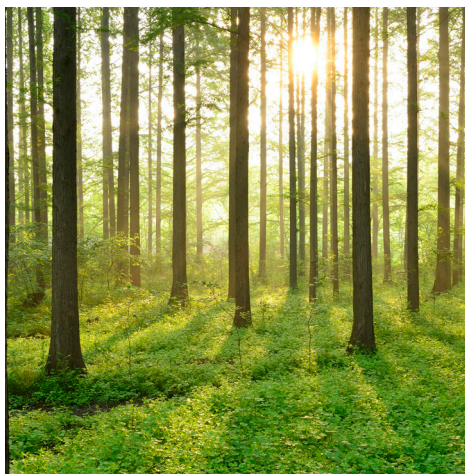


HYDRAULISKA FÖRUTSÄTTNINGAR OCH ÅLENS BETEENDE I KRAFTVERKSINTAG

RAPPORT 2017:459



KRAFT
TAG ÅL



Hydrauliska förutsättningar och ålens beteende i kraftverksintag

Ålvandring komplett – från start till kraftverkspassage
Del 1

KJELL LEONARDSSON, HENRIK JEUTHE, ARNE FJÄLLING, GUSTAV HELLSTRÖM, JOHAN LEANDER,
DANIEL NYQVIST, OLLE CALLES OCH JOHAN ÖSTERGREN

ISBN 978-91-7673-459-9 | © ENERGIFORSK december 2017

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

Förord

Syftet med projektet Ålvandring komplett var att studera ålens nedströmsvandring från vandringsstart, triggers och timing, beteende vid ankomst till kraftverk till kraftverkspassage.

Projektet finns avrapporterat i två delrapporter, där denna rapport är den ena. Den andra delrapporten heter Utvärdering av sonar som varningssystem för nedströms ålvandring och har rapportnummer 2017:460. Den aktuella rapporten består i sin tur av två delar. Ena delen bestod av fältarbete i Motala ström. Med hjälp av akustisk telemetri för högupplöst positionering av fisk kunde ålarnas simbeteende studeras i detalj i området kring intaget till kraftverket. Den andra delen var utveckling av en ny statistisk metod för analys av beteenden som triggas av förändringar i omgivningen.

Förbättrade kunskaper om vad som får ålen att initiera vandringsstart är värdefullt vid tillämpning av någon form av varningssystem, så kallad "early warning"-system. Genom att studera ålens vandringsbeteende i kraftverksmiljöer ökar kunskaperna om ålens vägval vid kraftverkspassage.

Projektutförare var Kjell Leonardsson och Gustav Hellström vid Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), Vilt fisk och miljö, Henrik Jeuthe, Arne Fjälling, Johan Östergren vid SLU Akvatiska resurser, Johan Leander, Umeå universitet, Daniel Nyqvist och Olle Calles, vid Karlstads universitet. Författarna står för innehållet i rapporten.

Projektet ingick i programmet Krafttag ål med följande styrgrupp:

Erik Sparrevik, Vattenfall Vattenkraft AB (ordförande)
 Niklas Egriell, Havs- och vattenmyndigheten
 Marco Blixt, Fortum Generation AB
 Rikard Nilsson, Holmen Energi AB
 Henrik Jatkola, Statkraft Sverige AB
 Ola Palmquist/Katarina Ingvarsson, Tekniska Verken i Linköping AB
 Johan Tielman, Sydkraft Hydropower AB (Uniper)
 Sara Sandberg, Energiforsk (adjungerad)

Krafttag ål genomförs i samverkan mellan vattenkraftföretagen och Havs- och vattenmyndigheten. Energiforsk är sammanhållande för programmet. Programmet består av två delar: Åtgärder och Forsknings- och utvecklingsprojekt. Skonsam drift är en av tre inriktningar för FoU-delen av programmet.

Energiforsk

Sara Sandberg

Stockholm december 2017

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

För att framgångsrikt formge och implementera miljöförbättrande åtgärder för utvandrande blankål krävs ett holistiskt angreppssätt som beaktar olika aspekter av vandringen. Förbättrad kunskap om vad som får ålen att initiera vandring har möjliggjorts inom projektet genom utveckling av en ny statistisk metod för analys av beteenden som triggas av förändringar i omgivningen. Med hjälp av akustisk telemetri för högupplöst positionering av fisk kunde ålarnas simbeteende studeras i detalj i området kring intaget till kraftverket. Telemetristudien visade även att omfattningen av direkt och fördröjd dödlighet för blankål efter turbinpassage var jämförbara, men studien illustrerar svårigheten att med säkerhet särskilja död från skadad ål och osäkerheten är därför stor.

Syftet med projektet har varit att undersöka om det går att förutse utvandringen av blankål, samt att verifiera detta med fångstdata. Vandringsstart, timing av ankomst, beteende och vägval vid ankomst till kraftverk, överlevnad på kort och längre sikt efter kraftverkspassage är de aspekter som varit i fokus. Vi har även testat sonarteknik som ett potentiellt "early warning"-system.

Undersökningarna har genomförts i Motala ström i Norrköping. Högupplöst akustisk telemetri har använts i projektet för att studera ålarnas simbeteenden vid intaget till Holmens kraftverk. Metodiken har gjort det möjligt att uppnå några decimeters positioneringsnoggrannhet. 60 ålar märktes med högupplösta akustiska märken och 34 av ålarna försågs även med djupsensorer för att kunna läsa av vilka djup ålarna uppehöll sig på. Märkningen och utsättningen av ålarna gjordes från slutet av juli till slutet av augusti 2016.

Den statistiska metoden för analys av vad som initierar utvandringen identifierar signifikanta omvärldsvariabler, kvantifierar triggerresponsen som en funktion av dessa variabler, samt förutsäger kommande ålvandring givet att omvärldsvariablerna mäts på daglig basis. Tillämpning av metoden på fångstdata från höstperioden i Skärhultsån under åren 2011-2013 visade att framförallt flöde, men även månfas och dagslängd ingick i den bästa modellen. Vattentemperaturen förbättrade modellen obetydligt. Med smärre justeringar i flödesparametrarna kunde modellen framgångsrikt återge vandringen (fångsterna) i Ätran (Ätrafors), och till viss del även i Mörrumsån, men inte i Kävlingeån.

Ålarna med akustiska märken följde i stort huvudströmmen under dygnets mörka period vid nedströmsvandringen och de vandrade i huvudsak nära ytan, inte nära botten. Ålarnas beteende vid kraftverksintag och spill varierade mellan individer trots likartade omvärldsförhållanden. Merparten av ålarna uppvisade ett sökbeteende. Hydrauliken eller öppningarnas egenskaper vid intaget till kraftverket och spill resulterade ofta i tvekan att passera, med 25 % passagesannolikhet per besök. Överlevnaden vid passage var ca 36 % och oberoende av om ålarna passerade via Holmens kraftverk eller via spill och vidare nedströms mot Bergsbron/-Havets kraftverk och havet. Det är oklart vad som fick ålarna att tveka respektive välja passage. 5 av 19 ålar som kom till spillområdet när

merparten av vattnet spilldes ($>20 \text{ m}^3/\text{s}$) passerade via spillöppningarna. 7 av 16 individer passerade via $2 \text{ m}^3/\text{s}$ spill samtidigt som flödet via turbinen var mellan 30 och $40 \text{ m}^3/\text{s}$. För att skonsam drift skall vara ett säkert alternativ för ålarna behövs därför kunskap om hur spillöppningarnas utformning, i relation till de spillmängder som är aktuella, påverkar ålarnas passagevilja.

Uppehållstiderna i området vid intagsgallret och i området med spill var genomgående korta, några få minuter, vid varje enskilt besök oavsett vilken väg ålarna valde. Det innebär att ett detektionssystem för skonsam drift behöver finnas en bra bit uppströms intaget till kraftverket eftersom simhastigheterna i nedströmsvandringen ofta överskred $0,5 \text{ m/s}$, vilket var snabbare än den genomsnittliga strömhastigheten i området.

Summary

In order to design and implement mitigation measures for successful downstream migration of silver eels a holistic approach is needed that accounts for many different aspects. Improved knowledge on what triggers the eel migration has been made possible in the project by the development of a new statistical method for analysis of behaviours triggered by changes in the environment. The use of high resolution acoustic telemetry allowed studies of the eels' swimming behaviour close to the hydropower inlet. The telemetry study also showed that direct and delayed mortalities for eels that passed through the turbines were comparable in magnitude. Difficulties in separating live from dead eels after turbine passage contributes to uncertainties in survival estimates from these types of studies.

The aim of the project was to investigate if it is possible to predict the downstream migration of silver eels, and to verify the predictions by catch data. The focus has been on initiation of migration, timing of arrival, behavior and choice of migration route when arriving to hydropower stations, and survival after turbine passage. We also tested and evaluated sonars as a potential "early warning"-systems.

The investigations were performed in Motåla ström, Norrköping. High-resolution acoustic telemetry was used to study the eels' swimming behaviour at the intake to Holmen's hydropower station. This method can provide a 2D positioning accuracy of decimeters. 60 eels were tagged with high-resolution tags and 34 of the eels were also tagged with depth sensors to allow the swimming depth of the eels to be registered. The tagging and the release of the eels were performed from the end of July to the end of August 2016.

The statistical method for what factors that initiate eel migration in freshwater identify significant environmental variables, quantifies the trigger response, as a function of these variables, and predicts the eel migration the following days given that the environmental variables are quantified on a daily basis. Applying the method on autumn data from the river Skärhultsån, 2011-2013, showed that the flow contributed most to the migration, but moon phase and day length also entered as significant variables. Water temperature improved the model slightly. With minor changes in the flow parameters the model could successfully predict the migration (catches) in Ätran (Ätrafors), and to some extent also in Mörrumsån, but not in Kävlingeån.

The eels with acoustic tags mainly followed the main stream, some distance above the bottom, during their downstream migration that took place during nighttime. The behaviour of the eels at the hydropower intake and at the spill area varied between individuals despite similar hydraulic conditions. A majority of the eels displayed a search behavior. The hydraulics or the characteristics at the hydropower station intake and at the spill gates frequently made the eels hesitate and turn away, resulting in 25 % passage probability per visit. The average survival was about the same, ca 36 %, for eels that passed the Holmen's

hydropower station or for those that passed via spill gates. The eels that passed via spill gates also had to pass the hydropower station, Bergsbron/-Havet, further downstream before entering the sea. It was unclear what made the eels hesitate or pass. Five out of 19 eels that entered the spill area when most of the water was spilled ($>20 \text{ m}^3/\text{s}$) passed via the spill gates. Seven out of 16 individuals passed via $2 \text{ m}^3/\text{s}$ spill when the flow through the turbine was between 30 and $40 \text{ m}^3/\text{s}$. In order for adaptive flow management of the hydropower plant to be a safe alternative for the eels, knowledge is needed on how the spill gates should be shaped in relation to the amount of spill flow to attract eels.

The eels spent just a few minutes in the area near the intake to the hydropower station or in the spill area independent if the eel passed or not. This means that a detection system for adaptive flow management of a hydropower plant needs to be implemented further upstream in the river since the swimming speed in the downstream migration often exceeded 0.5 m/s , which were faster than the highest water velocities in the area.

Innehåll

1	Uppdraget	9
2	Bakgrund	10
3	Material och metoder	12
3.1	Platsbeskrivning	12
3.2	Triggers	14
3.2.1	Åldata	15
3.2.2	Omvärldsdata	15
3.2.3	Tidsfördröjning från signal till vandring och fångst	16
3.2.4	Modellselektion	16
3.2.5	Jämförelse i respons mellan ålar i de tre vattendragen	16
3.3	Telemetri	16
3.4	Hydraulisk kartläggning	18
3.5	Sonarstudie	21
4	Resultat	23
4.1	Triggers	23
4.2	Ålens utvandring i Motala ström	27
4.3	Ålens rörelser i anslutning till kraftverk – telemetri, hydraulik & sonardata	30
5	Diskussion	43
6	Slutsatser och rekommendationer	48
7	Referenser	50

1 Uppdraget

Krafttag ål-projektet "Ålvandring komplett – från start till kraftverkspassage" omfattar studier av ålens nedströmsvandring hela vägen från vandringsstart och dess triggers, beteende vid ankomst till kraftverk och till slut själva kraftverkspassagen. Uppdraget är en vidareutveckling av flera tidigare projekt bl.a. "Radiotelemetriundersökning av ålens passage av vattenkraftverk i Motala ström" (Östergren *et al.*, 2014) och "Understanding downstream migration timing of European eel (*Anguilla anguilla*)" (Stein *et al.*, 2014).

Det övergripande målet med aktuellt projekt har varit att

1. Förbättra kunskapen om vad som får ålen att initiera vandring,
2. Undersöka potentialen för "vandringsindikatorer" (Eng. early warning) för att prediktera vandring
3. Öka kunskap om ålens beteende och vandringsväg in mot kraftverk.
4. Undersöka fördröjd dödlighet (mortalitet) efter kraftverkspassage

Slutrapporten för projektet har delats upp i två delar. Innevarande rapport är den mest omfattande och behandlar ålutvandring ur ett helhetsperspektiv. Den andra delrapporten (Energiforsk rapport 2017:460) utvärderar en tänkbar teknik med potential att detektera nedströms utvandrande blankålar. Denna teknik skulle ge en förvarning (early warning) om vandrande ålar och möjlighet att i realtid ställa om kraftverken till så kallad skonsam drift (behandlas i Energiforsk rapport 2017:417).

SLU Aqua har genomfört projektet i samverkan med Karlstads och Umeå universitet. Johan Östergren (SLU Aqua) var projektledare 2015-2016 och Olle Calles (NRRV, Karlstads universitet) 2017.

2 Bakgrund

Den Europeiska ålen är en panmiktisk akut hotad art och sedan ålförordningens införande 2008 (Anonymous 2008) har åtgärdsarbetet för ålens bevarande tagit fart (Baran *et al.*, 2011). Eftersom hoten mot ålens fortlevnad är många och komplicerade, har man inte kunnat identifiera någon huvudsaklig orsak bakom den minskade rekryteringen. Den Europeiska ålförvaltningen fokuserar dock i ett första steg på att öka överlevnaden av blankål, så att flera lekmogna individer når lekområdena i Sargasso. Detta åstadkommes främst genom att minska fisketrycket på samtliga livsstadier samt genom att öka överlevnaden för de blankålar som efter tillväxt i sötvatten vandrar mot havet.

Blankålar lämnar sina uppväxtområden i sötvatten vid 4-20 års ålder, men ålar från norra Europa inklusive Sverige tenderar att vara äldre och större än i södra Europa (Tesch, 2003). Nedströmsvandringen sker oftast under höglödesperioder under hösten (Durif & Elie, 2008), men i vissa vattendrag vandrar fler ålar ut under våren än under hösten (EKLÖV). Kunskapen om vilka faktorer som får ålen att initiera nedströmsvandring i små vattendrag är förhållandevis välkänd, men motsvarande kunskap för sjöar och stora vattendrag är bristfällig (men se Durif & Elie, 2008). I små vattendrag tenderar vattenflöde, vattentemperatur och månfas att vara de viktigaste förklarande variablerna, men deras relativa betydelse varierar både i tid och i rum (Stein *et al.*, 2014). I stora vattendrag och sjöar/dammar finns indikationer på att flöde, vattentemperatur och fotoperiod är av betydelse, men förklaringsgraden tenderar att vara låg och då i synnerhet i vattendrag med vattenkraftverk (Acou *et al.*, 2008; Durif & Elie, 2008). En god kännedom om vad som får ålen att initiera sin nedströmsvandring skulle innebära att man kan koncentrera åtgärdsarbetet till de perioder när ålvandringen är som mest intensiv, vilket även öppnar för åtgärder som t.ex. anpassad drift av vattenkraftverk. Försök att med tekniska lösningar prediktera ålutvandring har genomförts med begränsad framgång, medan statistiska analyser av förhållandet mellan ålfångstdata och miljöparametrar sett lovande ut (Baran *et al.*, 2011).

Det är väl känt att blankålar löper stor risk att skadas och dödas vid passage av vattenkraftverk (Calles *et al.*, 2010; Carr & Whoriskey, 2008) och att dödligheten i vissa extrema fall till och med kan uppgå till 100 % (Larinier & Travade, 1998). På senare tid har dock, som redan nämnts, åtgärdsarbetet tagit fart och tekniska lösningar som utvärderats med god framgång består främst i låglutande galler med flyktöppningar (Calles *et al.*, 2015; Calles *et al.*, 2013; Travade *et al.*, 2010). De låglutande gallren har hittills testats på små till medelstora kraftverk och dessutom är flera aspekter av åtgärdernas utformning att betrakta som platsspecifika. För att tekniken ska gå att applicera på flera olika kraftverkstyper och i vissa fall även större kraftverk, krävs en ökad kunskap om ålens beteenderespons på hydrauliska förhållanden (Piper *et al.*, 2015). En ökad kunskap om ålens beteende i kombination med redan beskrivna kunskap om vandringstiming (Stein *et al.*, 2014) skulle markant förbättra förutsättningarna för framtagandet av effektiva åtgärder (Jeuthe & Leonardsson, 2017).

Ålförvaltningsfrågor i Motala ström har varit föremål för flera tidigare studier inom forskningsprogrammet Krafttag ål (Calles & Christiansson, 2012; Calles *et al.*,

2014). Blankålens beteende vid kraftverkspassage har tidigare studerats med hjälp av telemetri vid kraftverken Skärblacka och Fiskeby (Östergren *et al.*, 2014). Den senare studien undersökte möjligheterna till att öka passageframgången för blankål genom att spilla motsvarande cirka 10 % av totalflödet vid de två kraftverken. Försöken visade att detta spill resulterade i att totalt 23 % av blankålarna passerade kraftverken via spillluckor, men att endast cirka hälften av de utsatta ålarna initierade nedströmsutvandring under studieperioden som varade nio månader från höst till vår. Tidsåtgången från utsättning till kraftverkspassage var generellt sett lång för ålarna (>1,5 månad), men samtliga ålar passerade kraftverken i mörker och kort efter de anlönt till kraftverken. Studien beskrev ålens beteende vid kraftverkspassage och hur den beror av rådande hydrauliska förutsättningar, men kunde endast beskriva detta i grova drag till följd av lågupplöst telemetridata.

Som en konsekvens av ovan beskrivna kunskapsbrist initierades 2015 forskningsprojektet "Ålvandring komplett – från start till kraftverkspassage" av Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) i samarbete med Karlstads universitet (KAU) och Umeå universitet (UMU). Målet med projektet är att öka kunskapen om blankålsutvandring genom att uppnå fyra projektmål, varav samtliga fyra delmål behandlas i innevarande rapport:

1. Förbättra kunskapen om vad som får ålen att initiera vandring
2. Undersöka potentialen för "vandringsindikatorer" (Eng. early warning) för att prediktera vandring?
3. Öka kunskap om ålens beteende och vandringsväg in mot kraftverk.
4. Undersöka fördröjd dödlighet (mortalitet) efter kraftverkspassage.

Projektet har bestått i att blankålar i Motala ström märkts med telemetrisändare och deras rörelser registrerats med hög precision vid passage av Holmens kraftverk i Norrköping. Ålens rörelsemönster har därefter analyserats mot uppmätta förklarande variabler samt en hydraulisk kartläggning av området kring Holmens kraftverk. Slutligen har en metodjämförelse utförts mellan telemetridata och data från sonarer placerade i samma område.

