Förbättrad nedströmspassage för vild laxfisk i Klarälven

Larry Greenberg, Daniel Nyqvist, Eva Bergman, Olle Calles

Naturresurs rinnande vatten, Biologi, Karlstads universitet, Karlstad, Sverige

Projektets finansiering

Projektet som redovisas i denna rapport har kostat 8,8 miljoner kronor och tog 5 år att genomföras. Det finansierades till största del genom R & D medel från Fortum Generation AB (32 %) och bidrag från Fortums miljöfond genom försäljning av el märkt med Bra Miljöval (32 %). Karlstad universitet bidrog som utförare med en mindre del av projektets kostnader genom egenfinansiering (13 %). Länsstyrelsen i Värmland finansierade genomförandet under projektets första två åren genom Interregprojektet ”Vänerlaxens fria gång” (till ett värde motsvarande ungefär 23 % av projekts totala budget).

Sammanfattning

I dag finns inga fria vandringsvägar mellan Vänern och de i Klarälven och Trysilelva återstående lek- och uppväxtområdena för sjövandrande lax och öring. För att upprätthålla dessa populationer bedrivs kompensationsodling parallellt med transport av lekfisk förbi de åtta nederst belägna kraftverken i Klarälven, vilket ger de transporterade fiskarna tillgång till 150 km av älven mellan Edsforsens och Höljes kraftverk. Huvudsyftet med studierna som redovisas i denna rapport har varit att öka möjligheterna för den vildproducerade smolten och den utlekta fisken att överleva nedströmsvandringen från Klarälven till Vänern. Detta har vi gjort genom att dels utföra en serie ekologiskt inriktade studier av nedströmsvandring hos kelt och smolt och dels genom att identifiera och utvärdera olika möjliga åtgärder vid Edsforsens kraftverk.

Under 2011-2014 studerade vi den utlekta laxens och öringens nedströmvandring i Klarälven med hjälp av radiotelemetri. Under dessa år, överlevde mellan 38 och 59 % (medelvärdet för 3 år: 47 %) av de radiomärkta vildlaxarna leken och inledde sin nedströmsvandring. De vandrade under höst och vår, och honor vandrade i högre grad nedströms under våren medan hanarna visade olika mönster under olika år. Av laxen som nådde Edsforsen, det första hindret för nedströmsvandrande fiskar, varierade passagetiden från 10 minuter till 50 dagar (median 25-30 minuter). När laxen närmade sig intagsgallret fanns de huvudsakligen nära ytan. Totalt klarade 81 % av laxen passagen förbi Edsforsen under 2011-2013 och 41 % under 2013-14, men bara en av dessa individer nådde Vänern under dessa 3 år (2 %). Dessa resultat tyder på att spill har stor betydelse för keltens passage, eftersom passageframgång vid Edsforsen var ca dubbel så högt när spillet motsvarade 51 % av det totala flödet (2011-13) jämfört med när spillet motsvarade 20 % av det totala flödet (2013-14). Turbindödligheten var hög (62 % under 2013-14) och en betydligt större andel av laxarna passerade genom turbinerna när spillet var lågt (2013-14). Vad gäller öringen överlevde sammanlagt 43 % leken och inledde sin nedströmsvandring, 75 % på hösten och 25 % på våren. Passagetiden vid Edsforsen sträckte sig från 11 min till 12,4 dagar (median = 32,6 timmar) och 8 % av öringarna nådde Vänern efter att ha passerat alla åtta vattenkraftverk.

Syftet med studien i Winooski River, USA var att utvärdera några enkla åtgärder för nedströmspassage med en metod som gav relativt detaljerad information om laxsmoltens vandringsbeteende. Studien visade att odlad och vild laxsmolt hade i det närmaste en identisk vandringsframgång genom älvsystemet – dvs. överlevnad i samband vid utsättning, vid vandring i fria älvssträckor och vid de tre kraftverkspassagerna. Av de laxar som inledde nedströmsvandring nådde 10 % sjön. Däremot påverkade tidpunkten för smoltutsättningar hur stor andel av de utsatta laxarna som vandrade nedströms. Detaljstudien vid Essex-dammen (överst belägna kraftverket) visade att av smolten som anlände till Essex lyckades bara 65 % passera. Det var fler laxar som passerade via bypassen (33 %) än via spill (18 %) och turbiner (15 %), men passageframgången var inte högre via bypassen än via någon av de andra passagevägarna. Faktum är att 35 % av laxarna inte passerade Essex alls, vilket visar att fiskpassage beror på mer än vägval och passageöverlevnad. Dessutom visar den låga passageframgången vid Essex att det inte räcker med att bygga fiskvägar för att den vandrande fisken ska använda dem.

Med hjälp av en matematisk modell beräknades mortalitet vid turbinpassage för nedströmsvandrande fisk vid alla kraftverksdammar i Klarälven. Modellen bygger på olika egenskaper hos turbiner och kördes för olika storlekar av smolt (11, 14, 17, 20 och 23 cm) och kelt (74 cm) vid

olika turbinbelastningar och turbintyper. Som väntat ökade mortaliteten med ökad fiskstorlek oavsett turbintyp. Beräkningarna för Kaplanturbinerna visade att smolt- och keltmortalitet är ungefär densamma för samtliga Kaplanturbiner i Klarälven. Beroende på fiskstorlek och belastning på turbinen (räknat för 50-100%) varierade mortalitetsvärdena mellan 3-9 % för smolt och 18-27 % för kelt. Att värdena ligger så nära varandra beror på att egenskaperna hos de olika turbinerna är relativt lika. Mortaliteten för den enda Francisturbin som finns i älven (vid Dejefors) visar på en högre mortalitet hos både smolt (5-20 %) och kelt (30-66 %) vid samma belastningar (dvs. mellan 50 och 100 % belastning) jämfört med Kaplanturbinen.

Utifrån våra ekologiska studier (del 1 i rapporten) kan vi konstatera att förlusterna för nedströmsvandrande smolt och kelt är höga eftersom fiskarna måste simma förbi åtta kraftverksdammar. Frågan blir då om, och på vilket sätt, vi kan skapa en långsiktig och effektiv lösning för att åstadkomma lyckad nedströmsvandring för en hög andel av laxartade fiskar från lek- och uppväxtområdena i den svenska delen av övre Klarälven till Vänern. Huvudsyftet med del 2 i rapporten handlar om att identifiera och att presentera åtgärdsförslag för att förbättra förutsättningarna för smolt och kelt att överleva nedströmsvandringen från Klarälven till Vänern. Fokus för åtgärdsarbetet med nedströmspassage ligger på Edsforsens kraftverk, det första hindret för nedströmsvandrande fisk, även om det troligen kommer att behöva ytterligare åtgärder och ändrade rutiner vid andra kraftverk.

I en första fas beskrevs åtgärdsalternativ som utgjordes av fyra olika typer av avledare med avsikt att leda fisken till en eller flera flyktöppningar och därefter vidare till en uppsamlingsenhet för transport nedströms. Avledaralternativen bestod av två låglutande β-galler som leder fisken mot ena sidan (i sidled), ett α-galler som leder fisken mot ytan (i höjdled), och en ytligt placerad läns. Den ytligt placerade länsen avfärdades på ett tidigt stadium, eftersom dess förväntade funktion bedömdes osäker. De tre beskrivna gallertyperna har låg lutning och stor yta för att minska risken för att fisk kläms fast och för att effektivt leda fisken längs gallret mot en eller flera passager. Flera åtgärdsaspekter analyserades gemensamt för de tre exemplen på fysiska avledaralternativ, t.ex. spaltvidd, flyktöppningar och förbipassage, avvattning, sortering och hantering. Åtgärdsalternativen har därefter beskrivits och värderats ytterligare av teknisk expertis, vilket uppmärksammade potentiella problem med såväl hydrauliska som driftsrelaterade aspekter av åtgärdsförslagen. Till följd av detta nedprioriterades även α-avledaren och endast de två varianterna av β-galler kvarstod.

I en andra fas förbättrades utformningen av de två återstående åtgärdsalternativen, β-avledare och dubbel β-avledare. Förbättringarna bestod främst i att intagens och gallrens dimensioner ändrades och utökades för att minska vattenhastigheterna och vattentrycket över gallret. Dessutom förbättrades inströmningsförhållandena genom att komplettera designen med utökade strukturer i kraftverksdammen. Slutligen förlades samtliga alternativ till flyktrännor (passager) utanför kraftverksbyggnaden.

Det råder inget tvivel om att det finns ett behov att få till stånd en förbättrad och mer effektiv nedströmspassage i Klarälven, speciellt med tanke på det höga naturvärdet av att ha ett förhållandevis stort bestånd av en relativt unik sjövandrande laxfiskpopulation. På kort sikt åstadkoms en ökad överlevnad bland nedströmsvandrande fisk lämpligen genom att fisken leds av från Edsforsens turbinintag och samlas upp för transport förbi kraftverken och utsättning nedströms Forshaga kraftverk. Eftersom det finns ytterst få exempel på avledare vid kraftverk av Edsforsens

storlek och geografiska placering, är samtliga åtgärdsalternativ att betrakta som experimentella och kommer kräva utvärderingar och modifieringar under en försöksperiod som bör spänna över flera år.

Introduktion

Idag finns det inga fria vandringsvägar mellan Vänern och de återstående lek- och uppväxtområdena för sjövandrande lax och öring i Klarälven och Trysilelva. För att upprätthålla dessa populationer bedriver man idag dels kompensationsodling och dels transport av lekfisk. Uppvandrande lekfisk fångas i Forshaga (det mest nedströms belägna kraftverket) och transporteras förbi de åtta nederst belägna kraftverken i Klarälven, vilket ger fisken tillgång till 150 km av älven mellan Edsforsens och Höljes kraftverk. Det finns inga passagelösningar för nedströmsvandrande fisk vid något av de åtta kraftverk som utlekt fisk och deras avkomma ska passera för att nå Vänern. Syftet med de studier vi redovisar i denna rapport har varit att öka möjligheterna för den vildproducerade laxen, både vad gäller smolten och den utlekta fisken (även öring till viss mån) att överleva sin nedströmsvandring från Klarälven till Vänern. Därför har vi genomfört dels några olika ekologiskt inriktade studier om nedströmsvandring hos kelt och smolt och dels genom att identifiera och utvärdera olika möjliga åtgärder vid Edsforsens kraftverk.

Våra studier fokuserar på longitudinell konnektivitet för lax- och öring, vilket innebär att fisken, med mänsklig hjälp, ska ha möjlighet att förflytta sig mellan sina lek- och uppväxtområden i Klarälven och Vänern. Sedan länge har man på olika platser arbetat mycket med att bygga fiskvägar av olika slag, men tills ganska nyligen fanns ett ganska ensidigt fokus på uppströmspassage för lekmogen fisk. Idag är man medveten om att både uppströms- och nedströmsvandringen är viktig och flera studier inriktar sig på att tydliggöra behovet av fungerande nedströmspassager men också på en utvärdering av genomförda åtgärder för att förbättra nedströmspassage (Calles et al. 2013). På motsvarande sätt börjar man idag tydligare uppmärksamma att inte bara smolten behöver ha en hög vandringsframgång i sin nedströmsvandring, utan det gäller även de utlekta fiskarna (kelt/besor).

I vår studie om på keltens (den utlekta fiskens) nedströmsvandring, ligger ett fokus på att undersöka keltens beteende, dvs. hur fisken rör sig framför kraftverket, i vilken utsträckning passerar fisken via turbinerna och i vilken utsträckning passerar de via spillet. Ett annat fokus är att få ett mått på den totala vandringsframgången för nedströmsvandrande kelt. Ur ett populationsekologiskt perspektiv är kelten viktig eftersom lekfisk som leker fler än en gång bidrar väsentligt till populationstillväxten. I studien som behandlar smoltens nedströmsvandring ligger fokus på att utvärdera några enklare åtgärder som genomförts för att underlätta nedströmsvandring. Ett ytterligare fokus var att genomföra utvärderingen med en nyare metod som ger högre detaljupplösning vad gäller smoltens beteende framför kraftverket än vad vi tidigare arbetat med. Även i denna delstudie har vi mätt beteende framför kraftverk samt total vandringsframgång genom hela flodsystem förbi flera kraftverk. En tredje studie vi genomfört är en uppskattning av turbinmortalitet hos både smolt och kelt vid alla kraftstationer i Klarälven. Detta är en teoretisk uppskattning av dödligheten när fisk passerar en turbin som baseras på en matematisk modell.

I vår utvärdering av olika potentiella åtgärder vid Edsforsen, det första hindret för nedströmsvandrande fiskar, har vi försökt ha en brett angreppssätt, där vi har tagit hänsyn till många möjliga åtgärder för att komma fram till vad som är bäst vid Edsforsen. Vi har utvärderat olika typer

av avledare. Dessutom har vi tittat på bästa sättet att fånga fiskarna för att sedan transportera dem vidare nedströms förbi alla kraftverksdammar mellan Edsforsen och Forshaga.

Föreliggande rapport består av två större separata delar, dels är det resultaten från de olika biologiska undersökningarna som genomförts och dels är det resultat från arbetet med att ta fram några alternativa åtgärdsförslag för att förbättra nedströmspassagen vid Edsforsens kraftverk. Därtill finns fem publicerade vetenskapliga arbeten samt Daniel Nyqvists doktorsavhandling, som vi valt att inte inkludera i rapporten, utan detta material finns tillgängligt utanför. Del 1, de biologiska undersökningarna, rapporteras under titeln ”Laxfiskars beteende och passagemöjligheter i reglerade vattendrag” och består av fyra delkapitel: ”Keltens nedströmsvandring”, ”Smoltens nedströmsvandring”, ”Turbinmortalitet hos kelt och smolt” och ”Diskussion och slutsatser”. Del 2, åtgärdsförslagen, rapporteras under titeln ” Åtgärdsförslag för förbättrad nedströmspassage vid Edsforsens kraftstation i Klarälven” och är en detaljerad rapportering av situationen och möjligheterna kring Edsforsens kraftverk. Den är så pass omfattande att vi i denna del har valt att inkludera en egen innehållsförteckning.

Del 1

Laxfiskars beteende och passagemöjligheter vid nedströmsvandring i reglerade vattendrag

Larry Greenberg, Daniel Nyqvist, Olle Calles, Eva Bergman

Naturresurs rinnande vatten, Biologi, Karlstads universitet, Karlstad, Sverige

Keltens nedströmsvandring

I denna delstudie har vi följt keltens beteende, vägval och överlevnad under deras nedströmsvandring förbi åtta kraftverk i Klarälven. Vi har följt fisken hela vägen från Edsforsens kraftverk tills att den passerat Forshaga kraftverk, men vi har haft extra fokus på laxens beteende vid just Edsforsens kraftverk.

För att kunna designa en bra åtgärd krävs detaljkunskaper om vägvalet fisken gör när den närmar sig kraftverket, helst under olika flödessituationer. Två studier har redan gjorts på smoltens beteende i Klarälven, vilka visade att 16 - 29 % av smolten under två olika år med olika mycket spill klarade av att passera åtta kraftverksdammar mellan lekområdena uppströms Edsforsen och Vänern (Norrgård et al. 2013, Bergman & Norrgård 2015). Motsvarande kunskap om utlekta fiskar eller kelt/besor är bristfällig, och ingen vetenskaplig studie har gjorts på utlekt fisk i Klarälven tidigare. Om man kan lyckas få en större andel av den vildproducerade smolten och den utlekta fisken att överleva nedströmsvandringen till Vänern ökar möjligheten att stärka laxpopulationen i systemet ytterligare. Ökad överlevnad hos utlekt fisk medför att både *mängden lekfisk* och *andelen stor lekfisk med erfarenhet från tidigare lek* ökar, inklusive värdefulla stora honor med hög fekunditet (Calles & Greenberg 2009). Därför ville vi studera den utlekta fiskens beteende och vägval när de närmar sig Edsforsen samt mäta förlusterna och migrationsframgång när de simmar nedströms förbi de åtta kraftverken mot Vänern.

Hagelin et al. (2016) följde radiomärkta lekfiskar på deras lekvandring uppströms i Klarälven. Det är dessa fiskar som efter avslutad lek har ingått i föreliggande projekt (som delvis har redovisats i Greenberg et al. 2015). Här beskriver vi kortfattat förutsättningarna för lekfiskstudierna som har relevans för våra keltstudier. Totalt märktes 181 laxar och 28 öringar (Tabell 1). Fisken märktes mellan mitten av augusti till början av oktober 2011, mitten av juni till slutet av augusti 2012, samt mitten av juni 2013. Totalt sett varierade storleken på laxarna mellan 47 och 96 cm under de tre åren och för öring mellan 49 och 74 cm (Tabell 1). Det fanns några skillnader mellan åren som lekfiskstudierna utfördes. År 2011 jämfördes odlad och vild lax (Tabell 1). År 2012 studerades både vild öring och vild lax. Dessutom jämfördes vild lax som flyttades förbi Edsforsen tidigt på säsongen med vild lax som flyttades senare på säsongen. Det sista året, 2013, jämfördes tidigt och sent uppflyttade laxar. All fisk fångades i fiskfällan i Forshaga, märktes med externa radiosändare, längdmättes och kördes samma dag upp för utsättning ovan Edsforsen (Figur 1).

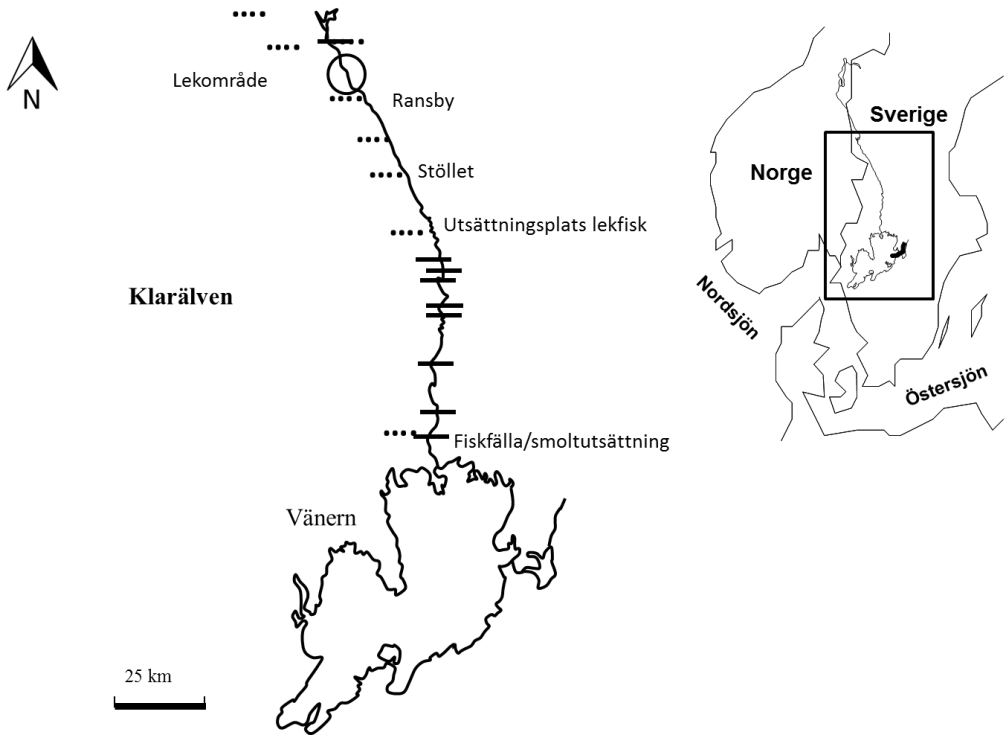
Tabell 1. Antal och längd (cm; medelvärde ± SD) på lekfisken som märktes de olika åren.

År		Öring	Vild lax	Odlad lax
2011	Antal Längd		34 sent 47-81 (72±7)	28 46-81 (66±9)
2012	Antal Längd	28 49-74 (60±7)	28 tidigt 33 sent 63-91 (75±6)	
2013	Antal Längd		29 tidigt 29 sent 50-96 (74±7)	

Vi följde den radiomärkta fisken efter leken för att undersöka hur de beter sig under nedströmsvandringen 2011-2014. Särskild vikt har lagts vid beteendet vid Edsforsens kraftverk,

eftersom det är det första kraftverket fisken möter under sin nedströmsvandring från lekplatserna. Vi har haft både stationära loggrar och pejlat manuellt i syfte att undersöka migrationsperioder, rörelsemönster vid kraftverket, uppehållstid och passageväg. Flera stationära loggrar placerades vid Edsforsen för att kunna beskriva keltens beteende vid dammen, särskilt vilken väg som de använde när de simmade förbi dammen. Under 2014 har vi också studerat fiskarnas beteende vid intagsgallren framför turbinerna vid Edsforsen med hjälp av akustisk sonar.

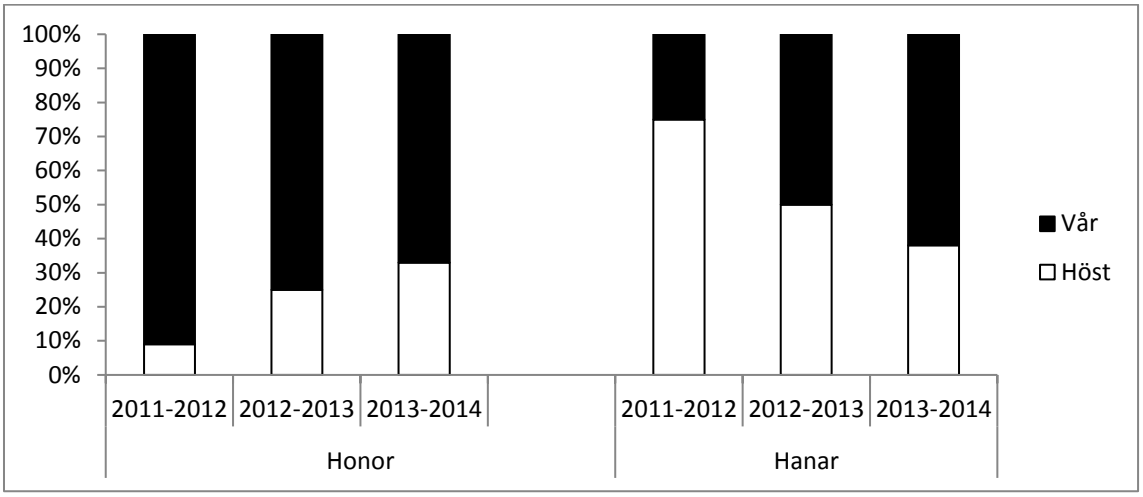
Vi har också följt fisken på deras fortsatta vandring mot Vänern och därmed kunnat kartlägga förlusterna och migrationsframgång förbi alla åtta kraftverksdammar, från Edsforsen till Forshaga (Figur 1). I telemetristudier följer man fiskens vandring genom att registrera varifrån sändarnas signaler kommer. Tekniken i sig, ger inga direkta svar på om t.ex. en fisk är död eller inte. Eftersom vi inte exakt vet vad som händer när en fisk som inte längre registreras vid loggerstationerna, har vi valt att använda termen *förlust* och *vandringsframgång* när vi beskriver vad som händer med fisken i studien. Termen *förlust* används när en fisk inte längre registreras av loggrarna, eller om en fisk vid upprepade tillfällen registreras i lugnflytande habitat med vegetation (i samband med manuell pejling), som normalt associeras med hög tillgång på predatorer. Termen *vandringsframgång* beskriver fisk som passerat en eller flera loggerstationer.



Figur 1. Karta över Klarälven och Vänern som visar kraftverksdammarna (feta streck) och placeringen av loggrarna (streckade linjer). Cirkeln visar det primära lekområdet för lax i huvudfåran.

Av den radiomärkta vilda laxen lekte sammanlagt 64 av 119 fiskar under 2011-13: 32 fiskar av 61 uppflyttade år 2012 och 32 fiskar av 58 uppflyttade år 2013. För perioden 2011-14 överlevde i genomsnitt 47 % leken (2011-12: 59 %, 2012-13: 38 %, 2013-14: 45 %) och inledde sin nedströmsvandring. Kelten migrerade nedströms under höst och vår men utan tydliga toppar. Under

2011-2012 skedde vandringen i oktober-november samt i mars-maj, under 2012-2013 i november samt i april-maj och slutligen under 2013-14 i november-december samt i april-maj. Honor vandrade i högre grad nedströms under våren under alla 3 år medan situationen för hanarna var mindre entydig. Hanarna vandrade i högre grad nedströms på hösten än på våren under 2011-12, lika mycket på höst och vår under 2012-13 och i större grad på våren än hösten under 2013-14 (Figur 2).

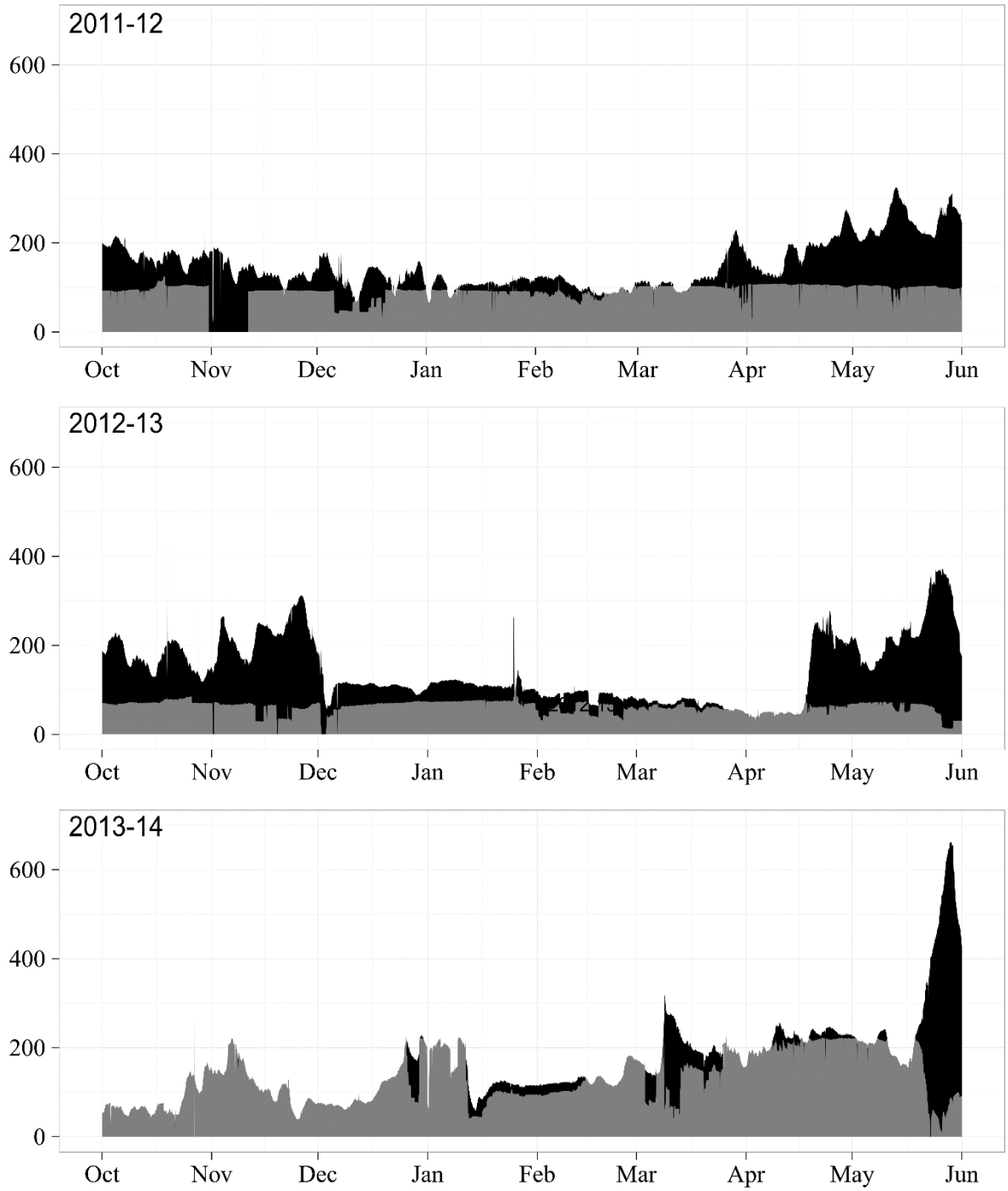


Figur 2. Vandringsperiod för lax uppdelad för kön under höst och vår 2011-2014. Staplarna baseras på följande antal fiskar: 2011-12: 12 honor och 8 hanar; 2012-13: 8 honor och 4 hanar; 2013-14: 9 honor och 8 hanar.

