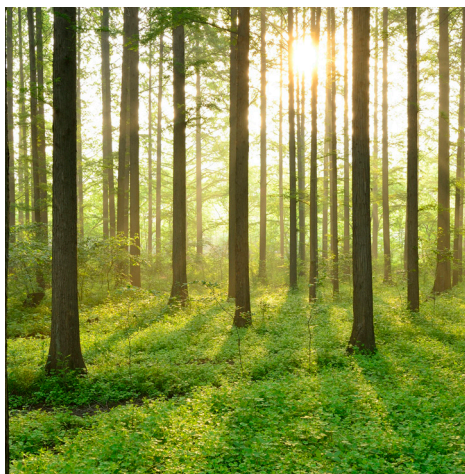


# SKONSAM DRIFT AV VATTENKRAFTVERK VID ÅLVANDRING

RAPPORT 2017:417



KRAFT  
TAG ÅL





# **Skonsam drift av vattenkraftverk vid ålvandring**

**HENRIK JEUTHE  
KJELL LEONARDSSON**



## Förord

**Skonsam drift är en av fyra tänkta åtgärder för ålens bevarande, enligt avsiktsförklaringen som tecknades mellan dåvarande Fiskeriverket och sex vattenkraftbolag.**

Den aktuella rapporten är resultatet av projektet Skonsam drift – är det möjligt? Skonsam drift under perioder med stor utvandring av ål är en förhållandevis oprövad metod varför det fanns behov av att studera vilka möjligheter och utmaningar det innebär. Syftet med projektet var att sammanställa erfarenheter från andra länder och intervjua personal på vattenkraftbolag. Projektledare var inledningsvis Johan Östergren, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Därefter övertog Henrik Jeuthe, SLU ansvaret som projektledare. Kjell Leonardsson, SLU arbetade också i projektet. Författarna står för innehållet i rapporten.

Projektet ingår i programmet Krafttag ål som leds av följande styrgrupp:

Erik Sparrevik, Vattenfall Vattenkraft AB (ordförande)

Marco Blixt, Fortum Generation AB

Rikard Nilsson, Holmen Energi AB

Henrik Jatkola, Statkraft Sverige AB

Ola Palmquist, Tekniska Verken i Linköping AB

Katarina Ingvarsson, Tekniska Verken i Linköping AB

Johan Tielman, Uniper AB

Niklas Egriell, Havs- och vattenmyndigheten

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

## Sammanfattning

**Syftet med denna rapport är att sammanfatta kunskapsläget kring begreppet skonsam drift, samt att utvärdera potentialen för tillämpning av denna åtgärd vid kraftverk i de högt prioriterade ålproducerande vattendragen i Sverige, Göta älv och Motala ström. Utredningen omfattade i första hand en litteratursammanställning av material som söks på internet samt genom olika nätverk inom forskning, förvaltning och kraftverksindustrin. För att identifiera praktiska möjligheter och begränsningar vid tillämpning av skonsam drift i de aktuella vattendragen omfattades även platsbesök på anläggningarna ifråga samt intervjuer med driftspersonal.**

Författarnas tolkning av begreppet skonsam drift är att det omfattar åtgärder där driften av vattenkraftverk anpassas under fiskvandringssäsong (i detta fall blankålens nedströmsvandring) för att underlätta skadefri passage. Åtgärden omfattar tre huvudtyper av driftsanpassning:

- Anpassat flöde, och ålpassage, genom turbiner
- Turbinstopp (totalt eller delvis) med passage via omfattande spill
- Anpassad drift av galler med passage via måttligt spill

Valet av åtgärdsform avgörs av förutsättningarna vid det aktuella kraftverket. Det finns ingen universell driftsmodell som fungerar för alla typer av anläggningar. Generellt kan sägas att anpassat turbinflöde medför lägst kostnader men har också begränsad effekt, då viss turbindödligheten kvarstår även vid optimal drift. Totalt turbinstopp är en säker åtgärd för eliminering av turbindödlighet, men omfattningen av driftstopp påverkar naturligtvis kostnaden i form av produktionsförlust. Anpassad drift av galler, d.v.s. införande av reglerbara galler (fysiska avledare) framför turbinintaget, innebär, utöver löpande kostnader som nämnts ovan, även investeringskostnader om inte majoriteten av infrastrukturen redan finns på plats.

En av de mest avgörande förutsättningarna för tillämpning av skonsam drift är möjligheten att förutse ålarnas vandring. Det finns ett antal potentiella varningssystem för detta. De kan vara baserade på de omvärldsförändringar som triggar ålens vandring, indikatorer på själva ålarnas vandring eller direkta observationer av vandrande ålar. De olika typerna av befintliga och potentiella varningssystem beskrivs i detalj i denna rapport. Ett optimalt varningssystem skall med stor sannolikhet ge besked om när och hur många ålar det finns i närområdet uppströms kraftverket och helst också signalera när mängden ål uppströms har minskat till en nivå när den skonsamma driften kan avbrytas. Sammanställningen av befintlig information i denna rapport tyder på att inget av de existerande varningssystemen i nuläget klarar denna uppgift. I de fall varningssystem visat resultat som närmast sig acceptabel träffsäkerhet har dessa varit begränsade till specifika vattendrag.



Författarnas bedömning är att skonsam drift i form av totala driftstopp inte anses lämplig i Göta älv då passage via spill troligen också skulle orsaka omfattande skador och dödlighet. Denna bedömning är baserat på visuell undersökning av aktuella spillvägar. En eventuell tillämpning av skonsam drift skulle dock behöva omfatta en utredning av detta. En mer rimlig åtgärd anses (av författarna) vara att styra om merparten av flödet från Francis-turbinerna i Olidan till de mer fiskvänliga stora Kaplanturbinerna i Hojum under perioder när merparten av ålarna vandrar, vilket innebär framför allt perioden augusti-oktober. Samtidigt med denna åtgärd vid Olidan/Hojum skulle flödet genom anläggningarna vid Vargön och Lilla Edet anpassas så att turbindödligheten minimeras (d.v.s. köras strax under fullt pådrag).

Författarnas bedömning är att det i Motala Ström är både möjligt och lämpligt att införa totala driftstopp vid kraftverken under blankårens nedströmsvandring. Omfattningen av stopperperioden kan begränsas med tillämpning av fungerande varningssystem. Alternativt skulle eventuellt kostnaden av omfattande stopp kunna minskas genom omprövning av nuvarande vattendom rörande spill genom Norrköping stad.

Det blir en stor utmaning att utveckla skonsam drift till en effektiv förvaltningsåtgärd. Med tanke på att det inte finns tillräcklig kunskap för att lösa hela problemet i dagsläget torde den bästa strategin vara att använda befintlig kunskap för att på ett så effektivt sätt fånga så många ålar som möjligt uppströms de översta kraftverken och sedan transportera dem ner till kusten. Detta bör inte vara en slutgiltig lösning, men den rättfärdigas i det korta tidsperspektivet av den akuta situationen som ålbeståndet befinner sig i.

## Summary

**The current report aims to summarize the state of knowledge concerning adaptive hydropower management<sup>1</sup> in connection to eel migration, and to evaluate the potential for such mitigating measures to be applied at hydropower facilities in the eel producing river systems of Göta älv and Motala ström in Sweden. The investigation comprised primarily a literature review based on internet search as well as inquiries through collaborative networks within research, environmental management and power companies. Visits to hydropower facilities and interviews with technicians and management on site were also included to determine the practical potential of implementation at the specific facilities.**

The authors' interpretation of the concept "skonsam drift" is that it includes measures where adaptive hydropower management is implemented during fish migration season (in this case downstream silver eel migration) to facilitate safe passage. The measures include three types of adaptations:

- Adjusted flow, and passage, through the turbines
- Turbine shutdown (complete or partial) and passage via substantial spill
- Implementation of temporary intake barriers and passage via moderate spill

The prerequisites of the facility in question determine which measure should be applied. There is no universal solution that works for all types of facilities. In general, adjusted flow through the turbines comes with the lowest cost, but has a limited mitigating effect as some mortality will remain even at optimal turbine operation. Complete turbine shutdowns will eliminate all turbine induced mortality, but the extent of such measures will of course affect the cost in lost production. The implementation of temporary, adaptable, barriers at the turbine intake will, in additions to running costs, entail investment costs unless most of the infrastructure is already in place.

One of the most important prerequisites for implementation of adaptive hydropower management is the ability to predict eel migration. There are a number of potential early warning systems available for this purpose. They can be based on changes in the environment that trigger eel migration, indicators of the actual migration or direct observations of migrating eels. Different types of early warning systems, existing and potential, are described within this report. An optimal warning system should be able to tell when and how many eels are heading for the hydropower plant, and preferably also when the eels have passed and normal operation may resume. The literature review in this report indicates that no early warning system meets these criteria today. In some cases, systems have been shown to work with more or less acceptable accuracy, but these results are limited to application at specific sites.

---

<sup>1</sup> The established Swedish term "skonsam drift" has no equivalent in English, where the concept is reported under several different names.



The authors' assessment of the potential for implementation of adaptive hydropower management suggests that measures that involve complete turbine shutdown is not suitable for the facilities in Göta älv. Passage via spillways at the facilities in question is likely to cause extensive injury and mortality to the eels. This assessment is based on visual examination of said spillways. However, this needs to be investigated further if implementation is considered. A more suitable action (according to the authors) would be to completely divert the discharge from the Francis-turbines of the Olidan station to the more eel-friendly large Kaplan-turbines at the Hojum station, during eel migration (generally August-October). In connection to this measure, discharge through the facilities at Vargön and Lilla Edet should be adjusted to minimize mortality during turbine passage.

For Motala ström, the authors assess that complete turbine shutdown is both a possible and suitable mitigating measure during silver eel migration. The extent of the shutdown period can be limited with application of a suitable early warning system. As an alternative, the cost of extensive turbine shutdown periods could perhaps be lowered by re-examination of the current regulations concerning spill through Norrköping city.

The development of adaptive hydropower management as an efficient mitigating measure will be a challenge. At the current state of knowledge it is not possible to resolve the issue of hydropower induced mortality quickly. An alternative would be to use the knowledge we have to efficiently capture as many as possible of the silver eels upstream of the uppermost hydropower plants, and transport them for release downstream of the last obstruction. This should not be meant as a final solution, but is justified in short term by the alarming situation of the eel population.

# Innehåll

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduktion</b>                                              | <b>10</b> |
| 1.1      | Uppdraget                                                        | 10        |
| 1.2      | Ålens livscykel                                                  | 10        |
| 1.3      | En riskfylld vandring                                            | 11        |
| <b>2</b> | <b>Vattenkraftens påverkan</b>                                   | <b>13</b> |
| 2.1      | Turbindödlighet                                                  | 13        |
| <b>3</b> | <b>Åtgärder för underlättad kraftverkspassage</b>                | <b>15</b> |
| 3.1      | Skonsam drift                                                    | 15        |
| 3.1.1    | Turbinstopp                                                      | 16        |
| 3.1.2    | Anpassat turbinflöde                                             | 17        |
| 3.1.3    | Anpassad drift av galler                                         | 18        |
| 3.2      | Fiskvänliga turbiner                                             | 19        |
| 3.3      | Fysiska avledare                                                 | 21        |
| 3.4      | Beteendebaserade avledare                                        | 22        |
| 3.5      | Ålpassage                                                        | 23        |
| 3.6      | Trap & Transport                                                 | 24        |
| <b>4</b> | <b>Triggers för vandring</b>                                     | <b>25</b> |
| 4.1      | Ljus                                                             | 26        |
| 4.2      | Temperatur                                                       | 26        |
| 4.3      | Vattenföring                                                     | 27        |
| <b>5</b> | <b>Varningssystem</b>                                            | <b>30</b> |
| 5.1      | Modellering                                                      | 30        |
| 5.2      | Migromat®                                                        | 34        |
| 5.3      | Telemetri                                                        | 35        |
| 5.4      | E-DNA                                                            | 36        |
| 5.5      | Akustiska kameror                                                | 36        |
| 5.5.1    | Förutsättningar                                                  | 37        |
| 5.5.2    | Observation                                                      | 37        |
| 5.5.3    | Identifiering                                                    | 38        |
| 5.5.4    | Automatisering                                                   | 38        |
| 5.6      | Ger fungerande varningssystem önskat resultat?                   | 39        |
| <b>6</b> | <b>Skonsam drift i världen</b>                                   | <b>42</b> |
| 6.1      | Exempel på tillämpningar                                         | 44        |
| 6.1.1    | Tyskland                                                         | 44        |
| 6.1.2    | USA                                                              | 46        |
| <b>7</b> | <b>Potential för skonsam drift vid utvalda svenska kraftverk</b> | <b>47</b> |
| 7.1      | Göta älv                                                         | 47        |
| 7.1.1    | Ål i Göta älv                                                    | 47        |

|          |                                           |           |
|----------|-------------------------------------------|-----------|
| 7.1.2    | Förutsättningar för åtgärd                | 49        |
| 7.1.3    | Förslag på driftanpassning i Göta älv     | 54        |
| 7.1.4    | Genomförbarhet                            | 54        |
| 7.2      | Motala ström                              | 55        |
| 7.2.1    | Ål i Motala ström                         | 55        |
| 7.2.2    | Förutsättningar för åtgärd                | 56        |
| 7.2.3    | Förslag på driftanpassning i Motala ström | 63        |
| 7.2.4    | Genomförbarhet                            | 63        |
| <b>8</b> | <b>Diskussion och slutsatser</b>          | <b>64</b> |
| 8.1      | Slutsatser                                | 65        |
| 8.2      | Nästa steg                                | 65        |
| <b>9</b> | <b>Referenser</b>                         | <b>67</b> |

# 1 Introduktion

## 1.1 UPPDRAGET

Målet med det aktuella projektet var att sammanställa kunskapsläget kring begreppet skonsam drift, d.v.s. anpassad drift av vattenkraftverk för att underlätta skadefri nedströmsvandring av ål. Anpassad drift innebär att man i samband med ålens vandring tillfälligt förändrar vattenflödet genom turbinerna till mer skonsamma förhållanden, stoppar turbinerna och spiller vatten genom en nedströms fiskpassage eller eventuellt aktiverar en reglerbar fysisk avledare som tillsammans med ett begränsat spill leder ålarna förbi kraftverket. I samband med utformandet av projektet ställde KTÅs styrgrupp upp ett antal frågor som skulle utredas.

- Vilka är de främsta praktiska utmaningarna vid förändrad drift av kraftverk med hänsyn till älvvandring?
- Kan reglerteknik för anpassad drift av galler vara en framkomlig väg?
- Vad är potentialen för tillämpning i de prioriterade vattendragen?
- Vilka är erfarenheterna från andra länder?
- Vad uppskattas kostnaden bli?
- Hur kan man optimera turbindrif och/eller spill förbi i syfte att öka överlevnaden vid passage?

Dessa frågor utreddes i första hand genom en litteraturgenomgång där material söks på internet samt genom olika nätverk inom forskning, förvaltning och kraftverksindustrin. Litteraturstudien omfattade vetenskapliga publikationer så väl som s.k. grå litteratur i form av rapporter och nyhetsartiklar, samt muntlig och skriftlig kommunikation med experter runt om i världen. Utöver detta omfattas intervjuer med driftspersonal vid ett antal strategiskt utvalda stationer längs Sveriges högst prioriterade vattendrag vad gäller ålproduktion, Göta älv och Motala ström, för att identifiera praktiska möjligheter och begränsningar vid tillämpning av skonsam drift.

Alla åsikter, slutsatser och rekommendationer som presenteras i denna rapport kommer från författarna om inget annat specificerats.

Projektet drivs av institutionen för akvatiska resurser vid Sveriges lantbruksuniversitet, Drottningholm (SLU Aqua). Projektledare var inledningsvis Johan Östergren, men under arbetets gång har ansvaret för att slutföra projektet överförs på Henrik Jeuthe. Projektgruppen omfattar även Olle Calles vid Karlstad Universitet samt Kjell Leonardsson vid Institutionen för vilt, fisk och miljö, SLU Umeå.

## 1.2 ÅLENS LIVSCYKEL

Den europeiska ålen (*Anguilla anguilla*) är en katadrom fisk, vilket betyder att den tillbringar större delen av livet i sötvatten, men vandrar ut i havet för reproduktion. Leken sker någonstans i Sargassohavet, d.v.s. i de västra delarna av

norra atlanten, nordost om Kuba och Haiti. Exakt var och hur leken sker är fortfarande oklart, lokaliseringen av lekområdet är baserat på var man hittat de minst utvecklade ålynglen vid provtagning. Det mest lyckade försöket att följa märkta vuxna ålar på väg till lekområdet skedde ganska nyligen (Righton et al., 2016). Man fick då in de sista signalerna från ål som tagit sig till Azorerna som ligger ca 150 mil väster om Lissabon. Efter att äggen kläcks i Sargassohavet tar sig ynglen med hjälp av ytströmmarna till Europa, dit de anländer efter ca 1 till 3 år beroende på strömförhållanden och vart i Europa de tar vägen. Vid det här laget har ynglen ändrat utseende, från den ursprungliga gulesäckslarven via den bladformiga leptocephalus-larven till den trådformiga glasålen. Det finns uppskattningar som säger att 90% av alla glasålar som ankommer Europa samlas i Biscayabukten (Dekker et al., 2016), medan resten fördelas över kustområdena i Medelhavet, Engelska kanalen och längre in i Nordsjön. Det är alltså en bråkdel av den totala produktionen av glasål som når ända upp till Sverige på naturlig väg. Dock fångas en del glasål i Centraleuropa och fraktas till bl.a. Sverige för utsättning där det finns relativt goda möjligheter för dem att utvecklas till nästa generations lekbestånd. Idag sträcker sig ålens utbredningsområde upp till Dalälven, men historiskt sett har det funnits ål i de flesta av norrlandsälvarna (Larsson and Sparrevik, 2009). Under tillväxtperioden som följer glasålsstadiet pigmenteras ålarna och de får sitt mer typiska utseende med svart rygg och gul mage. Under denna period sker även en del naturliga förflyttningar längs kusterna och den så kallade gulålen hittas mer jämt fördelat över utbredningsområdet jämfört med glasålen. Tillväxtperioden äger rum både i kustområden och i inlandsvatten. Ofta tar sig ålen uppströms i sötvattenssystem redan som glasål, men en del beger sig upp i sötvatten senare, som gulålar, och andra blir kvar ute längs kusten under hela tillväxtperioden. Det är vanligt att man har passager eller uppsamlingsstationer för uppvandrande ålyngel nedströms vattenkraftverk för att underlätta färden mot de inlandsvatten som utgör viktiga tillväxtområden, bl.a. här i Sverige. Längden på gulålens tillväxtperiod kan variera enormt; det är framför allt kön och geografi som spelar in. Honorna blir större och äldre än hanarna, och överlag sker tillväxten långsammare i norra delarna av utbredningsområdet. Generellt kan perioden variera från 2 till 50 år, med ett medel på ca 10 år för hela utbredningsområdet.

Så småningom når tillväxtfasen sitt slut och ålen genomgår ännu en förvandling, från gulål till blankål. I och med denna förvandling närmar sig ålarna könsmognad, och det är tid att påbörja den långa vandringen mot lekområdet.

### 1.3 EN RISKFYLLD VANDRING

Vägen från Europas kustvatten till Sargassohavet är lång och kantad av faror. En stor del av de blankålar som påbörjar vandringen når aldrig fram. Predation är sannolikt den viktigaste orsaken till bortfall (Righton et al., 2016), men bristande energireserver kan troligen också skörda sina offer. På senare tid har även tiaminbrist påtalats som en möjlig begränsande faktor för ålens möjlighet att nå ända till Sargasso (Balk et al., 2016). Men, många ålar når inte ens kusten för att överhuvudtaget kunna påbörja sin vandring i havet. Orsakerna bakom förlusterna i sötvatten kan grovt sett delas in i tre kategorier: predation, fiske och vandringshinder. Den senare är i de flesta fall kopplad till vattenkraftsutvinning.

Naturlig predation står för en signifikant del av förlusterna. Predationen från fåglar, och i synnerhet skarv, kan vara omfattande, åtminstone på lokal och regional nivå. Fiske utövas på ålens alla livsstadier här i Europa. Vid flodmynningar i sydvästra Europa, dit det fortfarande kan komma relativt ansevliga mängder glasål, bedrivs fiske på dessa. Glasålen anses här vara en delikatess, och fisket har gamla anor. Denna kombination utgör ofta en effektiv bromskloss vad gäller införandet av fångstrestriktioner, oavsett art och geografi. Gulålen fiskas över hela Europa, i de länder där den fortfarande går att hitta, både i söt- och saltvattensområden. Och även blankålen fiskas både i rinnande vatten när de påbörjar sin nedströms vandring och ute i havet innan den lämnar de kustnära områdena, t.ex. på den svenska ost- och sydkusten, Öresund och Bältsunden i Danmark.

För mer ingående svenska beskrivningar av ålen biologi och mänsklig påverkan på denna, se exempelvis (Tell, 2012, Dekker et al., 2016).



## 2 Vattenkraftens påverkan

Vattenkraft och andra installationer i vattendrag har negativ inverkan på ålbeståndet i samband med vandring, både upp- och nerströms. Påverkan sker genom direkt dödlighet (se avsnitt 2.1) men även genom andra mekanismer, t.ex. kan vandringen rent fysiskt stoppas eller försenas (Acou et al., 2008, Besson et al., 2016, Bruijs and Durif, 2009). Förseningar i vandringen p.g.a. hinder kan medföra att delar av energireserven förbrukas i förtid, men även ökad utsatthet för predatorer (Acou et al. 2008). I de fall det finns yngelavledare för uppvandrande ål kan bristande underhåll och tillsyn försvåra passagen påtagligt. Det kan också förekomma mer indirekt påverkan, som att ålarna blir mer exponerade för predation i samband med passage över dammar eller genom trånga passager (Bruijs and Durif, 2009).

### 2.1 TURBINDÖDLIGHET

Fiskdöd i samband med kraftverkspassage orsakas i de flesta fall av skador som uppkommer då de färdas genom turbiner. De mest uppenbara skadorna uppkommer av direkt fysisk kontakt med turbinens delar, i form av slag, klämning och skrapning. Men skador kan också skadas genom andra mekanismer (Therrien and Bourgeois, 2000, Pracheil et al., 2016). Dessa kan delas upp i tre huvudkategorier. Accelerationsförändringar och turbulens inne i turbinerna kan vara så stora att de sliter sönder fiskar. Snabba tryckförändringar kan ge skador på, framför allt, simblåsan. Kavitation, bildande av gasbubblor p.g.a. undertryck, och efterföljande implosion av dessa kan orsaka varierande skador. Hastighets- och tryckförändringar kan uppkomma på en mängd olika platser under kraftverkspassagen, medan kontakt och kavitation främst är kopplade till de rörliga delarna i turbinen. Skador som uppkommer av de senare mekanismerna kan alltså påverkas av turbinens utformning och drift.

De två vanligaste turbintyperna som används i Sverige är Kaplan och Francis. Om man generaliserar brukar man säga att fiskdödligheten är högre för Francis-turbiner. Det finns även andra, mindre vanliga turbinmodeller, som t.ex. Pelton, som ofta orsakar 100% dödlighet. Om man undersöker skadefrekvensen hos de två vanligare modellerna närmare, visar det sig att individuella parametrar som turbindiameter, avstånd mellan blad, rotationshastighet, vattnets fallhöjd samt hur de körs har minst lika stor betydelse som den generella turbintypen. Om man ser samlat på de studier som gjorts på turbinskadad ål för de två typerna, så ser Francis ut att vara mer skonsam, tvärtemot vad man ser för t.ex. laxfiskar. I äldre litteratur är dödligheten för ål hög i båda turbinmodeller. Mitchell och Boubée (1992) presenterar värden på 25-100% för Kaplan och 9-100% för Francis från studier utförda mellan 1940 och 1985. Nyare litteratur, som troligen ger en mer rättvis bild för dagsläget, visar på en medelmortalitet på 26% ( $\pm 11$ ) för ålar i Kaplan turbiner och 11% ( $\pm 13$ ) i Francis (Pracheil et al., 2016). Men då måste man tänka på att det oftast finns flera kraftstationer i samma vattendrag, och ålarna måste ta sig förbi alla dessa på väg ut mot havet. Då får man en kumulativ dödlighet för denna serie turbinpassager. Om ett vattendrag har fyra kraftverk och dödligheten är 25%

i varje kommer 68% av de som började vandringen försvinna på vägen ut till kusten, utöver de som faller offer för predation och fiske m.m.

Till stor del handlar turbindödlighet om sannolikheten att fisk blir träffad av turbinbladen. Sannolikheten att bli slagen av turbinbladen är större för större och framför allt längre fisk. Men samtidigt är risken att bli indragen i intaget till turbinerna större för liten fisk. Ålen, med sin långa kroppsform, har stor risk att träffas av turbinblad, samtidigt som dess smala kropp kan komma genom relativt täta galler. Dock ska man tänka på att en ål inte tvunget färdas genom turbinen med fullt utsträckt kropp, utan kan veckla/krulla ihop sig så att sannolikheten för mekanisk skada inte står i direkt proportion till den totala kroppslängden (Vowles et al., 2014). I allmänhet är fiskdödligheten större i de mindre kraftverken (Leonardsson 2012). Förklaringen är att mindre kraftverk har relativt små turbiner med höga varvtal samtidigt som avståndet vanligen är kortare mellan bladen/skovlarna i och med att Francisturbiner oftare används i små vattendrag.

