



Modellverktyg för beräkning av ålförluster vid vattenkraftverk

Elforsk rapport 12:36



Kjell Leonardsson

Maj 2012

Havs
och Vatten
myndigheten

ELFORSK

Modellverktyg för beräkning av ålförluster vid vattenkraftverk

Elforsk rapport 12:36

Förord

Projektet "Modellverktyg för beräkning av dödlighet för nedströmsvandrande ål" som avrapporteras i och med denna rapport har bedrivits inom ramen för programmet "Krafttag ål". Projektet har genomförts av Kjell Leonardsson, SLU, som också skrivit rapporten. "Krafttag ål" är ett samarbete mellan vattenkraftföretag via Elforsk och Havs- och vattenmyndigheten.

Styrgruppen för programmet:

Erik Sparrevik	Vattenfall AB (ordf.)
Johan Tielman	E.ON Vattenkraft Sverige AB
Marco Blixt	Fortum Generation AB
Jan Lidström	Holmen Energi AB
Ola Palmquist/Katarina Ingvarsson	Tekniska Verken i Linköping AB
Morgan Rubensson	Statkraft Sverige AB
Fredrik Nordwall/Niklas Egriell	Havs- och vattenmyndigheten
Willem Dekker (adjungerad)	SLU-Aqua
Håkan Wickström (adjungerad)	SLU-Aqua
Sara Sandberg (adjungerad)	Elforsk

"Krafttag ål" pågår mellan 2011-2013 och innehåller både konkreta åtgärder samt forskning och -utvecklingsprojekt för ålens bevarande. För att kunna göra kostnadseffektiva åtgärder för lekvandrande ål med koppling till vattenkraft behövs forsknings- och utvecklingsinsatser. Ett viktigt område är att förbättra kunskapen om överlevnad vid passage av olika typer av vattenkraftanläggningar.

Forsknings- och utvecklingsdelen av programmet finansieras av Havs- och vattenmyndigheten och vattenkraftföretagen E.ON Vattenkraft Sverige AB, Fortum Generation AB, , Holmen Energi AB, Karlstads Energi AB, Sollefteåforsen AB, Statkraft Sverige AB, Tekniska Verken i Linköping AB samt Vattenfall Vattenkraft AB.

Stockholm, juni 2012



Sara Sandberg
Programområde Vattenkraft
Elforsk

Sammanfattning

I denna rapport presenteras en modell för att beräkna passageförluster av ål som passerar via vattenkraftverksturbiner. Ett mål med projektet var också att utveckla en modell för att beräkna sannolikheterna för passage via olika passagevägar. På grund av "databrist" har inte någon tillförlitlig parameterisering kunnat göras, för att uppnå generell användbarhet, av en modell som tar hänsyn till alla passageaspekter. Däremot presenteras ett ramverk för den modelltyp som jag anser lämpar sig bäst för ändamålet och i rapporten redovisas ett exempel på tillämpning efter parameterisering med passage- och flödesdata från en treårig fransk studie (Travade *et al.* 2010).

Modellen för att beräkna passageförluster via turbinerna har visat sig ge bra överensstämmelse med empiriska data på ålförluster och det gäller även den version av modellen, en Monte Carlo modell, som endast behöver indata i form av turbin typ och maximalt turbinflöde. Osäkerheten i resultaten minskar om fler av de tekniska uppgifter som behövs i den kompletta modellen finns tillgängliga vid analysen. En applikation med dessa modeller för beräkning av fiskpassageförluster finns tillgänglig på programmets hemsida (www.krafttagal.se).

Med hjälp av Monte Carlo-modellen och indata om turbinerna från Kuhlins kraftverksdatabas (<http://vattenkraft.info/>) redovisas analyser av förväntade passageförluster för kraftverk i många olika vattendrag. Det flödesviktade medelvärdet på de beräknade passageförlusterna i samband med turbinpassage vid 191 vattenkraftverk i Svealand och Götaland uppgick till ca 30 %. Om man räknar bort Dalarnas och Uppsala läns vattendrag (främst Dalälven) blev de flödesviktade passageförlusterna ca 40 %. Om dessutom Göta älv räknas bort blev de flödesviktade medelvärdet ca 50 % per kraftverkspassage. Utan flödesviktning domineras passageförlusterna av kraftverken i de mindre vattendragen och det totala medelvärdet på passagförlusten per kraftverk hamnade mellan 60 och 70 %. Det innebär även att ett stort antal kraftverk förväntas ge passageförluster över 80-90 %. Kunskap om de enskilda kraftverkens passageförluster är därför nödvändiga för att kunna tillämpa en ålförvaltning som bygger på produktions- och förlustberäkningar för de enskilda vattendragen där utsättningar görs.

I de vattendrag där ålutsättningar görs uppströms tre kraftverk krävs att andelen av ålarna som passerar kraftverken via spill uppgår till ca 70 % per kraftverk om de genomsnittliga passageförlusterna via turbinerna uppgår till 80 %, för att nå EU:s mål i ålförvaltningen. Om passageförlusten per kraftverk uppgår till 40 % krävs att minst ca 35 % av ålarna passerar de enskilda kraftverken via spill. Enskilda kraftverk verkar kunna ge sådana förutsättningar, men det stora flertalet tycks vara långt från det målet enligt beräkningarna i denna rapport. Den mest framkomliga vägen för att minska ålförlusterna i de svenska vattendragen tycks därför vara att använda fingaller för att avleda ålarna där endast enstaka kraftverk behöver passeras. Om det finns flera kraftverk framstår fångst och transport som det mest effektiva sättet att minska förlusterna på kort sikt. Det 40-procentiga målet i ålförvaltningen gäller landet som helhet. De stora procentuella ålförlusterna vid många enskilda kraftverk gör det svårt att nå det målet om inte utsättningarna prioriteras till sjösystem där vandringsförlusterna förväntas bli försumbara, som exempelvis i Mälaren.

Summary

In this report a turbine blade strike model for calculation of turbine passage mortality in European silver eel is presented. The project also aimed at developing a model that could also account for alternative passes, but lack of empirical data made a reliable parameterization of such a model impossible to accomplish. However, a framework is presented that is exemplified by parameterization from a three-year eel passage telemetry study by Travade *et al.* (2010).

A simplified version of the blade strike model was developed that allows estimation of fish passage losses based on the maximum turbine load (flow) as the only technical specification of the turbine. However, the uncertainty in the model results decrease when more technical specifications of the turbine is available. The validation of the blade strike model, even the simplified Monte Carlo version, showed good agreement with empirical data on eel losses in turbine passage situations. An interactive application for calculation of fish passage losses is available at the programme's website www.krafttagal.se.

Monte Carlo simulations based on the blade strike model in combination with turbine data from Kuhlén's hydropower database were performed to assess the expected eel losses at hydropower stations in several Swedish rivers. The flow weighted average of the predicted eel passage losses at 191 hydropower stations in southern Sweden amounted to c. 30 % per hydropower station. Discounting the region with one of the largest rivers, River Dalälven, increased the predicted losses to c. 40 %. If also omitting the largest river, Göta älv, the predictions increased to c. 50 %. Applying an arithmetic mean increased the predicted losses even further, to between 60 and 70 %. Consequently many of the single hydropower stations are expected to cause even higher passage losses, over 80-90 %. Therefore, knowledge about the passage losses at specific hydropower stations is necessary when applying an eel-management at the catchment level.

In rivers where eel is stocked upstream three hydropower stations, it was calculated that about 70 % of the eels need to pass via spill or bypasses if the blade strike mortality is 80 % at each single power station, in order to reach the objective of the EU's eel Directive. If the blade strike losses are 40 %, at least 35 % of the eels need to pass via spill or bypasses. A few hydropower stations seem to fulfill these criteria, while the majority seems to be far from these limits according to the calculations in this report.

The most reliable strategy for the management to reduce the losses of eel in the Swedish rivers with a few (one-two) hydropower stations therefore seems to be to apply fine meshed trash racks to lead the eels away from the turbine inlets and towards the bypass. When there are more hydropower stations to pass, trap and transport seems to be the most powerful method to reduce the losses in a short time perspective. The objective of eel management plan is to save at least 40 % of the eels produced in freshwater, in the country as a whole, to reach the sea. The large expected passage losses at most hydropower stations make it difficult to reach the goal unless the stocking is redirected to catchments where migration losses are absent or negligible, as in Lake Mälaren.

Innehåll

1	Bakgrund	8
2	Modeller för skattning av passageförluster via turbiner	10
2.1	Modellparameterisering för Francis och Kaplan turbiner	15
2.2	Validering mot empiriska data.....	17
2.2.1	Ytterdiameter.....	18
2.2.2	Navdiameter (Kaplan)	19
2.2.3	Inloppshöjd (Francis)	20
2.2.4	Varvtal.....	20
2.2.5	Antal turbinblad (skovlar).....	22
2.2.6	Resultat från valideringen av modellen	23
2.3	Betydelsen av varvtal och antal turbinblad för turbinpassageförluster	26
2.4	Skattning av ålförluster vid turbinpassage i svenska kraftverk	29
2.5	Turbinpassageförluster i situationer med fingaller.....	38
3	Alternativa passagevägar	43
3.1	Befintlig kunskapsnivå.....	43
3.2	Preliminära beräkningar av passager via spill från flödesdata	44
3.3	Markovmodell för beräkning av passager via spill och turbin.....	51
3.3.1	Underlag till parameterisering av modellen.....	57
4	Diskussion	59
5	Slutsatser och förslag till prioriteringar i det fortsatta arbetet	63
6	Erkännande	65
7	Litteratur	66
8	Appendix	69
8.1	Osäkerhet vid skattning av β	69
8.2	Osäkerhet vid beräkning av den relativa öppningen till följd av mätfel i β	72
8.3	Monte Carlo-beräkningar för 151 kraftverk i Götaland och Svealand – Francisturbiner	74
8.4	Monte Carlo-beräkningar för 151 kraftverk i Götaland och Svealand – Kaplanturbiner	79

1 Bakgrund

Ålbeståndet har minskat avsevärt under de senaste årtiondena, vilket återspeglas i den kraftigt minskade mängden unga ålar sedan 1980-talet och minskningen märks i alla Europas kustländer (Dekker *et al.* 2011). Man har hittills inte lyckats hitta någon enkel förklaring till den drastiska minskningen av beståndet. Fiske efter glasål och blankål har bidragit och bidrar fortfarande till dödligheten. Samtidigt har tillgängligheten till uppväxtområden i sötvatten minskat över tiden till följd av kraftverks- och dammbyggnationer. Till följd av denna minskning beslutade EU år 2007 om en återhämtningsplan för ålen (EG 1100/2007); "Målet för varje förvaltningsplan för ål skall vara att minska den antropogena mortaliteten så att minst 40 % av biomassan av blankål med stor sannolikhet tar sig ut i havet, i förhållande till den bästa uppskattningen av utvandring som skulle ha funnits om inte antropogena faktorer hade påverkat beståndet. Förvaltningsplanen för ål skall utarbetas med syftet att detta mål på lång sikt skall uppnås". Utifrån EU-förordningen införde Sverige en nationell förvaltningsplan 2009. Ett flertal åtgärder har vidtagits i Sverige för att försöka nå 40-procentsmålet. En åtgärd som genomförts är att ålfisket reducerats med ca 50 % samtidigt som mer än 2 miljoner ålyngel sätts ut i sötvatten, företrädesvis i sjöar och vattendrag där utvandringsförlusterna förväntas vara små. Dessutom är ambitionen i ålförvaltningsplanen att vandringsförlusterna vid kraftverkspassager skall minskas. Ett exempel på åtgärd som syftar till att förbättra passageöverlevnaden förbi kraftverk är att använda fingaller vid kraftverken som skall hindra den nedströmsvandrande ålen att passera via turbinerna. Försök med justering av fingaller för att minska dödligheten för ål har framgångsrikt genomförts i Ätran (Calles & Bergdahl 2009). Den optimala designen för den typen av avledning är troligen platsspecifik och anpassningar kan därför behöva göras för att successivt förbättra avledningen.

Med tanke på att de lokala "ålbestånden" varierar i storlek mellan olika vattendrag bör det vara rimligt att man gör större insatser för att rädda bestånden där de största absoluta förlusterna förväntas. I dagsläget finns det dock ingen enkel och tillförlitlig metod för att bedöma passageförlusterna förbi olika typer av kraftverk i olika miljöer. Inom den svenska ålförvaltningen används idag en konstant förlustsiffra på 70 % oberoende av hur stort kraftverket är eller hur förhållandena i alternativa passagevägar ser ut, om sådana finns. Målet med detta projekt har därför varit att utveckla en modell som kan användas för att bedöma vandringsförluster av ål vid olika typer av kraftverksanläggningar. Modellen skall kunna användas för att ge underlag till prioritering av åtgärder för nedströmsvandrande ål. Eftersom en komplett passagemodell består av flera komponenter, fiskens val mellan alternativa passager samt överlevnaden i var och en av dem har jag valt att analysera varje komponent för sig innan jag formulerar den slutgiltiga modellen. Tyngdpunkten i denna rapport ligger på en modell för att skatta förlusterna för de ålar som passerar via turbinerna. Resultat från den modellen ger i sig mycket information om vad som kan tänkas återstå att undersöka eller åtgärda för att kunna uppnå 40 % målet.

Jag börjar med en analys av befintliga modeller för överlevnad via turbinpassage för att se vilken variant som ger en rimlig kompromiss mellan användbarhet och tillförlitlighet. Jag parameteriserar turbinpassagemodellen för ål i största möjliga utsträckning då det finns en hel del empiriska data om ål i Montén (1985). Med parameterisering avses här att konstanter i de matematiska funktionerna tilldelas numeriska värden som ger den bästa överensstämmelsen mellan modellens beräknade värden och observerade data. I det andra avsnittet presenterar jag studier som kan ligga till grund för en modellformulering för skattning av val av passageväg, via spill/bypass alternativt via turbinerna. Jag avslutar rapporten med en diskussion där jag gör reflektioner kring de erfarenheter jag samlat på mig i samband med detta arbete. Jag ger även förslag till ett standardiserat protokoll som lämpligen används i samband med framtida ålpassagestudier för att resultaten i mesta möjliga mån skall kunna användas till att förbättra parameteriseringen av de modeller som föreslås i rapporten.

2 Modeller för skattning av passageförluster via turbiner

Av de explicita modeller jag hittat i litteraturen (von Raben 1957, Montén 1985, Bell 1991, Turnpenny *et al.* 2000, Pavlov *et al.* 2002, Ploskey & Carlson 2004, Deng, *et al.* 2007, Ferguson *et al.* 2008, Deng, *et al.* 2011) går samtliga att härleda till samma matematiska form, dvs de är att betrakta som samma modell. Den ekvation som numera används vid beräkning av sannolikhet för en fisk att träffas av ett eller flera turbinblad vid passagen genom en Kaplan eller Francisturbin är den som publicerades av von Raben (1957). Han och senare Montén (1985) gjorde även fullskaliga experiment för att undersöka dödlighet för bland annat ål som passerar turbiner. Det bör noteras att denna modell tar endast hänsyn till mekaniska skador på fisken. Skador som uppkommer på grund av snabba tryckförändringar, kavitation och skjuvning hanteras inte av modellen. Den förstnämnda torde inte vara vanlig i södra Sverige eftersom det sällan handlar om stora fallhöjder. Kavitation torde vara ovanlig eftersom den ger kostsamma skador på turbinbladen, vilket rimligen undviks genom att anpassa belastningen på turbinen därefter. Skjuvningsskador (som uppkommer till följd av snabba förändringar i vattnets krafter i samband med eller strax efter turbinpassagen) kan däremot förekomma men är svåra att beräkna och de skador som uppkommer på fisken är svåra att skilja från de mekaniska skadorna.

Modellen bygger på att fisken måste hinna passera emellan två närsittande turbinblad i det tidsfönster som uppstår när turbinbladen sveper runt för att undgå att träffas av turbinbladen. Ju snabbare rotation och ju kortare avstånd mellan turbinbladen desto kortare tidsfönster och desto större sannolikhet att en passerande fisk träffas av något av bladen. Strömhastigheten via turbinen bidrar då till att skapa en teoretisk "vattenlängd" inom detta tidsfönster. Montén (1985) använde begreppet relativ öppning istället för "vattenlängd" och använde symbolen s . Jag väljer att använda mig av Monténs beteckningar i denna rapport. von Rabens ekvation har på senare tid förenklats till den form (Bell 1991) som nu används (ekvation 1).

$$P = \frac{\text{Fiskens längd}}{\text{Relativ öppning}} = \frac{n \cdot N}{60} \cdot \frac{l \cdot \cos \theta}{V_{\text{axial}}}, \quad \text{ekvation 1}$$

där P anger sannolikheten att en fisk träffas av ett eller flera turbinblad vid passage genom turbinen, n är antalet rotorblad, N är varvtalet (varv per minut), l är fiskens längd i cm, θ är den relativa inloppsvinkeln mellan V_{axial} och den absoluta hastigheten (se Figur 1) och V_{axial} är den axiala inflödes hastigheten. Samtliga symboler finns angivna och förklarade i tabell 1. Den relativa öppningens storlek beräknas enligt:

$$s = \text{relativ öppning} = \frac{60 \cdot V_{axial}}{n \cdot N \cdot \cos \theta}.$$

ekvation 2

Det kan vara av intresse att notera att Montén valde att beräkna den relativa öppningen med hjälp av formeln: $s = \text{Turbinbladsavstånd} \cdot \sin(\beta)$, där β är den relativa strömriktningen vilket motsvarar turbinbladsvinkeln (Tabell 1). Den formeln ter sig mycket enklare än ekvation 2, och skall egentligen ge samma resultat. Ett litet problem med Monténs formulering är att slutresultatet tycks vara känsligare för mätfel i β än vad känsligheten för β är i ekvation 2 där β ingår i beräkningen av θ (se faktaruta 1). I Appendix (8.1) görs en jämförelse mellan de relativa felen från de båda formlerna baserade på Monténs (1985) turbinspecifikationer och åldata.

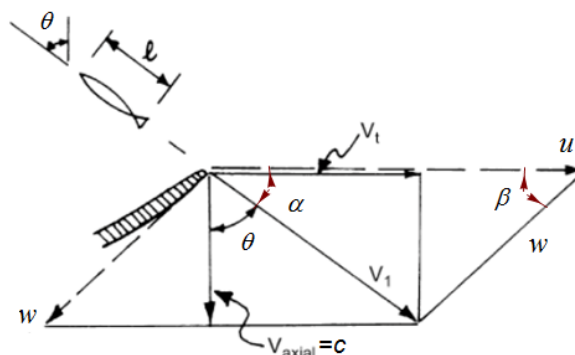
Den observerade skadefrekvensen vid turbinpassage är vanligen lägre än vad som predikteras av ekvation 1, något som redan von Raben (1957) observerade. Han argumenterade för att fisken inte är känslig för träffar på alla delar av kroppen och föreslog därför en justeringsfaktor på 0.43 för bättre överensstämmelse med förlustsiffrorna. Resultaten från Monténs betydligt mer omfattande försök med smolt och ål visade på en variation i förlusterna som antydde att en enda konstant inte skulle förklara all variation. Montén använde ett intervall mellan 0.46 och 0.57 inom vilka de flesta observationerna samlades. Han noterade också liksom von Raben att förlusterna minskade vid låga relativa strömhastigheter i turbinen, troligen på grund av att en träff av turbinbladen vid låga hastigheter inte orsakar någon större skada på fisken. Turnpenny *et al.* (1997, 2000) gjorde också omfattande försök för att närmare studera förlusterna vid turbinpassage. De fann ett storleksberoende, utöver det som ingår i ekvation 1, i förlusterna som i kombination med träffsannolikheten gav en mer rättvisande bild av de förluster man observerade i samband med fiskarnas passage via turbiner jämfört med att multiplicera med en konstant. Ytterligare försök med fisk har gjorts utöver de arbeten som redovisats här, men i det stora hela visar de redovisade resultaten kunskapsläget idag. Vid val av förlustmodell för turbinpassagen skulle Turnpenny's *et al.* (2000) modell varit att föredra med tanke på den gedigna parameteriseringen. Dock gäller deras modell (STRIKER 2000, Excel 97) endast små fiskar, $L \leq 22$ cm vilket inte gör modellen tillförlitlig att applicera på ål, som vanligen är betydligt längre än så i samband med nedströmsvandringen. I det läget återstår att göra en utförlig analys av Monténs åldata för att parameterisera av en mer komplett modell än den som Montén redovisade och som skattar skadefrekvens av ålar som passerar via Francis- eller Kaplan-turbiner.

Montén argumenterade för att den relativa hastigheten och belastningen på turbinerna påverkade överlevnaden vid passage så att en korrektion av den enkla träffsannolikhetsekvationen skulle vara nödvändig. De två kompletterande funktioner jag valt att anpassa till Monténs åldata är en logistisk funktion som justerar skadans omfattning så att en träff vid låga relativa hastigheter blir i det närmaste ofarlig för fisken medan en träff vid höga hastigheter blir letal. Den andra funktionen utgörs av ett andragradspolynom som en funktion av belastningen. Montén menade att den lägsta träffsannolikheten torde vara vid optimal verkningsgrad i turbinen, vilket vanligen inträffar inom intervallet 60-85 % belastning. Ökningen av

träffsannolikheten vid lägre belastningar skulle bero på ökad turbulens i strömningen genom turbinen. Genom att multiplicera dessa två funktioner med ekvation 1 får vi en funktion som borde ge en bättre skattning av passageförlusterna för ål. Skagerstrand (2008) använde ett sådant angreppssätt för att utvärdera förväntade ålförluster vid Torsebro kraftstation i Helge å. Skagerstrands anpassning av modellen till Torsebro är inte helt enkel att använda i andra sammanhang eftersom inga matematiska funktioner eller parametrar från parameteriseringen angavs i rapporten. I denna rapport har jag därför valt att utföra en parameterisering av dessa två funktioner liksom en justering av Monténs konstant på 0.5 med hjälp av data om turbinerna och skadefrekvensen på ålarna som återfinns i Montén (1985). En parameterisering som gjorts på data från många olika turbiner kan ge något missvisande resultat för enskilda turbiner men i gengäld gör det modellen mer tillförlitlig överlag när man applicerar den på data från andra turbiner och noggrannheten är viktigare än precisionen i detta sammanhang, för att minimera avvikelser på grund av systematiska fel. I de fall nya passageförsök med ål görs, kan resultaten med fördel användas för att förbättra parameteriseringen av den modell som presenteras i den här rapporten.

Tabell 1. Symboler och beteckningar som används i denna rapport. Notera att vektorer generellt betecknas med fet stil.

Symbol	Enhet	Förklaring	Monténs symboler
V_{axial}	m/s	Inflödeshastighet	c
V_1	m/s	Absolut hastighet	V_1
V_t	m/s	Tangentiell hastighet	V_t
u	m/s	Bladens perifera hastighet	u
w	m/s	Relativ hastighet	w
θ	°	Vinkeln mellan vektorerna V_{axial} och V_1	
α	°	Inflödesvinkel, $\alpha = 90^\circ - \theta$	α
β	°	Den relativa strömriktningen, motsvarar turbinbladsvinkeln	β
n	antal	Antal rotor(skovel)blad	z
N	Varv/min	Turbinens varvtal	n
D_Y	m	Diameter mellan turbinbladens ytterkant (periferi), löphjulsdiameter	$D_{periferi}$
D_I	m	Navets diameter (Kaplan)	D_{nav}
H_F	m	Inloppshöjd till Francisturbinen	
Q	m ³ /s	Flöde genom turbinen	Q
Q_{max}	m ³ /s	Maximalt turbinflöde, slukförmåga	$Q_{1/1}$
l	cm	Fiskens längd	l
s	cm	Den relativa öppningen, teoretisk maxlängd på fisk som kan passera oskadd	s
L	%	Belastning, pådrag i procent av maximal kapacitet (Q_{max})	



Figur 1. Parallelogram med hastighetsvektorer och vinklar som används vid beräkning av den relativa öppningen (s) (omritad från Bell 1991). Förklaringar till symbolerna återfinns i tabell 1. V_{axial} och u kan beräknas med hjälp av turbinens ytter- och innerdiameter (Kaplan), inloppshöjd (Francis), varvtal samt inflöde. Däremot måste vinkeln β mätas upp eller beräknas från tekniska data för den specifika turbinen. En skattning av β kan erhållas via ekvation 18 och ekvation 19 i Appendix 1. Om man känner V_{axial} , u och β kan resterande vinklar och hastigheter beräknas.

FAKTARUTA

FLÖDESVINKLAR OCH VEKTORER

För att kunna beräkna sannolikheten för en fisk att träffas av något av turbinbladen via en turbinpassage behöver man veta ett antal strömhastigheter (vektorer), dess vinklar samt rotorbladens vinkling. Den absoluta strömhastigheten, V_1 , kan delas upp i en vertikal, V_{axial} , och en tangentiell (horisontell) komponent, V_t (Figur 1). Vinkeln θ motsvarar vinkeln mellan hastighetsvektorerne V_1 och V_{axial} . För Francisturbiner används benämningen V_{radial} istället för V_{axial} . Montén (1985) använde egentligen inte vinkeln θ i sina beräkningar av den relativa öppningens storlek. Han använde istället komplementvinkeln α , $\alpha=90-\theta$. Den relativa öppningens storlek motsvarar den största längd på en fisk som teoretiskt skulle kunna passera mellan turbinbladen utan att träffas. Han använde dessutom benämningen inflödes hastighet med beteckningen c istället för V_{axial} . V_{axial} kan beräknas utifrån kännedom om turbinens ytterdiameter (m) och det aktuella inflödet (m^3/s). För Kaplanturbiner behöver man dessutom måttet på navdiametern medan man för Francisturbinen behöver uppgift om inloppshöjden i meter.

$$V_{axial} = \frac{4Q}{\pi(D_Y^2 - D_I^2)}, \quad (\text{Kaplan})$$

$$V_{axial} = \frac{Q}{\pi \cdot D_Y \cdot H_F}, \quad (\text{Francis})$$

För beräkning av vinkeln θ behövs ytterligare information. I den beräkningen behövs skovelhastigheten (u) och den relativa inflödesvinkeln (turbinbladens vinkel), β , vid det aktuella flödet. Om uppgift om den aktuella vinkeln saknas eller inte kan mätas upp kan man för fiskförlostberäkningar skatta den (och dess osäkerhet) hjälpligt med hjälp av funktioner som anges i Appendix 1. I mesta möjliga mån bör man dock försöka få fram de verkliga värdena på β . Numeriska värden på β kan finnas dokumenterade av tillverkaren i de tekniska specifikationerna för turbinen från utprovningen vid olika belastningar. Turbinbladshastigheten beräknas enligt:

$$u = \frac{\pi \cdot (\text{Ytterdiameter} + \text{Innerdiameter})}{2} \cdot \frac{\text{Varvtal}}{60} \quad (\text{Kaplan})$$

$$u = \pi \cdot \text{Ytterdiameter} \cdot \frac{\text{Varvtal}}{60} \quad (\text{Francis})$$

Parallelogrammet i figuren ovan utgörs av två vektorer; skovelbladens hastighet (u) och den relativa hastigheten (w). Summan av dessa två vektorer ger, liksom för V_{axial} och V_t , den absoluta strömhastigheten (V_1). Den relativa hastigheten behövs egentligen inte för beräkningen av träffsannolikheten, men den har visat sig vara användbar för att korrigera fiskens överlevnad efter träff av ett turbinblad speciellt när den relativa hastigheten är låg (<4 m/s). θ och w beräknas enligt:

$$\theta^\circ = \text{ArcTan} \left(\frac{u \cdot \frac{V_{axial}}{\tan(\beta^\circ)}}{V_{axial}} \right) \cdot \frac{360}{2\pi}$$

$$w = \frac{V_{axial}}{\sin(\beta^\circ)}$$

För mer detaljerad beskrivning av Kaplan- och Francisturbinernas egenskaper och utformning, se Montén (1985).