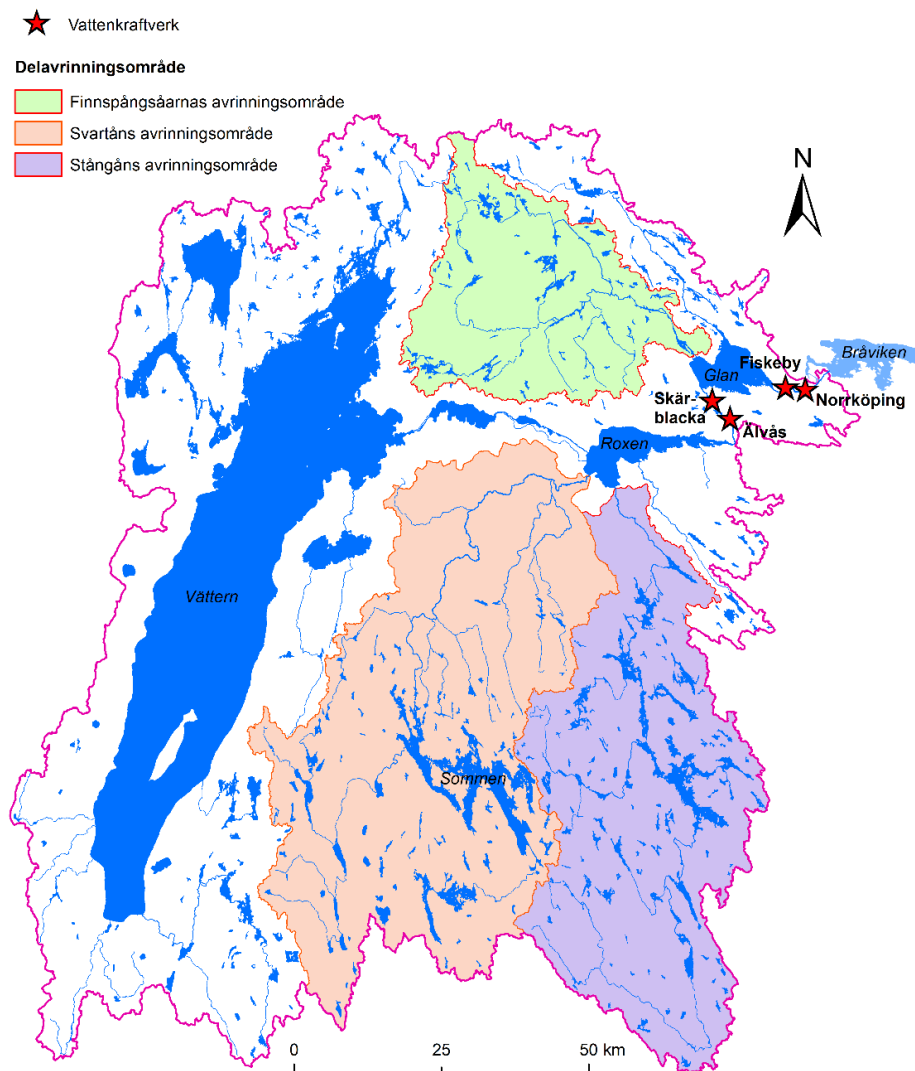
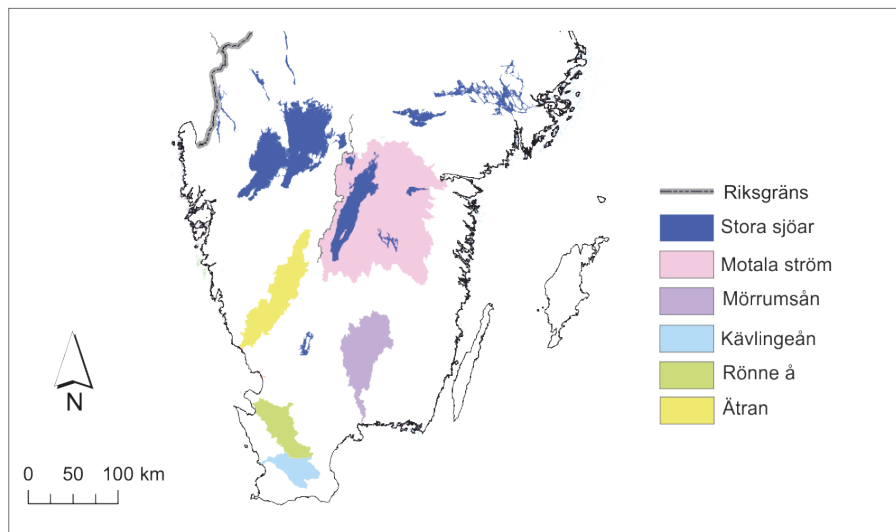
3 Material och metoder

Projektets har bestått i att studera ålens rörelser och hur detta förhåller sig till vattnets strömning (hydraulik). Ålens rörelser har undersökts med hjälp av akustisk telemetri och sonar, medan hydrauliken har kartlagts med hjälp av en ADCP.

3.1 PLATSBESKRIVNING

Motala ström har ett årsmedelflöde på cirka 96 m³/s och sträcker sig från Vättern i Motala till Bråviken i Norrköping där den mynnar ut i Östersjön (Figur 1). De huvudsakliga produktionsområdena för ål i systemet är belägna i sjöarna Roxen, Glan och Sommen (Calles *et al.*, 2014). Uppströmsvandrande ålyngel fångas i anslutning till vandringshindren i Norrköping och transporteras därefter uppströms och sätts ut i Roxen och Glan. Blankål i Roxen måste således passera fyra kraftverk under sin vandring mot havet, nämligen Älvås, Skärblacka, Fiskeby och Holmen eller Bergsbron-Havet. Driften av samtliga kraftverk planeras och koordineras i tvåveckorsperioder. Innevarande studie har studerat ålutvandringen från nedströms Fiskeby kraftverk förbi Holmens kraftverk och ner till Motala ströms mynning i Bråviken, Östersjön

Utöver data som samlats in i Motala ström inom ramen för projektet har även rådata från ett tidigare Krafttag ål-projekt av Stein *et al.* (2014) nyttjats för vidare analys av vad som får ålen att initiera vandring. Data har samlats in från fällor i tre vattendrag i södra Sverige, nämligen ålkistor i vattendragen Skärhultaån (Ätran), och Kävlingeån, samt ålavledare med fångstanordningar vid kraftverket i Ätrafors (Ätran). Dessutom har data med ålfångster från fisket i Havbältan vid Åsnens utlopp, Mörrumsån, för perioden 2003-2009 varit tillgängligt för analys (källa Arne Fjälling).



Figur 1. De avrinningsområden som studerats (överst) samt Motala ströms avrinningsområde (figur från Calles et al. (2014)). "Norrköping" avser kraftverken Holmen respektive Bergsbron-Havet.

3.2 TRIGGERS

I de tidigare vetenskapliga arbetena om ålvandring har analyserna av vad som initierar vandringen fokuserats på vilka variabler som är av betydelse snarare än hur de enskilda variablerna påverkar. För att kunna göra prognoser behövs kunskap om hur vandringssannolikheten förändras kvantitativt när till exempel flöde, temperatur och månfas förändras. Utmaningen ligger därför i att utveckla en analysmetod som gör det möjligt att utvärdera formen på dessa sannolikhetsfunktioner i relation till respektive variabel. Dessutom skall analysen kunna ge resultat som kan användas för att avgöra vilka variabler som är av betydelse (signifikanta) för att förklara vandringen. En modell som uppfyller dessa kriterier behöver hantera de enskilda ålarnas val för varje enskild dag till dess att de bestämmer sig för att vandra. Om sannolikheten som beskrivs av omvärldsförhållandena för en enskild ål att vandra dag 1 är p_1 så blir sannolikheten $1-p_1$ att ålen inte vandrar den dagen. För en ål som inte vandrade dag 1 blir sannolikheten att vandra dag 2: $(1-p_1)*p_2$, där p_2 anger vandringssannolikheten baserat på omvärldsförhållandena dag 2. Sannolikheten att en ål skall vandra dag t blir då:

$$p(t) = p_t * \prod_{i=1}^{t-1} (1 - p_i).$$

Vid utvärdering av vandringsmönstret över säsongen av ett givet antal ålar, N , kommer summan av proportionerna som vandrar enskilda dagar under säsongen att uppgå till 1. Det innebär att tidsserien karaktäriseras av olika sannolikheter som summerar till 1 när säsongen är över eftersom fokus endast är på de individer som faktiskt vandrar. Denna egenskap uppfyller kriterierna för en multinomialfördelning, vilket ger en likelihood-funktion enligt:

$$L(\mathbf{p}) = N! \prod_{t=1}^T \frac{(p_t * \prod_{i=1}^{t-1} (1-p_i))^{n_t}}{n_t!},$$

där $n_t \geq 0$ motsvarar antalet ålar som observeras dag t , vilket ger det totala antalet ålar under säsongen som avslutas dag T : $\sum_t n_t = N$.

För att analysera hur olika omvärldsvariabler påverkar vandringssannolikheten kan en logistisk funktion användas istället för p_x , där x motsvarar i eller t i ovanstående ekvation. Den logistiska funktionen som beskriver p_x som en funktion av två omvärldsvariabler X_1 och X_2 blir:

$$p_x(X_1, X_2) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 * X_1(x) + \beta_2 * X_2(x))}}$$

där β_i är koefficienter. Den bästa anpassningen av den logistiska funktionen erhålls när likelihood-funktionen maximeras. Eftersom omvärldsdata kan uppvisa stor variation även mellan närliggande dagar, speciellt flödet, är det risk att programvaran som söker den bästa lösningen fastnar i så kallade lokala maxima. Av den anledningen bör man söka den bästa anpassningen genom att testa många olika startvärden för koefficienterna. Mathematica ver. 11.2 användes vid dessa beräkningar (Wolfram Research, Inc. 2017).

3.2.1 Åldata

Data på ålvandring, eller snarare ålfångster, var desamma som analyserades av Stein *et al.* (2014). Fångsterna gjordes under åren 2011 till 2013, i tre vattendrag; Skärhultsån som är ett biflöde till Högvadsån som i sin tur mynnar i Ätran strax nedströms Ätrafors, Ätran med fångst i Ätrafors, samt Kävlingeån i Skåne (se Stein *et al.* (2014)) för mer utförlig beskrivning av fångstmetoder och områdesbeskrivningar).

3.2.2 Omvärldsdata

Eftersom fokus i analyserna var att identifiera vad som initierar vandrigen valdes tillrinningsdata till de närmaste områdena uppströms där man kan anta att ålarna befann sig när de påbörjade vandrigen. Motiveringen till detta val var att ålarna antas reagera på en eller flera signaler från omgivningen och ändrade förhållanden i tillrinningen har en potential att påverka såväl vattenkemi, temperatur som vattenståndet/flödet. Data på genomsnittliga dygnsflöden och vattentemperaturer hämtades från SMHI:s vattenwebb (<https://vattenwebb.smhi.se>). De data som användes gällde; Skärhultsån (Utloppspunkt, SWEREF99: 370360, 6338385), Ätran (Utloppspunkt, SWEREF99: 386710, 6343186) och Kävlingeån (Utloppspunkt, SWEREF99: 389521, 6182818).

För att begränsa antalet möjliga transformeringar av dessa variabler valdes här de mest rimliga alternativen. Om flödet är en viktig trigger, vilket det verkar vara enligt tidigare studier, bör man förvänta sig att responsen ökar med flödet men att ökningen inte nödvändigtvis är linjär. För ge utrymme för en sådan respons användes en potensfunktion för flödet (aQ^b). Vad gäller temperaturen torde det snarare vara ett intervall som är lämpligt för vandring medan mycket låga och mycket höga temperaturer förväntas hämma vandrigen. Möjligheten till en sådan respons ges av en andragradsekvation.

Ytterligare omvärldsdata som i flera studier framstått som betydelsefulla i sammanhanget är månfas och dagslängd och dessa variabler inkluderades även i analyserna i denna rapport. Uppgifter om dessa beräknades med hjälp av Mathematica funktionerna MoonPhase, Sunrise och Sunset (Wolfram Research, Inc. 2017). Studier av ålarnas omställning till silverålsstadiet har visat att mognadsprocessen börjar under sommaren och kulminerar under hösten (Durif *et al.*, 2009). Den aspekten kan inkluderas i analysen i form av en motivations- eller snarare mognadskurva som ökar från sommar till höst. Det blir dock svårt att skilja på effekterna av dagslängd och mognadsnivå i modellen eftersom dessa två kommer att vara starkt korrelerade från sommar till senhöst. Av den anledningen har endast dagslängden använts i analyserna. Eftersom mognadsgraden ökar under sensommar-höst kommer de som inte vandrar under hösten vintern att ha fortsatt hög motivation att vandra till våren. För att analysera data från våren skulle man även behöva data från sommaren, hösten och vintern innan eftersom analysen fördelar det antal individer som anges initialt över den period som anges i fångstdata. Alternativet vore att göra en separat analys av vandrigen under våren. Då skulle det räcka med fångstdata från våren som underlag. I avsaknad på sådana data från de tre vattendragen har analyserna begränsats till sensommar-höst.

3.2.3 Tidsfördröjning från signal till vandring och fångst

Eftersom ålarna befinner sig en bit uppströms när de får signalerna som de reagerar på kan man förvänta sig att det blir en tidslagga mellan signal och fångst. Av den anledningen utvärderades olika tidslaggar, från noll till sju dagar, för de variabler som kan förväntas ge påtagliga skillnader i signalstyrka inom den tidsdomänen.

3.2.4 Modellselektion

För att kunna skilja mellan olika modeller valdes modellselektion med Akaikes Information Criterion (AIC) som utgångspunkt. Med den fullständiga modellen som utgångspunkt uteslöts sedan en eller flera variabler åt gången vilka var och en analyserades med varierande tidslaggar från noll till 7 dagar. Den modell med lägsta AIC skall då i teorin vara den mest tillförlitliga modellen. Den bästa modellen applicerades sedan på data från Ätran och Kävlingeån för att jämföra utfallet med de observerade fångsterna.

3.2.5 Jämförelse i respons mellan ålar i de tre vattendragen

Istället för att göra separata analyser för data från de tre vattendragen gjordes en första analys med samtliga års data från Skärhultsån. Därefter användes parametervärdena från den bästa modellen för att återskapa vandringsmönstren i de två andra vattendragen. Det torde dock finnas behov att justera flödesdata från Ätrafors och Kävlingeån för att få en bra anpassning av modellen till data eftersom storleken på vattendragen skiljer sig åt. Ytterligare en aspekt som borde behöva justeras är tidslaggen mellan signal och fångst eftersom avståndet från uppväxtområdena till fångstområdena sannolikt skiljer sig mellan de tre områdena.

3.3 TELEMETRI

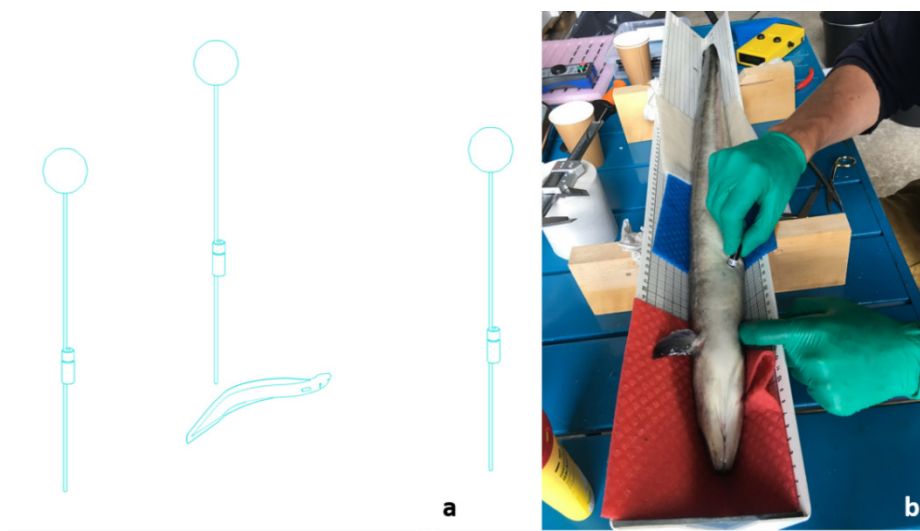
Information om ålens nedströmsvandring, samt rörelser och beteende, samlades in med akustisk telemetri. Akustisk telemetri är en fiskspårningsteknologi där man märker fisken med sändare som sänder kodade ljudsignaler. Märkta fiskar kan spåras via hydrofoner som detekterar och avkodar dessa signaler. Om signalen detekteras av tre eller flera hydrofoner samtidigt kan fiskens absoluta position i vattnet bestämmas med hög rumslig precision m.h.a trianguleringsmetoder (Figur 2).

Ål fångades av yrkesfiskare i sjön Glan med ålryssjor och sumpades under ett dygn i stora perforerade lådor (sumpar) nedsänkta i vattnet. Totalt märktes 60 ålar med akustiska sändare. Ålen hävades från sumparna till balja innehållandes bedövningsmedlet MS222. När ålen befanns vara i djupbedövning, flyttades den till en märkvagga där den lades med buken uppåt. Ett ca 15 mm långt skalpellsnitt gjordes snett ventralt strax bakom höger bröstfena i vilket sändaren stoppades in (Figur 2). Sändaren hamnade då i nedre bukhålan på ålen. Snittet stängdes sedan med två stygn av kirurgiklassad sutur. Märkningsprocessen tog i snitt ca 8 minuter. Efter märkning tilläts ålarna vakna upp i väl syresatt vatten i en balja. I

samband med märkningen togs också data på längd, vikt, fetthalt, ögondiameter, längd på bröstfena samt okulär bedömning av silvergrad.

Tre typer av akustiska sändare användes; Vemco V9-2H (9 x 25 mm, 3.7g), Lotek MM-M-8-SO-TP (8.5 x 47mm, 6g) och Lotek MM-M-11-28-TP (12 x 65mm, 13g). För att undvika problem med signalkollision, användes ett modernt sk. High-Residency (HR) system vilket medgav att sändarna kunde sända med mycket tätt tidsspann utan att störa ut andra märkta ålar inom hydrofonernas räckvidd. Vemco V9-2H sände en HR signal i snitt var 0.7 sekunder på 170 kHz. För att även kunna utnyttja hydrofoner från ett äldre signalsystem i spårningen, så sände också V9-2H en kodad signal på 180 kHz var 30:e sekund. Detta äldre signalsystem användes framförallt för att spåra fiskens vandring genom Motala ström, medan HR-systemet användes för mer finskalig positionering runt Holmens kraftverk (se Figur 2). Lotek MM-M-8-SO-TP och Lotek MM-M-11-28-TP sände i snitt var 5:e sekund på 76 kHz. Förutom ID-signal, sände också Lotek-sändarna information om djup och temperatur.

