

Smoltutvandring forbi Skotfoss kraftverk i Skiensvassdraget ved bygging av et nytt flomkraftverk

Per E. Skåre
Nils Arne Hvidsten
Torbjørn Forseth
Hans-Petter Fjeldstad



LAGSPILL



ENTUSIASME



INTEGRITET



KVALITET

NINAs publikasjoner

NINA Rapport

Dette er en ny, elektronisk serie fra 2005 som erstatter de tidligere seriene NINA Fagrapport, NINA Oppdragsmelding og NINA Project Report. Normalt er dette NINAs rapportering til oppdragsgiver etter gjennomført forsknings-, overvåkings- eller utredningsarbeid. I tillegg vil serien favne mye av instituttets øvrige rapportering, for eksempel fra seminarer og konferanser, resultater av eget forsknings- og utredningsarbeid og litteraturstudier. NINA Rapport kan også utgis på annet språk når det er hensiktsmessig.

NINA Temahefte

Som navnet angir behandler temaheftene spesielle emner. Heftene utarbeides etter behov og serien favner svært vidt; fra systematiske bestemmelsesnøkler til informasjon om viktige problemstillinger i samfunnet. NINA Temahefte gis vanligvis en populærvitenskapelig form med mer vekt på illustrasjoner enn NINA Rapport.

NINA Fakta

Faktaarkene har som mål å gjøre NINAs forskningsresultater raskt og enkelt tilgjengelig for et større publikum. De sendes til presse, ideelle organisasjoner, naturforvaltningen på ulike nivå, politikere og andre spesielt interesserte. Faktaarkene gir en kort framstilling av noen av våre viktigste forskningstema.

Annen publisering

I tillegg til rapporteringen i NINAs egne serier publiserer instituttets ansatte en stor del av sine vitenskapelige resultater i internasjonale journaler, populærfaglige bøker og tidsskrifter.

Norsk institutt for naturforskning

Smoltutvandring forbi Skotfoss kraftverk i Skiensvassdraget ved bygging av et nytt flomkraftverk

Per E. Skåre
Nils Arne Hvidsten
Torbjørn Forseth
Hans-Petter Fjeldstad

Skåre, P.E., Hvidsten, N.A., Forseth, T., Fjeldstad, H-P. 2006
Smoltutvandring forbi Skotfoss kraftverk i Skiensvassdraget ved
bygging av et nytt flomkraftverk. – NINA Rapport 193, 19 s.

Trondheim oktober 2006

ISSN: 1504-3312

ISBN 10: 82-426-1753-8

ISBN 13: 978-82-426-1753-8

RETTIGHETSHAVER

© Norsk institutt for naturforskning

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET

Åpen

PUBLISERINGSTYPE

Digitalt dokument (pdf)

REDAKSJON

Torbjørn Forseth

KVALITETSSIKRET AV

Odd Terje Sandlund

ANSVARLIG SIGNATUR

Forskningssjef Odd Terje Sandlund (sign.)

OPPDRAKSGIVER(E)

Skien Kraftproduksjon

KONTAKTPERSON(ER) HOS OPPDRAGSGIVER

Rollo Ersdal

FORSIDEBILDE

Fra Skotfoss, foto Torbjørn Forseth

NØKKEWORD

Skotfoss, Telemark, laks, vassdragsregulering, turbindødelighet

KEY WORDS

KONTAKTOPPLYSNINGER

NINA Trondheim

NO-7485 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00

Telefaks: 73 80 14 01

NINA Oslo

Gaustadaléen 21

NO-0349 Oslo

Telefon: 73 80 14 00

Telefaks: 22 60 04 24

NINA Tromsø

Polarmiljøseneteret

NO-9296 Tromsø

Telefon: 77 75 04 00

Telefaks: 77 75 04 01

NINA Lillehammer

Fakkeldgården

NO-2624 Lillehammer

Telefon: 73 80 14 00

Telefaks: 61 22 22 15

<http://www.nina.no>

Sammendrag

Skåre, P.E., Hvidsten, N.A., Forseth, T., Fjeldstad, H-P. 2006 Smoltutvandring forbi Skotfoss kraftverk i Skiensvassdraget ved bygging av et nytt flomkraftverk. – NINA Rapport 193, 19 s.