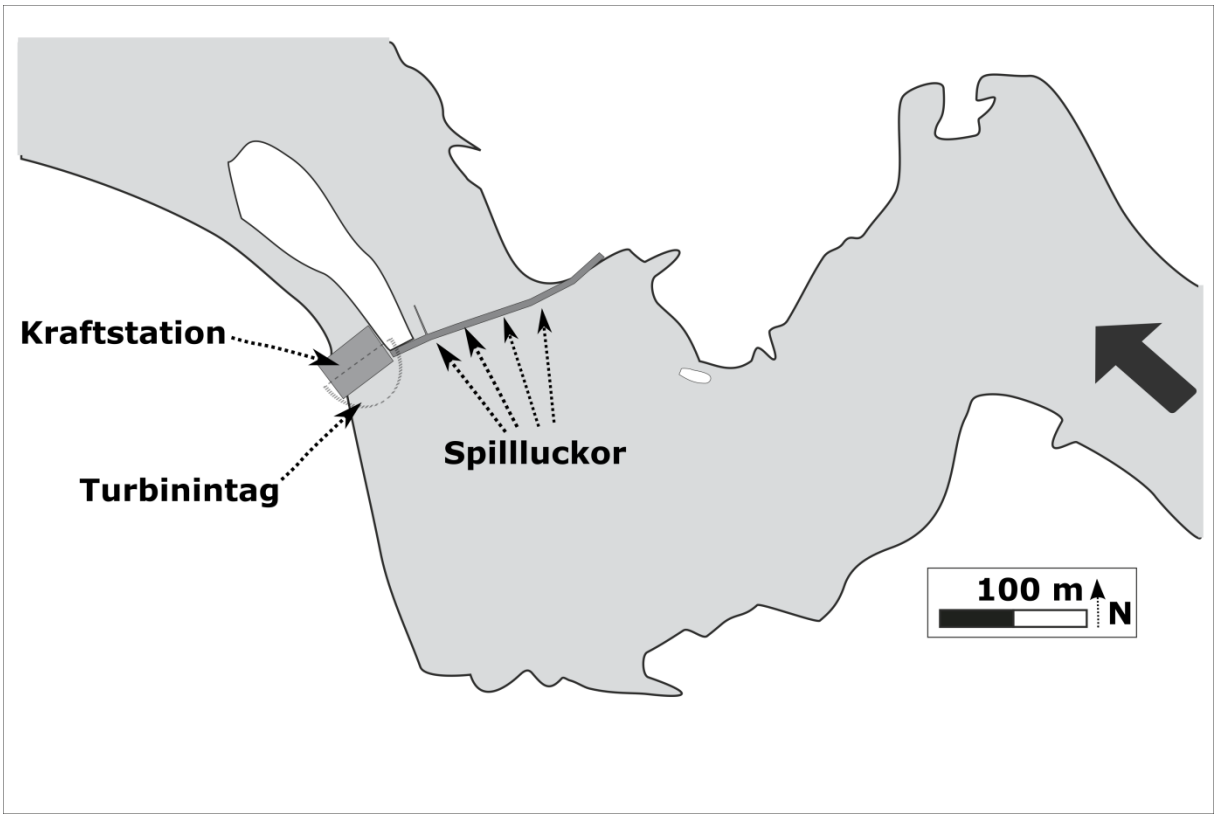
Av laxen som nådde och passerade Edsforsen tog det 25 minuter (medianvärde) under 2011-13 och 30 minuter (medianvärde) under 2013-14. Dock varierade passagetiden mellan 10 minuter och 50 dagar under dessa tre år. Observationer baserade på akustisk sonar visade att kelten i huvudsak var ytorienterad framför intagsgallret. Dessutom observerade vi, utifrån radiotelemetri data från 2014, att fiskarna kunde närma sig turbinintaget mellan 1 och 17 gånger innan de bestämde sig om de skulle simma igenom turbinerna eller inte.

Under 2011-13 spilldes det vatten vid Edsforsen > 98 % av tiden då keltvandringen skedde och i genomsnitt spilldes 51 % av det totala flödet (Figur 3). Totalt lyckades 81 % av kelten med vandringen förbi Edsforsen under 2011-13. Under dessa år skedde 84 % av passagerna via de bottentappade spilluckorna och 16 % via turbinerna (Figur 4). Under 2013-14 spilldes vatten vid Edsforsen 43 % av tiden, vilket motsvarade i genomsnitt 20 % av älvens totala flöde. Totalt klarade 41 % av kelten vandringen förbi Edsforsen. De flesta (87 %, 13 av 15) passerade via turbiner, där förlusten var hög (62 %). Två fiskar (13 %) passerade dammen via spilluckorna. Dessa resultat tyder på att spill har stor betydelse för passage. Under åren (2011-13) då spillet var högt i förhållandet till det totala flödet klarade 81 % av kelten vandringen förbi Edsforsen medan året (2013-14) då spillet var betydligt mindre, klarade bara 41 % av kelten och de flesta dog i turbinerna.

Ingen av de nedströmsvandrande fiskarna som lekt nådde Vänern under 2011-2013 medan en fisk simmade nedströms Forshaga under våren 2014 (Tabell 2). Med andra ord, under de tre studerade åren lyckades 2 % av kelten simma förbi samtliga åtta vattenkraftsdammar och fortsätta sin vandring mot Vänern.



Figur 3. Vattenflödet i Edsforsen genom turbinerna (ljusgrått) och via spill (mörkgrått) från september 2011 till juli 2013.



Figur 4. Karta över området kring Edsforsen kraftverk i Klarälven, som visar turbinintagen och spilluckorna (6 stycken).

Tolv av de 28 märkta öringarna överlevde leken och inledde sin nedströmsvandring, 75 % vandrade under hösten (5 honor och 4 hanar) och 25 % under våren (2 honor och 1 hane). Passagetiden vid Edsforsen sträckte sig från 11 min till 12,4 dagar (median 32,6 h). Det spilldes vatten vid Edsforsen under nästan hela migrationsperioden då åtta öringar passerade via spill och fyra via turbinen. En öring dog vid passagen (via turbin). Totalt nådde en av de 12 öringarna som lekte Vänern efter att ha passerat åtta vattenkraftverk (Tabell 3).

Tabell 2. Vildlaxens nedströmsvandring i kraftverkssystemet. Både antal lax som nådde fram till de olika kraftverken och antal förlorade vid varje kraftverk för de tre åren anges, liksom den ackumulerade överlevnaden.

	2011-2012	**2012-2013**	**2013-2014**	**Totalt (2011-2014)**	**Totalt (2011-2014)**	**Totalt (2011-2014)**
	Till Krv (Förlorade) (N)	**Till Krv (Förlorade) (N)**	**Till Krv (Förlorade) (N)**	**Till Krv (Förlorade) (N)**	**Överlevnad (%)**	**Ack. över-levnad (%)**
Edsforsen	19 (4)	12 (1)	19(10)	50 (15)	70 %	70 %
Skoga	15 (8)	11 (3)	7(3)	33 (14)	58 %	38 %
Krakerud	7 (2)	8 (3)	4(0)	19 (5)	74 %	28 %
Forshult	5 (2)	5 (3)	4(2)	14 (7)	50 %	14 %
Skymnäs	1 (0)	2 (0)	2(0)	5 (0)	100 %	14 %
Munkfors	1 (1)	2 (0)	1(0)	4 (1)	75 %	6 %
Deje	-	2 (1)	1(0)	3 (1)	67 %	4 %
Forshaga	-	1 (1)	1(0)	2 (1)	50 %	2 %

Tabell 3. Öringens nedströmsvandring i kraftverkssystemet.

	Till Krv (N)	Förlorade (N)	Överlevnad (%)	Ackumulerad Överlevnad (%)
Edsforsen	12	1	92 %	92 %
Skoga	11	2	82 %	75 %
Krakerud	9	2	78 %	58 %
Forshult	**7**	3	57 %	33 %
Skymnäs	4	0	100 %	33 %
Munkfors	4	1	75 %	25 %
Deje	3	2	33 %	8 %
Forshaga	1	0	100 %	8 %
Vänern	1			

Betydelsen av laxartade fiskar som leker mer än en gång under sina liv har börjat få mycket uppmärksamhet. Dessa stora fiskar med hög fekunditet kan ha stor betydelse för en population (Fleming 1996, 1998; Halttunen 2011). De betraktas också som viktiga genetiskt sett (Saunders & Schom 1985) och bidrar till en populations stabilitet (Schindler et al. 2010) och produktivitet (Halttunen 2011). I en tidigare studie av lax från Vänern som baserades på fjällanalyser uppskattades antalet laxar som lekte mer än en gång till 3 av 65 fiskar, eller ca 5 % (Hållén 2008). Denna siffra är något högre jämfört med vårt resultat som visade att 2 % överlevde nedströmsvandringen. Med tanke på att en viss mortalitet bör förekomma i Vänern, blir skillnaden mellan vår studie och Hållén (2008) ännu större. Dock kan Hållén (2008) mycket väl innehålla fiskar som inte transporterats uppströms utan lekt nedströms Forshaga (förmodat utan framgång) innan de vandrat tillbaka ut i Vänern. Vår motsvarande siffra för återlek för öring var 8 %.

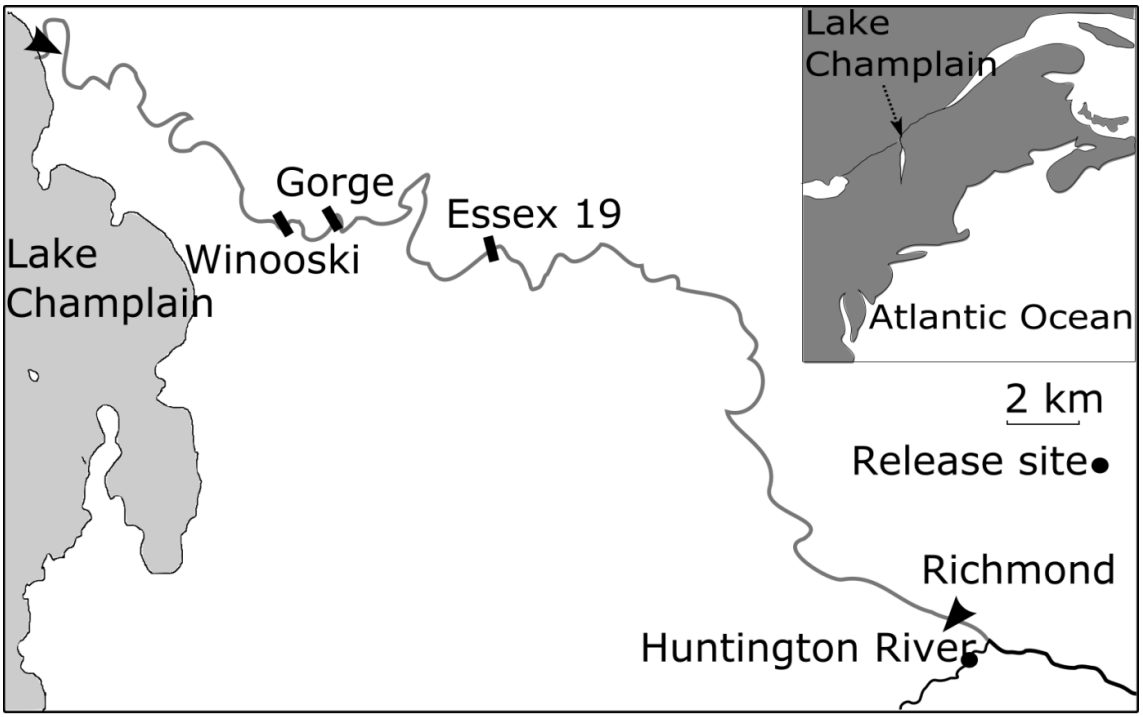
Återleksfrekvensen varierar stort bland olika populationer i världen, alltifrån några få procent (Ducharme 1969, Cuinat 1988, Jokikokko et al. 2006, Kjaransdóttir 2008) till en stor del av populationen (Ducharme 1969, Hedger et al. 1969, Halttunen 2011). Återleksfrekvensen i Klarälven är för närvarande väldigt låg och dessa fiskar lär inte bidra särskilt mycket till populationen. För att öka återleksfrekvensen krävs det åtgärder för att öka överlevnaden hos kelt. Sådana åtgärder undersöks i denna rapport, med fokus på att bygga en avledare och fångstanläggning vid Edsforsen, för att sedan transportera fiskarna nedströms förbi alla kraftverk.

Utförligare beskrivningar av studien i Klarälven kan läsas i Daniel Nyqvist avhandling ”*Atlantic salmon in regulated rivers: Migration, dam passage, and fish behavior”* samt i de vetenskapliga uppsatserna ”Post-spawning survival and downstream passage of landlocked Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a regulated river: Is there potential for repeat spawning?” och “Intake approach and dam passage by downstream-migrating Atlantic salmon kelts” av Nyqvist med flera.

Smoltens nedströmsvandring

Denna delstudie har vi genomfört i Winooski River i Vermont, USA. Fiskarna som studerades kom från en, precis som i Klarälven, sjövandrande laxstam som har flera kraftverk att passera på sin nedströmsvandring ut till sjön (Lake Champlain). Vi har följt smoltens beteende, vägval och överlevnad under deras nedströmsvandring förbi tre kraftverk, och vi har haft extra fokus på smoltens beteende vid den mest uppströms liggande kraftverket, Essex 19. Att genomföra denna smoltvandringsstudie i USA gav oss möjlighet att använda en annan teknik/metodik som givit mer nyanserad information om smoltbeteenden vid kraftverkspassagen än vad vi klarat av tidigare i svenska studier i Klarälven.

En åtgärd för nedströmsvandrande fisk måste ta hänsyn till både kelt och smolt. Flera studier har redan gjorts på laxsmoltens beteende under vandring med fokus på passage. Dock finns det inte mycket studier på sjövandrande populationer, särskilt inte i system där passageåtgärder finns. Här presenterar vi resultat för smolt i en sjövandrande Atlantlax-population i USA. Syftet med studien var att utvärdera enkla åtgärder för nedströmspassage, men också att lära oss en ny analysmetod, time-to-event-analys, för att kunna göra en mer nyanserad analys av passagedata.



Figur 5. Karta över Winooski River med de tre kraftverkdammarna (Winooski, Gorge och Essex 19) och utsättningsplatsen i biflödet Huntington River. Det fanns radiologgrar vid varje kraftverk samt för övervakning av initiering av nedströmsvandring samt framgångsrik ankomst till sjön (pilar).

Lake Champlain är belägen i nordöstra USA och Quebec, Kanada och hyste historiskt flera populationer av sjövandrande lax. Laxen utrotades från älven under slutet av 1800-talet och nu försöker man återintroducera den. I kombination med dammutrivning och fiskpassageåtgärder sätts varje år tusentals odlade yngel och smolt ut, både i sjön och i flera av biflödena. I samarbete med US Geological Survey, US Fish and Wildlife Services och Fish and Wildlife Vermont studerade vi

smoltbeteende och nedströmspassage för både vild och odlad smolt i Winooski River, ett biflöde till Lake Champlain.

I Winooski River (Figur 5) skiljer tre kraftverksdammar laxens lek- och uppväxtområden från sjön. Uppströmsvandrande laxar fångas i en fälla vid det nedersta kraftverket och, precis som i Klarälven, transporteras med lastbil förbi de tre kraftverken. För nedströmsvandrande fisk, finns enkla bypass-lösningar. Lösningarna består av ett eller två hål i, eller i anslutning till, ett ytligt fint intagsgaller.

Under studien märkte vi vild (n=21) och odlad (n = 60) smolt. De vilda fiskarna radiomärktes, och släpptes ut i älven allt eftersom de fångades (8 maj – 5 juni) i en skruvfälla medan de odlade smolten märktes vid tre tillfällen (6, 12 och 15 maj). Vi studerade sedan den märkta fiskens nedströmsvandring och dammpassage, med särskild fokus på beteendet uppströms Essex, dvs den mest uppströms belägna dammen (Figur 6).

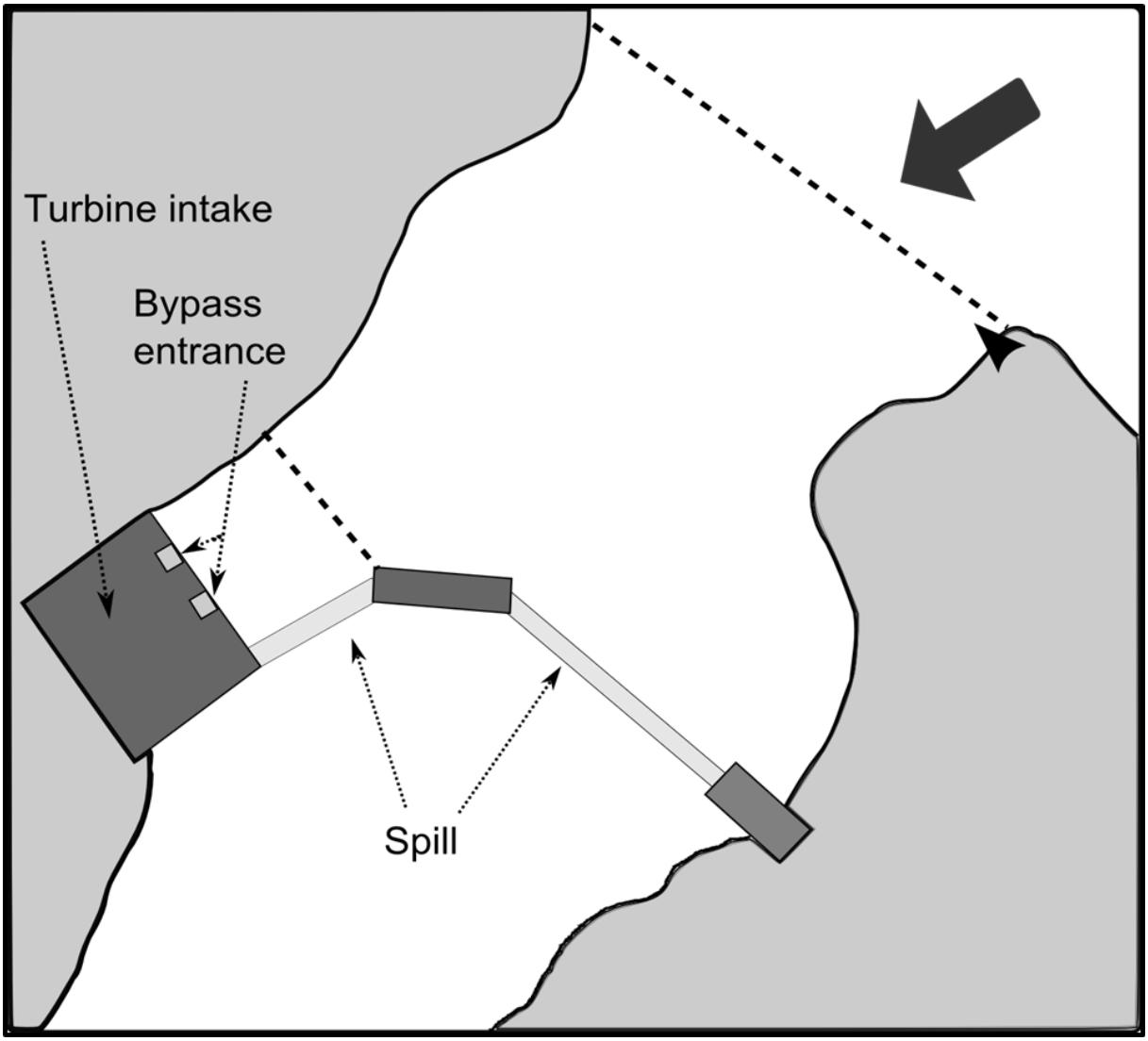


Figure 6. Essex dammen, den första dammen smolten möter under sin nedströmsvandring. De tre passagevägarna utgörs av by-pass-, spill- och turbinpassage.

Odlad smolt som var utsatt tidigt vandrande nedströms i högre grad och efter kortare tid från utsättning än odlad smolt som var utsatt sent. En liknande, men ej statistisk signifikant, tendens fanns även hos den vilda fisken. Odlad och vild fisk hade i det närmaste identisk vandringsframgång

på sin nedströmsvandring genom älvsystemet – dvs. från utsättning uppströms Essexdamm, vandring i fria älvssträckor samt de tre kraftverkspassagerna. Av de fiskar som inledde nedströmsvandring nådde 10 % sjön (Figur 7).

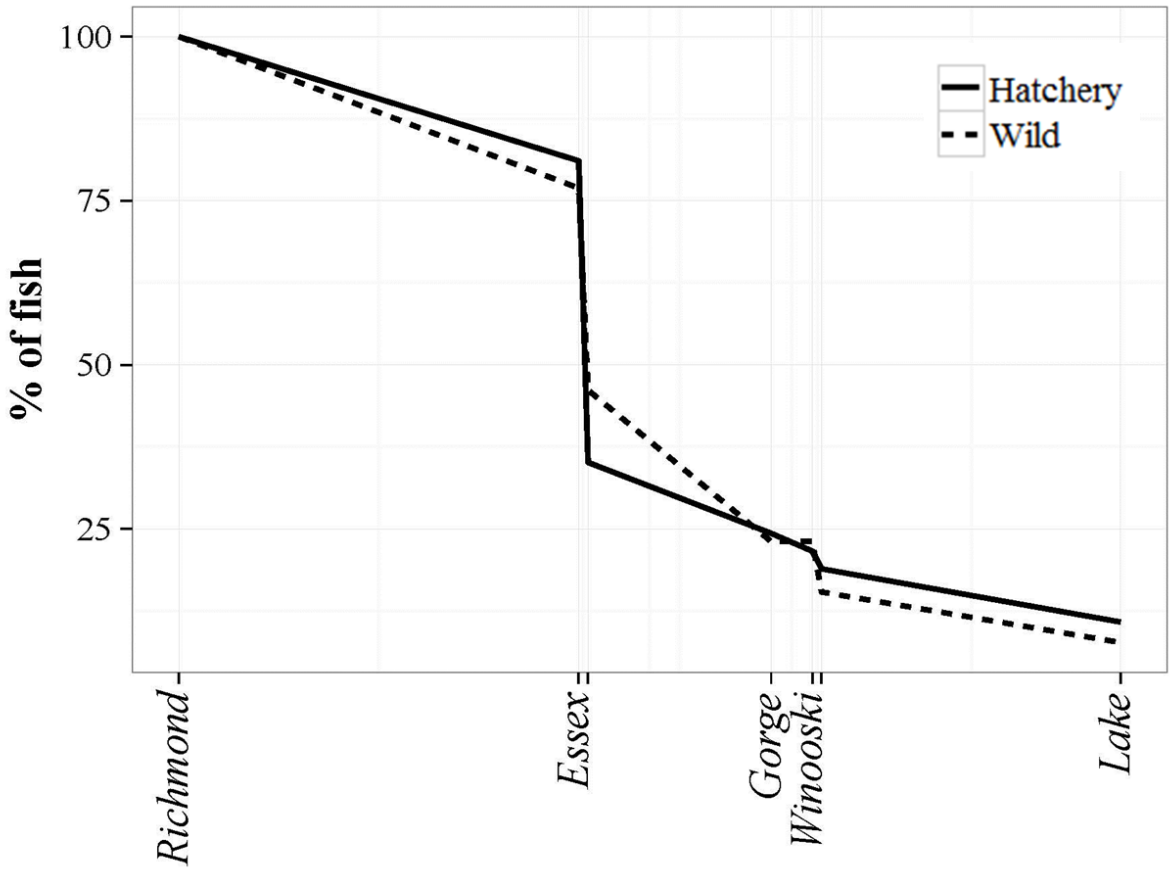


Figure 7. Vandringsframgång för vild (sträckad linje) och odlad (heldragen linje) fisk på nedströmsvandringen mot Lake Champlain. X-axeln motsvarar älvkilometer och kraftverksdammarna är markerade med namn.

Både spill och passageframgång varierade mellan de tre dammarna. Passageframgången var högst, smoltens uppehållstid var kortast och spill-nivåerna var högst vid den mellersta dammen (Gorge). Passageframgång och uppehållstid var lägst vid den översta dammen (Essex). Vid Essex, till skillnad från de andra två kraftverken, fanns inget krav på kontinuerligt spill vilket resulterade i långa tider utan spill.

Av de märkta smolten som anlände till Essex passerade 65 %. Fler fiskar passerade via bypassen (33 %) än via spillet (18 %) och turbinerna (15 %) men passageframgången var inte högre via bypassen än via någon av de andra passagevägarna (Figur 8). Smolt närmade sig dammen, turbinintaget och ingången till bypassen upprepade gånger. Vi såg positiva samband mellan flödet och ankomst till turbinintaget, passage och uppehållstiden i dammområdet.

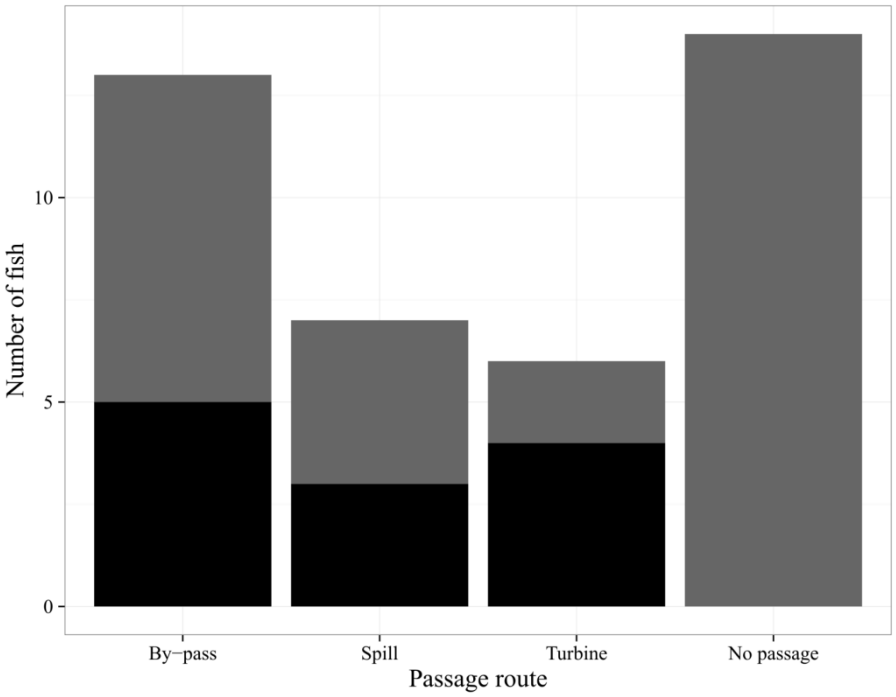


Figure 8. Antal fisk vid Essex fördelade på passageväg (by-pass, spill och turbin) och icke-passage. Även överlevnad och fortsatt nedströmsvandring (svart) och förlust/mortalitet (grått) är markerat.

Vår studie i Winooski River visar att tidpunkten för smoltutsättningar påverkar hur stor andel av de utsatta fiskarna som vandrar nedströms. Vi fann också att icke-passage kan vara lika betydelsefullt som passagedödlighet när det kommer till misslyckad nedströmsvandring. Dessutom visade den låga passageframgången vid Essex, där vi tydligt kunde kartlägga de olika passagevägarna, att det inte räcker med att bygga fiskvägar för att den vandrande fisken ska använda dem. Således fungerade inte dessa bypass-lösningar, bestående av ett eller två hål i, eller i anslutning till, ett ytligt fingaller, på ett tillfredsställande sätt.

Utförligare beskrivningar av studien i Winooski River kan läsas i Daniel Nyqvist avhandling ”*Atlantic salmon in regulated rivers: Migration, dam passage, and fish behavior”* samt i de vetenskapliga uppsatserna ”Migratory delay leads to reduced passage success of *Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam”* och *”Downstream migration and multiple dam passage by Atlantic salmon smolts”* av Nyqvist med flera.

Turbinmortalitet hos kelt och smolt

Denna delstudie är en teoretisk skattning av turbinmortaliteten hos både smolt och kelt vid alla kraftstationerna i Klarälven.

Information om turbinmortalitet vid kraftstationer är viktig kunskap när man planerar passageåtgärder (Tabell 4). Med hjälp av en matematisk modell är mortaliteten vid turbinpassage beräknad för nedströmsvandrande fisk i Klarälven (Stålerud och Bard 2015). Modellen bygger på olika egenskaper hos turbiner, så som varvtal, antal skovlar, löphjulsdiameter, navdiameter (Kaplan diameter) eller ledskenehöjd (Francisturbin) samt turbinens slukförmåga. Alla basdata om turbiner, förutom nävdiametrarna från samtliga Kaplanturbinerna och antalet löpskovlar på Francisturbinen, har erhållits av Fortum. Navdiametrarna har beräknats och antalet löpskovlar på Francisturbinen har antagits till 13. Alla värden på dessa egenskaper finns redovisade i rapporten av Stålered och Bard (2015).

Tabell 4. Lista på de åtta kraftverksdammarna, inkl turbintyp, information om smolt- och keltmortalitet vid 50 % - 100 % belastning. Qmax visar maximal slukförmåga hos varje turbin.

Damm	Antal turbiner	Turbintyp	Qmax (m3/s)	Mortalitet smolt	Mortalitet Kelt
Edsforsen	2	Kaplan	85	3-8 %	20-24 %
Skoga	2	Kaplan	90	3-9 %	21-27 %
Krakerud	2	Kaplan	110	3-7 %	20-24 %
Forshult	1	Kaplan	90	3-6 %	18-20 %
	1	Kaplan	120	3-6 %	18-21 %
Skymnäs	2	Kaplan	90	3-6 %	18-20 %
Munkfors	2	Kaplan	75	3-6 %	20-21 %
	1	Kaplan	85	3-6 %	19-21 %
Dejefors	1	H-Francis	36	5-20 %	30-66 %
	1	Kaplan	130	3-8 %	18-24 %
Forshaga	1	Kaplan	65	3-8 %	20-24 %

Beräkningarna gjordes för olika smoltstorlekar, i samma storleksintervall som den naturliga smolten har i älven (11, 14, 17, 20 och 23 cm) plus en storlek för kelt som var ungefär densamma som den genomsnittliga storleken av uppflyttade fiskar i våra tidigare studier (74 cm, Tabell 1). Modellen tar inte hänsyn till att kelten kanske inte kan passera turbinen på grund av grindarna framför turbinerna. Modellen kördes för olika belastningar på turbiner, 50-100% för Kaplanturbinerna och 25-100% för Francisturbinerna.