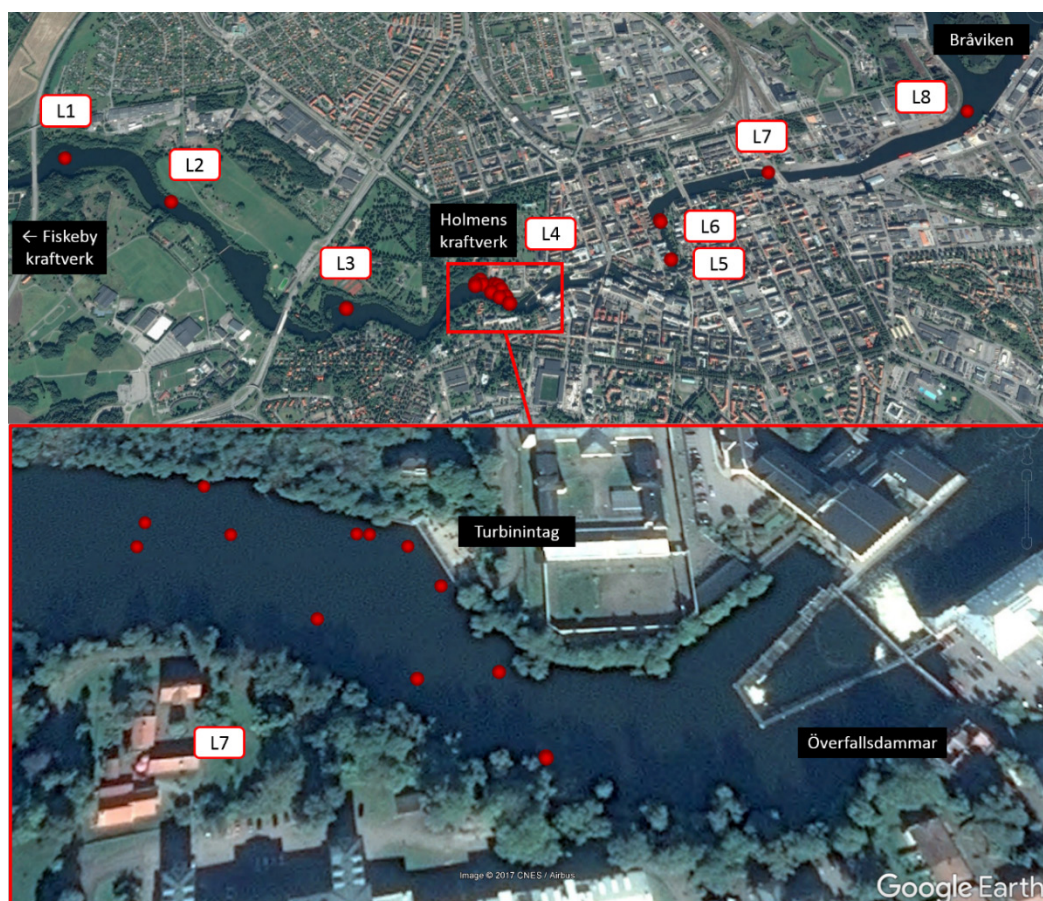
Samtliga 60 ålar märktes med V9-2H. Av dessa märktes 17 ålar även med Lotek MM-M-8-SO-TP och 17 ålar med Lotek MM-M-11-28-TP (dvs dubbelmärktes). Loteks -signalsystem användes i kombination med HR-systemet i området runt Holmens kraftverk i syfte att generera högupplöst 3D-data på ålen.



Figur 2. Schematisk bild av märkt ål inom ett nätverk av hydrofoner. Akustisk telemetri möjliggör finskalig positionering av märkt fisk via triangulering av sändaren. b) Kirurgisk märkning av ål med akustisk sändare.

Märkningen av ålarna skedde mellan den 28 Juli och den 25 Augusti 2016. Några timmar efter märkningen, vid skymning, transporterades ålarna till utsättningsplatsen. 50 av ålarna sattes ut nedströms Fiskeby kraftverk (Figur 1), 3,4 km uppströms Holmens kraftverk och 6,6 km från Motala ströms mynning. För att kontrollera för eventuella rörelser av död ål samt effekter av hanteringen på levande ål, sattes 4 avlivade märkta ålar och 6 levande ålar (samtliga singelmärkta med V9-2H) ut nedströms Holmens kraftverk, ca: 2,6 km från vattendragets mynning (Figur 1 och Figur 3). Ålens rörelser och beteende spårades sedan via 16

hydrofoner (Vemco HR2 & VR2W), från utsättningsplatsen ner till sista hydrofonen (Figur 3). Runt Holmens kraftstation upprättades ett nätverk av 8 Vemco HR2 hydrofoner för att positionera finskaligt beteende (Figur 3). I mitten av detta nätverk placerades även en Lotek WHS 3250 hydrofon i syfte att detektera djup och temperaturinformation från ål dubbelmärkt med loteksändare.



Figur 3. Fördelning av hydrofoner (röda prickar, $n = 40$) mellan utsättningsplatsen nedströms Fiskeby kraftverk och Motala ströms utlopp i Bråviken (överst) samt en inzoomad bild över hydrofonernas ($n = 22$) placering vid turbininloppet till Holmens kraftverk (nederst). Karta modifierad från Google earth.

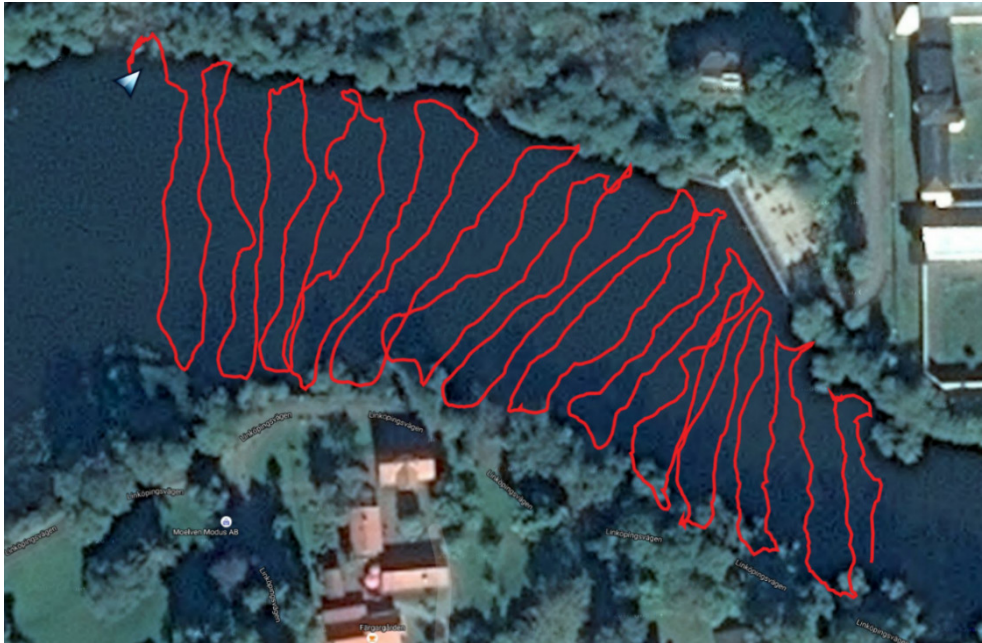
3.4 HYDRAULISK KARTLÄGGNING

Djup- och strömförhållanden framför intaget till Holmens kraftverk i Norrköping kartlades med hjälp av en ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, Workhorse Rio Grande ADCP monterat på en Riverboat, Teledyne Marine). Mätningarna utfördes under perioden 25 augusti till 14 september 2016 under två olika driftscenarior vid kraftverket, turbinstopp med spill via den gamla fåran, och turbindrift med lite spill (Tabell 1).

Tabell 1. Översikt över djup- och strömmätningar utförda med ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) framför intaget till Holmens kraftverk under tre olika driftscenarior.

Scenario	Flöden	mätdatum	Mätperiod (kl.)
Turbinstopp	Spill 27 m ³ /s	2016-08-25	13:07-14:24
		2016-08-25	15:47-16:37
		2016-08-26	10:15-12:10
		2016-08-26	14:29-15:39
Turbindrift lite spill	Turbin ~35 m ³ /s Spill ~2,5 m ³ /s	2016-08-30	05:50-07:30
		2016-08-31	05:33-07:19
		2016-09-01	05:32-06:54
		2016-09-13	05:34-08:00
		2016-09-14	05:33-07:43

Mätningarna utfördes genom att bogsera ADCPn med en eka försedd med en liten (2,3 hk) utombordsmotor. ADCPn bogserades parallellt med båten för att turbulens från motorn inte skulle påverka strömbilden i vattnet under mätutrustningen. Båten färdades under mätningarna vid en hastighet på högst 0,5 m/s. Riktvärdet låg på 0,2-0,3 m/s, men strömförhållande gjorde det stundtals svårt att hålla denna låga hastighet. Mätningarna utfördes med tvärgående transekter från strand till strand och studieområdet täcktes av efter hand i motströms riktning. Mätningarna påbörjades i omlöpet ett stycke nedströms om kraftverksintaget och mätområdet sträckte sig till strax uppströms den översta loggern för högupplöst telemetri (Figur 1 och Figur 3). För djupkartering utvidgades studieområdet något uppströms (Figur 4). Avståndet mellan transekterna lades så att mätningar fanns tillgängliga från varje (tänkt) ruta på 10 x 10 m inom studieområdet. Mätningarna direkt framför intaget gjordes något tätare (Figur 5). Upplösningen bestämdes av den modell data skulle användas för. Varje scenario (turbindrift kontra turbinstopp) mättes upp vid flera tillfällen (fyra eller fem) för att säkerställa tillräckligt antal mätpunkter (Tabell 1).



Figur 4. Mätningar med ADCP vid intaget till Holmens kraftverk utfördes längs tvärgående transekter som täckte av studieområdet i uppströms riktning. Den röda linjen illustrerar inmätningarnas placering.

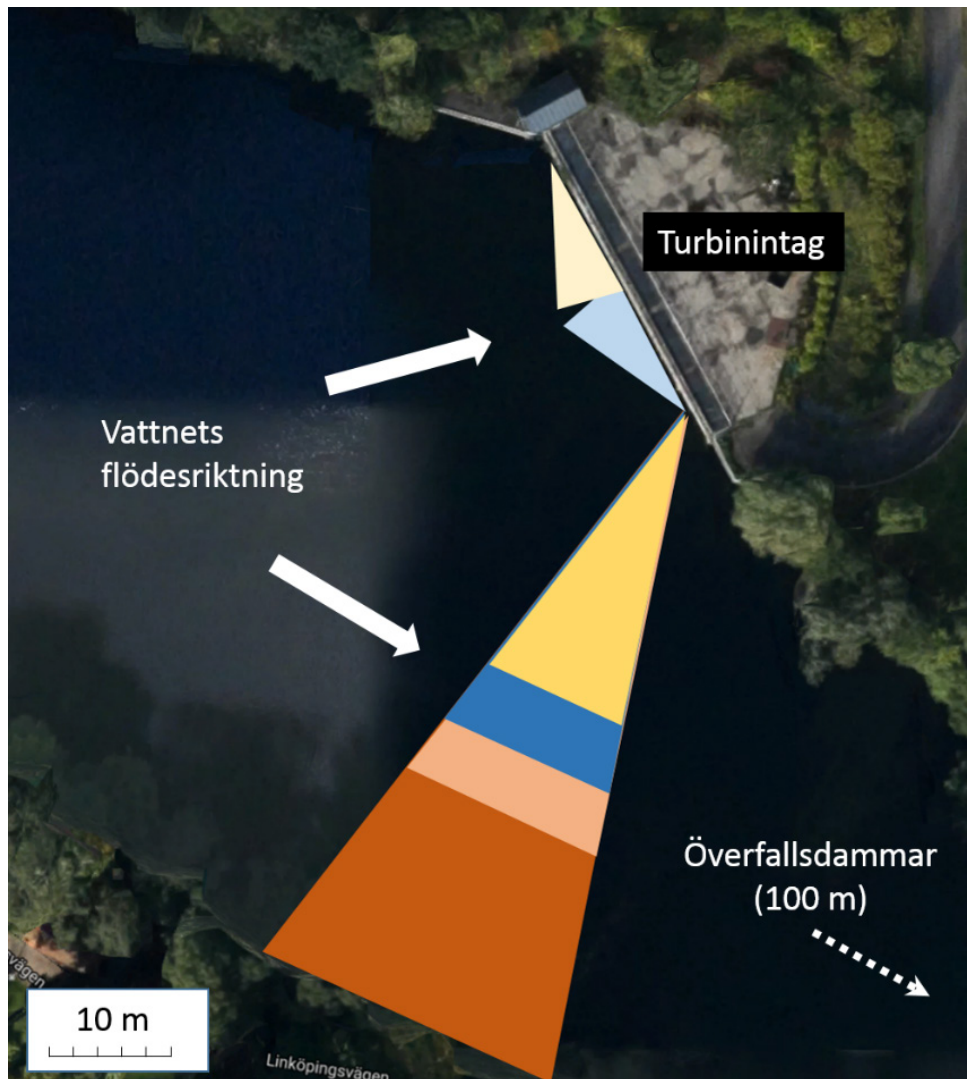


Figur 5. Närmast intaget till Holmens kraftverk gjordes ADCP-mätningar längs tätare transekter parallellt med intagsgallret. Pilen visar riktningen för transekterna, med start vid servicebyggnaden i riktning mot sydost. Resultaten från mätningarna presenteras i riktning

3.5 SONARSTUDIE

Sonarkameror användes för att studera nedströms vandrande ålar i anslutning till Holmens turbinintag. Det primära syftet var att kombinera information från filmsekvenser av ålar med telemetridata för att i detalj kunna beskriva hur blankålar beter sig vid turbinintag. Informationen kan även användas för att korsvalidera de två metoderna, dvs observationerna från sonarkamerorna skulle kunna verifiera informationen om de märkta ålarnas vägval. Denna rapport inkluderar endast analyser av sonardata kopplat till ålar märkta med hydroakustiska sändare. För mer generell analys av insamlad sonardata samt beskrivning och utvärdering av de olika sonarsystemen hänvisas till delrapport 2 inom samma projekt (Jeuthe & Fjälling, 2017). Tre sonarkameror från Sound Metrics Corp. (Bellevue, Washington, USA) användes vid undersökningen: ARIS Explorer 1800, DIDSON 300 LR (long range) och DIDSON 300 SR (short range). Dessa placerades så att deras synfält i möjligaste mån täckte området framför kraftverkets intag samt huvudfåran som rinner förbi intaget mot dammarna 100 m längre nedströms (Figur 6). Kamerornas placering byttes ut vid ett par tillfällen för att både ARIS och DIDSON skulle filma både framför intaget och ut mot omlöpet. De olika kameramodellernas prestanda skiljer sig åt, t ex har DIDSON LR har en längre räckvidd men lägre bildupplösning än övriga modeller. ARIS och den vanliga DIDSON SR har förhållandevis likvärdiga specifikationer, men ARIS är en nyare produkt som har ger en högre bildkvalitet och är mer användarvänlig.

Filmning skedde periodvis 2016 motsvarande cirka två månader med ARIS (27/9-26/11) och DIDSON SR (29/9-24/11) respektive cirka en månad med DIDSON LR (26/10-22/11). För att effektivisera granskningen av material från sonarerna granskades först telemetridatan för att identifiera tidpunkter när märkt ål passerade inom sonarernas detektionsområde. Detta tillvägagångssätt genererade begränsade tidsintervall för när ålarna mest sannolikt passerat kamerorna och analysarbetet effektiviserades. Analys av sonardata omfattade dubbel manuell genomgång av videosekvenser, med respektive utan bakgrundsreducering, motsvarande de tidsperioder (+/- 5 min) då märkta ålar passerat kamerorna.



Figur 6. Alternativa placeringar av sonarkameror under studien och deras ungefärliga synfält vid Holmens intag; ARIS vid låg frekvens (mörkblå) och hög frekvens (ljusblå), DIDSON vid låg frekvens (mörkgul) och hög frekvens (ljusgul) samt DIDSON LR vid låg frekvens (mörkorange) och hög frekvens (ljusorange). Synfältens räckvidd är baserade på tillverkarens teoretiska uppgifter för olika frekvenser.

4 Resultat

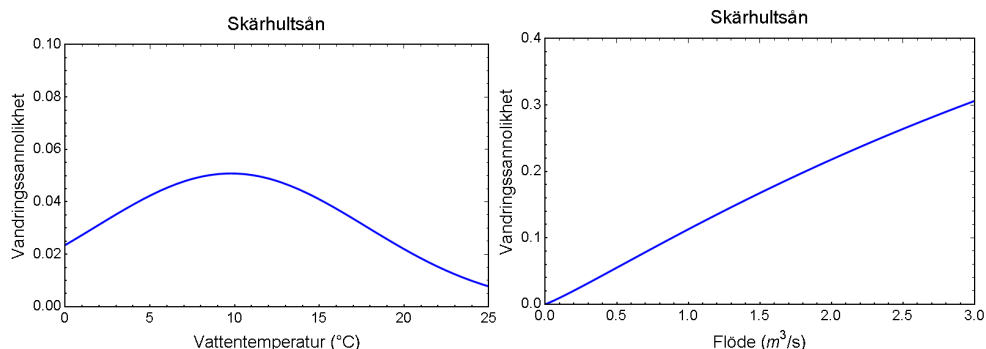
4.1 TRIGGERS

Den bästa modellen, lägsta AIC, med data från Skärhultsån inkluderade variablerna flöde, månfas och dagslängd, samt interaktionen mellan månfas och dagslängd och med tidslag noll. Skillnaden i AIC var dock liten mellan modellerna med respektive utan vattentemperatur (Tabell 2). Flödet var den viktigaste förklaringsvariabeln, följt av månfas, dagslängd och interaktionen mellan månfas och dagslängd. Modellen utan mörkervariabeln var nästan lika framgångsrik som den fullständiga modellen, men om både temperaturen och dagslängden uteslöts försämrades modellen avsevärt. En av dessa variabler behövs därför i modellen som ett mått på säsongsutvecklingen. I detta fall tycks det som att dagslängden ger den information som behövs, vilket även kan vara det som styr ålarnas transformering till silverålsstadiet. Det bör dock nämnas att temperaturen sannolikt blir en viktig komponent i modellen när analyserna gäller data från hela året eftersom ålens vandring avtar när temperaturen sjunker under 8 grader, och under vintern tycks många av ålarna gå i dvala (Westerberg & Sjöberg, 2015). Däremot antyder fångstdata från Mörrumsån att vandringen kan ske vid relativt höga temperaturer under sommaren. Även om modellen där även temperaturen ingick påvisade ett vandringsoptimum kring 10 °C, finns det anledning att tro att formen på temperaturresponsen kommer att bli mer rättvisande när vinter- och sommardata finns tillgängligt för analys.