På oppdrag fra Skien Kraftproduksjon har NINA og SINTEF Energiforskning vurdert effekten på nedvandrende laks- og auresmolt av å bygge et nytt flomkraftverk i Skotfoss i Skiensvassdraget. Vurderingen er basert på litteraturodata for smoltoverlevelse i turbiner, simuleringer av treffsannsynlighet i eksisterende og nye turbiner, og vannføringsforhold (overløp) ved utvidelsen av kraftverket. Simuleringene og litteraturodata antyder en smoltdødelighet på mellom 20 og 25 % i dagens turbiner. Fordi turbinene er mindre antas dødeligheten å bli dobbelt så høy i de nye turbinene. Installasjon av en stor turbin vil derfor være betydelig bedre enn to små. Økt kapasitet i kraftverket vil også redusere overløpet (over lukene), og potensielt bringe en høyere andel av den utvandrende smolten inn i turbinene (gitt at noe smolt går i overløp i dag). Det er særlig dager med overløp på mellom 20 og 40 % av totalvannføringen som blir redusert, og disse kan potensielt være dager der smolten i dagens situasjon kan gå utenom turbinene. Hovedutvandringsperioden for smolt er trolig begrenset til ca 30 dager, sannsynligvis i mai måned, og det er mulig å sette inn tiltak i denne perioden. Økt overløp, og lede- og skremmeanordninger er mulige tiltak, men erfaringene med slike tiltak er relativt få. Utvandrende vinterstøinger (utgytt laks eller sjøaure) vil ikke kunne overleve turbinpassasjer, og kan bare passere kraftverket levende ved overløp.

Per Egil Skåre & Hans-Petter Fjeldstad, SINTEF Energiforskning AS, 7465 Trondheim.

per.e.skare@sintef.no

Nils Arne Hvidsten & Torbjørn Forseth, Norsk institutt for naturforskning, Tungasletta 2, 7485 Trondheim. torbjorn.forseth@nina.no

Innhold

Sammendrag	3
Forord	5
1 Innledning.....	6
2 Smoltutvandring og overlevelse gjennom kraftverksturbiner	7
2.1 Utvandringstidspunkt.....	7
2.2 Smoltutvandring og kraftverk	7
2.3 Overlevelse i turbiner - resultater fra andre studier	8
3 Simulering av turbindødelighet i Skotfoss kraftverk.....	9
3.1 Turbiner.....	9
3.2 Forventet kjørestrategi	11
3.3 Beregningsgrunnlag	11
3.4 Skovlpasseringer.....	13
3.5 Fiskens oppførsel i turbinen	13
3.6 Fiskens størrelse.....	13
3.7 Treffsannsynlighet.....	14
3.8 Simulerte treffsannsynligheter og dødelighet	14
3.9 Vurdering av simuleringresultatene	15
4 Endringer i overløp	16
5 Diskusjon.....	17
6 Konklusjoner	18
7 Referanser	19

Forord

Skien Kraftproduksjon planlegger å installere to nye turbiner og dermed utvide kapasiteten i Skotfoss Kraftstasjon. Skiensvassdraget har vandrende lakse- og sjøaurebestander, og Skotfoss ligger på den lakseførende strekningen. Dette betyr at utvandrende smolt må passere kraftstasjonen på vei til havet. Norsk institutt for naturforskning (NINA) og SINTEF Energiforskning har fått i oppdrag å utarbeide en rapport som tar for seg effekten av dette kraftverket på utvandrende laks- sjøauresmolt.

Vi takker Skien Kraftproduksjon for oppdraget.

Trondheim, oktober 2006

Torbjørn Forseth
Prosjektleder



*Dagens kraftverksbygg i Skotfoss med utløp til venstre og fisketrapp midt på bildet.
Foto: Torbjørn Forseth*

Innledning

Skien Kraftproduksjon planlegger å utvide kapasiteten i Skotfoss Kraftstasjon ved å installere to nye turbiner. Skiensvassdraget har vandrende lakse- og sjøaurebestander, og Skotfoss ligger på den lakseførende strekningen ved utoaset av Norsjø. Dette betyr at utvandrende smolt må passere kraftstasjonen på vei til havet. Norsk institutt for naturforskning (NINA) og SINTEF Energiforskning har fått i oppdrag å utarbeide en rapport som tar for seg:

- "hvilken effekt utbyggingen av det nye kraftverket vil ha på lakseyngel (smolt) som utvandrer til elv, fjord og hav", og
- "redegjøre for hvordan dødeligheten for smolt (lengdegruppen 10-16 cm) gjennom turbinene er i dag, og hvordan de nye turbinene forventes å påvirke status".