Tabell 5. Medeltalet för mortaliteten för respektive fisklängd. Medeltalet är baserat på samtliga kaplanturbiner och belastningar från 50 till 100 %, med ett intervall med 5 %.

Fisklängd (cm)	Medel Mortalitet (%)
11	3,2
14	4,1
17	5
20	5,8
23	6,7
74	21,6

Som väntat ökade mortaliteten med ökande fiskstorlek (Figur 9, Tabell 5). Mortaliteten jämfördes mellan de olika turbinerna för olika belastningar. Beräkningarna för Kaplanturbinerna visade att smolt- och keltmortalitet är ungefär det samma för samtliga Kaplanturbiner i Klarälven. Beroende på fiskstorlek och belastning på turbinen (räknat för 50-100%) låg mortalitetsvärden mellan 3 och 9 % för smolt och 18-27 % för kelt (Tabell 4). Att värdena ligger så nära varandra beror på att egenskaperna hos de olika turbinerna är relativt lika. Mortaliteten för fisk som passerar Francisturbinen vid Dejefors var som förväntat högre än för Kaplanturbinerna. Mortaliteten hos smolt låg på 5-20 % och för kelt 30-66 % vid samma belastning som redovisades för Kaplanturbinen (dvs. mellan 50 och 100 %). Mortaliteten var lägre vid hög belastning än vid låg belastning. Vid 25 % belastning låg mortalitet mellan 9 % (11 cm smolt) och 65 % (74 cm kelt) medan vid 100 % belastning låg värdena på 4,5 % för smolt och 30 % för kelt.

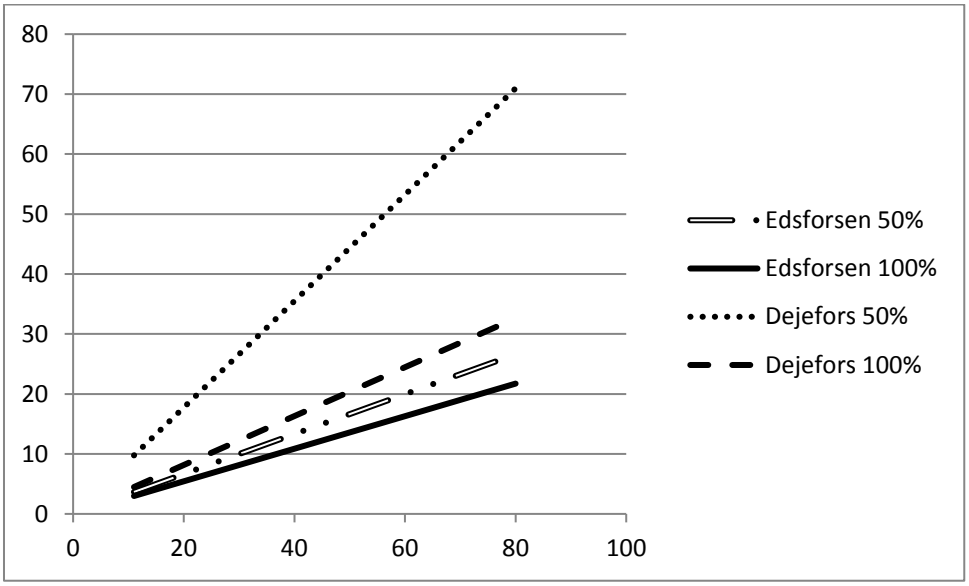


Fig. 9. Förhållandet mellan längd (cm, x-axeln) och mortalitet (%, y-axeln) för Kaplanturbinen vid Edsforsen och Francisturbinen vid Dejefors vid 50 % och 100 % belastning.

Diskussion och slutsatser

Huvudsyftet med de ekologiska studierna har varit att beskriva situationen för framför allt lax- och öringkeltens nedströmsvandring från lek- och uppväxtområden i Klarälven till födosöksområden i Vänern. Vi har inte studerat smolt eftersom tidigare studier av nedströmspassage i Klarälven och i andra vattendrag oftast har fokuserat på just smolt och inte kelt. Inom denna studie har extra fokus legat på att i detalj studera keltens beteende och överlevnad vid den första kraftverksdammen, Edsforsens kraftverk, som de möter under sin nedströmsvandring. Återlekande fiskar är av speciellt intresse (fiskar som leker mer än en gång under sina liv) eftersom de är stora, har hög fekunditet, och potentiellt stor betydelse för populationen (Fleming 1996, 1998; Halttunen 2011). De kan även vara viktiga för att bevara populationens genetiska diversitet (Saunders & Schom 1985) och kan bidra till en populations stabilitet över tiden (Schindler et al. 2010).

Våra studier av utlekta fiskar i Klarälven baseras på data som har samlats in under tre år (2011-2014) för lax och ett år (2012-2013) för öring. För båda arterna var det få individer som lyckades passera alla åtta kraftverksdammar. För lax var det 1 av 50 (2 %), och för öring 1 av 12 (8 %), som nådde tillbaka till Vänern. Andelen individer som passerade en enskild kraftverksdamm kunde vara hög men faktumet att de måste passera åtta kraftverksdammar resulterade i ett högt ackumulerat bortfall. Utifrån vår telemetri-data för lax ser vi att den genomsnittliga förlusten per damm är 32 % (mellan 0 och 50 % beroende på damm). Man får dock beakta resultaten för enskilda dammar med en viss försiktighet, eftersom antalet fiskar som når dammar längre nedströms i älven är väldigt få. Man kan även räkna fram att de 2 % som lyckades passera alla åtta kraftverksdammar motsvarar en 39 % förlust per damm, om förlusten är densamma för varje damm. Vi använde även en matematisk modell för att uppskatta dödligheten av en medelstorlek utlekt fisk (74 cm) vid turbinpassage. Passage via Kaplanturbin, resulterar enligt modellen i en mortalitet mellan 18 och 27 %. Detta förutsätter givitvis att fisken kan simma igenom intagsgallren framför turbinerna, vilket inte alltid är fallet. Man kan konstatera att förlusterna från modellen om turbinmortalitet är lägre än de förlusterna som vi ser baserad på våra telemetristudier, vilket indikera att det finns andra orsaker än turbinmortalitet till förlusterna (se nedan).

Inom detta projekt studerade vi inte smoltförluster i Klarälven bl a för att tidigare studier om smoltförluster har utförts i älven. Norrgård et al. (2012) fann att 16 % av smolten lyckades ta sig förbi alla åtta kraftverksdammar. Året som denna studie gjordes var flödet i älven lågt och inget vatten spilldes vid något kraftverk under stora delar av studieperioden. Smolten var alltså tvungna att passera via turbinerna för att ta sig förbi dammarna under nästan hela studien. Studien upprepades 2013, med ett visst spill, och då lyckades 29 % av smolten ta sig förbi alla åtta kraftverksdammar (Bergman & Norrgård 2015). Vid närmare analys såg man dock att den högre överlevnaden främst kunde härledas till Edsforsen damm, där väldigt mycket vatten spilldes. Enligt den matematiska modellen borde turbinmortalitet (Kaplanturbin) för smolt ligga mellan 3-9 % per damm. Det innebär att endast direkt turbinmortalitet inte kan förklara den totala förlusten på 84 % av smolten. En genomsnittlig turbinmortalitet av 5 % per damm skulle resultera i att 66 % av fiskarna skulle ha passerat alla dammar. Precis som för kelt tyder detta resultat på att det finns flera orsaker till förlusterna (se nästa stycke).

Vår studie om smoltförluster i USA visar att icke-passage kan vara lika betydelsefullt som passagedödlighet när det kommer till misslyckad nedströmsvandring. Cirka 35 % av fiskar passerade

inte Essexdammen i Winooski River medan 33 % passerade dammen via bypassen. Resultatet från Winooski River erbjuder en möjlig förklaring till varför smolt- och keltförlusterna i Klarälven var högre än vad man skulle förvänta utifrån turbinmortalitet. Det finns flera anledningar till att en fisk inte passerar en kraftverksdamm. Det kan handla om att fiskar ger upp efter många försök. Vi såg t ex att kelten kunde simma in i turbinintagsområdet vid Edsforsen upp till 17 gånger (2013-14) och att smolten kunde simma in i ”entry zone” i Essexdamm upp till 153 gånger. En annan orsak till icke-passage är predation. I Klarälven observerade vi att vissa fiskar slutade vandra och ställde sig i lugnflyttande, vegetationsrik område, vilket vi tolkar som att de har ätits av en predator. Vi vet att det finns gott om gäddor i Klarälven och maganalyser på gädda under smoltens vandringsperiod har visat att de kan äta mycket smolt (Norrgård 2014). Ytterligare en förklaring till förluster, och som även kan relatera till predationen, är att det kan uppstå skador när de har passerat dammar längre uppströms, som gör att de dör eller avbryter nedströmsvandringen (Budy et al. 2002, Ferguson 2006, Whitney et al. 2006).

Resultaten för både kelt och smolten visar att vandringsförlusterna för nedströmsvandrande fiskar i Klarälven är höga. Den låga vandringsframgången innebär att få fiskar leker flera gånger och behovet av åtgärder för att underlätta nedströmspassage är därmed stort. Framgångsrika åtgärder för nedströmspassage kan ha stora konsekvenser för populationens utveckling framöver. Våra studier vid Edsforsen, där vi i detalj har studerat situationen för nedströmsvandrande kelt, kan vara till hjälp för att designa åtgärderna.

En sak som är viktig att känna till när man planerar inför olika åtgärder är vid vilket djup fiskarna finns när de närmar sig dammen. Tidigare studier har visat att smolt ofta simmar ganska nära ytan (Coutant & Whitney 2000,Thorstad et al. 2012). Med hjälp av akustisk sonar observerade vi att även kelten oftast simmar nära ytan, vilket tidigare bara rapporterats från friströmmande vattendrag (Hubley et al. 2008, Halttunen 2009).

En annan aspekt att bejaka när man designar åtgärder är betydelsen av flödessituation vid dammen. Nedströmsvandrande laxartade fiskar simmar ofta med huvudflödet i ett vattendrag där de högsta vattenströmhastigheterna finns (Coutant & Whitney 2000, Thorstad et al. 2012). I Klarälven under ett år när spillet var relativt liten (2013-14), simmade 94 % kelten (16 av 17 individer) fram till turbinerna innan de valde vägen förbi dammen, antingen genom turbinerna eller via spill. Under de två andra åren (2011-13), när spillet var betydligt större (på grund av underhållsarbete vid turbinerna), simmade 38 % av kelten direkt till spilluckan och passerade dammen där. De övriga 62 % simmade, trots höga spillnivåer, först mot turbinintaget innan de valde vägen förbi dammen. Detta visar att de flesta kelten simmar mot turbinerna i första hand, även med mycket spill, vilket är bra om åtgärderna skall i första hand riktas mot turbinintaget. Men det indikerar också att det kan finnas ett behov av en sekundär åtgärd när mycket vatten spills.

Vid design av passageåtgärder är det också viktigt att känna till när fisken vandrar. Utifrån våra data från 2011-14 fann vi att kelt vandrade nedströms under ca hälften av året, från oktober-december samt från mars till maj. Tidigare studier av anadroma laxpopulationer har också visat att laxen vandrar nedströms på både våren och hösten (Jonsson et al. 1990, Halttunen 2013). Om man lägger till smoltutvandring, som sker huvudsakligen i maj och juni, men även till viss del i juli (Bergman et al. 2015), har vi en total utvandringsperiod på ca 8 månader. Det betyder att åtgärder riktade mot lax och öring måste fungera under en stor del av året.

Sammanfattningsvis visar våra studier att förlusterna för nedströmsvandrande fiskar i Klarälven är stora. Detta innebär att en långsiktig och väl fungerande åtgärd kan ha stor inverkan på lax- och öringpopulationens utveckling. Våra studier vid Edsforsen visar att kelten/besorna simmar nära ytan när de närmar sig Edsforsen kraftverk och att de flesta individer simmar mot turbinintaget. Denna värdefulla information har vi beaktat i Del 2 av rapporten, som handlar om att identifiera och utvärdera olika potentiella åtgärder, framför allt vid Edsforsens kraftverk.

Referenser

Bergman E, Norrgård J. 2015. Nedströmsvandring av vildfödd laxsmolt. I: *Vänerlaxens Fria Gång: Två Länder, en Älv*, Hedenskog M, Gustafsson P, Qvenild T (eds). Elanders Sverige AB, Mölnlycke, 136-143.

Bergman E, Greenberg L, Norrgård J, Piccolo J. 2015. Produktion of vildsmolt i Klarälven I: *Vänerlaxens Fria Gång: Två Länder, en Älv*, Hedenskog M, Gustafsson P, Qvenild T (eds). Elanders Sverige AB, Mölnlycke, 110-119.

Budy P, Thiede GP, Bouwes N, Petrosky CE, Schaller H. 2002. Evidence linking delayed mortality of Snake River salmon to their earlier hydrosystem experience. *North American Journal of Fisheries Management* 22: 35–51.

Calles O, Greenberg L. 2009. Connectivity is a two-way street- the need for a holistic approach to fish passage problems in regulated rivers. *River Research & Applications* 25: 1268-1286.

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*, 114 sidor.

Coutant CC, Whitney RR. 2000. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review. *Transactions of the American Fisheries Society* 129: 351-380.

Cuinat R. 1988. Atlantic salmon in an extensive French river system: the Loire-Allier. Atlantic Salmon: Planning for the Future. London: Croom Helm, 389-399.

Ducharme L. 1969. Atlantic salmon returning for their fifth and sixth consecutive spawning trips. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 26: 1661-1664.

Ferguson JW, Absolon RF, Carlson TJ, Sandford BP. 2006. Evidence of delayed mortality on juvenile Pacific salmon passing through turbines at Columbia River dams. *Transactions of the American Fisheries Society* 135: 139–150.

Fleming IA. 1996. Reproductive strategies of Atlantic salmon: ecology and evolution. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 6: 379-416.

Fleming IA. 1998. Pattern and variability in the breeding system of Atlantic salmon (*Salmo salar*), with comparisons to other salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55: 59-76.

Greenberg L, Bergman E, Nyqvist D, Calles O. 2015. Förbättrad nedströmspassage för vild laxfisk i Klarälven samt beteende hos utvandrande kelt (utlekt lax och öring). I: *Vänerlaxens Fria Gång: Två Länder, en Älv*, Hedenskog, M, Gustafsson, P, Qvenild, T (eds). Elanders Sverige AB, Mölnlycke, 214-226.

Hagelin A, Calles O, Greenberg L, Piccolo J, Bergman, E. 2016. Spawning migration of wild and supplementary stocked landlocked Atlantic salmon (*Salmo salar*). *River Research and Applications* 32: 382-389.

Hållen A. 2008. *Hur Stor Del av Vänerns Lax är Vild? En Undersökning av Andelen Vild respektiv Odlad Lax i Vänern*. Examensarbete, Zoologiska institutionen, Göteborgs universitet, 31 sidor.

Halttunen E. 2011. Staying Alive: *The Survival and Importance of Atlantic Salmon Post-Spawners*. Ph. D. dissertation. Universitetet i Tromsø, Norge.

Halttunen A. Jensen JLA, Naesje TF, Davidsen JG, Thorstad EB, Chittenden CM, Hamel S, Primicerio R, Rikardsen AH. 2013. State-dependent migratory timing of postspawned Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70: 1063-1071.

Halttunen A, Rikardsen AH, Davidsen JG, Thorstad EB, Dempson JB. 2009. Survival, migration speed and swmmingdepth of Atlantic salmon kelts during sea entry and fjord migration. *Tagging and Tracking of Marine Animals eith Electronic Devices*: 35-49.

Hedger RD, Hatin D, Dodson JJ, Martin F, Fournier D, Caron F, Whoriskey FG. 2009. Migration and swimming depth of Atlantic salmon kelts Salmo salar in coastal zone and marine habitats. *Marine Ecology Progress Series* 392: 179-92.

Hubley PB, Amiro PG, Gibson AJF, Lacroix GL, Redden AM. 2008. Survival and behaviour of migrating Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) kelts in river, estuarine, and coastal habitat. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 65: 1626-1634.

Jokikokko E, Kallio-Nyberg I, Jutila E, Saloniemi I. 2006. Effect of origin, sex and sea age of Atlantic salmon on their recapture rate after river ascent. *Journal of Applied Ichthyology* 22: 489-94.

Jonsson B, Jonsson N, Hansen LP. 1990. Partial segregation in the timing of migration of Atlantic salmon of different ages. *Animal Behaviour* 40: 313-321

Kjaransdóttir H. 2008. *Repeat Spawning of the Atlantic Salmon (Salmo salar) in Various Salmon Rivers in Iceland*. Agricultural University of Iceland. Borgames. 54.

Norrgård JR, Greenberg LA,Piccolo JJ, Schmitz M, Bergman E. 2013. Multiplicative loss of landlocked Atlantic salmon *Salar salar* L. smolts during downstream migration through multiple dams. *River Research and Applications*. 29: 1306-1317.

Nyqvist D, Bergman E, Calles O, Greenberg L. 2017. Intake approach and dam passage by landlocked Atlantic salmon kelts at a hydropower dam. *River Research and Applications* (early online).

Nyqvist D, Calles O, Bergman E, Hagelin A, Greenberg L. 2016. Post-spawning survival and downstream passage of landlocked Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a regulated river: Is there potential for repeat spawning? *River Research and Applications* 32: 1008-1017.

Nyqvist D, Greenberg L, Goerig, E, Calles O, Bergman E, Ardren, WR, Castros-Santos T. 2016. Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecology of Freshwater Fish* (early online)

Nyqvist D, McCormick SD, Greenberg L, Ardren WR, Bergman E, Calles, Castros-Santos T. 2016. Downstream migration and multiple dam passage by Atlantic salmon smolts. I: *Atlantic Salmon in Regulated Rivers: Migration, Dam Passage, and Fish Behavior*. Nyqvist, D., PhD dissertation. Karlstad University.

Saunders RL, Schom CB. 1985. Importance of the variation in life history parameters of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42: 615-8.

Schindler DE, Hilborn R, Chasco B, Boatright CP, Quinn TP, Rogers LA,. Webster MS. 2010. Population diversity and the portfolio effect in an exploited species. *Nature* 465: 609-12.

Stålered, J, Bard, A. 2015. Beräkning av mortaliteten vid turbinpassage för nedströmsvandrande fisk i Klarälven, Sveco Energuide, Rapport reviderad 2015-04-29, Uppdragsnummer 5470555000,

Thorstad EB, Whoriskey F, Uglem I, Moore A, Rikardsen AH, Finstad A. 2012. A critical life stage of the Atlantic salmon *Salmo salar*: behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. *Journal of Fish Biology* 81: 500–542.

Whitney RR, Coutant CC, Mundy PR. 2006. Sources of mortality and effectiveness of mitigation. I: *Return to the River. Restoring Salmon Back to the Columbia River*, Williams R, (ed). Elsevier Academic Press: Amsterdam; 324–417.

Del 2

Åtgärdsförslag för förbättrad nedströmspassage vid Edsforsens kraftstation i Klarälven

Olle Calles, Daniel Nyqvist, Eva Bergman och Larry Greenberg

Naturresurs rinnande vatten, Biologi, Karlstads universitet, Karlstad, Sverige

Contents

Uppdraget **32**

Bakgrund **33**

Älven och vattenkraften 33

Klarälvslaxen och Klarälvsöringen 34

Förbättrad nedströmspassage i Klarälven **36**

Kort- och långsiktig strategi 36

Edforsens kraftverk **37**

Flöden och nivåer 38

Turbinintaget 40

Utskoven 40

Djupförhållanden och hydraulik 40

Åtgärdsförslag för Edsforsens kraftverk **44**

Fysisk avledning av Klarälvsfisk 44

Spaltvidd 45

Flyktöppningar och förbipassage 45

Avvattning, sortering och hantering 46

Drivgods och is 48

Åtgärdsförslag 1 – α-avledare 49

Åtgärdsförslag 2 – β-avledare 53

Åtgärdsförslag 3 – dubbel β-avledare 56

Åtgärdsförslag 4 – Beteendeavledare 58

Åtgärdernas förväntade funktion – tappning och hydraulik 58

Sekundära åtgärdsförslag 59

Koordinerat spill vid kraftverk 1-9 60

Uppsamlingsanläggning 2 61

Uppströmspassage Edsforsen 63

Värdering och rangordning av åtgärdsalternativ 1-4 63

Modifierade åtgärdsförslag för Edsforsens kraftverk **64**

Åtgärdsförslag 5 – Modifierad β-avledare 65

Åtgärdsförslag 6 – Modifierad dubbel β-avledare 68

Värdering och rangordning av åtgärdsalternativ 5-6 71

Slutsats och rekommenderade åtgärdsalternativ **73**

Referenser **74**

Uppdraget

Huvudsyftet med detta delprojekt var att öka möjligheterna för den vildproducerade smolten och de utlekta vuxna fiskarna (kelt/besor) att överleva nedströmsvandringen från lek- och uppväxtområdena i Klarälven till Vänern. Innevarande rapport har fokuserat på två av projektets delmål: 1) Projektering av åtgärd(-er) för förbättrad nedströmsvandring och 2) beskrivning av de hydrauliska förutsättningarna för åtgärder i området uppströms Edsforsen.

Delprojektet kom att genomföras i två faser. Den första fasen (2012-2015) genomfördes i samverkan med Interreg-projektet ”Vänerlaxens fria gång” (Gustafsson *et al.*, 2015) och bestod av inledande hydrauliska mätningar i Edforsens kraftverksdamm samt att Marinteknik fick i uppdrag att i detalj kartlägga batymetrin uppströms kraftverket. Därefter togs fyra åtgärdsalternativ fram i samarbete med Fortum, Ed Meyer vid National Marine Fisheries Service (NMFS) (Meyer, 2013) och John Ferguson vid Anchor QEA. Åtgärdsförslagen utvärderades därefter hydrauliskt (Markku Lahti, Fortum) samt med avseende på dammsäkerhet, anläggningsteknik, effektivitet, kostnad och produktionspåverkan (Norconsult, 2014). Den första fasen avslutades med en workshop vid Karlstads universitet 2015-01-14 med representanter från Karlstads universitet, Fortum, Norconsult och KFS AnläggningsKonstruktörer AB (KFS). Vid workshopen beslutades att vidareutveckla de två mest lovande åtgärdsalternativen och förstärka projektgruppens kompetens med utökad hydraulisk expertis från Fortum (Markku Lahti) och anläggningsteknisk expertis från KFS (Thomas Rasmussen).

Den andra fasen (2015-2017) bestod i att identifiera problematiska aspekter av de två mest lovande åtgärdsalternativen och i möjligaste mån försöka lösa dessa. De två modifierade alternativen togs fram av Karlstads universitet och KFS (KFS AnläggningsKonstruktörer, 2016) och studerades med hydrauliska modeller (Lahti, opublicerat, 2015-2016). Slutligen utvärderades dessa två åtgärdsalternativ med avseende på dammsäkerhet, anläggningsteknik, effektivitet, kostnad och produktionspåverkan (Norconsult, 2017).

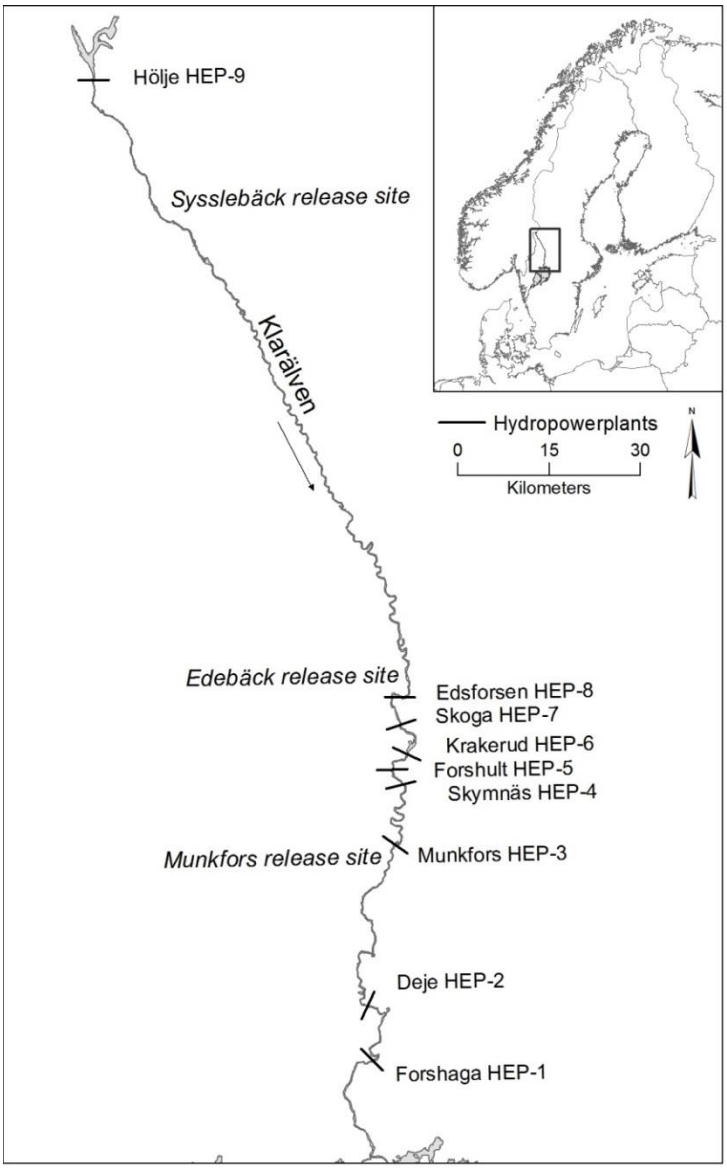
Bakgrund

I dag finns inga fria vandringsvägar mellan Vänern och de i Klarälven och Trysilelva återstående reproduktionsområdena för sjövandrande lax och öring. För att upprätthålla dessa populationer bedrivs kompensationsodling parallellt med transport av lekfisk förbi de åtta nederst belägna kraftverken i Klarälven, vilket ger de transporterade fiskarna tillgång till 150 km av älven mellan Edsforsens kraftverk och Höljes kraftverk (Gustafsson *et al.*, 2015). Inga passager för nedströmsvandrande fisk finns vid de åtta kraftverk som utlekt fisk och deras avkomma sedan ska passera för att nå Vänern och tidigare studier visar på att endast en liten andel av fiskarna gör detta (Norrgård *et al.*, 2013; Bergman & Norrgård 2015, Nyqvist *et al.*, 2015). Det föreligger således ett stort behov av, och en potential för, att öka överlevnaden för nedströmsvandrande fisk förbi de åtta nedersta kraftverken i Klarälven (Gustafsson *et al.*, 2015).

Åtgärder för förbättrad nedströmspassage och uppsamling av fisk vid vattenkraft har tills nyligen inte förekommit i Sverige (Calles *et al.*, 2013d), men väl i andra länder (DWA, 2005a; EPRI, 2002; Travade *et al.*, 2010). Ett fåtal försök har gjorts även i Sverige, men dessa exempel har varit av en sådan karaktär att dess utformning varit extremt platsspecifik och ofta kraftigt försvårat kraftproduktionen. Under det senaste decenniet har dock flera åtgärder implementerats och testats med gott resultat för flera olika fiskarter som t.ex. ål, lax och öring (Calles *et al.*, 2015; Calles *et al.*, 2011b; Calles *et al.*, 2013b; Calles *et al.*, 2013d; Kriström *et al.*, 2010; Nyqvist *et al.*, 2017b), men ännu har inget stort kraftverk (>72 m^3/s slukförmåga) åtgärdats. Samtliga i Sverige testade åtgärder har bestått av en fysisk avledare i kombination med en förbipassage eller uppsamling, vilket stämmer väl överens med slutsatsen från flera genomförda sammanställningar av kunskapsläget kring åtgärder för förbättrad nedströmspassage (Calles *et al.*, 2013a; EPRI, 2002). I vissa fall kan åtgärder i form av ytligt orienterade avledare och/eller omfattande och välplacerat spill ha hög effektivitet trots att en barriär som hindrar fisken från att simma in i turbinerna saknas eller är bristfällig, men har då endast utvärderats för ytorienterade arter som salmonider (Anglea *et al.*, 2002; Arnekleiv *et al.*, 2007; Hanson, 1999; Ogden *et al.*, 2008; Scruton *et al.*, 2008; Scruton *et al.*, 2007). Åtgärder som har en avledande funktion genom att framkalla en beteenderespons hos fisken på någon form av stimuli, s.k. beteendeavledare, har i allmänhet inte befunnits ha god funktion och då i synnerhet inte i kraftverksintag (Calles *et al.*, 2013a). I innevarande rapport prioriteras i första hand därför fysiska avledare och endast beteendeavledare om det förstnämnda av någon anledning inte är möjliga att uppföra.

Älven och vattenkraften

Älvens huvudfåra har sin början i sjön Femunden i Norge, vilken avvattnas av Trysilelva. Älven byter namn till Klarälven i Sverige och nedströms Vänern övergår den i Göta älv. I Klarälven finns i dag nio kraftverk (Fig. 1) och på den norska sidan finns ytterligare två kraftverk i Trysilelva. Det finns stora arealer lek- och uppväxtområden i Trysilelva (Norge) och habitaten i Sverige har dessutom i högre grad påverkats av det stora antalet kraftverk och rensningsföretag i Klarälven (Ros, 1981). I Klarälven återfinns de största habitaten i såväl huvudfåran som biflöden mellan kraftverken Edsforsen (nr. 8) och Höljes (nr. 9), där en cirka 150 km lång sträcka av huvudfåran saknar kraftverk.