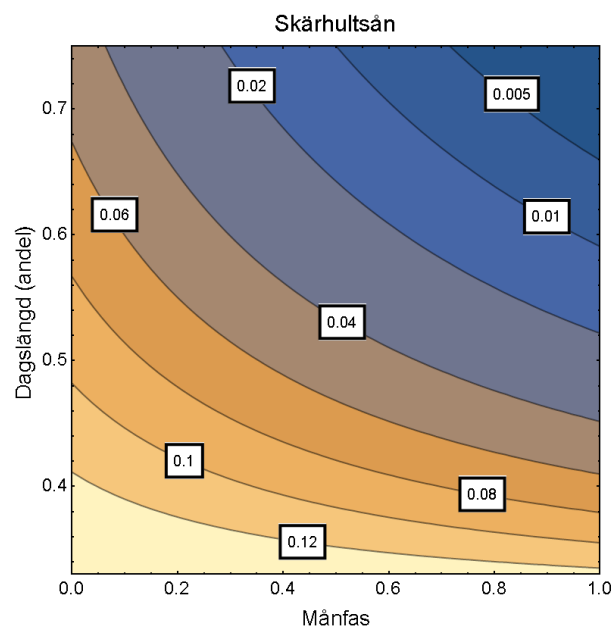
Tabell 2. Den bästa modellen var den med samtliga variabler utom vattentemperatur, men skillnaden var liten jämfört med den fullständiga modellen. Δ AIC-värden upp till 2 betraktas som likvärda modeller. T avser vattentemperaturen. Tidslag angiver fördröjningen i respons mellan signal och fångst i antal dygn.

Tidslag	Alla	-Flöde	-Dag	-Måne	-T ²	-T&T ²	-DagXMåne
0	0.5	727.9	9.9	107.4	0.2	0.0	8.7
1	51.9	723.1	86.6	189.8	50.0	50.1	71.6
2	242.2	737.0	317.4	388.2	240.9	253.7	267.9
3	407.5	766.3	522.8	538.0	409.5	441.6	431.8
4	506.8	813.9	645.3	611.3	510.6	549.2	526.6
5	571.3	879.3	692.4	655.9	577.3	603.8	593.3
6	642.5	938.2	729.4	695.0	641.3	653.0	658.9
7	654.9	982.5	713.5	679.1	655.5	658.9	664.7

För Skärhultsån var vandringssannolikheten nästan linjär mot flödet (Figur 7), medan effekten av månfas och dagslängd ökade snabbare ju kortare dagarna blir (Figur 8). Enligt interaktionstermen mellan månfas och dagslängd är fullmånens negativa inverkning på vandringen som minst sent under hösten när nätterna blir mörkare och längre (Figur 8). Modellresultaten indikerar att den största skillnaden i vandringsbenägenhet mellan nymåne och fullmåne borde inträffa kring höstdagjämningen.

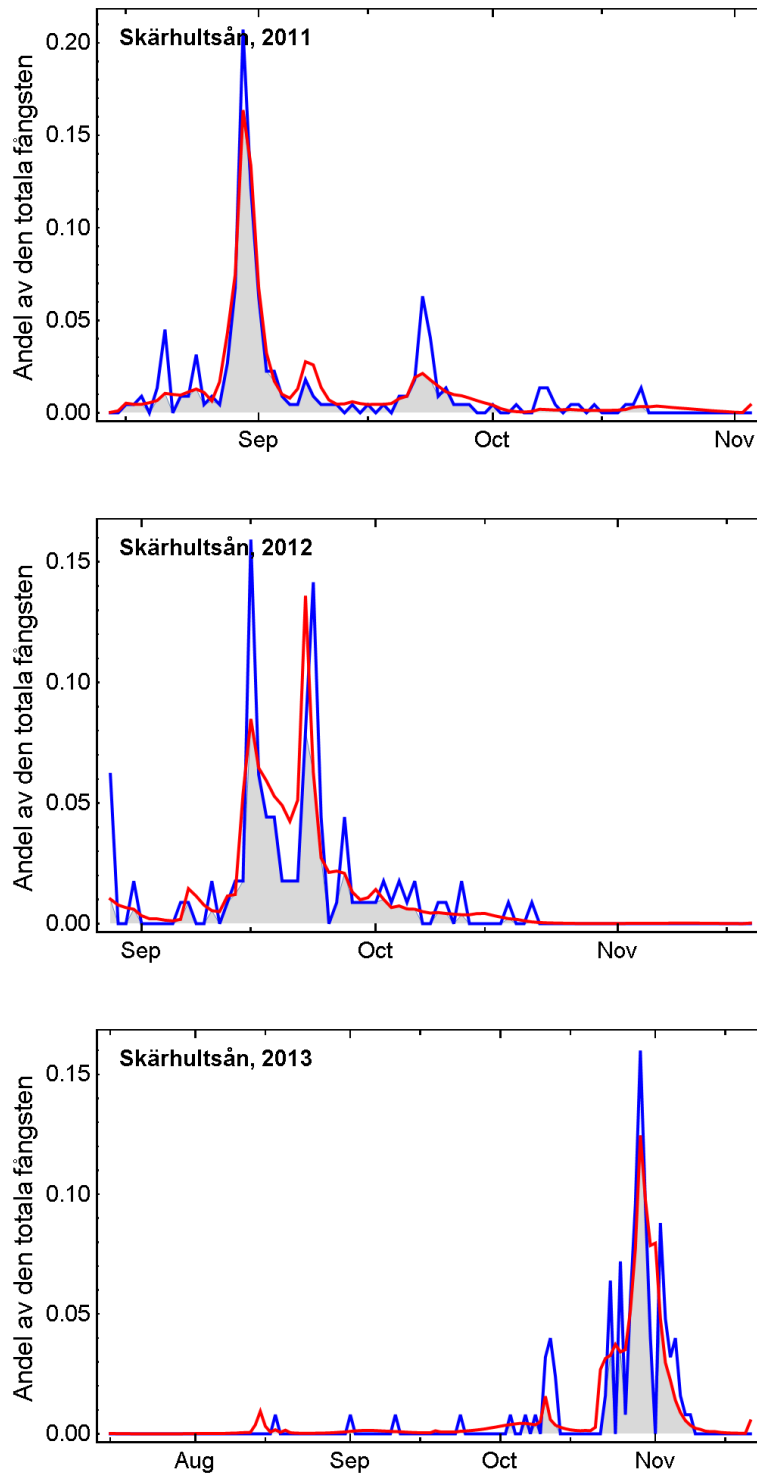


Figur 7. Responsfunktioner som beskriver vandrings sannolikheten i relation till vattentemperatur och flöde i Skärhultsån. I underlaget till de responser som visas användes säsongsmedelvärden för månfas och dagslängd.



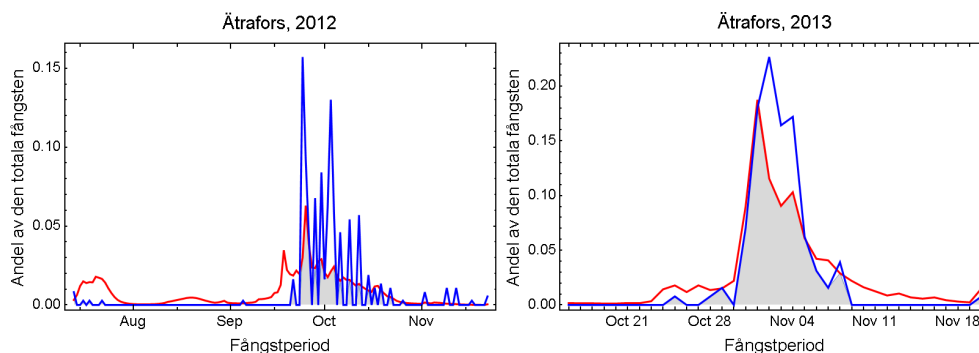
Figur 8. Vandringsrespons uttryckt i sannolikheter för en ål att fångas i fällan som en funktion av månfas och dagslängd när säsongsmedelvärden för vattentemperatur och flöde användes i modellen. Skalan för månfasen går från nymåne (0) till fullmåne (1). När dag och natt är lika långa (dagslängd=0,5) är det ca tre gånger så hög sannolikhet för ålen att vandra när det är nymåne ($P \approx 0.03$) jämfört med när det är fullmåne ($P \approx 0.09$).

Ålarnas vandringsmönster i Skärhultsån under höstarna 2011 till 2013 återgavs väl av modellen, vilket inte är förvånansvärt eftersom parameteranpassningarna gjordes med hjälp av omvärldsdata till dessa fångstdata (Figur 9). I likhet med tidigare studier om ålvandring gav flödespulser en tydlig vandringsrespons.



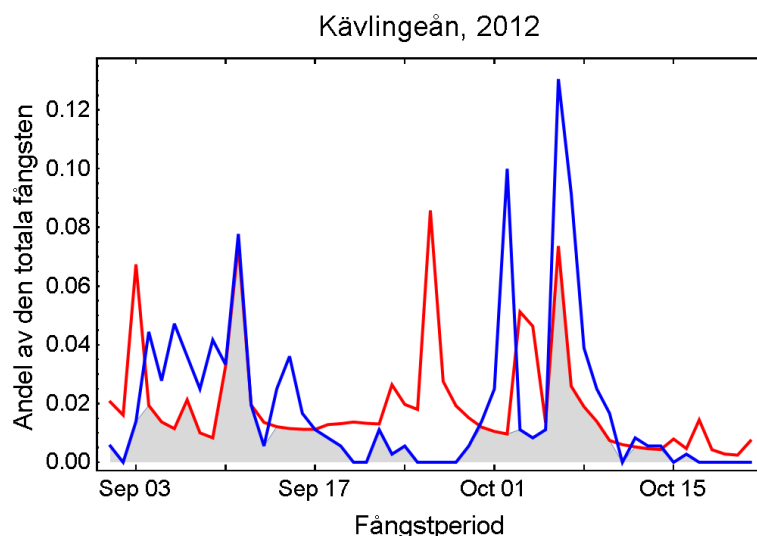
Figur 9. Jämförelse mellan de observerade (blå) och modellerade (röda) andelarna av den totala fångsten i Skärhultsån. De grå fälten visar överensstämmelsen mellan observerat och modellerat. Modellen utan temperaturvariabler användes för att beräkna förväntad fångst, men figurerna skulle även kunna gälla den fullständiga modellen eftersom skillnaderna mellan dessa figurer var nästan obefintliga.

Valideringen av modellen utan temperaturvariablerna med fångstdata från Ätrafors och Kävlingeån visade på en stor potential för att återge ålvandringen i Ätrafors, men inte lika bra för Kävlingeån. Det blev inte någon god överensstämmelse mellan observerat och beräknat när omvärldsdata från dessa två vattendrag användes utan någon anpassning av flöden eller tidslaggar. Däremot blev överensstämmelsen god för Ätrafors efter justering av flödet genom att multiplicera med en faktor 0,2, samt införande av en tidslagg på 3 dygn (Figur 10).



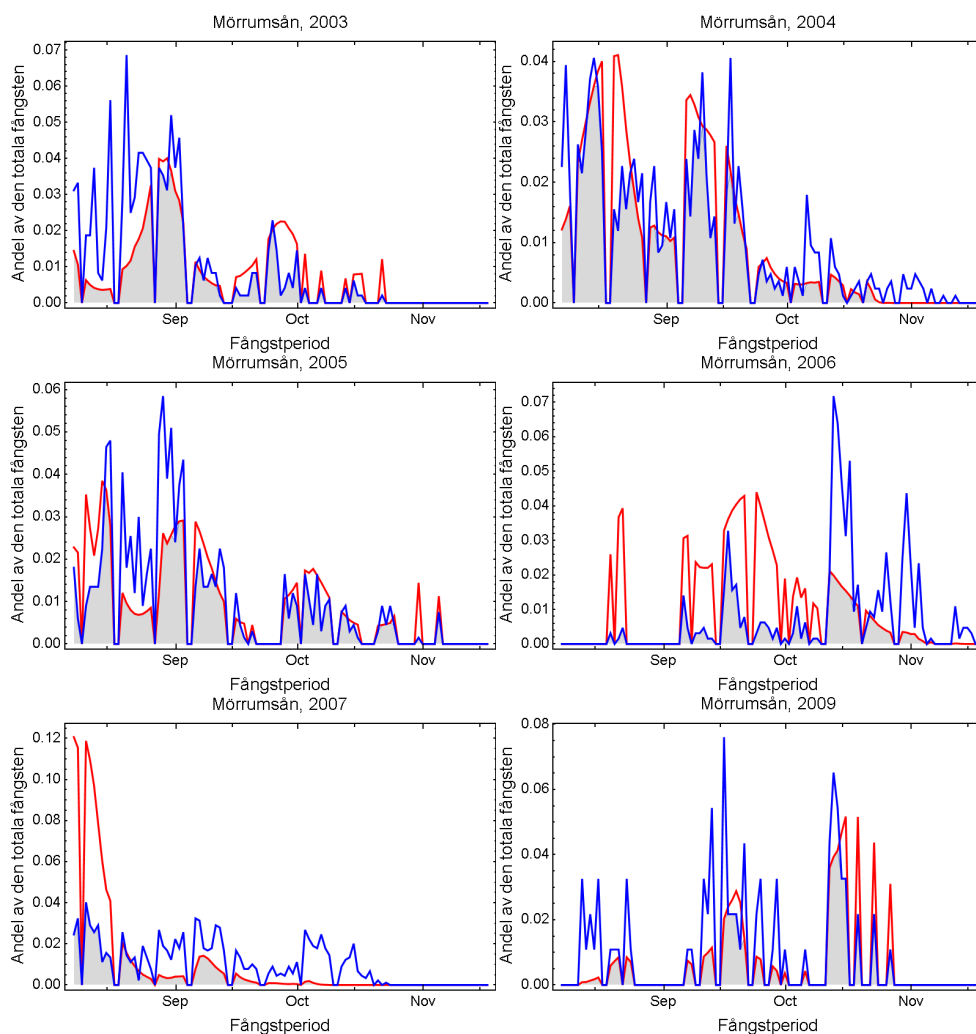
Figur 10. Jämförelse mellan de observerade (blå) och modellerade (röda) andelarna av den totala fångsten i Ätrafors. De grå fälten visar överensstämmelsen mellan observerat och modellerat. Vid modellvalideringen med data från Ätrafors multiplicerades flödet med en faktor 0.2 och tidslaggen sattes till tre dygn. Parametervärdena från den bästa modellen baserad på data från Skärhultsån användes vid beräkningarna av förväntad fångst.

Anpassningen var inte speciellt god till data från Kävlingeån trots justering av flödet och ändring av tidslagg. Den bästa anpassningen erhöles genom att multiplicera flödet med 14 och införa en tidslagg på 12 dagar (Figur 11). Storleken på dessa justeringar antyder att det är något annat som triggar ålvandringen i Kävlingeån än det som förklaras av modellen.



Figur 11. Jämförelse mellan de observerade (blå) och modellerade (röda) andelarna av den totala fångsten i Kävlingeån. De grå fälten visar överensstämmelsen mellan observerat och modellerat. Vid modellvalideringen med data från Kävlingeån multiplicerades flödet med en faktor 14 och tidslaggen sattes till 12 dygn. Parametervärdena från den bästa modellen baserad på data från Skärhultsån användes vid beräkningarna av förväntad fångst.

Anpassningen till data från Mörrumsån varierade mellan år under perioden 2003 till 2009, med god överensstämmelse för några av åren, men betydligt sämre för vissa år (Figur 12). Vid valideringen av dessa data sattes vandrings sannolikheten till noll för de dagar fällan antingen inte var igång, eller att fångstuppegift saknades. Valideringen för 2008 årsdata uteslöts då endast 58 ålar fångades alternativt rapporterades under perioden augusti-december det året.

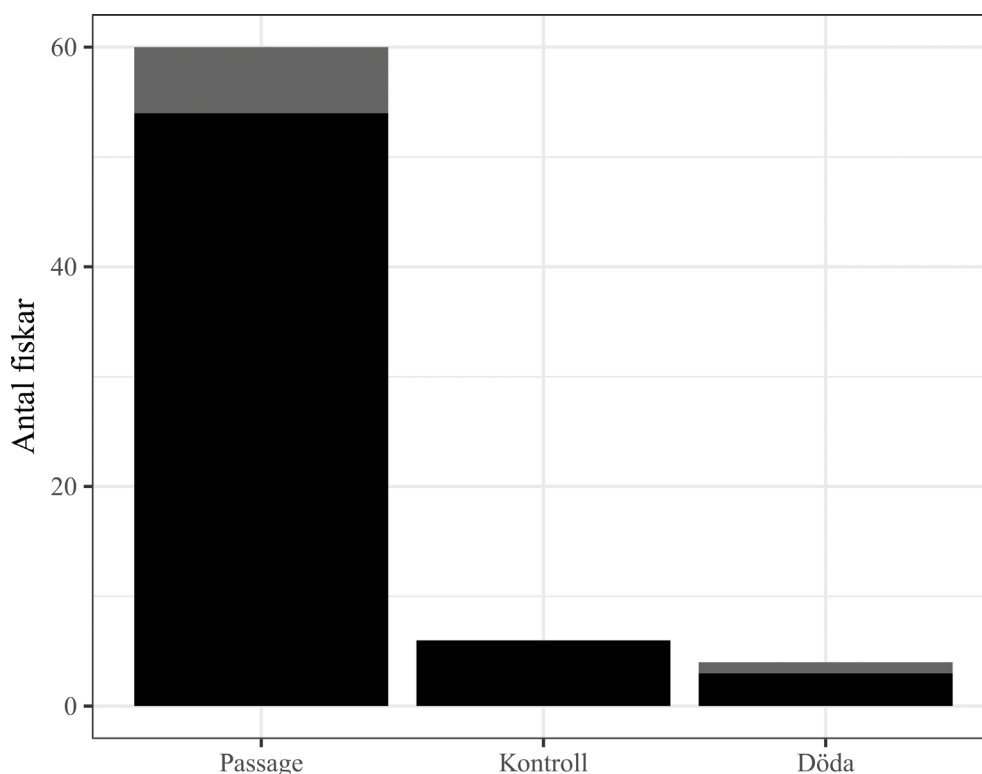


Figur 12. Validering av triggermodellen med parametervärden för månfas och dagslängd från Skärhultsån. Anpassningen till data från Mörrumsån har gjorts genom att multiplicera flödena med 12 samt justerat tidslaggen till tre dygn.

4.2 ÅLENS UTVANDRING I MOTALA STRÖM

Av de totalt 70 märkta ålar som sattes ut, detekterades 63 individer vid någon av de automatiska akustiska loggerstationerna, 54 av 60 från passagegruppen, 6 av 6 från kontrollgruppen och 3 av 4 döda ålar (Figur 13). Endast de individer som detekterats efter utsättning ingår i redovisningen av resultat nedan.