2.1 Modellparameterisering för Francis och Kaplan turbiner

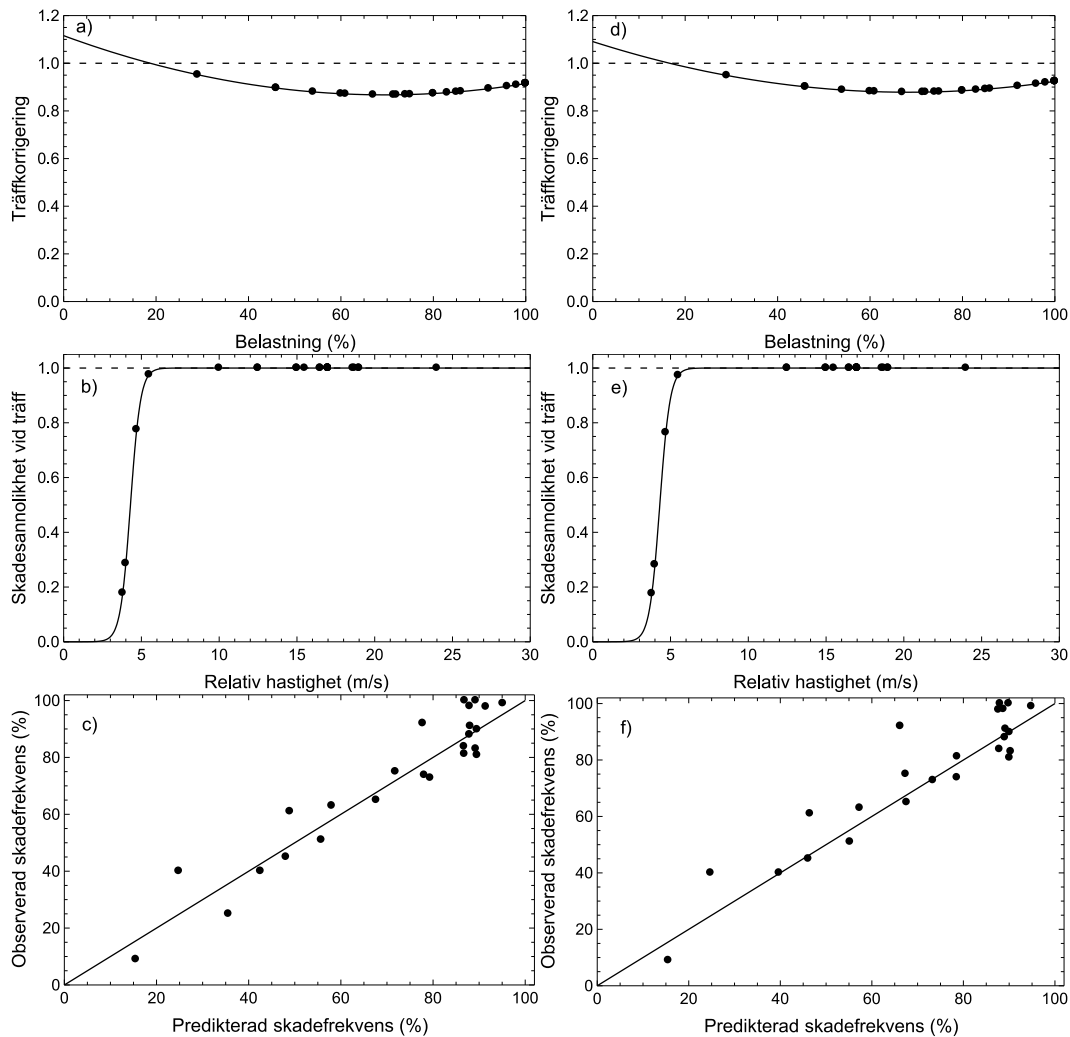
Den utökade modellen för skattning av förluster av ål som passerar via Francis- eller Kaplanturbiner består av tre komponenter: 1) träffsannolikhet, 2) träffkorrigerings med hjälp av belastning (pådrag) på turbinen, och 3) justering av förlustsiffror med hjälp av den relativa hastigheten genom turbinen.

Funktionen för träffsannolikheten är den som anges i ekvation 1, men multiplicerat med en konstant, som i grundutförande borde vara 0.5 enligt Montén. Däremot har empiriska resultat som nämnt ovan visat att denna konstant kan variera mellan ca 0.43 och 0.57 beroende på omständigheterna. I praktiken torde variationen vara större än så, men genom att ta hänsyn till den relativa hastigheten och pådraget i en och samma modell kommer denna konstant att få en annan innebörd än i Monténs rapport. Vid anpassning av dessa tre modellkomponenter till Monténs åldata erhöles en något bättre anpassning med Monténs egen beräkningsmodell för den relativa öppningen jämfört med ekvation 1 (Figur 2 c och f). Utvärderingen i denna rapport har dock visat (Appendix 1) att ekvation 1 är att föredra på grund av den lägre känsligheten för mätfel i β vid beräkningen av den relativa öppningen jämfört med känsligheten i Monténs formel. Dessutom kan ytterligare mätfel introduceras i Monténs beräkningsmodell eftersom den innehåller en parameter för avståndet mellan turbinbladen.

För fullständighetens skull redovisas resultaten av båda modellernas parameterisering (Tabell 2). Modellanpassningarna visas grafiskt i Figur 2 där även formen på kurvorna för träffkorrigerings och justering av förlustnivå visas. Anpassningen av dessa kurvor stämmer väl överens med Monténs beskrivning av hur dessa processer kan tänkas påverka den slutgiltiga förlusten vid passage genom en turbin. Anpassningen till data är inte perfekt, men modellen fångar upp den största delen av variationen och den felbedömning som den här delen av den slutgiltiga modellen kan leda till torde vara liten jämfört med de sannolikhetsberäkningar som återstår för att avgöra hur stor andel av ålarna som passerar via turbinerna jämfört med de som passerar via alternativa passager.

Tabell 2. Formulering av de tre modellkomponenterna och den sammansatta modellen för att beräkna passageförluster av ål. Parameteriseringen har utförts med empiriska data på turbinuppgifter och observerade förluster av ål från Montén (1985). Som ett mått på modellanpassning vid parameteriseringen minimerades summan av residualkvadraterna (KS) med viktning för antalet ålar i respektive försöksomgång. Anpassningen av ekvation 6 resulterade i $KS=35\,415$ ($n=24$ omgångar med totalt 658 ålar) och motsvarande värde för ekvation 10 blev $KS=31\,354$ ($n=25$ omgångar med totalt 688 ålar). Notera att det saknades uppgifter för att kunna använda ekvation 6 för ett av experimenten.

Modellkomponent	Formel	Ekv. nr.
Träffsannolikhet	$P(l) = \text{Min}\left(0.432 \cdot \frac{n \cdot N}{60} \cdot \frac{l \cdot \cos \theta}{V_{axial}}, 1\right)$	ekvation 3
Träffkorrigering med hjälp av belastning (pådrag, L) på turbinen.	$P_{tk}(L) = 1.09 - 0.00622 \cdot L + 0.0000455 \cdot L^2$	ekvation 4
Justering av förlustnivå med hjälp av den relativa hastigheten (w).	$P_{fk}(w) = \frac{1}{1 + e^{13.0 - 3.01 \cdot w}}$	ekvation 5
Komplett modell	$P_T(l, L, w) = \text{Min}(P(l) \cdot P_t(L) \cdot P_f(w), 1)$	ekvation 6
Motsvarande komponenter men med parameterisering för Monténs formulering av $P(l)$		
Träffsannolikhet	$P_{Montén}(l) = \text{Min}\left(0.48 \frac{l}{s}, 1\right)$	ekvation 7
Träffkorrigering med hjälp av belastning (pådrag, L) på turbinen.	$P_{tk}(L) = 1.12 - 0.0071 \cdot L + 0.0000513 \cdot L^2$	ekvation 8
Justering av förlustnivå med hjälp av den relativa hastigheten (w).	$P_{fk}(w) = \frac{1}{1 + e^{13.2 - 3.07 \cdot w}}$	ekvation 9
Komplett modell	$P_T(l, L, w) = \text{Min}(P_{Montén}(l) \cdot P_t(L) \cdot P_f(w), 1)$	ekvation 10



Figur 2. Jämförelse i anpassning av skadefrekvensmodell med Monténs beräkning av den relativa öppningen s (c) jämfört med ekvation 1 (f). Båda modellerna multiplicerades med korrigering för belastningsgraden (a) och d)) och den relativa hastigheten (b) och e)). Data från Monten (1985) användes vid anpassningen. De fyllda cirklarna i a-b) och d-e) anger vilka belastningar respektive relativa hastigheter som förekom i underlagsdata.

2.2 Validering mot empiriska data

Överensstämmelsen mellan modellberäkningarna och de observerade ålförlusterna i Monténs data kan inte användas för att validera modellen eftersom Monténs data användes för att parameterisera modellen. Det finns några olika dataset att använda för validering och ett av dem är en sammanställning som Travade och Larinier (2011) gjorde av dödlighet för ål vid turbinpassage i relation till turbinernas varvtal. De redovisade resultat från 70 olika experiment, varav 27 torde ha utgjorts av Monténs data. För valideringsändamål bör den mindre andelen som utgörs av Monténs data inte störa alltför mycket. Det finns också resultat från ett försök med ål som genomfördes vid Ätrafors 2007 (Calles *et al.* 2010). Även om det bara utgör

en observation på förluster är det värt att se hur modellresultatet överensstämmer med resultatet från den studien. Det finns sannolikt mer data som skulle kunna användas till validering, men möjligheten att få tag på ytterligare data under projektperioden har varit begränsad.

Valideringen med ovanstående modell gjordes genom att använda formlerna ovan och slumpa ut ingångsvärden i Monte Carlo-simuleringar (MC-simuleringar) för de olika variablerna från de samband som gick att finna i Monténs data. I en MC-simulering slumpas värden från kända fördelningar eller samband. I ett första steg var det därför nödvändigt att försöka identifiera så tillförlitliga samband som möjligt med en oberoende variabel som är förknippad med turbinen och som enkelt kan identifieras för varje turbin. Den variabel som uppfyller ett sådant kriterium och som i mesta möjliga mån gav samband som kunde återges utan någon större osäkerhet var $Q_{\max}$, dvs. flödet via turbinen vid maximal belastning. För att få en uppfattning om osäkerheten i sambanden mellan de olika variablerna och $Q_{\max}$ redovisar jag dem var och en för sig i de följande avsnitten, för skattning och osäkerhet i turbinbladsvinkeln β , se Appendix 1. Jag har inkluderat de data jag haft tillgängliga vid framtagande av dessa samband och det är framförallt Monténs (1985) data samt data från den sammanställning som Calles & Christiansson (2012) gjort. Totalt ingår 101 turbinspecifikationer i dataunderlaget, varav 47 utgörs av Francisturbiner och 54 av Kaplanturbiner. Specifikation på inloppshöjd i Francisturbinerna och navdiameter i Kaplanturbiner har endast varit tillgängligt i Monténs data.

2.2.1 Ytterdiameter

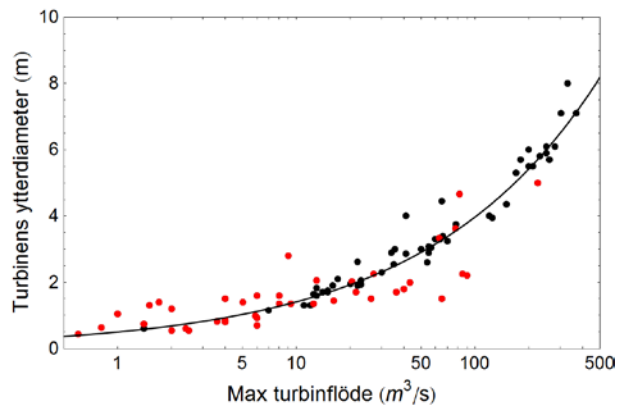
Kaplan- och Francisturbinernas ytterdiameter i Monténs data uppvisar en gemensam trend i relation till $Q_{\max}$ (Figur 3). Förklaringsgraden för det gemensamma sambandet är högt (97 %), men spridningen kring linjen var större för Francisturbiner än för Kaplanturbiner. Av den anledningen presenteras sambanden var för sig, för att inte skapa onödigt stor osäkerhet i MC-simuleringarna av Kaplanturbinerna. Regressionsekvationerna används var för sig i MC-simuleringar tillsammans med den osäkerhet som är förknippad med regressionerna (ekvation 11 och ekvation 12). Med det tillvägagångssättet torde MC-simuleringarna ge användbara resultat även för andra Francis och Kaplanturbiner än de som användes i dessa regressioner. Förklaringsgraden i regressionsekvationen för Kaplanturbinerna uppgick till 99 % (r^2_{adjusted}), medan den blev något lägre för Francisturbiner; $r^2_{\text{adjusted}}=91$ %.

$$Ytterdiameter(Kaplan) = 0.541 \cdot Q_{\max}^{0.440} \cdot Rnd(\sim N(1, 0.1)) \quad \text{ekvation 11}$$

$$Ytterdiameter(Francis) = 0.634 \cdot Q_{\max}^{0.354} \cdot Rnd(\sim N(1, 0.2)) \quad \text{ekvation 12}$$

I ekvation 11 och ekvation 12 anges både regressionsekvationerna och de tillhörande osäkerheterna som slumpas från normalfördelningar med medelvärde 1 och den angivna standardavvikelsen. Beteckningen $\sim N(1, 0.1)$ avser en normalfördelning med medelvärde 1 och standardavvikelsen 0.1.

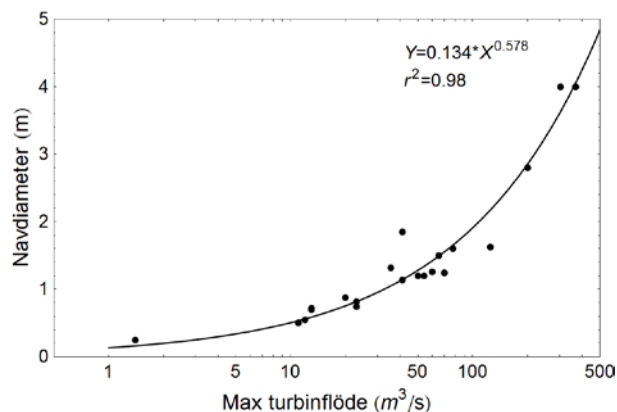
Den minsta ytterdiameter som tillåts i MC-simuleringarna är 0.44 m, vilket valts utifrån de specifikationer som funnits tillgängliga. Det torde vara få turbiner i de svenska vattendragen som underskrider den ytterdiameteren.



Figur 3. Turbinens ytterdiameter kan skattas med en potensfunktion och både Kaplan- och Francisturbiner tycks följa samma samband. Svarta fyllda cirklar motsvarar Kaplanturbiner och röda fyllda cirklar motsvarar Francisturbiner.

2.2.2 Navdiameter (Kaplan)

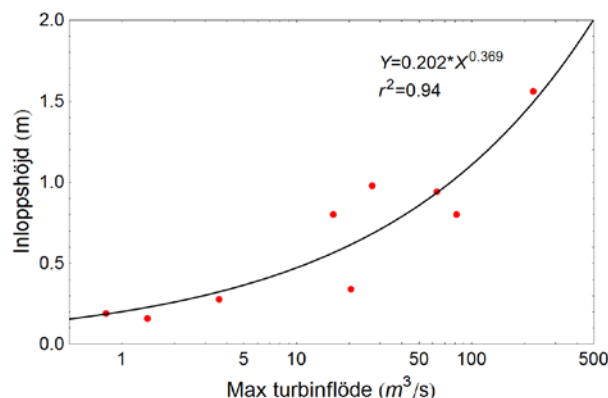
Även navdiametern följer ett tydligt samband i relation till $Q_{\max}$ (Figur 4). Däremot fanns betydligt färre specifikationer med angiven navdiameter. Det är därför oklart hur tillförlitligt detta samband är. Det torde finnas ett samband mellan navdiametern och ytterdiameteren, vilket innebär att oberoende slumpningar i MC-simuleringarna av de två skulle kunna ge turbindimensioner som avviker markant från det observerade. För att minimera det problemet valde jag att inte introducera osäkerhet i beräkningarna av navdiametern samt att kontrollera att kvoten mellan innerdiameteren och ytterdiameteren hamnade inom det observerade intervallet av sådana kvoter; 0.45-0.65.



Figur 4. Kaplanturbinens navdiameter kan skattas med en potensfunktion. Data från turbinspecifikationerna i Montén (1985) har använts i denna analys.

2.2.3 Inloppshöjd (Francis)

Det fanns endast nio angivna värden för inloppshöjder i Francisturbiner vilket innebär att sambandet med $Q_{\max}$ blir osäkert. Sambandet mellan inloppshöjden i Francisturbinerna och $Q_{\max}$ tycks också följa en potensfunktion och en förklaringsgrad på 94 % får anses var tillfredsställande med tanke på de fåtaliga observationerna. Det fastställda sambandet som redovisas i Figur 5 har använts i MC-simuleringarna, dock utan kompletterande osäkerhet. Innebörden för resultaten från MC-simuleringarna blir något mindre än vad de skulle bli om osäkerheten tagits med. Däremot torde inte median och medelvärdeskattningarna påverkas i någon nämnvärd omfattning. Det går att modifiera MC-modellen för att inkludera även denna osäkerhet, men i samband med en sådan förändring vore det önskvärt med mera data på inloppshöjder för att få ett mera tillförlitligt samband med tillhörande osäkerheter. Vid alla slags modellberäkningar som gjorts för Francisturbiner i denna rapport samt i Calles & Christiansson (2012) där inloppshöjden inte var känd bygger på sambandet i figur 5. Med tanke på det fåtal observationer som ligger till grund för sambandet mellan inloppshöjd och det maximala turbinflödet för Francisturbiner framstår de beräknade förlusterna för Francisturbiner som betydligt osäkrare än förlustberäkningarna för Kaplan-turbiner.



Figur 5. Francisturbinens inloppshöjd ett relativt tydligt samband med $Q_{\max}$, men få turbiner i underlagsdata gör sambandet något osäkrare än de som redovisas i tidigare figurer. Data från turbinspecifikationerna i Montén (1985) har använts i denna analys.

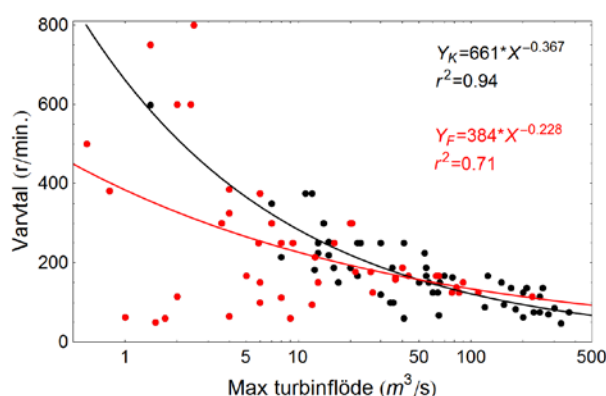
2.2.4 Varvtal

Turbiner med ett högt $Q_{\max}$ har vanligen lägre varvtal än turbiner med ett lågt $Q_{\max}$. Det bör noteras här att varvtalet för en Kaplan- och Francisturbin är konstant och ändras sålunda inte med flödet. Sambandet mellan varvtalet och $Q_{\max}$ tycks vara relativt likartat för Kaplan- och Francisturbinerna och det följer liksom tidigare samband en potensfunktion (Figur 6). Varvtalet mellan olika Francisturbiner tycks dock variera mycket vid låga maximala turbinflöden, $<20 m^3/s$. Bristen på data för Kaplan-turbiner med låga $Q_{\max}$ gör eventuellt att en motsvarande variation i varvtal inte framkommer. Jag har

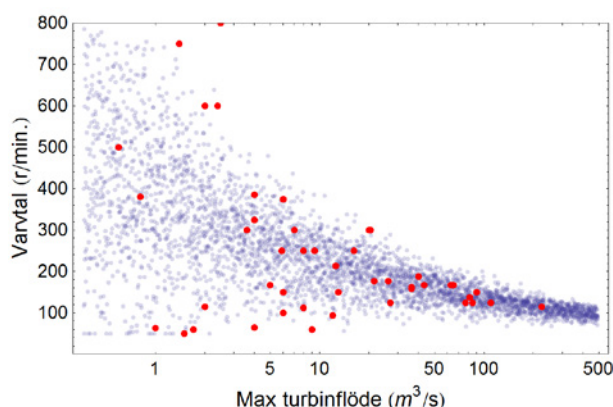
valt att hålla isär regressionerna för varvtalen mellan de två turbin typerna och anpassa ett mått på osäkerhet i ekvationen för Francisturbinerna som fångar upp den ökade variationen vid låga flöden (ekvation 13, ekvation 14, Figur 7). De ekvationer som använts i MC-simuleringarna ser ut som följer:

$$\text{Varvtal}(\text{Kaplan}) = 0.661 \cdot Q_{\max}^{-0.367} \cdot \text{Rnd}(\sim N(1, 0.25)) \quad \text{ekvation 13}$$

$$\text{Varvtal}(\text{Francis}) = 0.384 \cdot Q_{\max}^{-0.228} \cdot \text{Rnd}\left(\sim N\left(1, \frac{0.4}{(Q_{\max}-0.1)^{0.2}}\right)\right) \quad \text{ekvation 14}$$



Figur 6. Även om det finns ett signifikant negativt samband mellan varvtalet och turbinernas $Q_{\max}$ uppgår förklaringsgraden bara till 71 % för Francisturbiner, vilket kan orsaka stor variation i resultaten speciellt när förlustmodellen används i MC-simuleringar för turbiner med $Q_{\max} < 20 \text{ m}^3/\text{s}$. Förklaringsgraden blev betydligt bättre för Kaplanturbiner, men för dessa fanns endast få specifikationer för $Q_{\max} < 10 \text{ m}^3/\text{s}$. Data från turbinspecifikationerna i Montén (1985) och Calles & Christiansson (2012) har använts i analysen. Svarta fyllda cirklar motsvarar Kaplanturbiner och röda fyllda cirklar motsvarar Francisturbiner.



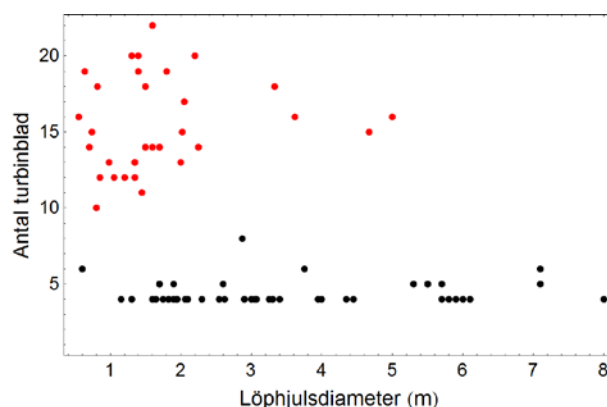
Figur 7. Jämförelse mellan slumpade varvtal med (blå punkter) och faktiska varvtal för Francisturbiner (röda punkter).

Ekvation 13 och 14 kan resultera i mycket låga varvtal vid slumpningarna i MC- simuleringarna. För att undvika varvtal under de nedre gränserna baserat på specifikationerna i de data som fanns tillgängliga; 45 varv per minut för Kaplanturbinerna och 50 varv per minut för Francisturbiner, ersattes lägre värden med dessa. Alternativet hade varit att minska variationen för varvtalet i slumpningen, men det hade gjort det mer osannolikt att erhålla de lägsta observerade varvtalen i MC-simuleringarna.

Eftersom varvtalet liksom antalet turbinblad i hög utsträckning sätter gränserna för den storlek på fisk som kan passera en turbin utan att träffas så går det redan utifrån denna figur att uttala sig om i vilken typ av miljöer som de största procentuella passageförlusterna borde förväntas. Höga varvtal används företrädesvis i mindre vattendrag, där vattenföringen sällan medger höga flöden. Med höga varvtal får fisken svårare att hinna passera turbinen oskadd och de procentuella förlusterna vid en turbinpassage borde därför vara störst i de små vattendragens kraftverk.

2.2.5 Antal turbinblad (skovlar)

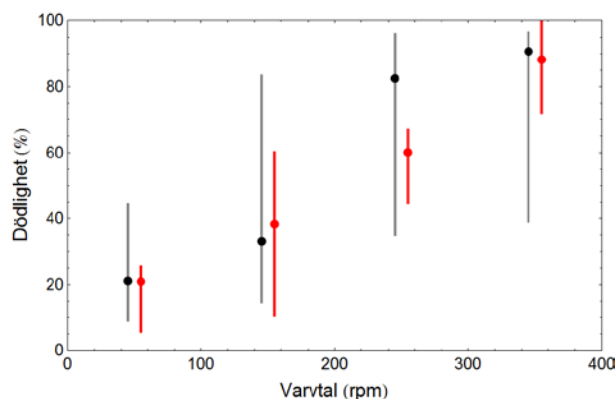
Francisturbiner har generellt fler turbinblad än Kaplanturbiner och det går inte att se något tydligt samband vare sig mot $Q_{\max}$ eller mot löphjulsdiametern (Figur 8), vilket gör att denna variabel inte lämpar sig att skatta utifrån en regressionsfunktion. Variationen i antal turbinblad mellan olika turbiner var betydligt större bland Francisturbinerna än bland Kaplanturbinerna. Vid MC-simuleringarna valde jag att slumpa antalet turbinblad för respektive turbintyp utifrån den fördelning av varvtal mellan olika turbiner som fanns att tillgå i Monténs (1985) och Calles & Christianssons (2012) data. I en mer generell MC-simulering i syfte att analysera inverkan på förlustsiffror av antalet turbinblad användes något vidare intervall med antal turbinblad än i dessa data. Exakt vilka intervall som användes redovisas i anslutning till respektive simulering.



Figur 8. Det finns inget tydligt samband mellan antalet turbinblad och löphjulsdiametern. Svarta fyllda cirklar motsvarar Kaplanturbiner och röda fyllda cirklar motsvarar Francisturbiner.

2.2.6 Resultat från valideringen av modellen

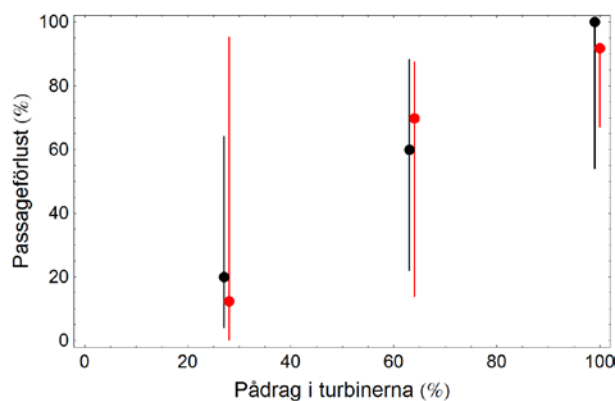
I sammanställningen av observerade passageförluster för ål som Travade och Larinier (2011) gjorde redovisades resultatet i form av en boxplot där varvtalen hade aggregerats i intervaller om 100 varv per minut. För att få jämförbara resultat grupperade jag data från MC-simuleringen på samma sätt och avgränsade resultaten från simuleringen till det varvtalsintervall (0-400 varv per minut) som de hade i sin figur. I denna analys valde jag en fisklängd på 70 cm, utan variation. Resultatet av jämförelsen visar att förlustmodellen gav skattningar av dödligheten vid turbinpassage som stämde väl överens med Travades *et al.* (2011) resultat, med en viss avvikelse vid 200-300 varv per minut (Figur 9).



Figur 9. Modellen för att skatta dödligheten vid turbinpassage i denna rapport återger relativt väl de empiriska observationerna som gjorts av dödlighet i relation till turbinernas varvtal. De svarta fyllda cirklarna avser resultaten från MC-simuleringarna och de röda fyllda cirklarna avser resultaten från Travades och Lariniers (2011) sammanställning. Felstaplarna anger intervallet mellan 5:e och 95:e percentilerna i MC-simuleringen och ytterkanterna (ej "outliers") in den boxplot som Travade och Larinier (2011) redovisade.

I en passagestudie vid Ätrafors (Calles *et al.*, 2010) uppgick förlusterna i Francisturbinerna till ca 60 % av de 15 ålar som släpptes direkt i anslutning till turbinintaget (nedströms fingallret). Av dessa 15 ålar släpptes fem stycken vid fullt pådrag. Fem stycken släpptes vid 63 % pådrag i turbinerna och de resterande fem släpptes vid 27 % pådrag. Förlusterna ökade från 20 % till 100 % med ökat pådrag. De modellberäknade förlusterna (medianvärdena) från den första parameteriseringsomgången för de tre olika pådragen, då endast Monténs turbinspecifikationer fanns att tillgå, hamnade samtliga över 80 % med stora osäkerhetsintervall. Efter revidering av modellparameteriseringen med hjälp av ytterligare turbinspecifikationer från Calles & Christiansson (2012) minskade de modellberäknade förlusterna och överensstämmelsen med de observerade data från Ätrafors blev betydligt bättre men fortfarande med stor osäkerhet, speciellt vid lägre belastningar. Även konfidensintervallen för de observerade förlusterna var stora, men i detta fall på grund av få observationer. Med den förbättrade parameteriseringen stämmer de beräknade förlusterna förvånansvärt väl

överens med de observerade trots att endast den genomsnittliga slukförmågan för samtliga turbiner och blankålarnas längdfördelning (Jo2008/3901) fanns att tillgå som indata. Inga tekniska data om antal turbinblad och vinklar användes som indata vid beräkningarna. Även om ökningen i passageförluster med ökat pådrag i turbinerna i Ätraforsstudien kan tyckas entydig så avviker mönstret från Monténs (1985) förväntningar och även från empiriska data från studier som genomfördes under tre år vid kraftstationen Linne i floden Meuse, Nederländerna (figur sid. 66 i Bruijs *et al.* 2003). Vid Linne minskade passageförlusterna från 20-30 % vid 30-40 m³/s till 5-10 % vid 100 m³/s turbinflöde. Vid Linne används Kaplanturbiner, och de beräkningar som gjorts för Ätrafors gäller Francisturbiner. Ytterligare en aspekt är att även om de observerade resultaten och modellresultaten för Ätrafors stämde väl överens så torde de låga förlusterna vid lågt pådrag sällan eller aldrig realiseras eftersom Francisturbiner sällan körs med lägre pådrag än 50 % på grund av vibrationer och dålig verkningsgrad.



Figur 10. Jämförelse mellan observerade förluster vid ålpassage genom turbinerna i Ätrafors 2007 (Calles *et al.* 2010) (svart) och förväntade förluster vid beräkning med modellen (röd) när uppgifter om turbintyp, antal turbiner, slukförmåga, pådrag och ålarnas storleksfördelning användes som indata. De heldragna linjerna avser 95 % konfidensintervall.