### 3 Åtgärder för underlättad kraftverkspassage

För en blankål som närmar sig ett vattenkraftverk på sin vandring ner mot havet finns det tre möjliga sätt att ta sig förbi. Den kan simma genom turbinerna, simma förbi turbinerna via en alternativ passage eller den kan bli fångad och transporterad nedströms med t.ex. lastbil. Den stora frågan är i första hand vilket alternativ som är bäst för ålen, och i andra hand om detta alternativ är genomförbart vid den aktuella lokalen. Om inte den nödvändiga infrastrukturen finns tillgänglig på platsen idag, är det (ekonomiskt) motiverat att göra de ändringar och investeringar som behövs? Eller måste man hitta en alternativ lösning som är enklare att få till (billigare) men ger lite sämre resultat för ålbeståndet? Som vi sett är det framför allt vid passage genom turbinerna de största skadorna sker. En avgörande fråga är därför om det finns en fungerande passage förbi det aktuella kraftverket. Med fungerande menas att det är fysiskt möjligt för ålar att oskadda ta den vägen, och att de har möjlighet att hitta den. Om det finns en fiskväg (omlöp), hur får man ålarna att välja denna passage i stället för via turbinerna? Man kan installera någon typ av avledare framför intaget till turbinerna, denna kan antingen rent fysiskt tvinga fisken att simma i rätt riktning (fysisk avledare) eller avskräcka fisken med stimuli riktade mot något av dess olika sinnen (beteendebaserad avledare). Ett alternativ till de investeringar som installation av avledare innebär, är att anpassa driften i kraftverket så att turbinerna stoppas och vatten spills via en passage i samband med ålens vandring. Detta är alltså en form av det vi betecknar skonsam drift.

I de fall det saknas fungerande fiskpassage återstår två alternativ. Antingen fångas ålarna uppströms kraftverket för att transporteras och släppas nedströms, eller så får de som kan/vill simma genom turbinerna. Men även i detta scenario, som måste anses som det sämsta alternativet, finns möjligheter till förbättrande åtgärder. Turbinen kan bytas ut mot en mer fiskvänlig modell eller att driften av befintlig turbin anpassas under perioden för ålvandring så att flödet genom turbinen är optimalt för minimal skadeverkan på passerande fisk, alltså ytterligare en form av skonsam drift. Här följer en översiktlig genomgång av de alternativ som finns tillgängliga för att underlätta skadefri fiskpassage vid vattenkraftverk. Det har skrivits en mängd bra beskrivande rapporter på detta område tidigare. Vid intresse för fördjupning i något av dessa ämnen, vänligen uppsök den litteratur som hänvisas till i respektive avsnitt.

#### 3.1 SKONSAM DRIFT

Författarnas tolkning av begreppet skonsam drift omfattar åtgärder för underlättad fiskpassage som, istället för att kräva nya installationer av tekniska lösningar för avledning och passage, bygger på anpassad drift av kraftverk och utnyttjande av befintliga spillvägar för passage. De huvudsakliga kostnaderna för skonsam drift som åtgärd ligger således i minskad elproduktion p.g.a. spill, istället för de investeringar som krävs vid mer konventionella passageåtgärder.

### 3.1.1 Turbinstopp

Den mest uppenbara formen av skonsam drift, och troligen den mest effektiva, innebär turbinstopp kombinerat med spill via en alternativ passage. Denna åtgärd förutsätter att det finns en alternativ passage som lämpar sig för nedströmsvandring av ål, alternativt att befintliga spillvägar på ett enkelt sätt kan anpassas för att underlätta passage vid skonsam drift. Det finns en rad olika strategier för hur turbinstopp ska tillämpas. Valet av strategi baseras på vilka kunskaper man har kring ålens vandringsmönster och därmed möjligheten att förutsäga vandringstillfällen. För att försäkra sig om att alla blankålar passerar ett kraftverk oskadda måste man tillämpa (i) *turbinstopp under hela vandringssäsongen*. Man vet dock att ålen är mestadels nattaktiv. Därför kan den absoluta majoriteten blankål skonas med hjälp av (ii) *turbinstopp som begränsas till nattetid under hela vandringssäsongen*. Men vandringssäsongen är en långdragen process. Även om majoriteten blankålar vandrar nedströms på hösten, väntar en del till våren. Totala eller nattliga stopp under hela vandringssäsongen skulle medföra långa perioder med förlorad elproduktion. Ålens vandringsbeteende triggas av externa faktorer som väder och vattenföring. Det är mer troligt att vandring sker under vissa omvärldsförhållanden (se även avsnitt 4). Med kunskap kring dessa förhållanden kan stopperperioden begränsas. Således kan (iii) *turbinstopp vid regn och påföljande flödesökning* skona majoriteten av de vandrande ålarna. Exakt vilka faktorer som triggar ålvandring verkar till viss del vara individuellt för enskilda vattendrag och olika typer av vattenmiljö. Därför kan utvärdering av vandringsmönster kopplat till klimatdata användas för att ytterligare precisera när majoriteten av vandringen kommer ske i ett visst vattendrag. På så sätt tillämpas (iv) *turbinstopp baserat på statistiska modeller som beräknar förväntad sannolikhet givet rådande omvärldsförhållanden*, varmed perioden kan begränsas ytterligare utan att fler ålar blir lidande. Ett alternativ till att modellera fram de mest sannolika tidpunkterna för vandring är att se på hur ålar själva reagerar på förändringar i väder och vattenegenskaper. Tillämpningar av (v) *turbinstopp baserat på beteende hos ål i fångenskap* finns t.ex. i Tyskland (se avsnitt 6.1). Här tillämpas turbinstopp när ålar i bassänger uppvisar ökad aktivitet, vilket tolkas som att de vill påbörja sin nedströms vandring. Den strategi som har störst potential att både minimera stopperperioden och maximera andelen ålar som kan passera oskadda bygger på faktiska observationer av ålar som närmar sig kraftverket i fråga. Denna strategi förutsätter ett varningssystem (ofta omtalat som "early-warning") som automatiskt identifierar blankålar på lämpligt avstånd uppströms kraftverket varpå turbinerna stoppas lagom till att dessa ålar når kraftverket, d.v.s. (vi) *turbinstopp genererat av automatisk detektion* (se även avsnitt 5 och 6.1).

Varje steg i strategilistan, i-vi, syftar till att begränsa stopperperioden och därmed den elproduktion som går förlorad. Men varje steg innebär också en ökad kostnad, för ålbeståndet eller rent ekonomiskt genom ökade investerings- och driftskostnader. För varje förkortning av stoppet kommer ytterligare ålar att behöva gå genom turbinerna. Även om majoriteten vandrar nattetid kommer en del av vandringen ske på dagen. Prognoser med vandringstidpunkt baserat på modellering, beteende och observationer bygger också på generaliserande antaganden som innebär att inte hela ålbeståndet tas hänsyn till. Inom biologin finns alltid de som avviker från normen, inte minst i miljön kring kraftverk som innehåller många störningar.

### 3.1.2 Anpassat turbinflöde

Skaderisken vid turbinpassage påverkas av hur turbinerna körs. Hur detta samband ser ut skiljer sig tydligt mellan olika turbintyper. När pådraget ökas på en Kaplan-turbin med ställbara blad ökar vattenflödet genom turbinen samtidigt som skovelvinkeln (vinkeln mellan skovelblad och turbinens rotationsplan) ökas. Detta betyder att fisken snabbare tar sig genom turbinen och att ytan för fri passage mellan skovelbladen blir större, därmed minskar sannolikheten för att fisken ska bli träffad (Bruijs et al., 2003). En studie på ålars passage genom Kaplan-turbiner i floden Meuse (Maas), som rinner genom Belgien och Nederländerna, visade att dödligheten minskade från 25 till 8% då man ökade körningen från 30 till 100m<sup>3</sup>/s (Jansen et al., 2007). Detta samband mellan körningsnivå och skadefrekvens hos Kaplan-turbiner har också visats i svenska kraftverk, t.ex. av Erik Montén (1985). De relativt små (ca 200 cm diameter) och snabbroterande (ca 250 rpm) turbinerna som Montén studerade i Helgeå i Skåne hade skadefrekvenser på 73 resp. 74% vid full kapacitet. När körningen minskades till ca 73% ökade skadefrekvensen till 84 resp. 81% i dessa kraftverk. Men dessa samband är inte alltid lika tydliga i Kaplan-turbiner. Vid Gustavsbergs kraftstation i Kilaån, ett biflöde till Nissan, uppmättes dödlighet hos ål på över 90% oavsett körningsnivå, mellan 29 och 86% kapacitet (Montén 1985). Den genomgående höga dödligheten i detta fall tros bero på de små (130 cm diameter) och därmed snabbt roterande (375 rpm) turbinerna. Flödet genom turbinen och bladens utformning påverka även omfattningen av kavitation och turbulens. Värst blir det när verket körs nära gränserna för kapaciteten, både minimum och maximum. Vid körning på full kapacitet kan alltså de positiva effekterna på fisken, p.g.a. lägre sannolikhet att bli träffad, motverkas av uppkomsten av andra skador orsakade av turbulens och kavitation. Skador som uppkommer på detta sätt kan vara mindre uppenbara och svårare att härleda än de rent mekaniska, men skär-, skrapsår och delningar. Den mest skonsamma driften av en Kaplan-turbin torde därför uppnås strax under fullt pådrag.

I Francis-turbiner ökar dödligheten med pådrag. Detta samband har bl.a. visats för ålpassage vid Ätrafors kraftverk i Ätran. I de tre dubbel-Francis-turbinerna ökade dödligheten från 20% vid 27% körning till 60% vid 63% körning och slutligen 100% dödlighet vid full kapacitet (Calles et al., 2010). Det positiva sambandet mellan pådrag och dödlighet i Francis-turbiner visas också av Leonardssons "Modellverktyg för beräkning av ålförluster vid vattenkraftverk" (Leonardsson, 2012). Detta betyder alltså att skonsam drift av Francis-turbiner innebär att turbinflödet ska minskas för att underlätta skadefri passage av ål, tvärtom åtgärden som tillämpas hos Kaplan-turbiner.

Det finns alltså möjligheter att minska dödligheten hos ålar som passerar turbinerna på vattenkraftverk genom att anpassa driften. Tillämpningen av anpassad turbindrif skulle följa samma strategi som beskrivs för turbinstopp. Exakt vilken driftsform som är mest skonsam för ålar är specifikt för just det aktuella kraftverket eftersom det är så många olika parametrar som spelar in. Det har tagits fram en del modeller för att prediktera fiskdödligheten för individuella turbiner baserat på dess specifika dimensioner och rotationshastighet (Therrien and Bourgeois, 2000). Man kan använda sig av en modell för att bestämma vilken körningsnivå som innebär högst passageeffektivitet, t.ex. med Leonardssons

”Modellverktyg för beräkning av ålförluster vid vattenkraftverk” (Leonardsson, 2012). Detta modellverktyg ska ge relativt goda prediktioner för passageeffektivitet hos Kaplan-turbiner i förhållande till körningsnivå, medan ytterligare validering krävs för tillförlitlig tillämpning på Francis-turbiner.

En alternativ metod för att utvärdera sambandet mellan pådrag och turbindödlighet involverar test med den aktuella målorganismen, i detta fall levande ålar. Man släpper då ålar uppströms turbinerna och ser på hur stor andel ål som tar sig genom turbinen oskadda. Men ur ett djuretiskt perspektiv bör ålarna bytas ut mot någon typ av icke levande testobjekt. Det finns så kallade sensorfiskar (eng. sensor fish) för just detta ändamål (Deng et al., 2011). Sådana sensorfiskar kan ge svar på turbinbladsträffar som torde påminna om hur en fisk skulle påverkas under förutsättning att den inte har ett specifikt beteende när den passerar turbinen. Om en verklig fisk simmar aktivt i strömriktningen under turbinpassagen minskar risken att bli träffad av turbinbladen jämfört med vid passiv drift. På motsvarande sätt skulle avvikelser kunna uppkomma om en ål drar ihop sig jämfört med om den är utsträckt. För att få svar på sådana frågor skulle man behöva filma fiskens passage genom turbinen.

Tillämpning av anpassat turbinflöde som en form av skonsam drift kan vara aktuell vid anläggningar som saknar fungerande fiskpassage, och där anläggandet av en sådan inte är ekonomiska motiverat. Styrningen av den anpassade turbindriften skulle följa samma princip som beskrivs i avsnitt 3.1.1. Ett alternativt till att ändra flödet genom turbinerna är att ändra fördelningen av flödet mellan turbinerna, i de fall kraftverket har flera olika turbiner. Eftersom ålarna förväntas följa huvudströmmen kan flödet anpassas så att det mesta vattnet (och ålar) går genom den mest skonsamma turbinen. Är denna lösning otillräcklig kan istället turbinen med störst dödlighet stängas ner helt under perioder av skonsam drift, och överskottsvattnet fördelas då mellan övriga turbiner och en spillväg.

### 3.1.3 Anpassad drift av galler

Anpassad drift av galler har föreslagits som en alternativ form av skonsam drift. Principen är att man har möjlighet att sänka ner en fysisk avledare (fingaller) framför turbinintaget vid behov. Istället för att påverka turbindriften under ålvandringsperioden tillämpar man alltså en tillfällig avledning av fisken. Fördelen med detta system framför anpassad eller stoppad turbindrift är en minimal produktionsförlust. Fördelen gentemot en fast fysisk avledare är att man minskar risk för igentäppta galler.

Anpassad drift av galler hamnar till viss del utanför författarnas tolkning av skonsam drift p.g.a. de investeringskostnader åtgärden kräver. Tillämpningen bygger, under denna definition, på att det redan finns en fysisk avledare på plats, så att denna under perioder kan anpassas för att vara effektiv för ål. Utformningen av denna tillfälliga avledare följer samma krav som en traditionell för att ålen inte ska fastna på gallret (se avsnitt 3.3). För att avledaren ska kunna anpassas i respons på ålvandring krävs en anordning som höjer och sänker gallret. Eventuellt behövs även ett rensningssystem. För även om fingallret är i drift under begränsad tid, sammanfaller ålens höstvandring med perioden för lövfällning och höststormar och därmed stora mängder material som täpper igen gallret.



Investeringskostnaderna som krävs för tillämpning av denna åtgärd varierar från stora, i de fall där delar av infrastrukturen (avledare och passage) redan finns på plats, till mycket stora där man måste bygga upp systemet från grunden.

Ett alternativ kan vara att kombinera installationen av reglerbara galler med fiskuppsamlare istället för en fiskpassage. Liknande anläggningar, men av konventionell fast typ har föreslagits som åtgärd för både Göta älv och Motala ström (Calles et al., 2014). Fördelen med fiskuppsamlare istället för passage är att fisken kan transporteras direkt ner till kusten enligt T&T-princip. Detta betyder att endast det första kraftverket som blankåarna möter på sin nedströms vandring behöver åtgärdas. Denna åtgärd förbiser dock vandringsbehov hos fisk (ål och andra arter) som lever mellan kraftverken. Det samma gäller dock alla former av skonsam drift, för alla arter utöver ål. Fördelarna med en sänkbar lösning, jämfört med fasta installationer, är att de utmaningar som fingaller för med sig begränsas till en kortare period.

### 3.2 FISKVÄNLIGA TURBINER

Turbindesign har stor inverkan på överlevnad hos fisk som passerar. Som nämnts i avsnitt 2.1 finns det stora skillnader mellan etablerade turbinmodeller beroende på utformning och storlekar. Men det arbetas också med att ta fram nya så kallade fiskvänliga (eng. fish-friendly) modeller. Denna utveckling har dock gått långsamt och få färdiga produkter har nått hela vägen till marknaden. Den stora utmaningen är, i första hand, att förstå hur skador uppstår på fisk som passerar turbiner, och inte bara vilka mekanismerna är och vad sannolikheten är för skador. Man måste även ta hänsyn till fiskens biologi och beteende, både på individ- och populationsnivå (Pracheil et al., 2016). Samtidigt som man tar hänsyn till fisken måste man få fram en produkt som effektivt kan producera el. Ofta blir både investerings- och driftskostnaderna högre för fiskvänliga turbiner.

Det finns några exempel på fiskvänliga turbiner som nått marknaden. Alden-turbinen är ett sådant exempel (Figur 1). Utvecklingsprocessen har pågått under en lång tid och involverat US Department of Energy (DOE), Alden Research Laboratory och senare även Electric Power Research Institute (EPRI), och har beskrivits i ett antal artiklar och rapporter (t.ex. Hogan et al., 2014, Cook et al., 2003, Cook et al., 1997, Čada, 2001, Amaral et al., 2011). Utvecklingen av denna turbin började i mitten av 90-talet med hjälp av två- och tredimensionella CFD-modeller (eng. Computational Fluid Dynamics). Utformningen har förändrats en del under vägen, i samband med tester av prototyper, och utgörs nu av en trebladig skruvformad turbin. Alden-turbinen ska nu finnas som en färdig kommersiell produkt hos företaget Voith hydro. Verkningsgraden för denna turbintyp anges kunna nå upp till 94 %. Enligt tester ska fisköverlevnaden vara god för fisk av varierande art och storlek, 98-100% för fisk under 20 cm. Samma siffror påstås gälla för fullvuxen ål (Dixon, 2011, Cook et al., 2003). Det bör dock påpekas att testerna gjordes på en nerskalad prototyp med mindre ålar och att dessa resultat sedan extrapolerats till full skala. Detta gäller för övrigt alla fiskarter som testats. Fullskaliga tester har legat på bordet hos tillverkarna under en tid, men testet har ännu inte blivit verklighet på grund av avsaknad av en lämplig testanläggning (Hogan et al., 2014).



Figur 1. Vänster panel: En skalmodell (1:8,7) av Alden-turbinen. Höger panel: Minimum Gap Runner-turbin (MGR) under installation vid Wanapum Dam, Columbia River, Washington State 2005 (Bilder från Hogan et al., 2014)

Ett annat exempel som också saluförs av Voith hydro är den så kallade Minimum Gap Runner (MGR) som är en vidareutveckling av Kaplan-turbinen (Figur 1). Skillnaden mot en konventionell Kaplan är, som namnet antyder, att man minimerat mellanrummen mellan bladen och navet respektive väggarna i övre sugröret. Detta ska minska kläm- och skärrisken samt uppkomsten av skadlig turbulens och kavitation (Hogan et al., 2014). Denna turbintyp finns installerad i åtminstone tre anläggningar Oregon och Washington i nordvästra USA. De tidiga testerna med fiskpassager visade på god överlevnad hos laxfisk, med generell överlevnad på över 98%. Testerna gjordes i jämförelse med de gamla Kaplan-turbinerna, men det visade sig att överlevnaden var i stort sett samma hos dessa. Senare utvärderingar på vuxen laxfisk visade på direkt överlevnad på 96% och 85% efter 48 timmar. Även här hade de gamla Kaplan-turbinerna i princip samma siffror. Däremot har el-produktionseffektiviteten ökat med 15-30% i de kraftverk där Kaplan-turbiner bytts ut mot MGR. Så frågan är om det verkligen är skadefri fiskpassage som motiverar installationer av denna turbintyp. Oss veterligen finns det inga tester med ål och MGR-turbiner.

En annan turbintyp som anses fiskvänlig är den så kallade VLH-turbinen (eng. Very Low Head). Som namnet antyder lämpar sig dessa turbiner för lokaler med mycket låg fallhöjd, 1,5–4,5 meter, och med begränsat flöde (10-30 m<sup>3</sup>/s) (Hogan et al., 2014). Verkningsgraden skall enligt tillverkaren ha 5 % högre verkningsgrad än traditionella turbiner. Tester gjorda 2008 med fullvuxna ålar (0,7-1,2 m) visar på en genomsnittlig överlevnad på 95% hos denna turbintyp (Leclerc 2008 i Hogan 2014). Överlevnaden varierade beroende på vilken väg ålarna tog genom turbinen, men 100% överlevnad närmast navet och 85% överlevnad ytterst, nära bladens spetsar. Ytterligare tester med en uppdaterad modell av turbinen 2010 resulterade i 100% överlevnad för blankål (0,6-1,0 m) (Lagarigue and Frey, 2011). VLH-turbinen produceras kommersiellt och finns installerad i ett flertal kraftstationer, framför allt i Frankrike.



Som ett sista exempel kan nämnas Arkimedes-skruben som bygger på en uråldrig teknik för att pumpa upp vatten. Men som kraftversturbin låter man alltså vattnet driva rotationen av skruven i stället för det motsatta som skedde i originalversionen. Arkimedes-skruben kan med all rätt kallas för fiskvänlig. Tester med både ål, laxfiskar och nejonöga visar på noll eller försumbar dödlighet (Kibel and Coe, 2011, Hogan et al., 2014, Bracken and Lucas, 2013). Grunden till skonsamheten hos denna turbintyp ligger framför allt i den låga rotationshastigheten (20-30 rpm) och antal blad (vanligtvis max 3). Archimedes-skruben lämpar sig bäst för lokaler med fallhöjd på 10 meter eller lägre och med mycket låga flöden ( $<10\text{ m}^3/\text{s}$ ). Verkningsgraden når ca 85 % om flödet överskrider 60 % av det maximala. Turbintypen är i bruk på en mängd platser i världen och finns tillgänglig hos många olika producenter.

### 3.3 FYSISKA AVLEDARE

Ett sätt att undvika turbinskadorna är att rent fysiskt hindra fisken från att ta sig in till turbinerna via vattenintaget. Man använder sig då av en fysisk fiskavledare. Förutom att avleda fisken från turbinerna kan en avledare konstrueras så att den leder fisken i rätt riktning för att hitta passagen förbi kraftverket, förutsatt att det finns en fungerande sådan. Alternativt kan fisken ledas till någon form av uppsamlingsplats där de kan fångas och transporteras förbi kraftverket. En fysisk avledare består ofta av ett nät eller galler som fisken inte kan ta sig genom, ett så kallat intagsgaller. Intagsgallret, som finns på de flesta anläggningar, är egentligen konstruerade i syfte att skydda turbinerna från drivgods. Men de kan, och skall enligt en del vattendomar, konstrueras så att de även stoppar fisk. Detta görs genom att begränsa spaltvidden i intagsgallret, s.k. fingaller eller fingrindar. För ålen, med sin långsmala kroppsform, krävs mycket liten spaltbredd för att den ska stoppas. Men tar sig fisken inte genom gallret finns en risk för att den istället kläms fast. Detta sker när strömhastigheten är för stor genom gallret. Strömhastigheter på 1,5 m/s genom ett fingaller med 20 mm spaltbredd räcker för att de flesta fiskarter ska fastna (Montén, 1985). För att minimera risken för att ål fastnar i fingaller bör strömhastigheten hållas under 0,5 m/s (DWA, 2005 i Calles and Christiansson, 2012, Travade et al., 2010). Generellt brukar spaltbredd mellan 10 och 20 mm rekommenderas för all hindra ål att gå genom (Bruijs and Durif, 2009, Calles and Christiansson, 2012, Travade et al., 2010). Under en studie i Ätran visade det sig att 20 mm fingaller dödade alla ålar över 680 mm, medan de ålar som gick genom turbinerna led en genomsnittlig dödlighet på 60%, med variationer enligt körning (se avsnitt 3.1.2) (Calles et al., 2010). I vissa fall är det alltså bättre att låta ål passera genom turbinerna än att stoppa dem med ett fingaller om det inte finns någon anordning för att fånga eller leda förbi ålarna. Finns det dessutom ingen fungerande passage är lämpligheten av ett traditionellt intagsgaller som fiskavledare ytterst tvivelaktig.

Använt på rätt sätt är ändå ett fingaller den mest effektiva fysiska avledare för ål. Den kritiska faktorn är, som nämnts, strömhastigheten genom gallret. Genom att montera ett lutande galler minskas hastigheten rakt genom, d.v.s. på flödet vinkelrätt mot gallret. Generellt rekommenderas att vinkeln mellan vattenflödet och gallret understiger  $30^\circ$ , men vinkeln måste minskas med ökande flödes hastighet. Lutningen kan vara riktad antingen horisontellt eller vertikalt, och

leder lämpligen fisken till en flyktväg. Det finns många exempel som visar att kombinationen av lutande galler och flyktöppning är effektiv för att leda ålar förbi turbiner i kraftverk (Genivar Ontario Inc., 2010, Calles & Christiansson, 2012). Eftersom ålar gärna letar efter öppningar då de kommer fram till ett galler kan extra flyktöppningar, utöver en i slutet av avledaren, öka effektiviteten.

En allmän nackdel med fingaller är att det samlar upp mycket skräp som normalt skulle gå genom turbinerna utan skadeverkan, och därmed täpps gallret igen, ju tätare galler desto mer fastnar. Isbildning är också ett generellt problem för intagsgaller, och även här kan problemen öka med minskande spaltvidd. Installation av en fiskavledare är relativt kostsamt i sig. Behövs dessutom någon typ av mekanisk rensningsfunktion går kostnaden upp ytterligare. Sådana installationer kan också vara opraktiska i storskaliga kraftverk (Boubée & Haro, 2003).

### 3.4 BETEENDEBASERADE AVLEDARE

Det har gjorts många försök att ta fram fiskavledare som baseras på att skrämma eller locka fisk att gå i en viss riktning, istället för att fysiskt styra dem (Boubée & Haro, 2003). En beteendebaserad avledare kan använda t.ex. ljud, ljus, elektricitet eller ridåer av luftbubblor (Therrien & Bourgeois, 2000). Även galler som egentligen går att ta sig genom kan ha en beteendemässig avledande funktion (Boubée & Haro, 2003, Bruijs & Durif, 2009). Ålen, som är nattaktiv och skyr ljus under vandring borde kunna styras bort från kraftverksintag med ljus, men så långt har inga sådana installationer kunnat mäta sig i effektivitet med fingaller. Det som fungerat bäst för ål är stroboskopiskt ljus, men resultaten varierar (65-92% enl. Therrien & Bourgeois, 2000). Ett problem med ljusstyrning är kravet på mycket klart vatten för att kunna påverka fisk på längre avstånd, dessutom minskar effekten med ökande strömhastigheter. Det har gjorts försök att avleda ål med lågfrekvent ljud. Men även här visade sig räckvidden och den totala effekten på ålarna vara begränsad (Sand et al., 2000). Det återstår, den andra ord, mycket arbete innan det finns beteendebaserade avledare som fungerar effektivt för ål. Både ljud och ljus har visat potential, men ytterligare arbete krävs för att förfin systemen, vad gäller utformning, placering, frekvens m.m. En väg att gå kan vara att kombinera flera stimuli, t.ex. ljud plus ljus eller ljus plus elektricitet. Samtidigt som fisken styrs bort från turbinintaget måste en alternativ väg presenteras på ett inbjudande sätt. Annars riskerar avledaren att bli ett vandringshinder i sig som försenar eller stoppar vandringen.