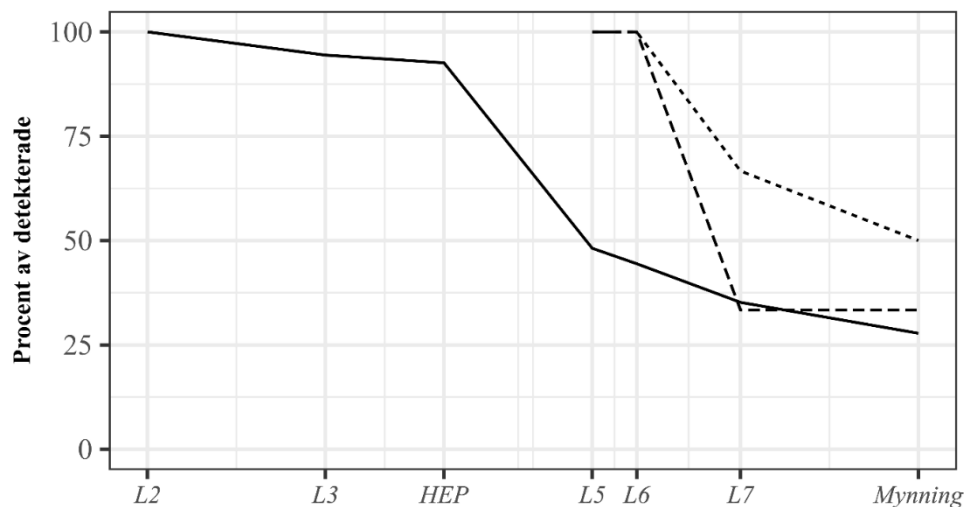
Detektionseffektiviteten vid de olika loggrarna L2-L7 (Figur 2) var hög och varierade mellan 90-100% (L2 = 100%, L3 = 90%, HEP = 100%, L5 = 96%, L6 = 95%, L7 = 100%).



Figur 13. Ålar utsatta och detekterade på någon (svart) eller ingen (grå) logger. Passageålarna är utsatta uppströms Holmens kraftverk medan kontroll och döda ålar är utsatta nedströms Holmens kraftverk.

Av den ål som sattes ut uppströms kraftverket och detekterats under nedströmsvandringen nådde 15 av 54 (28%) Motala ströms mynning och registrerades av den längst nedströms belägna hydrofonen (L8; Figur 3 och Figur 14). Motsvarande resultat för övriga ålar som detekterats efter utsättning var att tre av sex individer (50%) i kontrollgruppen och en av tre individer (33%) av de döda ålarna nådde mynningen.

Samtliga tre kontrollålar detekterades upprepade gånger vid mynningen under 35 - 55 dagars tid. De flesta passageålar passerade mynningsloggern relativt snabbt (median = 2,3 h, range = 13 min – 18 dagar), men fem av passageålarna gjorde upprepade besök vid mynningen, med 1 - 18 dagar mellan första och sista detektion.



Figur 14. Andelen detekterad ål ur respektive passagegrupp i Motala ström (hel linje, n = 54) enligt: kontrollgrupp (kort streckad linje, n = 6) och dödens grupp (lång streckad linje, n = 3) som når loggerstationer (L2-L8). Avståndet på x-axeln motsvarar kilometer av vattendraget. Nedströms detektion förutsätter uppströms närvaro. HEP avser Holmens kraftverk.

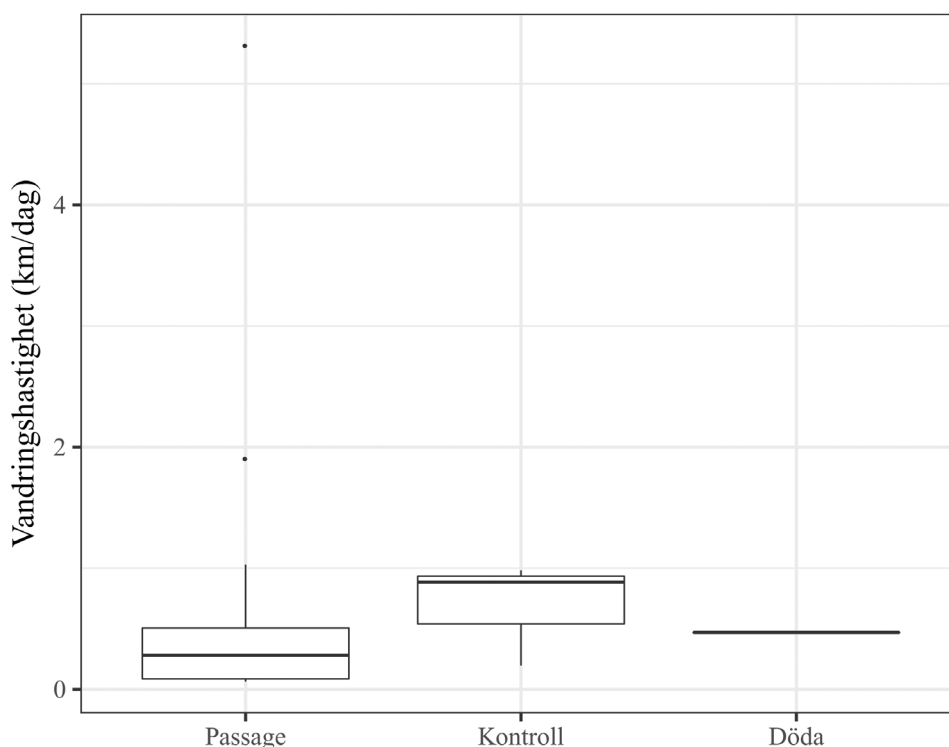
För ål utsatt uppströms kraftverket initierades nedströmsvandring, tid från utsättning nedströms Fiskeby till ankomst till första loggerstationen (L2), efter 2,6 dagar (median, range = 2,2 – 11,3 dagar, n = 54). Motsvarande tidsåtgång från utsättning till ankomst till mynningen var 29 dagar (median, range = 3,7 – 84,2 dagar, n = 15; Figur 15). Motsvarande tidsåtgång från utsättning till ankomst till mynningen för de tre kontrollåarna var 5,4 dagar (range = 2,2 -11,3; Figur 15), att jämföra med tiden om 4,7 dagar det tog för den döda ålen att drifva ut till vattendragets mynning.

Femtio av de 54 märkta ålar som initierade nedströmsvandring ankom till Holmens kraftverk. Av dessa 50 ålar passerade 38 ålar kraftverket (76 %), medan resterande 12 ålar återvände uppströms (24 %). Av de ålar som passerade kraftverket passerade något fler via turbinen (22 av 38 = 58 %) än via spillluckorna (16 av 38 = 42 %). Tid till kraftverkspassage efter ankomst var kort och mediantidsåtgången var 2,4 h (range 2,1 h – 37 dagar), medan motsvarande tid till avbrutet passageförsök var 8,5 h (range 0 min – 68 dagar).

Av de 22 ålar som passerade Holmens kraftverk via turbinen detekterades 13 nedströms kraftverket och åtta ålar nådde hela vägen till Motala ströms mynning, vilket motsvarar en total turbininducerad dödlighet om 14 av 22 individer (64 %). Av de 16 ålar som passerade Holmens kraftverk via spillluckorna och Bergsbron-Havets kraftverk detekterades 12 nedströms kraftverket och sex nådde hela vägen till Motala ströms mynning, vilket motsvarar en total passageinducerad dödlighet om 10 av 16 individer (63 %). Kombinerat dessa resultat för ålar som passerat turbinerna med en fördjupad jämförande analys av utvandringsbeteendet för kontrollgrupperna bestående av levande och döda ålar, tyder resultaten på att 9 av 22 (41 %) förlorades direkt vid turbinpassage (direkt dödlighet) och att resterande 5 av 22 (23 %) förlorades med viss fördröjning (fördröjd dödlighet). Motsvarande förluster för ålar som passerade spillluckorna var att 4 av 16 (25 %) förlorades

direkt vid spillpassage (direkt dödlighet) och att resterande 6 av 16 (38 %) förlorades med viss fördröjning (fördröjd dödlighet). Kombinerar man datan för passage via Holmens turbiner respektive passage via Holmens spillluckor och Bergsbron-Havets kraftverk, erhålls en total direkt dödlighet om 34 % respektive en fördröjd dödlighet om 29 %. Eftersom en ål som var död vid utsättningen nådde mynningen, föreligger dock viss osäkerhet kring den exakta dödligheten och i synnerhet skillnaderna mellan direkt och fördröjd dödlighet.

Således fanns det ingen skillnad i vandringsframgång beroende av passageväg (Fischer exact test, $p = 1$). Det fanns en tendens till att ålar som passerade spillluckorna och Bergsbron-Havets kraftverk tog längre tid från passage till ankomst till mynningen (59,6 dagar, range = 8,4 – 82 dagar), än de ålar som passerade Holmens turbin (median = 15,6 dagar, range = 4,5 – 78,7 dagar), men skillnaden var inte statistiskt signifikant (Wilcoxon-test, $p = 0,23$).

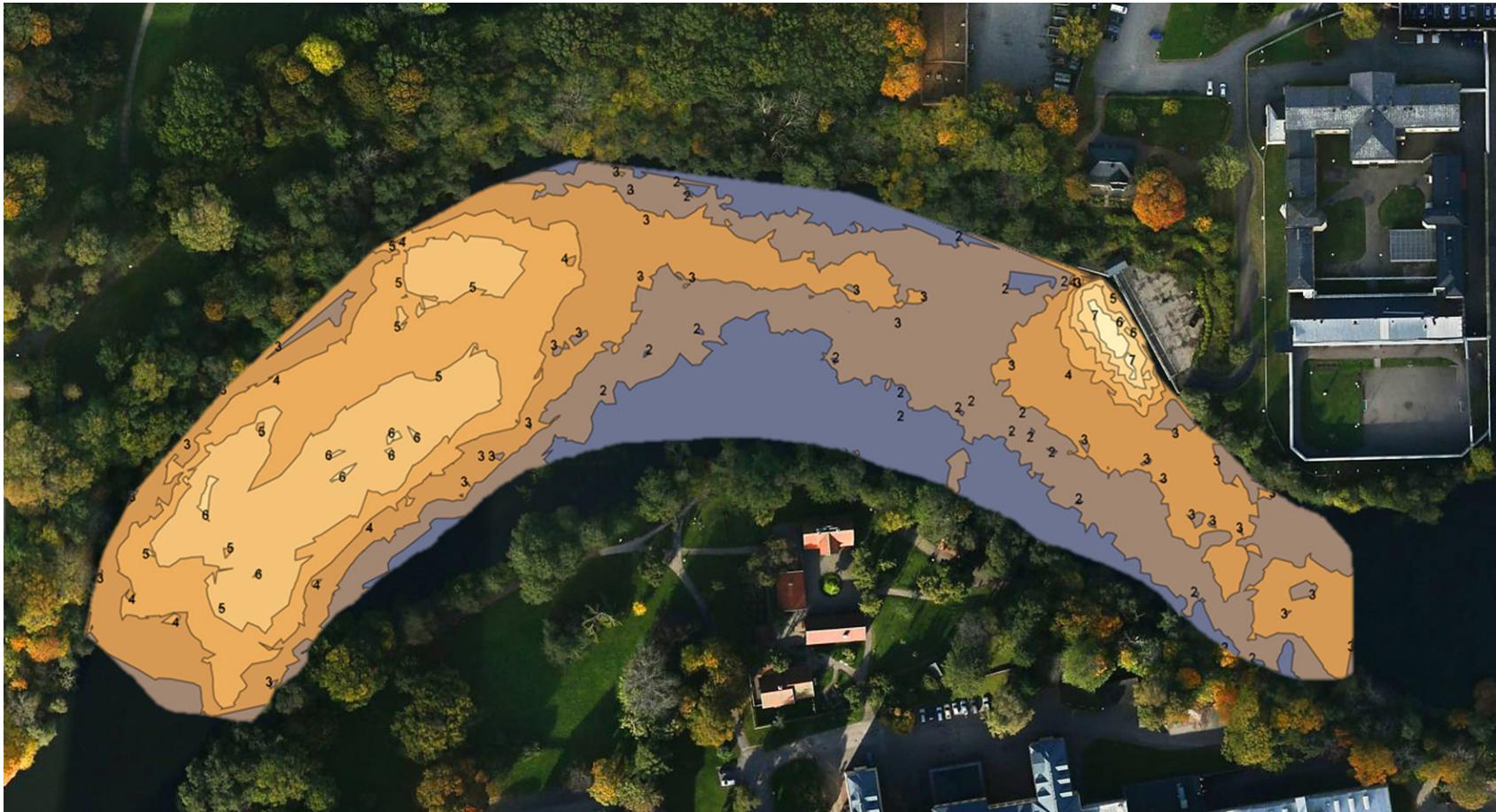


Figur 15. Vandringshastighet (km/dag) från utsättning till ankomst till Motala ströms mynning för ålar utsatta nedströms (kontroll, $n = 3$; döda, $n = 1$) och uppströms (passage, $n = 15$) Holmens kraftverk, Motala ström.

4.3 ÅLENS RÖRELSE I ANSLUTNING TILL KRAFTVERK – TELEMETRI, HYDRAULIK & SONARDATA

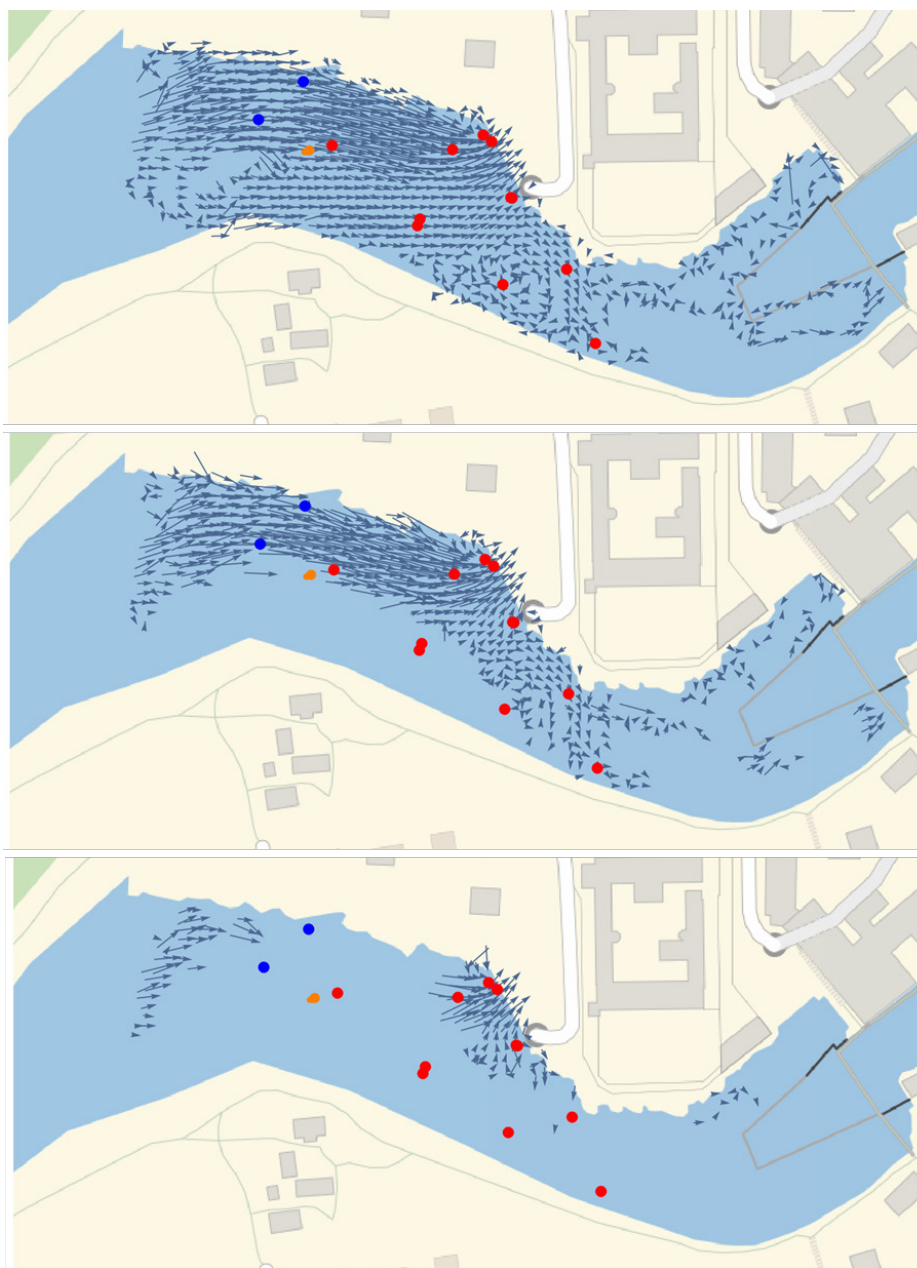
Djupkartering av området kring intaget till Holmens kraftverk i Norrköping visar en relativt tydlig djupfåra uppströms intaget (Figur 16). Djupfåran går mellan mitten och ytterkant (norra stranden) av svängen som leder fram till intaget. Längs yttersvängen ligger en mängd fallna träd i vattnet, vilket försvårade ADCP-körningar nära stranden. De djupaste delarna av djupfåran är ca sex meter. Det största djupet i området ligger på ca sju meter och finns just framför intaget till kraftverket. Ungefär 50 meter uppströms intaget är botten utformad som en

långdragen tröskel på två till tre meters djup. Området längs innersvängen (södra stranden) är grunt och innehöll under mätningstillfällena, under sensommaren, stora mängder undervattensväxter och kaveldun m.m.

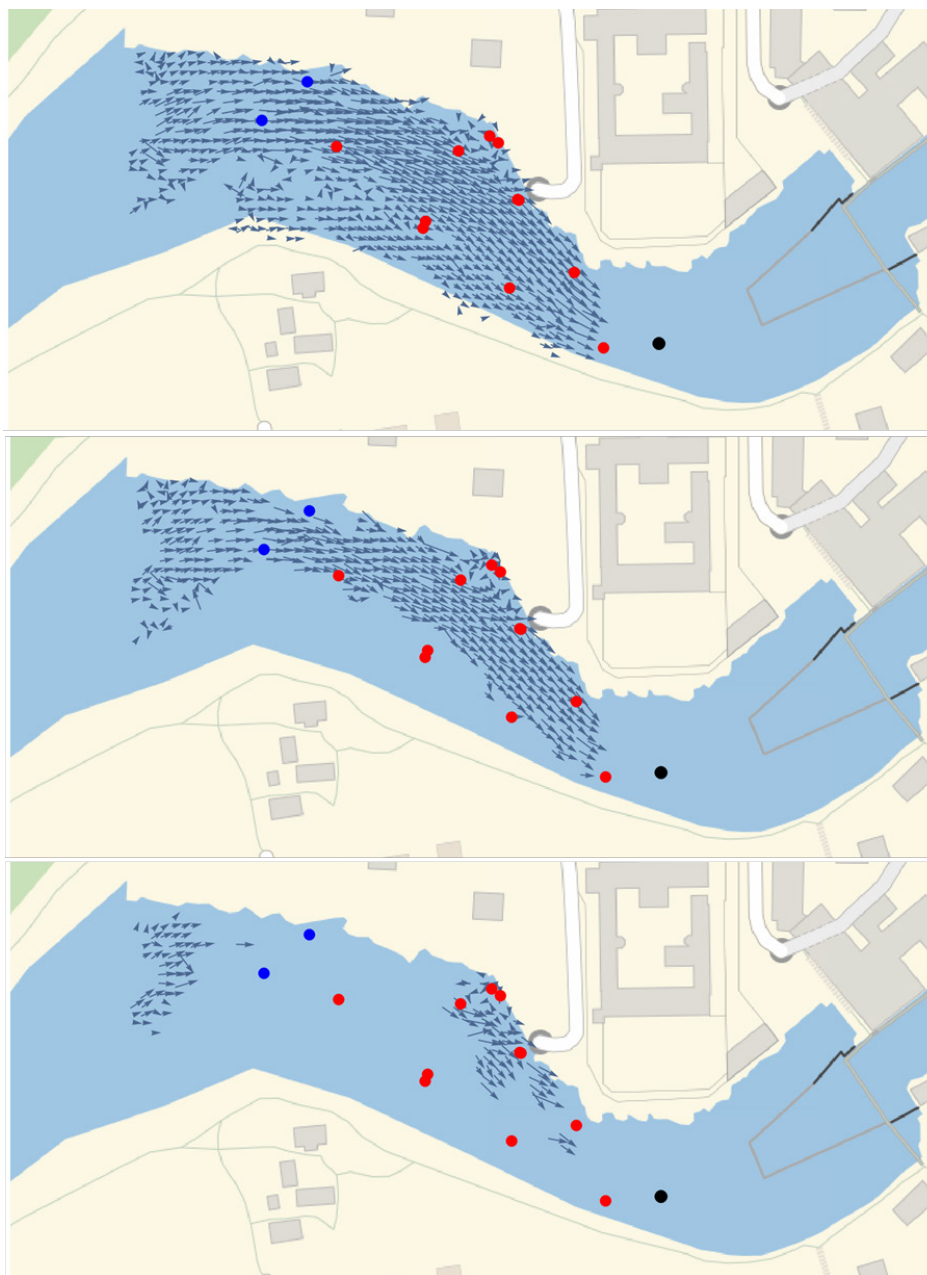


Figur 16. Djupkarta över området framför intaget till Holmens kraftverk i Norrköping, uppmätt med ADCP.