Figur 1. Den nedre delen av Klarälvens huvudfåra med vattenkraftverken:

1) Forshaga,
2) Deje,
3) Munkfors,
4) Skymnäs,
5) Forshult,
6) Krakerud,
7) Skoga,
8) Edsforsen
9) Höljes

Karta från Norrgård et al. (2013)

Klarälvslaxen och Klarälvsöringen

Historiskt vandrande både Vänerlax och Väneröring upp till 400 km från Vänern för att leka (Nordberg, 1977; Ros, 1981). I dag är bara de 25 km nedströms det första kraftverket i Forshaga direkt tillgängliga för fisk som vandrar upp från Vänern, eftersom kraftverket saknar fiskväg. Som redan nämnts kompenseras denna skada på fiskpopulationerna dels genom att man sätter ut odlad smolt nedströms Forshaga kraftverk och dels genom att man fångar och transporterar lekfisk cirka 100 km uppströms, förbi de nedersta åtta kraftverken, där de släpps ut på en 150 km ofragmenterad sträcka mellan Edsforsens och Höljes kraftverk (kraftverk nr. 8 respektive 9 från Vänern räknat). Från början var tanken att endast vild fisk skulle flyttas till lekområdena, men eftersom det totala antalet lekfiskar var lågt vissa år har både individer av vilt och odlat ursprung transporterats. Efter att studier dokumenterat ett avvikande beteende på lekområdena bland lekvandrande laxar av odlat ursprung (Hagelin *et al.*, 2016), har man sedan 2012 endast transporterat upp lekvandrande lax av vilt ursprung (Gustafsson *et al.*, 2015).

Man har observerat en uppåtgående trend för det årliga antal vilda lekfiskar som fångas i Forshaga och det årliga genomsnittet under perioden 1996-2016 var 538 vilda laxar och 54 vilda öringar (Tabell 1 Motsvarande årliga genomsnittsfångst för odlad fisk var 669 laxar och 487 öringar. Eftersom fällan där lekfisken fångas tidvis har en låg fångsteffektivitet, i synnerhet vid höga flöden, vet man inte hur många lekfiskar som totalt vandrar upp varje år i Klarälven (Gustafsson *et al.*, 2015). Det är dock klarlagt att de vilda bestånden ökar och därmed även det antal fiskar som årligen fångas och transporteras uppströms till lekområden (Tabell 2). De största fångsterna av vilda laxar och öringar under perioden noterades 2016, att jämföra med motsvarande fångstrekord för odlad fisk 2012-2013.

Tabell 1. Fångster av lekfisk vid Forshaga kraftverk 1996-2016. Data från M. Blixt, Fortum and M. Hedenskog och P. Gustafsson, Länsstyrelsen Värmland.

Art	Ursprung	Min	Medel	Max	Bästa år
Lax	Vild	95	**538**	1212	2016
	Odlad	124	**669**	1400	2013
Öring	Vild	12	**54**	178	2016
	Odlad	199	**487**	976	2012
	Totalt	743	**1748**	3551	2013

Tabell 2. Antal lekfiskar fångade vid Forshaga kraftverk och transporterade uppströms till Ekshärad 1996-2016. Data från M. Blixt, Fortum och M. Hedenskog and P. Gustafsson, Länsstyrelsen Värmland.

Art	Ursprung	Min	Medel	Max	Bästa år
Lax	Vild	91	**476**	1145	2016
	Odlad	0*	**349**	927	2003
Öring	Vild	12	**51**	157	2016
	Odlad	97	**380**	858	2012
	Totalt	541	**1255**	2259	2003

** Till följd av att upptransporten av odlad lax upphörde 2012.*

Smoltutvandringen i Klarälven har tills nyligen varit dåligt känd, men förvaltande myndigheter har utgått från att passagen av de åtta kraftverken inte orsakat någon omfattande dödlighet (Anonymous, 1998). Den två empiriska studierna som genomfördes för att studera den faktiska passageeffektiviteten för nedströmsvandrande laxsmolt i Klarälven visade att passagen av dessa åtta kraftverk orsakade förluster på >70% (Norrgård *et al.*, 2013; Bergman &Norrgård., 2015). Den vilda laxsmolten i Klarälven vandrar nedströms i maj-juli, vanligen med den mest intensiva vandringen i juni (Bergman *et al.*, 2015; Lans *et al.*, 2011).

Det finns ännu inga noggranna mätningar av den årliga smoltproduktionen i Klarälven, men fångst-återfångstförsök visar att >90 % är lax och skattar antalet till cirka 4000-20000 smolt per år (Bergman *et al.*, 2015). Vid studien observerades en medellängd för laxsmolt på 152-165 mm (min-max: 111-

192 mm) och för öringsmolt 173 mm (120-262 mm). Nyligen genomförda studier visar att endast enstaka nedströmsvandrande utlekt lax (kelt) och öring (besor) når Vänern efter avslutad lek (Nyqvist *et al.*, 2017a; Nyqvist *et al.*, 2016). Observationerna om hög förlust bland nedströmsvandrande laxfisk styrks av uppgifter från närboende och underhållspersonal om stora mängder död laxfisk på intagsgallren, i synnerhet vid Edsforsen och de närmast nedströms belägna kraftverken. Kelt och besor vandrar nedströms både efter höstens lek (oktober-december) och efter islossningen på våren (mars – maj). Telemetristudier visar att ungefär 1/2 av laxen och 2/3 av öringen överlever leken och vandrar nedströms mot Vänern, vilket baserat på mängden upptransporterad fisk innebär att cirka 500 laxar och lika många öringar försöker vandra nedströms förbi de åtta kraftverken mellan lekområdena och Vänern. Det är inte bara laxfisk som rör sig nedströms i vattendraget och vid ovan nämnda smoltproduktionsstudie av Bergman *et al.* (2015) fångades även bäcknejonöga, lake, stäm, harr, abborre, gädda, mört och sik.

Redan i dagsläget är således potentialen stor för åtgärder som innebär en ökad överlevnad för nedströmsvandrande smolt och kelt i Klarälven, eftersom förlusterna är omfattande för de sammanlagt tusentals smolt och kelt som varje år försöker nå födosöksområdena i Vänern. Dessutom finns flera andra arter i Klarälven som bedömts som påverkade av fragmentering och således skulle gynnas av förbättrade vandringsförhållanden (Näslund *et al.*, 2013).

Förbättrad nedströmspassage i Klarälven

Forskare vid Karlstads universitet har erfarenhet av flera projekt som studerat och åtgärdat fiskars nedströmspassage av kraftverk i reglerade vattendrag (Calles and Bergdahl, 2009; Calles *et al.*, 2011a; Calles *et al.*, 2013c; Norrgård *et al.*, 2013; Nyqvist *et al.*, 2017b). Forskargruppens kontaktnät inom branschen är omfattande både nationellt och internationellt. Kraftverken i Klarälven är större än de där man hittills förbättrat nedströmspassage i Sverige, så för att stärka projektgruppens kompetens har två erfarna amerikanska experter konsulterats som en del av åtgärdsarbetet: Ed Meyer vid National Marine Fisheries Service (NMFS) och John Ferguson vid Anchor QEA. Både Ed och John har besökt Karlstad och kraftverken längs Klarälven och bidragit till innehållet i denna rapport. Ed Meyer har utifrån sin expertis och diskussioner med författarna till denna rapport författat ett PM med en presentation av vilka åtgärdstyper som enligt deras arbetssätt skulle vara aktuella för kraftverk av den typ som återfinns i Klarälven (Meyer, 2013). Under projektets senare del har ytterligare teknisk expertis tillkommit i form av Thomas Rasmussen från KFS (KFS AnläggningsKonstruktörer, 2016). Åtgärdsförslagen har löpande utvärderats hydrauliskt av Fortums Markku Lahti (Lahti, opublicerat, 2015-2016). De framtagna åtgärdsförslagen har granskats av Norconsult för att bedöma aspekter som konstruktion och byggteknik, funktion ur fisk- och driftsynpunkt, dammsäkerhet, kostnader och produktionspåverkan (Norconsult, 2014, 2017).

Kort- och långsiktig strategi

Från ett biologiskt perspektiv behöver alla av människan skapade vandringshinder i vattendrag göras passerbara, både för uppströms- och nedströmsvandrande fisk. Dessutom ska flödesregimen vara sådan att de biologiska processerna kan fortgå och därmed bevara habitat och livskraftiga populationer. Den långsiktiga strategin för Klarälvens och Trysilelvans bevarande och rehabilitering bör därför vara att uppnå just detta. Strategin på kort sikt kan dock behöva vara en annan, för att uppnå resultat snabbt och som en anpassning till rådande kunskapsläge.

De problem som identifierats som de allvarligaste vad gäller den kortsiktiga förvaltningen av bestånden av lax och öring i Klarälven har varit fångsteffektiviteten och hanteringen av lekfisk vid Forshaga kraftverk och överlevnaden för nedströmsvandrande fisk (Gustafsson *et al.*, 2015). Nyligen genomförda åtgärder och studier har bekräftat såväl låg fångsteffektivitet vid höga spillflöden i Forshaga som redan nämnd hög kumulativ dödlighet för nedströmsvandrande fisk i de åtta nedersta kraftverken (Hagelin *et al.*, 2016; Norrgård *et al.*, 2013; Bergman & Norrgård, 2015; Nyqvist *et al.*, 2015). Det finns tecken på att arbetet med att förbättra fångsteffektiviteten och hanteringen av lekfisk vid Forshaga kraftverk redan har gett resultat (Gustafsson *et al.*, 2015). T.ex. var fångsterna av både vild lax och öring 2016 i Forshaga de högsta på 75 år. Även om de bakomliggande orsakerna kan vara svåra att fastställa så är således åtgärder för att förbättra överlevnaden för nedströmsvandrande fisk förbi Klarälvens nedersta åtta kraftverk fortsatt ett viktigt och prioriterat område.

Det stora antalet kraftverk i älven i dag i kombination med att de återstående habitaten med fritt strömmande vatten är koncentrerade till ett fåtal sträckor långt upp i älven, gör att återetablerandet av konnektivitet bör bedrivas stegvis och på flera fronter. Även om det är önskvärt att helt ersätta kompensationsodling och transport av lekfisk med naturligt vandrande fiskbestånd längs hela älvens längd, är det inte realistiskt att på kort sikt genomföra en sådan total förändring. Passageåtgärder kan inte förväntas ha en så god funktion att den kumulativa passageeffektiviteten för åtta hinder är så hög att tillräckligt med fisk framgångsrikt ska passera till och från lek-, uppväxt- och födosöksområdena för att populationerna ska stärkas eller ens bevaras. Om man t.ex. skulle uppnå en så hög passageeffektivitet som 90 % per kraftverk, både upp- och nedströms, skulle det innebära att endast 43 % av lekfisken når lekområdena mellan Edsforsen och Höljes och samma andel skulle överleva nedströmsvandringen. Motsvarande siffra för 70 % passageeffektivitet vid alla kraftverk är 6 % förbi åtta kraftverk.

Under en övergångsperiod bör därför lax- och öringpopulationerna förvaltas genom en kombination av fria vandringsvägar, fångst-transport och kompensationsodling. I dag är Edsforsens kraftverk det första hindret för nedströmsvandrande smolt och kelt/besor, vilket innebär att åtgärdsarbetet med nedströmspassage bör ta sin början där. Förutsättningarna för framgångsrika åtgärder vid denna plats utreds närmare nedan under rubriken ”Edforsens kraftverk” varefter åtgärdsförslag presenteras under ”Åtgärdsförslag för Edsforsens kraftverk” och ”Modifierade åtgärdsförslag för Edsforsens kraftverk”. Edsforsens kraftverk ligger således i fokus för det föreslagna kortsiktiga åtgärdsarbetet, men som ett led i föreslagna förbättringar kommer nya åtgärder och rutiner även att behöva implementeras vid de övriga kraftverken, vilket beskrivs under ”Sekundära åtgärdsförslag”.

Edforsens kraftverk

Kraftverket sattes i drift 1949 och delar av dammen och båda turbinerna rustades upp 2012-2013. Stationen är ett älvkraftverk och har i dag två Kaplan-turbiner med en total slukförmåga om cirka 190 $m^3 s^{-1}$ och 7 m fallhöjd (6-9 m). Detta motsvarar en effekt på 12 MW och en årsproduktion om cirka 49 GWh $år^{-1}$. Det finns åtta möjliga flödesvägar vid Edsforsens kraftverk; genom två turbiner samt ytterligare sex spillutskov (Tabell 3).

Tabell 3. Flödesvägarna vid Edsforsens kraftverk i Klarälven (Fortum, 2013). T = turbin, L = lucka (radiell). För varje utskov anges dess dimensioner vid +135,5 m.ö.h., en lägsta slukförmåga i $m^3 s^{-1}$ för nivån +134,5 m.ö.h. och en högsta slukförmåga för nivån +135,5 m.ö.h.

Kod	Typ	Bredd x djup (m)	Slukförmåga (m^3/s)		Kommentar
			Låg	Hög	
G1	Kaplan	11,00 x 7,65	98	116	
G2	Kaplan	11,00 x 7,65	87	119	
L1	Sektorlucka 1	9,00 x 2,00	10	29	Flottningslucka, manuell, yttappad
L2	Sektorlucka 2	12,00 x 3,75	105	167	Timmersluss, manuell, yttappad
L3	Segmentlucka 1	12,00 x 4,75	167	238	Fjärrstyrd, bottentappad, vinterbonad,VNR**
L4	Segmentlucka 2	12,00 x 4,75	167	238	Manuell & bottentappad
L5	Segmentlucka 3	12,00 x 4,75	167	238	Fjärrstyrd, bottentappad,VNR**
L6	Segmentlucka 4	12,00 x 4,75	167	238	Manuell & bottentappad
		Totalt	1018	1333	

** Under vintertid, 15/10-10/4, är nivån uppströms kraftverket ungefär en meter högre än sommartid, 11/4-14/10, vilket ger högre slukförmåga vintertid.*

*** VNR = vattennivåreglering.*

Flöden och nivåer

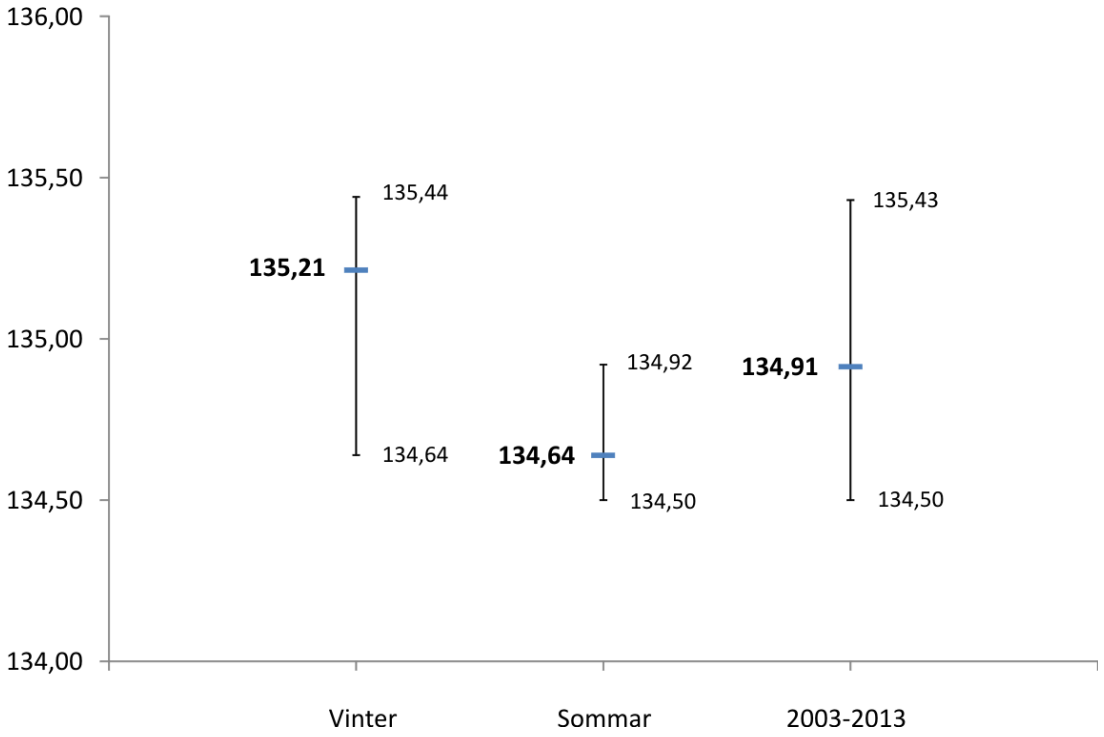
Informationen om Edsforsen har lämnats av Claes Kjörk, regleringssamordnare på Fortum Generation AB (2013-10-14). Vattenståndet uppströms Edforsens kraftverk får regleras mellan dämningsgränsen 137,0 m och sänkningsgränsen 135,5 m, men viktigt att notera är att enligt gällande vattendom är det nivån vid bron i Edebäck knappt 2 km uppströms kraftverket som anger dämningsgränsen. Rådande driftläge avgör därför vilken nivå som är lämplig ur säkerhetssynpunkt och som lägst är fallförlusten från Edebäck till Edsforsen cirka 5 cm, vilket infaller vid lågt flöde i älven. Med ökat flöde ökar fallförlusten ned till dammen och nivån blir då lägre vid kraftverket. Vanligen sänks nivån vid dammen till +134,50 och ökar flödet ytterligare tillåts nivån i Edebäck stiga över +135,50 m. I Edebäck gäller nivån +135,00 m 11 april-14 oktober och +135,5 m 15 oktober-10 april, men vid ett flöde över 300 m/s^3 blir inte längre dammnivån bestämmande för nivån i Edebäck och ingen maxnivå är därför satt vid Edebäck. Vid spill i Edsforsen när både G1 och G2 är i drift kommer alltså nivån vara betydligt lägre än +135,50 m, sällan över +135,00 m och oftast ned mot +134,50 m. Under vårfloden är nivån som regel +134,50 m. I samband med isläggningen uppstår ofta problem med isproppar mellan Edebäck och Edsforsen. Nivån kan då variera snabbt, både när isproppen bildas och när den släpper. När det är isproblem försöker man hålla nivån vid dammen runt +135,00 m eftersom en lägre nivå endast förvärrar problemen och ger ingen lägre nivå vid Edebäck.

Registrerad nivådata för Edsforsen visar att nivån i dammen varierade mellan +134,41 och +135,98 under perioden 2003-01-01 och 2013-09-30 (Fortum, 2013), vilket motsvarar ett vattendjup i

turbinintaget om 6,56 - 8,13 m. Under vinterhalvåret (15/10-10/4) var nivån i snitt +135,21 m och varierade mellan +134,34 och +135,98 m. Ett 95 % konfidensintervall exkluderar 5 % av de mest extrema värdena och nivåintervallet under vintern var då +134,64-135,44 (Figur 2).

Man kan förvänta sig att det relativa spillflödet ger en fingervisning om hur stor andel av nedströmsvandrande fisk som kommer passera vid sidan av en eventuellt framtida uppsamlingsanläggning i kraftverksintaget, vilket styrks av keltstudierna på platsen (Nyqvist *et al.*, 2017a; Nyqvist *et al.*, 2016). Vid granskning av totalt 100 000 timmedelvärden för flödet vid Edsforsen för perioden 20030101 – 20130930 spilldes i 54 % av fallen och vid ungefär 1/3 av tillfällena utgjorde spillflödet det dominerande flödet, dvs spillflödet genom utskoven var högre än flödet genom turbinerna. Om hänsyn tas till de driftsstörningar som inträffat 2010-2013 och motsvarande analys genomförs på data från perioden 2003-2009, har spill inträffat 41 % av tiden och endast under 6 % av tiden har spillflödet varit högre än turbinflödet.

Under sommarhalvåret (11/4-14/10) var nivån i snitt drygt en halvmeter lägre (+134,64 m) och mindre variabel än under vintern (Fig. 2). När de kallaste månaderna december-februari exkluderades förändrades lägstanivån från 134,64 till 134,50 medan medelvärdet och högstanivån förblev de samma. Årsmedeldjupet i turbinintaget 2003-2013 var således 7,06 m med ett 95 % konfidensintervall på 6,65-7,58 m.



Figur 2. Medelnivån uppströms vinter (15/10-10/4), sommar (11/4-14/10) samt hela året (2003-2013) vid Edsforsens kraftverk med 95 % konfidensintervall (dygnsmedel, 2003-2013, Fortum).

Turbinintaget

Turbinintaget omges av en enkel tillbyggnad som syftar till att skydda intaget och minska isproblemen på intagsgallren. Rensningen ombesörjs av en kran med hydrauliska arm med gripklo monterad på en släde. Varje intag är 11,4 x 7,65 m, vilket ger en teoretisk anloppshastighet (V_A) på 1,12 m/s. Gallren är 11,4 m breda, 8 m långa med en 73° vinkel i relation till horisontalplanet (botten) och har en 70 mm bred spalt (Norconsult, 2014). De branta gallren medför att vattenhastigheten vinkelrätt mot gallren (V_N) i stort sett är identisk med V_A, medan hastighetsvektorn parallellt med gallren i dess längdriktning är låg. Den breda spalten och den branta lutningen är båda egenskaper som gör att gallrets avledande effekt bör ha varit obefintlig.

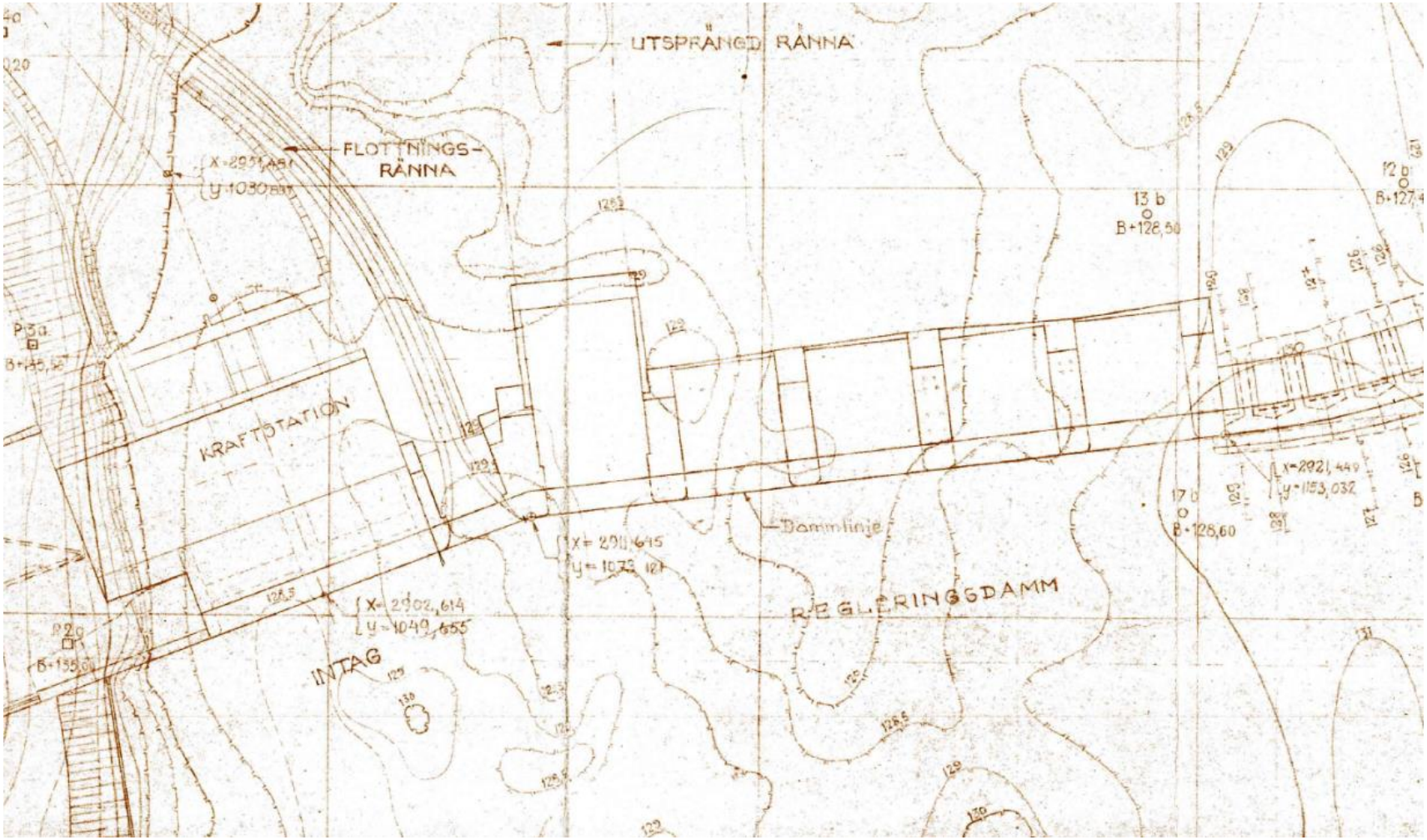
Den totala gallerytan är cirka 183 m^2, vilket vid fullkörning i kraftverket vid nivå 135,5 i teorin innebär att 190 m^3/s fördelas jämnt över gallrets yta; V_N = 1,04 m/s (Travade *et al.*, 2010). Vid de nivåer som observerats under perioden 2003-2013 var gallrens genomsnittliga våta längd 7,4 m, vilket motsvarar en våt area om 84,4 m^2. När timmedelvärden för våt gallerarea ställs mot flödet genom respektive turbin får man att det genomsnittliga flödet per ytenhet galler är cirka 0,6 m/s, samt att de mest extrema förhållandena var 1,7 m/s för G1 och 1,6 m/s för G2. Hastigheten i spalterna har inte beräknats, men eftersom spalten är bred i nuvarande galler så har hastigheten genom dem inte varit avsevärt högre än ovan angivna hastigheter.

Utskoven

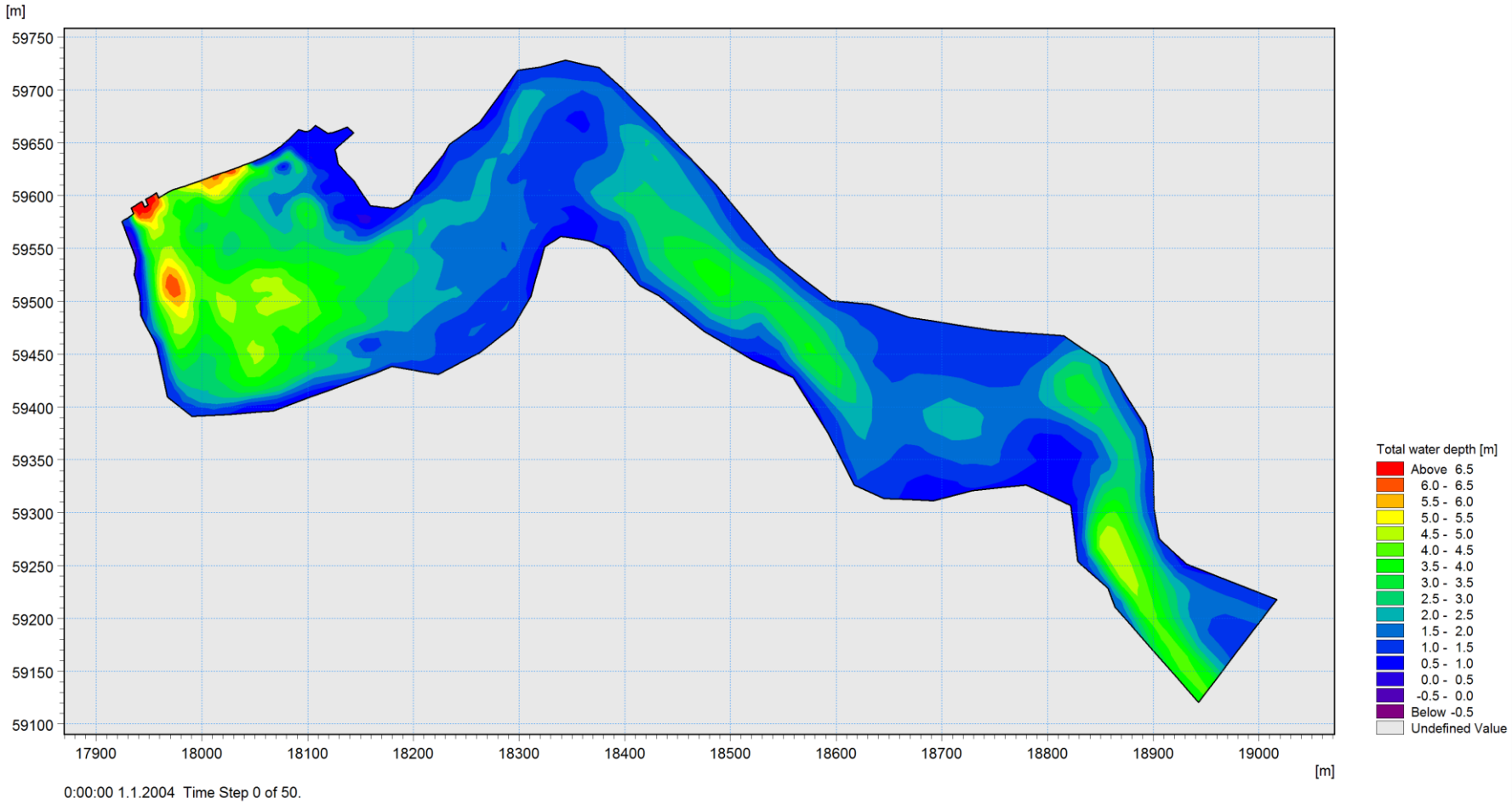
Närmast kraftverket österut kommer två sektorutskov, en timmerränna och en timmersluss (Tabell 3, Figur 3), vilka är radiella sektorluckor som sänks ner och ger en yttappning och är därför av speciellt intresse i fiskpassagesammanhang. Slukförmågan för timmerrännan är 21/32 $m^3 s^{-1}$ (sommar/vinter) och för timmerslussen 135/167 $m^3 s^{-1}$ (Peter Blomberg, Fortum Generation AB). Därefter följer fyra segmentutskov med konventionella radiella segmentluckor som höjs upp och ger en bottentappning. Dessa luckor har högst kapacitet och används i första hand för att släppa ut spillvatten. Intaget är förberett för att vid torrläggning nyttja bågsättar, vilket måste vara möjligt även efter implementerandet av en passageförbättrande åtgärd (KFS AnläggningsKonstruktörer, 2016). För att kunna hantera bågsättarna krävs att ett område om minst 8 meter uppströms intaget är tillgängligt.