I denne rapporten gjennomgår vi kort eksisterende kunnskap om smoltutvandring generelt og passering av kraftverksturbiner spesielt, og gjennomfører simuleringer av treffsannsynlighet i eksisterende og nye turbiner. Sammen med vurderinger av vannføringer og overløp i dag, og med det nye anlegget, danner dette grunnlag for å vurdere effekten av utvidelsen av Skotfoss Kraftverk på smoltutvandringen.

1 Smoltutvandring og overlevelse gjennom kraftverksturbiner

1.1 Utvandringstidspunkt

Etter ett til fire år i elva (avhengig av klima og vekstforhold) er laksungene klare til å vandre til havet (se Thorstad et al. 2006 for en oppsummering av kunnskap om smoltutvandring). De mister om våren sin brune parrrdrakt, blir sølvfarget og starter utvandringen. Tidspunktet for utvandringen ser ut til å være rettet inn mot å nå sjøen til egnet sjøtemperatur og gode matforhold i havet, og skjer tidligere sør i landet enn i nord (Hvidsten, Heggberget & Jensen 1998). De ulike bestandene bruker ulike stimuli for å synkronisere utvandringen og komme ut til rett tid, og vannføring og vanntemperatur er vist å være viktige faktorer (Jonsson & Ruud-Hansen 1985; Hvidsten et al. 1995). I noen vassdrag er økt vannføring et viktig stimuli, mens vanntemperatur ser ut til å være viktigere i andre. I mange norske vassdrag skjer utvandringen i forbindelse med vårflommen. I vassdrag i Sør-Norge er fangstene i smoltfeller størst om natta, noe som antyder at mye av smolten går om natta, trolig fordi mørke gir beskyttelse mot fiender. Radiomerking av smolt i Mandalselva antyder at smolt var spesielt lite villig til å gå inn i kraftverkstunnelen om dagen, mens utvandringen over dammen var mer spredt over døgnet (Uglem et al. 2005).

I de undersøkte elvene i Norge ser det ut til at det meste av smolten vandrer ut i løpet av en periode på 30 dager. Det er ikke kjent når smolten vandrer ut i fra Skiensvassdraget. Det foreligger imidlertid undersøkelser av smoltutgang hos laks fra Mandalselva og Numedalslågen (Uglem et al. 2005 og egne upubliserte data). Smoltutvandringen i Mandalselva (5 år) og Numedalslågen (3 år) startet tidligst hhv. 4. mai og 23. april og var over senest hhv. 2. juni og 13. mai. Skiensvassdraget er nabovassdrag til Numedalslågen og det er rimelig å anta at utvandningsperioden for smolten faller sammen med utvandningsperioden for smolten i Numedalslågen. Slik er det også for de nærliggende elvene Orkla og Stjørdalselva i Trondheimsfjorden. Median utvandringstid i Numedalslågen (når 50 % av smolten var fanget i fellene) var tidligst 1. mai og senest 12. mai. Dersom en antar at smolten vandrer ut i løpet av en 30 dagers periode og bruker datoene for 50 % utvandring i Numedalslågen, vil smolten i Skiensvassdraget vandre ut i perioden 15. april til 27. mai de fleste årene. Den lange vandringen gjennom Heddalsvatnet og/eller Norsjø kan imidlertid medføre at ankomsttiden til Skotfoss forsinkes. Lave temperaturer i april ser også ut til å kunne forsinke utvandringen (resultater fra Suldalslågen; Forseth et al. 2003).

Sjøaure har et utvandningsmønster som ligner på laksesmolten, men det ser ut til at utvandningsperioden kan strekke seg lengre utover sommeren.

1.2 Smoltutvandring og kraftverk

Vannkraftverk på lakseførende strekning representerer et problem for utvandrende laksefisk. Når smolten ankommer en reguleringsdam eller kraftverksinntak har den ofte to valg: å gå inn i kraftverket eller i eventuelt overløp (over dammen eller i flomluker). I Mandalselva er det gjort forsøk med å manipulere vannmengdene i kraftverk og overløp for å undersøke om det er mulig å påvirke dette valget. Resultatene viste at andelen som gikk i kraftverkstunnelen økte med totalvannføringen i vassdraget, og ble redusert når mye av vannet gikk i overløp. Det generelle bildet var at det i mange situasjoner måtte være relativt store overløp for at mye av smolten skulle unngå kraftverket (30-50 % av totalvannføringen). Ledesystemer kan trolig redusere andelen som går i kraftverket noe, og det arbeides i Mandalselva med å prøve ut strobelys (sterkt blinkende lys montert under vann ved inntaket) for å skremme smolten. Resultatene fra Mandaleva er selvsagt ikke direkte overførbare til Skiensvassdraget. Lokale strømningsforhold og smoltens vandringsrute i magasinet er viktig for hvordan fordeling av vann påvirker smoltens vandringsrute. Dersom alt vann går i kraftverket i hele utvandningsperioden vil smoltoverlevelsen forbi kraftverket være direkte bestemt av overlevelsen gjennom turbinene.