Den största anledningen till att utvecklingsarbetet fortsätter inom detta område är att beteendebaserade avledare har några klara fördelar gentemot fysiska avledare. Beteendebaserade system bör generellt vara mindre kostsamma att installera än fysiska avledare. De påverkar inte vattenflöde på samma sätt som mekaniska installationer och sätts inte igen av drivgods så som fingaller. Driften begränsas till de perioder då fisken vandrar, vilket medför mindre slitage och underhållsarbete (Mitchell & Boubée, 1992). Beteendebaserade avledare har därför potential att användas som hjälpmedel vid skonsam drift.

### 3.5 ÅLPASSAGE

En passage förbi ett kraftverk kan utgöras av en mängd olika konstruktioner som antingen installerats i syfte att leda fisk eller bara har detta som bieffekt. Det kan vara en flyktöppning i direkt anslutning till en fysisk fiskavledare, där flyktöppningen är ingången till ett rör eller en ränna som leder till öppet vatten nedströms hindret eller till en uppsamlare för vidare transport av fisken. Det kan också vara en dammlucka eller ett överfallsvärn, eller en fiskväg, konstruerad för uppströms eller nedströms passage, oftast med en specifik art i åtanke. En fiskväg som är designad för en art fungerar inte nödvändigtvis för en annan, och en konstruktion som lockar till uppströmsvandring fungerar inte säkert för nedströmsvandrare.

Mycket tyder på att nedströmsvandrande ålar följer huvudströmmen i ett vattendrag. Då vattenflödet delas upp i flera grenar väljer de ofta den gren som har störst flöde (Jansen et al., 2007). Vid ett vattenkraftverk som är i drift går huvuddelen av vattnet via turbinerna, och en ål som vandrar med huvudströmmen leds således hit. Men ålar som närmar sig turbinintag uppvisar ofta tvekande och undersökande beteende, som att de letar efter en alternativ väg. Det verkar i första hand vara vattnets acceleration framför intaget som utlöser ålarnas beteendeförändring (Piper et al., 2015), men även intagsgallret kan ha en beteendemässig repulsiv effekt (Boubée & Haro, 2003, Bruijs & Durif, 2009). Att det finns en alternativ väg förbi turbinerna betyder dock inte att ålarna använder denna. Även här visar ålarna stor tveksamhet. Travade med kollegor (2010) studerade ålpassage vid en kraftstation i Frankrike, där fisken kunde välja mellan att gå genom turbinerna eller genom passager antingen nära ytan eller botten. Endast ett fåtal ålar valde att använda sig av passagerna, och i de fall detta skedde var det ofta efter flera besök vid ingången och upp till flera dagars fördröjning av vandrigen. Just placeringen av passage för ål, ytligt eller bottennära, har studerats en hel del, men med varierande resultat. Ostörda ålar tros vandra ganska ytligt i huvudströmfåran. Detta är det mest energieffektiva sättet att ta sig nedströms eftersom strömhastigheten vanligen är högre vid ytan jämfört med vid botten. Här är ålarna visserligen mest exponerade för predation, men eftersom de väljer att vandra i skydd av mörker samtidigt som de väljer den snabbaste rutten minskar predationsrisken. När ålarna känner sig hotade eller störda dyker de ner till botten där det är mer skyddade. Den störning som skapas vid kraftstationer och i stadsnära miljö kan resultera i att ålarna väljer en väg nära botten då de närmar sig kraftverk (Behrmann-Godel & Eckmann, 2003). Således bör en bottenpassage vara mer effektiv i dessa sammanhang, vilket också visats i ett flertal studier där ålarna presenterades med båda möjligheterna (Gosset et al., 2005, Durif et al., 2002, Petersson, 2015). Men det finns åtminstone en studie som visat motsatt förhållande, d.v.s. preferens för ytpassage (Nordquist, 2013). Orsaken till det avvikande resultatet i denna studie är oklart. Det finns även studier som visar att ytliga passager som enda alternativ till att gå genom turbiner, t.ex. fisktrappor för uppströmsvandrande lax, ratas av ålar (Dębowski et al., 2016, Haro et al., 2000).

Generellt när det gäller placering och utformning av en fiskpassage kan sägas att den ska uppfattas, av fisken, som det naturliga vägvalet. I de fall det finns en avledare är detta relativt enkelt att få till. Fisken styrs bort från turbinintaget och samtidigt mot intaget till passagen. Väl där ska fisken helst inte ha möjlighet att fly

eller rygga tillbaka uppströms. Men i många fall är den enda befintliga alternativa passagen en lucka eller ett överfall för reglering av spillvatten, och denna behöver inte vara placerad i direkt anslutning till turbinintaget. Att få en ål att hitta och välja en sådan passage vid sidan av huvudflödet som går genom turbinerna är inte helt enkelt. Om däremot flödet genom turbinerna stängs så att allt vatten går via spillvägen blir detta den naturliga (och enda) vägen för en ål som följer huvudströmmen. På så vis kan befintliga passager, som inte konstruerats med fisk i åtanke, utnyttjas som effektiva fiskvägar utan investeringar i mekaniska installationer (mer om detta i avsnitt 3.1.1) (Boubée & Williams, 2006). Detta förutsätter naturligtvis att spillvägen är utformad så att ålar kan passera utan skaderisk.

### 3.6 TRAP & TRANSPORT

“Trap and transport” (T&T) innebär att man fångar in blankålar uppströms det översta vandringshindret i ett vattensystem och transporterar dem, vanligen med tankbil, nedströms det nedersta hindret där de släpps. Denna åtgärd kringgår alltså både investeringskostnader kopplade till anläggning av fria vandringsvägar och elproduktionsförluster i samband med skonsam drift (turbinstopp och/eller spill). En klar fördel med T&T är att man vet säkert att alla ålar som fångas kommer ner till mynningsområdet utan att behöva ta sig förbi turbiner och andra vandringshinder. Alltså kan man, förutsatt god hantering, garantera skadefri transport till havet för ett bestämt antal ålar. T&T tillämpas på initiativ av KTÅ sedan 2010 i Sveriges prioriterade älvattendrag, Göta älv, Motala ström, Lagan, Ätran, Rönne å och Mörrumsån (Dekker, 2015). Dessa transporter uppskattas ha ökat den utvandrande lekbiomassan med 1-6% (Dekker, 2015).

De största frågetecknen kring T&Ts lämplighet som skyddsåtgärd gäller dels direkta effekter av transport, som skador och desorientering, och dels huruvida rätt ålar körs ut till havet. Utvärderingar har gjorts med hjälp av stickprov bland de transporterade ålarna i SLUs regi (t.ex. Wickström, 2014). Dessa omfattade skadefrekvens och mognadsstatus, d.v.s. om de var färdigutvecklade blankålar redo för vandring. Det finns dock en viss osäkerhet i bedömningarna av mognadsgrad, och det krävs omfattande vidare märkningsstudier för att ta reda på vad det blir av ålarna efter att de släpps i mynningsområdena. Det finns också stor osäkerhet kring hur stor andel av den totala årliga lekbiomassan som fångas in, inte minst i de fall där fisket sker i sjöar. Även då fisket sker med fällor i rinnande vatten kan denna osäkerhet vara stor, framför allt i större vattendrag.

## 4 Triggers för vandring

Ålen har ingen klart definierad period då de påbörjar sin nedströms vandring, men de mest omfattande vandringstopparna sker under vår och höst. Hösten brukar omtalas som huvudperioden för blankålen nedströmsvandring, och generellt gäller att höstvandringen i Europa sker tidigare vid nordligare breddgrader (augusti-september) än vid sydliga breddgrader (oktober-januari) (Haro, 2003). Ofta sker dock vandringstoppar i samma storleksordning även under våren. En fyraårig studie på blankålvandring i Warnowfloden i Tyskland visade på mer eller mindre kontinuerlig vandring från mars till december (hela studieperioden) (Reckordt et al., 2014). En generellt tillämpad skonsam drift under vandringssäsongen är alltså svårmotiverad. Turbinstopp som garanterar att alla blankålar skonas innebär alltför stor elproduktionsförlust. Ett begränsat stopp under den period då, statistiskt sett, flest ålar förväntas vandra skulle rädda många ålar men i de fall den förväntade perioden blir lång skulle elproduktionen bli lidande. En realistisk nivå på för en fungerande trigger-modell skulle kunna vara att den flaggar för den eller de perioder som sammantaget ger möjlighet för 50-90 % av vandringsbeståndet att passera.

Ålarnas vandringsbeteende sätts igång av en kombination av invändiga hormonella processer och förändringar i omvärlden. Först genomgår de förvandlingen till blankål, och när den processen är slutförd blir ålarna mottagliga för yttre stimuli som startar själva vandringsbeteendet. Omvärldsförändringarna som startar vandringen omfattar diverse faktorer kopplade till klimat (lufttryck, nederbörd, temperatur m.m.), hydrologi (vattenflöden, -temperatur, -kemi m.m.) och ljus. Genom att följa dessa omvärldsförändringar skulle man kunna förutse ålens vandringstoppar. Men detta är inte helt enkelt. För det första verkar de olika faktorernas betydelse variera med vattendrag eller typ av vattendrag eller sjö. För det andra syns variationer i omvärldsförändringarna inverkan på de individuella ålarna och deras benägenhet att börja vandra. Även om alla ålar påverkas lika av omvärldsförhållandena när de exponeras för dem i ett avrinningsområde kommer antalet ålar som anländer till ett givet kraftverk att variera över tiden eftersom inte alla ålar påbörjade vandringen på samma ställe. Omvärldshistoriken kommer därför att skilja mellan ålar, vilket dock inte hindrar att kraftiga miljösignaler påverkar mer än en ål samtidigt. Effekten av triggers på säsongsvariationen i vandringen blir mer utjämnad ju större sjöar ålarna växer upp i och ju längre de har att vandra från uppväxtområdet till ett givet kraftverk.

För att på förhand sammanfatta de kommande avsnitten som beskriver de olika faktorer som kan kopplas till blankålen vandringsbenägenhet skulle man kunna generalisera och säga som följer. Ålar är aktiva i skydd av mörker, vilket innebär att vandringen sker på natten, framför allt från solnedgången till midnatt, och de undviker fullmåne. De påbörjar gärna sin vandring i samband med förhöjda vattenflöden och grumligt vatten till följd av regn, troligen eftersom detta innebär både ytterligare mörker och en extra skjuts på vägen.

#### 4.1 LJUS

Månfas sägs ofta ha inverkan på ålens vandringsbenägenhet. En del menar att detta samband kan kopplas till ålens biologiska rytm (Jens, 1953, Boëtius, 1967), och är därmed ett sätt för ålarna att synkronisera lekperioden. Andra hävdar att det bara handlar om att ålen föredrar att vandra i skydd av mörker, och eftersom det är mörkare kring nymåne ökar vandringsaktiviteten under denna period (se gärna Bruijs & Durif, 2009 inkl. flertal referenser däri). Det senare resonemanget skulle förklara varför sambandet mellan månfas och vandringsaktivitet ofta är svagt. Det är inte bara månfas som påverkar ljusintensiteten under vattenytan. Molntäcke, vattnets grumlighet och rörelser på vattenytan av t.ex. blåst och regn är också bidragande orsaker till att det blir mörkare vissa nätter och därmed att ålen blir mer vandringsbenägen vid dessa tillfällen. Oavsett orsak så har ett flertal studier visat på samband mellan månfas och ålens vandringsaktivitet. Blankålar i Shannonfloden på Irland uppvisar tydlig månfasperiodicitet i sitt vandringsmönster, framför allt i de övre delarna av vattendraget (MacNamara, 2012). Den absoluta majoriteten ålar vandrar här under de två veckorna kring nymåne, men vandringen sker varken koncentrerat till en nymåne per säsong eller alla nymånar under säsongen. Så det är uppenbart att även andra faktorer spelar in. Man bör också ha i åtanke att tvåveckorsperioden kring nymåne utgör halva måncykeln, så redan utan något som helst samband förväntas hälften av ålarna vandra under denna period.

Utöver den faktiska ljusintensiteten och eventuellt månfas kan ljus även påverka ålen genom dagslängd. Hos laxfiskar, t.ex., fungerar dagslängd som en säsongsberoende trigger för både könsmognad och lekbeteende. Det finns många exempel där man styr leksäsongen hos fisk i odling genom att manipulera dagslängden, alltså antal ljustimmar per dag. Det har också hos ål visat sig finnas ett samband mellan dagslängd och produktionen av könshormoner (Parmeggiani et al., 2015).

#### 4.2 TEMPERATUR

Blankålens vandring pågår, med några få undantag (se avsnitt 4), under vår och höst med uppehåll under sommar och vinter. En trolig förklaring till dessa uppehåll är temperatur. Det ser nämligen ut som att ålen endast vandrar inom ett visst temperaturintervall, eller runt en optimal temperatur. Vid temperaturer över och under detta intervall upphör aktiviteten. Preferenstemperaturen verkar variera mellan olika geografiska områden. Vøllestad med kollegor (1986) såg högst vandringsaktivitet vid 9°C vattentemperatur i Imsaälven i Norge; all vandring skedde mellan 4 och 18°. I Bretagne observerades högst vandringsaktivitet mellan 6 och 10°C (Acou et al., 2008), och i Tyskland visade ålarna högsta aktivitet över 10° (Reckordt et al., 2014). I Sverige har man sett att vårvandringen påbörjas först efter att vattentemperaturen nått 6,5°C, medan höstvandringen pågår så länge temperaturen håller sig över 5°C (Stein et al., 2014). Stein med kollegor konstaterade att just temperatur verkade vara den avgörande triggern för vårens vandring medan höstens vandring styrdes till större del av hydrologiska faktorer och månfas (eller mörker). En genomgång av fångstdata från Mörrumsån har visat att 75 % av ålarna som fångades vid Havbältan fångades i temperaturintervallet 8-



15 °C och 8 % fångades vid lägre temperaturer än 8 °C. Vid Håstad-Mölla fångades samma andel i temperaturintervallet 11-18 °C och inga ålar fångades vid temperaturer under 8 °C. Vid Ätrafors fångades 75 % av ålarna under hösten i temperaturintervallet 9-11 °C och 7.6 % fångades vid lägre temperatur än 8 °C. I Skärhultaån fångades 75 % av ålarna i temperaturintervallet 9.5-17 °C och endast 3 % av ålarna fångades vid lägre temperatur än 8 °C. Denna variation antyder att det kan vara skillnad mellan vattendrag vad gäller trigging av vandringsbeteendet, men även att olika individer har olika nivåer som triggar igång vandrigen. Extremvärden från data för att beskriva och förstå triggingen skapar ökad osäkerhet jämfört med att använda kvantiler. En nackdel med att använda kvantiler och fokusera på merparten av individerna är att alla individer inte kan fångas in av de statistiska modellerna om dessa används som varningssystem. Den positiva aspekten är att det underlättar möjligheten att utveckla en användbar modell som gör det möjligt att förvarna om ankomst av merparten av ålarna, om än inte alla. En tumregel vad gäller vattentemperaturen som gör det möjligt att köra kraftverken utan risk att skada merparten av ålarna är perioder med vattentemperaturer under 8 °C. Däremot har det varit svårare att identifiera en motsvarande övre gräns då vandrigen avtar. Den övre temperaturgränsen när 95 % av populationen fångats varierade från 11.7 °C i Ätrafors till 21.5 °C i Mörrumsån. Om man skall använda en övre gräns skulle det bli 21.5 °C för att vara på den säkra sidan eftersom merparten av fångstdata kommer från höstperioden. Sannolikt blir den övre gränsen inte något stort problem eftersom flödena normalt är mycket låga vid dessa temperaturer. Det innebär att turbinerna i många fall torde vara avstängda för att undvika vibrationer eller slitage på turbinblad eller skovlar som uppkommer vid låga pådrag samtidigt som efterfrågan på elkraft torde vara låg. Av denna anledning har t ex turbinerna i Sädva och Rebnis körförbud under 60 % pådrag (Öhrvall 2007).

Det råder inget tvivel om att ålars könsmognad och därmed benägenhet att påbörja sin lekvandring påverkas av temperatur. Fysiologisk processer i kroppen hos alla kallblodiga djur är starkt beroende av omgivningens temperatur. Men den exakta mekanismen som gör vattentemperatur till en trigger för blankålens vandring är inte känd. Det är också svårt att isolera temperatur som enskild trigger när man studerar ålar i naturen. Förändringar i temperatur nämns ibland som en viktig faktor. Men förändringarna i temperatur är kopplade till andra säsongsberoende processer som sker parallellt. Sker höstvandringen då den gör för att ålens biologiska klocka säger att det är dags (med eller utan hjälp av månfas), för att dagarna blir kortare, för att vattnet blir kallare eller är det av kombination av dessa och andra faktorer? Som nämnt ovan vet man i alla fall inom vilka ungefärliga temperaturintervall man kan förvänta sig vandring.

### 4.3 VATTENFÖRING

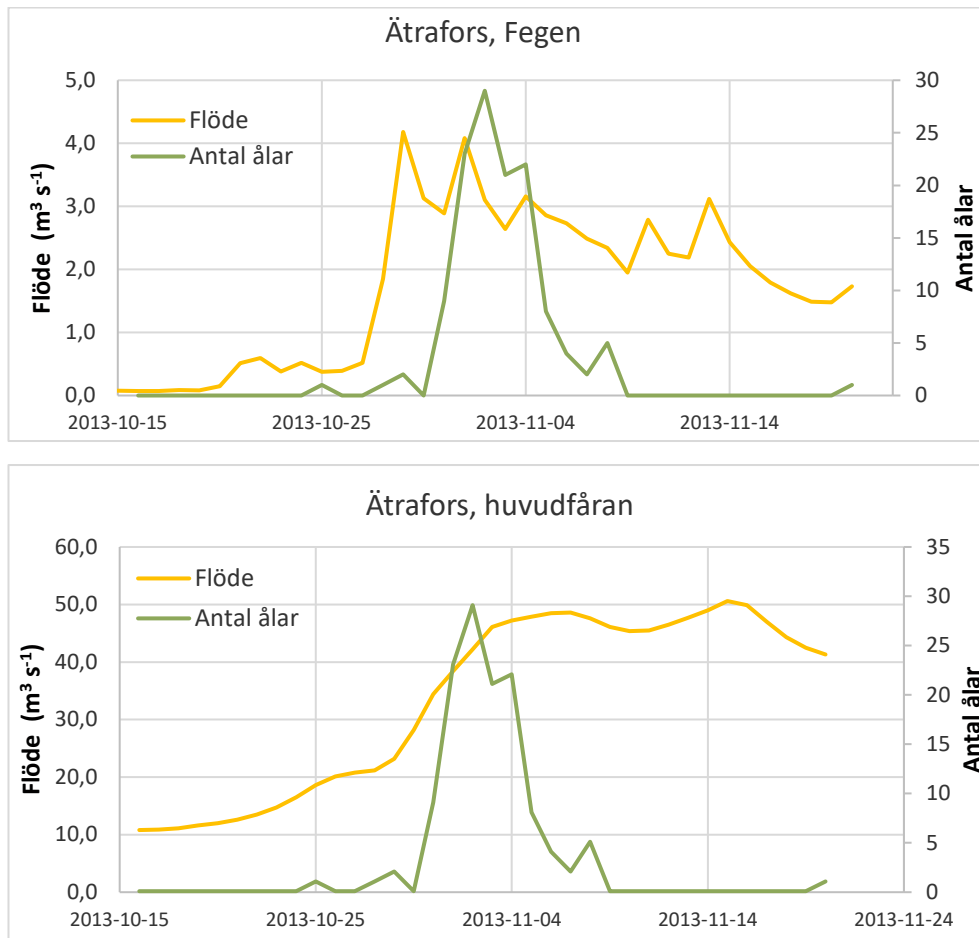
Nederbörd och vattenflöde är till stor del sammankopplade (även) vad gäller påverkan på ålars vandring. Men effekterna verkar troligen genom två huvudsakliga mekanismer, underlättad förflyttning och skyddande mörker. Nederbörd ökar flödet i ett vattendrag och nedströmsvandring under perioder med högre flöde kväver mindre energi. Varje möjlighet till energibesparing är



livsviktig för att klara den långa havsvandringen till lekområdet i Sargasso. Samtidigt medför nederbörd finpartikulärt material som ökar grumligheten i vattnet och därmed blir de vandrande ålarna svårare att upptäcka av rovdjur. Snabbare förflyttning längs vattendraget medför också minskad risk för predation eftersom exponeringen blir kortare och ålar kan röra sig mer obehindrat genom t.ex. grunda partier som är svårforcerade vid lågt vatten.

Oavsett vilken mekanism som är drivande så är just flödesökningar till följd av stora nederbördsmängder den faktor som är starkast kopplad till blankålars vandringsaktivitet (Haro, 2003). I franska Frémurfloden finns ett starkt samband mellan vattennivån i Bois Joli-dammen och blankålarnas vandring (Acou et al., 2008). Innan vattennivån når toppen av dammen kan ålarna passera genom den rörledning som upprätthåller minimumflöde förbi dammen, men väldigt få ålar tar denna väg. Istället väntar de tills dammen rinner över och följer med ytströmmen över dammen. 90% av hela säsongens älvvandring sker under de två första veckorna av överflödesperioden. I mindre vattendrag sägs regnet i sig vara en relativt säkert förebud för älvvandring. Detta har bland annat visats i floderna Scorff och Oir i Frankrike (se även avsnitt 5.1) (Trancart et al., 2013). I de svenska fångstdata som Florian et al. (2015) använde i samband med modelleringen i förra programperioden av Krafttag ål framgår i samtliga fall, utom i Rönne å, att triggningsen av älvvandringen i hög grad orsakas av nederbörd som påverkar den lokala tillrinningen nära ålarnas uppväxtområden snarare än den kumulativa effekten av nederbörden på flödet i huvudfåran vid kraftverken (Figur 2). Notera nedgången i fångst efter en ganska kort fångstperiod. Orsaken till nedgången torde vara en kombination av en sjunkande temperatur och att merparten av de som var vandringsfärdiga passerade under kort tid.

Det är oklart hur, med vilka sinnen, ålarna uppfattar flödesförändringarna som startar deras vandringsbeteende. Utöver själva vattenflödet kan det vara någon annan förändring som är kopplat till detta, t.ex. nederbörd, grumlighet, vattnets kemi och lukt, eller lufttryck. När väl de rätta flödesförutsättningarna uppträder kan vandringen hämmas eller stoppas av ogynnsamma ljusförhållanden, d.v.s. för mycket ljus för att ålarna ska känna sig trygga. Detta kan ske inför, så väl som under, påbörjad vandring.



Figur 2. Kraftig nederbörd som påverkar vattenkemin i ålarnas uppväxtområden, antingen direkt via nederbörden eller via tillrinning från omgivningen, ger en skarp signal som ålarna kan reagera på till skillnad mot den mer utjämnade effekten som blir resultatet nedströms i huvudfåran i och med att huvudfåran kan förses med vatten från betydligt större områden än där merparten av ålarna kommer ifrån. Exemplet gäller ålfångster vid Ätrafors och merparten av ålarna som når Ätrafors torde ha Fegen som uppväxtområde i och med att ålar från längre uppströmsliggande områden har betydligt fler kraftverk att passera innan de når Ätrafors.

## 5 Varningssystem

### 5.1 MODELLERING

Trots att det finns starka samband mellan omvärldsfaktorer och ålens vandring har det visa sig mycket svårt att förutsäga tidpunkten för vandringstoppar. Vilka faktorer som är avgörande verkar till viss del vara lokalspecifika. Det har gjorts många försök att ta fram modeller som ska förutse vandring, med varierande framgång. Det vanligaste sättet att gå tillväga är att se på mångårig fångstdata för ett specifikt vattendrag och försöka koppla ihop ålarnas aktivitetsmönster med de meteorologiska och hydrologiska förhållanden som rått under studieperioden. De exempel som har varit mest framgångsrika fokuserar på mindre vattendrag. En förklaring är en mer effektiv och träffsäker datainsamling. I ett litet vattendrag blir fångster mer representativa för hela lekbeståndet och meteorologi och hydrologi är mer konstanta inom ett litet geografiskt område. Därför finns det ytterst lite information om sambandet mellan omvärldsfaktorer och ålvandring i större vattensystem. De är helt enkelt logistiskt mycket svårare att undersöka. En generell svårighet med användning av modeller som styrmedel för skonsam drift, som också ökar med vattensystemets storlek, är att göra förutsägelser för enskilda kraftverk längs vattendraget. Om en modell baseras på vad som händer längst uppströms i systemet nära ålarnas tillväxtområde där vandringen startat, när kommer dessa ålar till det nedersta kraftverket? Vi vet att ett flertal faktorer kan fördröja och stoppa vandringen efter att den påbörjats. Men ytterst lite är känt om vad som får dessa ålar att återuppta sitt vandringsbeteende efter att de stannat upp. Och hur är det med ålarna som redan lever i olika delar av vattendraget, när börjar de vandra i förhållande till de som startar överst i systemet?

En annan utmaning vid modellering av ålvandring är att välja en lämplig responsvariabel, alltså vad det är man försöker förutsäga. Ett tillvägagångssätt är att modellera antal ålar som kommer att vandra vid en given tidpunkt, men detta bygger på antagandet att man vet hur stor del av beståndet som är klara för lekvandring ett givet år. Alternativt kan man kringgå detta och fokusera på när en viss andel av alla ålar vandrar. När modellen byggs upp baserat på fångstdata kan man se under vilka perioder och förutsättningar majoriteten av ålarna fångades. Ett exempel på detta beskrivs av Durif och Elie (2008) som använde fiskeridata för att ta fram en startpunkt för säsongens vandring samt den tidsperiod som skulle behövas för att täcka en viss andel av den totala vandringen. Användandet av denna metod skulle alltså leda till en kontinuerlig åtgärd som inte hänsyn till att vandringen sker stötvis med uppehåll i vandringsaktiviteten under säsongen.