Djupförhållanden och hydraulik

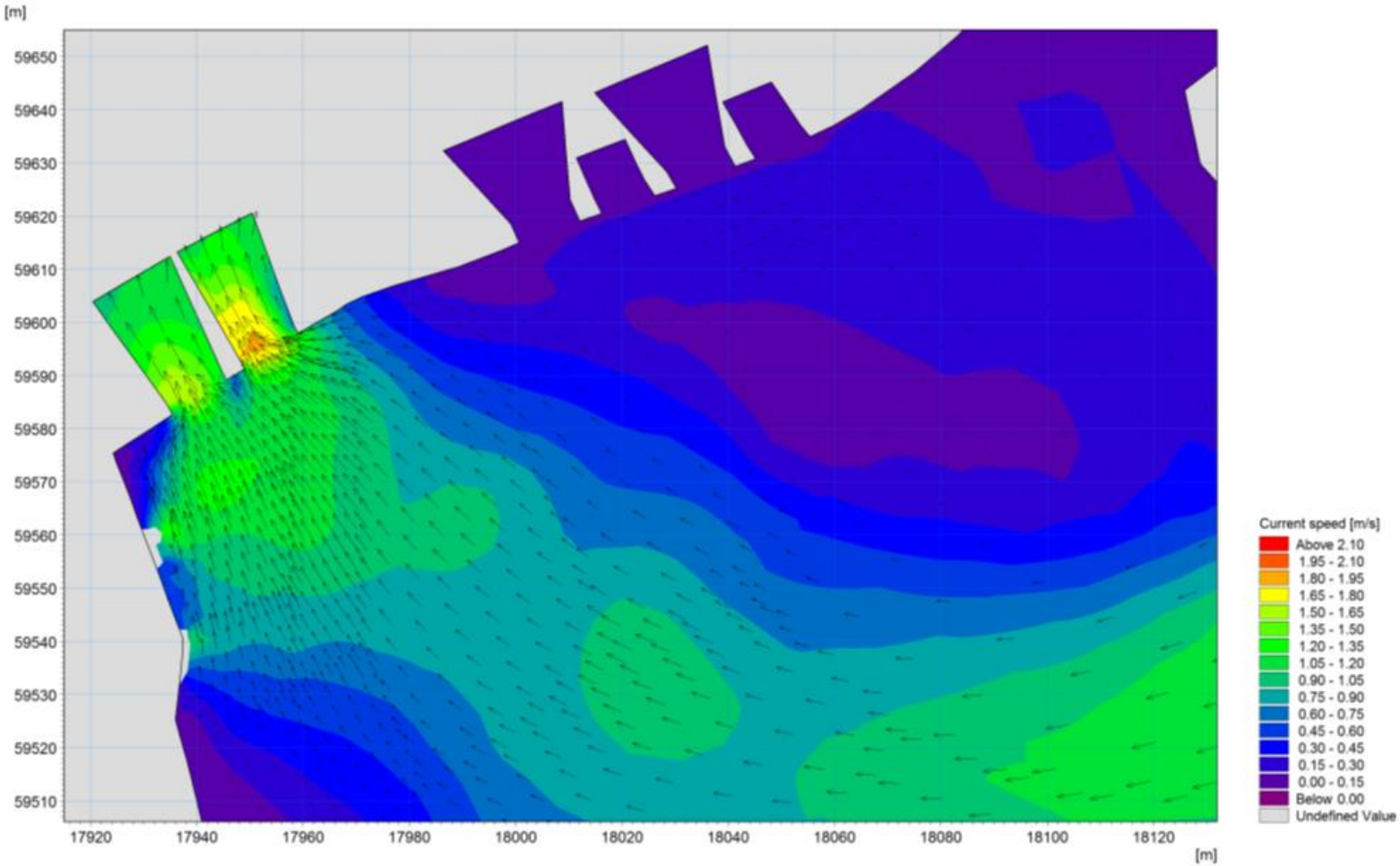
De batymetriska och hydrauliska förhållandena vid Edsforsens kraftverk grundar sig främst på underlagsmaterial tillhandahållet av Fortum. Detta har kompletterats med inmätningar av Edsforsens damm september 2012 (Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP, Sontek M9 River Surveyor; San Diego, U.S.A.) och en batymetrisk inmätning av utförd av Marinteknik 2013 (Figur 4). Dessutom har den batymetriska kartan använts till omfattande hydraulisk modellering, av såväl nuvarande som möjliga framtida förhållanden, av Fortums Markku Lahti (Mike 3 HD tillsammans med Mike Zero Release 2016, Service Pack 1; DHI, Denmark; t.ex. Figur 4). Samtlig hydraulisk data som presenteras i rapporten härrör från Markku Lahiti (opublicerat, 2015-2016).



Figur 3. Edsforsens kraftverk med kraftstation, sektorluckor 1-2 (L1-L2) och segmentluckor 1-4 (L3-L6).



Figur 4. Batymetrisk karta av Edsforsens kraftverksdamm upp till Edebäcksbron vid dammnivå +134,5 m.ö.h. (Marindata, 2013).



Figur 5. Medelvattenhastigheter och hastighetsvektorer i Edsforsens kraftverksdamm i dess nuvarande utförande vid totalflödet 200 $m^3 s^{-1}$, utan spill, och nivå +134,5 m.ö.h.

Åtgärdsförslag för Edsforsens kraftverk

En åtgärd för att öka överlevnaden för nedströmsvandrande fisk vid Edsforsens kraftverk bör bestå i en avledare som för fisken mot en alternativ passage vid kraftverket. På kort sikt bör denna passage anläggas i form av en uppsamlingsanläggning, för att fisken ska kunna transporteras nedströms och inte tvingas till passage av ytterligare sju kraftverk. Vid behov ska dock uppsamlingsanläggningen enkelt kunna ställas om till att utgöra en passage.

En avledare vid Edsforsen ska i första hand vägleda smolt och utlekt fisk av öring och lax. I vissa fall kan avledning av just laxfisk åstadkommas med en temporär ytorienterad beteendeavledare, t.ex. en spjälavledare (louver) eller en ytläns (BSG, Behavioural Guidance Structure)(Meyer, 2013). Fisken kommer dock i någon okänd utsträckning att dyka och simma under en sådan avledare och genom turbinen. En fysisk/mekanisk avledare ger ett säkrare skydd mot turbinpassage och dess stoppande funktion är inte på samma sätt beroende av fiskart eller livsstadium. En beteendeavledare skulle sannolikt vara både billigare och snabbare på plats, men vi bedömer att en fysisk avledare är den lämpligaste lösningen vid Edsforsen eftersom syftet är uppsamling för transport förbi övriga stationer och man bör eftersträva en hög effektivitet. Även om en sådan åtgärd implementeras vid Edsforsen, kommer man vid t.ex. högflöden att få fiskar som passerar kraftverket med spillvatten. Detta ställer höga krav på sekundära åtgärder, i form av adaptiv spilltappning vid samtliga nedströmsliggande kraftverk och sannolikt också en andra uppsamling vid t.ex. Edsforsen eller Skogafors.

Totalt redogörs för sex olika primära åtgärdsalternativ vid Edsforsen, samt översiktligt för ytterligare fem sekundära åtgärdsalternativ:

Primära åtgärder för ökad överlevnad av nedströmsvandrande fisk:

1. α-avledare
2. β-avledare
3. Dubbel β-avledare
4. Beteendeavledare
5. Modifierad β-avledare
6. Modifierad dubbel β-avledare

Sekundära åtgärder för ökad överlevnad av nedströmsvandrande fisk:

1. Koordinerat spill vid kraftverk 1-9
2. Uppsamlingsanläggning 2 – tre alternativ
3. Uppströmspassage Edsforsen

Fysisk avledning av Klarälvsfisk

En fysisk barriär vid Edsforsen ska hindra smolt och kelt från att passera och samtidigt leda dem till en flyktöppning. Alternativen utgörs av tre olika varianter av fysiska

låglutande galler av α- (alt. 1) respektive β-typ (alt. 2-3 & 4-5). Utformningen av en beteendeavledare beskrivs kortfattat. Flera åtgärdsaspekter diskuteras gemensamt för de tre exemplen på fysiska avledaralternativ, t.ex. spaltvidd, flyktöppningar och förbipassage, avvattning, sortering och hantering. De sex åtgärdsalternativen beskrivs och värderas ytterligare i rapporter av Norconsult (2014 & 2017).

Spaltvidd

Utgår vi från redan redovisade längddata för Klarälvssmolt, är laxen i genomsnitt kortast och således den art som kräver minst spaltvidd för att fysiskt hindras från passage. Flera vandrande fiskarter som påträffats uppströms Edsforsen och därför bör beaktas vid anläggande av en åtgärd är som redan nämnts främst lake, stäm, harr och sik. Huruvida dessa arter ska transporteras nedströms eller återutsättas uppströms Edsforsen är en senare fråga. Med tanke på att underlaget för vissa arter grundar sig på ett fåtal individer och eftersom medellängden i stort sett överensstämmer med det som noterades för lax, har vi gjort bedömningen att laxsmoltens storlek ska vara vägledande för åtgärdens utformning.

Medellängden för laxsmolt i Klarälven var 172 mm år 2013, vilket motsvarar en teoretisk spaltvidd om 17,2 mm för att fysiskt stoppa fisken från att passera gallret (DWA, 2005b). Den minsta laxsmolten 2013 var 111 mm vilket enligt samma resonemang kräver en spalt på 11,1 mm för att hindras från passage. I Meyer (2013) refereras till de kriterier som gäller för avledning av smolt av Atlantlax i nordöstra USA (North East Region Criteria, NERC), vilka säger att för laxsmolt >120 mm får spaltvidden inte understiga 12,7 mm. I båda dessa fall grundar sig på att gallret ska utgöra en fysisk barriär, inte beteendemässig. Om gallret anläggs med en lutning kring 30° i förhållande till botten (α) eller sidan (β) kan sannolikt spalten ökas något med bibehållen funktion, men vilken exakt spaltvidd som kan användas med bibehållen funktion är inte känd. Den bästa lösningen är därför sannolikt att välja en spaltvidd i intervallet 15-18 mm, vilka har utvärderats med god funktion för bl.a. lax- och öringsmolt (Kriström et al. 2010, Heiss 2015), med risken att modifieringar kan behöva göras om en större spaltvidd inte har en fullgod avledande effekt eller om en liten spaltvidd inte är förenligt med kraftverksdriften.

Flyktöppningar och förbipassage

Flyktöppningarnas utformning och placering beskrivs först på ett övergripande sätt och därefter beskrivs de egenskaper som är speciella för de olika åtgärdsförslagen. Där inte annan referens anges härrör resonemangen från författarna och Meyer (2013).

Generellt behöver flyktöppningen eller flyktöppningarna täcka in nivåintervallet 134,0 – 136,0 m.ö.h., vilket lämpligen ombesörjs genom att tröskeln i flyktöppningen är justerbar i höjd. Dessutom är det lämpligt att man kan reglera flödet i förbipassagen utan att ändra tröskelns nivå, vilket kan åstadkommas genom att en hydraulisk lucka placeras på var sida om passagen och flödet kontrolleras genom att den öppna bredden varieras.

Det totala flödet i flyktöppningarna bör enligt litteraturen vara cirka 2-10 % av turbinkapaciteten (Ferguson *et al.*, 1998; Larinier and Travade, 1999; NMFS, 2011; Odeh

and Orvis, 1998), vilket i Edsforsen motsvarar 3,8-19 m^3/s. Lämpligen bestäms högsta flödet av flyktöppningarnas dimensioner och därefter får man i ett inledande skede testköra för att utröna vilket flöde som krävs för en god funktion.

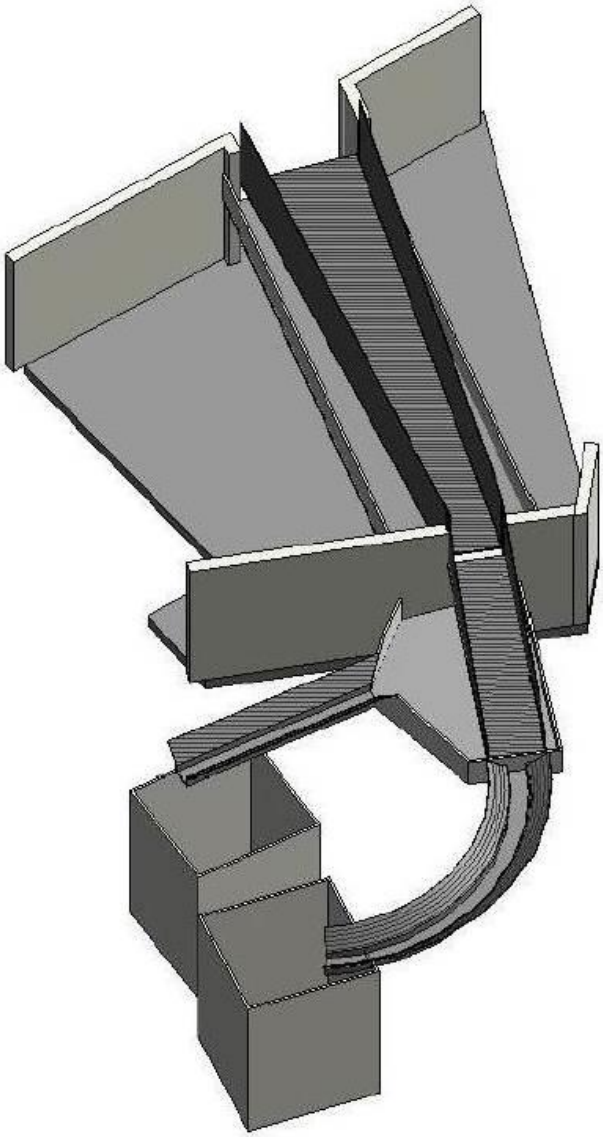
Själva flyktöppningen bör föregås av en ramp eller successiv uppgrundning för att åstadkomma en långsam acceleration av vattnet in i öppningen tills det att den s.k. ”fångsthastigheten” på cirka 2,4 m/s uppnås (NMFS, 2011). Accelerationen per meter skall dock helst inte överstiga cirka 0,2 m/s, vilket innebär att en hastighetsökning från 1,0 m/s till 2,4 m/s bör spridas ut över en 7 m lång sträcka. Värt att notera är dock att den maximalt rekommenderade accelerationen har sitt ursprung i en studie där man observerade omfattande repellerande beteende hos fisk vid en acceleration motsvarande 1 m/s (muntligen, Peter Christensen, R2 Resource Consultants). Enligt samma källa överskrids dessutom ofta accelerationsvärdet 0,2 m/s ofta utan dokumenterade negativa konsekvenser.

Precis som avledning i övrigt bör lutningen vara ≤30˚, vilket innebär att rekommenderad ramplängd beror både av aktuellt vattendjup och accelerationens omfattning. Det rekommenderade vattendjupet i flyktöppningen bör vara minst 0,3 m djupt, men för god funktion för kelt krävs sannolikt ≥ 1 m djup (Meyer, 2013). Enligt Travade and Larinier (1992) är de minsta dimensionerna på en flyktöppning 0,5-1,0 m bredd och 0,4 m djup, med tillägget att större dimensioner krävs för större kraftverk. Det är välkänt att nedströmsvandrande fisk undviker hastigt accelererande vatten och små öppningar. Således rekommenderar vi att flyktöppningarna vid Edsforsen ska vara ≥ 1 x 1 m, med möjlighet att vid behov minska djup/bredd.

Förbipassagen ska ha en slät insida för att undvika skador på fisken. Dessutom bör den inte ha tvära svängar, där rekommenderad svängradie är minst 3 m enligt Turnpenny *et al.* (1998) och minst fem gånger förbipassagens diameter enligt NMFS (2011).

Avvattning, sortering och hantering

När fisken väl passerat flyktöppningens tröskel och fångsthastigheten omöjliggör flykt uppströms, behöver fisken separeras från skräp och merparten av vattnet, vilket beskrivs närmare nedan. När vattnet väl skiljts från fisken, finns möjlighet att pumpa tillbaka detta uppströms för att undvika onödigt spill. Om flödessituationen är sådan att spill finns att tillgå kan vattnet istället släppas ut i turbinutloppet. All fisk och en mindre mängd vatten leds av till en fångststation och vidare till förvaringstankar från vilka fisken kan lastas på lastbil och transporteras nedströms för utsättning nedströms Forshaga kraftverk (Figur 6).



Figur 6. Principutformning av anläggning för avvattning och sortering i anslutning till en avledare vid Edsforsens kraftverk (Norconsult, 2014).

Vatten och fisk bör hanteras och separeras så nära tröskeln/krönet och efterföljande ränna som möjligt för att undvika att vattnet uppnår kritiskt höga hastigheter. Dessutom innebär detta att vatten som eventuellt pumpas tillbaka inte behöver lyftas högre än nödvändigt. Övergången från rännan till efterföljande avvattningsskärmar måste vara mjuk för att undvika skador och dödlighet för fisken och ju lägre hastighet vattnet har desto effektivare blir avvattningen. Avvattningsskärmarna kan placeras både i underkant och längs sidorna, men om avvattning längs sidorna är tillräckligt är det att föredra. Avvattningsdelen är flackare än rännan och avsmalnande, som en anpassning till den minskade mängden vatten längs skärmarna och för att vattendjupet ska förbli ungefär detsamma längs hela avvattningsenhetens längd. Lite vatten bör alltid rinna över skärmarna så att inte fisk blir torrlagda och fastnar där, men för att ytterligare minska

risken för torrläggning bör vattensprutor monteras över skärmarna för att säkerställa att de alltid är fuktiga.

Det finns i huvudsak två sätt att kontrollera avvattningshastigheten, antingen genom flödeskontrollerande reglerbara plåtar under skärmarna eller genom att alternera skärmarnas lutning eller genom en kombination av de två (Meyer, 2013). Det krävs vanligen omfattande intrimning innan funktionen är tillfredsställande. Efter avvattningen är det önskvärt att endast 1-2 cm vattendjup återstår i slutet av avvattningen, vilket innebär att skärmarna måste vara helt släta så ingen skada uppstår på fisken.

Vid slutet av avvattningsenheten går återstående vatten genom ett system som skiljer vatten och smolt från stor fisk och skräp. Denna del består av en serie släta rör/järn (ø = 38 mm) orienterade parallellt med flödesriktningen och sådana lösningar i drift har ofta 3,2 mm spaltvidd. Avskiljaren bör vara ungefär 2,5-3,0 m lång och ha 10 % lutning, men detta måste prövas ut för att smolt ska falla ner i spalterna och stor fisk och skräp ska sköljas förbi och landa i en separat tank vid avskiljarens slut. Det är inte önskvärt att blanda smolt och kelt eftersom det är vanligt att kelt äter smolt när tillfälle ges (muntligen Stefan Stridsman).

Från respektive kammare leder en trumma ner till hållningsbassänger placerade ovanpå turbinutloppet. Bassängerna genomsköljs av vatten från ovan nämnda uppsamlingsbehållare och nivå hålls konstant genom breddavlopp. Vid transport sänks nivåerna i bassängerna till en nivå som medger förflyttning av bassäng med fisk med kran till en väntande lastbil.

Drivgods och is

Ett problem med fingaller är att det ansamlas stora mängder drivgods och is, i synnerhet när det handlar om anläggningar som Edsforsen där området uppströms utgörs av en lång ofragmenterad sträcka och stora sjöar/dammar saknas. Driftpersonalen vid Edsforsens kraftverk har stor erfarenhet av de problem som uppstår vid just på denna plats, varför deras erfarenheter varit helt avgörande för resonemanget nedan.

En automatisk rensmaskin som håller rent gallret (-n) är en nödvändighet, men utöver det är det även lämpligt att planera för ytterligare en konstruktion som stoppar grovt drivgods. Dess utformning påverkas av vilken åtgärd som väljs. För åtgärdsförslag 2, 4 och 5 vore det lämpligt med en flytande ytläns uppströms turbinintaget och respektive avledare, för att leda grovt drivgods mot någon av spilluckorna där de kan spillas ut och tas om hand vid Skoga kraftverk alternativt tas om hand på plats. För åtgärdsförslag 1,3 och 6 kan man utnyttja den nya förlängningen av intagskanalen för att montera ett grovgaller i dess längst uppströms belägna del. Drivgods som ansamlas där måste precis som i dag regelbundet tas bort, åtminstone under perioder med stor transport. Ytterligare en variant av skräpgaller är att placera ett sekundärt fällbart α-galler ett stycka nedströms flyktöppningen i passagen (Norconsult, 2014), som endast fälls ner i vattenvägen i anslutning till att rensmaskinen avslutat en renscykel. Sammantaget kan

sägas att det är av avgörande betydelse att dessa länsar och grovgaller inte påverkar avledarens funktion negativt.

Man bör utreda möjligheterna till att även i framtiden skydda intaget för att minska isproblemen på intagsgallren. Man måste dock vara medveten om att fisk kan tveka att passera in mot flyktöppningen om denna är placerad under någon form av täckande struktur, varför det vore fördelaktigt att kunna välja mellan att ha taket öppet eller stängt.

Åtgärdsförslag 1 – α-avledare

Fysiska åtgärder av α-typ är en av två tekniker som implementerats och utvärderats med gott resultat vid svenska kraftverk (Calles *et al.*, 2013b; Kriström *et al.*, 2010). Tekniken har inte tidigare testats för ett kraftverk av Edsforsens storlek, men det som begränsar teknikens användande är främst att gallret inte får vara längre än att man kan hålla det rent med en automatisk rensmaskin, vilket enligt uppgift innebär en maxlängd på 12-13 meter (Michel Larinier, muntligen). Ett låglutande intagsgaller med 30° lutning i förhållande till botten kommer att om det placeras direkt framför dagens intagsgaller att bli drygt 15 m långt, vilket sannolikt blir för långt för goda driftförhållanden. Ett låglutande intagsgaller med 35° lutning kommer under samma förhållanden att bli drygt 13,3 m långt, vilket borde vara teknisk möjligt att rensa med en automatisk rensmaskin. Om ett separat galler anläggs för respektive turbinintag kommer de således bli 13,3 meter långa och 11,4 m breda, vilket ger en total yta på 151,6 m^2 per intag och ett V_A på 0,63 m/s vid ett flöde på 95 m^3/s per turbin. Om ett brett galler anläggs för båda turbinintagen kommer även det att bli 13,3 meter långt men 25,6 m brett, vilket ger en total yta på 340,5 m^2 och ett V_A på 0,56 m/s vid ett flöde på 95 m^3/s per turbin. För att gallren ska få plats och för att rensmaskinen ska fungera utan att hindra nyttjandet av körbanan ut på dammen och lämna plats för nyttjandet av bågsättarna (KFS AnläggningsKonstruktörer, 2016), måste två cirka 20 m långa stödmurar anläggas från turbinintagets ytterkanter (Figur 7).

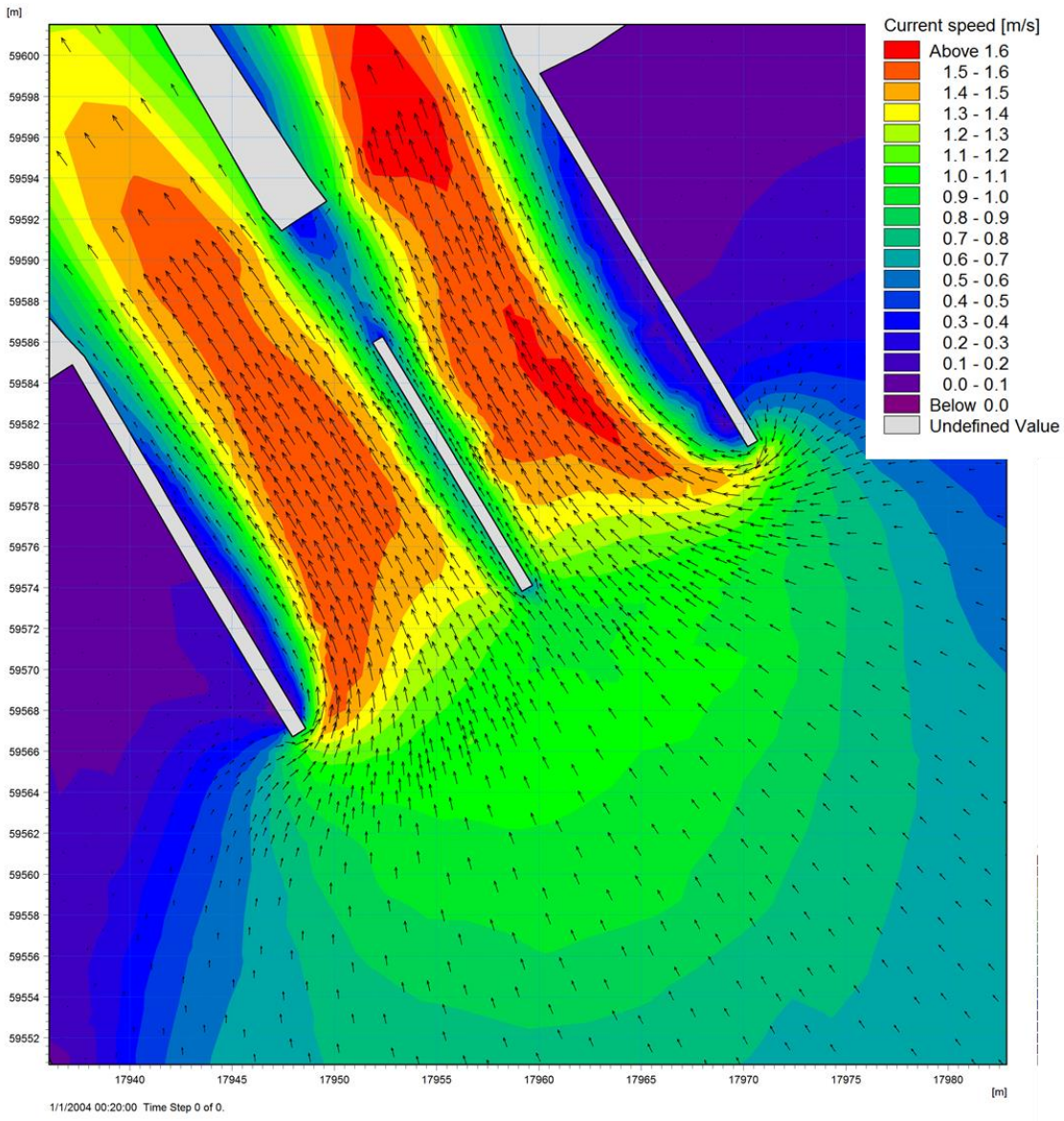
I båda fall behöver α-gallren förses med flyktöppningar, enligt franska riktlinjer en på varje sida av gallret plus en var tionde meter (Larinier, 1996). Applicerat på de två varianterna av åtgärdsförslag 1:

1. Två smala α_{35}-galler med totalt fyra flyktöppningar i de två gallrens ytterkanter
2. Ett brett α_{35}-galler med totalt tre flyktöppningar placerade i gallrets ytterkanter och i dess mitt

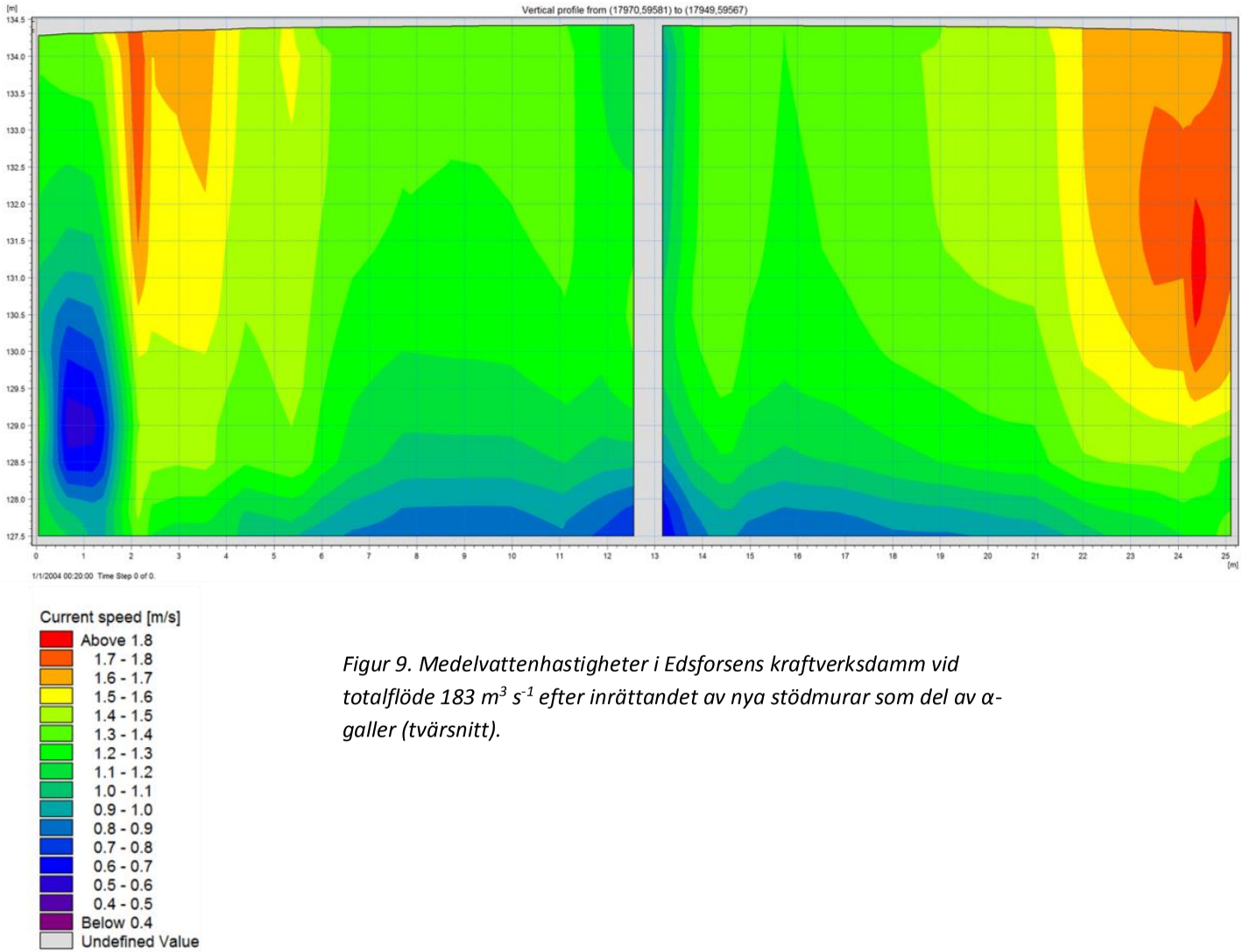
För båda lösningarna gäller att varje flyktöppning är 1 x 1,5 m, avsmalnande och med sidmonterade justerbara hydrauliska luckor för att möjliggöra separat flödesstyrning för de olika öppningarna. Efter flödeskontrollen sker en acceleration vilket gör att fisken inte kan vända tillbaka. Därefter övergår rännorna med öppet tak till trummor som svänger av åt höger, mot timmerluckan. Trummans svängradie bör vara minst 3 m (Turnpenny *et al.*, 1998), vilket innebär att avståndet från gallrets överkant till sättarnas placering för torrläggning av turbinhuset ska vara >3 m.