1.3 Overlevelse i turbiner - resultater fra andre studier

Laks- og ørretsmolt kan påføres direkte og indirekte dødelighet i forbindelse med passasje av kraftverk. Direkte dødelighet hos ungfisk kan oppstå ved inntaket, i turbinen og i kraftverksutløpet (Monten 1985, Jepsen et al. 1998 og Coutant & Whitney 2000). Det er vanskelig å sammenligne dødelighet i kraftverk fordi det fins ulike typer inntak, turbiner og avløp, og at vannmengde og fallhøyder varierer. Kraftverksinntak og dammer kan også forsinke utvandringen, og således gjøre smolten mer utsatt for predasjon fra fisk og andre dyr. Mills (1964) fant dødelighet på 10 % på smolt pga predasjon fra gjedde i to kraftverksdammer i Skottland.

Overlevelse hos smolt i kraftverk i Norge er undersøkt i noen få anlegg. Det er gjort forsøk med utsetting av merket smolt i kraftverk i Orkla og Mandalselva, i to svenske elver og i Snake River i USA (**Tabell 1**). Disse forsøkene baserer seg på å sammenligne gjenfangster av merket fisk (i sjø- og elvefiske) fra smolt satt i kraftverksinntaket (eller i kraftverkstunnelen) og nedenfor inntaket, eller på radiomerking.

Tabell 1. Oversikt over dødelighet hos merket smolt som er satt ut i og utenfor kraftverksturbiner i ulike elver, med informasjon om kraftverk, type turbiner, fallhøyde og slukeevne.

Elv	Kraftverk	Turbintype/antall	Fallhøyde meter	Slukeevne m ³ s ⁻¹	Turbin-/ totaltdødelighet (%)
Orkla	Svorkmo kr. verk	Francis/2 turbiner	99	27/43	-/73
Mandalselva	Laudal kr. verk	Francis/2 turbiner	36	110	-/66,7
Umeåelven	Stornorrfor	Francis/3	75	225	9/ 25
Piteelven	Sikfors	Kaplan/2 turbiner	20	270	-/ 17
Snake River	Lower Granite Little Goose Lower Monumental	Kaplan/6 turbiner	30	340-623	7-13 ¹ /-

¹ Stillehavslaks

Francis turbiner i Orkla, Mandalselva og Umeåelven

Seks års utsetninger i Orkla ga en gjennomsnittlig gjenfangst på 2,95 %, for den smolten som var satt nedenfor kraftverket (i minstevannføringsstrekningen), mens den smolten som ble satt i kraftverket hadde en gjennomsnittlig gjenfangst på 0,8 %. Dette utgjør en dødelighet på 73 % for smolten som gikk gjennom turbinene (Hvidsten & Johnsen 1997). I Mandalselva ble det satt ut smolt i innløpstunnelen til kraftverket. Ett års utsetninger (2000) ga 2,1 % gjenfangst av voksen laks fra smolt satt nedenfor kraftverksinntaket, mens de som ble satt ut i kraftverksinntaket hadde en gjenfangst på 0,7 %. Det tilsvarer en dødelighet på 67 % på grunn av passasjen gjennom Laudal kraftverk. Resultatet fra Mandalselva er usikkert fordi det var bare ett års utsetninger som var vellykkete (Hansen & Johnsen 2005).

I Umeåelven fant Monten (1985) en totaldødelighet på 25 % med parallelle utsetninger av smolt og gjenfangster av voksen laks. Dødeligheten i selve turbinen var 9 %, den største dødeligheten var i utløpstunnelen, som var senket over en strekning, slik at smolten kom i berøring med et ujevnt tunneltak.