Andra modeller fokuserar istället på att definiera tidsfönster då omvärldsfaktorerna är optimala och sannolikheten för vandring är stor. En sådan modell som har relativt stor potential för användning i samband med skonsam drift är framtagen av Trancart med kollegor och beskrivs här nedan. Även med denna typ av modell är det svårt att förutsäga varje vandringstopp under en säsong eftersom ålarnas motivation för vandring förändras över tid.

Vandringstriggers kan ha starkare effekt om de uppträder sent på säsongen då ett större antal ålar som är fysiologiskt redo för vandring har ackumulerats och byggt upp motivation. Om två tillfällen med optimala förhållanden för vandring sker tätt

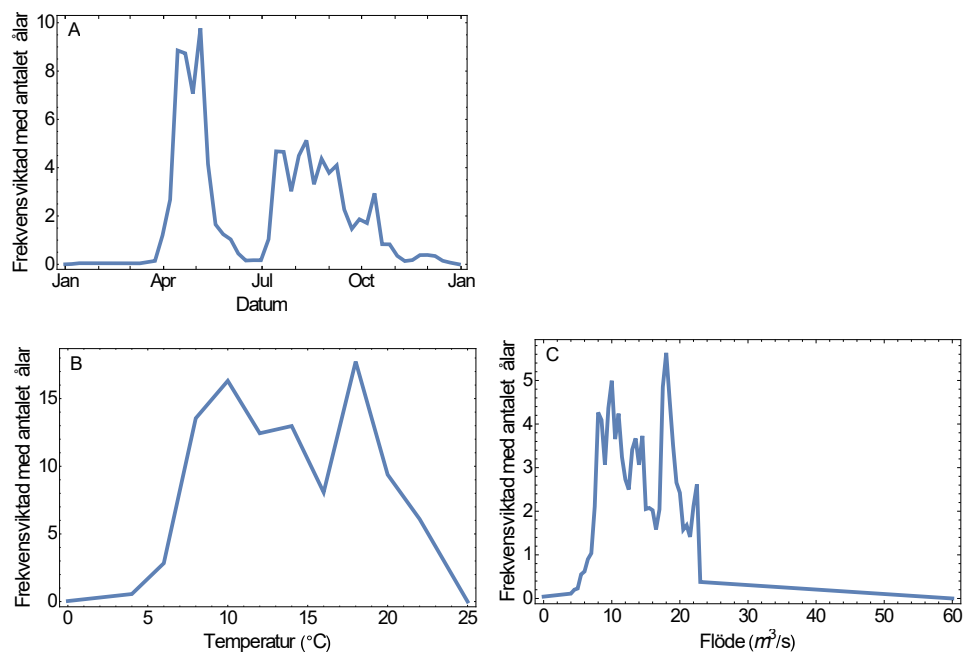
över tid kan alla ålar som är redo vandra vid det första tillfället, och då finns det inga kvar som är mogna att starta under det andra tillfället.

Trancart med kollegor (2013) har tagit fram en modell som ska förutse blankålars vandringstoppar baserat på nederbörd. Modellen bygger på observationer av älvvandring och omvärldsfaktorer i de franska floderna Oir och Scorff. Deras modell FMM (forecasting migration model, baserad på SARIMA modellering) går ut på att förutse de perioder (veckor) då en viss andel av hela säsongens vandring kommer ske. Man bestämmer själv vid vilken aktivitetsnivå modellen ska "larma". Lägre tröskel räddar fler ålar men medför längre turbinstopp. Genom att (hypotetiskt) stoppa turbindriften under de perioder då modellen förutspådde att minst 10% av ålarna skulle vandra i Oirfloden skulle (enligt modellmakarna) 90% av blankålarna räddas. Detta skulle innebära totalt 5,6 driftsstopp à en vecka. Ytterligare analys visade att förkortning av stopperperioden från en vecka till två dagar (totalt 11 dagar) skulle skona 80% av de ålarna som skulle räddas vid veckolånga stopp. Modellen var inte riktigt lika träffsäker när den applicerades på data från Scorfffloden. Endast 43% av de observerade vandringstopparna kunde förutses i Scorff jämfört med 91% i Oir. Men likväl skulle turbinstopp under de 3,3 veckorna som förutspåddes medföra räddning av 70% av ålarna i Scorff. Tyvärr är möjligheterna för tillämpning av modellen på andra vattendrag ytterst begränsade. Vattendraget i fråga måste vara i samma storleksordning och ha samma vandringssäsong, vilket är mest troligt för geografiskt närliggande. Det måste också finnas ett bevisat starkt samband mellan regn och vandringsaktivitet. Och även om dessa förutsättningar uppfylls rekommenderas att modellen kalibreras med fångstdata från det aktuella vattendraget. En stor nackdel med modellen är att en av de signifikanta parametrarna utgjordes av andelen ål som redan passerat i relation till förväntad mängd ål som kommer att passera under året. Det innebär att om modellen skall kunna tillämpas fullt ut behöver man räkna ålarna som passerar. För Scorff River var det ingen större skillnad med eller utan den parametern, men i gengäld var inte heller träffsäkerheten i den modellen lika hög.

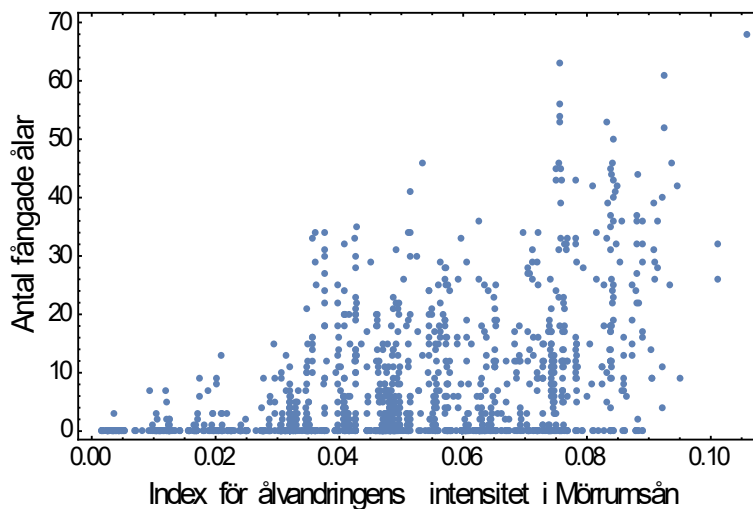
En doktorsavhandling på ålens biologi i Shannonfloden på Irland omfattade bl.a. modellering för att förutsäga vandringstillfällen (MacNamara, 2012). Den logistiska regressionsmodellen omfattade en rad omvärldsfaktorer och verifierades med fångstdata från ålfällor. Här definierades vandringstillfälle som nätter med fångst motsvarande minst 2% av säsongens totala fångst. Modellen var relativt träffsäker. Mellan 66,7 och 95% (olika år) av alla vandringstillfällen kunde förutsägas, vilket motsvarade sex till 19 nätter som var korrekt förutsedda. Ytterligare en till 7 nätter förutsågs som vandringstillfällen men mötte inte definitionen enligt mängden fångad ål. De ålar vars vandring förutsågs motsvarade 27,5 till 86,4% av den totala mängden ål som fångades. Utvärderingen av modellen gjordes parallellt med en test av Migromat® som här visade sig vara mindre träffsäker som varningssystem (se avsnitt 5.2 för detaljer).

Ett alternativt sätt att modellera förväntad mängd ål som anländer till ett kraftverk en given dag är att använda sig av sannolikhetsfördelningar som beskriver sannolikheten, eller snarare andelen av årsvandringen, i relation till de omvärldsvariabler som är av betydelse. För att kunna skapa en sådan modell behövs tillgång till "historiska" fångstdata på ål. Däremot behövs inte fångstdata i

realtid för att använda modellen. Ett exempel för att belysa denna princip ges här för älvandringen i Mörrumsån, baserat på fångstdata från ålfisket i Havbältan (data från Arne Fjälling), flödesdata från utloppet av Åsnen (SMHI), vattentemperatur vid utloppet av Åsnen (SMHI) samt datum (säsongsmässigheten). Principen är enkel. Sannolikhetsfördelningen som en funktion av dag på året när ålarna anländer sammanställs från medel av årliga relativa frekvensfördelningar av antalet fångade ålar, antingen per dygn eller perioder om flera dagar. Sannolikhetsfördelningen som en funktion av temperaturen sammanställs på motsvarande sätt, men genom att använda temperatur istället för datum. Detta tillvägagångssätt tillämpas även för att ta fram sannolikhetsfördelningen som en funktion av flödet. För älvandringen i Mörrumsån under åren 2003-2010 visas sådana "sannolikhetsfunktioner" i Figur 3. Resultaten från funktionerna kan sedan multipliceras med varandra för att få ett index på förväntat utfall aktuell dag givet omvärldsförhållandena. Ett alternativ är att beräkna ett medelvärde, vilket i detta exempel ger det säkraste resultatet (Figur 4).



**Figur 3.** Relativa frekvensfördelningar (%) som beskriver hur ålfångster vid Havbältan varit i relation till omvärldsvariablerna, dagnummer (A), vattentemperatur (B), respektive flöde (C). Fördelningarna kan användas för att beräkna ett index på förväntad ålaktivitet genom att multiplicera värdena som motsvarar det dagnummer, temperatur och flöde som gäller den aktuella dagen. Det är oklart om det inte fångades några ålar på högre flöden än ca 24 m³/s eller om fållan i Havbältan inte var i gång vid högre flöden.



Figur 4. Indexet som bygger på medelvärdet av resultat som extraherats från tre variablers relativa frekvensfördelningar för var och en av de dagar fållan varit igång under åren 2003-2010. De tre variablerna är dagnummer, vattentemperatur vid utflödet ur Äsnen, samt flödet vid utloppet ur Äsnen.

Som med andra modeller missar denna modell genom att signalera hög sannolikhet trots att det kommer inga eller få ålar. Om man väljer att sätta gränsvärdet vid 0.05 för att just denna modelluppsättning skall flagga signalera för skonsam drift den aktuella dagen kan man se att det behövs relativt många "nätter" med skonsam drift per säsong (Tabell 1). Med gränsvärdet 0.05 kommer 70 % av den totala fångsten, under samtliga år sammantaget (2003-2009), att inträffa i samband med de dagar gränsvärdet överskrids. Enstaka år kommer en relativt liten andel av ålarna att räddas jämfört med andra år då en betydande andel räddas med betydligt färre "nätter" med skonsam drift. Kostnaden för den skonsamma driften i termer av antal "nätter" blir relativt hög, 685 av totalt 1703 dvs driftstopp mer än var tredje natt under hela perioden 2003-2009. Det bör dock nämnas att flödena som användes i modellen gäller samma dag som ålarna kom. Det skulle troligen gå att förbättra modellen något genom att använda de flöden som rådde några dagar innan ålarna fångades.

Tabell 1. Resultat från tillämpning av modellen som bygger på ålfångster som funktioner av relativa frekvensfördelningar av dagnummer, vattentemperatur och flöde. T avser antal dagar, SD avser skonsam drift, N avser antal fångade ålar.

| År   | T_SD | T_totalt | T_SD/T_tot | N_SD | N_tot | N_SD/N_totalt |
|------|------|----------|------------|------|-------|---------------|
| 2003 | 76   | 239      | 0.32       | 338  | 1109  | 0.30          |
| 2004 | 116  | 244      | 0.48       | 1556 | 2237  | 0.70          |
| 2005 | 98   | 244      | 0.40       | 777  | 970   | 0.80          |
| 2006 | 65   | 244      | 0.27       | 1114 | 1752  | 0.64          |
| 2007 | 142  | 244      | 0.58       | 1867 | 2163  | 0.86          |
| 2008 | 101  | 244      | 0.41       | 257  | 338   | 0.76          |
| 2009 | 87   | 244      | 0.36       | 452  | 538   | 0.84          |

Liksom med de övriga modellerna är denna modell platsspecifik och behöver anpassas till den plats den skall göra förutsägelserna för. Fördelen gentemot de övriga modellerna är att denna inte kräver någon avancerad statistikprogramvara

för att utveckla eftersom det främst handlar om att sammanställa befintlig information om fångster i området och ställa dessa i relation till omvärldsvariablerna i form av tabeller med relativa frekvensfördelningar, vilket t ex kan göras med hjälp av Pivot-tabeller i Excel.

## 5.2 MIGROMAT®

Ett alternativ till att använda datormodeller för prediktion av vandringstillfällen är att låta ålarna själva tolka förändringar i omvärldsfaktorer och se på hur dessa reagerar. Ett system som utnyttjar detta kallas Migromat® och har tagits fram av Institut für angewandte Ökologie (IfÖ) i Tyskland. Systemet fungerar så att man placerar en bassäng i anslutning till det aktuella vattendraget. Vatten från floden pumpas upp och passerar genom bassängen. Invändigt består bassängen av ett flertal rum, och öppningarna mellan rummen är försedda med antenner som kan registrera passage av PIT-tags (Passive Integrated Transponder). I bassängerna släpper man 60 blankålar som försetts med PIT-tags. Eftersom bassängen har ett genomflödessystem med vatten från floden upplever ålarna de vattenkemiska förändringar som sker i vattendraget. Ovanpå bassängen finns ett perforerat lock så att ålarna även upplever förändringar i ljusförhållanden och nederbörd. Tanken är att ålarna i bassängen ska reagera på omvärldsförändringarna på samma sätt som fria ålar i vattendraget. När ålarna är redo att vandra uppvisar de en viss rastlöshet och rör sig mer inom bassängen, kanske för att hitta en väg ut. När ålarna rör sig mellan rummen registreras deras aktivitet av antennerna och man får ett mått på deras rastlöshet och därmed vandringsbenägenhet. Vid förhöjd aktivitet i bassängen, utifrån ett på förhand definierat tröskelvärde, går en varningssignal till nedströms belägna kraftverk där man kan vidta lämpliga åtgärder för att säkerställa fri passage för den (troligtvis) annalkande älvvandringen.

Migromat® är en kommersiellt tillgänglig produkt som tillhandahålls av IfÖ och har installerats i tre tyska vattendrag (<http://www.ifoe.eu/Migromat-engl.html>). Det första installerades 2010 vid Statkrafts kraftverk Wahnhausen i Fuldafloden, ett biflöde till floden Weser. Sedan dess har ytterligare tre system installerats i Weser-området av Statkraft och fem system installerats i Mainfloden av E. ON (E.ON./Uniper/Rhein-Main-Donau AG).

Tillförlitligheten hos Migromat® som ett varningssystem för älvvandring har utvärderats i ett flertal studier. Enligt producenten visar samlade uppgifter från olika studier att systemet kan förutse vandringstillfällen motsvarande i genomsnitt 70% av vandringssäsongen (80% som bäst) (Irmscher, 2016). Systemet testades vid Linne och Alphen kraftstation i Meusefloden under perioden 2001 till 2003 genom att jämföra aktivitet i Migromat-systemet med telemetridata för sändarförsedda vandrande ålar (Bruijs et al., 2003). Vid 24 respektive 17 tillfällen registrerades aktivitetsnivåer som tolkades som vandringstillfällen vid de två kraftverken. Vid 10 respektive 7 av dessa varningar kunde vandring bekräftas med telemetriregistreringar framför kraftverket. Eftersom ett begränsat antal ålar ingick i telemetristudien fanns ingen information om det även skedde vandring vid övriga varningstillfällen. Varningarna kom i allmänhet på kvällen och åtföljdes av ökad kraftverkspassage några (ca tre) timmar senare. Varje varning tolkades som



att gälla enskilda nätter; endast vid ett fåtal tillfällen registrerades vandrande ålar efterföljande dag. I studien uppskattades att de 24 respektive 17 tillfällena omfattade 66% respektive 73% av de sändarförsedda ålarna, och med rätt åtgärder under dessa dagar skulle motsvarande andel av säsongens vandrande ålar rädda undan turbindöd vid respektive kraftverk.

Migromat® testades i Shannonfloden på Irland åren 2008 till 2009 som del av en doktorsavhandling på ålens biologi (MacNamara, 2012). Här installerades systemet ca 500 meter uppströms en ålfälla som täckte av hela flodens bredd. Denna fälla används normalt för att fånga ålar för transport nedströms förbi vandringshindren (T&T). I studien konkluderades att Migromat® inte fungerade tillfredställande i det aktuella vattendraget. De varningar som kom från systemet under hösten 2009 var visserligen korrekta (åtta av nio), men varning uteblev under ytterligare 19 vandringsstillfällen. Alltså kunde endast 32% (nio av 28) av vandringsstillfällena förutses. Detta kan jämföras med resultaten från modelleringen som skedde parallellt och förutsåg 95% av vandringsstillfällena under samma säsong. Av okänd anledning användes olika definition för vandringsstillfälle i Migromat®- och modellutvärderingarna, vilket medförde att man hade olika antal observerade vandringsstillfällen som referens i de två studierna (28 resp. 20).

### 5.3 TELEMETRI

Vid telemetriska fiskundersökning förses fiskar med sändare, antingen fäst utanpå kroppen eller inopererat i bukhålan, och mottagare placeras ut i eller nära vattnet kring det område där man vill studera. I ett vattendrag kan mottagarna t.ex. placeras ut som "check-points" på ett flertal punkter längs den studerade sträckan så att de registrerar fiskarnas rörelser upp- eller nedströms. Telemetrisystem kan bygga på olika typer av signaler. För fiskstudier används oftast radiotelemetri eller akustisk telemetri. Radiosändare (eller märken) som används till fisk kan delas in i aktiva och passiva, så kallade PIT-tags. Akustiska system kommunicerar med ljudsignaler istället för radiosignaler och har alltid aktiva sändare. Fördelen med passiva märken är att de är mycket billigare och har, i sammanhanget, obegränsad livslängd eftersom de inte har någon egen energikälla. Detta medför dock att räckvidden är mycket begränsad. En PIT-tag-märkt fisk måste komma mycket nära, vanligen mindre än 0.5-1 m, mottagarantennen för att registreras.

Telemetri används flitigt för att studera ålars rörelsemönster under deras nedströmsvandring. Ett flertal studier kopplade till skonsam drift använder tekniken för att validera potentiella varningssystem och triggers, och för att utvärdera överlevnad och beteende vid vandringshinder. Men telemetri i sig skulle också kunna användas som ett varningssystem. Vid märkning av blankålar i ett uppväxtområde kan dessa agera indikatorer för när beståndet vandrar. Men för att de märkta ålarna ska vara representativa för hela beståndet krävs troligen ganska stort antal, vilket medför höga kostnader för sändare och arbetstid för kvalificerad personal. Med PIT-tags kan man märka ett stort antal ålar till relativt låg kostnad. Märkena är billiga och kan injiceras med kanyl istället för kirurgiskt. Men planeringen av mottagarstationer är mer komplicerad för passiva märken eftersom räckvidden är kort. Fisken kan behöva ledas genom en begränsad passage för att komma tillräckligt nära antennerna. Om detta är fallet kan andra system som inte

kräver fiskmärkning vara att föredra (se avsnitt 5.5). Det är även osäkert hur hantering i samband med märkning påverkar fiskarnas beteende och vandringsbenägenhet.

#### 5.4 E-DNA

E-DNA (environmental-DNA) är ett relativt nytt begrepp som syftar på DNA (arvs massa) som kan hittas i naturen utanför de individer de tillhör. DNA finns i all organisk vävnad så när hudflagor, fiskslem och annat lossnar från djur och sprids kommer deras DNA att finnas i miljön omkring dem. Tar man ett vattenprov från en sjö eller ett vattendrag och analyserar DNA-innehållet i detta kan man alltså ta reda på vilka arter som finns där liksom hur vanliga de olika arterna är i förhållande till varandra (Sigsgaard et al. 2017, Spens et al. 2017). I teorin skulle sådana analyser på vattenprover tagna vid eller uppströms ett kraftverk kunna visa när ålen börjar vandra, eftersom antalet ålar och därmed mängden ål-DNA ökar i vattendraget under vandringen. Potentialen för e-DNA som ett varningssystem för älvvandring utreds i ett första steg i ett parallellt Krafttag ål-projekt (älvvandring komplett) och kommer presenteras i dess rapport.

#### 5.5 AKUSTISKA KAMEROR

De varningssystem som beskrivits hittills i denna rapport baseras på indikatorer för ålens vandring. Ett alternativ som skulle ge mer precisa prediktioner är att faktiskt observera ålarna när de vandrar, och därmed få en sann bild av när de närmar sig ett kraftverk. Detta skulle i teorin kunna göras med en traditionell videokamera, men eftersom ålen vandrar mestadels på natten skulle man behöva infraröd belysning, och ljus av denna våglängd har kort räckvidd i vatten. Alternativt skulle man kunna använda en traditionell fiskräknare. Men båda dessa alternativ innebär, p.g.a. sin begränsade räckvidd att man skulle behöva leda in fisken genom en begränsad passage framför den tekniska inrättningen.

Akustiska kameror, eller sonarkameror, har på senare år lyfts fram som en alternativ teknik för användning som varningssystem i samband med skonsam drift av kraftverk. Det finns en rad olika produkter på marknaden, DIDSON (Dual-Frequency Identification Sonar) och ARIS (Adaptive Resolution Imaging Sonar) från Sound Metrics, BlueView från Teledyne och Simsonar Underwater Video Camera (UWC). Tekniken används idag till allahanda undervattensundersökningar inom bl.a. biologi och arkeologi, samt teknisk inspektion av diverse off-shore inrättningar. DIDSON används för att räkna stigande laxar i bl.a. Torneälven (Romakkaniemi et al., 2000). En akustisk kamera kan beskrivas som ett högupplöst ekolod som producerar video av relativt hög kvalitet. Tekniken är baserad på högfrekvent ljud och därför helt oberoende av ljusförhållanden. Akustiska kameror kan också användas i grumligt vatten utan avsevärd påverkan på bildkvalitet. Räckvidden varierar från fem till 100 meter beroende på modell, signalfrekvens, egenskaper hos objektet samt användarens krav på detaljupplösning, d.v.s. om den ska användas för detektion eller identifikation. Sound Metrics ARIS och DIDSON ser ut att ha störst potential för tillämpning inom skonsam drift p.g.a. deras kombination av hög detaljupplösning och relativt goda räckvidd. Det är också dessa system, framför allt DIDSON ännu

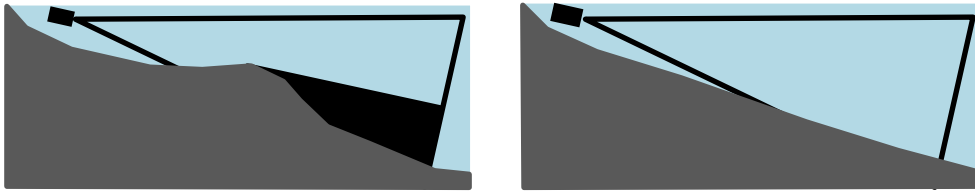
så länge, som omnämns mest frekvent för användning bland publicerade fiskbeteendestudier. ARIS och DIDSON utvärderas för användning som ålvarningssystem i ett parallellt Krafttag Ål-projekt och kommer presenteras i detalj i en separat rapport. Därför kommer också detta avsnitt främst fokusera på dessa två kameratyper. Med en BlueView-kamera kan man täcka stora ytor, den har både lång räckvidd och brett synfält, men upplösningen är inte tillräcklig för att studera mindre fiskar (Adams et al., 2015). Adams med kollegor använde Blueview parallellt med ARIRS och DIDSON för att studera beteende hos smolt och konstaterade att varken individer eller stim kunde upptäckas med BlueView-kameran. Simsonars kamera sägs vara jämförbar med DIDSON i prestanda, men oss veterligen har ingen jämförande utvärdering gjorts med Simsonar.

### 5.5.1 Förutsättningar

För att akustiska kameror ska kunna användas som varningssystem för vandrande blankålar måste en rad förutsättningar uppfyllas. Kamerans placering och räckvidd måste vara sådan att vandrande ålar passerar genom synfältet, och kan därmed observeras. Bildkvaliteten måste vara tillräcklig för att identifiera ålar och särskilja dessa från andra fiskar och drivved. Analysprocessen måste vara automatisk och helst ske i realtid för att systemet ska fungera effektivt som varningssystem.

### 5.5.2 Observation

Synfältet från en ARIS eller DIDSON (i standard utförande) utgörs av en kon med rektangulärt tvärsnitt som strålar ut från linsen som är ca 5 cm hög och 15 cm bred. Genom linsen sprids 48 eller 96 parallella vertikala strålar (beroende på frekvens) som var och en har en vertikal spridning på 14°, och som tillsammans har en horisontell spridning på 28°. De ursprungliga spridarlinserna kan bytas ut mot så kallade tele- och koncentrationslinser som begränsar den horisontella spridningen till 1, 3, 8 eller 15°, beroende på modell. Oavsett vilken modell som används är det svårt att täcka av hela vattendragets profil p.g.a. synfältets utformning. Här spelar även bottenprofilens lutning och struktur in (Figur 5). Då strålen träffar objekt på botten skapas en skugga bakom detta objekt och därmed ett blint fält, det samma gäller en konvex bottenprofil. För att täcka en större del av vattendragets bredd kan lämpligen två kameror placeras mot varandra från var sin sida av vattendraget. Denna uppställning används t.ex. i Torneälven, där man räknar stigande laxar (Romakkaniemi et al., 2000). För lax fungerar de akustiska kamerorna väl som fiskräknare. Laxarna går ganska samlade i den fria vattenmassan i den mittersta delen av älven. Så man vet vart man ska rikta kamerorna och eftersom laxarna håller sig en bit över botten är de sällan dolda av bottenstrukturer. Ålens vägval vet man däremot väldigt lite om. Man tror att ostörda ålar vandrar nedströms i huvudströmmen, vilket skulle ge dem en relativt yttlig placering mitt i huvudströmfåran. Detta skulle ge goda chanser för att kunna observera merparten av de vandrande ålarna med akustiska kameror, utan att behöva leda fiskarna genom speciella strukturer som ska koncentrera dem framför kameran. Däremot söker sig störda ålar ner till botten för att söka skydd. I närheten av mänskliga störningsmoment, t.ex. vid kraftverk i stadsmiljö, ser man ofta att ålarna rör sig nära botten (personlig observation). I en sådan situation är det troligt att många ålar undgår upptäckt.