När jag var i det närmaste klar med denna rapport tillgängliggjordes dokumentationen från den franska slutkonferensen för ett stort forskningsprogram om ål (<http://www.onema.fr/Programme-de-R-D-Anguilles>). Där presenterade Gomes & Larinier (2012) tre regressionsmodeller som de anpassat till passageförluster av ål som passerat via Kaplanturbiner. Med tanke på omständigheterna har jag inte haft möjlighet att göra någon omfattande analys av deras modeller. Däremot inkluderar jag en enkel resultatjämförelse mellan MC-modellen som presenteras i denna rapport och de tre franska regressionsmodellerna. De tre empiriskt framtagna regressionssekvationerna som beskriver passageförluster för Kaplanturbiner (Gomes & Larinier 2012) är:

$$M(\%) = 4.67 * TL^{1.53} Dn^{-0.48} N^{0.6} , \quad (M1)$$

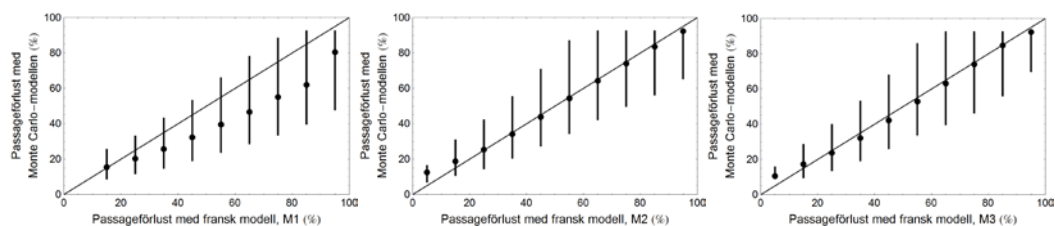
$$M(\%) = 6.59 * TL^{1.63} Q^{-0.24} N^{0.63} , \quad (M2)$$

$$M(\%) = 12.42 * TL^{1.36} Q^{-0.22} Dn^{-0.1} N^{0.49} , \quad (M3)$$

där M är dödlighet, TL är ålens totallängd (m), Dn är Kaplanturbinens navdiameter (m), N är varvtalet (rpm) och Q är turbinens maximala flödeskapacitet. För att kunna tillämpa dessa behövs alltså dessa tekniska specifikationer för turbinerna. Men på motsvarande sätt som med MC-simuleringarna för den mekanistiska modellen i denna rapport går det att göra MC-simuleringar med Gomes & Lariniers (2012) modeller för att få en uppfattning om passageförlusterna i de svenska Kaplanturbinerna. I Gomes & Larinier (2012) visas även boxplottar med dödligheten i relation till, varvtalet, ytterdiametern och turbinflödet.

Passageförlusterna från MC-modellen verkar genomgående vara lägre jämfört med de som beräknats med den franska modellen M1 även om avvikelserna ryms inom osäkerhetsintervallen. I denna validering har jag inte tagit hänsyn till osäkerheten i de franska modellerna. Gomes & Larinier (2012) presenterade inte några mått på osäkerhet vilket inte gjort det möjligt att inkludera detta i valideringen. Med tanke på att spridningen i deras boxplottar är ca $\pm 10\%$ för observationerna inom boxen (50 % av observationerna) så skulle överlappen med de heldragna linjerna i Figur 11 bli betydligt större än vad som framgår nu om man skulle inkludera osäkerheterna i de franska regressionsmodellerna.

Överensstämmelserna i resultat blev betydligt bättre mellan Monte Carlo-modellen och modell M2 och M3 av de franska regressionsmodellerna (Figur 11). MC-modellens resultat hamnar centrerat kring de franska modellernas prediktioner över nästan hela intervallet vilket dels innebär att MC-modellens resultat är tillförlitliga samtidigt som det innebär att de enklare regressionsekvationerna kan användas för att få fram motsvarande resultat för Kaplanturbiner, dock utan osäkerhetsmått.



Figur 11. Jämförelse i beräknade passageförluster i Kaplanturbiner mellan Monte Carlo-modellen och den tre franska regressionsmodellerna. Som underlag användes en storleksfördelning på ålarna med $\bar{X}=72$ cm, $SD=10$, samt fullt pådrag i turbinerna. Övriga tekniska specifikationer slumpades med hjälp av de funktioner som presenteras i avsnittet om valideringen inom de intervall för varvtal, navdiameter och slukförmåga som presenteras i Gomes & Larinier (2012). De svarta fyllda cirkelarna visar medianerna för varje 10 %-intervall och felstaplarna visar percentil-intervallet 5-95 %. De heldragna linjerna motsvarar 1:1 förhållandet.

Överlag tycks MC-modellen ge tillförlitliga resultat om än med relativt stora konfidensintervall. I gengäld behövs endast ett fåtal tekniska specifikationer för att uppnå det resultatet. Med flera specifikationer i indata bör tillförlitligheten i modellen öka ytterligare.

En personlig reflektion kring de franska modellerna är att samtliga komponenter utom ålens längd är relativt väl korrelerade med slukförmågan ($Q_{\max}$). Av de parametrar som modellerna innehåller har varvtalet mycket stor betydelse för hur stora ålar som hinner passera igenom turbinen utan att träffas av något att bladen. Den andra turbinkomponenten som i kombination med varvtalet har stor betydelse för ålarnas överlevnad vid en turbinpassage är antalet blad. Ju fler blad desto kortare avstånd mellan bladen och därmed har ålarna svårare att hinna mellan bladen utan att träffas. Frånvaron av den variabeln i de franska modellerna (ekvationerna M1-M3) bidrar därför rimligen till en viss osäkerhet i prediktionerna.

Med tanke på att överensstämmelserna mellan observerade förluster och MC-modellens beräknade förluster var relativt goda bör det med hjälp av MC-simuleringar gå att få en uppfattning om hur stora förluster av ål vi kan förvänta oss vid turbinpassager i de svenska vattendragen. Det säkraste vore naturligtvis att utgå från de tekniska specifikationerna för var och en av de turbiner som finns i de svenska vattendragen. Att samla in all den informationen är ett tidskrävande projekt och ligger långt utanför det uppdrag som legat till grund för denna rapport. Jag bedömer att även den "parameterfattiga" versionen av MC-modellen är så pass tillförlitlig att den går att använda för att se åt vilket håll förlustsiffrorna pekar, hur de förhåller sig till den fasta förlustnivå på 70 % som används inom ålförvaltningen idag, samt i vilken storlek av vattendrag som de största problemen kan tänkas finnas.

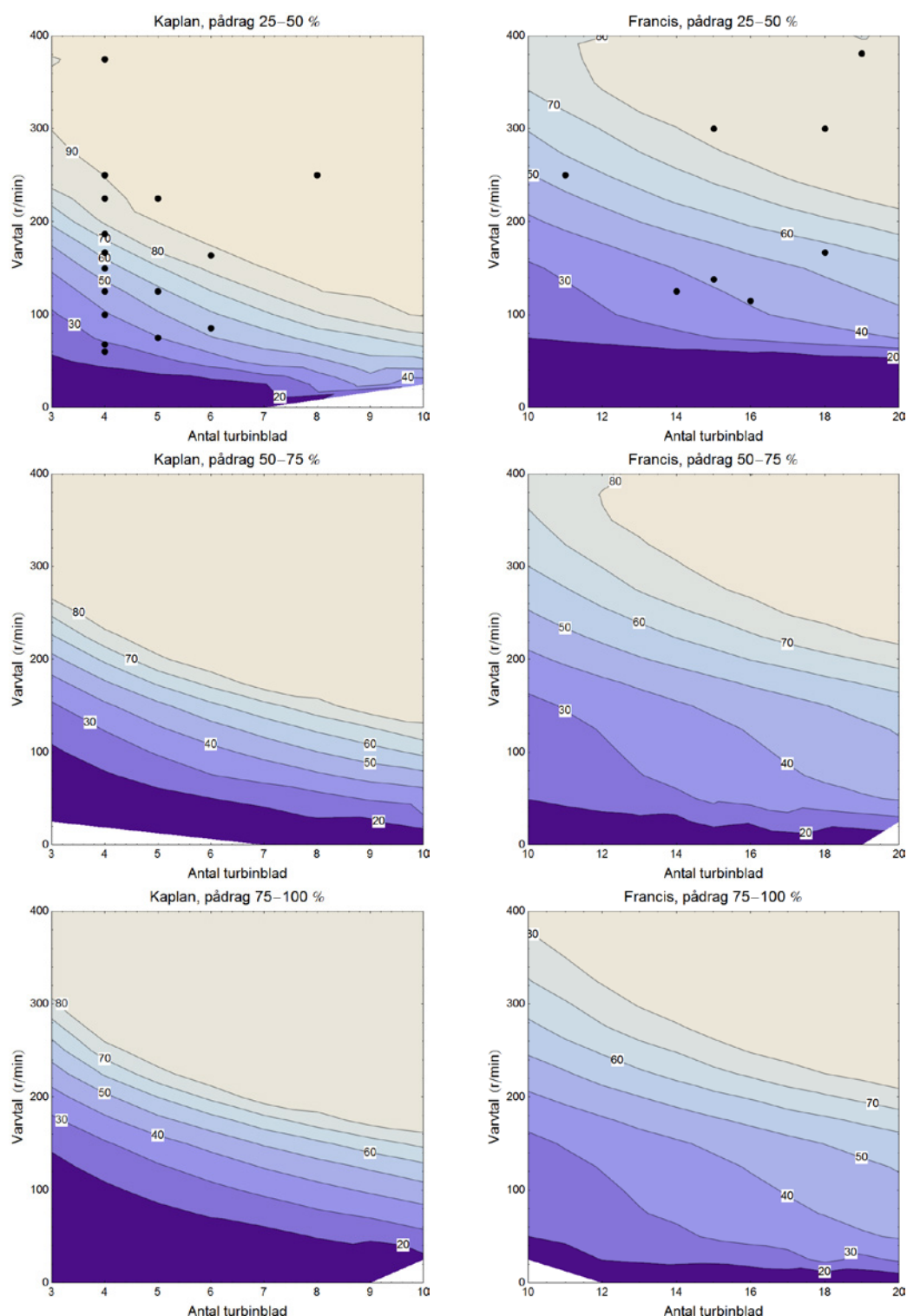
2.3 Betydelsen av varvtal och antal turbinblad för turbinpassageförluster

Innan jag går in på beräkningar som gäller de svenska förhållandena kan det vara på sin plats att se hur förlusterna (dödligheten) vid passage påverkas av en kombination av varvtal och antal turbinblad. I de franska modellerna fanns inte antalet turbinblad med som förklaringsvariabel. Antalet turbinblad i kombination med varvtalet har stor betydelse för passageförlusterna eftersom produkten av dessa återfinns i täljaren vid beräkningen av passageförluster. Jag har därför valt att med hjälp av MC-modellen ta fram figurer som beskriver dödligheten som en funktion av både varvtalet och antal turbinblad. Dessa figurer kan sedan användas för att avgöra vilken dödlighet som kan förväntas i en turbin när man känner antalet turbinblad och varvtalet. Eftersom varvtalet är definierat som en funktion av $Q_{\max}$ sätter de slumpade $Q_{\max}$ -värdena att sätta gränsen för hur högt varvtal som kommer med i simuleringresultaten. I de MC-simuleringar som gjordes för att ta fram nedanstående figurer slumpades $Q_{\max}$ i intervallet 0.5-200 m³/s, pådraget inom tre olika intervall; 25-50 %, 50-75 % och 75-100 %, antalet turbinblad varierades inom intervallet; Kaplan 3-10 och Francis 10-20 blad. Varvtalet skattades med den gemensamma regressionsekvationen för Francis- och Kaplanturbiner; $\text{varvtal} = 570 * Q_{\max}^{-0.301}$, vilken härrör från

parameteriseringen med enbart Monténs turbinspecifikationer. Varvtalet multiplicerades därefter med ett slumpmässigt värde från en normalfördelning med medelvärde 1 och standardavvikelse 0.2 (ca $\pm 40\%$). Antalet simuleringar per figur uppgick till en miljon. Medianvärdena av passageförlusterna för varje kombination av heltalsintervall av antalet turbinblad och intervall om 25 för varvtalet användes sedan som underlag till konturplottarna. Notera att i den senaste versionen av modellparameteriseringen har varvtalsfunktionerna delats upp i separata funktioner för de två turbintyperna, vilket även påverkat formlerna för osäkerheten. Vid kontroll av nedanstående resultat gentemot de nya parametervärdena kvarstår dock det övergripande mönstret även om vissa numeriska skillnader kan förekomma.

Som framgår av figurerna är antalet turbinblad nästan lika avgörande för dödligheten som varvtalet (Figur 12). Kaplanturbiner har vanligen få turbinblad och med 4-5 turbinblad uppkommer höga förluster ($>70\%$) när varvtalet kommer upp mot 200 rpm. Dödligheten vid höga varvtal verkar vara högre i Kaplanturbiner jämfört med vid motsvarande varvtal i Francisturbiner trots att Francisturbinerna har betydligt fler blad (skovlar). Pådraget i turbinerna verkar inte ha så stor betydelse (enligt modellen).

Eftersom det främst rådde osäkerhet i varvtalet och antalet turbinblad i indata till MC-simuleringarna, så utgör Figur 12 ett lämpligt underlag att använda vid preliminära bedömningar av vilka passageförluster som kan förväntas vid kraftverken. I Figur 12 kan man se det förväntade resultatet för många specifika kombinationer av varvtal och antal turbinblad och de flesta av de svenska turbinerna torde hamna någonstans inom de gränser som finns i figurerna. Jag valde att klippa figuren vid 400 varv per minut eftersom gradienten med ökade dödligheter huvudsakligen förekom vid lägre varvtal. I de fall utvärderingen gäller turbiner med högre varvtal kan man dra slutsatsen att den förväntade dödligheten är över 80-90 %.



Figur 12. Sammanvägda förväntade passageförluster (% , medianvärden) för blankålar som följer en längdfördelning med $\bar{X}=72$ cm och $SD=10$ som en funktion av varvtal och antal turbinblad för Kaplan- respektive Francisturbiner. De svarta punkterna i de övre figurerna motsvarar varvtal och antal turbinblad för turbinerna i Montén (1985).

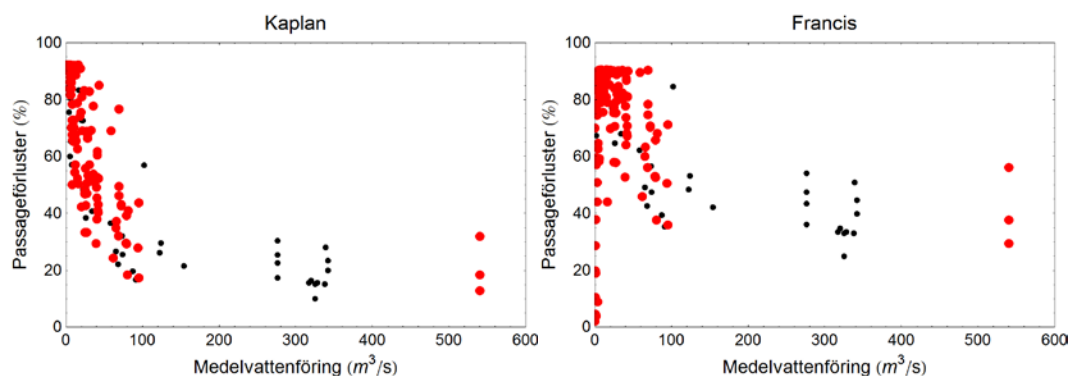
2.4 Skattning av ålförluster vid turbinpassage i svenska kraftverk

Med hjälp MC-simuleringar går det även att få en uppfattning om hur stora procentuella förluster per passage vi maximalt kan förvänta oss i svenska utbyggda vattendrag. Med maximalt i detta sammanhang avses en situation där alla ålar passerar via turbinerna, vilket sannolikt inte stämmer. Effekten av eventuella gallerkonstruktioner, grov- eller fingaller, framför intaget till turbinerna har inte räknats in. Effekten av sådana konstruktioner analyseras i nästa avsnitt. Resultaten från MC-simuleringarna bör således ge en uppfattning om det värsta scenariot, med maximala förlustnivåer. Utifrån dessa resultat går det sedan att beräkna hur stor andel av ålarna som måste passera via spill eller fiskvägar för att målsättningen med ålförvaltningen skall kunna uppfyllas. Andelen av ålarna som passerar via spill blir alltså viktig att följa upp vid de prioriterade kraftverken för att kunna göra en sammanvägd skattning av passageförlusterna.

För att kunna göra skattningar av förväntade passageförluster via andra svenska kraftverk än de som återges i Montén (1985) och Calles & Christiansson (2012) behövs åtminstone data på $Q_{\max}$ och turbin typ. Resten av variablerna går att skatta med hjälp av de funktioner som angivits ovan. I dessa simuleringar har jag slumpat ålarnas längder från en storleksfördelning gällande blankål som presenterats i den svenska förvaltningsplanen för ål (Jo2008/3901). För att få fram $Q_{\max}$ för många turbiner i de svenska vattenkraftverken på kort tid har jag utgått från Kuhlins data (<http://vattenkraft.info/>, Kuhlin 2012) om utbyggnadsvattenföring, antal turbiner samt medelvattenföring. Den sistnämnda uppgiften kommer till användning för att kunna väga procentuella förluster mot absoluta förluster, med antagandet att antalet ålar är proportionellt mot medelvattenföringen. För att få fram $Q_{\max}$ (per turbin) dividerade jag utbyggnadsvattenföringen med antalet turbiner, dvs med antagandet att samtliga turbiner har samma kapacitet. Det antagandet stämmer inte till fullo, men avvikelserna torde inte vara så stora sett över hela datasetet. Jag valde att använda 100 % belastning på turbinerna som indata i dessa analyser som baserats på den senaste modellparameteriseringen, med turbinspecifikationer både från Montén (1985) och Calles & Christiansson (2012). Trots att det finns uppgifter om många kraftverk i Kuhlins databas så minskade antalet kraftigt eftersom kravet för denna analys var att det finns värden för samtliga variabler för att kraftverket skall kunna ingå i analysen. För den här rapporten har jag kompletterat en del uppgifter om utbyggnadsvattenföring och medelvattenföring för att få ett större underlag framförallt för vattendragen i Hallands län och Blekinge län. Utbyggnadsvattenföringen räknade jag fram från den angivna effekten för kraftverken i kombination med fallhöjden enligt ekvationen; $\text{utbyggnadsvattenföringen} = 125.5 \cdot \text{Effekten i MW} / \text{Fallhöjden i meter} - 0.0941$. Den regressions ekvationen gav 99.3 % förklaringsgrad vid applicerande på ett urval av Kuhlins data där både effekt, fallhöjd och utbyggnadsvattenföringen fanns angiven. Medelvattenföringen beräknades från 20-åriga flödesserier från SMHI:s VattenWeb (<http://vattenweb.smhi.se/>).

Genom att relatera MC-resultaten till vattendragens medelvattenföring kan vi få en uppfattning om vilka kraftverk som bör prioriteras i åtgärdsarbetet. I analyserna har jag hållit isär resultaten från Kaplan- och Francisturbiner, men utfallet antyder att turbintypen inte har någon avgörande betydelse när man relaterar resultaten till vattendragens medelvattenföring. I dessa analyser använde jag samma uppgifter för Kaplan som för Francisturbiner, dvs. samma data från Kuhlins databas användes för båda turbintyperna. Visserligen har Kuhlin angivit vilka turbiner som finns, men i flera fall finns båda turbintyperna installerade och det framgår endast i enstaka fall vilken kapacitet de enskilda turbinerna har när flera turbiner finns installerade. Om det inte hör till vanligheten att turbinernas kapacitet skiljer sig väldigt mycket i ett och samma kraftverk torde nedanstående resultat vara tillförlitliga att använda i den svenska ålförvaltningen till dess att mera data på turbinernas tekniska specifikationer tillgängliggörs.

MC-resultaten antyder att de största förlusterna vid passage av en enskild turbin förekommer i de mindre vattendragen, troligen på grund av att mindre turbiner med högre varvtal används i sådana vattendrag (Figur 13). Endast data från vattendrag i Götaland och Svealand har tagits med vid MC-simuleringarna som legat till grund för dessa figurer (N=191). De sammanvägda beräknade flödesviktade förlusterna i samtliga dessa kraftverk blev ca 30 %. Om man utesluter data från Dalarnas och Uppsala län (Dalälven) kvarstår endast mindre vattendrag förutom Göta älv och de sammanvägda flödesviktade förlusterna ökar då till drygt 40 % (röda symboler i Figur 13, N=146). Om man utesluter Göta älv, som dominerar stort i den analysen, ökar andelen förluster till ca 50 %. Om man istället räknar medelförlusterna per kraftverk, utan flödesviktning, blir de genomsnittliga förlusterna drygt 60 %. Dessa förlustberäkningar är förknippade med en hel del osäkerhet och ett 90-procentigt intervall för percentilerna sträcker sig över 30-35 procentenheter i passageförlusterna.



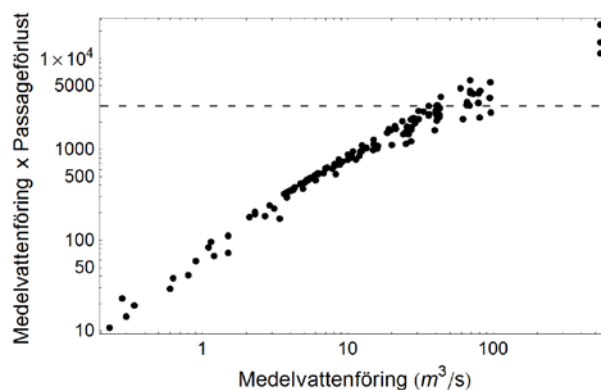
Figur 13. Förväntade passageförluster (%) för ål vid passage genom Kaplan- och Francisturbiner i vattendrag i Götaland och Svealand, röda fyllda cirklar avser kraftverk efter att Dalarnas och Uppsala län exkluderats. Uppgifter om utbyggnadsvattenföring, antal turbiner och medelvattenföring vid respektive kraftverk har hämtats från Kuhlins kraftverksdatabas.

Modellresultaten för Olidan och Hojum i Göta älv, se punkterna vid ca 550 m³/s medelvattenföring i Figur 13, är av särskilt intresse att studera närmare, dels på grund av att det går att räkna fram säkrare förlustsiffror, dels för att det finns telemetridata från området samt att en stor del av det svenska ålbeståndet kan förväntas passera via Göta älv. Om man endast utgår ifrån totalt antal turbiner (16) och utbyggnadsvattenföring (1040 m³/s) får man fram en förväntad dödlighet på ca 50 % om man utvärderar samtliga turbiner som Francisturbiner och ca 41 % för Kaplan turbiner. I just det här fallet finns mer detaljerad beskrivning att tillgå där det framgår att det finns 13 dubbelfrancis i Olidan, varav 10 är aktiva i nuläget enligt Vattenfalls hemsida. Maxkapaciteten i Olidan är 950 m³/s enligt Vattenfalls hemsida. Det ger ca 47 m³/s genom var och en av de 20 Francisturbinerna. Utifrån dessa specifikationer blir den förväntade dödligheten vid passage ca 70 %. Vilket är högre än de ursprungliga beräkningarna på grund av att en tvillingfrancis räknas som en turbin i Kuhlins databas. För Hojum däremot blir resultatet betydligt lägre än från den "grova" beräkningen. I Hojum finns tre Kaplan turbiner och två av dem har kapacitet för 200 m³/s och den tredje klarar 260 m³/s. Med dessa siffror blir de förväntade förlusterna ca 40 %. Om vi antar att ålarna väljer att passera via Olidan i lika stor utsträckning som via Hojum blir den sammanvägda förlusten ca 55 % med den högre upplösningen i data. Förlusterna kan bli större eller mindre beroende på hur stor andel av ålarna som passerar via Olidan kontra Hojum.

Det finns även telemetrastudier på ål i Göta älv (Lagenfelt & Westerberg 2009). Upplösningen i den telemetrastudien är dessvärre för låg för att kunna avgöra hur stor andel av ålarna som passerade via Hojum respektive Olidan och inte heller för att avgöra hur stora de sammanvägda förlusterna var vid passage av dessa kraftverk. Däremot finns totala förlustsiffror förbi alla tre kraftverksområdena i Göta älv från Väneren ut mot kusten. De genomsnittliga förlusterna per passage i den studien uppgick till ca 30 %. Passageförlusterna i de två andra kraftverken (Lilla Edet och Vargön) kan beräknas med passageförlustmodellen eftersom det finns turbin specifikationer gällande turbin typ, kapacitet och varvtal att tillgå för dessa. Dessa kraftverk har betydligt färre och mera enhetlig uppsättning av turbiner som domineras av stora Kaplan turbiner, vilket ger mer tillförlitliga resultat vid beräkningarna med modellen. Med de specifikationer som anges på Kuhlins hemsida blir de beräknade passageförlusterna mellan 10-20 % per kraftverk, vilket innebär att förlusterna vid passage förbi Olidan/Hojum måste uppgå till ca 50-60 % för att de totala passageförlusterna skall uppgå till de uppmätta ca 70 %. Det innebär att de två olika sätten att beräkna passageförlusterna vid Olidan/Hojum ger likartade resultat. Notera att passageförlusterna vid Vargön och Lilla Edet hamnar på ungefär rätt nivå i Figur 13. Anledningen till att de stämmer bättre än resultaten för Olidan/Hojum är främst att det är betydligt färre turbiner och mer likartade turbiner i Vargöns och Lilla Edets kraftverk.

Vid prioritering av åtgärder handlar det bland annat om att identifiera de största problemen och undersöka vad som går att åtgärda. Enligt resultaten i Figur 13 borde den högsta andelen förluster förekomma i de minsta vattendragen. Men antalet ålar som passerar där torde å andra sidan vara lågt jämfört med i de större vattendragen. Om man istället multiplicerar passageförlust med medelvattenföringen får man sannolikt mera användbar information för att prioritera bland olika objekt. Antagandet som ligger till

grund för det beräkningssättet är att mängden ålar, eller åtminstone produktionskapaciteten, är proportionell mot mängden vatten med antagandet att uppväxtarealen är proportionell mot mängden vatten i låglandsområden. I Figur 14 kan man se hur prioriteringen mellan olika objekt skulle bli med detta beräkningssätt jämfört med om man enbart fokuserar på förlustsiffrorna i till exempel Figur 13. Den prioriteringmetoden kan få till följd att större objekt kan hamna på prioriteringslistan även om de har relativt låga förlustsiffror. I stora vattendrag förväntas "stora" mängder ålar vandra nedströms och även en liten förbättring av passagemöjligheterna där kan rädda fler ålar än en relativt stor förbättring i ett litet vattendrag.



Figur 14. Omräkning av procentuella passageförluster till ett relativt mått på de totala förlusterna genom att multiplicera passageförlusterna (%) med medelvattenföringen. Detta mått ger en bra beskrivning av den relativa mängden ålar som går förlorade i turbinerna om mängden ål i en vattenförekomst är positivt korrelerad med vattenföringen, förutsatt att det finns ål uppströms. Endast data från kraftverk i vattendrag i Götaland och Svealand (exkl. Dalarnas och Uppsala län, se Appendix 8.3 och 8.4 för kraftverk i Dalälven från Uppsala län) ingår i underlaget. Den streckade horisontella linjen visas som ett exempel på gränsdragning för prioritering av åtgärder.

För att det skall vara möjligt inom ålförvaltningen att göra prioriteringar av åtgärder bland olika objekt behöver man dels veta hur passageförlusterna fördelar sig mellan olika kraftverk i ett och samma vattendrag och dels hur förlusterna fördelar sig mellan vattendrag. Med modellen som presenteras i denna rapport är detta möjligt. I Tabell 3 redovisas en sammanställning av modellberäknade medelförluster (geometrisk medelvärden) för ett antal vattendrag i Götaland och Svealand (Se Appendix 8.3 och 8.4 för resultat för de enskilda kraftverken). I den tabellen, till skillnad från beräkningarna ovan, har endast de faktiskt installerade turbin typerna (Kaplan eller Francis) använts för att beräkna förlusterna. Siffrorna torde därför skilja sig en del. Syftet med sammanställningen ovan var att ge de grova dragen och se hur förlusterna förhåller sig till storleken på vattendragen, medan det här handlar om att hamna så nära de sanna förlusterna som möjligt i de specifika vattendragen. De genomsnittliga beräknade förlusterna uppgick till mellan 60 och 70 %, beroende på vilken belastning som råder.

Tabell 3. Geometriska medelvärden samt 5:e och 95:e percentiler för beräknade passageförluster per turbin i olika vattendrag i Svealand och Götaland, i frånvaro av spill. Se texten för beskrivning av beräkningarna.