Figur 7. Principutformning för α-galler Edsforsens kraftverk (Norconsult, 2014).

Hydraulisk modellering motsvarande full körning i turbinerna och flyktöppningarna för de föreslagna α-gallren visar på extremt höga vattenhastigheter i de två intagen, i synnerhet det högra (östra; Figur 8 & 9). Värt att notera att varken gallret eller flyktöppningar och passageränna finns inkluderade i körningen och därmed illustreras inte den effekt passagerännans hindrande effekt har på inströmmande vatten.



Figur 8. Medelvattenhastigheter och hastighetsvektorer i Edsforsens kraftverksdamm vid totalflöde 183 $m^3 s^{-1}$ efter inrättandet av nya stödmurar som del av α-galler (planvy).



Figur 9. Medelvattenhastigheter i Edsforsens kraftverksdamm vid totalflöde 183 $m^3 s^{-1}$ efter inrättandet av nya stödmurar som del av α-galler (tvärsnitt).

Åtgärdsförslag 2 – β-avledare

Fysiska åtgärder av β-typ har endast implementerats vid två kraftverk i Sverige, och utvärderingen av åtgärden vid Hertings kraftverk i Ätran visade såväl goda driftsförhållanden som mycket hög passageeffektivitet för laxsmolt, laxkelt och blankål (Calles *et al.*, 2015; Nyqvist *et al.*, 2017b). Sådana lösningar finns planerade för fler kraftverk och dessutom sker experimentella studier av deras funktion under 2017 och således kommer kunskapen om dem att förbättras. Det största kraftverk som tekniken testats vid är Raguhns kraftverk i Mulde, Tyskland, där kraftverket har slukförmågan 88 m^3/s. Vid detta kraftverk saknas en kvantitativ utvärdering av den fiskavledande funktionen, men åtgärden har dokumenterat god funktion vad gäller kvalitativ fiskavledande funktion och drift vid anläggningen (Ebel, 2013).

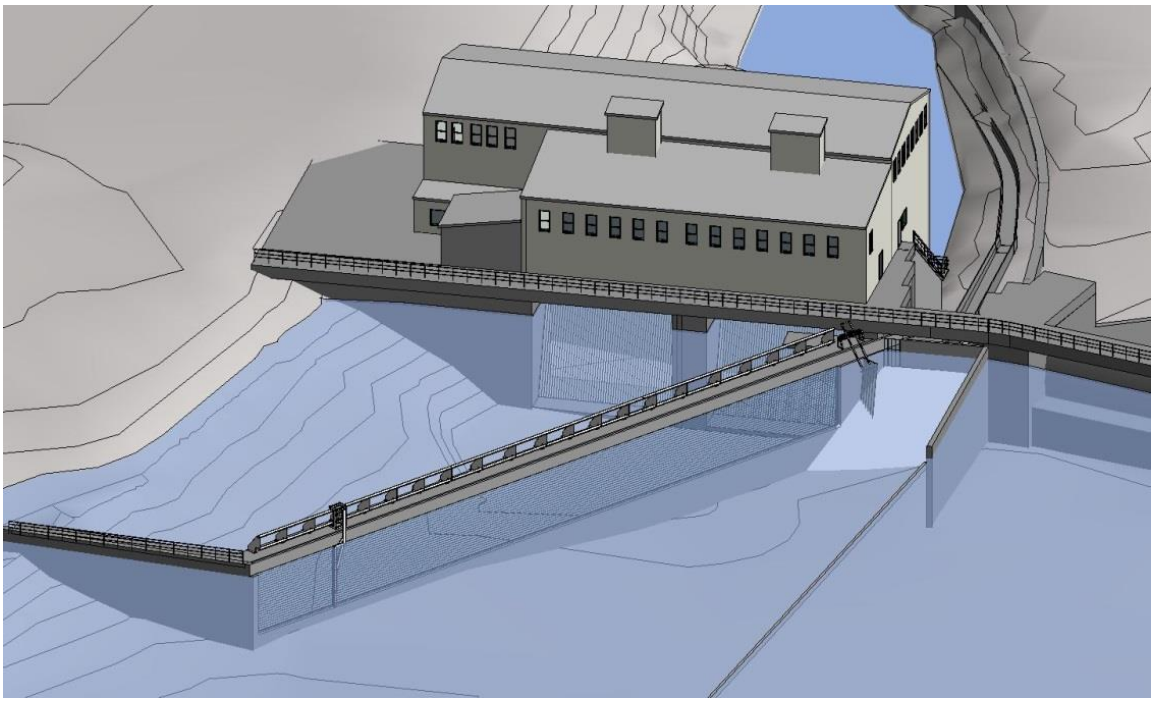
Eftersom en avgränsad intagskanal saknas vid Edsforsens kraftverk, kommer den funktionella vinkeln för ett β- galler som placeras där att bero på den huvudsakliga strömriktningen. I åtgärdsförslag 2 utgår vi från att båda turbinerna går på full kapacitet och att inget spill förekommer.

För att åstadkomma en V_A kring 0,6 m/s behövs en galleryta motsvarande:

$$190/0{,}6 = 317\ m^2$$

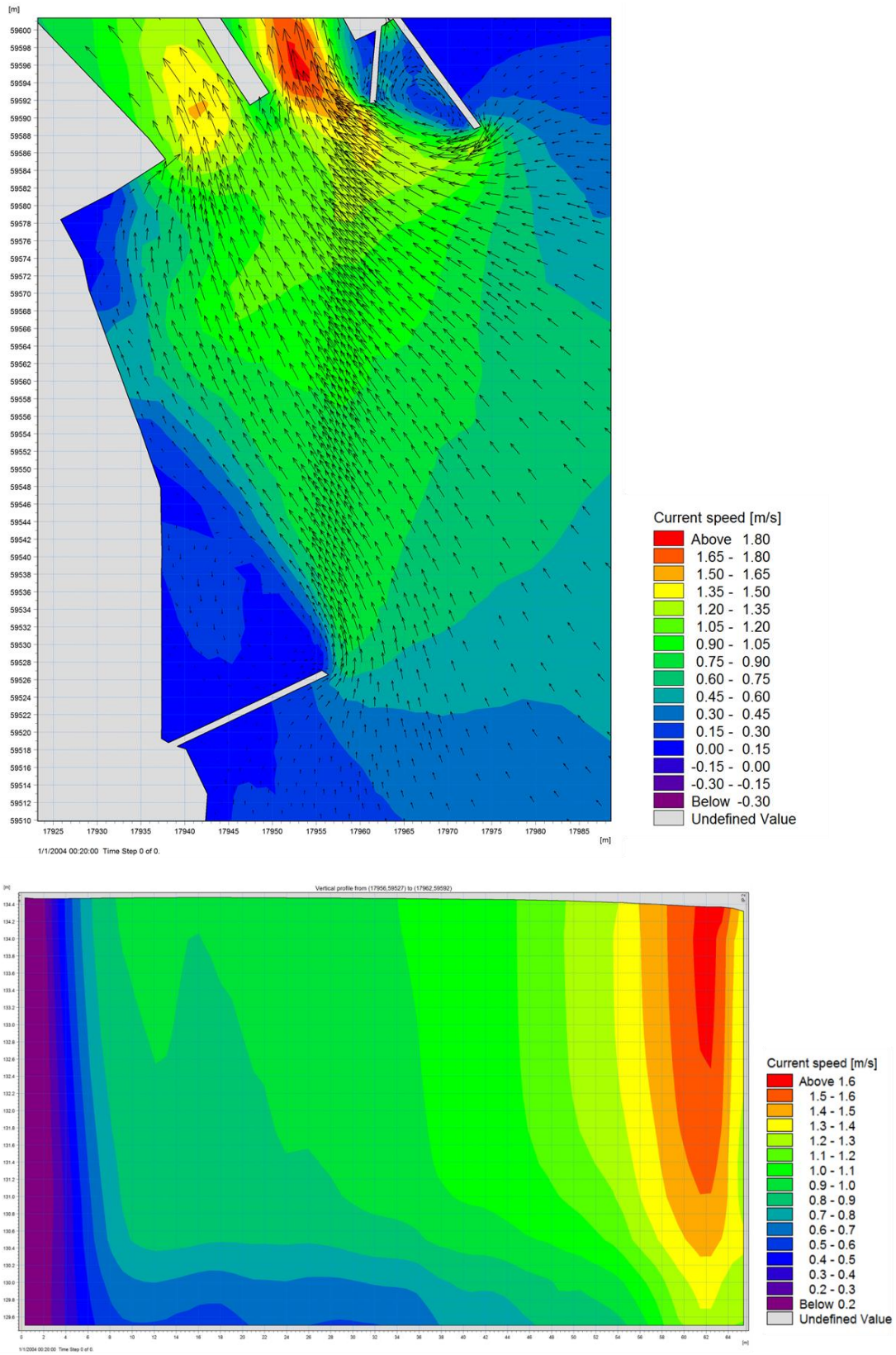
Enligt djupkartorna är bottennivån 128-130 m.ö.h. i det område där en β-avledare kan komma ifråga, vilket motsvarar ett djupintervall om 4,5-6,5 m vid vattennivån 134,5 och följaktligen 5,5-7,5 m vid vattennivån 135,5. Det är inte lämpligt att ha ett uppstickande galler vintertid, eftersom det sannolikt försvårar isproblemen vid kraftverket genom att gallret och stödstrukturer leder ner kylan i vattnet. Om vi antar att nivån 135,00 m.ö.h. råder under större delen av vintern, vilket man eftersträvar, kommer således att djupintervallet uppströms turbinintaget att vara 5-7 m.

Ett 5 m djupt galler med den totala arean 317 m^2 kommer således att bli 63,3 m långt och leda till det som i dag är sektorlucka 1, flottningsluckan (Figur 10). Som jämförelse är β-gallret vid Raguhns kraftverk 4,5 m djupt och således finns information att inhämta om rensmaskinens utformning och funktion (Ebel, 2013). Flottningsluckans utformning kommer att behöva modifieras för att utgöra en funktionell flyktöppning, vilket bl.a. består i att skapa en gradvis accelererande vattenström med minsta möjliga turbulens. Erfarenheter från när detta utskov använts för fiskfångst tyder på att vattendjupet inte är tillräckligt för goda passageförhållanden vid låga nivåer. Dessutom skapar det skarpa dammkrönet en uppåtriktad ström framför utskovet, vilket tenderar hindra fisk från att passera (DWA, 2005b). Utskovet behöver därför förses med en ramp som med låg lutning leder från botten till utskovets krön, samt att själva flyktöppningen är trattformad och smalnar av enligt anvisningar ovan, men att den som smalast är cirka två meter bred och ungefär en meter djup. Det beräknade flödet blir då 4,8 m^3/s om man utgår från den rekommenderade ”fångsthastigheten” på 2,4 m/s. Rampen har låg lutning (≤30˚) och leder från botten till utskovets krön. Rampen bör vara minst 7 m lång, både utifrån α=30˚ och rekommenderad maximal acceleration.



Figur 10. Principutformning för enkelt β-galler vid Edsforsens kraftverk (Norconsult, 2014).

Vinkeln mellan avledaren och vattnets flödesriktning är svår att teoretiskt bestämma till följd av dammens utseende, men preliminära hydrauliska modeller indikerar att den skulle bli 45-65° (Figur 11). Vinkeln som sådan är inte optimal för fiskavledning, men förutsatt att hydrauliken i flyktöppningen förbättras förväntas ändå funktionen bli godtagbar. Ett sätt att åstadkomma detta är att optimera utformningen av stödmuren (entrainment wall) belägen mellan flottningsluckan och timmerslussen, möjligen genom att förlänga den ytterligare (se ”Åtgärdsförslag 5 – Modifierad β-avledare”).

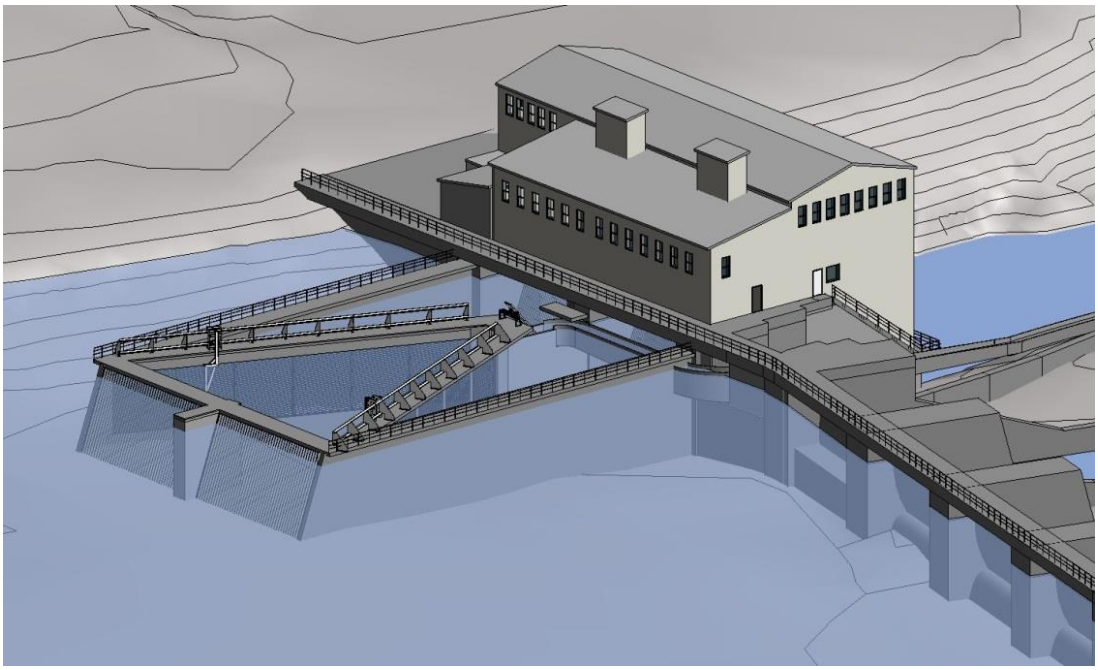


Figur 11. Medelvattenhastigheter och hastighetsvektorer i Edsforsens kraftverksdamm vid totalflöde 183 $m^3 s^{-1}$ efter inrättandet av nya stödmurar för som del av α-galler; A) från ovan, samt B) i ett tvärsnitt direkt uppströms det nya gallret. Nivå 134,50 m.ö.h.

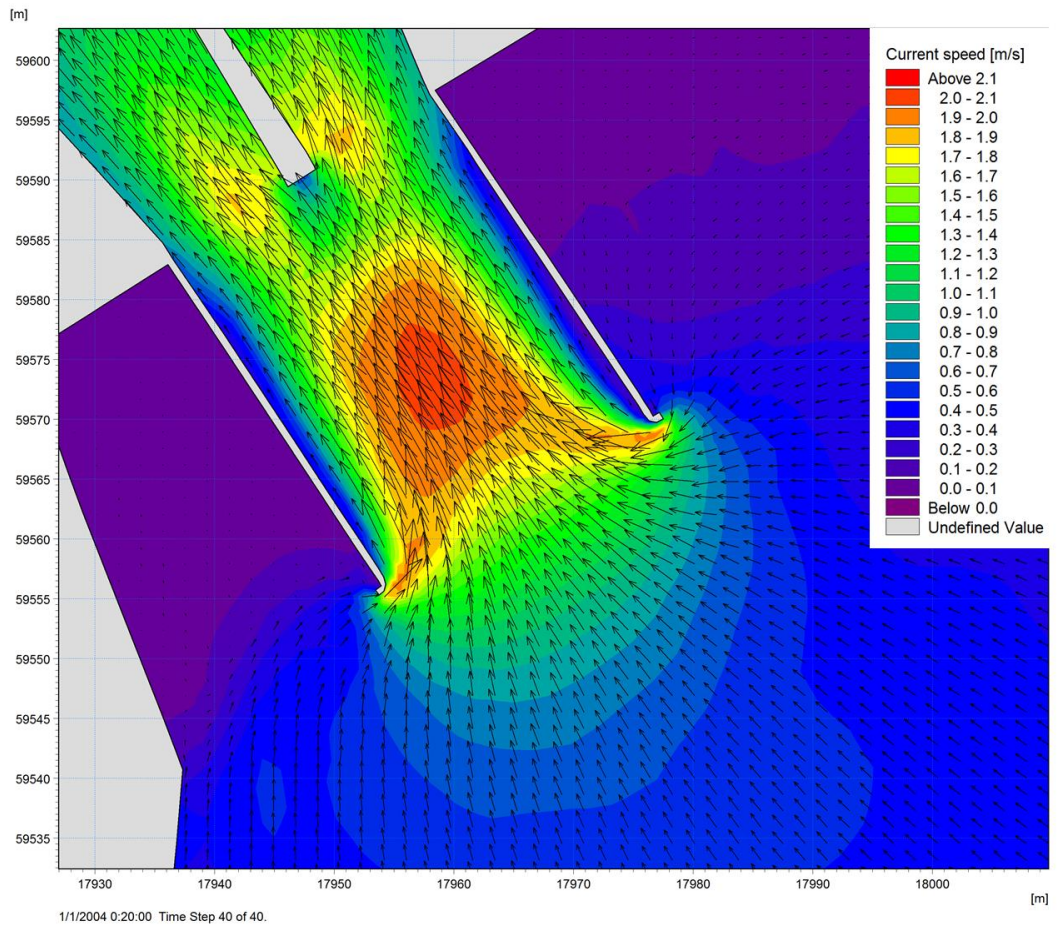
Åtgärdsförslag 3 – dubbel β-avledare

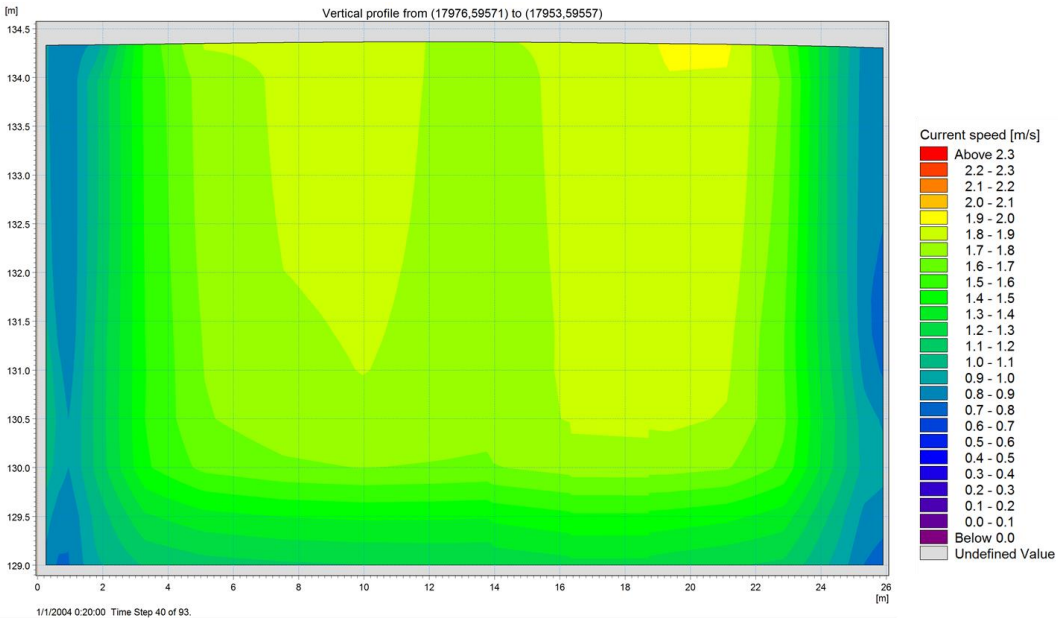
En åtgärd av β-typ med dubbla galler (V-form) innebär främst att konstruktionen inte når lika långt ut i dammen och att avståndet från gallrets längst uppströms belägna del till flyktöppningen halveras. Dessutom underlättas anläggningsarbetet eftersom en mindre fångdamm behöver anläggas. Liknande lösningar finns i Tyskland vid ett litet kraftverk i Oderwitz, Tyskland, men anläggningen har en slukförmåga om 7,5 m^3/s (Ebel, 2013). Desto vanligare är denna typ av V-formade avledarkonstruktioner i Nordamerika (Meyer, 2013), där de främst används just för att minimera gallerlängden till flyktöppningen och för att leva upp till kraven om maximalt 60 sekunders ”drifttid” för fisk som passivt följer med vattenströmmen (NMFS, 2011).

Enligt redan redovisat resonemang för dimensionering av ett enkelt β-galler, behövs en galleryta motsvarande 317 m^2 för att åstadkomma en $V_A \approx 0{,}6$ m/s. Två likstora 5 m djupa galler med den totala arean 317 m^2 kommer således att bli 31,7 m långa (Figur 12 & 13). Om vinkeln är β=30˚ och intagets bredd bibehålls får dock inte så långa galler plats, då krävs en längre intagskanal och resulterar i β≈22˚. Om man istället utgår från intagets bredd samt lämnar utrymme för en 1,5 m bred flyktöppning (25,6 – 1,5 m), kommer gallrens maximala längd att bli 24 m. Detta ger den totala gallerytan 241 m^2 och $V_A = 0{,}79$ m/s, men om gallren kan göras 6 m djupa blir $V_A = 0{,}66$ m/s, vilket ligger närmare önskvärt V_A.



Figur 12. Principutformning för dubbelt β-galler vid Edsforsens kraftverk (Norconsult, 2014).





Figur 13. Medelvattenhastigheter och hastighetsvektorer i Edsforsens kraftverksdamm vid totalflöde 183 $m^3 s^{-1}$ efter inrättandet av nya stödmurar för dubbel-ß-galler; A) från ovan, samt B) i ett tvärsnitt i kanalens inlopp. Nivå 134,50 m.ö.h.

Mellan gallren lämnas 1,5 m bredd till flyktöppningen som föregås av en ramp som med låg lutning (≤30˚) leder från botten till utskovets krön. Flyktöppningen är trattformad och smalnar av till de minsta dimensionerna 1,5 x 1,5 m. Det beräknade flödet blir då 3,6 m^3/s om man utgår från den rekommenderade ”fångsthastigheten” på 2,4 m/s. Accelerationen skall ske längs en minst 7 m lång ramp, både utifrån α=30˚ och rekommenderad maximal acceleration. Om snävaste svängradie är 3 meter innebär det att rampen och den första svängda delen av flyktöppningen och förbipassagen blir åtminstone tio meter lång.

Åtgärdsförslag 4 – Beteendeavledare

För bästa fiskavledande funktion rekommenderas fysiska barriärer, eftersom funktionen är säkrare och inte artspecifik (Larinier and Travade, 2002). I vissa fall kan dock beteendeavledare vara tillräckligt för en tillfredsställande funktion och de innebär dessutom ett mindre och reversibelt ingrepp i anläggningen och är vanligen mindre kostsamma. Flottningsluckans utformning kommer att behöva modifieras för att utgöra en funktionell flyktöppning, på samma sätt som för alternativet med en enkel β-avledare.

Åtgärdernas förväntade funktion – tappning och hydraulik

Åtgärdernas funktion kommer bero på en rad olika faktorer, men förenklat kan man förvänta sig att andelen individer som vandrar mot turbinintaget och därmed avledaren är direkt beroende av relativt flöde genom kraftverket. Med andra ord kan man förvänta sig att hälften av fisken passerar kraftverket via spilluckorna om motsvarande hälften av flödet spills. För att analysera den teoretiska effektiviteten för avledaren behöver man således identifiera de mest intensiva vandringsperioderna. Utifrån studier på lax i Klarälven har de mest intensiva vandringsperioderna förenklat identifierats som mars – juli och oktober-november (Gustafsson *et al.*, 2015; Nyqvist *et al.*, 2015). Under antagandet att fiskens vägval styrs av flödesfördelningen mellan kraftverket och spilluckorna samt att samtliga dessa individer fullföljer en passage längs vald väg, kan en teoretisk effektivitet beräknas. Sådana beräkningar har utförts på fyra scenarier enligt:

i. faktiskt relativt turbinflöde vid Edsforsen 2003-2009
ii. som ovan men med tillägget att ytterligare 5 m^3/s antas gå via avledarens flyktöppning (-ar) och därmed minskar spillets omfattning med 5 m^3/s
iii. antagen full körning i kraftverket med 195 m^3/s, med 190 m^3/s genom turbinerna samt 5 m^3/s genom bypass uttryckt som andel flöde (och därmed fisk) genom avledaren
iv. som iii) men uttryckt som andel flöde relaterat till den dagliga relativa smoltfångsten under 2013 respektive 2014

Den predikterade fångsten blir att mellan 76 % och 100 % av smolten skulle vandra mot en avledare vid Edsforsens kraftverk, med merparten av de skattade värdena >80 % (Tabell 4 och Figur 14). Det enda avvikande lägre värdet noterades för scenarie ”iv”, där antalet fångade smolt var högt vissa dagar med höga flöden, och därmed en hög andel spillvatten, vilket är förväntat eftersom vandringstoppar oftast inträffar i anslutning till högflöden. Dessutom innehåller smoltfångstdatan luckor under de perioder flödet varit

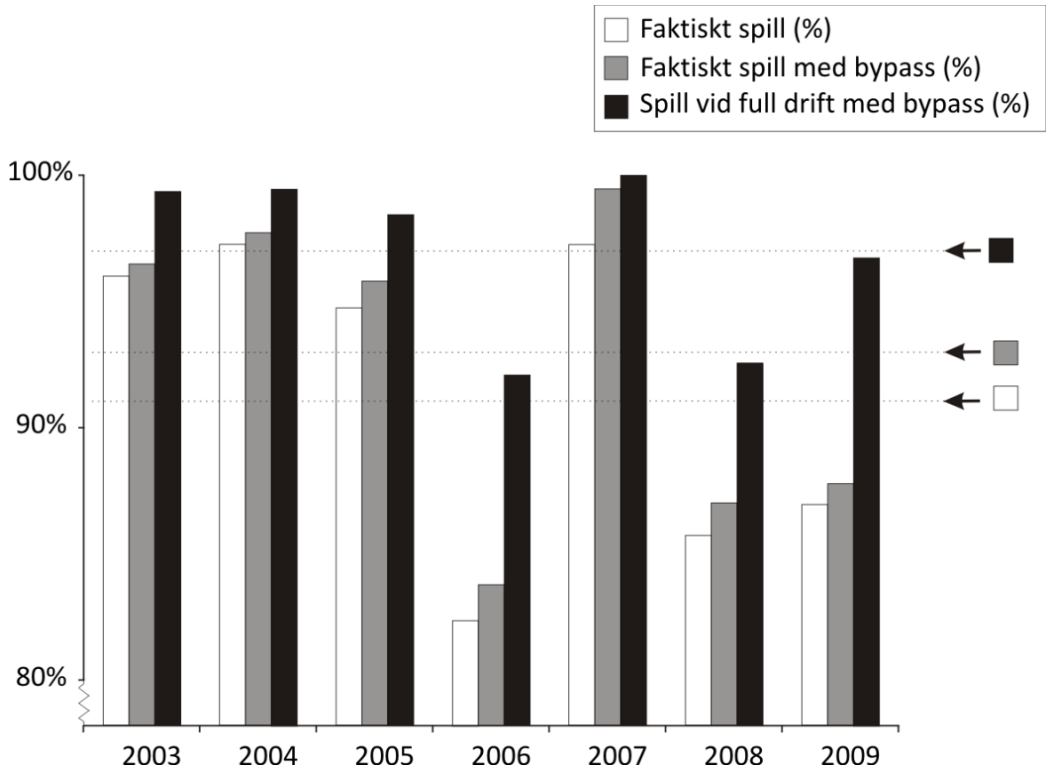
som högst, till följd av svårigheter att behålla smoltfällan i drift vid högflöden. Således kan man förvänta sig att den teoretiska avledareffektiviteten skulle vara lägre under högflödesår. Detta belägger ytterligare behovet av ytterligare åtgärder och/eller tappningsstrategier vid flöden som överstiger kraftverkens slukförmåga, vilket diskuteras ytterligare i stycket ”Sekundära åtgärdsförslag”.