Figur 5. Synfältet för akustiska kameror påverkas av bottenprofilens struktur och lutning. I skuggan av uppstickande bottenstrukturer bildas blinda fält. Närmast kameran är synfältet smalt, så här finns alltid områden som hamnar utanför synfältet.

### 5.5.3 Identifiering

Det är inga problem att upptäcka objekt i storlek med blankålar som rör sig genom synfältet hos en ARIS eller DIDSON, inom den räckvidd som anges av tillverkaren (ca 30 meter). Men nära den yttre gränsen för synfältet kan det vara svårt att skilja ålar från andra fiskar och drivved i samma storlek. Det har gjorts en del försök att ta fram programvara som kan skilja på olika fiskarter och andra föremål, men inget program är hundra procentigt (se avsnitt 5.5.4). Det mest kraftfulla verktyget för bildbehandling av detta slag är våra egna ögon och hjärna. Men manuell genomgång av omfattande videoupptagning är mycket tidskrävande. För både ARIS och DIDSON-data finns bildbearbetningsfunktioner inbyggda i standardprogramvaran som kommer med utrustningen. Bl.a. har företaget utvecklat en kraftfull bakgrundsreducering (background subtraction) som underlättar upptäckt av objekt i rörelse. Videosekvenser kan också omvandlas till ekogram, där informationen från varje bildruta komprimeras till ett vertikalt streck och presenteras i en graf med avstånd från kameran på y-axeln och förfluten tid längs x-axeln. I ekogrammet visas alltså en fisk som förekommit i flera bildrutor som ett spår eller en båge, liknade det som syns i ett traditionellt ekolod. Det finns också funktioner som letar genom en data-fil efter objekt inom ett visst storleksintervall. Med dessa funktioner är det lättare att hitta misstänkta ålar, jämfört med att se genom hela videosekvenser. Efter att misstänkta objekt letats fram måste dessa verifieras manuellt.

### 5.5.4 Automatisering

För att ett datorprogram ska kunna känna igen en ål från sonarbilder måste man definiera för programmet vad en ål är. Detta skulle kunna göras på flera sätt, baserat på t.ex. rörelsemönster (Mueller et al., 2010), storlek och form på själva ekot (Mueller et al., 2008) eller storlek och form på skuggan, förutsatt att det finns en bakgrund i bild där skuggan kan avbildas (Langkau et al., 2012). Studien av Mueller med kollegor (2008) syftade i att kunna identifiera just nedströmsvandrande ålar med en DIDSON, och framför allt att kunna skilja mellan ålar och drivved. Den process som fungerade bäst resulterade i att 7% av ålarna felklassificerades som drivved och 5% av drivveden felklassificerades som ålar. Alltså kunde 93% av de ålar som passerade kamerans synfält automatiskt detekteras, medan man samtidigt fick en del falska larm. Under perioden för just denna studie innebar detta 53 detektioner av sanna ålar och sju falska detektioner, alltså grenar som uppfattades som ålar, jämfört med vad man hittade vid manuell genomgång av videomaterialet. Det är oklart om systemet har vidareutvecklats så att den kan tillämpas i realtid sedan studien publicerades.

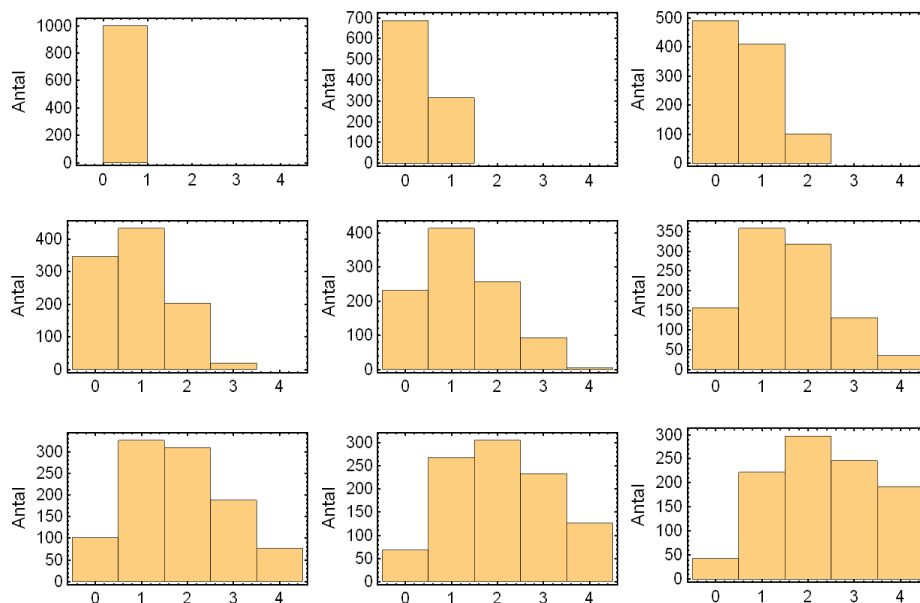
De ska dock finnas en annan programvara för DIDSON-data som utvecklats för automatisk detektion av ålar i (nästintill) realtid. Video spelas i korta sekvenser på en minut och skickas vidare till ett separat program (utvecklat i datorprogrammet R) för analys med en fördröjning motsvarande maximalt sekvensens längd plus behandlingstid (1,5 minut). Systemet beskrivs i en vetenskaplig artikel av Ludwig Bothmann med kollegor (Bothmann et al., 2016) och mer detaljerat i Bothmanns doktorsavhandling (Bothmann, 2016), och sägs vara redo för praktisk tillämpning. Programvaran ska vara utformad för att, tillsammans med en DIDSON, kunna tillämpas som varningssystem för ålar vid vattenkraftverk, utan specialkunskaper hos driftpersonalen. Även detta system resulterar i en del felklassificeringar. Tester med ål, öring och drivved visade att 91% (122 av 134) av de passerande ålarna kunde detekteras, i tillägg registrerades 1,2% av öringarna (5 av 414) felaktigt som ål. Ingen drivved misstogs för ål.

Det finns också företag som specialiserar sig i att utveckla mjukvara för analys av hydroakustisk data (ekolod och sonar). Ett sådant företag är Echoview (Hobart, Australien), vars programvara kan anpassas för olika analysbehov. De har bl.a. en programmodul för detektion och automatisk spårning av fisk med DIDSON, ARIS och BlueView (Adams et al., 2015). Det är oklart hur pass avancerade dessa program är, om de i befintligt utförande kan användas för automatisk detektion av ål. Men det kan vara värt att titta närmare på vid test av akustiska kameror som varningssystem.

## 5.6 GER FUNGERANDE VARNINGSSYSTEM ÖNSKAT RESULTAT?

Det som vanligen nämns i samband med de Early warning system som tagits i bruk eller testats är hur effektiva de är på att förutsäga älvvandring i närområdet. Något som inte nämns är hur lång tid det tar för ålarna att passera när de väl befinner sig i närområdet. Om ålarna tvekar att passera trots att det finns fri passage via spill eller fiskväg kommer detta att leda till fördröjning av passagerna och den skonsamma driften måste då pågå under längre tid än just den dag då många ålar anlände. Trots att det finns många telemetristudier av nedströmsvandrande ål i kraftverksmiljöer har uppgifter om uppehållstider och passagetider vanligen inte redovisats. I en av de få studier där denna problematik redovisas tyder resultaten på att tiden från det att ålen anländer tills den passerar kan vara betydande (Eklöv, 2012, Östergren et al., 2014), vilket ger en relativt låg sannolikhet för passage samma dag den anländer. I samband med telemetristudien i Motala ström var dock passagetiden överlag kort, från några minuter till enstaka timmar medan några av ålarna tog flera dagar eller veckor på sig (Östergren et al. 2012). Om det är mindre än 50 % chans att ålen passerar till dagen efter kommer man nödvändigtvis att få en ansamling ålar uppströms kraftverket samtidigt som ankomsten till nedströmsliggande kraftverk blir mera utdragen i tid än den var vid det översta kraftverket. Kunskap om passagesannolikheter och uppehållstider är därför avgörande för att kunna beräkna hur länge den skonsamma driften behöver fortgå när den väl initierats. Med en daglig passagesannolikhet på 0.3, vilket troligen är högre än i verkligheten vid ett kraftverk, tar det cirka två veckor innan en ål med säkerhet har passerat (Figur 6). Om det kommer många ålar vid ett tillfälle kommer ca hälften att ha passerat efter två dagar och efter ytterligare fyra dagar har 90 % av de som anlände passerat. Om den dagliga passagesannolikheten

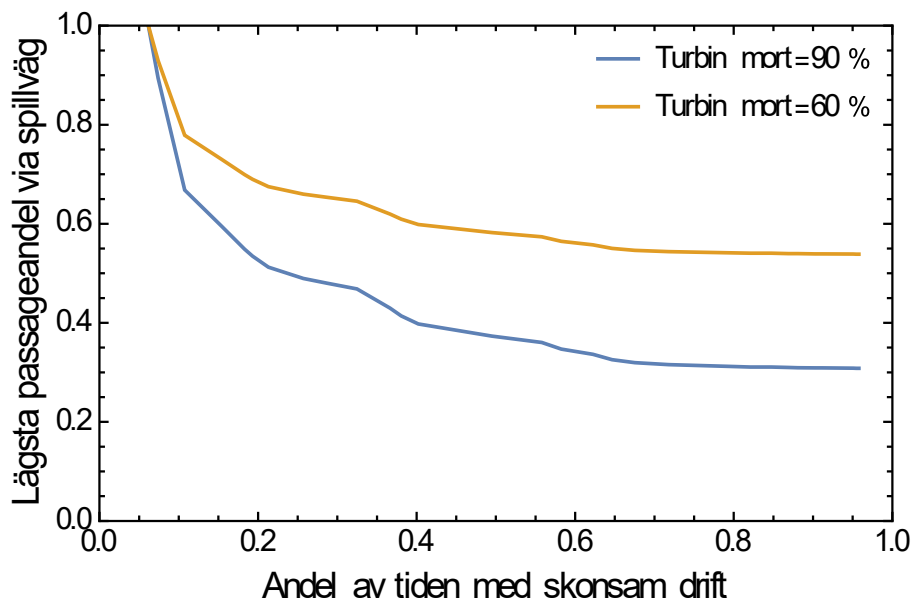
är lägre än 0.3 kommer uppehållstiderna att bli längre. Med andra ord, skonsam drift innebär inte enbart att man behöver dra ned på driften när ålarna kommer till kraftverket utan för att ålpassagerna skall kunna ske utan skador krävs att den skonsamma driften fortsätter i många dygn efter att varningssystemet flaggat att "vandringstoppen" är över. I och med detta blir det inte uppenbart hur många ålar som faktiskt räddas även om man har ett väl fungerande varningssystem. För att veta hur länge hur länge man behöver vänta efter omställning till skonsam drift tills man kan övergå till normal drift krävs kunskap om passagehastighet/sannolikhet för ålarna vid kraftverken. Den kunskapen saknas i stor utsträckning dagsläget.



**Figur 6.** Delfigurerna visar antalet ålar på olika platser (x-axeln) i ett vattendrag under olika dagar från det att 1000 individer anländer till första kraftverket. Dag 1 har ca 300 individer passerat anläggning 1. Exemplet bygger på att sannolikheten för en ål att passera till nästa område nedströms från en dag till en annan är konstant, 0.3. Med den passagehastigheten/sannolikheten kommer det fortfarande att finnas ålar kvar uppströms det första kraftverket efter 10 dygn.

En aspekt som är värd att utforska oavsett vilket varningssystem som används är vilken nivå på spill som är lämpligast att använda. I de fall man inte med säkerhet har möjlighet till fullt spill för när alla ålar kommer kan den optimala lösningen vara att spilla mindre än 100 % under ett visst antal tillfällen. Om man istället utgår från en total spillmängd finns alternativet att fördela denna mängd över längre tid med mindre andel spill vid varje tillfälle. Det som avgör vilken variant som leder förbi flest oskadda ålar beror på hur stor andel som passerar via spill vid olika andelar spill i kombination med dödligheten för de som passerar via turbinerna. För att visa hur detta kan slå i en specifik situation används ett exempel baserat på modellen som presenterades ovan för Mörrumsån. Den referensnivå som valts i detta exempel för att signalera skonsam drift ger totalt driftstopp under ca 7 % av tiden under vandringssäsongen (Figur 7). Om man ökar tiden med skonsam drift men samtidigt minskar på spillmängden i motsvarande grad kommer en del ålar

att passera via spill och resten via turbinen. Det kan mycket väl vara fallet att andelen som passerar via den mindre spillmängden är tillräckligt hög för att mer än kompensera för bortfallet via turbinerna eftersom fler ålar kommer att exponeras för denna situation jämfört med om spillmängden skulle förbrukas på kortare tid med 100 % spill. Denna typ av analys är definitivt motiverad i de fall man överväger skonsam drift medelst spill. Telemetristudier kan användas för att undersöka hur stor andel av ålarna som väljer spillvägen vid olika andelar spill. Samtidigt behöver man utvärdera passageförlusterna via turbinerna eftersom den uppgiften också behövs vid beräkning av vilken spillandel som är optimal.



Figur 7. Om varningssystemet flaggar för skonsam drift med 100 % spill under ca 7 % av tiden när ålarna vandrar, april-november i Mörrumsån, antas här 100 % överlevnad i samband med driftstoppen. Med samma mängd spill kan tiden med spill fördubblas om andelen spill halveras, alternativt att tiden fördubblas om andelen spill uppgår till 25 % osv. Två scenarier redovisas, ett med 90 % mortalitet via turbinerna och ett med 60 % mortalitet. I båda fallen gäller att om andelen ålar som passerar via spill är högre än den lägsta nivå som anges av kurvorna ger det totalt högre ålöverlevnad med mindre andel spill än 100 %.



## 6 Skonsam drift i världen

Det finns ett antal exempel från andra länder där skonsam drift tillämpats, antingen för utvärdering eller som en faktisk förvaltningsåtgärd för ål. Några sådana exempel beskrivs senare i detta avsnitt. Utöver dessa praktiska exempel har skonsam drift diskuterats och lyfts fram som potentiell förvaltningsåtgärd i en mängd olika sammanhang, både i Sverige och andra länder. En av utmaningarna med internetsökningar på ämnet skonsam drift är själva terminologin. På svenska är uttrycket skonsam drift ett relativt vedertaget begrepp, om än inom en begränsad skara användare (Berglund, 2015, Dekker et al., 2016, Tell, 2013). Det är inte lika enkelt på t.ex. engelska. Konceptet omtalas i ett flertal vetenskapliga artiklar (Travade et al., 2010, Eyler et al., 2016, Trancart et al., 2013, Larinier, 2008, Durif & Elie, 2008), doktorsavhandlingar (Eyler, 2014, MacNamara, 2012), rapporter (Genivar Ontario Inc., 2010, EPRI, 2001, Shepard, 2015, Stein et al., 2014, Bruijs et al., 2003, FERC, 1999) konferenspresentationer (Bau et al., 2015), böcker (Richkus & Dixon, 2002, Haro, 2003) och nyhetssidor (O'Connor, 2015, Anonymous, 2015), och man använder då termer som:

- Adaptive/dynamic turbine management
- Eel-friendly turbine management
- Turbine shut-down/cessation
- Controlled/programmed spill/spillage
- Altered generation schedule

I tillägg kan *turbine* bytas ut mot ex.vis *hydropower*, *hydroelectric power (HEP)*, *generating station*, *waterpower*, *dam* eller bara *water*. När det kommer till den grå litteraturen, ex.vis rapporter från företag och myndigheter, skrivs denna ofta på det inhemska språket, vilket gör sökningen än mer besvärlig. På tyska talar man om *Aalschonender Betriebsmanagment*, vilket direkt översatt skulle betyda ål-skonsam drift. Litteratursökningar inom detta projekt begränsades till svenska, engelska och tyska. Funnen litteratur som på något sätt omtalar ämnet skonsam drift presenteras i tabell 1.

**Tabell 2.** Lista över litteratur där skonsam drift i någon form omtalas

| Referens              | Publikationstyp       | Sammanhang                                                                                                                              |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anonymous 2012        | Nyhetsartikel         | Artikel i Bayerische Gemeinde Zeitung baserad på RMD 2012                                                                               |
| Anonymous 2015        | Nyhetsartikel         | Artikel i Der Neue Wiesenbote baserad på RMD 2015                                                                                       |
| Bau et al., 2015      | Konferenspresentation | Studie på koppling mellan flöde och ålvandring för planering av turbinstopp                                                             |
| Berglund 2015         | Rapport               | skonsam drift som förslag på åtgärd med hänvisning till förvaltningsplanen                                                              |
| Bothmann 2016         | Doktors-avhandling    | Beskrivning av framtagna programvara för automatisk identifiering och detektion av ål med DIDSON för skonsam drift, inkl. bakgrundsinfo |
| Bothmann et al., 2016 | Vetenskaplig artikel  | Automatisk identifiering och detektion av ål med DIDSON för skonsam drift                                                               |

| Referens                   | Publikationstyp      | Sammanhang                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Boubée & Haro, 2003        | Vetenskaplig artikel | Diskussion kring planerade spill för ålpassage                                                                                                                                                                                       |
| Boubée & Williams, 2006    | Vetenskaplig artikel | Utvärdering av planerat spill i samband med nedströms vandring                                                                                                                                                                       |
| Boubee et al., 2003        | Vetenskaplig artikel | Sammanställning av åtgärder för nedvandrande ål i Nya Zeeland, t.ex kort turbinstopp och spill och spill och fångst T&T i samband med regn                                                                                           |
| Buijs et al., 2003         | Rapport              | Utvärdering av skonsam drift med Migromat® som varningssystem i Meusefloden, Nederländerna                                                                                                                                           |
| Dekker et al., 2016        | Rapport              | Konstaterande om att skonsam drift ännu inte implementerats i Sverige, som föreslaget i åtgärdsplanen.                                                                                                                               |
| Durif & Elie, 2008         | Vetenskaplig artikel | Stopp och anpassad drift av turbiner diskuteras som en av de mest kostnadseffektiva åtgärden för att skona blankål, kravet på att kunna förutsäga vandring belyses                                                                   |
| EPRI, 2001                 | Rapport              | Utförligt om turbinstopp, med exempel på tillämpningar i USA, ingående beskrivning av diverse modelleringsförsök för vandringsprediktion, även beskrivning av migromat® och hydroakustik som varningssystem                          |
| Eyler et al., 2016         | Vetenskaplig artikel | Test av nattliga turbinstopp i 3 mån samt studie av vägval mellan turbiner och spill i 3 år, inkl. mått på turbindödlighet                                                                                                           |
| Eyler, 2014                | Doktors-avhandling   | Omfattande utredning av ålens vandring i kraftverksutbyggt vattendrag Shenandoahälven, USA med skonsam drift som en huvudfokus. Studier på vandringsmönster, förutsägbarhet, vägval, effekter på ålbestånd dödlighet, försening m.m. |
| FERC, 1999                 | Rapport              | Turbinstopp som förslag på åtgärd vid Holyoke kraftverk, Connecticutfloden, USA                                                                                                                                                      |
| Genivar Ontario Inc., 2010 | Rapport              | Utförlig beskrivning av hur turbinstopp kan implementeras och vilka förutsättningar som krävs, samt exempel på tillämpningar i USA                                                                                                   |
| Hebrand et al. 2012        | Rapport              | Turbinstopp som förslag på åtgärd för fri vandring av lax och ål                                                                                                                                                                     |
| Larinier, 2008             | Vetenskaplig artikel | Lämpligheten av turbinstopp som åtgärd begränsas av svårighet att förutsäga vandring och att den pågår över lång tidsperiod                                                                                                          |
| Larsson & Sparrevik, 2009  | Rapport              | Presentation av stopp och anpassad drift av turbiner under blankålens vandring som åtgärdsalternativ                                                                                                                                 |
| MacNamara, 2012            | Doktors-avhandling   | Diskuterar skonsam drift, mest fokus på hur man kan förutse vandring, baserat på Migromat® och omvärldsdata.                                                                                                                         |
| Mitchell & Boubée, 1992    | Rapport              | Rekommendationer om ekonomisk utvärdering och tillämpning av turbinstopp vid kraftverk i Nya Zeeland                                                                                                                                 |
| Mueller et al., 2008       | Vetenskaplig artikel | Automatisk identifiering och detektion av ål med DIDSON för skonsam drift                                                                                                                                                            |

| Referens                | Publikationstyp              | Sammanhang                                                                                                                                                                               |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| O'Connor, 2015          | Populär-vetenskaplig artikel | Rekommendation om turbinstopp och spill som åtgärd i Shannonfloden, Irland, inkl beskrivning av problem och förutsättningar i det aktuella vattendraget                                  |
| RMD 2012                | Pressinformation             | Beskrivning av E.ON.s åtgärder i Main, Tyskland, framför allt tillämpning av skonsam drift                                                                                               |
| RMD 2015                | Pressinformation             | Beskrivning av E.ON.s åtgärder i Main och Regnitz, Tyskland, framför allt tillämpning av skonsam drift                                                                                   |
| Shepard, 2015           | Rapport                      | Beskriver turbinstopp som en möjlig åtgärd för ålens vandringshinder, återger bl.a. resultat från Welsh et al. 2014                                                                      |
| Statkraft               | Informationsbroschyr         | Beskrivning av Statkrafts skonsam drift-åtgärder i Weser, Tyskland                                                                                                                       |
| Stein et al., 2014      | Rapport                      | Utredning av triggers för ålvandring, i syfte att förutse denna och tillämpa skonsam drift                                                                                               |
| Svedäng & Gipperth 2011 | Rapport                      | "skonsam drift under perioder med stor blankålvandring" som förslag på åtgärd                                                                                                            |
| Tell, 2013              | Rapport                      | Erik Sparrevik pratar bl.a. om skonsam drift                                                                                                                                             |
| Trancart et al., 2013   | Vetenskaplig artikel         | Huvudämne för studien: skonsam drift, med fokus på att ta fram en modell för att förutsäga ålvandring                                                                                    |
| Travade et al., 2010    | Vetenskaplig artikel         | Diskussion kring möjligheter för turbinstopp och anpassat flöde samt vikten av att förutsäga vandringsstopp, studie av vägval turbin/spilllucka kopplat till spillflöde.                 |
| Watene & Boubée, 2005   | Vetenskaplig artikel         | Utvärdering av korta turbinstopp och spill på ålpassage och skadefrekvens vid Patea kraftverk, Nya Zeeland                                                                               |
| Watts, 2004             | Websida                      | Brev från föreningen "Friends of the Kennebec Salmon" till FERC med begäran om turbinstopp vid Benton Falls kraftverk i samband med ålvandring, inkl. länk till dokumentation av ärendet |
| Welsh et al., 2014      | Rapport                      | Omfattande utredning av ålens vandring i Shenandoahälven, USA, Studier på vandringsmönster, förutsägbarhet, vägval, effekter på ålbestånd, överlappande med Eyler 2014                   |

## 6.1 EXEMPEL PÅ TILLÄMPNINGAR

### 6.1.1 Tyskland

Tyskland ser ut att vara det land som i störst utsträckning har anammat konceptet skonsam drift. Denna åtgärd har tillämpats i liten (utvärderande) skala sedan början av 2000-talet, och sedan utökats avsevärt under de senaste åren. Majoriteten av tillämpningarna är baserade på varningssystemet Migromat®, men försök görs också i mindre skala med akustiska kameror, som ett eget varningssystem eller som komplement till Migromat® (se egna avsnitt för detaljer kring respektive system). Skonsam drift tillämpas idag i åtminstone i Main-Regnitz (RMD, 2012, RMD, 2015) och Weser (Statkraft).

### Weser

Det mest välbeskrivna exemplet på skonsam drift, tillämpat i skarpt läge, är från Statkrafts kraftverk i den tyska floden Weser. Varningssystemet som används vid samtliga kraftverk i Weser är Migromat®. Längs den beskrivna sträckan (se nedan) finns fyra sådana system uppställda, ett vid vart av de två kraftverken i biflödena Werra och Fulda, ett vid Petershagen som styr driften av detta plus de fyra efterföljande kraftverken, samt ett vid Langwedel-kraftverket som ligger just nedströms sammanflödet mellan Weser och Aller. Migromat®-system har varit i drift sedan säsongen 2002/03 vid Wahnhausen-kraftverket i Fulda och sedan 2011/12 vid övriga anläggningar. Varningar från systemen hanteras som så att om de kommer dagtid, 06:00-17:00, tillämpas skonsam drift kommande natt, 17:00-06:00. Om varningar kommer in kvälls- eller nattetid, 17:00-06:00, aktiveras skonsam drift omgående och automatiskt.

Wahnhausen-kraftverket i Fulda, ett biflöde till Weser har relativt små och snabbt roterande turbiner som anses resultera i hög dödlighet hos passerande ålar. Skonsam drift tillämpas därför på så sätt att flödet genom turbinerna minskas så pass att vattenhastigheten genom intagsgallret hålls under 0,5 m/s. På så vis riskerar ålarna inte att fastna på gallret utan har möjlighet att vända vid gallret och leta efter en alternativ passageväg. Intagsgallret har en spaltvidd på 20 mm, vilket innebär att åtminstone de större blankålar inte tar sig genom. För att nå en hastighet på 0,5 m/s genom gallret minskas turbinflödet ner till 26 m<sup>3</sup>/s (från upp till 70 m<sup>3</sup>/s) och överskottsvattnet spills via ett överlöp, placerat parallellt med turbinerna, som då fungerar som en ålpassage.