Vattendrag	Antal krv (turbiner)	Medel flöde (m ³ /s)	Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Medel (%)	5:e perc (%)	95:e perc (%)	Medel (%)	5:e perc (%)	95:e perc (%)
Alsterälven	2	4.7	72	70	74	88	80	92
Alsterån	1	10.8	13	7	22	85	81	89
Arbogaån	4	29.9	84	72	89	57	43	73
Ätran	11	38.9	66	53	78	64	49	78
Bäveån	1	3.7	89	89	89	91	85	92
Borgviksälven	1	11.3	65	53	76	83	66	92
Bredsdal	1	4.7	89	89	89	90	77	92
Dalälven	4	341.3	45	34	57	36	27	46
Emån	21	19.0	79	70	83	78	63	87
Eskilstunaån	4	16.2	78	73	81	85	69	91
Finspångsån	2	10.4	69	68	70	86	84	89
Gamla Hjälmare Kanal	1	0.3	6	3	12	70	59	79
Göta älv	4	540.0	43	33	56	32	24	41
Gullspångsälven	2	61.5	46	35	57	36	27	45
Gunnilboån	2	2.6	6	3	11	67	56	76
Häggån	1	4.2	9	5	16	80	72	86
Hedströmmen	10	7.3	72	66	75	84	76	89
Helge å	1	16.0	3	1	5	44	30	59
Klarälven	1	94.0	55	42	69	51	39	62
Kolbäcksån	8	26.1	69	52	84	54	41	63
Lagan	17	59.3	66	57	76	67	52	80
Lillälven, Värmland	1	5.2	22	13	34	89	86	91
Lillån Falkenberg	1	1.5	1	0	1	4	2	7
Mörrumsån	3	30.0	56	43	68	86	75	92
Motala Ström	5	69.9	59	44	74	50	37	67
Nissan	7	36.6	72	56	82	73	56	85
Nyköpingsån	2	10.0	70	68	71	89	83	91
Rolfsån	1	7.2	89	89	89	84	66	92
Ronnebyån	14	8.4	75	70	79	84	72	91
Sällevadsån	1	0.6	89	89	89	92	92	92
Säveån	4	16.2	52	37	69	79	71	85
Skaddeån	1	0.6	89	89	89	92	92	92
Skärvån	1	0.2	1	0	1	2	1	4
Stångån, Motala Ström	1	12.0	64	52	74	85	68	92
Storån, Örebro län	10	2.8	40	38	44	72	61	78
Storån Söderköping	1	1.1	5	2	8	60	46	72
Storån Västervik	3	0.9	54	53	55	75	72	79
Suseån	2	5.0	89	89	89	90	86	92
Svartån, Motala ström	4	16.1	73	71	76	87	78	92
Svartån, Västerås	2	5.8	89	89	89	89	84	92
Sverkestaån	2	5.5	23	13	35	89	87	91
Tidan	1	4.0	89	89	89	92	88	92
Upperudsälven	6	22.3	42	37	48	86	80	90
Vallsjön	1	0.3	1	0	1	4	2	7
Västerån	1	5.0	9	5	16	80	72	86
Viskan	5	12.0	63	55	71	86	76	92
Medelvärde			62	54	69	72	61	80
Flödesviktat medel, exkl. Dalälven			47	38	55	45	36	54

Överlag verkar det handla om höga förluster i de flesta av vattendragen. Det finns dock några undantag där de beräknade förlusterna per turbin inte överskrider 50 %, annat än med några få procent för 95:e percentilen. Dit hör bland annat Dalälven, Göta älv, Gullspångsälven och Helge å, av de vattendrag som har en vattenföring av någon omfattning. De genomgående höga förlustsiffrorna antyder att strategin att flytta ålyngel uppströms kraftverk innebär att en stor andel av ålarna måste passera via spill, även om inget fiske alls tillåts uppströms. Ju mer fiske efter ål som förekommer uppströms desto större andel av ålarna behöver avledas. Om till exempel hälften av ålarna, i termer av biomassa, fångas i uppströms liggande fisken får passageförlusterna inte uppgå till mer än 10 procentenheter om de sammanlagda förlusterna inte skall överskrida 40 % i det vattendraget. Det innebär att de sammanlagda passageförlusterna från fiskeområdet via samtliga kraftverk i vattendraget nedströms mot havet inte får överskrida 20 %. Med två kraftverk i vattendraget får då de genomsnittliga passageförlusterna inte uppgå till mer än 10 % per kraftverk.

De förlustsiffror som presenterats hittills i rapporten gäller passage via turbiner och med antagandet att ingen passagedödighet uppstår i alternativa passager. En aspekt som kan tillkomma i vissa fall är dödlighet på gallergrindar och fingaller, men jag har inte haft tillgång till sådana data från mer än ett kraftverk. Det underlaget är inte tillräckligt för att kunna extrapolera resultaten till andra kraftverk genom att inkludera den typen av dödlighet. Om det skulle visa sig vara en vanlig dödsorsak för ålarna i anslutning till kraftverken så bör skattningar på den dödligheten tas fram för att komplettera modellen. Om dödligheten på gallergrindar och eventuella fingaller är avsevärd så ger modellresultaten som presenteras i denna rapport en mer optimistisk bild av passageförlusterna än vad som egentligen är fallet. Å andra sidan finns också en motverkande aspekt, passage via spill och fiskvägar. Om det spills vatten i samband med ålvandringen kommer åtminstone en del av ålarna att passera kraftverken via spillet. Det finns flera studier som visat att ålarna väljer spillvägen i minst lika stor omfattning som andelen spillflöde motsvarar av totalflödet. För att kunna få säkrare skattningar på totalförlusterna så behöver man också kunskap om hur stor andel av ålarna som går via spill i olika situationer. Det gäller inte minst vid utvärdering av funktionen av fingallren eftersom ålar som varken passerar fingallret eller via spill hamnar i kategorin passageförluster.

Det går att få en grov uppfattning om hur stor andel av ålarna som behöver passera via spill för att uppnå ett långsiktigt mål på låt säga 40 % i ett specifikt vattendrag. I praktiken skiljer sig det målet mellan olika vattendrag för att den sammanräknade förlusten i samtliga vattendrag inte skall uppgå till mer än 40 % av den totala produktionen. Låt oss anta att det inte förkommer någon dödlighet på gallergrindarna eller vid spillpassage, utan all dödlighet sker vid passage av turbinerna. Jag väljer att exemplifiera med två scenarier. I det ena scenariot är sannolikheten att överleva en turbinpassage 40 % och i det andra 80 %.

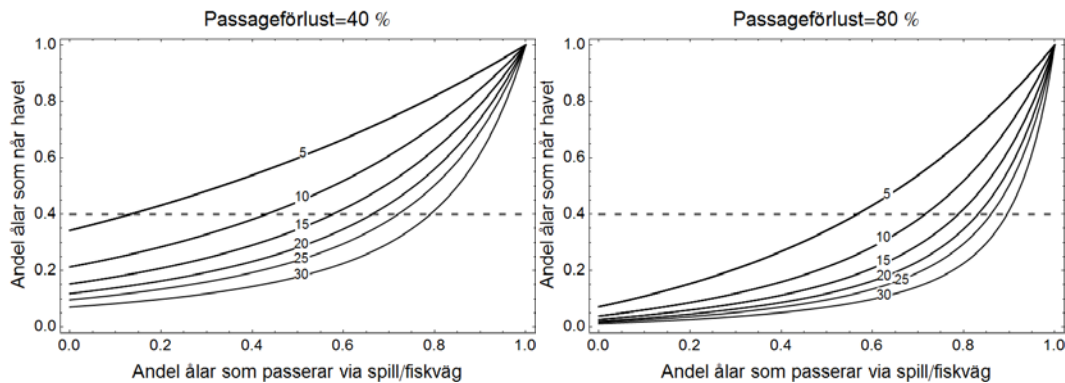
Situationen i flera av vattendragen stämmer in på någon av dessa nivåer (Tabell 3). Sannolikheten att överleva en kraftverkspassage blir:

$$P = (1 - q)(1 - M) + q, \quad \text{ekvation 15}$$

där q är andelen som passerar via spill och M avser dödligheten via turbinerna. Vid beräkningen av den genomsnittliga andelen av ålarna i ett vattendrag som tar sig tillbaks till havet gör jag antagandet att en viss andel stannat för uppväxt i området uppströms varje kraftverk och att en proportionellt större andel stannar längre ner i vattendraget eftersom vattenmängderna (uppväxtarealerna) vanligen är större där än längre uppströms. Detta är naturligtvis en grov förenkling och även om grundantagandet om kopplingen mellan vattenmängder och uppväxtarealer är rimligt så kan avståndsskalan variera avsevärt mellan vattendrag. Ett antagande som ligger till grund för denna beräkning är att ålarna tagit sig upp från havet på egen hand, eller att människan planterat ut ålarna i relation till uppväxtarealerna. Beräkningarna blir betydligt enklare om man har ett scenario där alla ålarna som planteras ut i ett vattendrag sätts ut i en enskild sjö, t. e.x. i Väneren. Beräkningar för det senare fallet presenteras nedan. För att förenkla beräkningen ignorerar jag de ålar som finns nedströms det nedersta kraftverket. Ofta finns det nedersta kraftverket nära mynningen mot havet. Den genomsnittliga sannolikheten för alla ålar i vattendraget att ta sig ut i havet blir då:

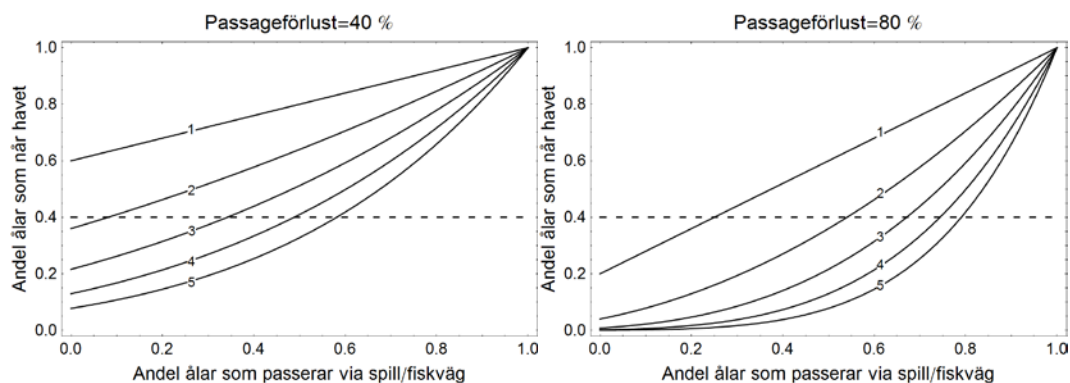
$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n ((n-i+1)^a * p^i)}{\sum_{i=1}^n i^a}, \quad \text{ekvation 16}$$

där $(n-1+1)^a$ används för att vikta upp de nedströms liggande kraftverken för att motsvara de ökande vattenmängderna (ålarna) nedströms och i avser kraftverk nummer 1 till n från mynningen och uppströms. Jag har använt $a=0.75$ vid beräkningarna för att närliggande kraftverk nedströms vanligen inte har så stor skillnad i vattenföring. Resultatet från denna beräkningsprocedur indikerar att det är nödvändigt att en stor andel av ålarna, 50-90 %, passerar via spill för att kunna nå det 40-procentiga målet i vattendrag där turbinpassageförlusterna uppgår till ca 80 % (Figur 15). I de vattendrag där passageförlusterna via turbiner ligger kring 40 % räcker det att ca 10 % passerar via spill om det endast finns fem kraftverk i vattendraget. Om det däremot finns 30 kraftverk krävs det att nästan 80 % passerar via spill. Notera att siffrorna för den andel som behöver passera via spill gäller för varje enskilt kraftverk i vattendraget för att 40-procentsnivån skall kunna uppnås. Det innebär att även om man skulle lyckas halvera turbinpassageförlusterna i de vattendrag som ligger kring 80 % så återstår sannolikt en hel del att göra för att lyckas nå tillräckligt höga andelar som passerar via spill i vattendrag med många kraftverk.



Figur 15. Den genomsnittliga andelen ålar i ett vattendrag som tar sig ut till havet beroende på hur stor andel som passerar kraftverken via spill eller fiskväg och hur många kraftverk som finns i vattendraget, givet att ålarnas uppväxtområden i vattendraget fördelas i proportion till flödet i de olika delarna. Siffrorna i anslutning till linjerna avser antalet kraftverk. Vid beräkningarna användes en konstant dödlighet på 40 % respektive 80 % vid passage via enskilda turbiner. De streckade horisontella linjerna visar ett exempel på hur stor andel av ålarna i det enskilda vattendraget som behöver nå havet.

Ovanstående beräkningar gäller för de ålar som lyckas ta sig upp på egen hand och kanske då främst som förklaring till vilka problem de ålar hade som redan fanns i vattendragen under utbyggnaden av vattenkraften. Numera torde ålbestånden uppströms kraftverken till största delen härröra från utsättningar. Eftersom utsättningarna vanligen görs i större sjösystem måste alla ålar passera samtliga nedströms liggande kraftverk. Beräkningarna av behov av spillpassager förenklas jämfört med ekvation 16 och den totala överlevnaden kan beräknas som P^n , där P ges av ekvation 15 och n är antalet kraftverk. Eftersom utsättning av ål sällan görs uppströms fler än 3-5 kraftverk har jag ökat upplösningen i antalet kraftverk i Figur 16 jämfört med i Figur 15 så att man enkelt kan avgöra vad ett extra kraftverk innebär för möjligheten att nå förvaltningsmålet. Det blir betydligt större totala förluster för ett givet antal kraftverk om ålarnas rumsliga fördelning i vattendraget är en följd av riktade utsättningar än om ålarna själva skulle fördelat sig i vattendraget. Exempelvis skulle 40 % av ålarna klara sig till havet med det föregående scenariot, med 40 % passageförluster och fem kraftverk, om ca 10-15 % av ålarna passerar via spill förbi vart och ett av kraftverken. Om alla ålar istället sätts ut uppströms det femte kraftverket behöver andelen som passerar via spill förbi de enskilda kraftverken uppgå till 60 %. Med det sistnämnda scenariot och tre kraftverk krävs det fortfarande en hög andel passager via spill, ca 35 %, för att 40 % av ålarna skall ta sig till havet. Om dödligheten vid turbinpassage är 80 % krävs att ca 25 % av ålarna tar sig förbi via spill även om det bara finns ett kraftverk nedströms. Med två kraftverk blir motsvarande siffra ca 55 %.



Figur 16. Den genomsnittliga andelen ålar i ett vattendrag som tar sig ut till havet beroende på hur stor andel som passerar kraftverken via spill eller fiskväg och hur många kraftverk som finns i vattendraget, givet att alla ålar sattes ut ovanför det översta kraftverket i vattendraget. Siffrorna i anslutning till linjerna avser antalet kraftverk. Vid beräkningarna användes en konstant dödlighet på 40 % respektive 80 % vid passage via enskilda turbiner. De streckade horisontella linjerna visar ett exempel på hur stor andel av ålarna i det enskilda vattendraget som behöver nå havet.

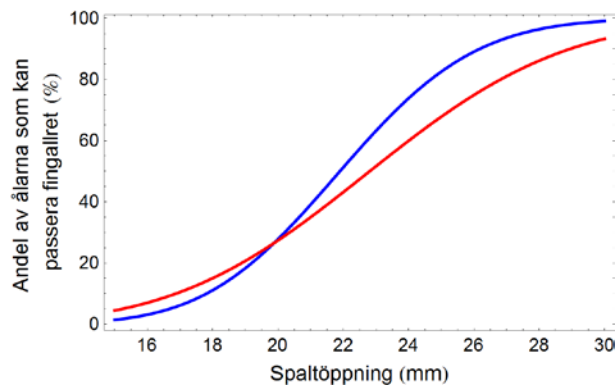
Om man kombinerar resultaten från förlustberäkningarna och analysen av andelen ålar som behöver passera via spill inser man att det behövs väl fungerande avledning av ålarna vid kraftverken för att hindra dem att passera via turbinerna, för att förvaltningsmålet skall kunna nås. Det är därför viktigt inom ålförvaltningen att få bra skattningar på hur stor andel av ålarna som passerar via spill för att kunna utvärdera hur långt från målet vi befinner oss. Resultaten från sådana utvärderingar skulle ge en antydning om hur omfattande förbättringar som kan behövas. Ett första steg i en sådan utvärdering borde vara att analysera flödesdata från kraftverken för att se hur stor andel som spills under den period som ålarna vandrar. Ålarna tycks företrädesvis passera via spillvägarna och främst via bottenspill när sådant finns (Travade *et al.* 2010, Russon & Kemp 2011), vilket innebär att analyser av flödesdata borde ge värdefull information om vilka nivåer vi kan förvänta oss på andelen ålar som passerar via spill. Med hjälp av sammanställningen och analysen av flödesdata i kombination med modellberäkningar för de specifika kraftverken går det sedan att prioritera vid vilka kraftverk som passagestudier är lämpliga att genomföra. I avsnitt 3 går jag igenom mer i detalj vad man vet om ålens val av passagealternativ under olika förhållanden. Jag ger även förslag, med några exempel, på hur man skulle kunna beräkna (modellera) andelen ålar som väljer att passera via turbiner kontra alternativa passagevägar (eller stanna). I avsnitt 3.2 presenteras dessutom ett antal enkla beräkningar för att få en första grov uppskattning av vilken storleksordning man kan förvänta sig på andelen ålar som passerar via spill.

2.5 Turbinpassageförluster i situationer med fingaller

Vid kraftstationer används vanligen grova gallergrindar för att hindra att skräp som kommer med vattnet skall komma in i turbinerna. Spaltöppningen på dessa galler är vanligen relativt stor i relation till ålarnas bredd, vilket gör att dessa konstruktioner inte i sig hindrar ålen oavsett storlek att passera via turbinerna. Däremot kan strömförhållandena vid den typen av gallergrindar göra att ålen fastnar på tvären och omkommer. Det finns en hel del information om hur man bäst dimensionerar och applicerar olika typer av avledningsanordningar, se till exempel Environment Agency (2011) och Calles & Bergdahl (2009) med tillhörande referenser. Det finns även en del information om vilken storlek på ål som kan passera ett fingaller av given storlek. Travade (2008) presenterade resultat från en studie där han undersökt vilka spaltöppningar olika stora ålar kunde ta sig igenom. Jag har översatt resultaten från den studien till en formel (ekvation 17) som kan användas för att beräkna sannolikheten för en ål av en given längd att ta sig igenom ett galler med en given spaltöppning mellan stängerna. Storleksberoendet påverkas till viss del av strömförhållandena (Environment Agency 2011), vilket jag inte tagit hänsyn till i formeln. Om man tillämpar formeln på Calles *et al.* (2010) data från Ätrafors ger den en relativt bra förklaring till gränsen, 64-68 cm, mellan de som passerade 20 mm gallret och de som omkom på gallret eller blev kvar uppströms.

$$P_{Galler}(S, TL) = 1 - \frac{1}{1 + e^{34 - 1.034 \cdot TL/S}}, \quad \text{ekvation 17}$$

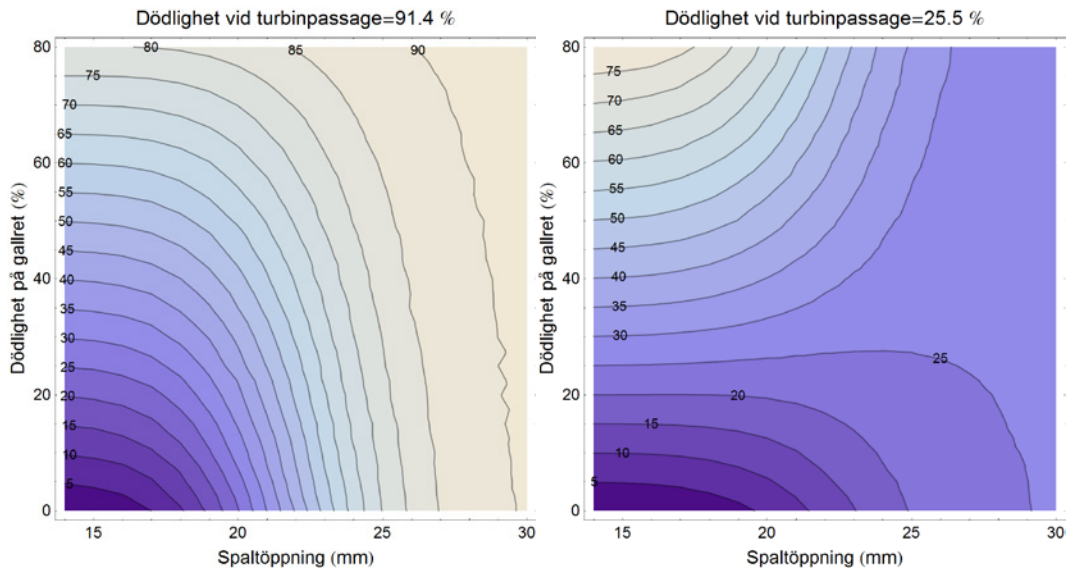
$P_{Galler}(S, TL)$ anger sannolikheten för en ål av längden TL (mm) att ta sig genom en spaltöppning på S (mm). I praktiken är det ålens huvudbredd som avgör vilken spaltöppning ålen kan ta sig igenom. I ekvationen ovan har jag använt en kvot på 0.033 för att representera huvudbredd/totallängd. I de fall denna kvot skiljer sig från den i de svenska ålbestånden måste totallängden räknas om ($TL = \text{totallängd} \cdot \text{huvudbredd} / 0.033$) för att resultaten skall gälla. Kvoten mellan huvudbredd och totallängd tycks kunna skilja sig mellan olika bestånd i närliggande områden, se Ide *et al.* (2011). Det är en betydande storleksvariation hos de utvandrande ålarna och storleken på spaltöppningen får därför konsekvens för hur stor andel av populationen som kan förväntas passera via turbinerna. I Figur 17 framgår hur denna andel påverkas av spaltöppningens storlek för två olika storleksfördelningar, enligt beräkningar med ekvation 17.



Figur 17. Andel av ålbeståndet i ett vattendrag som förväntas passera via fingaller med olika spaltöppning. Blå linje avser ett ålbestånd med medellängd 72 cm och standardavvikelse 10. Röd linje avser ett ålbestånd med medellängd 75 cm och standardavvikelse 15.

Dödligheten vid turbinpassage är storleksberoende, där stora individer löper större risk att skadas av turbinbladen jämfört med små. Ambitionen med att använda fingaller är därför att avleda den fraktion av populationen som löper störst risk att skadas i turbinerna. Problemet är att fingallren inte heller är ofarliga för ålarna, om det installeras på fel sätt. Vid strömhastigheter över ca 0.5 m/s löper ålarna risk att fastna på gallret och hindras från att ta sig loss av egen kraft (Calles & Bergdahl 2009). Vid ett försök med det gamla fingallret (20 mm och 63 graders lutning) i Ätrafors fastnade ca hälften av de stora ålarna på gallret (Calles *et al.* 2010). Efter installation av ett finare galler med ca 18 mm spaltöppning och 35 graders lutning blev dödligheten försumbar (Calles & Bergdahl 2009).

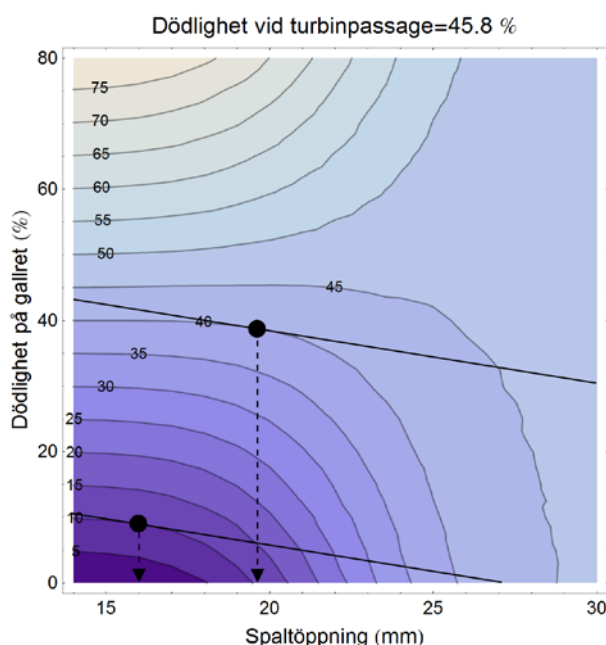
I Figur 18 redovisas resultat från två MC-simuleringar av passageförluster med Kaplanturbiner och intagsgaller vars spaltöppning varierats från 14-30 mm, för att visa hur kombinationen av dödlighet på fingaller och dödlighet via turbinpassage påverkar den totala dödligheten i de fall inget spill förekommer. För att detta skall kunna vara realistiskt krävs alltså att de ålar som inte omkommer på gallret eller passerar turbinerna kan avledas till en fångstanläggning och transporteras nedströms. Resultaten gäller även för den situation där spill förekommer, men att alla ålar först försöker passera via turbinerna och endast de ålar som är för stora för att passera fingallret men som inte fastnar där väljer att passera via spill. Alternativt kan resultaten i exemplet med lågt $Q_{\max}$ där dödligheten vid turbinpassage utan fingaller uppgick till ca 90 % skulle det gå att avsevärt minska dödligheten genom att använda ett fingaller med liten spaltöppning varvid den totala överlevnaden blir helt avhängig den dödlighet som uppkommer till följd av fingallret. I det andra exemplet med lågt $Q_{\max}$ uppgick dödligheten vid turbinpassage utan fingaller till 25 %. I den situationen ställs betydligt större krav på funktionaliteten med fingallret eftersom en dödlighet på fingallret som överskrider 25 % bidrar till att öka förlusterna totalt sett.



Figur 18. Total passedödlighet vid fullt pådrag i Kaplanturbiner och olika spaltöppningar i fingallret. Situationen avser frånvaro av spill. $Q_{\max}$ är $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (vänster) respektive $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (höger). Vid beräkningarna har hänsyn tagits till storleksselektiviteten i spaltöppningen och dödlighet på gallret.

Små ålar har sannolikt mindre kapacitet att ta sig loss från ett fingaller av egen kraft än stora ålar om strömförhållandena är de samma. Den procentuella dödligheten på fingallret ökar då med minskad spaltöppning eftersom allt större andel av de mindre ålarna kommer att hindras från att passera gallret. Genom att empiriskt fastställa sambandet mellan dödlighet på fingallret och spaltöppningen går det att räkna fram den optimala spaltöppningen för att minimera den totala dödligheten vid passage förbi kraftverket. Det framgår av Figur 18 att den optimala spaltöppningen är beroende av vilka förhållanden som råder. Med tanke på att förlustnivåerna skiljer sig mellan olika turbiner kan man dra slutsatsen att det inte finns en specifik optimal spaltöppning. Spaltöppningen behöver anpassas för varje enskilt kraftverk utifrån de förutsättningar som råder. I de fall dödligheten vid turbinpassage är låg kan man förvänta sig att den optimala spaltöppningen är så pass stor att den släpper igenom alla ålar. Om dödligheten via turbinerna däremot är mycket hög borde den optimala spaltöppningen vara så pass liten att den knappt släpper igenom några ålar över huvud taget. Svårigheten ligger i att identifiera de optimala spaltöppningarna mellan dessa ytterligheter. Ytterligare en faktor att ta hänsyn till är att gallerkonstruktionen också behöver fylla funktionen att hindra skräp, såsom löv, kvistar, etc., från att komma in i turbinerna. Med de modellverktyg som tagits fram i denna rapport går det att räkna fram den optimala spaltöppningen för alla tänkbara scenarier, se Figur 19 för ett exempel på hur det kan göras. Vid beräkning av den optimala spaltöppningen behöver man känna till hur dödligheten på fingallret förändras med spaltöppningen. I nedanstående exempel (Figur 19) har jag inte inkluderat strömhastigheten, men genom att mäta upp kritiska strömhastigheter för olika storlekar på ålar går det att förfinas analysen. Exemplet gäller MC-beräkningar av totala passageförluster förbi en Francisturbin ($Q_{\max} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$) med olika spaltöppningar i fingallret samt med

olika dödligheter på fingallret. Resultaten gäller i frånvaro av alternativa passagevägar för ålen. Den totala passageförlusten utan intagsgaller uppgår till ca 46 % räknat över hela populationen av blankålar som passerar. I exemplet med den lägre dödligheten på intagsgallret (den undre heldragna linjen) blir den optimala spaltöppningen 16 mm, vilket resulterar i 10 % förluster. I det andra exemplet blir den optimala spaltöppningen 19-20 mm, med en total dödlighet på 40 %. Det senare alternativet minimerar visserligen dödligheten, men dödligheten på fingallret är så pass hög att den totala förlusten endast skiljer ca 6 % från situationen utan fingaller. I sådana situationer handlar det snarare om att försöka installera fingallret på ett sådant sätt att dödligheten blir minimal.



Figur 19. Total passagedödlighet med Francisturbiner ($12 \text{ m}^3/\text{s}$, 50 % pådrag) och olika spaltöppningar i intagsgaller. Situationen avser frånvaro av spill. Vid beräkningarna har hänsyn tagits till storleksselektiviteten i spaltöppningen och dödlighet på intagsgallret. De heldragna linjerna exemplifierar olika storleksberoende dödligheter på intagsgallret, ökande dödlighet med minskande ålstorlek. Den övre linjen visar en situation med högre risk för ålen att fastna och bli kvar på fingallret jämfört med den undre linjen. De svarta punkterna indikerar de lägsta totala förlusterna längs de svarta linjerna och de streckade pilarna visar de optimala spaltöppningarna.

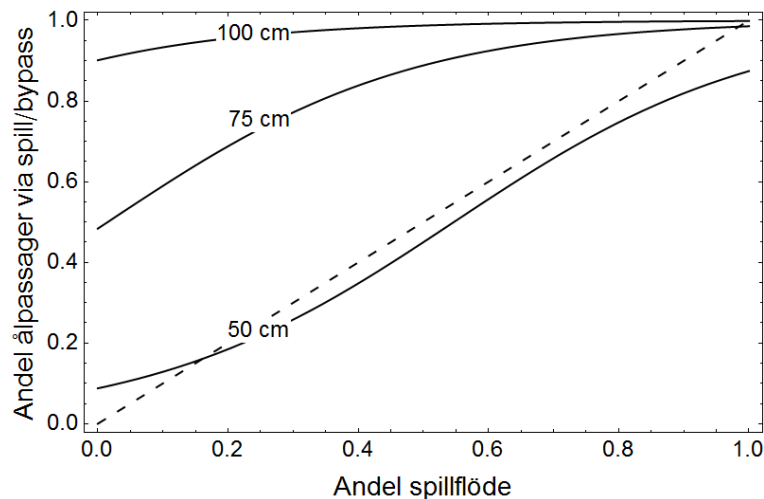
I de fall spaltöppningen inte får överskrida en viss gräns för att effektivt kunna hindra skräp från att komma in i turbinerna tillkommer den gränsen som en vertikal linje i figurerna. Den optimala spaltöppningen begränsas då till området vänster om den vertikala linjen.

I dessa analyser var antagandet att det kan förekomma dödlighet på fingallret och att den i vissa fall kan vara betydande, som med det gamla 20 mm gallret vid Ätrafors. Ett fungerande fingaller innebär dock inte enbart att dödligheten på gallret blir försumbar. Det krävs också att de ålar som inte passerar fingallret avleds eller fångas för nedtransport. Om en del av dessa ålar blir kvar uppströms resulterar det ändå i en passageförlust. Det är därför viktigt att utvärdering av fingaller även omfattar passageframgången för de ålar som inte passerade fingallret.