Kaplan turbiner i Piteelven og Snake River

Totaldødelighet for nedvandrende smolt i Sikfors kraftverk i Piteelven ble målt til 17 % (Rivinoja 2005), mens dødeligheten i forskjellige turbiner i Snake River (tilløpselv til Columbia River) varierte fra 7-13 % hos smolt av kongelaks (Muir et al. 2001). Tretten prosent av den utsatte radiomerkete smolten ble stående foran kraftverksinntaket i Piteelven uten å gå ned i kraftverket (Rivinoja 2005). I disse forsøkene, hvor det var fra 5-55 % overløp, var det likevel bare ca 20 % av smolten som passerte overløpet (Rivinoja 2005).

Andre forhold

Det er størst overlevelse for fisk som passerer turbiner med stor driftsvannsføring og liten fallhøyde. I selve turbinen er det treffsannsynligheten mot skovlene som avgjør dødeligheten (Montèn 1985). Utformingen av utløpet fra kraftverket kan også ha betydning for smoltoverlevelsen, slik at for eksempel korte utløpstunneler med slette tak er gunstig for smolten. Ved store fallhøyder kan trykkskader og gassovermetning oppstå. I oversikten ovenfor varierte totaldødeligheten hos smolt for kraftverk med Francis turbiner mellom 25 og 73 %, fallhøydene var mellom 36 og 75 m og slukeevnen var fra 27 til 225 m³s⁻¹. For kraftverk med Kaplan turbiner var dødeligheten totalt 17 % i Sikfors og 7-13 % punktdødelighet i forskjellige Kaplan turbiner i Snake River. Fallhøydene i disse kraftverkene var fra 20 til 30 m og slukeevnen var fra 270-623 m³s⁻¹.

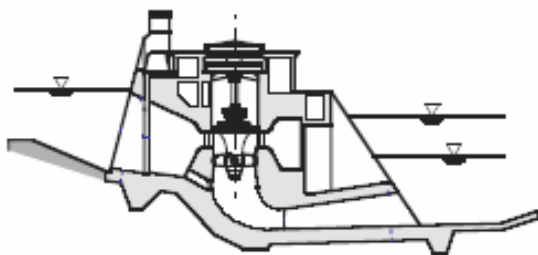
I Skiensvassdraget er det mye lavere fallhøyder (5-10 m) i kraftverkene enn de som er beskrevet her, men på den annen side har de planlagte turbinene liten slukeevne.

Dødeligheten for fisk som passerer kraftverksturbiner er sterkt størrelsesavhengig, slik at stor fisk har mindre sannsynlighet for å overleve enn små fisk (Montèn 1985).

2 Simulering av turbindødelighet i Skotfoss kraftverk

Utvandrende smolt er utsatt for dødelighet når de passerer gjennom kraftverksturbiner, primært ved at de blir truffet av turbinens skovler. Her gir vi en vurdering av overlevelsesraten for smolt som passerer gjennom turbinene i Skotfoss kraftverk ved en simuleringsmodell som beregner treffsannsynlighet. Beregningene er basert på at smolten har vilkårlig posisjon gjennom turbinen, og følger passivt strømmingen i turbinen. Beregningene inkluderer ikke andre mulige årsaker til dødelighet i kraftverkene (i inntaket eller utløpet), men disse forventes å være av mindre betydning (Montèn 1985). Skotfossanlegget består i dag av to Kaplan turbiner fra 1953 og 1970. Det er nå planlagt å installere to mindre rørturbiner av type "Bevel Gear Turbine". Resultatene bør ses på som relative i forhold til de to ulike turbintypene, og ikke som absolutte tall for smoltdødeligheten.