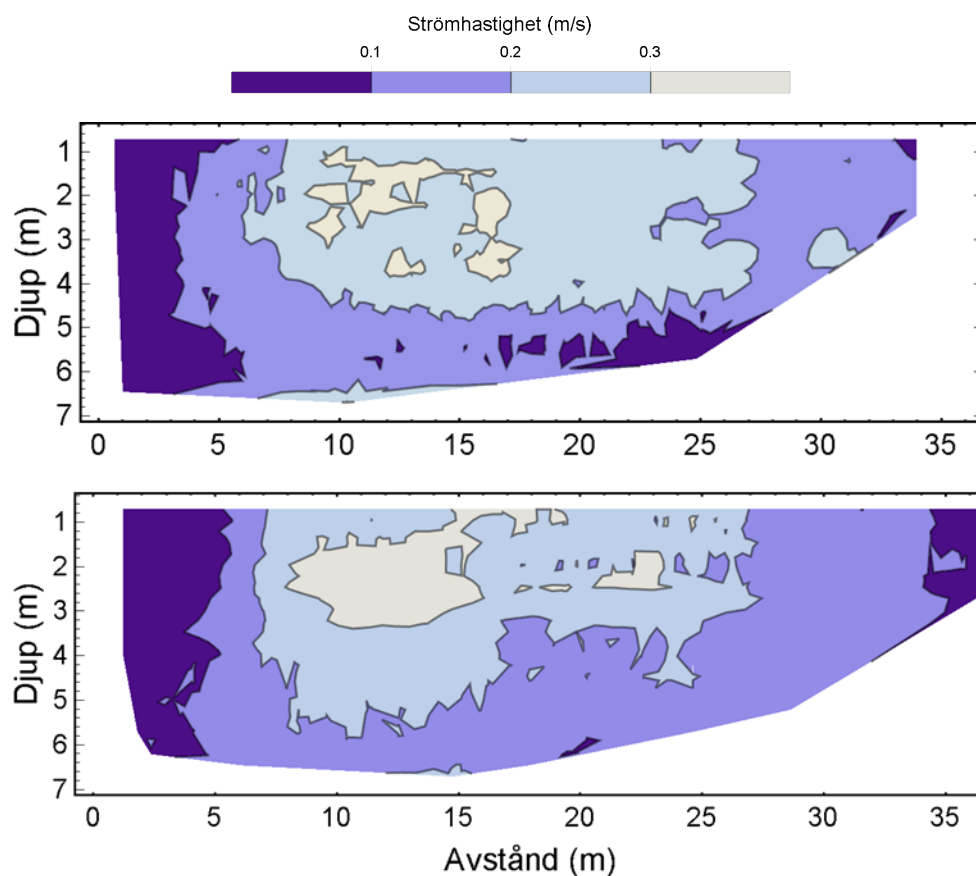
Från strömmätningarna som gjordes med ADCP vid turbindrift och -stopp syns hur huvudströmmen följer djupfåran ut mot yttersvängen innan vattnet når intaget till Holmens kraftverk (Figur 17 och Figur 18). Högst strömhastigheter uppmättes vid det tröskelliknande grundområdet ca 50 m uppströms intaget. Här låg flödes hastigheten i ytskiktet runt 0,4 m/s då turbinen kördes och totalflödet var ca 38 m³/s. Direkt framför intaget är djupet större och flödes hastigheten avtar något till ca 0,3 m/s (Figur 5 och Figur 19). Flödet in i intaget är i huvudsak begränsat till området med en bredd på ca 10 meter strax vänster om mitten av intaget (mot ytterkant av vattendraget).



Figur 17. Strömhastighetsvektorer i området kring intaget till Holmens kraftverk i Norrköping då kraftverket körs. Flödet genom turbinen är ca 35 m³/s, spillet via Grytdammen (till höger) är ca 2,5 m³/s. I övre panelen visas strömhastigheter vid 0,71 meters djup, i mellersta panelen vid 1,96 m och i nedre panelen vid 2,96 m. Punkter markerar telemetriloggrar av HR-typ (röd) och 180 kHz-typ (blå) samt en märkt ål som befinner sig i området (orange).



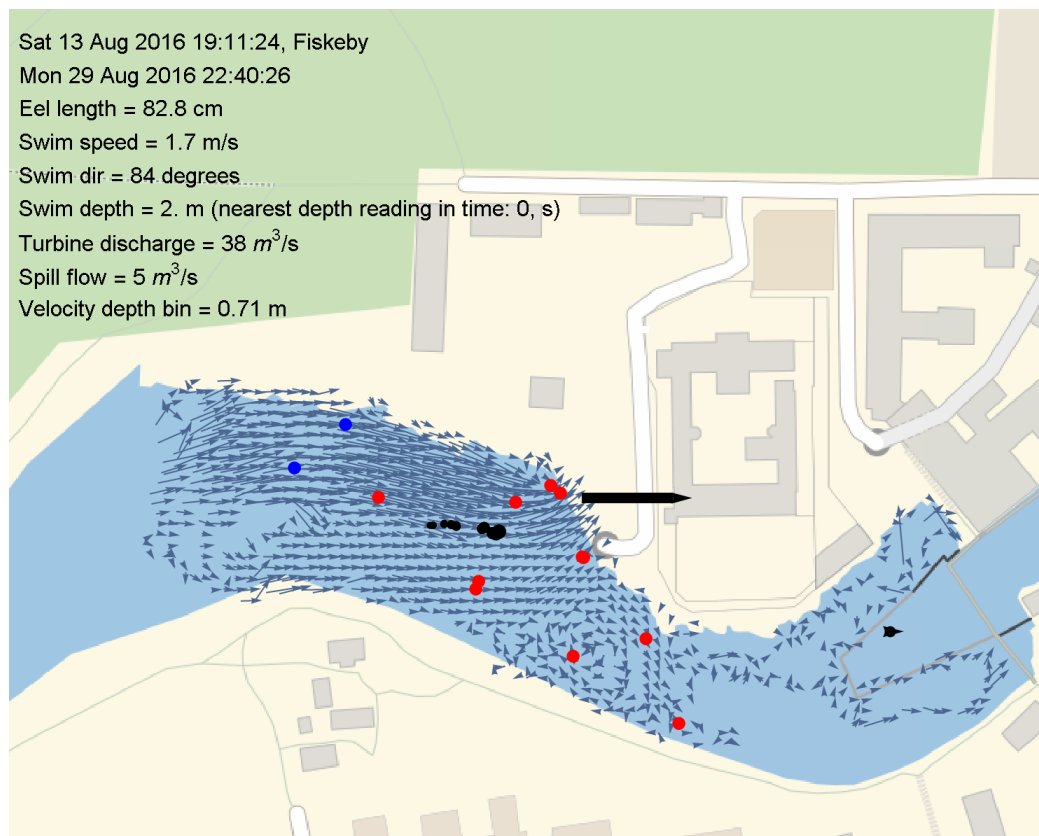
Figur 18. Strömhastighetsvektorer i området kring intaget till Holmens kraftverk i Norrköping då kraftverket står still. Flödet genom Grytdammen (till höger) är ca $20 \text{ m}^3/\text{s}$. I anslutning till kraftverksintaget finns ett intag till Bråvikens pappersbruk med ett flöde på ca $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. I övre panelen visas strömhastigheter vid 0,71 meters djup, i mellersta panelen vid 1,96 m och i nedre panelen vid 2,96 m. Punkter markerar telemetriologgar av HR-typ (röd) och 180 kHz-typ (blå) samt en märkt ål som befinner sig i området (svart).



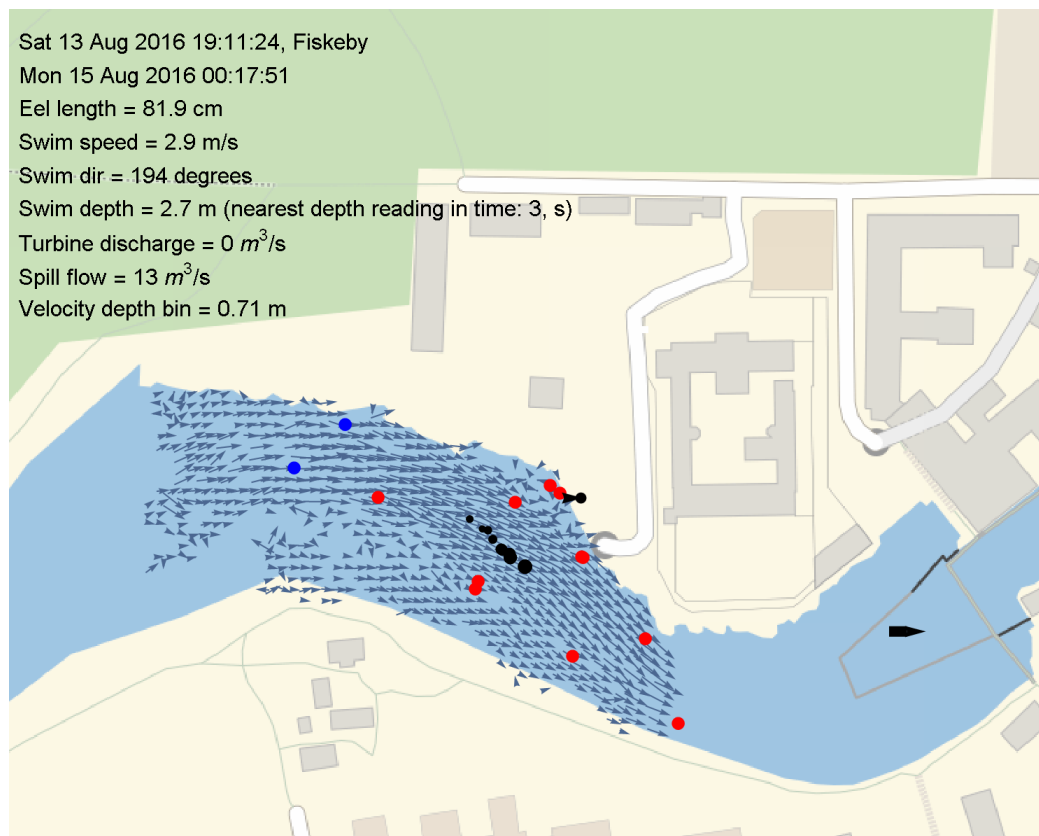
Figur 19. Strömshastigheter framför intaget till Holmens kraftverk, visade i profilsnitt sett från uppströms position. Avstånd noll motsvarar alltså intagets nordvästra ände vid servicebyggnaden (se även Figur 5). Övre panelen visar strömshastigheter i direkt anslutning till intagsgallret, nedre panelen visar strömshastigheter två meter från gallret.

Ålarnas vandringsbeteende i Grytdammen i närområdet, närmare än 30 m, av intaget till Holmens kraftverk och spillområdet karaktäriserades av snabba förflyttningar och något som liknade sökbeteenden. Resultaten som redovisas utgörs av de positioneringar som gjorts inom området med flera loggrar för att få så hög säkerheten i positioneringen som möjligt. För att underlätta tolkningen av resultaten användes visualisering med möjlighet att stega fram ålarnas förflyttning samtidigt som information om ålarna och deras omgivning gjordes tillgänglig. Exempel på denna grafiska miljö presenteras med strömshastighetsvektorer när Holmens kraftverk kördes (Figur 20) och med spill över Grytdammen (Figur 21).

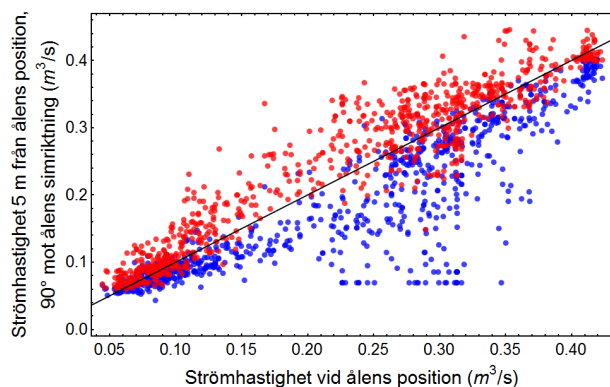
Ålarnas nedströmssimmande när de kom in i området där positioneringen var möjlig var huvudsakligen avgränsat till de områden där huvudströmmen gick. Däremot valde ålarna inte i första hand den högsta strömshastigheten, utan något lägre hastigheter (Figur 22). Ålarnas simhastighet varierade beroende på vilken simriktning de hade. De snabbaste förflyttningarna skedde med strömmen i de östliga riktningarna med i genomsnitt kring 0,7 m/s med 80 % av observationerna i intervallet 0,3 till drygt 1 m/s (Figur 22). Hastigheterna var något lägre i de motsatta riktningarna som i stor utsträckning handlar om simmande mot strömmen.



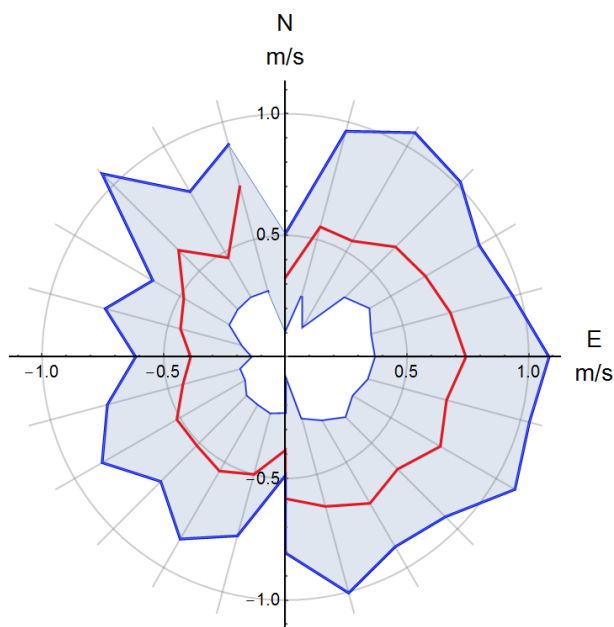
Figur 20. Analyserna av ålarnas beteenden har fokuserats på området där ålarna kunnat positioneras med hjälp av de högupplösta loggrarna (röda punkter) och till viss del även med hjälp av de lågupplösta (i tid) 180 kHz loggrarna (blå punkter). Svarta punkter visar ålens 10 senaste positioner där den största punkten motsvarar den senaste positionen. De svarta horisontella staplarna visar storleken på flödena via kraftverket respektive spill. Figuren visar en situation när kraftverket körs samtidigt som en mindre mängd vatten spills över Grytdammen. Vattnets strömhastighet återges med strömhastighetsvektorer.



Figur 21. Analyserna av ålarnas beteenden har fokuserats på området där ålarna kunnat positioneras med hjälp av de högupplösta loggrarna (röda punkter) och till viss del även med hjälp av de lågupplösta (i tid) 180 kHz loggrarna (blå punkter). Svarta punkter visar ålens 10 senaste positioner där den största punkten motsvarar den senaste positionen. De svarta horisontella staplarna visar storleken på flödena via kraftverket respektive spill. Figuren visar en situation med spill. Vattnets strömhastighet återges med strömhastighetsvektorer



Figur 22. Ålarna valde inte områden med de högsta strömshastigheterna i omgivningen när de simmade trots att strömshastigheterna inte var speciellt höga.



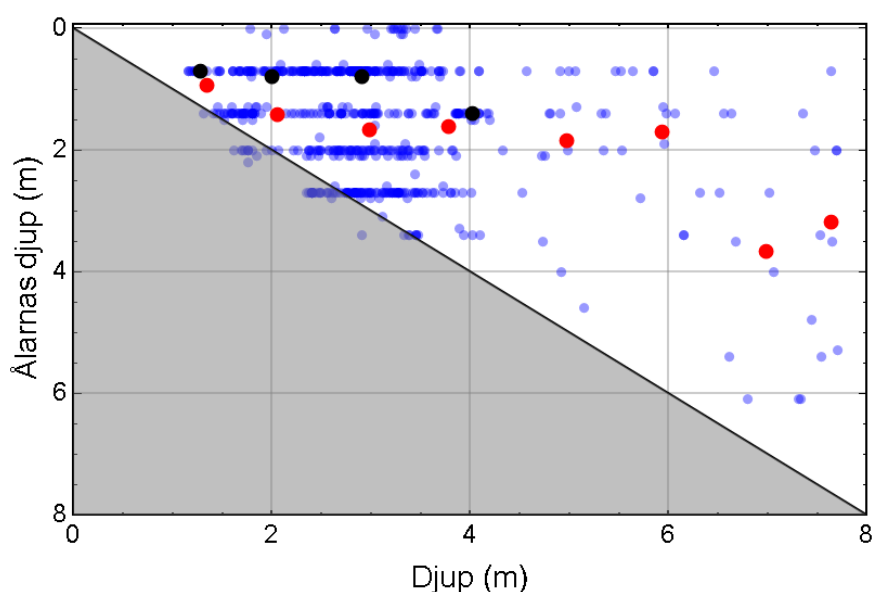
Figur 23. Ålarnas simhastigheter i Grytdammen, där hög noggrannhet av positionering var möjlig, var som störst i östliga riktningar medan simmandet i motsatt riktning var något lägre. Röd linje avser medelvärden och det ljusblå fältet visar intervallet mellan 10:e och 90:e percentilerna.

Ålarna simmade vanligen en bit upp från botten och ett anmärkningsvärt resultat var att de ålar, om än få, som kom till området under dagtid simmade i genomsnitt något närmare ytan än de nattliga ålarna (Figur 24). Det gick inte att koppla samtliga djupregistreringar till ålarnas positioner. En analys av enbart djupdata, utan koppling till position visade samma dygnsmönster med, en större andel djupa registreringar nattetid. Däremot framträdde en något mer nyanserad bild av djuppositionerna under dagtid. Ålarnas djup under dagtid uppvisade en positiv trend mellan solens position (höjd över horisonten) och ålarnas djup. Det innebär att ju ljusare det är under dagen desto djupare befann sig ålarna. De grundaste registreringarna observerades innan solnedgången när solen var 0-20 ° över horisonten.