3 Alternativa passagevägar

3.1 Befintlig kunskapsnivå

Endast i ett fåtal vetenskapliga artiklar eller rapporter har man försökt skapa en förklaringsmodell som syftar till att skatta med vilken sannolikhet en fisk väljer en viss passageväg. Turnpenny & Hanson (1997) använder en enkel modell för att skatta förluster via turbinpassager. De har kompletterat den grundläggande förlustmodellen med avskiljningsgallrets avledningsförmåga. Travade *et al.* (2010) presenterade en regressionsmodell, med andel spillflöde och ålens storlek, för beräkning av sannolikheten att ålen väljer något av bypass/spill alternativen, dvs. att inte gå via turbinerna (Figur 20). I deras studie valde en stor andel av ålarna att passera via spill eller bypass och ju större ålen var desto högre var andelen som passerade via spill/bypass. Om motsvarande preferens hos ålarna gäller även vid de svenska kraftverken innebär det att ett spill på 10 % skulle leda till att mer än 50 % av ålarna passerar via spillvägen. Det innebär en halvering av passageförlusterna. Tyvärr tycks det inte fungera så bra att använda samma parametervärden i modellen för att göra beräkningar av andelen som passerar via spill/bypass i andra kraftverk. Den slutsatsen drar samma forskargrupp efter att ha undersökt ålvandringen även vid andra kraftverk i Frankrike. Det borde dock finnas någon gemensam nämnare, frågan är vilken eller vilka. Det finns med andra ord behov att ta fram mera kunskap om ålens beteende i den typen av valsituationer.



Figur 20. Logistisk regressionsmodell från Travade *et al.* (2010) som beskriver sannolikheten för en ål att passera via spill eller bypass som en funktion av andelen spillflöde och ålens längd. De tre heldragna kurvorna avser anpassningar för olika längder på ål och den streckade linjen visar 1:1 linjen. Tre års telemetridata vid ett och samma kraftverk ligger till grund för regressionsanpassningen.

En modell liknande Travades *et al.* (2010) är lämplig att använda inom ålförvaltningen eftersom den kan användas i kombination med förlustmodellen för att skatta hur stor andel av ålarna som går via turbinerna för att få ett mer realistisk mått på passageförlusterna. I deras modell har ålen två alternativ, att passera via spill/bypass eller att passera via turbinerna. Detta enkla analysförfarande ger inte ett helt korrekt svar på med vilken sannolikhet en ål väljer att passera via spill/bypass. Ålen kan välja ytterligare ett alternativ, nämligen att inte passera just då. Resultatet blir med det senare alternativet att den kan stanna ytterligare en tid tills motivationen att passera kraftverket blivit högre. Den typen av beteende har observerats i flera studier, se t ex Montén (1985) och Calles *et al.* (2010). Detta beteende hos ålen får konsekvensen att anpassningen till data med Travades modellformulering blir något felaktig, eller kanske snarare otillräcklig. Om ålarna väljer att tveka i vissa situationer borde resultatet bli att observationerna aggregeras till vissa flödeskombinationer, vilket inte fångas upp av den enkla regressionsmodellen. Det går att åtgärda problemet genom att inkludera ålens motivation att passera (vandra) i modellen. Konsekvensen av en sådan förändring av modellen blir att den inte bara kan förutsäga hur stor andel som passerar via spill utan också när de förväntas passera. En annan konsekvens är att det krävs en Markov-modell snarare än en enkel regressionsmodell. Markovmodellen är lite mer komplicerad än regressionsmodellen, men det faktum att resultaten omfattar både sannolikheten för val av passageväg och när ålarna förväntas passera uppväger den ökade komplexiteten.

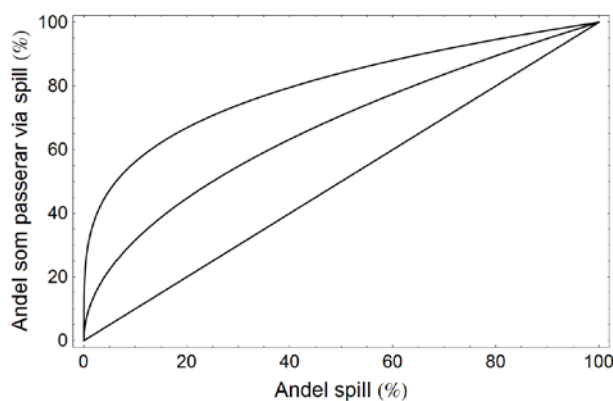
Innan jag går igenom Markovmodellen kan det vara på sin plats att använda betydligt enklare modeller, typ Travades *et al.* (2010), eller ännu enklare för att se hur mycket information om passager via spill det går att få ut av empiriska data där man använder flödesdata i kombination med uppgifter om slukförmåga och fångstdata om sådant finns att tillgå.

3.2 Preliminära beräkningar av passager via spill från flödesdata

Det går att få ut en hel del information om ålarnas beteende från fångstdata genom att analysera fångsterna tillsammans med omvärldsdata. Det finns ett antal publikationer i ämnet, se till exempel McCarthy & Cullen (2000), Acou *et al.* (2008) och Durif & Elie (2008). Dessa arbeten syftar till att förklara ålens vandringsmönster med variabler som flöde, tid på året, vattentemperatur, månfas, etc. Sådana förklaringsmodeller är bra att ha vid beräkning av till exempel hur stor andel av samtliga ålar som kan förväntas passera via spill. Om man har tillgång till fångstdata finns redan information om när ålen kommer till kraftverket. Det handlar då snarare om att försöka beräkna hur stor andel kan tänkas passera via spill under dagar på året. Ett exempel på hur man kan göra den typen av beräkning är att använda fångstdata tillsammans med flödesdata och kraftverkets maximala slukförmåga. För att hantera osäkerheten i beräkningarna behöver man inkludera flera olika scenarier som i detta fall innebär olika preferenser för ålarna att välja spillvägen i de olika scenarierna (Figur 21). Man brukar benämna denna typ av analyser för känslighetsanalyser, som just i det här fallet visar hur känslig

den beräknade andelen som passerar spill är beroende på vilket antagande man gör om ålens beteende.

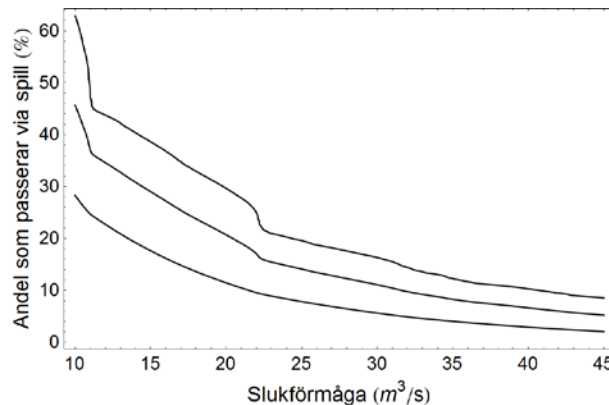
Jag visar med ett konkret exempel från Mörrumsåns nedre del (ålfångster från Havbältan, Arne Fjälling SLU-AQUA opublicerade data) vilken typ av resultat man kan få fram. Steg 1 är att beräkna andelen spill, i detta fall med dygnsmedelvärden för flödet, och använda det i var och en av de preferensekvationer som ges i Figur 21. Steg 2 är att för varje enskild dag multiplicera resultatet från steg ett med antal fångade ålar respektive dag för att få ett mått på det förväntade antalet ålar som passerar via spill de enskilda dagarna. I det sista steget i beräkningen dividerar man de dagliga värdena från steg 2 med totala antalet fångade ålar, vilket i detta fall utgjordes av 9826 individer. Om man upprepar dessa beräkningssteg för olika slukförmågor kan man välja slukförmåga i figuren för att representera olika kraftverk i samma region.



Figur 21. Tre hypotetiska preferenskurvor som visar i hur hög utsträckning ålarna väljer att passera via spillvägen i relation till andel spill av totalflödet. Funktionerna för linjerna är $Y = \text{AndelSpill}^A$, där exponenten A är 1 (rät linje), 0.5, respektive 0.25 räknat nerifrån. De två övre kurvorna stämmer bättre med Travades et al. (2010) empiriska resultat för ålens val av spillvägar än ett slumpmässigt val av passageväg (undre kurvan).

Beräkningarna för Mörrumsåns nedre del kompliceras något på grund av att man har lite olika spillregleringar i olika kraftverk under smoltutvandringsperioden. I några av kraftverken spiller man 50 % av flödet under perioden mitten av april och fem veckor framåt, medan man i ett av kraftverken spiller 100 %. Beräkningen måste därför göras i två steg, en beräkning för smoltutvandringsperioden och en beräkning för resterande delen av året. Den enklaste av dessa är smoltutvandringsperioden. 37 % av den årliga fångsten erhöles under den föreskrivna spillperioden. Det innebär att 37 % passerar via spill vid kraftverket där 100 % spill förekommer och beroende på preferens (exponenten A i Figur 21) för spillvägarna blir motsvarande siffror vid 50 % spill mellan 18 och 30 % vid de andra kraftverken, enbart under smoltutvandringsfasen. Under resten av året förekommer spill i samband med högflöden vilket i detta fall resulterade i ca 15-30 % förväntade passager (per år) via spill för ett kraftverk med 20 m³/s slukförmåga (Figur 22). De sammanlagda passagera via spill borde då

hamna mellan 33 och 60 % på årsbasis, vilket nästan innebär en halvering av de passageförlustsiffror som räknas fram med turbinpassagemodellen.

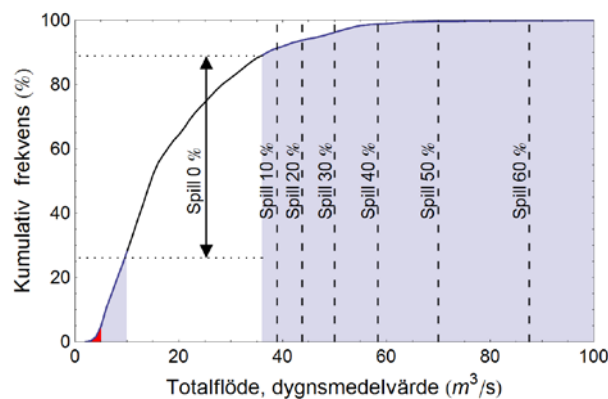


Figur 22. Beräknad andel av ålarna i nedre delen av Mörrumsån som passerar via spill under året, undantaget perioden från mitten av april och fem veckor framåt. Slukförmågan är hypotetisk och kan användas för att identifiera eventuella flaskhalsar i spillpassager. De faktiska slukförmågorna vid kraftverken i nedre delen av Mörrumsån varierar mellan 20 m³/s (Hemsjö nedre) och 28 m³/s (Hemsjö övre) medan kapaciteten vid Granö är betydligt större (60 m³/s). De tre kurvorna visar resultaten för var och en av de tre exponenterna (1, 0.5, 0.25, nerifrån och upp) för preferenskurvorna som visas i Figur 21.

Tillgång till fångstdata gör beräkningarna betydligt tillförlitligare än om man försöker sig på motsvarande beräkningar med enbart flödesdata och uppgifter om slukförmåga. I avsaknad av fångstdata måste man göra ytterligare antaganden som definierar hur ålarnas ankomst till kraftverket varierar under året. Här skulle det vara önskvärt med en ålvandringsmodell för svenska förhållanden. Trots osäkerheten i beräkningarna kan de ge värdefull information om det handlar om obetydliga mängder som kan passera via spill, eller om spill är så pass vanligt förekommande att man bör förvänta sig att en stor del av ålarna passerar via spill. Jag visar här med några exempel hur mycket passageförlusterna kan variera beroende på flödesförhållandena. Jag tillämpar passageförlustmodellen på dygnsbaserade flödesvärden från nedre delen av Sävveån under perioden 1990-01-01 – 2011-12-31 med data från SMHI:s VattenWeb och jag använder den sammanlagda slukförmågan i Jonsereds kraftverk för att identifiera spillperioder. I de två exemplen har jag valt att göra modellberäkningarna för Francisturbiner. I det ena alternativet finns en turbin med 35 m³/s slukförmåga och i det andra finns två turbiner med vardera 17.5 m³/s slukförmåga. Francisturbinerna körs (i modellen) vid flöden som ger belastningar inom intervallet 30-100 % (Små vattenkraftverk – En handbok). I exemplet med två turbiner lät jag den ena turbinen vara inaktiv vid flöden som underskred halva den sammanlagda slukförmågan för de två turbinerna. Pådraget i den aktiva turbinen höjdes då från 50 % till 100 %. Om flödet minskar ytterligare stängs även den turbinen av om det totala flödet underskrider 30 % av slukförmågan för den enskilda turbinen. Det sättet att köra turbinerna ger troligen inte maximalt energiutbyte, men det tjänar ändå syftet att visa den komplexitet som

uppstår i resultaten från modellberäkningarna. Jag använde endast en ålstorlek, 70 cm, i analysen.

Sammanställningen av flödesdata visade att det förekommer perioder då flödena är högre än den totala slukförmågan på 35 m³/s vilket innebär att det måste spillas vatten (Figur 23). Omfattningen av spill vid låga flöden beror helt och hållet på hur många turbiner som finns installerade och den minsta turbinens kapacitet. I de två exemplen som användes här förekom lågflödesspill under nästan 30 % av tiden med en turbin och i ca 5 % av tiden med två turbiner. Den sammanlagda andelen av tiden med spill i exemplet med en turbin uppgick till nästan 40 %, medan det blev ca 15 % med två turbiner.

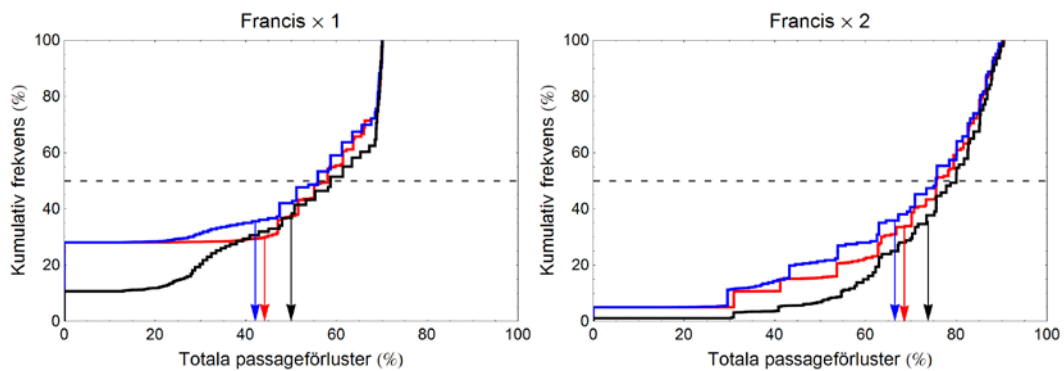


Figur 23. Kumulativ frekvensfördelning av totala dygnsmedelflöden vid Jonsered i Sävån, med data från perioden 1990-2011. Ljusblå färg nere till vänster i figuren visar förekomst av spill för scenariot med en turbin och den röda markeringen visar motsvarande lågflödesspill för två turbiner. Ljusblå markering till höger visar högflödesspill, där de streckade linjerna visar flödesgränserna för olika nivåer av spillflöden.

I exemplet med en turbin skulle en relativt stor andel av ålarna undvika att passera via turbinen, dels på grund av lågflödesperioder och dels på grund av spillperioder. Nästan 30 % av samtliga ålar skulle undvika turbinerna om de vandrar oberoende av det totala flödet. Om de istället vandrar i proportion till totalflödet sjunker den andelen till omkring 15 % (Figur 24). Av de resterande ålarna kommer ett antal att anlända kraftverket vid spill och kommer då beroende på beteendet att undvika turbinerna i större eller mindre omfattning. De högsta förlustsiffrorna uppgick till ca 70 %, vilket utgjorde nästan 30 % av tiden. I ca 40 % av tiden hamnade de beräknade förlusterna i intervallet 30 till 70 %. De genomsnittliga förlusterna hamnade mellan 40 och 50 %. Med två turbiner blev de beräknade förlusterna betydligt högre eftersom utrymmet med passagemöjligheter vid flöden under turbinernas nedre funktionsgräns krympt. Passageförlusterna ökade mer eller mindre kontinuerligt upp till ca 90 %. De genomsnittliga förlusterna blev ca 25 procentenheter högre jämfört med det förra exemplet.

Resultat från telemetristudier borde uppvisa motsvarande variation, vilket innebär att resultaten gäller för de flödessituationer när ålarna

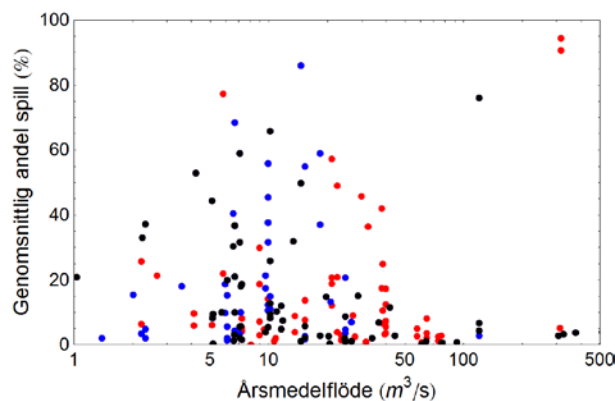
passerade det specifika kraftverket och att helt andra resultat kan förväntas om studien upprepas under andra flödesförhållanden. Det bör dock nämnas att exemplet med Jonsereds kraftverk inte parameteriserades fullt ut i modellen. I Jonsered finns fyra Francis turbiner med olika slukförmågor. Dessutom används intagsgaller med 20 mm spaltöppning för att hindra större fiskar (ca 75 cm ålar) från att passera via gallret, vilket torde förklara varför telemetristudien vid Jonsered resulterade i låga förluster (ca 18 %) då medelstorleken på ålarna var 84 respektive 91 cm under de två åren studien genomfördes (Lagenfelt & Hemmingsson 2011). De fiskar som avledds med fingallret har möjlighet att passera nedströms via en fisktrappa, även om det inte spills på grund av höga flöden. I Calles & Christiansson (2012) redovisas resultat från modellberäkningar som jag gjort för att komma åt de förväntade förlusterna vid bland annat Jonsereds kraftverk när de flesta turbinspecifikationerna var kända samt med hänsyn taget till fingallrets avledningskapacitet. De beräknade förlusterna uppgick då till 5-16 % vid pådrag mellan 50 och 100 % för ålar med en storleksfördelning med medellängd på 72 cm och standardavvikelse på 10.



Figur 24. Kumulativ frekvens av modellberäknade passageförluster baserade på dygnsmedelflöden från Sävåns nedre del under perioden 1990-2011. Den sammanlagda slukförmågan i turbinerna sattes till 35 m³/s. Beräkningarna gjordes för två olika turbinuppsättningar (1 st Francis – vänster panel, och 2 st Francis – höger panel). De färgade linjerna visar resultaten för tre olika ålbeteenden, röd - ålen saknar flödespreferenser och passerar via spill i proportion till andelen spill, blå - som röd linje men ålen passerar via spill direkt proportionellt mot roten ur andelen spill, svart - ålen vandrar i proportion till det totala flödet och väljer spillvägen som för den blå linjen. Pilarna anger respektive kurvas medelvärde. Skärningspunkterna mellan de streckade linjerna och de enskilda linjerna visar medianvärdena.

Med en mindre detaljerad sammanställning av spillflöden ger också värdefull information om i vilken omfattning det spills vid kraftverk i olika vattendrag. Kraftbolagen har rimligen bra kvalitet på flödesdata, både vad som går via turbinerna och vad som spills. Jag har inte haft tillgång till sådana data här, men väl data på utbyggnadsvattenföring och flödesdata från SMHI. Trots att det gick att få fram utbyggnadsvattenföringar för drygt 400 kraftverk var det endast hälften som uppfyllde kriterierna att det skulle finnas en

flödesmätstation i närheten, närmare än 20 km, i samma vattendrag. För ungefär hälften av de återstående var det längsta avståndet till en mätstation under 5 km. Flödesserierna var i genomsnitt 36 år långa. Den genomsnittliga andelen spill per år beräknat från dessa dygnsmedelvärden i kombination med utbyggnadsvattenföringen uppgick till 16 % och medianvärdet var 8 % (n=193). I Figur 25 visas resultaten från de enskilda kraftverken i relation till medelflödet. Även om en del flödesserier är gamla tycks inte spillmönstret påverkats nämnvärt vid årsmedelflöden upp till ca 20 m³/s. Över den flödesgränsen är det få kraftverk i det dataset som beräkningarna gjordes på som har något betydande spill, vilket kan tolkas som att man ökat kapaciteten i kraftverken där årsmedelflödena är högre. I många av vattendragen i södra Sverige finns små lagringsmöjligheter för att buffra flödena vilket innebär att eventuella tidsskillnader mellan flödesdata och kraftverkens etablering blir av mindre betydelse, se Tabell 4 för en sammanställning per vattendrag. Den största osäkerheten i resultaten blir därför eventuella avvikelser i flödena mellan kraftverken och mätstationerna, som exempelvis kan uppstå om mätstationen ligger uppströms kraftverket samtidigt som ett biflöde mynnar ut i huvudvattendraget mellan kraftverket och mätstationen (eller vice versa). Den här typen av spillberäkning bör därför helst göras med kraftverkens egna flödesdata för att undvika sådana osäkerheter i resultaten.



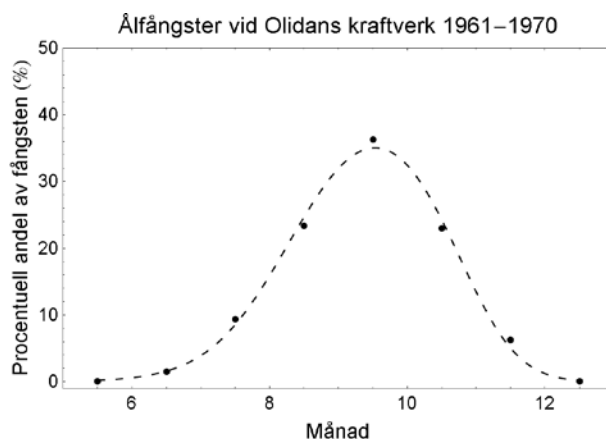
Figur 25. Genomsnittlig andel spill per år vid 193 olika kraftverk i södra Sverige. Röda symboler visar resultat som baseras på flödesserier som avslutades före 1990. Blå symboler baseras på flödesserier som fortsatte efter 1990. Svarta symboler avser beräkningar där längsta avståndet mellan kraftverket och mätstationen var mindre än 5 km, i övrigt samma som de blå punkterna. Kuhlins data med utbyggnadsvattenföring och SMHI:s flödesdata användes vid beräkningarna.

Tabell 4. Tabell. Genomsnittlig andel spillflöde per år i ett antal vattendrag i södra Sverige (Y<6700000, RT90). Utbyggnadsvattenföring från respektive kraftverk och flödesdata från dess närmaste flödesmätstation i samma vattendrag användes vid spillberäkningarna. Kuhlins data med utbyggnadsvattenföring och SMHI:s flödesdata användes vid beräkningarna. Notera att antalet kraftverk avser antalet där data fanns tillgängligt.

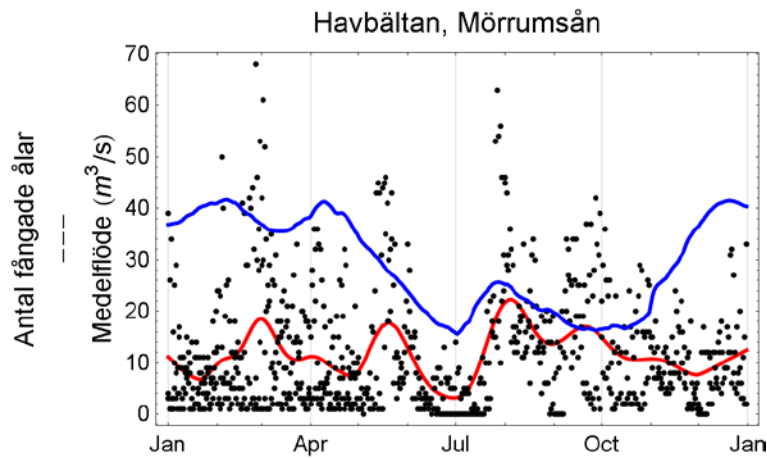
Vattendrag	Antal krv	Årsmedelflöde (m ³ /s)			Genomsnittlig andel spill per år (%)		
		Median	25:e perc.	75:e perc	Median	25:e perc.	75:e perc
Alsterån	11	10	10	10	38	11	45
Arbogaån	5	15	15	38	25	11	50
Assman	3	10	10	10	18	4	21
Ätran	5	34	31	39	3	2	3
Bäveån	4	4.1	4.1	4.1	10	6	10
Dalälven	7	317	313	326	5	3	91
Emån	15	15	6	22	9	4	15
Göta älv	2	515	515	515	2	0	4
Gullspångsälven	3	58	58	61	3	0	5
Hedströmmen	6	8.3	7.2	9.4	8	5	10
Helge å	5	25	23	25	2	2	2
Huskvarnaån	2	5	5	5	5	0	9
Klarälven	4	120	120	120	6	3	7
Kolbäcksån	11	27	15	27	3	2	7
Lagan	10	64	61	74	2	1	4
Lidan	2	6.6	6.6	6.6	35	30	40
Ljungbyån	2	2.3	2.0	2.7	18	15	21
Motala ström	3	77	77	92	1	1	3
Nissan	5	38	38	38	11	7	17
Nyköpingsån	1	21			13		
Röjdan	1	11			2		
Rönne å	2	11	10	12	11	8	14
Ronnebyån	7	7.2	5	7	5	4	8
Rössjöholmsån	1	4.2			53		
Rottnan	2	8.1	8	8	0	0	0
Säveån	9	6.7	7	7	37	21	37
Skållån	3	12	12	12	12	5	12
Stångån	2	14	14	14	6	4	9
Svartån	9	9.0	6.6	10.7	19	10	19
Sverkestaån	3	5.1	5.1	5.1	6	6	44
Tidan	21	10	7	10	19	11	32
Upperudsälven	8	40	18	40	10	4	17
Viskan	4	8.9	5.7	8.9	9	3	10

3.3 Markovmodell för beräkning av passager via spill och turbin

Grundkomponenten i Markov-modellen är den typen av logistisk regressionsmodell som Travade *et al.* (2010) använde. Den komplettering som behövs är sannolikhetsfunktioner för att hantera motivationen hos ålen. För att avgöra vilken typ av motivation som är relevant att inkludera i modellen behövs kunskap om ålens vandringsmönster och beteende. Passager förbi kraftverken tycks i stor omfattning ske vid höga flöden (Travade *et al.* 2010) och dessutom verkar ålen ha ett säsongrelaterat vandringsmönster i många av de vattendrag där studier gjorts. I de svenska vattendragen verkar det dock skilja sig en hel del mellan vattendrag. I Göta älv fanns ett uttalat säsongsmönster med vandring företrädesvis under sensommaren och hösten under perioden 1961-1970 (Figur 26, opublicerade data från Håkan Wickström, SLU-AQUA). I Mörrumsån verkar det snarare som att flödesregimen är det som avgör vandringen (Figur 27, opublicerade data från Arne Fjälling, SLU-AQUA)). Mindre vattendrag är mer flödeskänsliga och man kan därför förvänta sig att ålarna i mindre vattendrag nyttjar höghödesperioder för att underlätta vandringen. Jag väljer här att konstatera att det behövs mera kunskap om ålens vandringsmönster för att man skall kunna formulera en tillförlitlig passagemodell (utöver förlustmodellen) som är användbar inom förvaltningen.

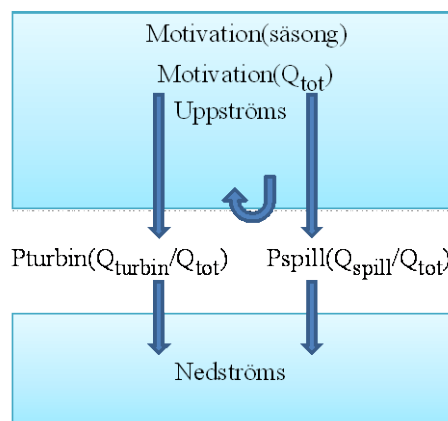


Figur 26. Säsongsfördelning av ålfångster vid Olidans kraftverk i Göta älv under perioden 1960-1970. Den streckade linjen är en anpassning till punkterna för att förtydliga säsongsmonstret. Totalt fångades ca 47.4 ton ål under perioden.



Figur 27. Säsongsfördelning av ålfångster vid Havbältan i Mörrumsån under åren 2003-2010 (svarta punkter). Den blå linjen visar medelflödet under motsvarande period. Den röda linjen visar en robust LOESS-anpassning till åldata ($\alpha=0.1$) för att framhäva säsongsmodellen.