Kraftverket Werraverk i biflödet Werra har även detta små snabba turbiner som lämpar sig dåligt för ålpassage. Här uppmäts redan under reguljär drift låga vattenhastigheter (0,18-0,3 m/s) genom intagsgallret, vilket ger ålarna möjlighet att vända. Spaltvidden är dock något större, 25 mm, vilket medför att en större andel blankålar fysiskt kan komma in i turbinkanalen. Skonsam drift innebär därför här att man presenterar en alternativ passage för ålarna, som de förhoppningsvis väljer framför turbinpassage. För närvarande betyder detta att man vid skonsam drift spiller 12 m<sup>3</sup>/s via ett överlöp, vilket anses vara tillräckligt för att en godtagbar andel av ålarna väljer denna väg. Samtidigt arbetas det dock med att utveckla en ny fiskväg som ska förses med vatten under skonsam drift vid detta kraftverk.

Längs den mellersta sträckan av Weser finns en serie med sex kraftverk som omfattas av skonsam drift. Alla dessa kraftverk har tre eller fyra relativt stora turbiner av Kaplan-typ. Vid skonsam drift ställs skovelbladen om till fullt pådrag i de turbiner som är placerade närmast älvens huvudströmfåra, där det är mest troligt att ålarna vandrar. Driften av turbinen eller turbinerna längst från huvudfåran anpassas till den vattenmängd som blir över. Är det överblivna vattnet inte tillräckligt för att driva ytterligare en turbin, spills detta istället via överlöp.

Blankålen i Weser vandrar ut framför allt under perioden november till februari. Migromat®-systemen är dock i drift under en längre period, oftast mellan 150 och 200 dagar per säsong. Antal dagar med larm under dessa perioder har varierat mellan 19 och 55. Träffsäkerheten av varningssystemet utvärderades genom provfiske nedströms kraftverket under vandringssäsongerna 2011/12 t.o.m.

2013/14, både under normal och skonsam drift styrt av varningssystemet. Utvärderingen visade på en hög träffsäkerhet. Mellan 73 och 96% av ålarna som passerade kraftverket under provfiskeperioderna gjorde så under nätter med skonsam drift (Statkraft).

### 6.1.2 USA

Det mest väldokumenterade exemplet på tillämpning av skonsam drift i USA rör Shenandoahfloden som är ett biflöde till Potomac. Shenandoah rinner genom Virginia och West Virginia och har ett årsmedelflöde på 78m<sup>3</sup>/s. Potomac, i sin tur, är den fjärde största floden som mynnar på USAs ostkust. Åtgärderna i detta vattendrag har utvärderats och beskrivits bl.a. i en doktorsavhandling (Eyler, 2014) och en rapport (Welsh et al., 2014).

Skonsam drift i Shenandoah omfattar totala nattliga turbinstopp (18:00-06:00) vid fem kraftverk under perioden 15 september till 15 december. Motsvarande åtgärder ska också tillämpas vid ett flertal kraftverk i Main, men dessa verkar inte ha utvärderats (muntlig referens i Eyler et al., 2016). Trots de omfattande åtgärdsperioderna sker ungefär en tredjedel av ålarnas vandring under normal drift. Detta kan till stor del förklaras med att ålen även vandrar på våren. Vid skonsam drift spills vattnet via överlöp med fallhöjder på 4,5 till 8,7 m. Dessa passager medför i princip inga skador för ålarna och åtgärden kan anses mycket effektiv för ökad överlevnad. Detta utvärderades med telemetriundersökningar under tre vandringssäsonger, 2007-2010. Den kumulativa dödligheten för samtliga fem kraftverk minskade från 63% till 7% i och med turbinstoppen.

Totala turbinstopp under tre månader medför naturligtvis betydande produktionsbortfall. Därför diskuteras möjligheten att reducera stopperperioderna med modellering av omvärldsdata (flöde, nederbörd, månfas och temperatur) för att förutsäga vandringstoppar (Eyler et al., 2016). En utmaning i det aktuella vattendraget är att fyra av fem kraftverk saknar fjärrstyrning, vilket innebär att förändringar i driften måste utföras manuellt på plats. Hur diskussionerna kring förfinandet av driften har gått vidare sedan rapporten skrevs 2016 är oklart. Men tillämpningen av skonsam drift både i Shenandoah och i de olika vattendragen i Main fortlöper och verkar styras av åligganden från myndigheterna.

## 7 Potential för skonsam drift vid utvalda svenska kraftverk

Uppdraget för detta projekt omfattar, utöver en kunskapssammanställning över ämnet skonsam drift, även en utvärdering av att tillämpa skonsam drift som ålbevarande åtgärd vid kraftverken i Göta älv och Motala ström. Denna utvärdering är baserad på (i) tidigare rapporter över ålens nuvarande möjlighet till passage (Calles & Christiansson, 2012), tekniska lösningar tillämpbarhet för förbättra passage (Calles et al., 2014) samt vägval och överlevnad (Östergren et al., 2014) vid kraftverk i de aktuella vattendragen, (ii) platsbesök på de aktuella kraftverken för att undersöka och dokumentera de praktiska förutsättningarna för olika typer av skonsamdrift samt (iii) intervjubaserade diskussioner med driftspersonal kring deras syn på potentialen att tillämpa skonsam drift. Som beskrivits i avsnitt 3.1 beror olika anpassningars potential på det specifika kraftverkens egenskaper, framför allt spillvägarnas lämplighet för fiskpassage och turbinernas utformning (turbindödlighet). Arbetsgången har således varit att först bedöma vilka former av skonsam drift som kan vara aktuella i respektive vattendrag och individuella kraftverk. Utifrån dessa bedömningar presenterades möjliga alternativ för driftspersonal hos de olika kraftbolagen och diskuterades med fokus på genomförbarhet gentemot andra fordringar på driftplanering, responstider på larm från eventuella ålvarningssystem, kostnadsuppskattningar samt personalens allmänna reflektioner. Närvarande vid intervju hos Vattenfall, gällande Vargön, Hojum, Olidan och Lilla Edets kraftverk i Göta älv var Anna Östlund och Lennart Larsson. Inför intervjun gav också Niklas Dahlbäck (programchef för Vattenfalls FoU-program för vattenkraft) skriftliga kommentarer på frågorna som skulle avhandlas. Vid intervju hos Tekniska Verken i Linköping, gällande Älvås, Skärblacka och Fiskeby kraftverk, närvarade Ari Sundvall, Katarina Ingvarsson och Dag Ahlqvist. Intervju hos Holmen Energi, gällande Holmen och Bergsbron/Havet kraftverk i Motala ström, skedde med Jan Lidström, Daniel Norenus och Rolf Bjernhagen.

Observera att utvärdering av spillvägar inom detta projekt är begränsade till subjektiva bedömningar baserade på information och observationer av fallhöjd, passagers utformning, vattenflödeskaraktär och fysisk miljö i och omedelbart nedströms utskoven. Om det i ett senare skede skulle bli aktuellt att gå vidare och utvärdera skonsam drift i praktiken krävs objektiva utvärderingar av skaderisk för ål i de aktuella spillvägarna, motsvarande de studier som görs av turbindödlighet, exempelvis med så kallade sensorfiskar.

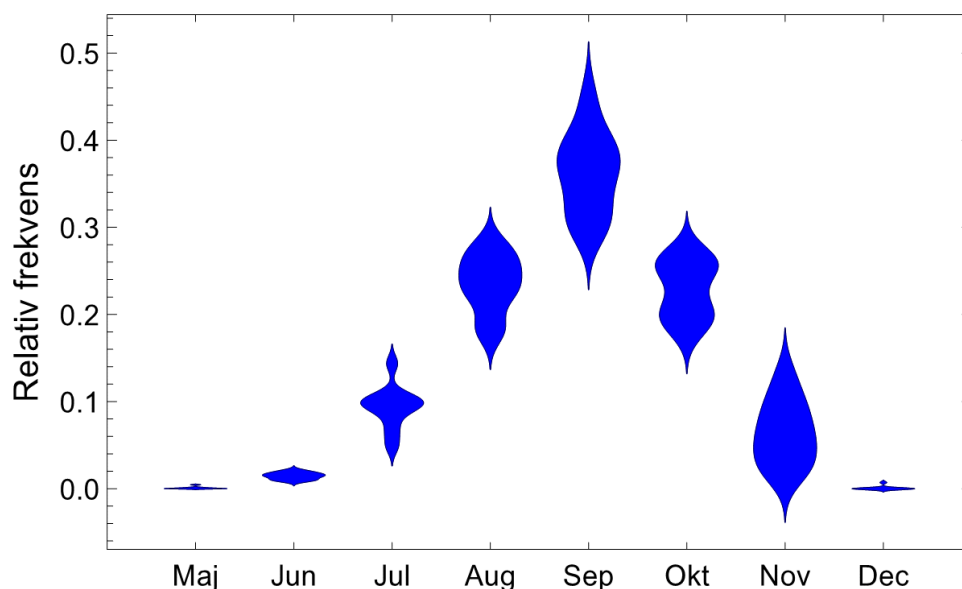
### 7.1 GÖTA ÄLV

#### 7.1.1 Ål i Göta älv

Göta älv är det högst prioriterade reglerade vattendraget baserat på potentiell ålproduktion i Sverige (Anonymous 2008, Calles et al., 2014). Den höga prioriteten bygger dock mer på dess potential som uppväxtområde än på hur produktionen

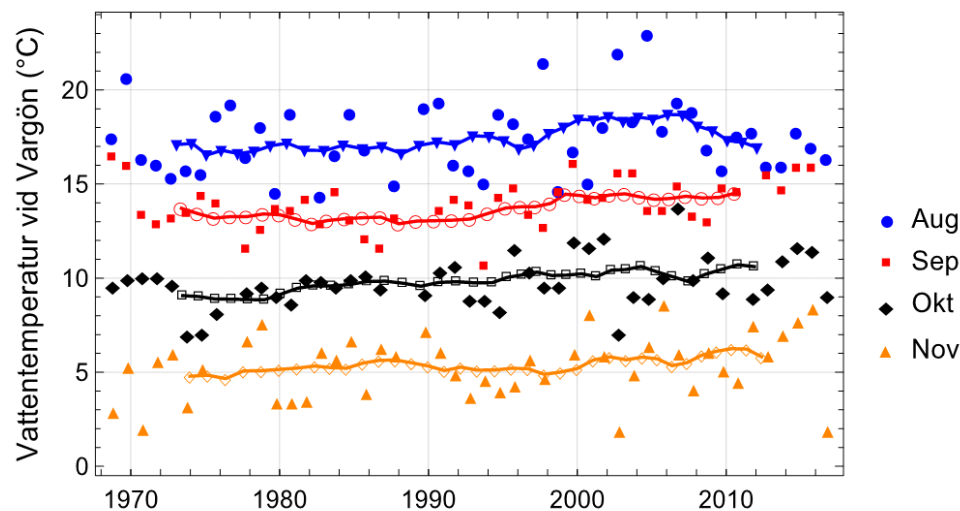
sett ut historiskt. Totalt beräknas en teoretisk årlig produktion av 71 ton blankål i Göta älvs avrinningsområde (Calles et al., 2014).

Det finns dock data från Olidan under 1960-talet då mängden död ål på gallergrindarna noterades (Yttrande till Vänersborgs tingsrätt, Vattendomstolen, från Fiskeriintendenten i Övre Södra distriktet, 1975-04-01, Dnr. 916/73). I genomsnitt rensades närmare 5 ton ål per år från gallergrindarna och säsongskurvan pekar på en tydlig vandringsperiod under sensommar-höst (Figur 8). Vandrings säsongen pågår troligen något längre under hösten i dagsläget jämfört med 1960-talet p.g.a. av något högre temperaturer (Figur 9). Trollhättefallet utgör ett naturligt vandringshinder som sannolikt begränsade möjligheterna för såväl upp- och nedströms vandring av ål i systemet redan innan kraftverksutbyggnaden av älven. För andra fiskarter har Trollhättefallet utgjort ett definitivt uppströms vandringshinder. Men om man ser tillbaka ännu längre i tiden har området varit i ständig men långsam förändring p.g.a. landhöjningen, och under perioder har Vänern varit förbunden med havet genom mer fiskvandringssvänliga älvsträckningar. Under dessa perioder har troligen ålproduktionen i systemet varit omfattande. Frågan om huruvida Göta älv är ett viktigt naturligt vattendrag för ålproduktion beror alltså på vilket tidsperspektiv man har. Oavsett, är vattendraget viktigt för Sveriges ålproduktion idag, men kanske kan ses mer som ett kompensationsodlingssystem för ål i naturlig miljö. Populationen bygger således på transport (tidigare ledning) av uppvandrande ål, samt utsättning av sättål från västkusten och importerad glasål.



Figur 8. Merparten av ålarna, 80-85 % baserat på vikt, som fastnade på gallergrindarna vid Olidans kraftverk under 1960-talet kom under perioden augusti-oktober. Fördelningarna inom respektive månad visar variationen mellan år.





Figur 9. En viss temperaturökning har skett på 0,5 m djup vid Vargön sedan 1960-talet och speciellt under den senare delen av vandringsäsongen, vilket torde innebära att älvvandringen pågår längre in i november i dagsläget jämfört med under 1960-talet som var en kall period. De heldragna linjerna visar 10 års glidande medelvärden.

### 7.1.2 Förutsättningar för åtgärd

Tidigare utredningar av fiskars passagemöjligheter i Göta älv har visat på de utmaningar som finns (Calles & Christiansson, 2012, Calles et al., 2014). (Se gärna dessa rapporter för detaljerade beskrivningar.) Göta älv avvattnar 10% av Sveriges yta och har en medelvattenföring på 550 m<sup>3</sup>/s. De tre kraftverken (Vargön, Hojum/Olidan och Lilla Edet) som omfattas i denna rapport är bland de största i Sverige vad gäller slukförmåga. Vattendragets och kraftverkens storlek medför stora tekniska och ekonomiska utmaningar vid införandet av tekniska passagelösningar. Dessutom förekommer omfattande fartygstrafik på älven och skredrisken är stor. Göteborgs stad tar dricksvatten från Göta älv. I samband med låga flöden i älven tränger saltvattenskilan från havet längre upp i vattendraget och försämrar vattenkvaliteten vid dricksvattentäkten. Driftsformer som medför låga flöden, t.ex. turbinstopp med begränsade spill via utskov eller flöde genom ett fåtal turbiner, kan alltså medföra problem även för dricksvattentäkten. Tillämpning av skonsam drift medför snabba ändringar av flödet som inte kan planeras lång tid i förväg. Förutsättningarna i Göta älv som nämns ovan skulle sannolikt medföra stora utmaningar för en effektiv implementering av skonsam drift i detta vattendrag.

Styrning av turbiner och spill sköts på distans för alla kraftverk i Göta älvs huvudfåra. Alla stationer tillhör samma bolag och styrs från samma central, vilket innebär enkel samordning. Responstiden för anpassad drift och spill kan räknas i minuter, och är alltså på inga sett en begränsande faktor för tillämpning av skonsam drift.

Utskoven ser ut att vara dåligt lämpade för fiskpassage vid alla kraftverk längs den aktuella sträckan av Göta älv. Värst är det vid Hojum och Olidan, båda placerade vid Trollhättefallet med en fallhöjd på 32 meter och grova klippstrukturer i fallområdet. Strålhastigheterna är mycket höga jämfört med motsvarande naturliga

fall p.g.a. dämning och lägre utsläppspunkt. Utformningen av utskov vid Vargön och Lilla Edet, med långa skibord och efterföljande grova nedströmsstrukturer, anses inte heller speciellt fiskvänliga. Samtliga utskov har öppningar vid botten vilket medför höga strålhastigheter genom passagen. Det finns även en islucka med ytspill vid kraftverket i Lilla Edet, vilken skulle kunna utgöra ett mer skonsamt passagealternativ. Detta skulle dock behöva utvärderas innan en eventuell tillämpning.

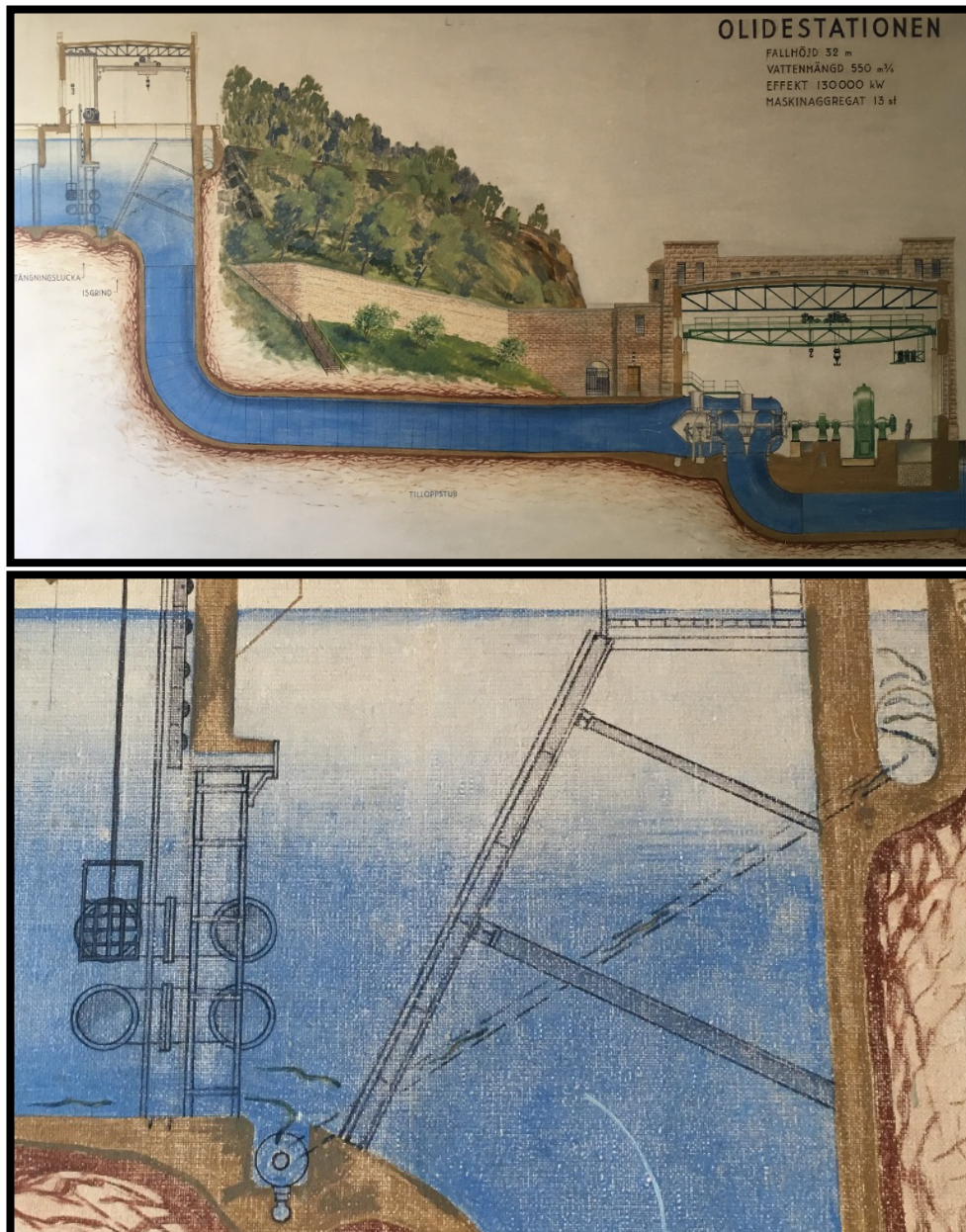


Figur 10. Översiktsskarta som visar placeringen av de vattenkraftverk i Göta älv som omfattas i denna rapport. (Modifierad från Calles et al. 2014)

Turbinerna vid Vargön, Hojum och Lilla Edet är alla stora (5,3-8 m diameter) och av Kaplan-, rör-Kaplan- eller propellermodell. Varvtalen är relativt låga, framför allt vid Vargön och Lilla Edet (46,9-75 rpm). Alla dessa egenskaper bör medföra relativt låga skadefrekvenser för ål. Enligt Leonardssons modell förväntas dödlighet på 11-12% resp. 20-23% i Vargöns kaplan- och rörkaplanturbinerna vid full resp. halv körning. Vid Hojum förutspås 22-32% resp. 39-54% vid full och halv körning, och vid Olidan 91% resp. 88%. Vid lilla Edet förutser samma modell dödlighet på 10-14% resp. 18-25% vid full resp. halv körning. För hela sträckan, fr.o.m. Vargön t.o.m. Lilla Edet, förutspår modellen en överlevnad på 24-39% beroende på körning, men då kan nämnas att det råder stor osäkerhet kring ålens vägval i Trollhättan. Det går fem parallella vattenvägar genom Trollhättan, Nedströms passage kan ske genom tre Kaplan-turbiner vid Hojum, sju Francis-turbiner vid Olidan, en fartygsled med sluss samt ett antal utskov då dessa är

öppna. Olika passager resulterar troligen i mycket varierande dödlighet. Dessutom lär det komplicerade kanalsystemet orsaka fördröjning i vandringen. Oavsett åtgärd är det alltså oklart hur lång tid det skulle ta för en ål att framgångsrikt söka upp den passage som presenteras.

Som kuriosas kan nämnas att det på Olidans kraftstation finns en väggmålning, (troligen) från 1940-talet, som visar vad som tros vara en invändig ålavledare för nedströms passage (Figur 10). Det har skett fångst av blankål vid fingallren i anläggningen, men enligt målningen har alltså ål också letts nedströms förbi turbinerna. Vid platsbesök kunde delar av dessa ålledningskanaler identifieras, men det är fortfarande oklart hur den sista delen var dragen och var den mynnade nedströms.



Figur 11 Väggmålning från Olidans kraftstation som visar en översikt över kraftverket i genomskärning (övre panelen) samt detaljbild av vad som tros vara delar av en tidigare ledare för nedströms passage av blankål (nedre panelen).

**Tabell 3.** Egenskaper för de fyra kraftverken i Göta älvs huvudfåra. Modellerad turbindödlighet enligt Leonardsson (2012), från Calles & Christiansson 2012.

| Parametrar                | Vargön     |                         |        | Hojum                   |        | Olidan      |
|---------------------------|------------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------|
| Galler (mm)               | Saknas     | 100                     | 100    | 100                     | 100    | 75          |
| Löphjul                   | Kaplan x 2 | Rör-Kaplan              | Kaplan | Kaplan                  | Kaplan | Francis x 9 |
| RPM                       | 46,9       | 75                      | 136,4  | 136,4                   | 136,4  | 187,5       |
| Ø / (mm)                  | 8000       | 6100                    | 5300   | 5500                    | 5700   | 1800        |
| Q (m <sup>3</sup> /s) tot | 2 x 330    | 250                     | 170    | 210                     | 260    | 40 x 9      |
| Fallhöjd (m)              |            | 4,3                     |        | 31                      |        | 31          |
| Åtgärder                  |            | Nej                     |        | Nej                     |        | Nej         |
| Dödlighet (ÅFP)           |            | 70%                     |        | 70%                     |        | 70%         |
| Obs. Dödlighet            |            | 24%                     |        |                         | 32%    |             |
| Modellerad (KTÅ)          |            | 11% (Q <sub>MAX</sub> ) |        | 50% (Q <sub>MAX</sub> ) |        |             |
| Q <sub>MAX</sub>          | 11%        | 12%                     | 32%    | 27%                     | 22%    | 91%         |
| 75% Q <sub>MAX</sub>      | 14%        | 16%                     | 40%    | 33%                     | 27%    | 87%         |
| 50% Q <sub>MAX</sub>      | 20%        | 23%                     | 54%    | 47%                     | 39%    | 88%         |

| Parametrar                 | Lilla Edet |                         |            | Totalt Göta älvs huvudfåra |
|----------------------------|------------|-------------------------|------------|----------------------------|
| Galler (mm)                | 200        | 100                     | 100        | -                          |
| Löphjul                    | Kaplan     | Propeller x 2           | Rör-Kaplan | -                          |
| RPM                        | 62,5       | 70                      | 70         | -                          |
| Ø / (mm)                   | 6000       | 5800                    | 6100       | -                          |
| Q (m <sup>3</sup> /s) tot  | 200        | 200 x 2                 | 280        | -                          |
| Fallhöjd (m)               |            | 6,5                     |            | -                          |
| Åtgärder                   |            | Nej                     |            | -                          |
| Dödlighet (ÅFP)            |            | 70%                     |            | 97%                        |
| Obs. Dödlighet             |            | 38%                     |            | 68% / 66% *                |
| Modellerad dödlighet (KTÅ) |            | 12% (Q <sub>MAX</sub> ) |            | 58% (Q <sub>MAX</sub> )    |
| Q <sub>MAX</sub>           | 14%        | 13%                     | 10%        | 61%                        |
| 75% Q <sub>MAX</sub>       | 17%        | 16%                     | 12%        | 65%                        |
| 50% Q <sub>MAX</sub>       | 25%        | 23%                     | 18%        | 76%                        |



### 7.1.3 Förslag på driftanpassning i Göta älv

I dagsläget anses inte ålpassage via spillvägar kombinerat med turbinstopp vara en lämplig form av skonsam drift för något av kraftverken i Göta älvs huvudfåra. Detta motiveras med utskovens egenskaper som tros orsaka hög dödlighet hos passerande ål. Detta skulle dock behöva utredas. Istället föreslås att ål får fortsätta passera genom turbinerna, men att de turbiner som har högst dödlighet stoppas och driften i övriga turbiner körs med fullt pådrag under ålens vandringsperiod.

Under intervjun diskuterades också en alternativ åtgärd som kombinerar ett tidigare utrett förslag på att införa  $\alpha$ -galler vid bron just uppströms Vargön med skonsam drift av kraftverken. Det ursprungliga förslaget med  $\alpha$ -galler ansågs inte genomförbart p.g.a. vattendragets dimension och skredrisk (Calles et al., 2014). Det nya alternativet som diskuterades omfattar ett reglerbart galler som sätts i drift endast under ålens vandring och kombineras med minskat flöde genom kraftverken. På så sätt behöver gallret inte dimensioneras för fullt flöde i älven (ca 1000 m<sup>3</sup>/s), utan för ett strypt "skonsam drift-flöde" (3-400 m<sup>3</sup>/s nämndes som förslag av driftsledningen). Begränsningarna i flöde och drifttid skulle drastiskt minska gallrets påverkan på flödet och därmed riskerna med installationen.