Området i sin helhet var inte speciellt djupt, utom området närmast intagsgallret där djupet var 6-7 m. Det kan förklara varför ålarna simmade i 0-2 m intervallet

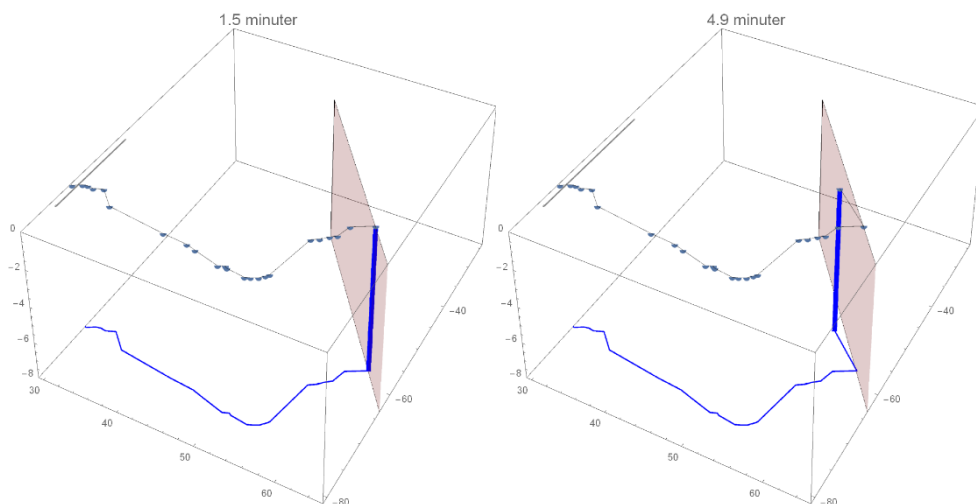
när de närmade sig intaget (medel 1,2, SD = 0,7). Trots stora mängder positionsdata blev det inte många individers data där position och djupuppgifterna matchade varandra tidsmässigt just när ålarna närmade sig intaget ($n = 7$).

Medelbottendjupet där dessa ålar registrerades var 3,8 m (SD = 0,7). En förklaring till varför det blev få observationer som matchade tidsmässigt mellan positions- och djupdata var att ålarnas uppehållstid vid intaget var kort. Hälften av ålarna hade antingen lämnat intagsområdet eller passerat inom 2 minuter. 28 av de 100 besök som registrerades vid intaget hade längre varaktighet än 5 minuter och det längsta var 12 timmar. Av rörelserna att döma för den individ som spenderade längst tid i intagsområdet verkar ålen ha tagit en paus i vandringen eftersom den inte rörde sig under dessa 12 timmar. Ålens position var då mot strandkanten strax nordväst om intagsgallret.



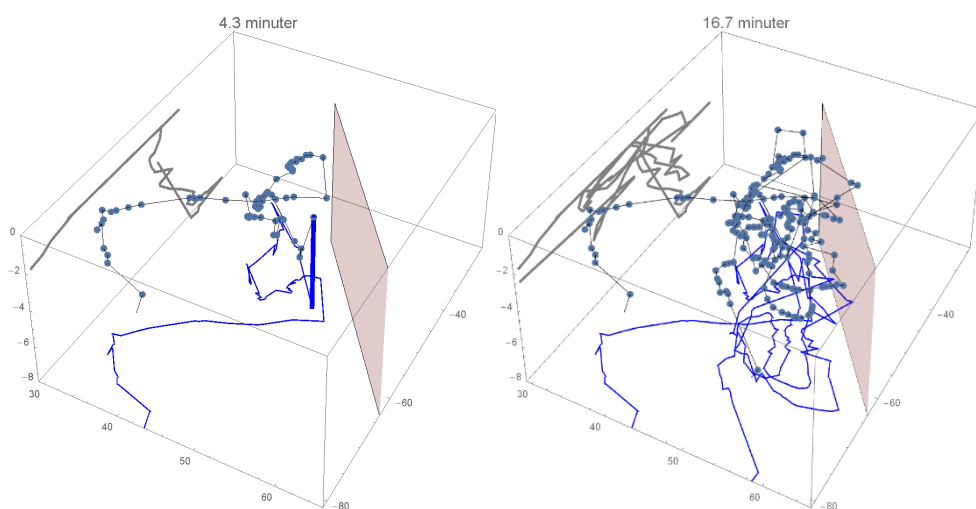
Figur 24. Ålarna simmade ofta en bit från botten och i genomsnitt något närmare ytan under dagtid (svarta punkter) jämfört med nattetid (röda punkter). Blå punkter avser enskilda observationer. Diagonalen med grå bakgrund visar botten i området.

Vid närmare analys av ålarnas rörelser nära intagsgallret visade det sig att flera av ålarna passerade gallret men kom ut igen några sekunder eller minuter senare (Figur 25). Noterbart är att några av ålarna även besökte intagsområdet även när kraftverket inte kördes ($n = 11$). I dessa fall fanns ingen egentlig strömbildning för att locka dit ålarna, men ett mindre flöde ($0,5 \text{ m}^3/\text{s}$) passerar hela tiden intagsgallret till ledningen som förser Bråvikens pappersbruk med sötvatten. När kraftverket var igång resulterade 24 % av besöken i passage ($n = 90$).



Figur 25. Några av ålarna passerade intagsgallret men återvände ut efter några minuter. I den vänstra figuren visas ankomsten av en ål till intaget och den högra figuren visar nästa registrering för samma ål, 3,4 minuter senare trots att loggrarna registrerar varje till var tredje sekund. Skalorna visar avstånden i meter. Den ljusröda rektangeln visar intagsgallret. Mörkblå punkter visar var ålen registrerades, vilket projicerats i det blå spåret mot botten (XY-planet) och djupspåret visas med grå linje i YZ-planet. Blå stapel visar ålens senaste position.

De ålar som tillbringade mer än några enstaka minuter vid intaget verkar söka längs gallret på olika djup. En del av dessa ålar har sannolikt även varit innanför gallret kortare stunder även om det inte gått att belägga. Ett exempel på spår från en ål som uppvisar denna typ av sökbeteende visas i Figur 26. Söktiden var generellt kortare nattetid (median 2 min.) än under dagtid (median 16 min) (Mann-Whitney, $P=0,008$, $N_{\text{natt}}=90$, $N_{\text{dag}}=10$).



Figur 26. Exempel på en ål som kommer in mot intaget på 1-2 m djup. Ålen dyker sedan ned mot botten och återvänder sedan upp mot ytan igen (vänster figur). Upprepade besök görs vid gallret på olika djup innan ålen lämnar området för att återvända ned mot spillområdet (höger figur).

Av de 40 ålar som besökte intaget när kraftverket var i gång, 30-40 m³/s, passerade ca 40 % direkt via turbinen (Tabell 3). Totalt registrerades 88 besök vid intaget vid dessa flödesförhållanden och 25 % av besöken resulterade i passage. Det fanns

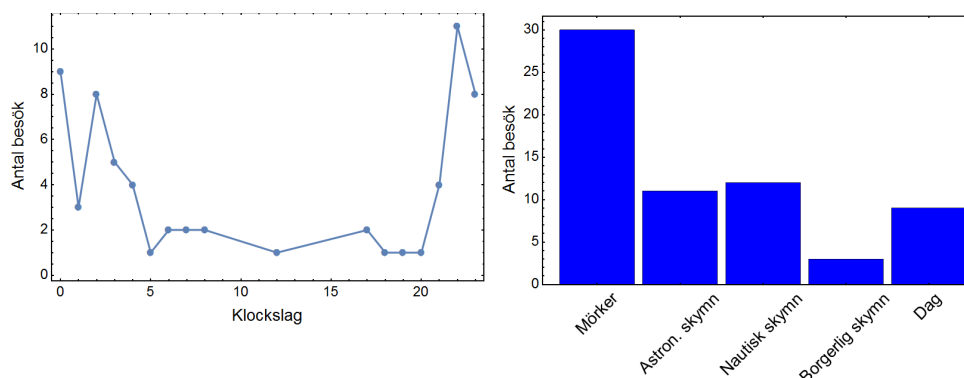
inget samband mellan tiden på dygnet och andelen passage. De hydrauliska förhållandena skiljer inte markant i detta flödesintervall vilket innebär att det inte går att avgöra om en enskild ål kommer att passera när den når intaget för första gången vid dessa flödesförhållanden.

Tabell 3. Endast en del av besöken vid intaget till kraftverket resulterade i passage när kraftverket var igång.

Flöde via intaget (m ³ /s)	Passageandel första besöket (%)	N	Passageandel samtliga besök (%)	N
0.5	0	2	0	11
7	0	1	0	3
33	42	12	25	24
38	40	25	26	62

I de fall ålarna inte passerade via intaget fortsatte de ofta ned mot spillområdet och sju av de 16 individer som passerade via spillvägarna gjorde det när det spilldes 2 m³/s samtidigt som det gick minst 30 m³/s via kraftverket. Registreringarna vid intaget och spillområdet visade att ålarna i stor utsträckning var nattaktiva (Figur 27).

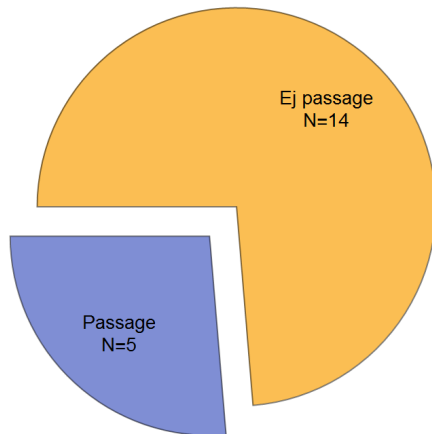
Aktivitetstoppen inträffade mellan klockan 22 och 1 med ytterligare en topp mellan klocka 2 och 3. 14 % av besöken inträffade i dagsljus, medan i 63 % av fallen rådde astronomisk skymning eller mörkare (n = 65). Vid astronomisk skymning befinner sig solen 12-18 ° under horisonten och det är då möjligt att urskilja enstaka stjärnor på himlen.



Figur 27. Ålarna var mest aktiva under kväll och natt. Endast individernas första besök per dag vid intaget eller spillområdet ingår i underlaget efter att första dygnet efter utsättning uteslutits (n = 65).

Eftersom det inte fanns några loggrar i spillområdet har det inte varit möjligt att få information om vad ålarna gjort, förutom kunskap om de passerade via spill eller inte. 97 av de 109 besöken i spillområdet registrerades under nattetid. På motsvarande sätt som vid intaget valde inte alla ålar att passera via spill trots att det totalt dominerande flödet gick via spillvägarna. Endast fem av 19 individer passerade via spill när det spilldes minst 20 m³/s samtidigt som individerna befann sig i spillområdet (Figur 28). Det har inte gått att göra någon detaljerad analys av ålarnas beteende i spillområdet eftersom positioneringen i det området inte var tillförlitlig.

Ålarnas beteende vid spillöppningarna
med $\geq 20 \text{ m}^3/\text{s}$ spill



Figur 28. Fem av de 19 individer som besökte spillområdet vid minst $20 \text{ m}^3/\text{s}$ spill passerade via någon av spillöppningarna i samband med besöket.

5 Diskussion

Studierna belyser flera aspekter av blankålens utvandring för vilka tidigare kunskap varit bristfällig, vilket kan bidra till en ökad effektivisering vid utformningen av framtida åtgärder för ål i reglerade vattendrag. Studierna av vilka faktorer som får ålen att initiera vandring grundar sig på data från flera vattendrag och flera år, vilket ger en extra tyngd till resultat och slutsatser. Samtidigt finns ytterligare stora mängder data på ålutvandring från fler vattendrag, t.ex. den "trap and transport" (T&T) som bedrivits inom Krafttag ål sedan 2011, vilket innebär att det finns goda möjligheter att ytterligare förfinas modellen och öka säkerheten i prediktioner om vandringens tidpunkt och omfattning. Passagestudien i Motala ström har gett en ny typ av information om hur ålen beter sig i kraftverksintag, detta eftersom resultaten har en högre upplösning än inom tidigare liknande projekt (Calles *et al.*, 2013; Calles *et al.*, 2010; Östergren *et al.*, 2014). Resultaten kommer dock från ett år med osedvanligt låga flöden, vilket innebär att resultaten bör tolkas med viss försiktighet. Sammanfattningsvis bedöms måluppfyllelsen som god, vilket givit ett visst underlag för rekommendationer om åtgärdsutformning och drift vid kraftverk där blankålar passerar.

De kvalitativa resultaten från triggeranalyserna visade i enlighet med flera tidigare studier (Cullen & McCarthy, 2003; Drouineau *et al.*, 2017; Durif & Elie, 2008; Sandlund *et al.*, 2017) att flödet var den viktigaste förklaringsvariabeln men att även månfas och dagslängd har betydelse. Det nya med metoden som utvecklats inom projektet är att responsfunktionerna, dvs vandringssannolikhet som en funktion av omvärldsvariablernas kvantitativa värden, grundar sig på individernas beslut att vandra i kombination med tidigare beslut att inte vandra. Metoden verkar lovande och valideringen visade att det finns goda möjligheter att kunna förutsäga ålarnas vandring efter sommaren. Hur säker prognosen, som egentligen endast handlar om någon enstaka dags förvarning, beror på hur stort dataunderlag som används vid parameterskattningarna. Valideringen av modellen antyder att vandringsbenägenheten som kopplar till vattentemperatur, månfas och dagslängd är överförbara till andra vattendrag än det vattendrag där parameterskattningarna gjordes. Däremot tycks inte modellen vara helt tillförlitlig i andra vattendrag än där den är framtagen eftersom ålarnas mest påtagliga respons som kopplade till flödet skiljde sig mellan vattendrag och inom vattendrag. Ett alternativ som inte undersöktes i samband med analysen var om nederbördsdata skulle kunna ersätta flödet i modellen och därmed öka överförbarheten till andra vattendrag. En indikation på att det skulle kunna fungera var att tidslaggen mellan flödesökningen och vandringsresponsen var mycket kort. Om ålarna reagerar direkt på nederbörden skulle tidslaggen bli något längre eftersom det tar tid för nederbörden att bidra till ett ökat flöde. Om det finns ett tydligt samband mellan nederbörd och vandringsbenägenhet förväntas modellen bli mer platsberoende. Skillnaden mellan olika platser främst skulle utgöras av skillnader i vandringstid (tidslaggen) från uppväxtområdet till fångstplatsen. Den skillnaden borde gå att bedöma utifrån kunskap om var ålarna har sitt huvudsakliga uppväxtområde uppströms.

I en del vattendrag sker en stor del av vandringen under våren. Det går att göra motsvarande analyser för vårperioden och försommaren och även i sin helhet från sensommar till försommar året efter. Däremot kan analysmetoden inte användas att förutsäga vandringen med start tidig vår till sen höst. I analysen beräknas hur stor andel av ålarna som skall vandra olika dagar givet att alla ålar är potentiella vandrare vid dag ett. Eftersom det tillkommer nya vandringsålar (metamorfos) under sommar-höst perioden behöver analysen startas om när det tillkommer individer. Detta utgör inget problem vid praktiskt användande av modellen, eftersom man väljer vår eller höstmodell. En variant vore att man har en modell som förutsäger ålvandringen från höst till vår, vilket fungerar eftersom det torde vara få ålar som övergår till blankålsstadiet under vintern. Slutsatsen av ett sådant resonemang är att de ålar som vandrar ut under våren är de som inte fick tillräckliga triggersignaler under hösten. Det skulle därför vara motiverat att göra analyserna med både höst- och vårdatabaser samtidigt. Analyserna i denna rapport kunde inte göras med ett sådant upplägg eftersom det saknades data från vinterperioden och det var även sparsamt med tillförlitliga data från vårperioden.

I analyserna av data från Skärhultsån framstod inte temperaturen som avgörande, men en analys som omfattar även vinterperioden kommer nödvändigtvis att inkludera temperatur som en viktig komponent eftersom vandringen i stort sett stannar av helt under vintern. Westerberg och Sjöberg (2015) som studerat ålar i Mälaren drog slutsatsen att ålarna hibernerar under vintern. Formen på den klockformade temperaturfunktionen som framkom vid analys av data från Skärhultsån kommer sannolikt att ändras så att vandrings sannolikheten minskar markant när temperaturen sjunker under 5-8 °C. Hur vandrings sannolikheten påverkas vid temperaturer i intervallet 20-30 °C återstår att utforska.

I samband med telemetristudien observerades hög vandringsbenägenhet då cirka 90 % av de märkta blankålarorna initierade nedströmsvandring, vilket ligger i linje med andra framgångsrika märkningsstudier på blankål (Calles *et al.*, 2012; Calles *et al.*, 2013; Calles *et al.*, 2010). Den höga vandringsbenägenheten skiljer sig från den tidigare telemetristudien i Motala ström där endast hälften av de märkta ålarna initierade nedströmsvandring efter utsättning (Östergren *et al.*, 2014). En låg utvandringsbenägenhet har även observerats vid telemetristudier i bl.a. Göta älv (Lagenfelt, 2012) och Mörrumsån (Karlsson *et al.*, 2015). Det är känt från tidigare studier att blankålsens vandringsinstinkt är flexibel och individer kan avbryta sin vandring och återuppta födosök och fördröja vandringen med flera år (Vøllestad *et al.*, 1994; Feunteun *et al.*, 2000; Durif *et al.*, 2005). Konsekvenserna av sådan fördröjning blir att överlevnaden till könsmognad minskar vilket tillsammans med den högre åldern vid könsmognad bidrar till att minska populationens tillväxthastighet.

Totalt nådde 28 % av ålarna havet efter att ha passerat Holmens kraftverk och passageframgången var i princip densamma för ål som passerade genom turbinen (36 %) respektive genom spilluckorna (37 %). En trolig förklaring till det höga noterade bortfallet för de ålar som passerade genom spilluckorna vid Holmens kraftverk, är att dessa även passerade Bergsbron-Havets kraftverk mellan loggrarna L4 och L5. Det observerade bortfallet är således ett mått på den sammanlagda förlusten av passage via Holmens spilluckor och Bergsbron-Havets

kraftverk, där spill är ovanligt och ålen därmed sannolikt passerat genom turbinen. Den observerade passageframgången vid turbinpassage av Holmens kraftverk (36 %) är lägre än den predikterade, vilket angetts till 63-80 % (Calles & Christiansson, 2012). Flödet via Holmens turbin var dock mycket lägre när ålarna i innevarande studie passerade vilket även ökar dödligheten. En beräkning med passagemodellen (Leonardsson, 2012) med de aktuella flödena visade att den observerade dödligheten hamnade inom det angivna osäkerhetsintervallet. Den observerade passageframgången vid förmodad turbinpassage av Bergsbron-Havets kraftverk (37 %) var dock i linje med det predikterade, vilket angetts till 24-57 % (Calles & Christiansson, 2012). Anledningen till att de tidigare predikterade förlusterna stämde bättre för passage via Bergsbron-Havet var att körningen i det kraftverket inte var lika reducerat som de nattliga körningarna via Holmens kraftverk.