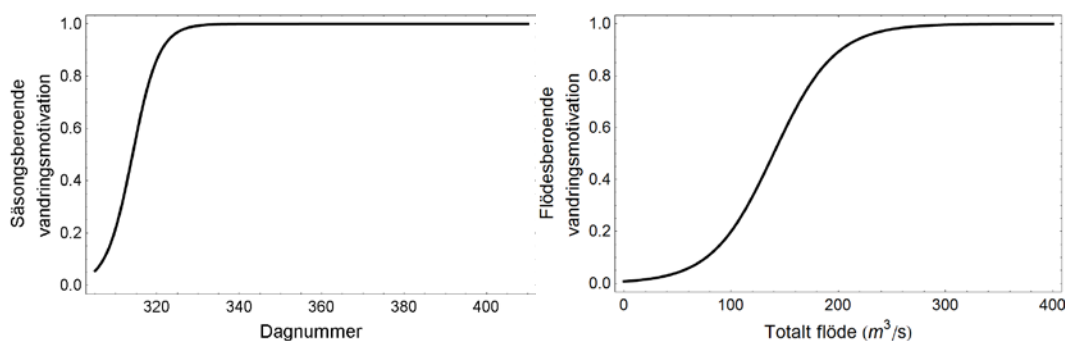
För att veta vilken typ av data som behövs för att parameterisera en vandrings- och passagemodell ger jag ett exempel med en Markov-modell som baseras på Travades *et al.* (2010) data. De presenterade tre säsongsdata med ålpassage (turbins, spill, fiskväg) samt flödesdata (totalflöde) i samma figurer där det framgick under vilka flödesförhållanden ålarna passerade och vilken väg de valde. Turbinflöden, spillflöden och flöden i fiskvägen fanns specificerade i texten. För att kunna använda dessa data fullt ut i en parameterisering av en Markov-modell valde jag att digitalisera flödesdata och passagedata från figurerna. Markovmodellens uppbyggnad utgörs i det här exemplet av två tillstånd (uppströms och nedströms kraftverket) samt fyra sannolikheter för att hantera utfallet av "beslut" som fattas av ålen på daglig basis (se Figur 28). Den ena sannolikheten ger motivationen att vandra och den multipliceras med sannolikheten att välja spill/bypass-vägarna. På samma sätt görs med sannolikheten att passera via turbinerna. Den resterande sannolikheten, att stanna, är inte definierad utan utgör den resterande sannolikheten för att summan av sannolikheterna skall uppgå till ett. Med andra ord, om ålen inte väljer att passera vare sig via spill eller via turbinerna så kommer den att finnas kvar uppströms kraftverket. För att förklara motivationen har jag valt att inkludera två sannolikhetsfunktioner, den ena ger den säsongsfördelningen och den andra ger motivationen att vandra som en funktion av totalflödet.



Figur 28. Schematisk skiss av Markov-modellen. De två tillstånden (var ålen befinner sig) beskrivs av boxarna, uppströms eller nedströms kraftverket. Pilarna anger möjliga alternativ för ändring av tillståndet, passera via spill, via turbin, eller stanna kvar uppströms. Varje alternativ som möjliggör en ändring (eller bibehållande) av tillståndet är förknippat med en sannolikhet. Tidssteget i Markov-modellen som används i rapporten är ett dygn, men det går att använda kortare tidssteg om underlagsdata har högre upplösning än på dygnsbasis.

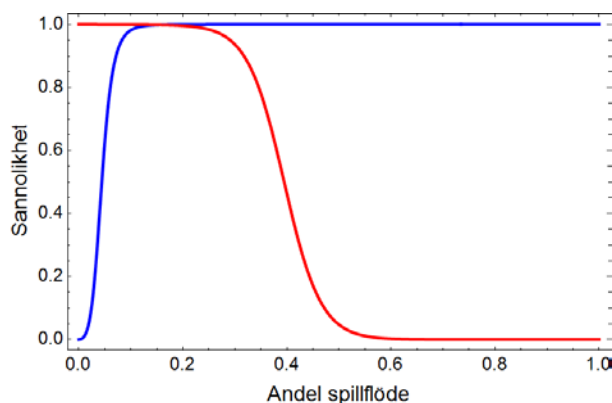
Det går att ha fler eller färre motivationsfunktioner i modellen och med bra kunskap och data om ålarnas vandringsbeteende bör det gå att formulera en eller ett par tillförlitliga funktioner. Jag har valt att använda logistiska funktioner för att beskriva sannolikheterna och parameteriserade dessa med hjälp av Travades *et al.* (2010) data. Med hjälp av de färdiga funktionerna kan man sedan räkna fram hur stor sannolikheten är för en ål att passera via spill respektive via turbinerna för varje enskild dag under säsongen. Slutresultatet blir två sannolikhetskurvor som sträcker sig över säsongen, eller så långt som data finns tillgängligt. Resultaten kan uppdateras (kompletteras) på daglig basis för att få en uppfattning om man skall förvänta sig "många" ålpassager just den aktuella dagen.

Parameteriseringen av motivationsfunktionerna går att göra oberoende av modellen om man har tillgång till fångstdata, alltså inte passagedata. Den parameteriseringen görs lämpligen med hjälp av logistisk regression i ett statistikprogram. Däremot är funktionerna som beskriver sannolikheterna för passage via spill respektive passage via turbinerna svårare att parameterisera. I praktiken behöver man starta med initiala parametervärden i dessa funktioner och sedan räkna fram resultaten för varje dag under säsongen och sedan summera upp överensstämmelsen, med hjälp av Log-likelihood, och sedan jämföra modellenanpassningen med utfallet från andra parametervärden. Det finns utvecklade matematiska metoder som kan användas för att relativt snabbt närma sig parametervärdena som ger den bästa anpassningen. I avsaknad av fångstdata valde jag att även parameterisera motivationsfunktionerna på detta sätt. De anpassningar jag fick fram för motivationsfunktionerna visas i Figur 29.



Figur 29. Sannolikhetsfunktioner (logistiska) som beskriver säsongsmotivationen (vänster) samt motivationen som en funktion av totalflödet (höger).

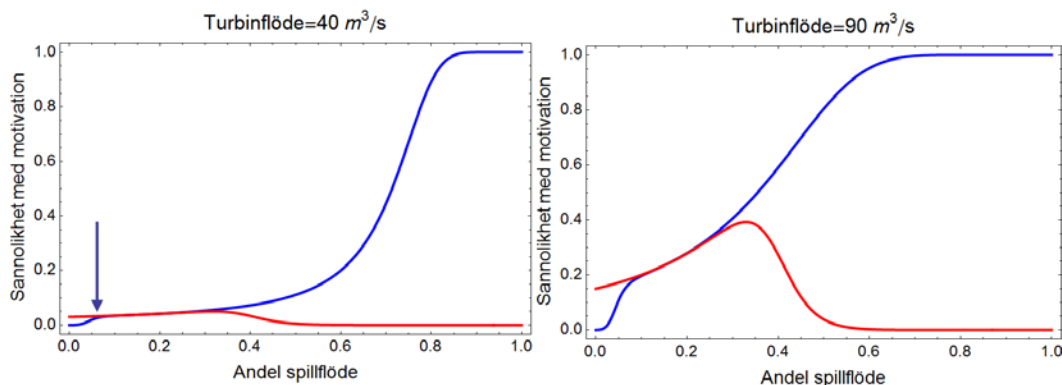
Även om det finns sannolikhetsfunktioner för spill- kontra turbinpassage i modellen så är dessa svåra att översätta till någon användbar information utan att multiplicera med säsongsmotivationen och flödesmotivationen. Den bästa anpassningen jag fick fram för de "avskalade" sannolikhetsfunktionerna för spillpassage respektive turbinpassage som en funktion av andelen spillflöde visas i Figur 30.



Figur 30. Sannolikhetsfunktioner (logistiska) som beskriver sannolikheten att passera via spill (blå linje) respektive via turbinerna (röd linje) som funktioner av andelen spillflöde, givet att ålen är motiverad att vandra.

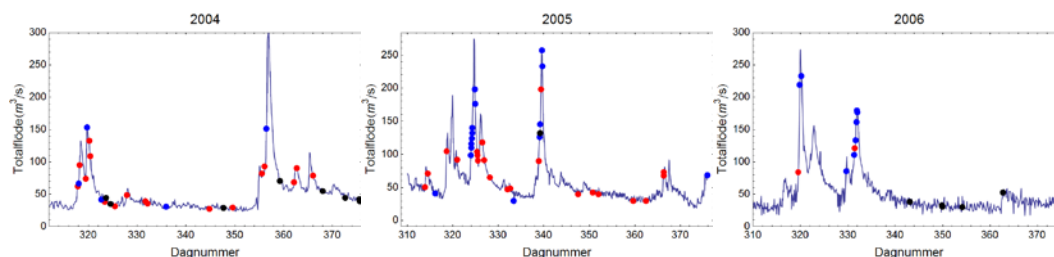
Eftersom motivationen kommer att variera under säsongen och med flödet kommer de faktiska sannolikheterna för att ålen skall passera via spill alternativt via turbinerna att variera med spillflödet på ett mer eller mindre komplicerat sätt från dag till dag. Se Figur 31 för ett exempel från dag nummer 350 där de sammanvägda sannolikheterna visas för två olika totalflöden. Vid låg andel spillflöde i den figuren domineras passagerna, om än få, av passager via turbinerna. Vid ca 5-30 % spillflöde är sannolikheterna ungefär lika stora att passera via spill som via turbinerna. Mellan 30 och 55 % spill ökar andelen som går via spill kraftigt och över 55 % spill väljer alla ålar som passerar att gå via spill (eller bypass). Notera dock att vid lägre andel

spillflöde än ca 70 % finns fortfarande en viss sannolikhet att inte passera alls och den andelen ökar ju mindre andelen spillflödet blir.

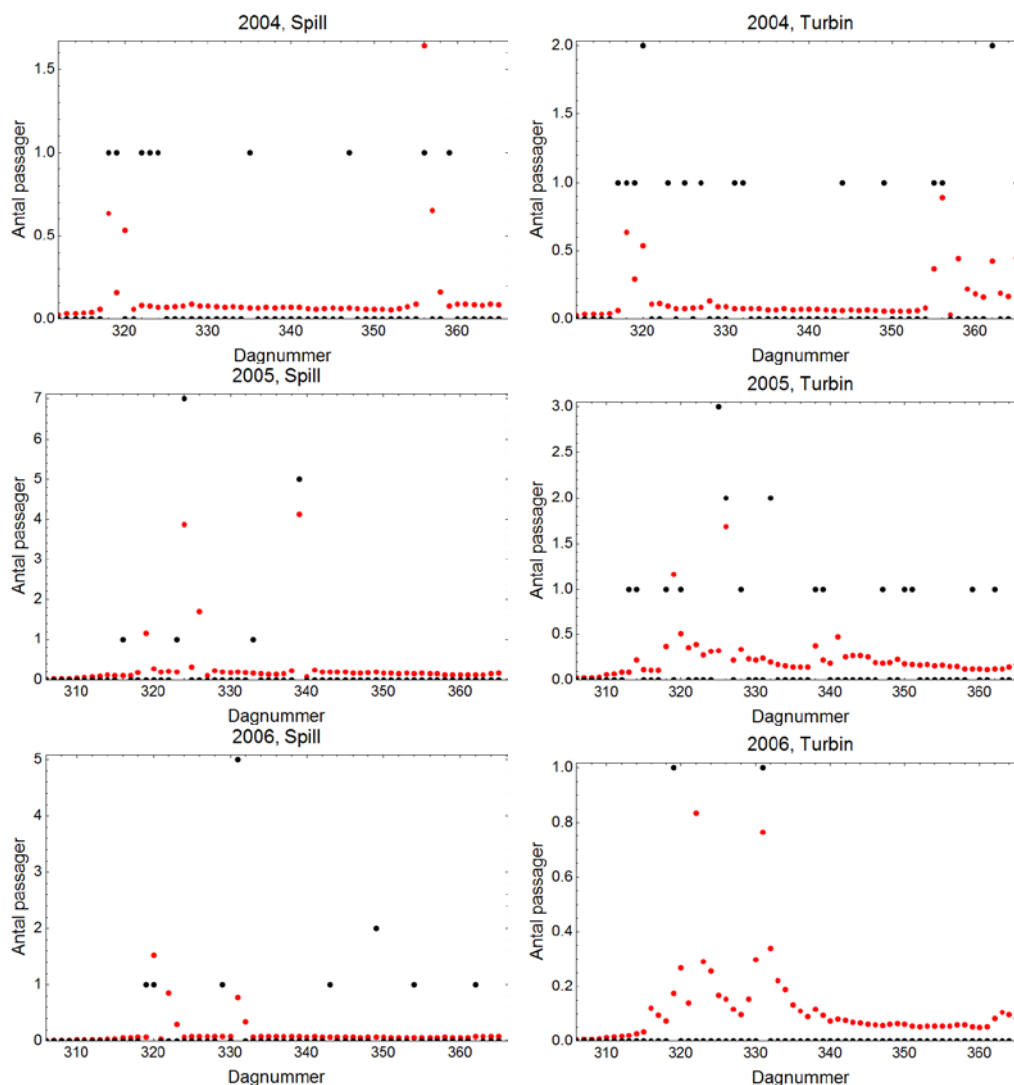


Figur 31. De realiserade sannolikhetsfunktionerna i Markov-modellen kan få väldigt speciella utseenden som kan vara svåra att återge med enklare regressionsmodeller. Blå linjer visar den totala sannolikheten att passera via spill och röda linjer visar motsvarande för passage via turbinerna. Den mörkblå pilen i den vänstra figuren visar den lägsta andelen spill/bypassflöde som förekom under perioden.

Även om det kan vara av intresse att se hur dessa funktioner ser ut i olika situationer så är det snarare de säsongsmässiga passagesannolikheterna som är mest värdefulla för förvaltningen. I just det här exemplet kan man se att passagesannolikheterna är högre vid högt spill, men sannolikheten kan vara olika hög vid ett och samma spillflöde beroende på när på säsongen som spillflödet förekommer (Figur 32, Figur 33). I Figur 33 har jag multiplicerat passagesannolikheten med antalet individer som finns kvar uppströms kraftverket för att få jämförbara nivåer på de faktiska passagerna och de förväntade. Modellanpassningen gjordes simultant för alla tre åren vilket innebär att sannolikhetsfunktionerna utgör en sammanvägning för hela perioden. I det sammanhanget är det värt att nämna att endast ytspill användes under 2004 och 2005 medan en bottenpassage fanns att tillgå för ålarna under 2006. Enligt modellen förväntades en större andel av ålarna passera via turbinerna under 2006, vilket inte realiserades. Jag tolkar den avvikelser som att bottenpassagen prioriterades i hög utsträckning av ålarna som passerade kraftverket 2006. Liknande preferenser för bottenpassager noterades även av Gosset *et al.* (2005) och Russon & Kemp (2011). Det finns dock en aspekt som försvårar tolkningen av passagerna via bottenpassaget. Travade *et al.* (2010) använde olika stora ålar de olika åren, vilket innebär att det inte går att säkert dra slutsatsen att det är bottenpassagen som är den viktigaste förklaringen till skillnaderna mellan år. Med samma argument blir storleksvariabeln i Travades regressionsmodell osäker. För att få en säker parameterisering av storlekens betydelse skulle man behövt använda samma storleksfördelning alla år.

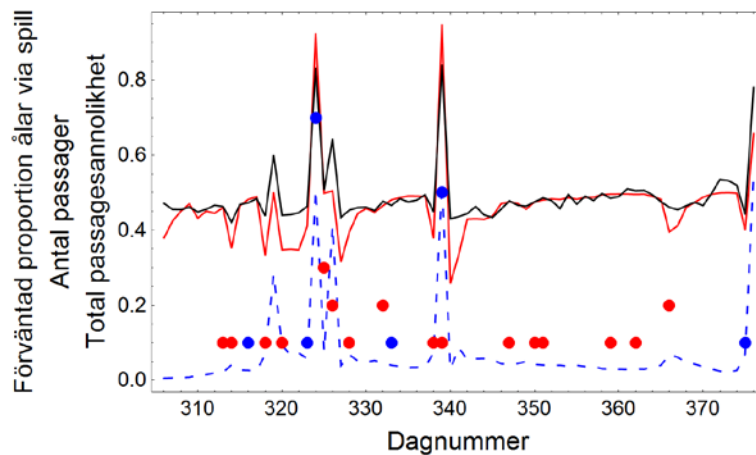


Figur 32. Data på ålpassager och totalflöde från Travade et al. (2010). Blå fyllda cirklar avser enskilda ålpassager via spill, svarta fyllda cirklar avser enskilda ålpassager via bypass / fiskväg och röda fyllda cirklar avser enskilda ålpassager via turbiner. Endast en del av vintersäsongen visas. Dagnumren efter årsskiftena adderades med 365 för att erhålla en linjär skala.



Figur 33. Observerade (svarta fyllda cirklar) och förväntade (röda fyllda cirklar) passager via spill/bypass och via turbinerna. Antal förväntade passager utgör produkten av sannolikheten att passera och antalet ålar som finns kvar uppströms kraftverket.

En direkt jämförelse med Travades *et al.* (2010) modell blir inte rättvisande eftersom jag inte haft tillgång till storleksdata på ålarna för att kunna inkludera den variabeln i Markov-modellen. För att kunna jämföra utfallet av de två modellerna har jag därför valt en ålstorlek i Travades modell som ger ungefär samma passagesannolikheter via spill under en stor del av tiden med båda modellerna för att se om och i vilka situationer resultaten skiljer sig i övrigt. Båda modellerna fångar upp de ökade sannolikheterna att ålarna skall passera via spill i samband med flödestoppar (Figur 34). Enligt Markov-modellen minskar andelen ålar som man skulle förvänta sig passera via spill efter flödestopparna på ett sätt som inte fångas upp i Travades modell. Markov-modellen ger dessutom information om när sannolikheten är hög respektive låg för ålarna att passera överhuvudtaget.



Figur 34. En jämförelse mellan utfallet för Travades *et al.* (2010) och Markov-modellen med 2005 års data visar att proportionen ålar som förväntas gå via spill skiljer sig en del i vissa flödessituationer även om mönstret överlag är likartat. Den röda linjen motsvarar resultat från Markov-modellen, svart linje motsvarar resultat med Travades modell och blå streckad linje motsvarar den totala sannolikheten (per individ) att passera via spill eller via turbinerna. Den totala sannolikheten har multiplicerats med 5 för att lättare kunna se säsongsmönstret. Blå punkter motsvarar antal ålar som passerade via spill och röda punkter det antal som passerade via turbinerna. Antalet ålar har dividerats med 10 för att passa in i figuren.

3.3.1 Underlag till parameterisering av modellen

För att den kompletta modellen skall bli användbar krävs att den parameteriseras med hjälp av data från empiriska studier. Det finns data från några enstaka studier som kan användas för en preliminär parameterisering, men det går då inte att garantera att modellresultaten är tillämpliga vid andra kraftverk än de få som användes vid parameteriseringen. För att kunna förbättra skattningarna av de totala passageförlusterna är det viktigt att kunna förklara ålens vandringsbeteende när ålen når dammen och kraftverksanläggningen. Vad får den att välja väg? Ålarna verkar inte följa

vattenströmmen helt slumpmässigt eftersom man då skulle se linjära samband i t ex Travades *et al.* (2010) modell. Montén (1985) med flera noterade att flera av ålarna väjde undan för turbinintaget, vilket antyder att ålarna är känsliga för vissa typer av förändringar i strömbildningen. Svårigheten ligger i att hitta rätt miljövariabler för att förklara undvikandebeteendet. Några sådana variabler skulle till exempel kunna vara vattnets acceleration vid turbinintaget, turbinintagets placering i relation till den övriga miljöns utseende/utformning (strandzonen, förekomst av påtagliga konstruktioner, djupförhållanden, etc.). På motsvarande sätt behövs bra förklaringsvariabler som är kopplade till varför ålarna ibland väljer att passera via spill och ibland inte.

4 Diskussion

Valet av modell för att beräkna vandringsförluster bör vara en avvägning mellan enkelhet att använda modellen och dess förmåga att återge förlusterna med en acceptabel felmarginal. Helst skulle man vilja ha en enkel modell som ger helt tillförlitliga beräkningar, men av de modeller som finns publicerade till dags dato ger även de mest detaljrika stokastiska modellerna en del avvikelser jämfört med de observerade värdena. MC-modellen som presenteras i denna rapport uppfyller kraven på enkelhet i och med att det behövs få specifika uppgifter om turbinerna och resultaten stämmer förvånansvärt bra överens med empiriska data med ål. För att göra modellerna användarvänliga har jag gjort en applikation i CDF-format (Computable Document Format) som kommer att finnas tillgänglig för nedladdning på ELFORSK:s hemsida. Om man däremot vill ha enkla formler med enstaka variabler för att skatta passageförluster via kraftverksturbiner (Kaplan) så hänvisar jag till Gomes & Larinier (2012), se formlerna i valideringsavsnittet i denna rapport.

Turbinpassagemodellen som presenteras i denna rapport gäller endast Kaplan- och Francisturbiner. Det används även andra turbin typer i en del av de svenska vattenkraftverken, men det är tveksamt om det är strategiskt att ta fram modellformuleringar för att hantera passageförluster för dessa turbin typer. De är totalt sett relativt få jämfört med Kaplan- och Francisturbiner. Ett alternativ vore att genomföra passagestudier vid något eller några kraftverk där andra turbiner än Kaplan och Francis används. Sådana studier kan utformas för att dessutom ge värdefull information om ålens beteende vid val av alternativa passagevägar. I samband med litteraturgenomgången inför rapportskrivandet har jag funnit enstaka uppgifter om passageförluster för ål i andra turbiner än Kaplan och Francis. Enligt dessa uppgifter tycks Peltonturbiner vara mycket svårare för ålarna att passera oskadda än via Kaplan- eller Francisturbiner.

För att kunna göra tillförlitliga förlustskattningar räcker det inte med en turbinpassagemodell eftersom en del av ålarna kan passera via spill, speciellt som ålarna företrädesvis tycks vandra vid höga flöden (e.g. McCarthy & Cullen 2000, Acou *et al.* 2008, Durif & Elie 2008, Travade *et al.* 2010). Det visade sig inte vara helt enkelt att få till en användbar passagemodell som även tar hänsyn till alternativa passagevägar. Det finns endast ett fåtal vetenskapliga publikationer som presenterar modeller för ålarnas val av väg vid kraftverkspassager. Travades *et al.* (2010) modell (logistisk regressionsmodell) är den som baserats på det största dataunderlaget, med tre års data. Med den modellen går det att räkna fram sannolikheter för passage via spill respektive turbin, men när denna modell applicerades vid andra kraftverksanläggningar i Frankrike än där den var framtagen tycks prediktionerna inte stämma speciellt bra. Det verkar därför som att lokala miljöbetingelser inverkar på ålarnas vägval. Men avvikelserna i prediktioner mellan olika anläggningar kan också bero på att modellen inte fångat de viktigaste komponenterna för att återge ålens val. I denna rapport presenterar jag en Markov-modell som ett alternativ till de logistiska

regressionsmodellerna. Markov-modellen gör det möjligt att beräkna passagesannolikheten för specifika dagar, vilket inte de enklare modellerna av typen logistisk regression klarar av. Även om en Markov-modell är den modelltyp som skulle passa bäst i ålförvaltningen så står man inför samma problem med att definiera ålens beteende i termer av ekvationer. Min bedömning är att det behövs mer detaljerad kunskap om ålens beteende i anslutning till kraftverksanläggningar för att kunna utveckla en användbar passagemodell som tar hänsyn till de passagevägar som ålen har att välja på. För att den nya informationen som genereras från sådana försök enkelt skall komma till användning krävs att det empiriska underlaget lagras i en databas som ålförvaltningen ansvarar för och som successivt fylls på med data från de undersökningar som görs i Sverige. Det skulle underlätta avsevärt för framtida analyser och utvärderingar. När man har tillräckligt med underlag för att parameterisera en modell som omfattar alternativa passagevägar har man den uppsättning modeller som behövs för att göra totala förlustberäkningar av ål i de svenska vattendragen. Ålförvaltningen får därmed möjlighet att utvärdera hur långt från målet vi befinner oss samt vilka åtgärder som gör störst nytta för ålbeståndet.

De förlustsiffror som återges i denna rapport gäller individer, inte biomassa. Men en omräkning till procentuella förluster i termer av biomassa visar att förlustsiffrorna som mest överstiger de individbaserade förlusterna med ca 3 procentenheter. Det ligger alltså inom felmarginalen för de resultat som redovisats, men det är ändå något att ha i åtanke eftersom EU:s direktiv gäller biomassa och inte individer. De genomsnittliga beräknade förlusterna per kraftverk uppgick i storleksordningen till mellan 60-70 % (n=179, Kaplan- och Francisturbiner). Med flödesviktade medelvärden minskade förlusterna till mellan 45 och 50 %, vilket är en följd av att de procentuella förlusterna är lägre i de största vattendragen. Vid dessa beräkningar har ingen hänsyn tagits till förekomst av fingaller eller spill. Fungerande fingaller med <22 mm spaltöppning minskar förlustsiffrorna påtagligt, under förutsättning att inte fingallret i sig orsakar ökad dödlighet. Därutöver minskar de beräknade förlusterna ytterligare om spill åtminstone periodvis förekommer vid kraftverken. Av de exempel jag gått igenom i denna rapport har det visat sig att förlustminskningen till följd av fingaller och spill kan bli betydande. De genomsnittliga förlustsiffrorna på mellan 60-70 % utan hänsyn taget till fingaller och spill torde därför vara i överkant av de totala passageförlusterna. I praktiken är de genomsnittliga värdena inte speciellt användbara i och med att resultaten visar att skillnaderna kan vara stora mellan olika kraftverk, antingen på grund av skillnader mellan turbinerna i kombination med flödesförhållandena eller på grund av lokala spillförhållanden eller användandet av fingaller. Det säkraste strategin inom ålförvaltningen är därför att använda sig av de bästa förlustskattningar det går att få för de enskilda kraftverken.

Hur stor andel av ålarna som passerar via spill eller fiskväg vid svenska vattenkraftverk i dagsläget är inte känt, men eftersom den siffran verkar vara helt avgörande för om målet med ålförvaltningsplanen skall kunna uppnås bör det ges hög prioritet att ta fram den typen av kunskap. En personlig reflektion utifrån analyserna och resultaten i denna rapport är att åtgärder som avleder ålarna från turbinerna krävs för att påtagligt kunna höja passageöverlevnaden. En lösning med fingaller kräver dock att det går hindra ålarna att

fastna på gallret. Om man kan få det att fungera så tycks fingaller vara den lösning som kan få ned förlusterna till så pass låga nivåer att beståndet inte äventyras. Med kunskap om när ålarna förväntas anlända till kraftverken går det sannolikt att få en större andel ålar att välja spillpassagen genom att temporärt öka spillet. Eftersom ålarna ofta tycks passera kraftverken i anslutning till flödestoppar borde ökat spill inte behöva innebära några omfattande energiförluster i sådana situationer. För att en avledning av ålarna via spillvägar skall vara en framkomlig väg krävs att ålarna som passerar via spill alltid överlever spillvägspassagen. Om spillförhållandena i sig medför påtaglig risk för ålen att omkomma framstår inte avledning av ålarna via spill som en lösning på förlustproblemet. Då återstår alternativet att fånga ålarna uppströms och frakta dem nedströms det nedersta kraftverket i vattendragen. Det alternativet framstår som det enda rimliga när det finns många kraftverk i vattendraget. Med fyra kraftverk i ett vattendrag får till exempel inte den genomsnittliga dödligheten per passage överstiga 20 % för att 40 % av ålarna i det vattendraget skall kunna nå havet, och då är inte dödligheten i fisket uppströms inräknat. Det verkar vara få kraftverk som ger så pass låga förluster och de som gör det har sannolikt fungerande fingaller för avledning av ålarna. Med fem kraftverk blir den kritiska förlustnivån ca 15 %, vilket troligen blir svårt att nå även med omfattande åtgärder vid vart och ett av kraftverken. Om de procentuella förlusterna är lägre än 40 % i något av vattendragen kan man enligt ålförvaltningsplanen använda detta som argument för att tolerera högre förluster i ett annat vattendrag. Men med tanke på de stora förväntade förlusterna vid enskilda kraftverka innebär det att en stor del av ålarna i så fall behöver sättas ut i vattendrag-sjöar utan vattenkraftsutbyggnad.

Om ålfiske tillåts i sötvatten behövs även en skattning av hur många ålar som finns totalt för att kunna veta om man uppnår 40 % -målet. De kvantitativa beståndsuppskattningarna måste dimensioneras för att få tillräckligt hög precision och noggrannhet skattningarna så att konfidensintervallen inte sträcker sig under 40 % till följd av otillräcklig provtagningsinsats eller på grund av systematiska fel. Lika vanskligt blir det att hävda att målet är nått om medelvärdet ligger på 20 % men det övre konfidensintervallet sträcker sig upp till 50 %.

Bakgrunden till detta arbete var att ett behov av modellverktyg för att stärka arbetet med ålförvaltningen. I takt med att jag blivit insatt i ålproblematiken och med de resultat jag fått fram framstår det allt mer tydligt att vi orsakar stora förluster för ålbeståndet genom att transportera ålarna uppströms vattenkraftverk. Det bör gå att reducera förlusterna en hel del genom relevanta åtgärder vid kraftverken, men det finns andra förvaltningsåtgärder som åtminstone på kort sikt skulle kunna ge ännu större effekt. Med tanke på att ålbeståndet är avsevärt mycket lägre nu än för 30-40 år sedan så måste tolkningen bli att det nu finns utrymme för mycket mer ål i de vattendrag där det inte finns några vandringshinder än de som lyckas ta sig dit på egen hand. Jag tänker speciellt på Mälaren. Om man vill öka verkningsgraden i de svenska ålutsättningarna så kan det enkelt åstadkommas genom att ändra nuvarande utsättningsstrategi och göra en stor del av utsättningar i Mälaren istället för i Vänern. Det skulle kunna ge ett visst utrymme för ökat fiske på ål i Mälaren eftersom en del av ålarna ändå förväntas omkomma i kraftverkspassager om de istället hade satts ut

uppströms kraftverk i andra vattendrag. Å andra sidan underlättar inte ett ökat fiske möjligheten för ålbeståndet att återhämta sig. Det är inte dödsorsaken i sig som hotar ålbeståndet utan omfattningen av dödligheten.