Tabell 4. Teoretisk smoltfångsteffektivitet för avledare vid Edsforsens kraftverk under fyra olika scenarier. Avledarens effektivitet presenteras som medelvärde (min-max).

Scenario	Data	Avledarens effektivitet
i. Relativt turbinflöde	Flödesdata 2003-2009	91 % (82-97 %)
ii. Relativt turbinflöde + 5 m^3/s genom bypass	Flödesdata 2003-2009	93 % (84-99 %)
iii. Optimerad körning I	Flödesdata 2003-2009	97 % (92-100 %)
iv. Optimerad körning II	Flödesdata 2013-2014 Smoltdata 2013-2014	2013: 98 % 2014: 76 %

Sekundära åtgärdsförslag

Oavsett vilken åtgärd som implementeras vid Edsforsen för att leda av och samla ihop nedströmsvandrande fisk, så kommer en viss andel av fisken fortfarande att passera kraftverket. Sannolikt kommer det främst inträffa när stora mängder vatten av någon anledning spills förbi kraftverket (Nyqvist *et al.*, 2017a; Nyqvist *et al.*, 2016), vilket bör undvikas just vid Edsforsens kraftverk när en avledare med uppsamling uppförts. Efter att en åtgärd implementerats vid Edsforsens kraftverk kommer det således var av yttersta vikt för åtgärdens funktion att kraftverket alltid körs för fullt. Det finns flera sätt att försöka minimera den negativa effekten av vuxen fisk som passerar Edsforsens kraftverk, antingen genom att slussa dem vidare nedåt i systemet, fånga dem längre nedströms för transport eller möjliggöra uppströmspassage av Edsforsens kraftverk för fisk som befinner sig nedströms kraftverket före lek.



Figur 14. Predikterad passageeffektivitet för åtgärd vid Edsforsens kraftverk för tre scenarier baserat på flödesdata (timvisa data, 2003-2009, Fortum). Pilarna anger medelvärdet för respektive scenario.

Koordinerat spill vid kraftverk 1-9

När totalflödet i Klarälven överstiger slukförmågan vid Edsforsens kraftverk och vatten spills genom utskoven i gamla fåran, kommer slukförmågan vid de nedströmsliggande kraftverken att överstigas i ungefär samma omfattning, eftersom kraftverkens slukförmåga i princip är dimensionerade till det ökade årsmedelflödet med minskat avstånd till Klarälvens mynning (Tabell 5). Dvs. vissa av kraftverken nedströms har en större slukförmåga än Edsforsen, men även ett högre årsmedelflöde.

Vid ett hypotetiskt totalflöde på 210 m^3/s vid samtliga kraftverk och full körning i samtliga kraftverk kommer kraftverken nedströms Edsforsen att spilla lika mycket, eller mer, vatten som Edsforsens kraftverk (Tabell 5). Det är då av yttersta vikt att detta spillflöde tappas på ett sätt som optimerar passagemöjligheterna vid kraftverken. Enkelt uttryck bör man se över vilka spillutskov som är bäst lämpade för fiskars nedströmspassage vid de olika kraftverken, ofta i form av yttappade luckor. Vid de flesta kraftverken finns timmerrännor och timmerslussar som inte längre används, men som till följd av dess utformning och lokalisering i de flesta fall är den bästa möjligheten att kombinera spill med fiskpassage. Vid vissa av kraftverken saknas lämpliga spillutskov och det kan därför vara nödvändigt att skapa sådana lösningar. Vid en översiktlig bedömning av möjligheterna till fiskpassage via befintliga spilluckor bedöms förutsättningarna för spillpassage vara intermediära-goda för fyra av kraftverken och dåliga för resterande fyra kraftverk (Tabell 5). En viktig del av arbetet med sekundära åtgärdsförslag är därför att ta

fram åtgärdsförslag för hur spillpassage kan förbättras vid kraftverken, i synnerhet de som bedömts ha dåliga förutsättningar. Tappningen vid de olika kraftverken måste koordineras för att maximera både produktion och fiskpassage. Slutligen kan konstateras att den förväntade dödligheten vid turbinpassage är förhållandevis låg för smolt (medel 4 %/kraftverk, 28 % totalt), men desto högre för kelt (medel 22 %/kraftverk, 86% totalt)(Stålered and Bard, 2015). Värt att notera är att den predikterade turbindödligheten är lägre än den som dokumenterats vid empiriska studier i Klarälven för såväl smolt (Norrgård *et al.*, 2013; Bergman & Norrgård, 2015) som kelt (Nyqvist *et al.*, 2015).

Uppsamlingsanläggning 2

Ett annat sätt att angripa problemet med spillpassage vid Edsforsens kraftverk vore att anlägga ett andra uppsamlingssystem som fångar de fiskar som passerar Edsforsen. Behovet av en sådan anläggning fastställs lämpligen efter uppförande, inkörning och utvärdering av anläggningen vid Edsforsens kraftverk. Bedöms funktionen för denna anläggning vara tillräcklig, eventuellt i kombination med koordinerad spilltappning vid kraftverk 1-7, kommer en andra uppsamlingsanläggning inte vara nödvändig att uppföra. Möjliga sekundära uppsamlingsanläggningar beskrivs kortfattat nedan.

Timmerslussen vid Edsforsen är yttappad och har en hög slukförmåga (105-167 m^3/s, Tabell 1). Det vore teoretiskt möjligt att anlägga en Wolf-fälla (Wolf, 1951) i detta utskov som primärt används vid spillflöde och där den fisk som fångas kan föras via en ränna till den uppsamlingsanläggningen för den primära uppsamlingen. Man behöver då även planera för att inte nämnvärt minska dammens totala avbördningsförmåga för att vid högflöden kunna stänga fiskfångsten och enbart avbörda vatten genom utskovet. Ett andra alternativ är att uppföra en anläggning vid Skoga kraftverk, av samma typ som vid Edsforsen. Bedömningen är att detta sannolikt är enklare att åstadkomma vid Skoga, eftersom anläggningen passar något bättre för detta ändamål och problemet med drivgods och drivis bör vara mindre där.

Ytterligare ett alternativ är att under intensiva vandringsperioder med mycket spill anlägga en tillfällig fångstanordning mellan Edsforsen och Skoga. En sådan lösning skulle kunna bestå i t.ex. en ryssja av den sort som tidigare använts för smoltfångst uppströms Edsforsen (Bergman *et al.*, 2015).

Tabell 5. Bedömning av spillpassagemöjligheterna vid de sju kraftverk belägna nedströms Edsforsens kraftverk i Klarälven grundat på egna observationer samt Norrgård et al. (2013) och Gustafsson et al. (2015). Hypotetiskt spillscenario utgår från ett flöde på 210 $m^3 s^{-1}$ vid Edsforsen samt att samtliga kraftverk körs för fullt, dvs. turbinerna tar in motsvarande slukförmågan.

Kraftverk (#)	Årsmedelflöde ($m^3 s^{-1}$)	Slukförmåga ($m^3 s^{-1}$)	Hypotetiskt spillscenario	Förutsättningar spillpassage
Edsforsen (8)	129	195	15	Dåliga om spill fördelas mellan bottentappade luckor
Skoga (7)	131	180	33	Intermediära/goda – intermediärt spill och relativt god placering av timmerränna
Krakerud (6)	151	220	26	Dåliga, intermediärt spill och timmerränna ur drift sedan ca. 20 år och belägen långt från turbinintag
Forshult (5)	151	230	16	Dåliga, lågt spill och timmersluss belägen långt från turbinintag
Skymnäs (4)	152	180	67	Intermediära/goda – högt spill och relativt god placering av timmerränna
Munkfors (3)	153	235	14	Intermediära/goda – lågt spill men god placering av isutskov
Dejefors (2)	158	238	19	Dåliga, lågt spill, timmerränna belägen långt från turbinintag
Forshaga (1)	162	165	99	Goda, högt spill och timmerränna mellan turbinintag

Uppströmspassage Edsforsen

Alla individer som passerar Edsforsen i dag är inte aktivt nedströmsvandrande individer, utan vissa passerar sannolikt nedströms av misstag. T.ex. har man noterat att en betydande andel av lekfisken, som fångas och transporteras från Forshaga och sätts ut i Ekshärad, passerar nedströms innan avslutad lek (Hagelin *et al.*, 2016; Nyqvist *et al.*, 2015). I flera fall har sådana individer sedan försökt komma tillbaka uppströms Edsforsen (Nyqvist *et al.*, 2015), vilket misslyckats eftersom fiskväg för uppströmspassage saknas. Det kan därför vara motiverat att göra det möjligt för fisk nedströms Edsforsen att simma förbi kraftverket och återvandra till området mellan Edsforsen och Höljes. Denna fångst åstadkommes sannolikt lämpligast genom att under en inledande fas driftsätta en fälla för analys av fångst och manuell upptransport. Skulle behovet då konstateras vara stort, kan man därefter anlägga en fiskväg så att fisken kan passera kraftverket utan mänsklig hantering.

1.1 Värdering och rangordning av åtgärdsalternativ 1-4

Norconsult (2014) har rangordnat alternativen enligt 1) β-avledare, 2) beteendeavledare, samt 3) dubbel-β-avledare och α-avledare. Till grund för denna rangordning har följande faktorer tilldelats samma betydelse:

- ✓ Anläggningsteknik
- ✓ Fångdamm
- ✓ Rensanordning
- ✓ Funktion – fisk
- ✓ Funktion – drift
- ✓ Kostnad

Om man använder samma bedömningar, men tillmäter samma betydelse för funktionen för fisk och sammantaget för drift/anläggning/kostnad, blir ordningen istället:
1) β-avledare, 2) dubbel-β-avledare samt 3) α-avledare och beteendeavledare.
Denna prioritetsordning stämmer bättre överens med vår bedömning, där följande för- och nackdelar speciellt beaktats:
En β-avledare bedöms få en god funktion för fisk, eftersom lösningen innebär att man på en optimal plats anlägger en stor flyktöppning med ett omfattande flöde. En nackdel är att det blir en lång längsta sträcka från gallrets ände till flyktöppningen. Det enda som skyddar gallret från drivgods och is är en ytläns, vilket kan bli ett problem med tanke på Edsforsens utsatta läge. Hydrauliska modelleringar illustrerar att inströmningsgeometrin kan bli ett problem, eftersom den teoretiskt låga vinkeln mellan huvudströmmen och gallret inte realiseras till följd av kraftverksdammens batymetri.
En dubbel β-avledare bedöms få en ännu bättre funktion för fisk, eftersom lösningen innebär att man på en optimal plats anlägger en stor flyktöppning med ett omfattande flöde och dessutom halveras sträckan från gallrets ände till flyktöppningen jämfört med β-avledaren. Det finns goda möjligheter att skydda fiskgallret från drivgods och is med hjälp av ett grovgaller i inloppet till den nya intagskanalen. Nackdelarna är att tekniken är obeprövad under ”mellansvenska förhållanden” och att inströmningen till det ena intaget begränsas av den ytligt placerade avledaren. Dessutom inbegriper åtgärdsalternativet en passageränna som måste vika av kraftigt direkt efter flyktöppningen, för att lyckas leda vatten och fisk till timmerrännan. Hydrauliska modelleringar illustrerar extremt höga

vattenhastigheter i den nya intagskanalens centrum, vilket tyder på att intaget måste breddas och/eller fördjupas för att en sådan avledare ska fungera.

En α-avledare bedöms få en god funktion för fisk och sträckan från gallrets ände till flyktöppningen är kortast av alla åtgärdsalternativ, i synnerhet för ytorienterad laxfisk. Dessutom finns goda möjligheter att skydda fiskgallret från drivgods och is med hjälp av ett grovgaller i inloppet till den nya intagskanalen. Tekniken är beprövad under ”svenska förhållanden”, men inte så långt norrut som Edsforsen och inte vid ett kraftverk av denna storlek. Ytterligare en nackdel är att fisken kan välja mellan flera mindre flyktöppningar jämfört med de övriga tre alternativen, vilket kan vara speciellt negativt för stor fisk, dvs. i huvudsak lekfisk/kelt. Dessutom inbegriper åtgärdsalternativet en passageränna som måste vika av kraftigt direkt efter flyktöppningen, för att lyckas leda vatten och fisk till timmerrännan. Hydrauliska modelleringar illustrerar extremt höga vattenhastigheter i båda intagskanaleerna, i synnerhet den högra. Precis som för dubbel-β-avledaren måste intaget sannolikt breddas och/eller fördjupas för att en sådan avledare ska fungera. Slutligen begränsas inströmningen till båda intagen av den ytligt placerade avledaren.

En beteendeavledare är svårbedömd vad gäller den avledande funktionen för fisk, eftersom tidigare exempel på sådana lösningar visar på stor variation i effektivitet. Om målet är och förblir att endast avleda och samla ihop laxfisk, är möjligheterna till en god funktion bättre än om fler målarter identifieras. En fördel, precis som för β-avledarna, är att man på en optimal plats anlägger en stor flyktöppning med ett omfattande flöde. Ytterligare en fördel är att avledaren lyfts bort vintertid, vilket dock medför en betydande arbetsinsats. En nackdel är att det blir en lång längsta sträcka från gallrets ände till flyktöppningen och att det enda som skyddar gallret från drivgods och is är en ytläns, vilket kan bli ett problem med tanke på Edsforsens utsatta läge.
Ovan presenteras fyra åtgärdsförslag till en primär uppsamling vid Edsforsens kraftverk, vilket grundar sig på bedömningar från litteraturen (Calles *et al.*, 2013a), egen erfarenhet (Calles *et al.*, 2013b; Calles *et al.*, 2013d), hydrauliska modelleringar (Lahti, opublicerat, 2015-2016) samt rapporter av Meyer (2013) och Norconsult (2014). Eftersom det finns ytterst få exempel på avledare vid kraftverk av Edsforsens storlek och geografiska placering, är samtliga åtgärdsalternativ att betrakta som experimentella och förknippade med osäkerheter. Vi har därför vidareutvecklat de mest lovande åtgärdsalternativen, vilket behandlas vidare nedan.

Modifierade åtgärdsförslag för Edsforsens kraftverk

Åtgärdsalternativ 1-4 har diskuterats vidare under projektets gång med företrädare från Naturresurs rinnande vatten, Fortum, Norconsult och KFS AnläggningsKonstruktörer AB. Resultatet är att två åtgärdsalternativ befunnits vara mindre lämpliga och de kvarvarande två har förbättrats ytterligare.

Avledaren av α-typ (nr. 1) har prioriterats bort främst på grund av det stora antalet flyktöppningar och att passagen skulle ha en negativ inverkan på inströmningen till båda turbinerna. Dessutom observerades, ur ett fiskpassageperspektiv, kritiskt höga hastigheter i intagen. Beteendeavledaren (nr. 4) har prioriterats bort främst på grund av att dess funktion anses vara för osäker, i synnerhet eftersom åtgärden bör fungera för fler fiskarter än laxartade.

De åtgärdsalternativ som således kvarstått och förbättrats är β-avledare (nr. 2) och dubbel β-avledare (nr. 3), som beskrivs närmare nedan samt i rapporter av KFS AnläggningsKonstruktörer (2016) och Norconsult (2017).

Åtgärdsförslag 5 – Modifierad β-avledare

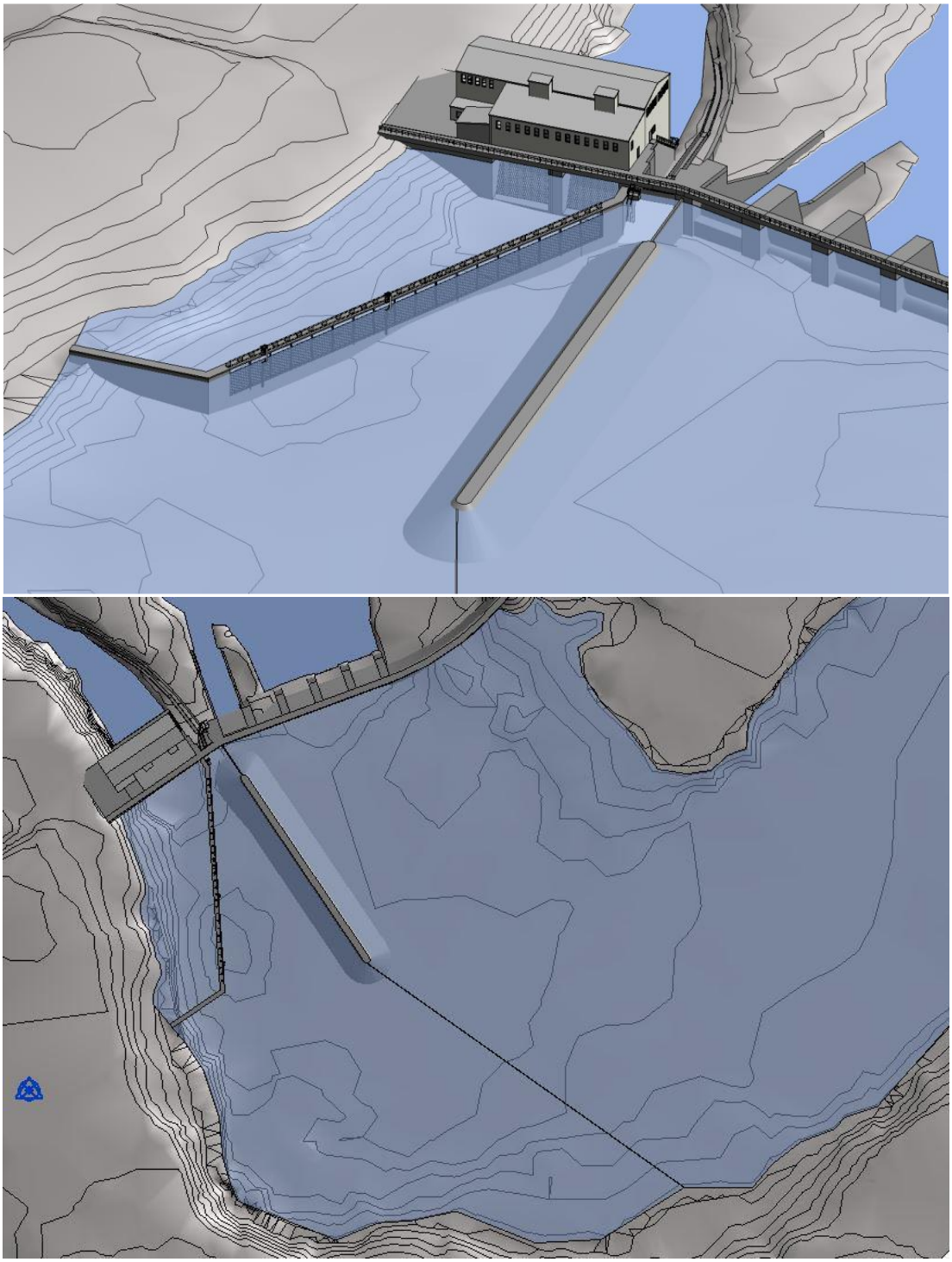
De huvudsakliga problemen med åtgärdsalternativ 2, β-avledare, var inströmningsbilden och risken med att placera avledaren utan skydd i form av ett grovgaller eller en ytläns. Inströmningsförhållandena skulle kunna förbättras genom att anlägga en stödmur längs hela avledarens högra sida, men detta bedömdes inte vara möjlig att uppföra och behandlades därför inte vid framtagandet av åtgärden. Thomas Rasmussen (KFS) föreslog då att man istället skulle kunna anlägga en stenpir/stenfyllnadsdamm mellan kraftverket och regleringsdammen (KFS AnläggningsKonstruktörer, 2016). En sådan konstruktion behöver inte vara tät så länge den är stabil och är förknippad med en betydligt lägre anläggningskostnad än en stödmur i betong. För att hindra grovt drivgods från att nå avledaren vore det mest driftsäkra att att installera ett grovgaller i det nya intagets inlopp. Detta bedömdes dock som för komplicerat och kostsamt, varvid man istället föreslagit att en ytläns ska hindra grovt drivgods från att nå fram till, och riskera att skada, den modifierade β-avledaren (Norconsult, 2017). Grovt drivgods stoppas av en ytläns som ansluts till stenpirens längt uppströms belägna del och drivgods som ansamlas kommer behöva tas om hand på plats eller spillas vidare ned till nästa kraftverk (Figur 15). Dessutom förses gallret med en automatisk rensmaskin och lämpligen även flyktöppningen med ett sekundärt rensgaller, vilka beskrivs närmare i Norconsult (2017).

Den föreslagna stenpiren är 100 m lång och delen ovan vatten är 3 m bred och ansluts till dammen vid timmerrännan med en betongkonstruktion (Figur 15 & 16). För att få en lämplig lutning på avledaren anläggs en stödmur från den vänstra stranden, i likhet med det ursprungliga åtgärdsalternativet nr. 2, som även utgör övre fästpunkt för gallret. Gallret blir 90 m långt och 4 m djupt (fundament på 130,5 m.ö.h.), vilket motsvarar en total area om 360 m^2 och således en tillfredsställande V_A = 190/360 = 0,53 m/s. Utformningen lämnar tillräckligt med plats för fortsatt nyttjande av befintliga bågsättar (Norconsult, 2017).

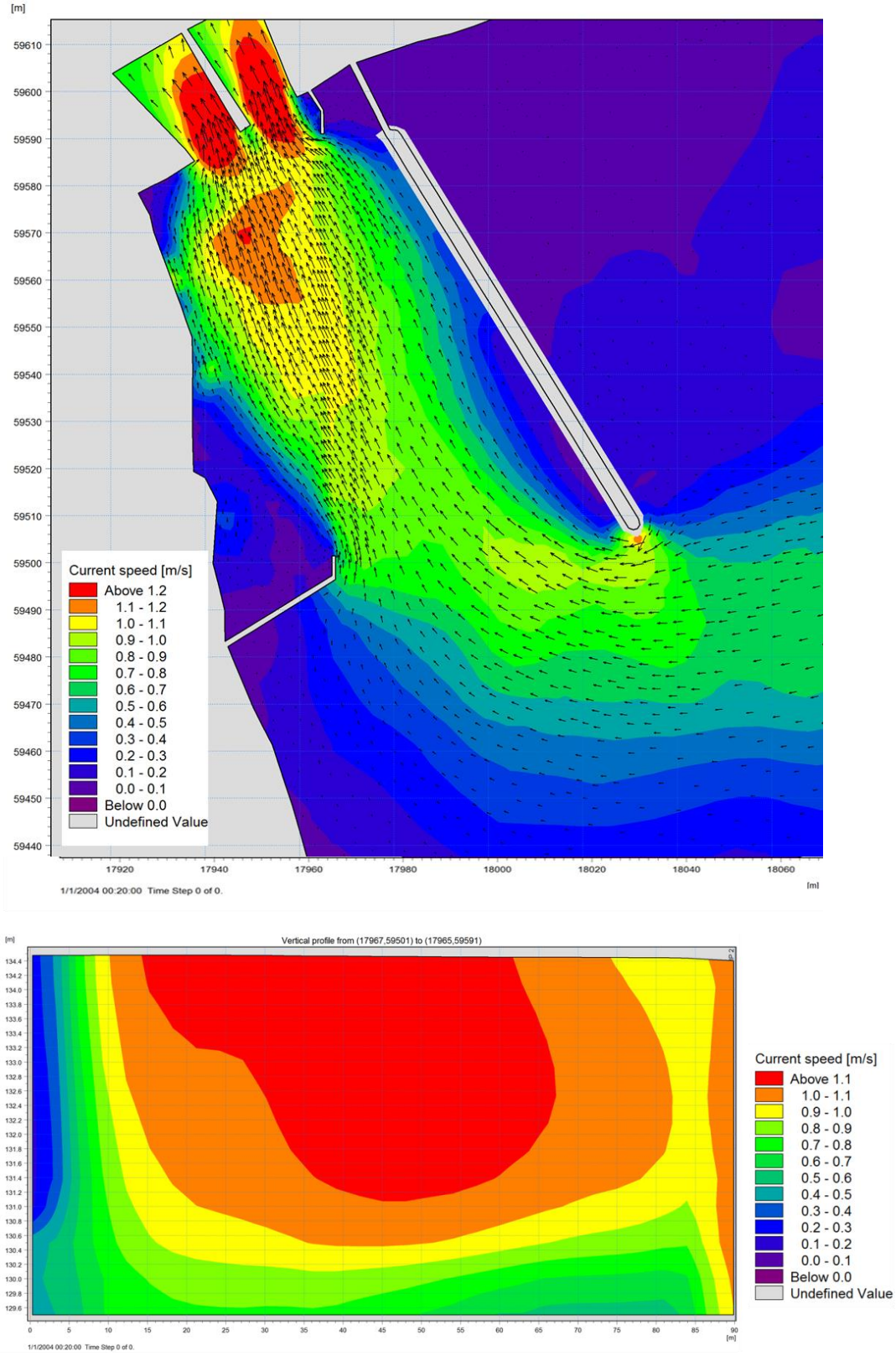
Till följd av stenpirens inverkan på inströmningen visar den hydrauliska modellen att vattenströmmen mot avledaren varierar mellan 20-35°, med lägst lutning på avledarens mitt och högst närmast kraftverket (Figur 16). De modellerade vattenhastigheterna framför gallret vid full körning i kraftverket och nivån 134,5 varierar inom intervallet 0,7-1,1 m/s, vilket är jämförbart med de hastigheter som observerats vid avledare med god funktion (Calles *et al.*, 2013b).

Som tidigare beskrivits kommer flottningsluckans utformning att behöva modifieras för att utgöra en funktionell flyktöppning, vilket bl.a. består i att skapa en gradvis accelererande vattenström med minsta möjliga turbulens. Den utformning som använts vid den hydrauliska modelleringen är inte optimal, vilket den hydrauliska modellen visar tydligt i form av minskande vattenhastighet och virvelbildning från avledarens slut in mot flyktöppningen (timmerrännan; Figur 16). Utskovet behöver därför förses med en ramp som med låg lutning leder från botten till utskovets krön, samt att själva flyktöppningen är trattformad och smalnar av enligt anvisningar ovan, men att den som smalast är cirka två meter bred och ungefär en meter djup (tröskelnivå 133,50 m.ö.h.). Det beräknade flödet blir då 4,8 m^3/s om man utgår från den rekommenderade ”fångsthastigheten” på cirka 2,4 m/s och

den genomsnittliga sommarnivån ≈ 134,50 m.ö.h. Rampen har låg lutning (≤30˚) och leder från botten till utskovets krön. Rampen bör vara minst 7 m lång, både utifrån α=30˚ och rekommenderad maximal acceleration, men den slutliga utformningen beslutas lämpligen efter en fördjupad utredning.



Figur 15. Principutformning enkelt β-galler med stenpir vid Edsforsens kraftverk (åtgärdsförslag 5) vid Edsforsens kraftverk enligt KFS AnläggningsKonstruktörer (2016). Principskiss av Norconsult (2017). Vy snett från ovan (överst) samt från ovan (underst).