I anslutning till gallret skulle en fångstanordning för ål installeras. Snarare än att vara en ren form av skonsam drift skulle detta förslag innebära en effektivisering av nuvarande T&T-åtgärd. Fler ålar kan fångas in och man vet att man fångar rätt ålar eftersom de påbörjat sin vandring.

### 7.1.4 Genomförbarhet

Åtgärdsförslaget som innebär anpassad turbindrift (se ovan) tar sin utgångspunkt i Trollhättan, då båda anläggningar här (Hojum och Olidan) anses ha högre dödlighet än övriga kraftverk i systemet. Driftsformen bygger på att man i första hand stoppar driften i samtliga av Olidans turbiner under ålens vandring, eftersom denna anläggning förmodas ha mycket högre turbindödlighet än övriga anläggningar. Samtidigt som driftstopp tillämpas vid Olidan, körs turbinerna vid Hojum strax under fullt pådrag. Antal turbiner som körs vid Hojum får till stor del styras av vattentillgång och andra fordringar på driften. Turbindriften prioriteras i ordningen 16-15-14, då turbin nr. 16 förutspås ha lägst dödlighet p.g.a. sin något större diameter och 5,5 meters lägre placering, vilket medför mindre kavitation. Driften av övriga anläggningar styrs i sin tur av den vattenmängd som bestäms vid Hojum och modelleras så att de turbiner som körs är ställda på strax under fullt pådrag. Eftersom turbinerna har olika slukförmåga väljs de turbiner vars kombinerade flöde bäst stämmer överens med det totala flödet. Eventuellt överskottsvatten vid Vargön och Lilla Edet anläggningar spills. Prediktioner av turbindödlighet enligt Leonardssons modell bör också beaktas vid val av turbiner. Full körning av de mest skonsamma turbinerna skulle enligt denna modell ge dödlighet på 11% vid Vargön, 22-27% vid Hojum och 10-13% vid Lilla Edet (Calles & Christiansson 2012). Detta motsvarar en total överlevnad för hela sträckan på ca 59%. Observera att detta förutsätter att all vandring sker under skonsam drift.

Som nämnts tidigare finns det både miljöfaktorer och fordringar från andra samhällsaktörer som kan påverka planeringen av skonsam drift. Dessa är svåra att förutsäga och planering får därför ske utifrån ett "normaltillstånd". Sker

kollisioner i planeringen får denna korrigeras enligt de prioriteringar som samhället erfordrar. Skonsam drift-periodens omfattning bestäms till stor del av varningssystemets träffsäkerhet. Med ett träffsäkert varningssystem skulle åtgärden troligen kunna begränsas till mellan 10 och 20 nätter per år, baserat på publicerade utvärderingar. Se t.ex. studien av Trancart med kollegor (2013) som beskrivs i avsnitt 5.1.

Genomförbarheten av åtgärdsalternativet som omfattar ett reglerbart galler utvärderas inte inom ramarna för detta projekt, men kan vara intressant att titta närmare på i framtiden. Med tanke på den begränsade vinst som förväntas av den föreslagna skonsam drift-åtgärden bör ett alternativ som bygger på effektiviserad fångst och transport förbi samtliga kraftverk övervägas.

Den huvudsakliga kostnaden för skonsam drift utgörs av elproduktionsbortfall. För en grov kostnadsuppskattning kan nämnas att en natts drift (12 timmar) vid Hojums kraftstation under perioden för ålens höstvandring (augusti-oktober) genererar i medeltal ca 1200 MWh. Detta motsvarar alltså den förväntade produktionsförlusten per nattligt turbinstopp, om inte tappning från Vätern kan planeras så att spillet minskas under åtgärdsperioden. Vid sena ändringar, efter inrapporterad produktionsplan, tillkommer även kostnaden för att köpa in motsvarande mängd el från annat håll.

Det aktuella åtgärdsförslaget omfattar inga totala driftsstopp. Beroende på de vattenflöden som råder vid det aktuella tillfället, kan en mindre andel av flödet behöva spillas, vilket medför ett visst produktionsbortfall. Kostnaden för detta åtgärdsförslag kan därför anses relativt låg i sammanhanget.

Vissa ytterligare kostnader tillkommer för varningssystemet. Var dessa kostnader hamnar beror på vilket system som väljs. Baserat på driften på modellering av omvärldsparametrar är kostnaderna mycket små. Ett mer avancerat system medför en investeringskostnad, akustiska kameror kostar från några hundra tusen till en miljon kronor per styck, och mindre kostnader för underhåll och drift.

För att kunna skatta kostnaderna för åtgärden behöver vinsten, i form av antal/andel räddade ålar, undersökas närmare. För detta behöver lämpligt varningssystem utvärderas på plats och teoretisk turbindödlighet verifieras. Denna utvärdering skulle även visa vilken omfattning åtgärdsperioden skulle få på de aktuella lokalerna.

## 7.2 MOTALA STRÖM

### 7.2.1 Ål i Motala ström

Motala ström är det näst högst prioriterade reglerade vattendraget baserat på potentiell ålproduktion i Sverige (Anonymous 2008, Calles et al., 2014). En stor del av produktionen sker i sjöarna Sommen, Roxen och Glan. Men även mindre sjöar längre upp i systemet anses ha potential för ansevärd ålproduktion (Calles & Christiansson, 2012). Vättern däremot lämpar sig mindre bra som uppväxtområde för ål, troligen för att den är kall, näringsfattig och saknar typiska ålhabitat (Håkan Wickström, SLU, muntligen i Calles & Christiansson 2012). Utsättningar av ål sker



i Roxen och Glan. Dessa ålar samlas in vid hästskodammen i Norrköping, som utgör det första hindret för uppströms vandring. Importerad glasål sätts också ut i Stångåsystemet som ansluter till Roxen. Totalt beräknas en teoretisk årlig produktion av 26 ton blankål i Motala ströms avrinningsområde (Calles et al., 2014). Men andelen blankål som på egen hand når havet i nuläget anses försumbar, och kraftverken tros stå för en betydande del av blankålarnas dödlighet (Calles et al., 2014). Dödligheten bland blankål som orsakas av fiske anses ligga på ungefär samma nivåer, sett på Sverige i stort (Dekker 2015). En ökande mängd ål fångas dock för T&T-programmet i Roxen och Glan och släpps i Bråviken ute i havet. År 2011 omfattade T&T-programmet i Motala ström 545 ålar (676 kg) och har sedan ökat successivt. 3788 ålar (4708 kg) sattes ut år 2014 (Dekker, 2015), 3534 ålar (4821 kg) år 2015 och 3749 ålar (5141 kg) år 2016 (Sara Sandberg, Energiforsk, muntligen).

### 7.2.2 Förutsättningar för åtgärd

Tidigare utredningar av fiskars passagemöjligheter i Motala ström har visat på de utmaningar som finns (Calles & Christiansson, 2012, Calles et al., 2014, Östergren et al., 2014). (Se gärna dessa rapporter för detaljerade beskrivningar.) Motala ström avvattnar 3 % av Sveriges yta och har en medel vattenföring på 96 m<sup>3</sup>/s. Linköping och Norrköping tar dricksvatten från Motala Ström.

Blankål från Glan måste passera två kraftverk på sin väg ut till havet, Fiskeby och Holmen (eller Bergsbron/Havet), ål från Roxen måste passera ytterligare två, Älvås och Skärblacka (Figur 11), och ål ännu längre upp i systemet måste passera ännu fler kraftverk. En åtgärd som bygger på fångst och nedströms transport kräver alltså två uppsamlingspunkter för att omfatta både Roxen och Glan. Tidigare åtgärdsförslag föreslår fångstanläggningar vid Älvås och Fiskeby enligt denna princip (Calles et al., 2014).



Figur 12 Översikt för Motala ströms sträckning och vattenkraftverk (röd markering) kring Roxen och Glan, samt ner till Bråviken.

Motala ström är ett markant mindre vattendrag än Göta älv, med ett medelflöde på 96 m<sup>3</sup>/s. Detta innebär att turbiner generellt är mindre och har högre varvtal, vilket i sin tur betyder högre dödlighet för fisk som passerar via turbinerna. Samtliga turbiner är av Kaplantyp eller snarlika konstruktioner med diameter mellan 2,9 och 4,35 m. Modellerad dödlighet vid fullt pådrag (d.v.s. lägsta dödlighet) ligger på 28% för Älvås och Skärblacka, 31% för Fiskeby, 20% för Holmen och 43% för Bergsbron/Havet (Tabell 4, Calles & Christiansson 2012). Högst dödlighet förutspås för Bergsbron/Havet, men denna anläggning körs endast på vatten som spills förbi Holmen. I praktiken betyder det att Bergsbron/Havet nästan uteslutande körs dagtid, då vattendomen säger att ett visst spill (normalt 20 m<sup>3</sup>/s) ska ske genom Norrköping. Eftersom ålen vanligtvis vandrar på natten förväntas få ålar passera genom turbinerna vid Bergsbron/Havet under befintlig driftsplan. Med ökat spill förbi Holmen nattetid skulle dock detta vatten (inkl. medföljande ålar) kunna gå genom i Bergsbron/Havet. Om alla ålar skulle gå genom turbinen vid Bergsbron/Havet förväntas en summerad dödlighet på minst 61% från Glan till havet och 80% från Roxen till havet vid turbinkörning nära fullt pådrag. Med antagandet att alla ålar istället går via Holmen predikteras en summerad dödlighet på minst 45% från Glan till havet och 71% från Roxen till havet vid turbinkörning nära fullt pådrag. Observera att dödligheten ökar avsevärt om turbinerna körs med lägre pådrag (Tabell 4). Flödena vid de aktuella kraftverken i Motala ström styrs av nivån i Roxen respektive Glan. Här finns idag alltså mycket begränsad möjlighet att spara vatten vid turbinstopp. Vattentillgången i Roxen och Glan, i sin tur styrs, av tillrinning från Vättern. Även tappning från Vättern är strängt reglerat, men tillåter små avvikelser och därmed i viss mån möjlighet att hålla på vatten under skonsam drift. Generellt är flödet högt på våren (ca 150 m<sup>3</sup>/s). Tillämpningen av skonsam drift i form av turbinstopp under denna säsong skulle innebära stora volymer spillvatten vilket medför större produktionsförlust och höga flöden genom centrala Norrköping. Denna åtgärd skulle därför vara enklare att genomföra under hösten än våren (kommentar från Holmens driftsledning).

Utskoven vid de aktuella kraftverken i Motala ström anses relativt fiskvänliga, men detta skulle behöva undersökas närmare, gärna kombinerat med en turbindödlighetsstudie, inför en eventuell tillämpning av skonsam drift. Vid Älvås finns två utskov med spetluckor som öppnas helt manuellt. Resonstiden för öppning av dessa luckor är alltså lång och handhavandet besvärligt. Därför utgår dessa som alternativ för fiskpassage i samband med skonsam drift i nuläget. Övriga utskov är konstruerade så att de öppnas genom att hela turbinröret vinklas upp samtidigt som en passage öppnas under (Figur 12). Detta styrs på distans från en driftcentral, vilket för övrigt även gäller Skärblacka och Fiskeby. Flödet genom Älvås utskov och strukturen i och omedelbart nedströms ser relativt skonsam ut.



**Figur 13. Nedströms vy av kraftstationen vid Älvås. Vid detta tillfälle är ingen av turbinerna i drift och vatten spills under de två längst bort.**

Vid Skärblacka finns tre utskov placerade ca 150 m uppströms turbinintaget, i stort sett vinkelrätt mot vattenflödet. I luckorna finns rör som släpper 0,5 m<sup>3</sup>/s dygnet runt på ett relativt fiskvänligt manér (Figur 13). Det är dock få ålar som lyckas hitta och väljer dessa små öppningar för passage vid sidan av en huvudström som går via turbinerna (Östergren et al., 2014). Även spill via luckorna anses kunna användas för fiskpassage, men få ålar väljer denna väg när huvudflödet går via turbinerna. Fallhöjden vid utskoven är lägre än den totala för kraftverket och mynnar i en relativt djup pool. Spillvattnet går via ett omlöp, älvens naturliga fåra, och mynnar sedan i huvudfåran nedströms turbinerna via ett överlöp, som också detta bör vara relativt skonsamt för ålar.

Vid Fiskeby kraftverk finns spillluckor, i form av fjärrstyrda spetluckor, direkt bredvid stationsbyggnaden med turbinerna. Tack vare den låga fallhöjden (2,5 m) spills vattnet med relativt låg strålningshastighet även om öppningen är nära botten. Även här bör alltså spill via luckor fungera för ålpassage. Luckornas placering nära turbinintagen bör underlätta för ålarna att hitta denna alternativa passage även då turbinerna körs. Men studier av detta scenario visar att få individer väljer att gå via spillet, tre av åtta vid 40% spill (Östergren et al., 2014). Delvis spill parallellt med turbinkörning anses därför vara en ineffektiv åtgärd, både vid Fiskeby och andra anläggningar.



Figur 14. Översiktsbild på utskov vid Skärblacka kraftverk (övre panelen) samt detaljbild av rör (nedre panelen) för kontinuerligt spill ( $0,5\text{m}^3/\text{s}$ ) genom omlöp (naturfåran).

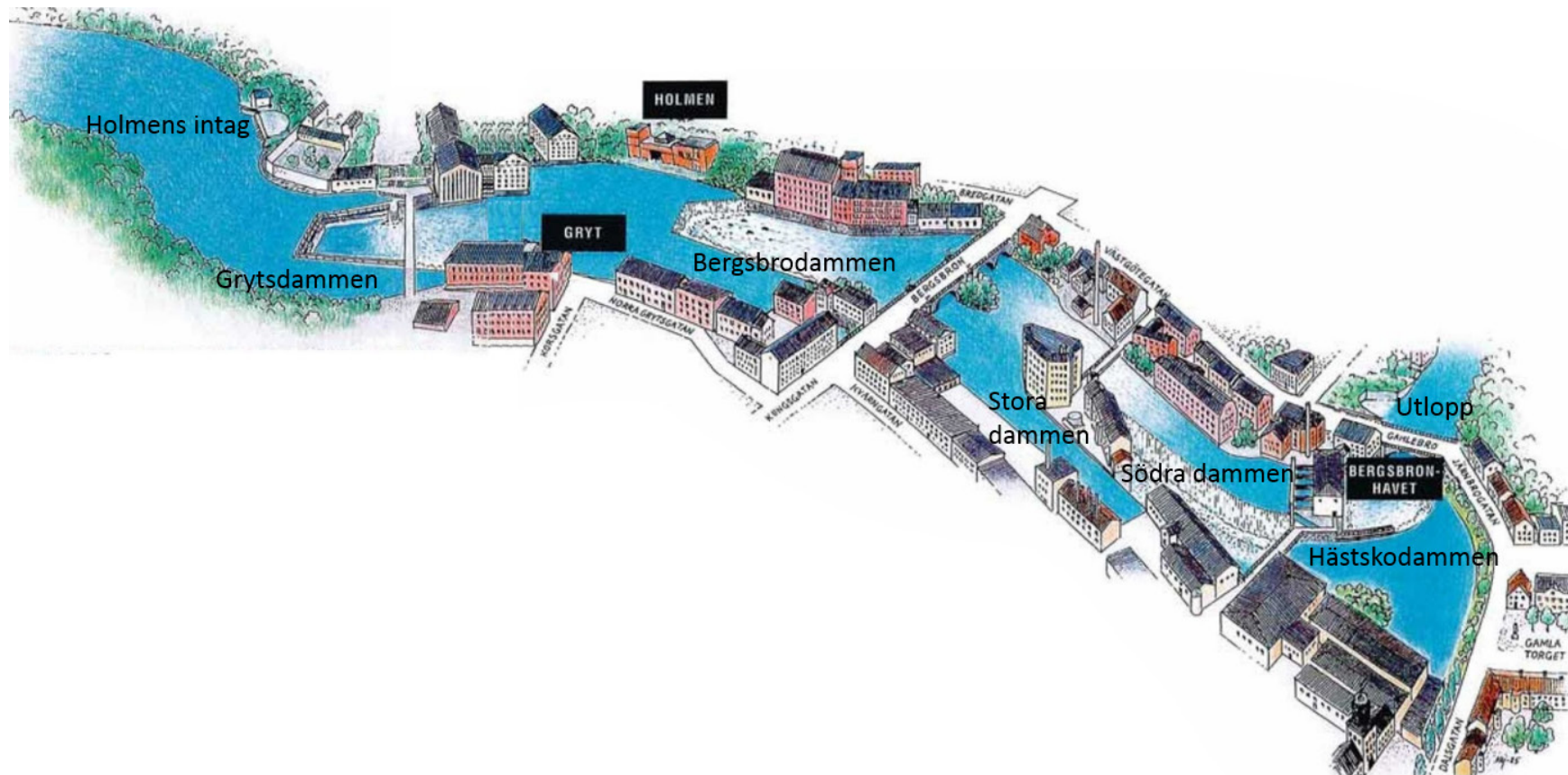
Passagen genom Norrköping innebär ett flertal hinder och vägval (Figur 14 och 15). Från Holmens intag kan vattnet gå via turbinen, eller omledas via en spilllucka parallellt med turbinen inne i tunnelsystemet. Denna lucka används vid akuta driftstopp i turbinen. Tunneln för Holmens kraftverk mynnar nedströms Bergsbron-Havets kraftverk, d.v.s. nedströms det nedersta vandringshindret. Från tunneln mellan Holmens intag och turbiner finns även ett intag till en vattenledning som går till Bravikens pappersbruk. Här går  $0,44\text{--}0,67\text{ m}^3/\text{s}$  kontinuerligt. Ett fåtal ålar hittar denna ingång och tar sig till pappersbruket varje år (Rikard Nilsson, Holmen Energi, muntligen). Vatten som inte tas in i Holmens intag spills via Grytsdammen. Vattnet från Grytsdammen går sedan över Bergsbrodammen eller via luckor i sydöstra änden av denna. Sedan finns två alternativ. Vattnet går antingen genom luckor i Stordammen eller över Södra dammen, alternativt genom Bergsbron-Havets turbin. I östra änden av Södra dammen finns också två luckor, genom vilka vattnet skulle kunna gå mer koncentrerat än via det breda överløpet. Luckan längst österut leder direkt förbi även Hästskodammen och öppnas automatiskt vid höga flöden. Luckan i direkt anslutning till överløpet leder vattnet till samma nivå som överløpet och sköts manuellt. I ett sista steg går vattnet över Hästskodammen, parallellt med kraftverket Bergsbron/Havet. Eftersom vattnet leds genom staden stegvis över dammar eller genom relativt ytliga luckor sker var passage vid låg fallhöjd och strålshastighet. Därmed anses dessa passager vara tämligen skonsamma. Flera av tappningsstegen har alternativa luckor och överløp, därmed kan den mest skonsamma passagen öppnas under ett skonsam drift-scenario. Vid höga flöden öppnas luckor automatiskt för att klara det extra spillet, t.ex. vid Södra dammen och Stordammen.



Holmens kraftverk styrs med så kallad kalenderstyrning. Driftsplanen programmeras då i förväg via en dator på stationen. Det är svårt att momentant lägga om till skonsam drift som svarar på ett larm om ålvandring då det inte finns personal på plats som kan utföra ändringen dygnet runt. Ett nattligt stopp bör alltså planeras och läggas in i planeringen under dagtid. Generellt gäller att produktionsplanen läggs kl. 11 dagen innan. Om man avviker från planerad produktion, t.ex. p.g.a. turbinstopp i samband med skonsam drift, får man köpa sig i balans. Grovt generaliserat innebär en natts turbinstopp under ålens mest troliga vandringsperiod (augusti-oktober) ett produktionsbortfall på 100-140 MWh.



Figur 15. Vattnets väg genom Norrköping. Vid Grytsdammen spills vatten genom luckor av varierande storlek (övre panelen och mittpanel, vänster), sedan går vattnet över Bergsbrodammen (mitten) eller genom luckor i sydöstra änden av denna (mittpanel, höger) och vidare antingen genom luckor i stora dammen (ej på bild) eller över Södra dammen (nedre panelen, vänster), och till sist över Hästskodammen (nedre panelen, höger). Vid höga flöden öppnas en lucka i västra änden av Södra dammen, direkt ner förbi Hästskodammen (skymtas i högra änden av bilden på Hästskodammen)



Figur 16. Översikt vattnets väg genom Norrköping (bild från Holmen Energi)

Tabell 4. Egenskaper för de fyra kraftverken i Motala ströms huvudfåra. Modellerad turbindödlighet enligt Leonardsson (2012), från Calles &amp; Christiansson 2012.

| Parametrar                 | Fiskeby                 |               | Skärbläcka              | Älvås                   | Holmen/Bergsbron        |        | Totalt                  |
|----------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------|-------------------------|
| Galler (mm)                | 111                     |               | 110                     | 110                     | 137 & 128               | 131    | -                       |
| Löphjul                    | S-Kaplan x 2            | Propeller x 3 | Rör-Kaplan x 2          | Rör-Kaplan x 3          | Kaplan                  | Kaplan | -                       |
| RPM                        | 100                     | 100           | 142,5                   | 98                      | 150                     | 187,5  | -                       |
| Ø / (mm)                   | 2900                    | 2900          | 3500                    | 2600                    | 4350                    | 2540   | -                       |
| Q (m3/s) tot               | 34 x 2                  | 34 x 3        | 150                     | 90                      | 150                     | 35     | -                       |
| Fallhöjd (m)               | 2,5                     |               | 9                       | 2,3                     | 18,2                    | 11,6   | -                       |
| Åtgärder*                  | Nej                     | Nej           | Nej                     | Nej                     | Nej                     | Nej    | -                       |
| Dödlighet (ÅFP)            | 70%                     |               | 70%                     | 70%                     | 70%                     |        | 95%                     |
| Obs. Dödlighet             | i.u.                    | i.u.          | i.u.                    | i.u.                    | i.u.                    | i.u.   | i.u.                    |
| Modellerad dödlighet (KTÅ) | 31% (Q <sub>MAX</sub> ) |               | 28% (Q <sub>MAX</sub> ) | 28% (Q <sub>MAX</sub> ) | 24% (Q <sub>MAX</sub> ) |        | 61% (Q <sub>MAX</sub> ) |
| Q <sub>MAX</sub>           | 31%                     | 31%           | 28%                     | 28%                     | 20%                     | 43%    | 73%                     |
| 75% Q <sub>MAX</sub>       | 38%                     | 38%           | 35%                     | 35%                     | 25%                     | 53%    | 82%                     |
| 50% Q <sub>MAX</sub>       | 56%                     | 57%           | 52%                     | 52%                     | 37%                     | 76%    | 94%                     |

\* Trap & Truck pågår Motalaströms huvudproduktions område. Dock inga fiskvårdandeåtgärder för utvandrande ål vid anläggningarna.



### 7.2.3 Förslag på driftsanpassning i Motala ström

Med tanke på den höga dödligheten som förväntas vid turbinpassage från Roxen till Bråviken, även vid full körning, och spillvägarnas sannolika lämplighet för fiskpassage föreslås fullt turbinstopp nattetid kombinerat med spill via de mest lämpliga passagerna som åtgärd för samtliga kraftverk längs denna sträcka. I centrala Norrköping innebär detta turbinstopp och spill vid både Holmen och Bergsbron-havet, antingen via gamla fåran genom staden eller via tunnel i anslutning till Holmens kraftverk genom den lucka som finns parallellt med turbinen. Vatten som spillas förbi Holmen ska alltså även spillas förbi Bergsbron-havet.

Skonsam drift skulle tillämpas antingen kontinuerligt under den period som omfattar blankålens nedströmsvandring (uppskattningsvis augusti till oktober), eller med tidvis omställning med hjälp av ett lämpligt varningssystem, vilket skulle behöva utvärderas inför en ev. tillämpning. Den enklare lösningen av dessa två alternativa styrningar, stopp under hela vandringssäsongen, skulle innebära större kostnad i form av produktionsbortfall, men har fördelen att kunna planeras i förväg.

### 7.2.4 Genomförbarhet

De föreslagna åtgärderna har potential att öka passageöverlevnaden för utvandrande blankål avsevärt. Detta bygger dock på antagandet att passageöverlevnaden är hög i spillvägarna, vilket alltså måste utvärderas inför en eventuell tillämpning. Rent praktiskt finns en del utmaningar i tillämpningen. För att kunna begränsa omfattningen av turbinstopp nattetid krävs ett precist varningssystem. Samtidigt finns en del tröghet i responssystemet som innebär att ett stopp bör planeras senast dagtid samma dag, men helst ytterligare en dag i förväg av kostnadsskäl. Valet av varningssystem är således inte uppenbart. En ytterligare utmaning vad gäller varningssystem kommer av att utvandring sker både från Glan och Roxen (och även längre uppströms). Det är oklart hur utvandring från dessa olika områden sker i förhållande till varandra.

Varningssystem som bygger på observationer av ålens beteende skulle troligen behöva omfatta två system för att täcka sträckorna Roxen-Glan och Glan-Bråviken. Skulle vandringssäsongen visa sig utdragen, kan totalt (kalenderstyrt) turbinstopp innebära stora produktionsbortfall. En möjlig åtgärd som skulle lindra kostnaden för en omfattande stopperiod är att ompröva nuvarande vattendom som dikterar ett spill på 20 m<sup>3</sup>/s genom Norrköping centrum under dagtid t.o.m. 31 september. Om detta spill flyttas till nattetid för att hjälpa ålarnas passage, finns en större möjlighet att köra Holmens kraftverk under dagtid denna period.

Koordinering av driften i de olika kraftverken sker redan idag, eftersom de använder samma vatten. Så olika bolagstillhörighet är inget hinder i denna fråga.

P.g.a. höga flöden under våren skulle en skonsam drift-åtgärd som omfattar totalt turbinstopp troligen endast kunna tillämpas under höstens älvandring.

För att få en uppfattning om kostnader i samband med turbinstopp kan nämnas att en natts elproduktion vid Holmens kraftverk omfattar i storleksordningen 100-140 MWh (grov uppskattning).