5 Slutsatser och förslag till prioriteringar i det fortsatta arbetet

De modellverktyg som presenteras i rapporten har visat sig vara väl lämpade för att få svar på många av de frågor man har inom ålförvaltningen rörande passageförluster i anslutning till vattenkraftverk. Ramverket för modellerna är relativt komplett, men speciellt den modell som har att hantera val av passage behöver parameteriseras för svenska förhållanden för att den skall bli användbar inom förvaltningen. Det har ändå gått att få en uppfattning om vad som krävs i form av åtgärder för att kunna få ned dödligheten till en så pass låg nivå att EU:s förvaltningsmål på 40 % lyckad utvandring kan nås. Eftersom dödligheter över 25 % per passage leder till svårigheter att uppnå målet om det finns tre eller fler kraftverk i vattendraget så måste minst hälften av ålarna passera via spill. Frekvensen av spill vid kraftverken verkar endast i undantagsfall kunna möjliggöra det utfallet. En åtgärd som har kapacitet att påtagligt minska förlusterna är att installera fingaller där det förväntas passera större mängder av ål och se till att fingallren i sig inte orsakar dödlighet. Erfarenheter från andra länder gällande alternativa tekniska lösningar för avledning av ål borde ges hög prioritet att följas upp. Oavsett teknisk lösning för avledning från turbinintaget behövs en fungerande utväg för ålen att ta sig förbi kraftverket utan att skadas. Den utvägen behöver i vissa fall vara en fälla som samlar upp ålarna så att de kan transporteras och släppas nedströms det nedersta kraftverket. Det senare torde vara aktuellt när det finns fler än 2-3 kraftverk i vattendraget.

Med den kunskap och insikt jag fått kring passageförlusterna i och med detta arbete är det några olika typer av prioriteringar som jag anser behöver göras dels för att förbättra skattningarna av förlusterna vid kraftverkspassage och dels för att minska passageförlusterna:

- De modellberäknade förlusterna av ål via turbinpassage har visat sig ge bra överensstämmelse med empiriska data. Med tanke på att det mesta av de tillgängliga specifikationerna gällde Kaplanturbiner så finns det ett behov att validera tillförlitligheten i de modellberäknade resultaten för Francisturbiner. Först och främst skulle man kunna förbättra skattningen av osäkerheten i den fristående applikationen för förlustberäkningar. Det kan göras genom att samla in uppgifter om inloppshöjder i det 40-tal Francisturbiner som Calles & Christiansson (2012) samlat in övriga tekniska uppgifter för. Dessa uppgifter kan användas till att förbättra den matematiska funktionen som beskriver sambandet mellan inloppshöjd och maximal slukförmåga. I nuläget baseras den funktionen på uppgifter från nio Francisturbiner. På motsvarande sätt skulle funktionen för navdiametern för Kaplanturbiner kunna förbättras genom att inhämta dessa uppgifter för de Kaplanturbiner som anges i Calles & Christiansson (2012). Därutöver behövs data på observerade förluster för ett flertal

Francisturbiner med olika kapacitet och helst också vid olika belastningsgrad av turbinerna.

- Eftersom förlusterna av ål vid kraftverkspassage ofta är höga i samband med turbinpassage kommer förlustberäkningarnas tillförlitlighet i stor utsträckning att bero på hur stor andel av ålarna som passerar via spill eller alternativa passager. Det är därför viktigt att de framtida studier som genomförs med inriktning mot passage av ål vid kraftverk kan identifiera vilken passage ålen valde. Med sådana data från flera olika kraftverk, i kombination med överlevnadsuppgifter samt vilka flödesförhållanden, totalt och via turbinerna som gällde vid det ögonblick som ålen passerade, kan man förbättra tillförlitligheten i en komplett passageförlustmodell. Med sådana data kan även parameteriseringen förbättras för den del av modellen som hanterar förluster via turbinpassage. För det sistnämnda skulle man även behöva identifiera vilken av turbinerna, där det finns flera, som ålarna passerade.
- Studier av passageframgång med märkt fiskger visserligen svar på frågan hur stor passageförlusten var under de rådande omständigheterna. Eftersom det används ett begränsat antal individer vid sådana studier kan dessa resultat inte extrapoleras till hela populationen eftersom tiden för vandring för populationen som helhet i vattendraget kan skilja från den eller de tider försöken genomfördes. För att kunna göra en uppräknig till populationsnivå behövs därför även uppgifter om ålpopulationernas tids- och säsongsmässiga vandringsmönster för de aktuella vattendragen. Tillsammans med uppgifter om flöde via spill respektive via turbinerna kan sedan mera tillförlitliga förlustberäkningar göras.
- Mera kunskap behövs om fingaller, såsom val av spaltöppning, lutning, avledningsmöjligheter, etc. Högsta prioritet bör ges för de kraftverk där begränsat spill förekommer samtidigt som passageförlusterna via turbinerna är stora. Detta kan lämpligen innefatta fångstanläggning vid "översta" kraftverket i ålförande vattendrag med fler än två kraftverk för att kunna minska förlusterna påtagligt.
- Omprioritering av en stor del av ålutsättningarna i Vänern till Mälaren. Om man vill ta ett krafttag för ålen så blir verkningsgraden betydligt högre om man sätter ut en andel av de tilltänkta Vänerålarna i Mälaren istället. Eftersom den naturliga invandringen i Mälaren idag är betydligt lägre än vad den varit så torde det finnas utrymme för komplettering med utsättning av ål. Att göra utsättningar i Mälaren genom att öka utsättningarna totalt bidrar däremot inte till att rädda flera ålar, såtillvida inte dödligheten är lägre i Mälaren än vad de skulle varit i de habitat de annars skulle växt upp i.

6 Erkännande

Detta projekt finansieras av programmet "Krafttag ål" som är ett samarbete mellan vattenkraftföretag via ELFORSK och Havs- och vattenmyndigheten. Jag vill också passa på att tacka Olle Calles (Karlstads universitet), samt Håkan Wickström och Arne Fjälling vid Sveriges lantbruksuniversitet (SLU-AQUA) för värdefull information och tillhandahållande av fångstdata för ål. Jag vill också tacka Håkan Wickström för att han med sin ålkompetens tog sig tid att läsa igenom och ge värdefulla synpunkter på denna rapport. Jag vill också tacka Fredrik Nordwall, Havs- och vattenmyndigheten, för information om den svenska ålförvaltningsplanen.

7 Litteratur

- 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.
- Adam, B. Experience with eel protection at hydropower stations. Power point presentation (pdf-format). Intitut für angewante Ökologie, Kirtorf-Wahlen, Germany.
http://www.fishsec.org/downloads/1176486317_84546.pdf
- Bell, M. 1991. Revised compendium on the success of passage of small fish through turbines. Report to US Army Corps of Engineers, Portland, Oreg.
- Bruijs, M.C.M., H.J.G. Polman, G.H.F.M. van Aerssen, R.R. Hadderingh, H.V. Vinter, C. Deerenberg, H.M. Jansen, U. Schwevers, B. Adam, U. Dumont & N. Kessels. 2003. Management of silver eel: Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse. Final Report Contract Q5RS-2000-31141. 50180283-KPS/MEC 03-6183. KEMA Nederland B.V., Anhem, the Netherlands.
- Calles O. & D. Bergdahl. 2009. Ålens nedströmspassage av vattenkraftverk. Forskningsrapport, Karlstad University Studies 2009:19, Universitetstryckeriet, Karlstad.
- Calles, O. & J. Christiansson. 2012. Ålens möjlighet till passage av kraftverk. Rapport, ELFORSK.
- Calles O., Olsson I.C., Comoglio C., Kemp P.S., Blunden L., Schmitz M. & Greenberg L.A. 2010. Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea. *Freshwater Biology*, 55, 2167-2180.
- Calles, O., S. Karlsson, M. Hebrand and C. Comoglio. *In Press*. Evaluating technical improvements for downstream migrating diadromous fish at a hydroelectric plant. *Ecological Engineering*.
- Dekker, W., H. Wickström, & J. Andersson. 2011. Ålbeståndets status i Sverige 2011. Aqua reports 2011:1. Sveriges lantbruksuniversitet, Drottningholm. 78 s.
- 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, 57-67.
- Deng Z., Carlson T.J., Ploskey G.R., Richmond M.C. & Dauble D.D. 2007. Evaluation of blade-strike models for estimating the biological performance of Kaplan turbines. *Ecol. Model.*, 208, 165-176.
- Durif C.M.F. & Elie P. (2008). Predicting downstream migration of silver eels in a large river catchment based on commercial fishery data. *Fisheries Manag Ecol*, 15, 127-137.
- Environment Agency. 2011. Screening at intakes and outfalls: measures to protect eel. The Eel Manual – GEHO0411BTQD-E-E. Environment Agency, Horizon house, Deanery Road, Bristol BS1 5AH, UK. 129 sid. (Finns i pdf-format på: <http://publications.environment-agency.gov.uk/>).
- Ferguson J.W., Ploskey G.R., Leonardsson K., Zabel R.W. & Lundqvist H. 2008. Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess

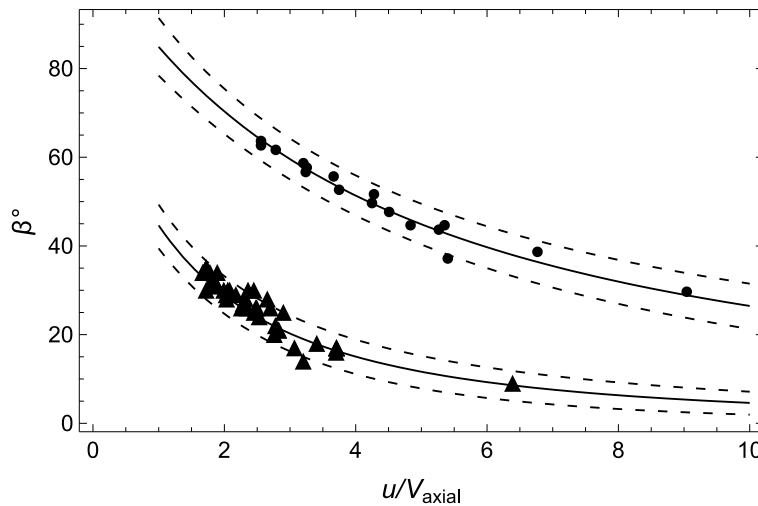
- mitigation strategies for fish passing dams. *Can J Fish Aquat Sci*, 65, 1568-1585.
- Jo2008/3901. Förvaltningsplan för ål. Jordbruksdepartementet, 2008-12-09.
- Gomes, P. & M. Larinier. 2012. Etablissement de formules prédictives de mortalité des anguilles lors du transit à travers les turbines Kaplan. Programme R&D Anguilles et ouvrages - Solution technique - Séminaire de restitution 28-29 novembre 2011, Paris.
<http://www.onema.fr/IMG/F6mortalitturbinesKaplan.pdf>
- 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.
- Ide C., De Schepper N., Christiaens J., Van Liefveringe C., Herrel A., Goemans G., Meire P., Belpaire C., Geeraerts C. & Adriaens D. 2011. Bimodality in head shape in European eel. *J Zool*, 285, 230-238.
- Kuhlin, L. 2012. Interaktiv kraftverksdatabas,
<http://vattenkraft.info/?page=main>, Informationen som har använts i denna rapport hämtades från databasen den 2012-02-22.
- Lagenfelt, I. & H. Westerberg. 2009. Ål i Göta älv, Säveån och Rolfsån - telemetristudier på blankålsvandring. ISSN: 1403-168X. Rapportnr: 2009:27. Länsstyrelsen i Västra Götalands län, Vattenvårdsenheten.
- Lagenfelt, I. & M. Hemmingsson. 2011. Älvvandring i Rolfsån, Säveån och Enningdalsälven - Telemetristudier på blankål 2008-2009. Rapport, Fiskeriverkets Utredningskontor i Göteborg. 32 sid.
- McCarthy, T.K. & P. Cullen. 2000. The River Shannon silver eel fisheries: variations in commercial and experimental catch levels. *Dana*, 12, 59-68.
- Montén E. 1985. Fish and Turbines: Fish Injuries during Passage through Power Station Turbines. In. Vattenfall Stockholm, Sweden.
- Pavlov, D., Lupandin, A., and Kostin, V. 2002. Downstream migration of fish through dams of hydroelectric power plants. [In Russian. English translation by T. Albert and Edited by G.F. Čada. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. Rep. ORNL/TR-02/02.]
- Ploskey, G., and Carlson, T. 2004. Comparison of blade-strike modeling results with empirical data. Battelle Pacific Northwest National Laboratory Rep. No. PNNL-14603 to US Army Corps of Engineers, Portland, Oreg. Available from
http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-14603.pdf
- von Raben, K. 1957. Zur Frage der Beschädigung von Fischen durch Turbinen. *Die Wasserwirtschaft*, 4: 97-100.
- Russon I.J. & Kemp P.S. 2011. Experimental quantification of the swimming performance and behaviour of spawning run river lamprey *Lampetra fluviatilis* and European eel *Anguilla anguilla*. *J Fish Biol*, 78, 1965-1975.
- Skagerstrand, A. 2008. Analys av ål och smoltpåverkan i turbinen i Torsebro. Rapport till länsstyrelsen i Skåne län. Vattenfall Power Consultant AB.
- Travade, F. 2008. Power point presentation at EIFAC Working Party on Fish Passage Best Practises. Krakow, Poland, 3-6 June 2008.
- 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*.

- Tikhij, M.V., and P.V. Viktorov. 1940. Fish Resources and HPP Construction. M.: Pithsepromizdat, 200 p.
- Turnpenny, A.W.H. and Hanson, K.P. 1997. Fish passage through small hydro-turbines: theoretical, practical and economic perspectives. Proceedings of the Hidroenergia 97 conference, September 29th – October 1st, 1997, Dublin, Ireland: 451-463.
- Turnpenny, A.W.H., S. Clough, K.P. Hanson, R. Ramsay & D. McEwan. 2000. Risk assessment for fish passage through small, low-head turbines. Technical Report ETSUH/06/00054/REP, Energy Technology Support Unit, Harwell, United Kingdom.
http://www.thaaquatic.co.uk/index_html_files/Risk%20Assessment%20of%20Fish%20Passage%20through%20small,%20low-head%20turbines.pdf
- Wolfram Research, Inc., 2010. Mathematica, Version 8.0, Champaign, IL.

8 Appendix

8.1 Osäkerhet vid skattning av β

I de fall det inte går att mäta turbinbladsvinkeln β för det aktuella flödet och där tekniska uppgifter om β är svåra att få tag på från tekniska specifikationer eller från turbintillverkaren kan man ändå göra förlustberäkningarna genom att skatta β med hjälp av nedanstående funktioner (ekvation 18 och ekvation 19) som bygger på de intervall som Montén (1985) angav i sin rapport. Funktionerna är specifikt formulerade för Mathematica ver. 8 (Wolfram Research, Inc., 2010), men kan enkelt omformuleras till annan mjukvara. Funktionerna skapar slumpvärden från en normalfördelning som har medelvärde som motsvaras av kvoten mellan u och V_{axial} (V_r för Francisturbiner) och standardavvikelse som motsvaras av halva intervallet från medelvärdet till någon av de streckade linjerna (se Figur 35).



Figur 35. Relativa strömriktningar (β) för olika turbiner och olika belastning från Montén (1985) i relation till det av Montén föreslagna sambandet med kvoten mellan den absoluta hastigheten och den relativa inflödes hastigheten (u/V_{axial}). Fyllda cirklar motsvarar resultat från Francisturbiner och fyllda trianglar motsvarar resultat från Kaplanturbiner.

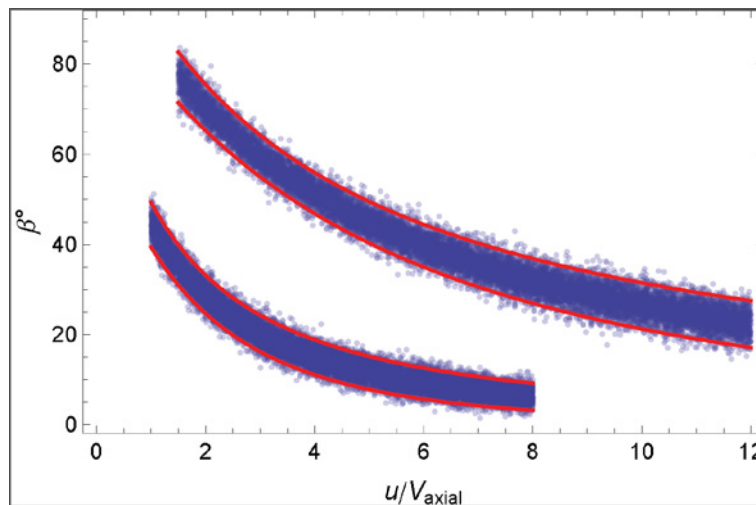
$$\text{RndKaplan}\beta[u, V_{axial}] := \text{Module}[\{sd\}, sd = \left(\frac{246}{(2.1 + u/V_{axial})^{1.42}} - \frac{155000}{(7 + u/V_{axial})^{3.98}} \right) / 4; \text{RandomVariate}[\text{NormalDistribution}[\frac{542}{(2.8 + u/V_{axial})^{1.87}}, sd]]]$$

ekvation 18

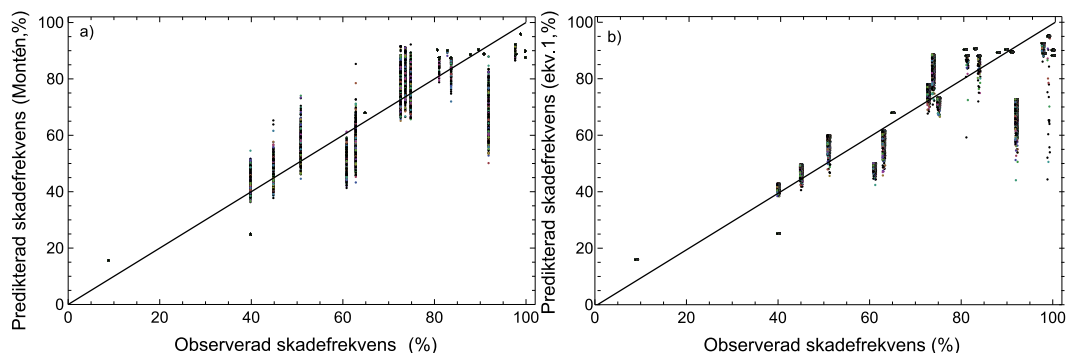
$$\text{RndFrancis}\beta[u, V_r] := \text{Module}[\{sd\}, sd = \left(\frac{427}{(3.7+u/V_r)^{0.996}} - \frac{45400}{(12+u/V_r)^{2.48}} \right) / 4; \text{RandomVariate}[\text{NormalDistribution}[\frac{1320}{(6+u/V_r)^{1.41}}, sd]]]$$

ekvation 19

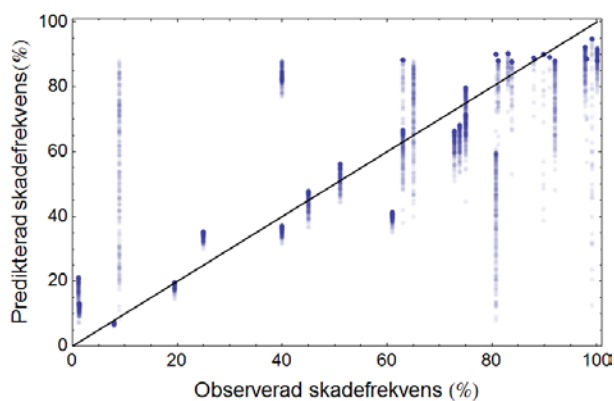
De slumpade värdena hamnar i enstaka fall utanför det intervall som Montén hade ritat in, men med tanke på det stora antalet punkter i Figur 36 så torde den avvikelser inte ha någon större betydelse. Det vore dock önskvärt om ytterligare empiriska data kunde komplettera Monténs data för att få en mer tillförlitlig skattning av β . För att kunna se hur denna osäkerhet i β återverkar på de predikterade förlusterna beräknade med hjälp av ekvation 6 och ekvation 10 vid jämförelse med de observerade förlusterna av ål i Monténs (1985) rapport har jag slumpat 1000 β -värden för vart och ett av experimenten som Montén gjorde. u/V_{axial} kvoten beräknades från de tillgängliga uppgifterna. Resultaten från denna analys visar att osäkerheten i förlustskattningen ibland kan bli betydande (upp till ± 10 -15 %) och i vissa fall påverkas inte resultatet nästa alls. Ett tydligt resultat var att osäkerheten i förlustskattningen generellt blev högre med Monténs beräkningsmodell (ekvation 10) jämfört med ekvation 6, se Figur 37. Orsaken till att felet vanligen blir större med ekvation 10 har med utformningen av ekvationen att göra så att den ekvationen ger en större felfortplantning vid mätfel i β än vad ekvation 6 ger. Jag gör en noggrannare analys av inverkan av det mätfelet på skattning av den relativa öppningens storlek i nästa avsnitt.



Figur 36. Slumpade β -värden med hjälp av ekvation 18 (Kaplan, nedre punktsvärmen) och ekvation 19 (Francis, övre punktsvärmen). De röda linjerna motsvarar de streckade gränserna för intervallen enligt Montén (1985). För var och en av slumpningsomgångarna (Kaplan respektive Francis) beräknades 20000 β -värden utifrån slumpade u/V_{axial} -värden.



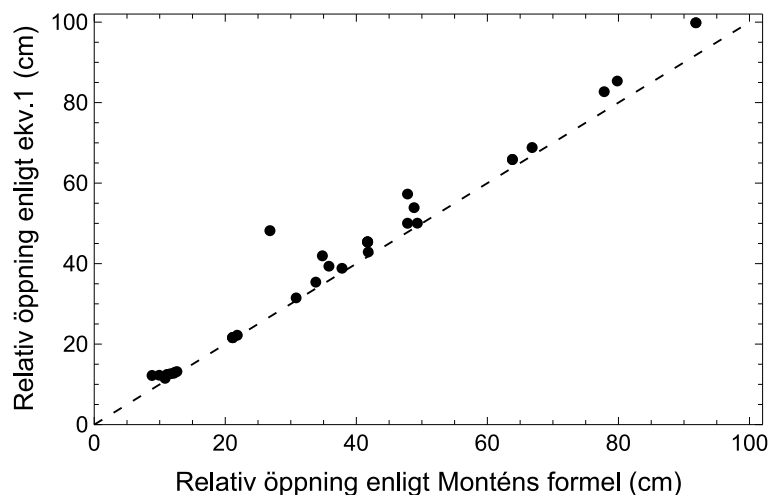
Figur 37. Predikterad skadefrekvens med hjälp av Monténs föreslagna samband mellan β och kvoten mellan skovelhastigheten (u) och inflödes hastigheten (V_{axial}) utifrån ekvation 19 och ekvation 20. I delfigur a) är prediktionerna beräknade med Monténs formel för (den relativa öppningen (s) och i b) har beräkningen gjorts med ekvation 1. Endast åldata från Montén (1985) har använts i figurerna.



Figur 38. Predikterad skadefrekvens med hjälp av Monténs föreslagna samband mellan β och kvoten mellan skovelhastigheten (u) och inflödes hastigheten (V_{axial}) utifrån ekv. X. Såväl åldata som smoltdata från Montén (1985) har inkluderats i figuren.

8.2 Osäkerhet vid beräkning av den relativa öppningen till följd av mätfel i β

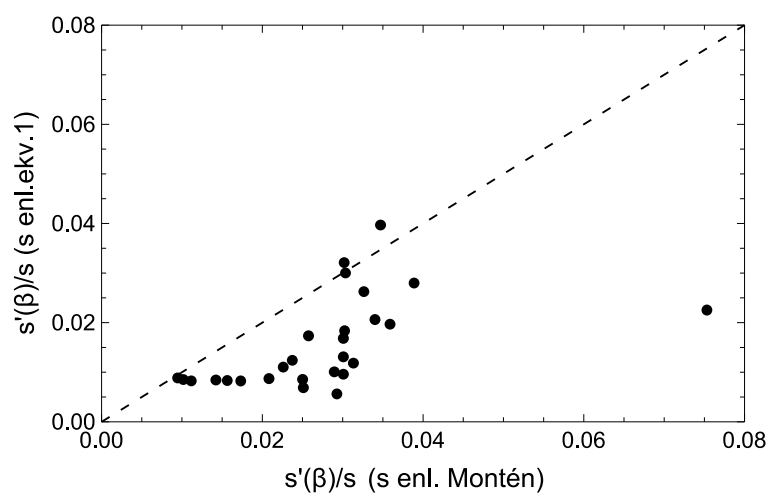
Några enstaka av de resultat jag fick när jag började analysera Monténs data skiljer sig något mellan de beräkningar jag gjort och de Montén redovisade (Figur 39). Det kan eventuellt ha uppstått något korrekturläsning, eller beräkningsfel i Monténs arbete. Överlag var dock överensstämmelsen god. Däremot uppstod större spridning i resultaten vid Monte Carlo-beräkningarna med Monténs ekvation jämfört med den allmänt vedertagna (ekvation 1). Förklaringen till denna skillnad verkar vara den explicita utformningen i Monténs ekvation. Det går att skriva om ekvationen så att den blir identisk med ekvation 1, vilket innebär att skillnaderna beror på hur man väljer att skriva ekvationen. Om man summerar två tal adderas osäkerheten. Om man däremot dividerar ett tal med ett annat kan den totala osäkerheten minska. För att kunna få en uppfattning om skillnaderna i osäkerhet mellan Monténs ekvation och ekvation 1 sökte jag en analytisk lösning för det relativa felet, vilket kan användas i en känslighetsanalys. Eftersom variationen uppstod till följd av slumpberäkningarna av β kan det tolkas som att skillnaderna orsakas av mätfel i β . Derivatn av ekvation 2 (och Monténs ekvation för den relativa öppningen) med avseende på β beskriver hur den relativa öppningens storlek förändras vid olika β -värden (ekvation 20). Den relativa känsligheten får man om man dividerar derivatan med den relativa öppningens storlek (Figur 40). När man sätter in Monténs turbin-specifikationer i dessa derivator och jämför dem med varandra ser man att en liten avvikelse i β ger större förändringar med Monténs ekvation än ekvation 2.



Figur 39. Ekvation 1 ger något större relativ öppning jämfört med Monténs beräkningar som baserades på avståndet mellan turbinbladen multiplicerat med $\sin \beta$.

$$s'(\beta) = \frac{100 \cdot V_{axial} \cdot \pi \cdot \text{Csc}[\frac{\pi \beta}{180}]^2}{3 \cdot n \cdot N \sqrt{1 + \frac{V_{axial}^2}{(u \cdot V_{axial} \cdot \text{Cot}[\frac{\pi \beta}{180}])^2}}}$$

ekvation 20



Figur 40. Känslighet för olika värden på den relativa vinkeln β vid beräkning av den relativa öppningen (s) vid jämförelse mellan Monténs beräkningsätt och ekvation 2. Underlagsdata från Montén (1985). Den relativa känsligheten är beräknad som kvoten mellan absolutbeloppet av derivatan av s med avseende på β och s .

8.3 Monte Carlo-beräkningar för 151 kraftverk i Götaland och Svealand – Francisturbiner

Beräknade förluster av ål, som passerar via turbiner, vid 151 kraftverk i Götaland och Svealand (exklusive Dalarnas län). I denna tabell har beräkningarna gjorts med antagandet att turbinen är av Francistyp. Monte Carlo (MC)-simuleringar har använts vid beräkningarna och den indata som användes var turbinernas maximala flödeskapacitet (vid $Q_{\max}=100$ % pådrag) respektive 50 % pådrag. Resterande turbinspecifikationer har slumpats från de samband som finns presenterade i denna rapport. Den osäkerhet som hanteras i beräkningarna omfattar ytterdiameter, varvtal, antal skovlar, samt bladvinkel för turbinerna medan inloppshöjden beräknades som en funktion av $Q_{\max}$. Vid MC-simuleringen slumpades ålarnas längd (1000 st) från en normalfördelning som motsvarar blankålarnas längdfördelning (medel=72 cm, SD=10). Passagförlusten vid ett specifikt kraftverk beräknades som medelvärdet av de 1000 medianvärden som vart och ett extraherats från 50 MC-beräkningar för varje slumpad ållängd. Observera att parameteriseringen av turbinpassagemodellen sällan ger skattningar över ca 92 %, vilket blev följden av den ursprungliga parameteriseringen av modellen för att få säkrare skattningar totalt sett. En förlustsiffra på 92 % skall därför tolkas som att den lika gärna kan vara närmare 100 %.

Även om grundmodellen bygger på mekanistiska principer för att räkna fram träffsannolikheten förekom en del avvikelser mellan förväntat och observerat i Monténs (1985) studie, som parameteriseringen av MC-modellen grundar sig på. Det innebär att de beräknade förlusterna i tabellen har ytterligare en osäkerhet förknippad med sig utöver den osäkerhet som kommer från "skattningen" av turbinspecifikationerna. Den osäkerhet som tillkommer kan handla om några enstaka % till 10-20 %. Med det i åtanke blir tolkningen av resultat som hamnar nära 90 % att intervallet troligen omfattar 70- 100 %, medan ett resultat kring 30 % borde hamna mellan 10-50 %. På så vis ger resultaten ändå en uppfattning om vilken storleksordning på förlusterna man kan förvänta sig vid de olika kraftverken.

Notera även att eventuell dödlighet eller förändring av storleksstrukturen till följd av intagsgaller inte tagits hänsyn till vid beräkningarna på grund av avsaknad av sådan information. Vid jämförelser med genomförda passagstudier kan därför siffrorna skilja sig en del. Vid analysen fanns inte tillräckligt med information för att kunna separera olika turbintyper för de olika kraftverken. $Q_{\max}$ för en enskild turbin beräknades genom att dividera utbyggnadsvattenföringen med antalet turbiner. För att se de relevanta förlustsiffrorna för respektive kraftverk får man alltså välja tabell utifrån vilken eller vilka turbintyper som faktiskt finns installerade vid respektive kraftverk.