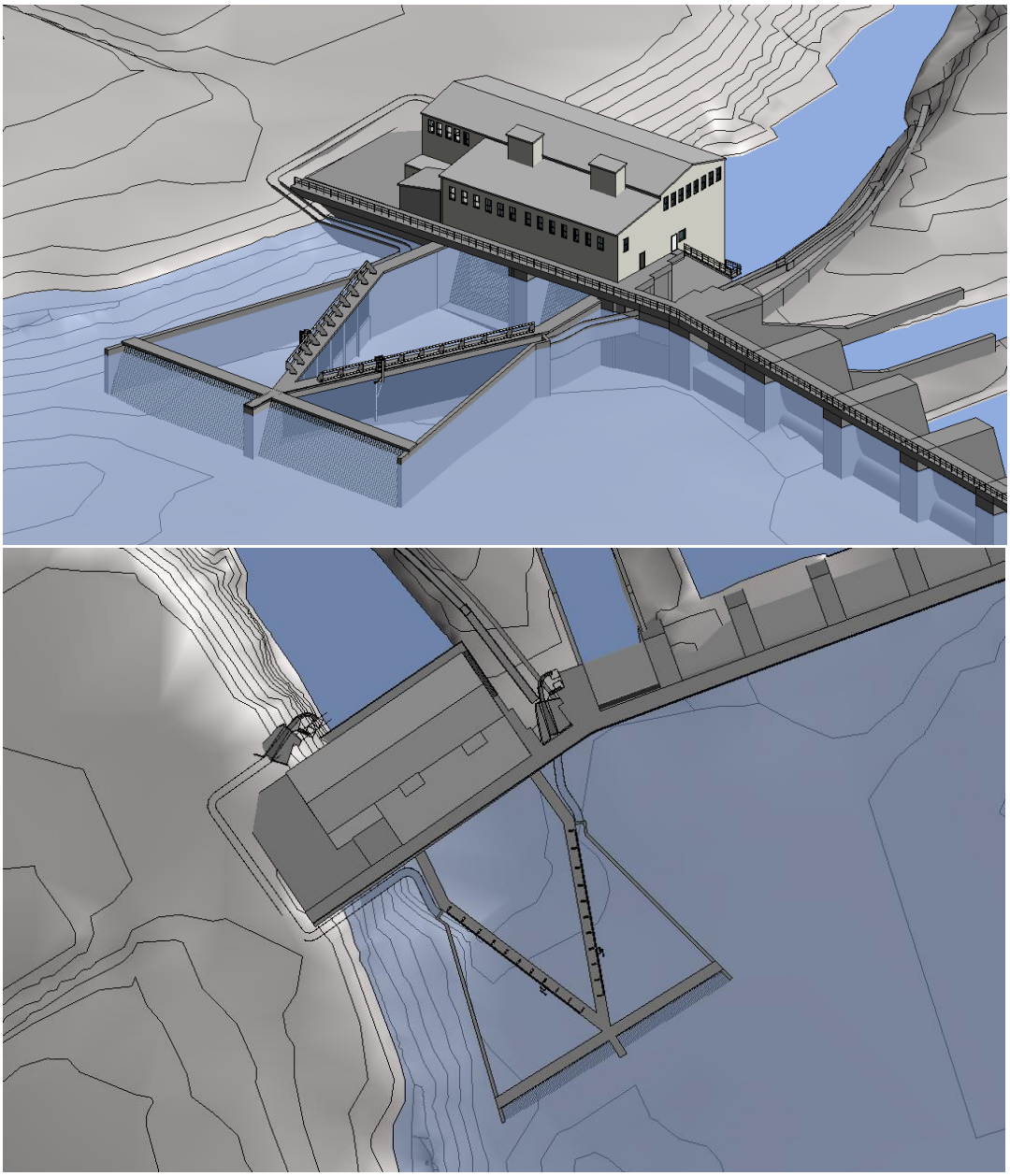
Figur 16. Medelvattenhastigheter och hastighetsvektorer i Edsforsens kraftverksdamm vid totalflöde 183 $m^3 s^{-1}$ efter inrättandet av en ny pir och en stödmur för β-galler; A) från ovan, samt B) i ett tvärsnitt i kanalens inlopp. Nivå 134,50 m.ö.h.

Åtgärdsförslag 6 – Modifierad dubbel β-avledare

De huvudsakliga problemen med åtgärdsalternativ 3, dubbel β-avledare, var de kritiskt höga vattenhastigheterna i den nya intagskanalen och att passagerännan blockerade de övre metrarna i det högra intaget. Dessutom måste passagen svänga kraftigt åt sidan för att kunna ledas genom den nya stödmuren till timmerrännan. Inströmningsförhållandena skulle kunna förbättras genom att bredda och fördjupa intaget. Även för detta alternativ finns möjligheten att minska kostnaderna genom att låta de två nya strukturerna längs intaget utgöras av stenpirar eller stenfyllnadsdammar. Om man dessutom vinklar de två β-gallren ut mot den nya kanalens sidor, istället för mot dess mitt, finns det gott om utrymme att leda fisk, vatten och eventuellt skräp vidare genom en ränna på vardera sidan om kraftverket. Det innebär således att flödet fördelas mellan två separata flyktöppningar och att man får en passage till timmerrännan och ytterligare en passage på vänster sida om kraftverket. Grovt drivgods stoppas av ett grovgaller i den nya intagskanalens början, som rensas med en anordning liknande den som finns på plats i dag (Figur 17). Dessutom förses de nya låglutande gallren med en automatisk rensmaskin vardera och lämpligen förses även flyktöppningarna med sekundära rensgaller (Norconsult, 2017).

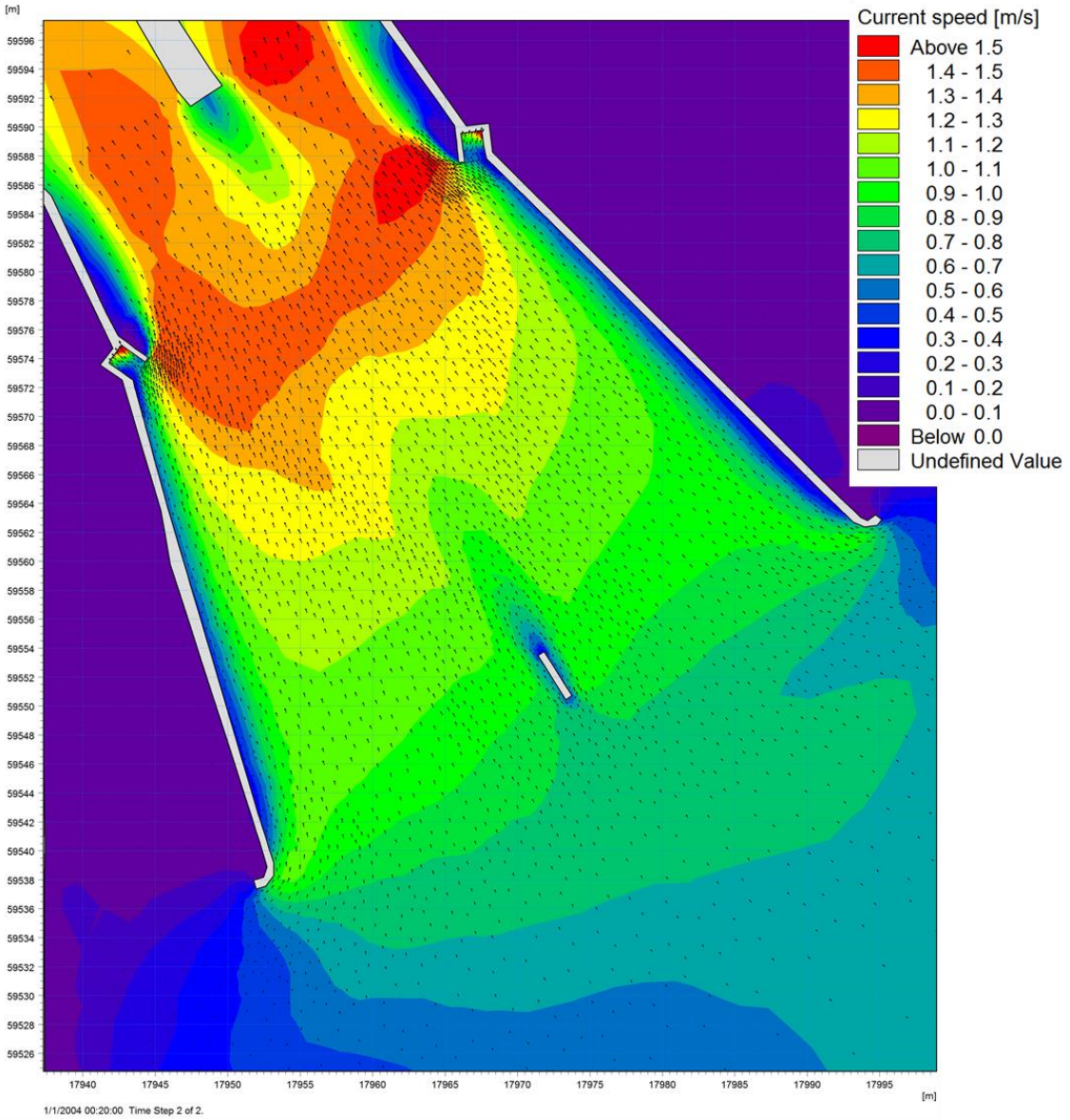
De föreslagna stödmurarna eller stenpirarna är vardera 50 m långa och angörs direkt till det befintliga intaget (Figur 17 & 18). Gallren blir 35 m långa och 5 m djupa (fundament på 129,5 m.ö.h.), vilket motsvarar en total area om 350 m^2 och således en tillfredsställande V_A = 190/350 = 0,54 m/s. Utformningen lämnar tillräckligt med plats för fortsatt nyttjande av befintliga bågsättar (Norconsult, 2017).

Till följd av den breda och djupa utformningen av intaget visar den hydrauliska modellen att vattenhastigheterna framför gallret vid full körning i kraftverket och nivån 134,5 håller sig kring 1 m/s, men undantaget för området längst ner på respektive galler där hastigheterna riskerar att hamna kring 1,3-1,4 m/s (Figur 18 & 19). Detta är fortfarande något högt, men ändå i paritet med vad som uppmättes vid t.ex. den väl fungerande avledaren vid Ätrafors kraftverk i Ätran (Calles *et al.*, 2013b). Vattenströmmens riktning relativt gallren varierar mellan 26-35°, med lägst lutning vid gallrens början och högst närmast flyktöppningen (Figur 16). Åtgärdsalternativ 6 inbegriper två flyktöppningar, en i slutet av respektive galler. Den utformning som använts vid den hydrauliska modelleringen är inte lämplig, eftersom de sticker ut i intaget, vilket den hydrauliska modellen visar tydligt i form av minskande vattenhastighet och virvelbildning direkt nedströms gallret (Figur 18). När detta korrigeras kommer sannolikt såväl den turbulenta strömbilden som de höga hastigheterna i anslutning till flyktöppningarna att förändras till det bättre.

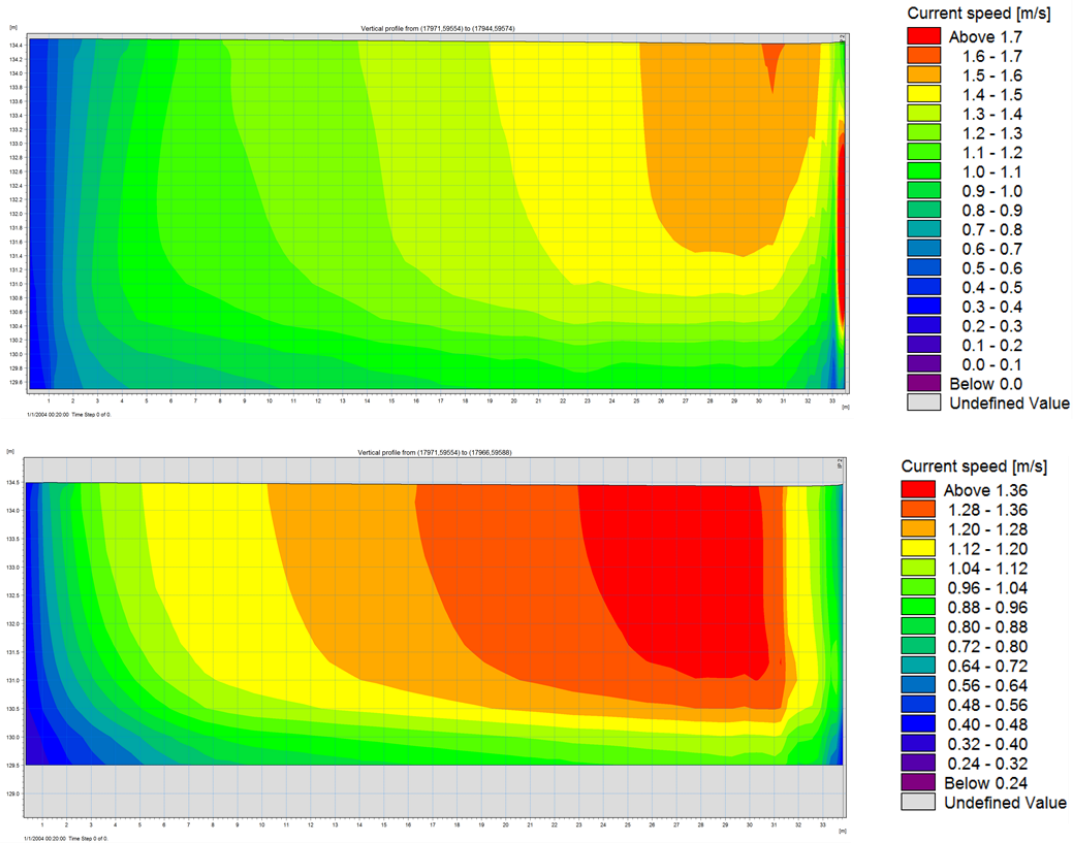


Figur 17. Principutformning inverterat dubbel-β-galler vid Edsforsens kraftverk (Norconsult, 2017). Vy snett från ovan (överst) samt från ovan (underst).

Flyktöppningarna ska vara integrerade i muren/piren och i det fall man väljer stenpirar bör de vara omgärdade av betongkonstruktioner. Flyktöppingarna utformas med en sluttande botten och avsmalnande kanter (trattformade) för att ge en gradvis accelererande vattenström med minsta möjliga turbulens. Flyktöppningarna är som smalast är cirka 1,5 meter breda och 1,0 meter djupa (tröskelnivå 133,50 m.ö.h.). Det beräknade flödet blir då 3,6 m^3/s om man utgår från den rekommenderade ”fångsthastigheten” på cirka 2,4 m/s och den genomsnittliga sommarnivån ≈ 134,50 m.ö.h. Rampen har låg lutning (≤30˚) och leder från botten till utskovets krön. Rampen bör vara 7 m lång, både utifrån α=30˚ och rekommenderad maximal acceleration, men den slutliga utformningen beslutas lämpligen efter en fördjupad utredning.



Figur 18. Medelvattenhastigheter och hastighetsvektorer i Edsforsens kraftverksdamm vid totalflöde 183 $m^3 s^{-1}$ efter inrättandet av två nya stödmurar för dubbel-ß-galler. Nivå 134,50 m.ö.h. (planvy).



Figur 19. Tvärsnitt av medelvattenhastigheter i Edsforsens kraftverksdamm vid totalflöde 183 $m^3 s^{-1}$ efter inrättandet av nya stödmurar som del av ett dubbelt β-galler. Transekterna är placerade längs vänster (längst upp) respektive höger gallerlinje (längst ned) vid vattennivå 134,50 m.ö.h.

Värdering och rangordning av åtgärdsalternativ 5-6

Norconsult (2017) har sammantaget bedömt att den modifierade β-avledaren (nr. 5) rankas högre än den modifierade dubbel-β-avledaren (nr. 6). Till grund för denna rangordning har följande faktorer tilldelats samma betydelse:

- ✓ Anläggningsteknik
- ✓ Fångdamm
- ✓ Funktion – fisk
- ✓ Funktion – drift
- ✓ Kostnad

Om man använder samma bedömningar, men tillmäter samma betydelse för funktionen för fisk och sammantaget för drift/anläggning/kostnad, blir ordningen densamma eftersom båda alternativen tilldelas högsta poäng för ”Funktion – Fisk”. Skillnaderna mellan de två alternativen bedöms bestå i ”anläggningsteknik” och ”funktion – drift”. Slutsatsen lyder: ” Ur fiskhänseende bedöms de båda alternativen relativt likvärdiga. Om man dessutom väger in drift- och produktionsegenskaper bedöms enkel-β-gallret vara det sammantaget mest fördelaktiga” (Norconsult, 2017).

Vi bedömer att den modifierade β-avledaren (åtgärdsalternativ 5) kommer ha en mycket god funktion för fisk, eftersom lösningen innebär att man på en optimal plats anlägger en stor flyktöppning med ett omfattande flöde. En nackdel är, även för detta förbättrade alternativ, den

långa längsta sträckan från gallrets ände till flyktöppningen. Precis som för den ursprungliga β-avledaren skyddas gallret från drivgods och is enbart av en ytläns, vilket kan bli ett problem med tanke på Edsforsens utsatta läge. Den nya utformningen, i främst till följd av den föreslagna stenpiren, visar på en fördelaktig inströmningsgeometri och en låg vinkel mellan huvudströmmen och gallret.

Den modifierade dubbel β-avledaren (åtgärdsalternativ 6) bedöms få en ännu bättre funktion för fisk, eftersom lösningen innebär att man på optimal plats anlägger en stor flyktöppning med ett omfattande flöde per galler (högre än för enkel-β) och dessutom halveras sträckan från gallrets ände till flyktöppningen jämfört med β-avledaren. Det finns precis som för det ursprungliga alternativet goda möjligheter att skydda fiskgallret från drivgods och is med hjälp av ett grovgaller i inloppet till den nya intagskanalen. De huvudsakliga identifierade problemen med åtgärdsalternativ 3 har lösts i och med modifieringarna: inget av intagen blockeras av flyktrännan, flyktrännan har ett relativt rakt lopp och inströmningsgeometrin är tillfredsställande och det predikteras en låg vinkel mellan huvudströmmen och gallret. Den hydrauliska modellen visar på relativt höga vattenhastigheter i det nya intaget och behovet av ytterligare fördjupning kan komma att behöva analyseras. Ytterligare en osäkerhet är att en av flyktrännorna kommer behöva grävas ner mellan ställverket och kraftverket, för vilket möjligheterna ännu inte utretts.

I detta avslutande kapitel presenteras ytterligare två åtgärdsförslag till primär uppsamling vid Edsforsens kraftverk, vilket grundar sig på de två mest lovande åtgärdsalternativen (nr. 2 & 3) i kombination med hydrauliska modelleringar (Lahti, opublicerat, 2015-2016) samt rapporter av KFS Anläggnings- Konstruktörer (2016) och Norconsult (2017). De två åtgärdsalternativen, nr. 5 och 6, bör prioriteras över åtgärdsalternativ nr. 1-4, men det är enligt vår mening inte självklart hur de bör rangordnas sinsemellan. Vi rekommenderar därför att man vidare utreder båda dessa åtgärdsalternativ.

Slutsats och rekommenderade åtgärdsalternativ

Det råder inget tvivel om att behovet av en förbättrad nedströmspassage förbi vattenkraftverken 1-8 i Klarälven är stort och till skillnad mot många andra reglerade vattendrag är potentialen stor även på kort sikt, eftersom man bevarat ett förhållandevis stort bestånd av vandrande laxfisk i Klarälven. På kort sikt åstadkommes en ökad överlevnad bland nedströmsvandrande fisk lämpligen genom att fisken leds av från Edsforsens turbinintag och samlas upp för transport förbi kraftverken och utsättning nedströms Forshaga kraftverk (nr. 1). Eftersom det finns ytterst få exempel på avledare vid kraftverk av Edsforsens storlek och geografiska placering, är samtliga åtgärdsalternativ att betrakta som experimentella och kommer kräva utvärderingar och modifieringar under en försöksperiod som bör spänna över flera år. Samtidigt har liknande lösningar testats med goda resultat vid mindre kraftverk i Sverige och kan man få åtgärden på plats samt att hålla avledaren och flyktöppningen fria från drivgods och is, förväntar vi oss att man kommer åstadkomma en stor förbättring i överlevnaden för nedströmsvandrande laxfisk i Klarälven. I dag är överlevnaden för såväl nedströmsvandrande smolt som kelt låg (Gustafsson *et al.*, 2015; Norrgård *et al.*, 2013; Bergman & Norrgård, 2015; Nyqvist *et al.*, 2015), i synnerhet under år med låga flöden. Tar man i beaktande att en åtgärd vid Edsforsen på kort sikt ersätter åtgärder vid de nedströms belägna sju kraftverken, kommer en uppsamlinseffektivitet på förhållandevis låga 43 % att motsvara den totala överlevnaden förbi de åtta kraftverken om åtgärder med 90 % passageeffektivitet skulle anläggas vid vart och ett av kraftverken ($0{,}9^8 = 0{,}43$). Självklart är målet att åtgärden får en effektivitet som ligger så högt som möjligt, helst 100 %, men med tanke på att åtgärden vore den första i sitt slag vid ett kraftverk av Edsforsens storlek och geografiska läge är en passageeffektivitet < 90 % ett mer realistiskt utgångsläge. Det finns goda förutsättningar att öka överlevnaden för nedströmsvandrande fisk i Klarälven, vilket sannolikt skulle ha stor positiv effekt på de vandrande fiskbestånden, i synnerhet lax och öring.

Referenser

Anglea SM, Simmons MA, Simmons CS, Kudera EA, Skalski JR. 2002. Hydroacoustic evaluation of the removable spillway weir at Lower Granite Dam. 26

Anonymous. 1998. Lax- och öringfisket i Vänern. *Fiskeriverket information* 8:1998: 3-62. (In Swedish)

Arnekleiv JV, Kraabol M, Museth J. 2007. Efforts to aid downstream migrating brown trout (Salmo trutta L.) kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway. *Hydrobiologia*. 582: 5-15.

Bergman E, Norrgard J. 2015. Nedströmsvandring av vildfödd laxsmolt. In *Vänerlaxens Fria Gång - Två länder, en älv - Ekologisk status och förslag till åtgärdsprogram för Klarälven, Trysilelva och Femundselva med biflöden*, P. Gustafsson, M. Hedenskog and T. Qvenlid (eds). Elanders Sverige AB: Mölnlycke; 136-143.

Bergman E, Greenberg L, Norrgard J, Piccolo JJ. 2015. Produktion av vild laxsmolt i Klarälven. In *Vänerlaxens Fria Gång - Två länder, en älv - Ekologisk status och förslag till åtgärdsprogram för Klarälven, Trysilelva och Femundselva med biflöden*, P. Gustafsson, M. Hedenskog and T. Qvenlid (eds). Elanders Sverige AB: Mölnlycke; 110-119.

Calles O, Bergdahl D. 2009. Ålens nedströmspassage av vattenkraftverk - *Före och efter åtgärd*. *Karlstad University Studies* 2009:19: 37

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* 34

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* 114

Calles O, Gustafsson S, Österling M, Levein U, Löfqvist M, Comoglio C, Vezza P. 2011a. Årsrapport 2011 - Nedströmspassage för ål i Alsterälven. *Forskningsrapport, Naturresurs rinnande vatten*

Calles O, Gustafsson S, Österling M, Levein U, Löfqvist M, Comoglio C, Vezza P. 2011b. Årsrapport 2011 - Nedströmspassage för ål i Alsterälven. *Forskningsrapport, Naturresurs rinnande vatten* 12

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, Karlsson S, Vezza P, Comoglio C, Tielman J. 2013c. Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology*. 58: 2168–2179.

Calles O, Rivinoja P, Greenberg L. 2013d. A historical perspective on downstream passage at hydroelectric plants in Swedish rivers. In *Ecohydraulics: An Integrated Approach*, A. H. Ian Maddock, Paul Kemp and Paul Wood (eds). John Wiley & Sons Ltd: West Sussex, UK; 309–322.

DWA. 2005a. Fish Protection Technologies and Downstream Fishways. Dimensioning, Design, Effectiveness Inspection. *DWA topics* 226

Ebel G. 2013. *Fish Protection and Downstream Passage at Hydro Power Stations Handbook of Bar Rack and Bypass Systems*. Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie:

EPRI. 2002. Upstream and Downstream Fish Passage and Protection Technologies for Hydroelectric Application: A Fish Passage and Protection Manual. 180

Ferguson JW, Poe T, Carlson TJ. 1998. Surface-oriented bypass systems for juvenile Salmonids on the Columbia River, USA. In *Migration and fish bypasses.*, M. Jungwirth, S. Schmutz and S. Weiss (eds). Fishing News Books: Oxford; 281-299.

Gustafsson P, Hedenskog M, Qvenlid T. 2015. *Vänerlaxens fria gång - Två länder, en älv*. Elanders Sverige AB: Mölnlycke.

Hagelin A, Calles O, Greenberg LA, Piccolo JJ, Bergman E. 2016. Spawning migration of wild and supplementary stocked landlocked Atlantic salmon (*Salmo salar*). *River Research and Applications*. 32: 383-389.

Hanson BN. 1999. Effectivenes of two surface bypass facilities on the Connecticut River to pass emigrating Atlantic salmon smolts. In *Innovations in fish passage technology*, M. Odeh (eds). American Fisheries Society: Bethesda, Maryland, USA; 43-59.

Heiss, M. 2015. Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (Salmo salar) at a hydroelectric power plant in southern Sweden. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

KFS AnläggningsKonstruktörer. 2016. Edsforsens kraftverk. PM Fiskvägar - Tekniska förutsättningar med särskild inriktning mot avledning. *KFS AnläggningsKonstruktörer AB* 9

Kriström B, Calles O, Greenberg LA, Leonardsson K, Paulrud A, Ranneby B. 2010. Samhällsekonomisk analys av alternativa åtgärder i flödespåverkade vattendrag: Emån och Ljusnan. Vetenskaplig slutrapport. (Cost-Benefit Analysis of River Regulation: The case of Emån and Ljusnan. Scientific summary report). *Elforskrapport* 89

Lans L, Greenberg LA, Karlsson J, Calles O, Schmitz M, Bergman E. 2011. The effects of ration size on migration by hatchery-raised Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*). *Ecology of Freshwater Fish*. 20: 548-557.

Larinier M. 1996. Passes à poissions. *Paris (CSP, Collection Mise au Point).*

Larinier M, Travade F. 1999. The development and evaluation of downstream bypasses for juvenile salmonids at small hydroelectric plants in France. In *Fish Passage Technology*, M. Odeh (eds). American Fisheries Society: Bethesda, Maryland, USA; 25–42.

Larinier M, Travade F. 2002. Downstream migration: problem and facilities. *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture*. 364: 181-207.

NMFS. 2011. Anadromous salmonid passsage facility design. *National Marine Fisheries Service Northwest Region* 140

Norconsult. 2014. Utredning fiskavledning Edsforsens kraftverk, Klarälven, Tekniska förutsättningar och konsekvensbedömning av 4 olika utförandealternativ. *Norconsult*

Norconsult. 2017. Fortsatt utredning av fiskavledning vid Edsforsens kraftverk - Tekniska förutsättningar och konsekvensbedömning av 2 nya utförandealternativ. *Norconsult AB* 34 inklusive 32 bilagor

Nordberg PO. 1977. Laxplan för Klarälven. 354

Norrgård JR, Greenberg LA, Piccolo JJ, 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 (10): 1306–1317.

Nyqvist D, Bergman E, Calles O, Greenberg LA. 2017a. Intake approach and dam passage by downstream migrating Atlantic salmon kelts. *River Research and Applications*. Early online:

Nyqvist D, Calles O, Bergman E, Greenberg LA. 2015. Post-spawning survival and downstream passage of landlocked Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a regulated river: Is there potential for repeat spawning? *River Research and Applications*. *Early online*:

Nyqvist D, Calles O, Bergman E, Hagelin A, Greenberg LA. 2016. Post-Spawning Survival and Downstream Passage of Landlocked Atlantic Salmon (*Salmo salar*) in a Regulated River: Is There Potential for Repeat Spawning? *River Research and Applications*. 32: 1008-1017.

Nyqvist D, Nilsson PA, Alenäs I, Elghagen J, Hebrand M, Karlsson S, Kläppe S, Calles O. 2017b. Upstream and downstream passage of migrating adult Atlanticsalmon: Remedial measures improve passage performance at ahydropower dam. *Ecological Engineering*. 102: 331-343.

Näslund I, Degerman E, Calles O, Wickström H. 2013. Fiskvandring – arter, drivkrafter och omfattning i tid och rum, en litteratursammanställning *Havs- och vattenmyndighetens rapport* 44

Odeh M, Orvis C. 1998. Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the North-east USA. In *Migration and fish bypasses.*, M. Jungwirth, S. Schmutz and S. Weiss (eds). Fishing News Books: Oxford; 267-280.

Ogden DA, Hockersmith EE, Axel GA, Burke BJ, Frick KE, Absolon RF, Sandford BP. 2008. Passage Behavior and Survival of River-Run Subyearling Chinook Salmon at Ice Harbor Dam, 2007. 58

Ros T. 1981. Salmonids in the Lake Vänern area. In *Fish gene pools*, N. Ryman (eds). Stockholm; 21-31.

Scruton D, Pennell C, Bourgeois C, Goosney R, King L, Booth R, Eddy W, Porter T, Ollerhead L, Clarke K. 2008. Hydroelectricity and fish: a synopsis of comprehensive studies of upstream and downstream passage of anadromous wild Atlantic salmon, Salmo salar , on the Exploits River, Canada. *Hydrobiologia*. 609: 225.

Scruton D, Pennell C, Bourgeois C, Goosney R, Porter T, Clarke K. 2007. Assessment of a retrofitted downstream fish bypass system for wild Atlantic salmon (Salmo salar) smolts and kelts at a hydroelectric facility on the Exploits River, Newfoundland, Canada. *Hydrobiologia*. 582: 155-169.

Stålered J, Bard A. 2015. Beräkning av mortaliteten vid turbinpassage för nedströmsvandrande fisk i Klarälven. *Sweco Energiguide AB - Vattenturbinteknik - på uppdrag av Karlstads universitet* 26

Travade F, Larinier M. 1992. La migration de dévalaison: problèmes et dispositifs. *Bulletin Francasi de la Peche et de la Pisciculture*. 326/327: 165-176.

Travade F, Larinier M, Subra S, Gomes P, De-Oliveira E. 2010. Behaviour and passage of European silver eels (Anguilla anguilla) at a small hydropower plant during their downstream migration. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 19.

Turnpenny A, Struthers G, Hanson KP. 1998. *A UK guide to intake fishscreeningregulations, policy and best practice*. Crown copyright: London, UK.

Wolf P. 1951. A trap for the capture of fish and other organisms moving downstream. *Transactions Of The American Fisheries Society*. 80: 41-51.