## 8 Diskussion och slutsatser

En förutsättning för skonsam drift är att det är möjligt att anpassa driften vid kraftverken så att ålarna kan passera oskadda samtidigt som det behöver komma ansemliga mängder ål, åtminstone vid enstaka tillfällen, för att det skall vara till någon nytta för ålbeståndet. Om denna möjlighet finns behövs information om när ålarna kommer till kraftverken för att veta när det är dags att initiera den skonsamma driften. Ett optimalt varningssystem skall med stor sannolikhet ge besked om när och hur många ålar det finns i närområdet uppströms kraftverket och helst också signalera när mängden ål uppströms har minskat till en nivå när den skonsamma driften kan avbrytas. Varningssystemet skall dessutom helst vara billigt och enkelt att sköta. Syftet med varningssystemet är dels att varna innan ålarna kommer till kraftverket för att möjliggöra omställning till skonsam drift, dels att minimera tiden för den skonsamma driften. Sammanställningen av befintlig information i denna rapport tyder på att inget av de existerande varningssystemen uppfyller alla dessa kriterier. En del system uppnår relativt hög träffsäkerhet vid enskilda lokaler. Behovet av områdesspecifika varningssystem/modeller innebär att utbyggnaden av dessa skulle ta tid eftersom det är nödvändigt att först samla in den information som behövs för att få ett väl fungerande system vid ett kraftverk.

För en del av kraftverken anses det inte vara något alternativ att genomföra totala driftstopp, främst för att passage via spill troligen innebär minst lika stor risk för skada på ålarna som vid passage genom turbinerna. Detta gäller vid de tre kraftverken i Göta älv. Förslaget för skonsam drift vid dessa kraftverk, och då speciellt vid Olidan/Hojum, begränsas till att styra om flödet till de största Kaplan-turbinerna som förväntas orsaka minst skada på ålarna vid passage. Däremot anses det möjligt att införa totala driftstopp vid kraftverken i Motala Ström, om det handlar om en begränsad del av tiden. Vid dessa kraftverk har det dessutom visat sig att passagetiden är förhållandevis kort för merparten av ålarna (Östergren et al. 2014). För att implementera skonsam drift vid dessa kraftverk skulle det därför behövas väl fungerande varningssystem. En nackdel är att det kommer att behövas åtminstone ett varningssystem vid något av kraftverken uppströms Glan och ett strax uppströms Fiskeby eftersom sjön Glan kan ge en betydande fördröjning i vandrigen från Skärblacka till Fiskeby.

Sonarutrustning skulle kunna fungera i Motala Ström eftersom det är ett relativt litet vattendrag. Utrustningens räckvidd borde inte bli något problem om man hittar en lämplig placering. Det krävs dock en hel del handpåläggning i samband med data-analysen vilket kan orsaka eftersläpning i "upptäckten" av ankommande ålar, och därmed också en reduktion av den förväntade positiva effekten av den skonsamma driften. Utveckling av en modell som förutsäger åtminstone de mest intensiva vandringsperioderna skulle troligen vara möjlig, men i dagsläget saknas data om älvvandringen i Motala Ström för att utveckla en sådan modell.

En omställning till skonsam drift där man bedömer att förutsättningarna är lämpliga kommer att ta ganska många år eftersom det krävs en hel del utvecklingsarbete och test av varningssystem för att vara säker på att de fungerar tillfredsställande. Det kommer också att vara en utmaning att införa skonsam drift

nedströms de övre kraftverken som ligger närmast ålarnas uppväxtområden. Eftersom ålarna inte vandrar med samma hastighet kommer de kraftiga vandringsstopparna som orsakas av triggnings från starka miljösignaler att spridas ut i tid och rum ju längre nedströms ålarna kommer i vattendraget. Det blir en stor utmaning att försöka hitta lösningar för att "rädda" dessa ålar med hjälp skonsam drift. Med tanke på att det inte finns tillräcklig kunskap för att lösa hela problemet i dagsläget torde den bästa strategin vara att använda den kunskap vi har kring ålens vandringbeteende för att på ett så effektivt sätt fånga så många vandringsmogna blankålar som möjligt uppströms de översta kraftverken och sedan transportera ned dem. Detta bör inte vara en slutgiltig eller ens långsiktig lösning, men den rättfärdigas i det korta tidsperspektivet på grund av den akuta situationen som ålbeståndet befinner sig i. Det ger lite extra tid som kan användas till att utveckla bättre lösningar på problemet, t ex att successivt byta ut uttjänta turbiner mot mer fiskvänliga varianter som har minst lika hög eller högre verkningsgrad än dagens turbiner.

## 8.1 SLUTSATSER

- Alla varningssystem som testats har visat sig vara platsspecifika. För statistiska modeller innebär det att de behöver anpassas till de miljöförhållanden och ålvandringsbeteenden som råder där modellen skall tillämpas.
- Skonsam drift i form av totala driftstopp anses inte vara en lämplig åtgärd i Göta älv. Spillvägarnas utformning skulle troligen medföra skador i motsvarande storleksordning som turbinpassage. Däremot skulle det vara möjligt att styra om merparten av flödet i Trollhättan från Francisturbinerna i Olidan till de mer fiskvänliga stora Kaplanturbinerna i Hojum under perioder när merparten av ålarna vandrar, vilket innebär perioden augusti-oktober. Denna åtgärd skulle kombineras med skonsam turbindrift i övriga kraftverk i vattendraget.
- I Motala Ström anses det möjligt och lämpligt att införa totala nattliga driftstopp kombinerat med spill vid de berörda kraftverken under ålens vandringsperiod. Omfattningen av stopperperioden skulle kunna begränsas med lämpligt varningssystem. Alternativt skulle kostnaden av en omfattande stopperperiod kunna begränsas genom omprövning av nuvarande vattendom rörande spill genom Norrköping stad.

## 8.2 NÄSTA STEG

Om intresset finns att gå vidare med något av ovannämnda förslag bör ett antal aspekter utredas vidare.

- Tänkbara varningssystem behöver utvärderas specifikt för de aktuella lokalerna. Om flera olika system övervägs, bör deras effektivitet utvärderas parallellt och kontrolleras kvantitativt, exempelvis med ryssjefiske. Vidare utvärdering av akustiska kameror som varningssystem bör omfatta utveckling ny, eller test av befintlig automatiserad detektionsmjukvara. Optimal placering av ett akustiskt kameraövervakningssystem kräver studier av rörelsemönster hos vandrande blankål i naturlig miljö.

- De passagevägar som omfattas i de aktuella åtgärderna behöver utvärderas med hänsyn till skaderisk för ålar. Detta gäller både spillvägar och turbiner, där respektive passagealternativ är aktuellt.

Istället för totalt driftstopp skulle ett alternativ vara att testa olika nivåer på spill parallellt med turbindrift, exempelvis med hjälp av radiomärkta ålar. Det skulle kunna visa sig att ett spill på 25 % eller 50 % attraherar merparten av ålarna. Om man då har möjlighet att istället spilla fler "nätter" skulle totalt fler ålar kunna räddas än om man använder sig av totalt driftstopp. Detta skulle behöva utredas vidare.

Med tanke på de osäkerheter som finns kring ålarnas vandringsmönster, varningssystemets tillförlitlighet, spillvägars lämplighet för ålpassage och inte minst det akuta läget för ålen finns en alternativ väg att gå. Trap & transport är en tillfällig och otillräcklig åtgärd för att rädda blankålen. Men under tiden det arbetas med att fylla de kunskapsluckor som står i vägen för mer permanenta lösningar, kan förbättrade åtgärder, baserade på transport, utvecklas. Fokus bör då ligga på rinnande vatten, möjligheten är här större att fånga en anseelig andel av ålarna, och man vet att dessa ålar är redo för vandring. Utvecklingen av dessa åtgärder skulle även kunna omfatta fasta installationer i anslutning till kraftverk, exempelvis vid Vargön, Älvås och Fiskeby. En satsning på ålfångst i rinnande vatten skulle med fördel kunna kopplas samman med utvärdering av varningssystem, samt ge detaljerad information om vandringsmönster och därmed även agera varningssystem i sig självt.

## 9 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.
- ADAMS, N. S., SMITH, C., PLUMB, J. M., HANSEN, G. S. & BEEMAN, J. W. 2015. An evaluation of fish behavior upstream of the water temperature control tower at Cougar Dam, Oregon, using acoustic cameras, 2013. US Geological Survey.
- AMARAL, S. V., HECKER, G. E. & DIXON, D. A. Designing leading edges of turbine blades to increase fish survival from blade strike. EPRI-DOE, Conference on Environmentally-Enhanced Hydropower Turbines, WA, 2011.
- ANONYMOUS 2008. Förvaltningsplan för ål. Bilaga till regeringsbeslut 2008-12-11 Nr 21 2008-12-09 Jo2008/3901 Jordbruksdepartementet. 62pp.
- ANONYMOUS. 2012. Fischdurchgängigkeit am Main auf rund 150 Fluss-Kilometern. Bayerische Gemeinde Zeitung, 2012-12-10
- ANONYMOUS. 2015. Positive Entwicklung beim Aalschutz an Main und Regnitz. *Der Neue Wiesenbote*, 2015-12-08.
- BALK, L., HÄGERROTH, P.-Å., GUSTAVSSON, H., SIGG, L., ÅKERMAN, G., MUÑOZ, Y. R., HONEYFIELD, D. C., TJÄRNLUND, U., OLIVEIRA, K. & STRÖM, K. 2016. Widespread episodic thiamine deficiency in Northern Hemisphere wildlife. *Scientific Reports*, 6.
- BAU, F., DELIGNE, N., ALRIC, A., GOMES, P., BARAN, P., SAGNES, P. & DROUINEAU, H. 2015. Migration in the fragmented Dronne River. Alas silver eels don't fly like drones! *3rd International Conference on Fish Telemetry*. Halifax, USA.
- BEHRMANN-GODEL, J. & ECKMANN, R. 2003. A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the River Mosel, Germany. *Ecology of Freshwater Fish*, 12, 196-202.
- BERGLUND, I. 2015. Sveriges nationella ålförvaltningsplan - Havs- och vattenmyndighetens analys av behovet att revidera den nationella förvaltningsplanen för ål. Havs- och vattenmyndigheten.
- BESSON, M. L., TRANCART, T., ACOU, A., CHARRIER, F., MAZEL, V., LEGAULT, A. & FEUNTEUN, E. 2016. Disrupted downstream migration behaviour of European silver eels (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river. *Environmental Biology of Fishes*, 99, 779-791.
- BOËTIUS, J. 1967. *Experimental indication of lunar activity in European silver eels, Anguilla anguilla [L.]*.
- BOTHMANN, L. 2016. *Efficient statistical analysis of video and image data*. Dissertation, München, Ludwig-Maximilians-Universität, 2016.

- BOTHMANN, L., WINDMANN, M. & KAUERMANN, G. 2016. Realtime classification of fish in underwater sonar videos. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*.
- BOUBÉE, J. & HARO, A. 2003. Downstream migration and passage technologies for diadromous fishes in the United States and New Zealand: tales from two hemispheres. *Downstream movement of fish in the Murray-Darling Basin, Canberra*, 24-32.
- BOUBÉE, J. A. T. & WILLIAMS, E. K. 2006. Downstream passage of silver eels at a small hydroelectric facility. *Fisheries Management and Ecology*, 13, 165-176.
- BRACKEN, F. S. & LUCAS, M. C. 2013. Potential impacts of small-scale hydroelectric power generation on downstream moving lampreys. *River Research and Applications*, 29, 1073-1081.
- BRUIJS, M. C. & DURIF, C. M. 2009. Silver eel migration and behaviour. *Spawning migration of the European eel*. Springer.
- BRUIJS, M. C. M., POLMAN, H. J. G., AERSEN, G. H. F. M. V., HADDERINGH, R. H., WINTER, H. V. & DEERENBERG, C. M. 2003. Management of silver eel: human impact on downstream migrating eel in the river Meuse: impact assessment of hydroelectric power stations and commercial eel fisheries on the eel population in the river Meuse. Arnhem, The Netherlands: KEMA.
- ČADA, G. F. 2001. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*, 26, 14-23.
- 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*.
- CALLES, O., CHRISTIANSSON, J., ANDERSSON, J.-O., KARLSSON, S., WICKSTRÖM, H. & ÖSTERGREN, J. 2014. Tekniska lösningars tillämpbarhet för förbättrad nedströmspassage för ål. *Elforsk rapport*.
- CALLES, O., OLSSON, I., COMOGLIO, C., KEMP, P., BLUNDEN, L., SCHMITZ, M. & GREENBERG, L. 2010. APPLIED ISSUES: Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea. *Freshwater Biology*, 55, 2167-2180.
- COOK, T., HECKER, G., AMARAL, S., STACY, P., LIN, F. & TAFT, E. 2003. Final Report—Pilot Scale Tests Alden/Concepts NREC Turbine. *Alden Research Lab., Holden, MA*.
- COOK, T., HECKER, G., FAULKNER, H. & JANSEN, W. 1997. Development of a more fish-tolerant turbine runner, advanced hydropower turbine project. Worcester Polytechnic Inst., Holden, MA (United States). Alden Research Lab.; Northern Research and Engineering Corp., Woburn, MA (United States).
- DEBOWSKI, P., BERNAS, R., SKÓRA, M. & MORZUCH, J. 2016. Mortality of silver eel (*Anguilla anguilla*) migrating downstream through a small hydroelectric plant on the Drawa River in northern Poland. *Archives of Polish Fisheries*, 24, 69-75.



- DEKKER, W. 2015. *Assessment of the eel stock in Sweden, spring 2015*.
- DEKKER, W., WICKSTRÖM, H. & SJÖBERG, N. B. 2016. Utvärdering av den svenska ålförvaltningen. *Aqua reports* Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för akvatiska resurser.
- DENG, Z., CARLSON, T. J., DAUBLE, D. D. & PLOSKEY, G. R. 2011. Fish Passage Assessment of an Advanced Hydropower Turbine and Conventional Turbine Using Blade-Strike Modeling. *Energies*, 4, 57.
- DIXON, D. 2011. "Fish Friendly" Hydropower Turbine Development and Deployment. Alden Turbine Preliminary Engineering and Model Testing. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (United States).
- DURIF, C. & 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, C., ELIE, P., GOSSET, C., RIVES, J. & TRAVADE, F. 2002. Behavioral study of downstream migrating eels by radio-telemetry at a small hydroelectric power plant.
- EKLÖV, A. 2012. Ålens vandring förbi tre kraftverk i Rönne å - en förstudie avseende utvandringslösningar. Skånska Energi Vattenkraft AB, Krafttag ål.
- EPRI 2001. Review and documentation of research and technologies on the passage and protection of downstream migrating catadromous eels at hydroelectric facilities. *Final Report to the Electric Power Research Institute*.
- EYLER, S. M. 2014. *Timing and Survival of American Eels Migrating Past Hydroelectric Dams on the Shenandoah River*. WEST VIRGINIA UNIVERSITY.
- EYLER, S. M., WELSH, S. A., SMITH, D. R. & ROCKEY, M. M. 2016. Downstream Passage and Impact of Turbine Shutdowns on Survival of Silver American Eels at Five Hydroelectric Dams on the Shenandoah River. *Transactions of the American Fisheries Society*, 145, 964-976.
- FERC 1999. Final Environmental Impact Statement - Relicensing the Holyoke Hydroelectric Project on the Connecticut River. Federal Energy Regulation Commission, Office of Hydropower licensing.
- GENIVAR ONTARIO INC. 2010. Best management practices: Guide for American Eel and Waterpower in Ontario. Ontario Waterpower Association.
- GOSSET, C., TRAVADE, F., DURIF, C., RIVES, J. & ELIE, P. 2005. Tests of two types of bypass for downstream migration of eels at a small hydroelectric power plant. *River Research and Applications*, 21, 1095-1105.
- HARO, A. 2003. Downstream migration of silver-phase anguillid eels. *Eel Biology*. Springer.
- HARO, A., CASTRO-SANTOS, T. & BOUBÉE, J. 2000. Behavior and passage of silver-phase American eels, *Anguilla rostrata* (LeSueur), at a small hydroelectric facility. *Dana*, 12.

- HOGAN, T. W., CADA, G. F. & AMARAL, S. V. 2014. The status of environmentally enhanced hydropower turbines. *Fisheries*, 39, 164-172.
- IRMSCHER, P. 2016. Eels II: 15 Years of MIGROMAT®: An Early Warning System Protecting Migrant Eels.
- JANSEN, H. M., WINTER, H. V., BRUIJS, M. C. & POLMAN, H. J. 2007. Just go with the flow? Route selection and mortality during downstream migration of silver eels in relation to river discharge. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 64, 1437-1443.
- JENS, G. 1953. Über den lunaren Rhythmus der Blankaalwanderung. *Arch. FischWiss*, 4, 94-110.
- KIBEL, P. & COE, T. 2011. Archimedean Screw risk assessment: strike and delay probabilities. *FISHTEK Consulting, Devon, UK*.
- LAGARRIGUE, T. & FREY, A. 2011. Test for evaluating the injuries suffered by downstream-migrating eels in their transiting through the new spherical discharge ring VLH turbogenerator unit installed on the Moselle river in Frouard. *Report E. CO. GEA for MJ2 Technologies*.
- LANGKAU, M., BALK, H., SCHMIDT, M. & BORCHERDING, J. 2012. Can acoustic shadows identify fish species? A novel application of imaging sonar data. *Fisheries Management and Ecology*, 19, 313-322.
- LARINIER, M. 2008. Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia*, 609, 97-108.
- LARSSON, M. & SPARREVIK, E. 2009. Återskapande av vandringsmöjligheter för havsvandrande fisk - ekologiska effekter och verksamhetspåverkan. Vattenfall AB, Vattenkraft.
- LEONARDSSON, K. 2012. Modellverktyg för beräkning av ålförluster vid vattenkraftverk. *Elforsk rapport*, 12, 36-84.
- MACNAMARA, R. 2012. *Conservation biology of the European eel (Anguilla anguilla) on a hydropower-regulated Irish river*.
- MITCHELL, C. P. & BOUBÉE, J. A. T. 1992. Impacts of Turbine Passage on Downstream Migrating Eels. *New Zealand Freshwater Fisheries Miscellaneous Report No. 112*.
- MONTÉN, E. 1985. *Fisk och turbiner: om fiskars möjligheter att oskadda passera genom kraftverksturbiner*, Vattenfall.
- MUELLER, A.-M., BURWEN, D. L., BOSWELL, K. M. & MULLIGAN, T. 2010. Tail-beat patterns in dual-frequency identification sonar echograms and their potential use for species identification and bioenergetics studies. *Transactions of the American Fisheries Society*, 139, 900-910.
- MUELLER, A.-M., MULLIGAN, T. & WITHLER, P. K. 2008. Classifying sonar images: can a computer-driven process identify eels? *North American Journal of Fisheries Management*, 28, 1876-1886.

- NORDQUIST, S. 2013. Blankålens (*Anguilla anguilla*) val av flyktväg vid passage av ett småskaligt vattenkraftverk.
- O'CONNOR, W. 2015. Monitoring silver eel turbine passage mortalities on the Lower Shannon. Available: [http://ecofact.ie/silver\\_eel\\_turbine\\_passage\\_mortality/](http://ecofact.ie/silver_eel_turbine_passage_mortality/).
- PARMEGGIANI, A., GOVONI, N., ZANNONI, A., DI BIASE, A., SIRRI, R., FORNI, M., MANDELLI, M. & MORDENTI, O. 2015. Effect of photoperiod on endocrine profiles and vitellogenin expression in European eels *Anguilla anguilla* during artificially induced ovarian development. *Theriogenology*, 83, 478-484.
- PETERSSON, T. 2015. Fiskars val av passage förbi ett vattenkraftverk där två alternativ finns tillgängliga.
- PIPER, A. T., MANES, C., SINISCALCHI, F., MARION, A., WRIGHT, R. M. & KEMP, P. S. Response of seaward-migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to manipulated flow fields. *Proc. R. Soc. B*, 2015. The Royal Society, 20151098.
- PRACHEIL, B. M., DEROLPH, C. R., SCHRAMM, M. P. & BEVELHIMER, M. S. 2016. A fish-eye view of riverine hydropower systems: the current understanding of the biological response to turbine passage. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 26, 153-167.
- RECKORDT, M., UBL, C., WAGNER, C., FRANKOWSKI, J. & DOROW, M. 2014. Downstream migration dynamics of female and male silver eels (*Anguilla anguilla* L.) in the regulated German lowland Warnow River. *Ecology of Freshwater Fish*, 23, 7-20.
- RICHKUS, W. A. & DIXON, D. A. 2002. Review of research and technologies on passage and protection of downstream migrating catadromous eels at hydroelectric facilities. *Biology, management, and protection of catadromous eels*, 377.
- RIGHTON, D., WESTERBERG, H., FEUNTEUN, E., ØKLAND, F., GARGAN, P., AMILHAT, E., METCALFE, J., LOBON-CERVIA, J., SJÖBERG, N., SIMON, J., ACOU, A., VEDOR, M., WALKER, A., TRANCART, T., BRÄMICK, U. & AARESTRUP, K. 2016. Empirical observations of the spawning migration of European eels: The long and dangerous road to the Sargasso Sea. *Science Advances*, 2.
- RMD 2012. Presse-Information: Rhein-Main-Donau AG stellt auf rund 150 Fluss-Kilometer Fischdurchgängigkeit am Main her. München.
- RMD 2015. Gemeinsame Presseinformation des Fischereiverbandes Unterfranken, der RMD und Uniper: Positive Entwicklung beim Aalschutz an Main und Regnitz.
- ROMAKKANIEMI, A., LILJA, J., NYKÄNEN, M., MARJOMÄKI, T. J. & JURVELIUS, J. 2000. Spawning run of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) in the River Tornionjoki monitored by horizontal split-beam echosounding. *Aquatic Living Resources*, 13, 349-354.
- SAND, O., ENGER, P. S., KARLSEN, H. E., KNUDSEN, F. & KVERNSTUEN, T. 2000. Avoidance responses to infrasound in downstream migrating European silver eels, *Anguilla anguilla*. *Environmental Biology of Fishes*, 57, 327-336.

SIGSGAARD, E. E., I. B. NIELSEN, H. CARL, M. A. KRAG, S. W. KNUDSEN, Y. C. XING, T. H. HOLM-HANSEN, P. R. MOLLER, AND P. F. THOMSEN. 2017. Seawater environmental DNA reflects seasonality of a coastal fish community. *Marine Biology* **164**.

SHEPARD, S. L. 2015. American eel biological species report. Hadley, Massachusetts: U.S. Fish and Wildlife Service.

SPENS, J., A. R. EVANS, D. HALFMAERTEN, S. W. KNUDSEN, M. E. SENGUPTA, S. S. T. MAK, E. E. SIGSGAARD, AND M. HELLSTROM. 2017. Comparison of capture and storage methods for aqueous microbial eDNA using an optimized extraction protocol: advantage of enclosed filter. *Methods in Ecology and Evolution* **8**:635-645.

STATKRAFT Aalschonendes Betriebsmanagement. *In*: GMBH, S. M. (ed.).

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*.

TELL, P.-E. 2013. Ålens fortlevnad och rent vatten - Rapport från seminariet ÅL 2013 23-24 januari. *Vattenriket i fokus 2013:03*. Ålakademin och Biosfärkontoret Kristianstads Vattenrike.

TELL, P. E. 2012. *Ålens framtid: att bruka eller förbruka ekosystemtjänster : 20 röster om hotet mot ålen*, Biosfärkontoret Kristianstads vattenrike.

THERRIEN, J. & BOURGEOIS, G. 2000. Fish Passage at Small Hydro Sites: Report by Genivar Consulting Group for CANMET Energy Technology Centre, Ottawa. *Fish Passage at Small Hydro Sites: Report by Genivar Consulting Group for CANMET Energy Technology Centre, Ottawa*.

TRANCART, T., ACOU, A., DE OLIVEIRA, E. & FEUNTEUN, E. 2013. Forecasting animal migration using SARIMAX: an efficient means of reducing silver eel mortality caused by turbines. *Endangered Species Research*, **21**, 181-190.

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*, **01**.

WELSH, S., EYLER, S. & SMITH, D. 2014. Migration of silver-phase and yellow-phase American eels in relation to hydroelectric dams on the Shenandoah River. NAES Corporation, PE Hydro Generation, LLC.

WICKSTRÖM, H. 2014. Trap and transport av ål 2013–"Fördjupad kvalitetskontroll".

VOWLES, A. S., KARLSSON, S. P., UZUNOVA, E. P. & KEMP, P. S. 2014. The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish. *Ecological Engineering*, **69**, 151-159.

ÖHRVALL, F. 2007. Samkörning av vindkraft och vattenkraft i Skellefteälven. Elforsk rapport 07:18.

ÖSTERGREN, J., KARLSSON, S., LEONARDSSON, K., ERIKSSON, A., WICKSTRÖM, H. & CALLES, O. 2014. Radiotelemetriundersökning av ålens passage av vattenkraftverk i Motala ström. *Elforsk rapport*.

# SKONSAM DRIFT AV VATTEN- KRAFTVERK VID ÅLVANDRING

Här sammanfattas kunskapsläget kring begreppet skonsam drift och erfarenheter från andra länder. Forskarna har också intervjuat personal på vattenkraftbolag och utvärderat möjligheten att tillämpa den här typen av åtgärder vid kraftverk i de ålproducerande vattendragen i Sverige.

Skonsam drift omfattar åtgärder där driften av vattenkraftverk anpassas under blankålens vandring nedströms för att underlätta en skadefri passage. Vilken åtgärd som väljs avgörs av förutsättningarna vid det aktuella kraftverket.

Resultaten visar att det inte finns en universell driftsmodell som fungerar för alla typer av anläggningar. En av de mest avgörande förutsättningarna för tillämpning av skonsam drift är möjligheten att förutse ålarnas vandring. Det finns ett antal potentiella varningssystem för detta.

## 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](http://www.energiforsk.se)



Energiforsk