Län	Kraftverk	Medel- flöde (m ³ /s)	Francisturbin					
			Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)
Blekinge län	Brantafors i Ronnebyån	8.8	50	37	62	90	80	92
Blekinge län	Djupafors i Ronnebyån	8.8	46	33	60	90	80	92
Blekinge län	Hemsjö Nedre i Mörrumsån	30.5	64	52	74	85	67	92
Blekinge län	Hemsjö Övre i Mörrumsån	30.5	31	19	45	90	86	92
Blekinge län	Kallinge i Ronnebyån	8.8	56	44	67	89	74	92
Blekinge län	Karlsnäs i Ronnebyån	8.7	49	37	62	90	79	92
Blekinge län	Klåvben i Ronnebyån	7.8	53	40	64	89	76	92
Blekinge län	Långgölsmåla i Ronnebyån	8.1	37	25	51	91	85	92
Blekinge län	Marieberg i Mörrumsån	28.9	66	53	76	82	64	92
Blekinge län	Ronneby i Ronnebyån	9.1	48	34	60	90	78	92
Blekinge län	Verperyd i Ronnebyån	8.7	18	10	29	88	84	90
Hallands län	Ätrafors i Ätran	42.8	66	53	77	80	62	92
Hallands län	Bällforsen i Ätran	42.2	68	53	81	71	54	88
Hallands län	Bassalt i Lagan	69	67	53	78	79	61	92
Hallands län	Boberg i Suseån	7	23	13	34	90	86	91
Hallands län	Fröslida i Nissan	39.9	67	51	78	78	61	92
Hallands län	Herting i Ätran	59	51	39	64	90	77	92
Hallands län	Hylte i Nissan	27.2	67	53	78	80	62	92
Hallands län	Karsefors i Lagan	79	57	44	71	52	40	65
Hallands län	Kinnareds övre i Västerån	5	9	5	16	80	72	85
Hallands län	Knäred nedre i Lagan	72	68	52	81	71	54	88
Hallands län	Knäred övre i Lagan	72	67	52	81	71	54	87
Hallands län	Laholm i Lagan	80	42	32	52	38	28	47
Hallands län	Maredsfors i Nissan	40.8	59	48	70	87	71	92
Hallands län	Nissaström i Nissan	40	66	53	77	81	63	92
Hallands län	Oskarström nedre i Nissan	41.2	60	48	71	87	72	92
Hallands län	Semb i Suseån	2.9	7	4	14	75	65	82
Hallands län	Skogaby i Lagan	79	66	50	81	66	50	82
Hallands län	Skogsforsen i Ätran	41.4	67	53	81	68	52	84
Hallands län	Vessige i Lillån Falkenberg	1.5	1	0	2	4	2	7
Hallands län	Yngeredsfors i Ätran	42.2	66	51	80	67	51	85
Jönköpings län	Ädelfors i Emån	12.3	53	40	65	89	77	92
Jönköpings län	Aspö i Emån	12.2	56	43	67	89	74	92
Jönköpings län	Bruksgården i Emån	12.3	55	43	67	89	76	92
Jönköpings län	Fabriksdammen i Skärvån	0.23	1	0	2	2	1	4
Jönköpings län	Fågelfors i Lagan	3.4	1	0	2	8	5	14
Jönköpings län	Flugeby i Emån	6.1	13	6	21	85	80	88
Jönköpings län	Hörle i Lagan	6.0	28	17	42	90	86	92
Jönköpings län	Kvillsfors i Emån	13.4	55	43	66	89	76	92
Jönköpings län	Öjaforsen i Tidån	4	11	6	19	83	77	87
Jönköpings län	Prinsfors i Vallsjön	0.3	1	0	1	4	2	7
Jönköpings län	Turefors i Emån	12.5	55	43	67	89	76	92
Kalmar län	Blankaström i Emån	28.3	54	42	65	89	75	92
Kalmar län	Finsjö Nedre i Emån	26.3	68	53	79	76	57	92
Kalmar län	Finsjö Övre i Emån	27	51	39	63	89	78	92
Kalmar län	Högsby i Emån	25.4	64	52	75	84	65	92
Kalmar län	Järnforsen i Emån	15	38	25	52	90	83	92
Kalmar län	Karlshammar i Emån	25	68	53	78	78	61	92
Kalmar län	Kvarnstugan i Sällevadsån	0.6	1	0	1	4	2	8
Kalmar län	Melby i Storån Västervik	0.34	1	1	3	19	11	30

Forts.			Francisturbin					
			Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Medel- flöde (m³/s)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)
Län	Kraftverk							
Kalmar län	Thorsvum i Alsterån	10.8	13	7	22	85	81	89
Kronobergs län	Ångabäck i Lagan	68.5	60	45	74	57	43	70
Kronobergs län	Barsbro i Mörrumsån	4.9	4	2	8	58	45	71
Kronobergs län	Hallaryd i Helge å	16	3	1	6	45	30	59
Kronobergs län	Hultakvarn i Skaddeån	0.63	2	1	4	28	17	42
Kronobergs län	Kvarnaholm i Lagan	65.9	65	50	79	63	48	78
Kronobergs län	Ljungby i Lagan	35.8	39	26	52	91	84	92
Kronobergs län	Majenfors i Lagan	69	68	52	80	75	57	92
Kronobergs län	Skogsryd i Ronnebyån	4.7	18	10	28	88	85	90
Kronobergs län	Timsfors i Lagan	69	40	27	53	90	83	92
Kronobergs län	Traryd i Lagan	64.9	62	46	77	60	45	75
Örebro län	Bångbro i Storån	4.3	16	9	26	87	83	90
Örebro län	Finnhyttan i Storån	3.8	16	9	25	88	84	90
Örebro län	Frötuna i Arbogaån	33	51	38	64	90	80	92
Örebro län	Frövifors i Arbogaån	14.8	66	53	77	81	63	92
Örebro län	Högbergsfors i Storån	1.2	1	1	3	19	11	29
Örebro län	Högfors i Storån	0.8	1	0	2	10	6	17
Örebro län	Krokfors i Storån	3.8	5	2	10	63	51	74
Örebro län	Östra Born i Storån	1.5	4	2	8	58	44	71
Örebro län	Rällså i Storån	4.2	29	18	41	90	88	92
Örebro län	Rällsälvi i Storån	3.9	18	10	28	88	85	90
Örebro län	Segersfors i Storån	0.9	2	1	5	38	24	52
Örebro län	Stensta i Sverkestaån	5.5	23	14	35	89	86	91
Örebro län	Stjärnfors i Storån	3.8	5	2	10	65	53	75
Örebro län	Storbo i Sverkestaån	5.5	23	13	35	89	86	91
Östergötlands län	Älvås i Motala Ström	81	67	51	80	68	52	85
Östergötlands län	Åtvidaberg i Storån Västervik	1.14	8	4	14	77	67	84
Östergötlands län	Finspång i Finspångsån	10.4	8	4	14	76	67	83
Östergötlands län	Fiskeby i Motala Ström	95	67	52	80	71	54	90
Östergötlands län	Flemminge i Svartån. Motala ström	12.5	21	11	31	89	86	91
Östergötlands län	Holmen i Motala Ström	95.2	40	31	49	36	28	45
Östergötlands län	Hovetorp i Stångån. Motala Ström	12	63	51	73	85	69	92
Östergötlands län	Malfors i Motala Ström	40.5	65	49	80	65	50	80
Östergötlands län	Motala i Motala Ström	40.3	68	52	80	74	57	91
Östergötlands län	Nybble i Storån Söderköping	1.1	5	2	8	60	47	72
Östergötlands län	Nykvarn i Motala Ström	40.5	66	53	77	82	64	92
Östergötlands län	Odensfors i Svartån. Motala ström	19.6	42	29	56	91	85	92
Östergötlands län	Skärblacka i Motala Ström	78.5	57	44	71	53	41	66
Södermanlands län	Åkfors i Nyköpingsån	10	13	7	22	85	81	89
Södermanlands län	Kvarnfallet i Eskilstunaån	15	59	47	69	88	74	92
Södermanlands län	Nyby i Eskilstunaån	7	26	16	38	90	87	91
Södermanlands län	Tunafors i Eskilstunaån	21.3	51	39	63	90	79	92
Uppsala län	Älvkarleby i Dalälven	342	50	38	61	45	34	56
Uppsala län	Lanforsen i Dalälven	342	44	34	55	40	31	49
Uppsala län	Söderfors i Dalälven	338	37	29	46	33	25	41
Uppsala län	Strömsnäs i Bredsdal	4.7	18	10	28	88	84	90

Forts.			Francisturbin					
Län	Kraftverk	Medel- flöde (m ³ /s)	Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)
Uppsala län	Untra i Dalälven	339	55	42	68	51	40	63
Värmlands län	Alster i Alsterälven	4.7	25	15	38	90	87	91
Värmlands län	Blixbol i Lillälven-Värmland	5.2	22	13	33	89	86	91
Värmlands län	Borgvik i Borgviksälven	11.3	65	53	76	83	65	92
Värmlands län	Höljes i Klarälven	94	55	42	67	51	40	63
Värmlands län	Karlsfors i Upperudsälven	2.3	13	7	22	85	80	89
Värmlands län	Kolsäter i Lillälven-Värmland	5.1	33	21	47	91	87	92
Värmlands län	Lennartsfors i Upperudsälven	19	13	7	23	85	80	89
Värmlands län	Snarkil i Upperudsälven	2.3	8	4	13	76	67	83
Värmlands län	Torp i Lillälven-Värmland	5.1	33	21	46	90	86	92
Västmanlands län	Ålsåtra i Kolbäcksån	27	67	53	79	75	58	92
Västmanlands län	Ekeby i Hedströmmen	10	55	43	66	89	76	92
Västmanlands län	Färna i Gunnilboån	2.1	8	4	15	78	69	84
Västmanlands län	Gisslarbo i Gunnilboån	3.1	4	2	6	51	36	65
Västmanlands län	Grindberga i Arbogaån	36	66	52	76	83	65	92
Västmanlands län	Hällby i Gamla Hjälmare Kanal	0.28	6	3	12	70	60	80
Västmanlands län	Hallstahammar i Kolbäcksån	27	61	46	76	58	45	73
Västmanlands län	Holmen i Hedströmmen	6.2	15	8	25	87	83	90
Västmanlands län	Jäder i Arbogaån	35.9	67	54	78	80	62	92
Västmanlands län	Kallstena i Hedströmmen	10.5	46	34	59	90	81	92
Västmanlands län	Kolsva i Hedströmmen	10	55	43	67	89	76	92
Västmanlands län	Lyftinge i Hedströmmen	10.3	49	36	62	90	79	92
Västmanlands län	Norrhammar i Hedströmmen	6.2	12	6	20	84	79	88
Västmanlands län	Nygårdsforsen i Hedströmmen	6.8	50	36	62	90	79	92
Västmanlands län	Östanfors i Hedströmmen	5.3	10	5	17	82	75	86
Västmanlands län	Östuna i Hedströmmen	10.4	56	43	68	89	75	92
Västmanlands län	Ramnäs i Kolbäcksån	25	62	46	77	58	45	73
Västmanlands län	Seglingsberg i Kolbäcksån	25	67	53	79	75	57	92
Västmanlands län	Skinnskatteberg i Hedströmmen	4	11	6	20	83	78	87
Västmanlands län	Skultuna i Svartån. Västerås	5.5	28	17	41	90	87	92
Västmanlands län	Sörstafors i Kolbäcksån	27	68	55	79	76	58	92
Västmanlands län	Surahammar i Kolbäcksån	26	67	53	81	71	55	89
Västmanlands län	Turbinbron i Svartån. Västerås	6	5	2	8	60	47	72
Västmanlands län	Västerkvarn i Kolbäcksån	28	53	40	65	90	78	92
Västmanlands län	Virsbo i Kolbäcksån	24	67	52	79	76	58	92
Västra Götalands län	Axelfors i Ätran	15.9	67	54	77	79	62	92
Västra Götalands län	Billingsfors i Upperudsälven	23.6	30	19	43	90	87	92
Västra Götalands län	Bosgården i Rolfsån	7.2	29	18	43	90	87	92
Västra Götalands län	Greva Säg i Sävåån	3.9	17	10	28	88	85	90
Västra Götalands län	Groröd (K5) i Bäveån	3.65	13	7	22	85	80	89
Västra Götalands län	Gullspång i Gullspångsälven	61.5	50	38	62	46	36	57
Västra Götalands län	Haby i Viskan	8.13	46	33	60	90	82	92
Västra Götalands län	Häggårda i Häggån	4.2	9	5	16	80	72	86

Forts.			Francisturbin					
Län	Kraftverk	Medel- flöde (m ³ /s)	Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)
Västra Götalands län	Hedefors i Säveån	19.9	67	53	80	70	54	87
Västra Götalands län	Hjultorp i Säveån	5	28	17	42	90	87	91
Västra Götalands län	Hulta i Viskan	8.24	67	54	78	79	61	92
Västra Götalands län	Jonsered i Säveån	21	34	21	48	90	86	92
Västra Götalands län	Krökingsfors i Viskan	6.2	33	21	47	90	86	92
Västra Götalands län	Kungsfors i Viskan	18.6	44	31	57	90	83	92
Västra Götalands län	Långed i Upperudsälven	43.3	27	17	40	90	88	92
Västra Götalands län	Lilla Edet i Göta älv	540	42	31	53	38	29	47
Västra Götalands län	Nordkvarn i Ätran	2.69	3	1	6	44	30	59
Västra Götalands län	Skåpanäs i Ätran	39.4	57	44	71	53	39	65
Västra Götalands län	Trollhättan (Olidan & Hojum) i Göta älv	540	59	46	74	56	43	70
Västra Götalands län	Vargön i Göta älv	540	33	25	42	29	22	36

8.4 Monte Carlo-beräkningar för 151 kraftverk i Götaland och Svealand – Kaplan­turbiner

Beräknade förluster av ål, som passerar via turbiner, vid 151 kraftverk i Götaland och Svealand (exklusive Dalarnas län). I denna tabell har beräkningarna gjorts med antagandet att turbinen är av Kaplan­typ. Monte Carlo (MC)-simuleringar har använts vid beräkningarna och den indata som användes var turbinernas maximala flödeskapacitet (vid $Q_{\max}=100$ % pådrag) respektive 50 % pådrag. Resterande turbinspecifikationer har slumpats från de samband som finns presenterade i denna rapport. Den osäkerhet som hanteras i beräkningarna omfattar ytterdiameter, varvtal, antal skovlar, samt blad­vinkel för turbinerna medan navdiameteren beräknades som en funktion av $Q_{\max}$. Vid MC-simuleringen slumpades ålarnas längd (1000 st) från en normalfördelning som motsvarar blankålarnas längdfördelning (medel=72 cm, SD=10). Passagförlusten vid ett specifikt kraftverk beräknades som medelvärdet av de 1000 medianvärden som vart och ett extraherats från 50 MC-beräkningar för varje slumpad ållängd. Observera att parameteriseringen av turbinpassagemodellen sällan ger skattningar över ca 92 %, vilket blev följd­en av den ursprungliga parameteriseringen av modellen för att få säkrare skattningar totalt sett. En förlustsiffra på 92 % skall därför tolkas som att den lika gärna kan vara närmare 100 %.

Även om grundmodellen bygger på mekanistiska principer för att räkna fram träffsannolikheten förekom en del avvikelser mellan förväntat och observerat i Monténs (1985) studie, som parameteriseringen av MC-modellen grundar sig på. Det innebär att de beräknade förlusterna i tabellen har ytterligare en osäkerhet förknippad med sig utöver den osäkerhet som kommer från "skattningen" av turbinspecifikationerna. Den osäkerhet som tillkommer kan handla om några enstaka % till 10-20 %. Med det i åtanke blir tolkningen av resultat som hamnar nära 90 % att intervallet troligen omfattar 70- 100 %, medan ett resultat kring 30 % borde hamna mellan 10-50 %. På så vis ger resultaten ändå en uppfattning om vilken storleksordning på förlusterna man kan förvänta sig vid de olika kraftverken.

Notera även att eventuell dödlighet eller förändring av storleksstrukturen till följd av intagsgaller inte tagits hänsyn till vid beräkningarna på grund av avsaknad av sådan information. Vid jämförelser med genomförda passagstudier kan därför siffrorna skilja sig en del. Vid analysen fanns inte tillräckligt med information för att kunna separera olika turbin­typer för de olika kraftverken. $Q_{\max}$ för en enskild turbin beräknades genom att dividera utbyggnadsvattenföringen med antalet turbiner. För att se de relevanta förlustsiffrorna för respektive kraftverk får man alltså välja tabell utifrån vilken eller vilka turbin­typer som faktiskt finns installerade vid respektive kraftverk.

Län	Kraftverk	Medel- flöde (m ³ /s)	Kaplanturbin					
			Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)
Blekinge län	Brantafors i Ronnebyån	8.8	50	37	62	90	80	92
Blekinge län	Djupafors i Ronnebyån	8.8	46	33	60	90	80	92
Blekinge län	Hemsjö Nedre i Mörrumsån	30.5	64	52	74	85	67	92
Blekinge län	Hemsjö Övre i Mörrumsån	30.5	31	19	45	90	86	92
Blekinge län	Kallinge i Ronnebyån	8.8	56	44	67	89	74	92
Blekinge län	Karlsnäs i Ronnebyån	8.7	49	37	62	90	79	92
Blekinge län	Klåvben i Ronnebyån	7.8	53	40	64	89	76	92
Blekinge län	Långgölsmåla i Ronnebyån	8.1	37	25	51	91	85	92
Blekinge län	Marieberg i Mörrumsån	28.9	66	53	76	82	64	92
Blekinge län	Ronneby i Ronnebyån	9.1	48	34	60	90	78	92
Blekinge län	Verperyd i Ronnebyån	8.7	18	10	29	88	84	90
Hallands län	Ätrafors i Ätran	42.8	66	53	77	80	62	92
Hallands län	Bällforsen i Ätran	42.2	68	53	81	71	54	88
Hallands län	Bassalt i Lagan	69	67	53	78	79	61	92
Hallands län	Boberg i Suseån	7	23	13	34	90	86	91
Hallands län	Frösilda i Nissan	39.9	67	51	78	78	61	92
Hallands län	Herting i Ätran	59	51	39	64	90	77	92
Hallands län	Hylte i Nissan	27.2	67	53	78	80	62	92
Hallands län	Karsefors i Lagan	79	57	44	71	52	40	65
Hallands län	Kinnareds övre i Västerån	5	9	5	16	80	72	85
Hallands län	Knäred nedre i Lagan	72	68	52	81	71	54	88
Hallands län	Knäred övre i Lagan	72	67	52	81	71	54	87
Hallands län	Laholm i Lagan	80	42	32	52	38	28	47
Hallands län	Maredsfors i Nissan	40.8	59	48	70	87	71	92
Hallands län	Nissaström i Nissan	40	66	53	77	81	63	92
Hallands län	Oskarström nedre i Nissan	41.2	60	48	71	87	72	92
Hallands län	Semb i Suseån	2.9	7	4	14	75	65	82
Hallands län	Skogaby i Lagan	79	66	50	81	66	50	82
Hallands län	Skogsforsen i Ätran	41.4	67	53	81	68	52	84
Hallands län	Vessige i Lillån Falkenberg	1.5	1	0	2	4	2	7
Hallands län	Yngeredsfors i Ätran	42.2	66	51	80	67	51	85
Jönköpings län	Ädelfors i Emån	12.3	53	40	65	89	77	92
Jönköpings län	Aspö i Emån	12.2	56	43	67	89	74	92
Jönköpings län	Bruksgården i Emån	12.3	55	43	67	89	76	92
Jönköpings län	Fabriksdammen i Skärvån	0.23	1	0	2	2	1	4
Jönköpings län	Fågelfors i Lagan	3.4	1	0	2	8	5	14
Jönköpings län	Flugeby i Emån	6.1	13	6	21	85	80	88
Jönköpings län	Hörle i Lagan	6.0	28	17	42	90	86	92
Jönköpings län	Kvillsfors i Emån	13.4	55	43	66	89	76	92
Jönköpings län	Öjaforsen i Tidån	4	11	6	19	83	77	87
Jönköpings län	Prinsfors i Vallsjön	0.3	1	0	1	4	2	7
Jönköpings län	Turefors i Emån	12.5	55	43	67	89	76	92
Kalmar län	Blankaström i Emån	28.3	54	42	65	89	75	92
Kalmar län	Finsjö Nedre i Emån	26.3	68	53	79	76	57	92
Kalmar län	Finsjö Övre i Emån	27	51	39	63	89	78	92
Kalmar län	Högsby i Emån	25.4	64	52	75	84	65	92
Kalmar län	Järnforsen i Emån	15	38	25	52	90	83	92
Kalmar län	Karlshammar i Emån	25	68	53	78	78	61	92
Kalmar län	Kvarnstugan i Sällevadsån	0.6	1	0	1	4	2	8
Kalmar län	Melby i Storån Västervik	0.34	1	1	3	19	11	30

Forts.		Kaplanturbin						
		Medel- flöde (m ³ /s)	Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)
Län	Kraftverk							
Kalmar län	Thorsvum i Alsterån	10.8	13	7	22	85	81	89
Kronobergs län	Ångabäck i Lagan	68.5	60	45	74	57	43	70
Kronobergs län	Barsbro i Mörrumsån	4.9	4	2	8	58	45	71
Kronobergs län	Hallaryd i Helge å	16	3	1	6	45	30	59
Kronobergs län	Hultakvarn i Skaddeån	0.63	2	1	4	28	17	42
Kronobergs län	Kvarnaholm i Lagan	65.9	65	50	79	63	48	78
Kronobergs län	Ljungby i Lagan	35.8	39	26	52	91	84	92
Kronobergs län	Majenfors i Lagan	69	68	52	80	75	57	92
Kronobergs län	Skogsryd i Ronnebyån	4.7	18	10	28	88	85	90
Kronobergs län	Timsfors i Lagan	69	40	27	53	90	83	92
Kronobergs län	Traryd i Lagan	64.9	62	46	77	60	45	75
Örebro län	Bångbro i Storån	4.3	16	9	26	87	83	90
Örebro län	Finnhyttan i Storån	3.8	16	9	25	88	84	90
Örebro län	Frötuna i Arbogaån	33	51	38	64	90	80	92
Örebro län	Frövifors i Arbogaån	14.8	66	53	77	81	63	92
Örebro län	Högbergsfors i Storån	1.2	1	1	3	19	11	29
Örebro län	Högfors i Storån	0.8	1	0	2	10	6	17
Örebro län	Krokfors i Storån	3.8	5	2	10	63	51	74
Örebro län	Östra Born i Storån	1.5	4	2	8	58	44	71
Örebro län	Rällså i Storån	4.2	29	18	41	90	88	92
Örebro län	Rällsälvi i Storån	3.9	18	10	28	88	85	90
Örebro län	Segersfors i Storån	0.9	2	1	5	38	24	52
Örebro län	Stensta i Sverkestaån	5.5	23	14	35	89	86	91
Örebro län	Stjärnfors i Storån	3.8	5	2	10	65	53	75
Örebro län	Storbo i Sverkestaån	5.5	23	13	35	89	86	91
Östergötlands län	Älvås i Motala Ström	81	67	51	80	68	52	85
Östergötlands län	Åtvidaberg i Storån Västervik	1.14	8	4	14	77	67	84
Östergötlands län	Finspång i Finspångsån	10.4	8	4	14	76	67	83
Östergötlands län	Fiskeby i Motala Ström	95	67	52	80	71	54	90
Östergötlands län	Flemminge i Svartån. Motala ström	12.5	21	11	31	89	86	91
Östergötlands län	Holmen i Motala Ström	95.2	40	31	49	36	28	45
Östergötlands län	Hovetorp i Stångån. Motala Ström	12	63	51	73	85	69	92
Östergötlands län	Malfors i Motala Ström	40.5	65	49	80	65	50	80
Östergötlands län	Motala i Motala Ström	40.3	68	52	80	74	57	91
Östergötlands län	Nybble i Storån Söderköping	1.1	5	2	8	60	47	72
Östergötlands län	Nykvarn i Motala Ström	40.5	66	53	77	82	64	92
Östergötlands län	Odensfors i Svartån. Motala ström	19.6	42	29	56	91	85	92
Östergötlands län	Skärblacka i Motala Ström	78.5	57	44	71	53	41	66
Södermanlands län	Åkfors i Nyköpingsån	10	13	7	22	85	81	89
Södermanlands län	Kvarnfallet i Eskilstunaån	15	59	47	69	88	74	92
Södermanlands län	Nyby i Eskilstunaån	7	26	16	38	90	87	91
Södermanlands län	Tunafors i Eskilstunaån	21.3	51	39	63	90	79	92
Uppsala län	Älvkarleby i Dalälven	342	50	38	61	45	34	56
Uppsala län	Lanforsen i Dalälven	342	44	34	55	40	31	49
Uppsala län	Söderfors i Dalälven	338	37	29	46	33	25	41
Uppsala län	Strömsnäs i Bredsdal	4.7	18	10	28	88	84	90

Forts.		Kaplanturbin						
		Medel- flöde (m ³ /s)	Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)
Län	Kraftverk							
Uppsala län	Untra i Dalälven	339	55	42	68	51	40	63
Värmlands län	Alster i Alsterälven	4.7	25	15	38	90	87	91
Värmlands län	Blixbol i Lillälven-Värmland	5.2	22	13	33	89	86	91
Värmlands län	Borgvik i Borgviksälven	11.3	65	53	76	83	65	92
Värmlands län	Höljes i Klarälven	94	55	42	67	51	40	63
Värmlands län	Karlsfors i Upperudsälven	2.3	13	7	22	85	80	89
Värmlands län	Kolsäter i Lillälven-Värmland	5.1	33	21	47	91	87	92
Värmlands län	Lennartsfors i Upperudsälven	19	13	7	23	85	80	89
Värmlands län	Snarkil i Upperudsälven	2.3	8	4	13	76	67	83
Värmlands län	Torp i Lillälven-Värmland	5.1	33	21	46	90	86	92
Västmanlands län	Ålsåtra i Kolbäcksån	27	67	53	79	75	58	92
Västmanlands län	Ekeby i Hedströmmen	10	55	43	66	89	76	92
Västmanlands län	Färna i Gunnilboån	2.1	8	4	15	78	69	84
Västmanlands län	Gisslarbo i Gunnilboån	3.1	4	2	6	51	36	65
Västmanlands län	Grindberga i Arbogaån	36	66	52	76	83	65	92
Västmanlands län	Hällby i Gamla Hjälmare Kanal	0.28	6	3	12	70	60	80
Västmanlands län	Hallstahammar i Kolbäcksån	27	61	46	76	58	45	73
Västmanlands län	Holmen i Hedströmmen	6.2	15	8	25	87	83	90
Västmanlands län	Jäder i Arbogaån	35.9	67	54	78	80	62	92
Västmanlands län	Kallstena i Hedströmmen	10.5	46	34	59	90	81	92
Västmanlands län	Kolsva i Hedströmmen	10	55	43	67	89	76	92
Västmanlands län	Lyftinge i Hedströmmen	10.3	49	36	62	90	79	92
Västmanlands län	Norrhammar i Hedströmmen	6.2	12	6	20	84	79	88
Västmanlands län	Nygårdsforsen i Hedströmmen	6.8	50	36	62	90	79	92
Västmanlands län	Östanfors i Hedströmmen	5.3	10	5	17	82	75	86
Västmanlands län	Östuna i Hedströmmen	10.4	56	43	68	89	75	92
Västmanlands län	Ramnäs i Kolbäcksån	25	62	46	77	58	45	73
Västmanlands län	Seglingsberg i Kolbäcksån	25	67	53	79	75	57	92
Västmanlands län	Skinnskatteberg i Hedströmmen	4	11	6	20	83	78	87
Västmanlands län	Skultuna i Svartån. Västerås	5.5	28	17	41	90	87	92
Västmanlands län	Sörstafors i Kolbäcksån	27	68	55	79	76	58	92
Västmanlands län	Surahammar i Kolbäcksån	26	67	53	81	71	55	89
Västmanlands län	Turbinbron i Svartån. Västerås	6	5	2	8	60	47	72
Västmanlands län	Västerkvarn i Kolbäcksån	28	53	40	65	90	78	92
Västmanlands län	Virso i Kolbäcksån	24	67	52	79	76	58	92
Västra Götalands län	Axfors i Ätran	15.9	67	54	77	79	62	92
Västra Götalands län	Billingsfors i Upperudsälven	23.6	30	19	43	90	87	92
Västra Götalands län	Bosgården i Rolfsån	7.2	29	18	43	90	87	92
Västra Götalands län	Greva Säg i Sävåån	3.9	17	10	28	88	85	90
Västra Götalands län	Groröd (K5) i Bäveån	3.65	13	7	22	85	80	89
Västra Götalands län	Gullspång i Gullspångsälven	61.5	50	38	62	46	36	57
Västra Götalands län	Haby i Viskan	8.13	46	33	60	90	82	92
Västra Götalands län	Häggårda i Häggån	4.2	9	5	16	80	72	86

Forts.			Kaplanturbin					
Län	Kraftverk	Medel- flöde (m ³ /s)	Pådrag 50 %			Pådrag 100 %		
			Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)	Förlust medel (%)	5:e perc. (%)	95:e perc. (%)
Västra Götalands län	Hedefors i Säveån	19.9	67	53	80	70	54	87
Västra Götalands län	Hjultorp i Säveån	5	28	17	42	90	87	91
Västra Götalands län	Hulta i Viskan	8.24	67	54	78	79	61	92
Västra Götalands län	Jonsered i Säveån	21	34	21	48	90	86	92
Västra Götalands län	Krökingsfors i Viskan	6.2	33	21	47	90	86	92
Västra Götalands län	Kungsfors i Viskan	18.6	44	31	57	90	83	92
Västra Götalands län	Långed i Uppersälven	43.3	27	17	40	90	88	92
Västra Götalands län	Lilla Edet i Göta älv	540	42	31	53	38	29	47
Västra Götalands län	Nordkvarn i Ätran	2.69	3	1	6	44	30	59
Västra Götalands län	Skåpanäs i Ätran	39.4	57	44	71	53	39	65
Västra Götalands län	Trollhättan (Olidan & Hojum) i Göta älv	540	59	46	74	56	43	70
Västra Götalands län	Vargön i Göta älv	540	33	25	42	29	22	36

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se