Man har vid tidigare studier observerat att den direkta dödligheten vid kraftverkspassage tenderar att vara av samma omfattning som den fördröjda (Ferguson *et al.*, 2006). Något förenklat spåras ungefär lika många individer som dör av skador åsamkade av en turbinpassage till området direkt nedströms kraftverket, medan ett lika stort antal individer spåras till en sträcka nedströms kraftverket. Detta kan dels bero på att den döda fisken driver med strömmen till det första depositionsområdet och dels på att fisken är skadad och avlider efter en viss tid (Calles *et al.*, 2010). Omfattningen på denna drift beror av vilken art som studeras, skadornas karaktär och omfattning, samt den studerade vattendragssträckans morfologi och flöde. Vid en studie med utsättning av döda radiomärkta ålar i Åtran observerades driftavstånd om 0-4,2 km, att jämföra med ett avstånd om 0-6,2 km för levande radiomärkta ålar som passerat turbinerna och sedan klassats som döda (Calles *et al.*, 2010). Detta utgör ett stort problem vid telemetristudier av kraftverk nära havet, eftersom både döda och allvarligt skadade individer mycket väl kan driva med strömmen ända till mynningen och därmed klassas som "en lyckad passage". Just ålar har påvisats kunna överleva och förflytta sig vidare nedströms trots att "Stora delar av stjärten var bortkapade", vilket gör bedömningen av passageframgång speciellt utmanande för ål (Östergren *et al.*, 2014).

Vid passage av Holmens och Bergsbron-Havets kraftverk observerades en direkt dödlighet som var av samma omfattning som den fördröjda, 34 % respektive 29 %, vilket således stämmer väl överens med tidigare rapporterade resultat (Calles *et al.*, 2010; Ferguson *et al.*, 2006). Vi kan dock inte med säkerhet särskilja direkt från fördröjd dödlighet för ålen i Motala ström och inte heller exakt fastställa passageframgången för Holmen/ Bergsbron-Havet. Detta eftersom döda och skadade ålar kan ha drivit till mynningen som är belägen mycket nära kraftverksutloppen, vilket även befanns vara fallet för en av de döda märkta ålar som sattes ut nedströms kraftverken. Den kraftverksinducerade dödligheten är således att betrakta som konservativ, trots att den stämmer väl överens med det av turbinmodellen predikterade bortfallet. En möjlig förklaring till detta är att turbinmodellen predikterar sannolikheten för att en fisk träffas av ett skovelblad vid turbinpassage, medan skador och dödlighet kan orsakas av flera faktorer än så vid kraftverkspassage.

Positioneringen med hjälp av den högupplösta akustiska telemetrin fungerade relativt väl i närområdet till Holmens intag till kraftverket. Under den period som ålarna befann sig i området varierade inte flödena nämnvärt vilket gjort det svårt att koppla ålarnas beteende till strömningsförhållandena. Medelflödet under augusti-september när de flesta ålar registrerades i området var ca 40 m³/s, vilket är betydligt lägre än normalt för årstiden (72 m³/s under perioden 1999-2015). Den huvudsakliga flödesvariationen under denna period förekom mellan dag och natt. Det innebär att det endast fanns två tydligt skilda flödessituationer, under dagtid när det spilldes via Grytdammen och under nattetid när Holmens kraftverk var igång. Det finns därför inga resultat som visar hur ålarna betedde sig vid högre flöden, normalsituationen, vid intaget respektive spill. De resultat som erhöles visade att ålarna gjorde många och korta "besök" vid intaget till turbinen när kraftverket var igång. De som lämnade intagsområdet simmade vanligen vidare till spillområdet nedströms. I det området saknades akustiska loggrar vilket innebär att det inte varit möjligt att få några säkra positionsuppgifter för att avgöra hur nära spillvägarna de var, hur de betedde sig nära spillöppningarna och vilken spillväg de använde i de fall de passerade vidare nedströms. Anledningen till att det inte fanns loggrar i spillområdet var att projektet endast hade tillgång till åtta högupplösta loggrar och den prioritering som gjordes var att fokusera på området närmast intaget till kraftverket.

Eftersom ca 40 % av ålarna passerade intaget vid första besöket samtidigt som flödesförhållanden var likartade (ca 30-40 m³/s) framstod ålarnas val som slumpmässiga, utan möjlighet att kunna kopplas till strömningsegenskaperna. Troligen skulle passagesannolikheten blivit annorlunda om flödet via turbinen varit det normala för årstiden (ca 70 m³/s). Man skulle då förväntat sig strömhastighetsgradienter i närheten av intaget. I nuläget var strömhastigheterna relativt låga och homogena (0,3-0,4 m/s) nära intaget. Vid den här typen av studier är det därför viktigt att tänka på att resultatens användbarhet ökar påtagligt om det finns fler än ett passagescenario via kraftverket. I detta fall innebär det alternativa scenariot att kraftverket var avstängt. Tidigare studier har visat att blankålar ofta uppvisar ett sökbeteende vid låga flöden/vattenhastigheter, medan ett sådant sökbeteende är mindre uttalat vid höga flöden/vattenhastigheter (Calles *et al.*, 2013). Ålens sökbeteende som observerades i anslutning till intagsgallret vid Holmens kraftverk stämmer därför väl överens med tidigare studier, medan ålen tenderar att snabbt fly uppströms när hastigheterna är höga och snabbt accelererande (Piper *et al.*, 2015).

Det fanns en del störningar i området vilket fick till följd att många av signalerna inte registrerades. Problemet med störningarna i detta fall har inte med tekniken som sådan att göra utan det beror snarare på egenskaper i miljön. Störningarna släcker ut signalerna till de loggrar som inte är tillräckligt nära, vilket innebär att det skulle vara möjligt att få säkrare positionering genom att använda fler loggrar med kortare avstånd mellan närliggande loggrar. Normalt borde en signal per sekund registreras, men i många fall dröjde det upp till 3-5 sekunder eller ännu längre mellan signalerna. Detta ledde till att många av resultaten från djupsensorerna, som sände djupinformation var femte sekund, inte kunde kopplas till ålens position när kriteriet definierades att tidsskillnaden mellan positions- och djupinformation inte fick skilja mer än tre sekunder. Trots detta databortfall fanns

tillräckligt med data för att utvärdera ålarnas vertikala fördelning under dygnet. Merparten av registreringarna kom under den mörka delen av dygnet, men några av ålarna besökte området även dagtid. Slutsatsen från analyserna av djupdata var att ålarna inte nödvändigtvis vandrar nära botten. Lite mera anmärkningsvärt var att de simmade närmare ytan under dagtid, timmarna före solnedgång, än under nattetid. De få observationer som fanns från den ljusaste delen av dagen var dock i genomsnitt från samma djup som under nattetid. Databortfallet har till viss del även påverkat säkerheten i analyserna av simhastigheterna.

En av ambitionerna var att undersöka hur ålarna rörde sig i förhållande till strömningsförhållandena i närmiljön där de simmade. I samband med dessa analyser introduceras ytterligare en osäkerhet som har att göra med noggrannheten i positioneringen av strömhastighetsdata. Vid mätningarna i fält användes en GPS och det genomsnittliga felet var ca 2 m. Det hade varit önskvärt med en positionsangivelse med högst några centimeters fel. Men även om detta varit fallet skulle det varit mycket resurskrävande att få hög upplösning i hela området för några olika flödesscenarier. Ett sätt att komma runt det problemet är att göra en systematisk mätning av djup och strömhastigheter och sedan sätta upp en CFD-modell för att återskapa strömningsbilden med hög upplösning i hela området. En fördel med en CFD-modell är att den kan användas till att räkna fram strömningsbilden vid olika flödesscenarier. Nackdelen är att det är tids- och kostnadskrävande att sätta upp en sådan modell. I de fall syftet med undersökningen är att försöka identifiera beteenderesponser hos fiskarna i relation till hydrauliken bör ambitionen vara att använda sig av en CFD-modell. Om syftet däremot är att undersöka strömningsbilden för att avgöra om den uppfyller kraven för framgångsrik passage bör det räcka med empiriska strömningsmätningar i kombination med högupplöst positioneringssystem. Det senare alternativet är inte relevant i dagsläget eftersom det saknas kunskap om hur strömningsbilden skall se ut för att garantera passage.

6 Slutsatser och rekommendationer

- En ny statistisk metod har utvecklats för analys av beteenden som triggas av förändringar i omgivningen. Metoden kan användas till att identifiera signifikanta omvärldsvariabler samt kvantifiera triggerresponsen som en funktion av dessa variabler.
- Tillämpning av metoden på fångstdata från Skärhultsån visade att flödet, månfas, mörkrets varaktighet per dygn ingick i den bästa modellen. Vattentemperaturen förbättrade modellen obetydligt. Med smärre justeringar i flödesparametrarna kunde modellen framgångsrikt återge vandringen (fångsterna) i Ätrafors, och till viss del även i Mörrumsån, men inte i Kävlingeån.
- Innan metoden används skarpt bör den testas på vandringsdata från fler områden och år samt inkludera både höst och vårddata. Data från ett antal fångstanordningar vid kraftverk där det också finns galler som hindrar ålarna att passera via turbinerna skulle kunna användas för att få en mer tillförlitlig modell. Det vore också värt att undersöka om nederbördsdata kan ersätta flödesdata för att få en mer platsberoendemodell. Alternativt att det går att fastställa sambandet mellan flödesparametern och till exempel medelflödet.
- Stora flödesvariationer kan resultera i många lokala maxima i parameterrymden vilket kan få till följd att den statistiska analysen ger "felaktiga" lösningar. Den bästa lösningen skall resultera i det globala maxvärdet för likelihood funktionen. För att vara säker att den lösning som erhålls utgör ett globalt maximum behöver man göra många analyser med samma data och modell med nya startvärden vid varje enskild analys.
- Vid praktisk tillämpning av den färdigutvecklade och validerade modellen krävs daglig insamling av omvärldsdata eftersom tidslaggarna var några få dagar. SMHI skulle kunna ges i uppdrag att använda ålvandringsmodellen och beräkna ålvandringssannolikhet för ett antal prioriterade kraftverk när de räknat fram flöden och temperaturer i den dagliga verksamheten (<https://vattenwebb.smhi.se/>) och antingen lägga ut informationen om förväntad ålvandring på en hemsida eller sända den till berörda kraftverk via epost.
- Ålarna med akustiska märken följde i stort huvudströmmen under dygnets mörka period vid nedströmsvandringen och de vandrade snarare nära ytan än nära botten.
- Ålarnas beteende vid kraftverksintag och spill varierade mellan individer trots likartade omvärldsförhållanden. Merparten av ålarna uppvisade ett sökbeteende. Hydrauliken eller öppningarnas egenskaper vid intaget till kraftverket och spill resulterade ofta i tvekan att passera. Det är oklart vad som fick ålarna att tveka respektive välja passage.
- Majoriteten av ålarna som kom till spillområdet när merparten av vattnet spilldes (>20 m³/s) passerade inte nedströms via spillöppningarna. För att skonsam drift skall vara ett säkert alternativ för ålarna behövs därför kunskap om hur spillöppningarnas utformning, i relation till de spillmängder som är aktuella, påverkar ålarnas passagevilja.

- Upphållstiderna i området vid intagsgallret och i området med spill var genomgående korta, några få minuter, vid varje enskilt besök oavsett vilken väg ålarna valde. Det innebär att ett detektionssystem för skonsam drift behöver finnas en bra bit uppströms intaget till kraftverket eftersom simhastigheterna i nedströmsvandringen ofta överskred 0,5 m/s, vilket var snabbare än den genomsnittliga strömhastigheten i området.

Övrigt

Forskningsarbetet kring de data som samlats in fortsätter även efter att Krafttag ål är avslutat. Analyser av ålarnas beteende i relation till hydrauliken kommer att påbörjas i februari 2018 tillsammans med Paul Kemps (Southampton) forskargrupp som samlat in högupplösta data om hydrauliken för att ta fram en CFD-modell över området.

7 Referenser

- Acou A, Laffaille P, Legault A, Feunteun E. 2008. Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river system. *ECOLOGY OF FRESHWATER FISH*. **17**: 432-442.
- Anonymous 2008 Förvaltningsplan för ål. Bilaga till regeringsbeslut 2008-12-11 Nr 21 2008-12-09. Jo2008/3901 Jordbruksdepartementet. 62 pp.
- Baran PB, Basilico L, Larinier M, Rigaud C, Travade F. 2011. Management plan to save the eel - Optimising the design and management of installations. Symposium on the results of the Eels & Installations R&D programme Paris. 81 pp.
- Calles O, Christiansson J. 2012. Ålens möjlighet till passage av kraftverk - En kunskapssammanställning för vattendrag prioriterade i den svenska ålförvaltningsplanen samt exempel från litteraturen. *Elforsk rapport*, **12:37**: 57 pp.
- Calles O, Christiansson J, Andersson J-O, Karlsson S, Wickström H, Östergren J. 2014. Tekniska lösningars tillämpbarhet för förbättrad nedströms passage för ål - Applicerat på Göta älv och Motala ström. *Elforsk rapport*, **14:35**: 83 pp.
- Calles O, Christiansson J, Andersson J, Sahlberg T, Stein F, Olsson B-M, Alenäs I, Tielman J. 2012. Ål i Ätran - En fallstudie för svensk ålförvaltning. *Karlstad University Studies*, **2012:43**: 51 pp.
- 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 pp.
- Calles O, Karlsson S, Vezza P, Comoglio C, Tielman J. 2013. Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology*. **58**: 2168-2179.
- Calles O, Olsson IC, Comoglio C, Kemp PS, Blunden L, Schmitz M, Greenberg LA. 2010. Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea. *Freshwater Biology*. **55**: 2167-2180.
- Carr JW, Whoriskey FG. 2008. Migration of silver American eels past a hydroelectric dam and through a coastal zone. *FISHERIES MANAGEMENT AND ECOLOGY*. **15**: 393-400.
- Cullen P, McCarthy TK. 2003. Hydrometric and meteorological factors affecting the seaward migration of silver eels (*Anguilla anguilla*, L.) in the lower River Shannon. *Environmental Biology of Fishes*. **67**: 349-357.
- Drouineau H, Bau F, Alric A, Deligne N, Gomes P, Sagnes P. 2017. Silver eel downstream migration in fragmented rivers: use of a Bayesian model to track movements triggering and duration. *Aquatic Living Resources*. **30**.
- Durif, C., Dufour, S. & Elie, P. (2005). The silvering process of *Anguilla anguilla*: a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. *Journal of Fish Biology*. **66**, 1025–1043.

- Durif CMF, Elie P. 2008. Predicting downstream migration of silver eels in a large river catchment based on commercial fishery data. *FISHERIES MANAGEMENT AND ECOLOGY*. **15**: 127-137.
- Durif CMF, Guibert A, Elie P. 2009. Morphological discrimination of the silvering stages of the European eel. Eels at the edge: science, status, and conservation concerns, Bethesda, Maryland, US. American Fisheries Society. 449 pages.
- Durif, C. M.F., van Ginneken, V., Dufour, S., Müller, T., and P. Elie. 2009. Seasonal Evolution and Individual Differences in Silvering Eels from Different Locations. In: G. van den Thillart et al. (eds.), Spawning Migration of the European Eel, Fish & Fisheries Series 30. Springer Science + Business Media B.V.
- Feunteun E, Acou A, Laffaille P, Legault A. 2000. European eel (*Anguilla anguilla*): prediction of spawner escapement from continental population parameters. *Canadian Journal Of Fisheries And Aquatic Sciences*. **57**: 1627-1635.
- 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.
- Jeuthe H, Fjälling A. 2017. Älvvandring komplett - Från start till kraftverkspassage (2) - Utvärdering av sonar som varningssystem för nedströms älvvandring. *Energiforsk Rapport*, **2017:460**: 35 pp.
- Jeuthe H, Leonardsson K. 2017. Skonsam drift av vattenkraftverk vid älvvandring. *Energiforsk Rapport*, **2017:417**: 75 pp.
- Karlsson S, Christiansson J, Calles O. 2015. Granö fiskavledare. *Karlstad University Studies*, **10**: 55 pp.
- Lagenfelt I. 2012. Blankålsvandring i Göta älv - Telemetrastudie 2010-2011. *Länsstyrelsen i Västra Götalands län, Vattenvårdsenheten*, **2012:95**: 30 pp.
- Larinier M, Travade F. 1998. Petits aménagements hydroélectriques et libre circulation des poissons migrateurs. *Houille blanche*. **8**: 46-51.
- Leonardsson K. 2012. Modellverktyg för beräkning av dödlighet för nedströmsvandrande ål vid vattenkraftverksanläggningar. *Krafttag ål*, 44 pp.
- Piper AT, Manes C, Sinischalchi F, Marion A, Wright RM, Kemp PS. 2015. Response of seaward-migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to manipulated flow fields. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*. **282**: 9 pp.
- Sandlund OT, Diserud OH, Poole R, Bergesen K, Dillane M, Rogan G, Durif C, Thorstad EB, Vollestad LA. 2017. Timing and pattern of annual silver eel migration in two European watersheds are determined by similar cues. *Ecology and Evolution*. **7**: 5956-5966.
- Stein F, Calles O, Hübner E, Östergren J, Schröder B. 2014. Understanding downstream migration timing of European eel (*Anguilla anguilla*) - Analysis and modelling of environmental triggers. *Elforsk rapport*, **14:51**: 49 pages.
- Tesch FW. 2003. The Eel. Blackwell London.

- 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*. **398**: 19 pp.
- Vøllestad, L. A., Jonsson, B., Hvidsten, N. A. & Naesje, T. F. (1994). Experimental test of environmental factors influencing the seaward migration of European silver eels. *Journal of Fish Biology*. **45**, 641–651.
- Westerberg H, Sjöberg N. 2015. Overwintering dormancy behaviour of the European eel (*Anguilla anguilla* L.) in a large lake. *ECOLOGY OF FRESHWATER FISH*. **24**: 532-543.
- Wolfram Research, Inc. 2017. Mathematica, Version 11.2, Champaign, IL.
- Östergren J, Karlsson S, Leonardsson K, Eriksson A, Wickström H, Calles O. 2014. Radiotelemetriundersökning av ålens passage av vattenkraftverk i Motala ström. *Elforsk rapport*, **14:34**: 55 pp.

HYDRAULISKA FÖRUTSÄTTNINGAR OCH ÅLENS BETEENDE I KRAFTVERKSINTAG

För att framgångsrikt kunna formge och implementera miljöförbättrande åtgärder för utvandrande blankål krävs ett holistiskt angreppssätt som tar hänsyn till olika aspekter av vandrigen.

En ny statistisk metod för att analysera beteenden som triggas av förändringar i omgivningen har här förbättrat kunskapen om vad som får ålen att initiera sin vandring. Med hjälp av akustisk telemetri för högupplöst positionering av fisk kunde ålarnas simbeteende studeras i detalj i området kring intaget till ett kraftverk.

Resultaten visar även att omfattningen av direkt och fördröjd dödlighet för blankål efter turbinpassage var jämförbara, men studien illustrerar svårigheten att med säkerhet särskilja död från skadad ål och osäkerheten är därför stor.

Ett nytt steg i energiforskningen

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



Energiforsk