2.1 Turbiner

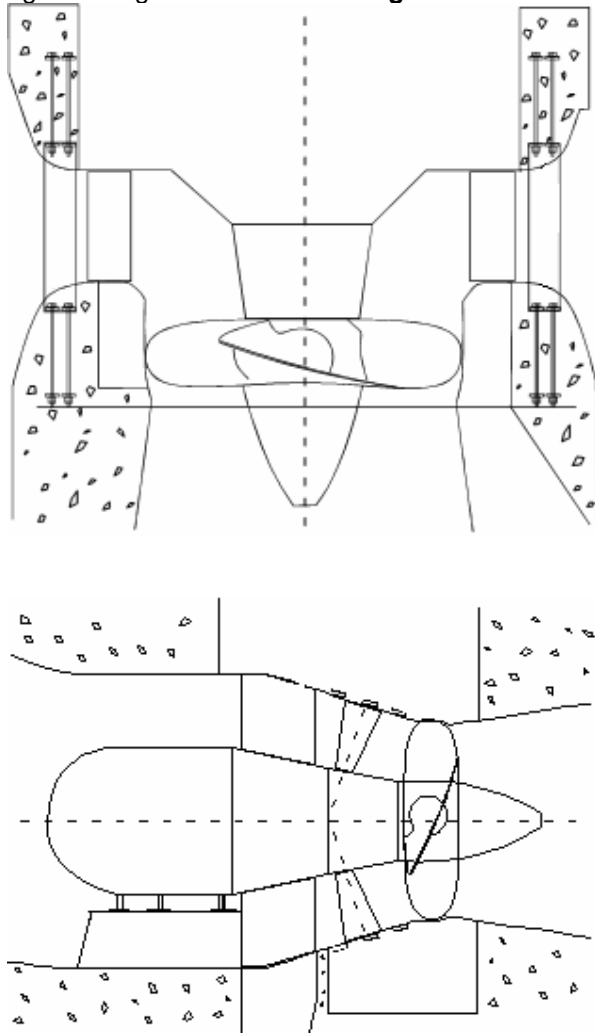


Figur 1 Kaplan aggregat (fra Avellan 2004).

En turbin er bygd opp av ulike komponenter som har ulike oppgaver. For et Kaplan aggregat kommer vannet først inn i tromma som vist i **Figur 1**. Der fordeles vannet likt rundt omkretsen før vannet entrer stagene som er med på å styre vannet inn mot ledeapparatet. Stagene er også med på å holde tromma sammen, og er ofte utformet i en profilform for å minke strømmingstap. Etter stagene går vannet inn i ledeapparatet. Ledapparatet har som funksjon å regulere volumstrømmen gjennom turbinen, og kan derfor vanligvis lukkes og åpnes. En større Kaplan turbin har ofte over 20 ledeskovler utformet noenlunde på samme måte som stagene. Gjennom ledeapparatet økes vannhastigheten og vannet får et spinn for å øke virkningsgraden på turbinen. Vannets bevegelse snus deretter til en omtrent aksial retning, og kommer inn i løpehjulet. Et Kaplan løpehjul består ofte av 4 – 5 skovler som går fra navet og ut til løpehjuls-kammeret. Omdreiningshastigheten til løpehjulet er fast og bestemt av turtallet. Den absolutte hastigheten til skovlen vil imidlertid øke med radiusen eller avstanden fra navet. I løpehjulet

taes energien ut, og vannet kommer ut i sugerøret. Ofte er skovlene vribare, slik at turbinen kan gi god virkningsgrad over et stort driftsområde. Imidlertid finnes alle kombinasjoner av vribare eller faste lede- og løpehjulsskovler. Sugerøret består av en sugerørskonos som har et økende tverrsnittsareal, et bend og selve diffusoren som reduserer hastighetsenergien til et minimum.

En rørturbin har ikke en spiraltromme men en kontraksjon slik at vannet kommer omtrent ak-sielt inn mot turbinen hele veien. Ellers er prinsippet det samme som i en Kaplan. Normal ligger generatoren inne i "bulben", som holdes opp ved hjelp av stagene. For den typen som er planlagt brukt i Skotfoss er generator flyttet ut av vannstrømmen ved hjelp av et vinkelgir, som står over turbinen nesten på samme måten som i en Kaplan turbin. En prinsippsskisse av en Kaplan og en vanlig Rørturbin er vist i **Figur 2**.



Figur 2. Prinsippsskisse av Kaplan (øvre) og Rørturbin (nedre)

Eksisterende turbiner

To eldre Kaplan turbiner er installert ved Skotfoss kraftverk. Disse er antatt like, selv om det er små forskjeller i designet som vist i **tabell 2**. Inntaksgrinda har en stavtykkelse på 15 mm og med lysåpninger (fri sikt mellom stavene) på 90 mm.

Tabell 2. Sentrale data for Skotfoss I

		Skotfoss I, Agg. 1	Skotfoss I, Agg. 2
Turbintype	Enhet	Full reg. Kaplan	Full reg. Kaplan
Fallhøyde	[m]	10.0	10.0
Volumstrøm	[m ³ /s]	160.0	150.0
Effekt	[MW]	12.0	12.0
Turtall	[rpm]	107	107
Antatt virkningsgrad	[%]	76.5	81.5
Navdiameter	[mm]	1900	1910
Løpehjulsdiameter	[mm]	4800	4875
Antall løpehjulskovler	[-]	4	4
Antall ledeskovler	[-]	28	24

De nye turbinene

To nye turbiner av typen "Bevel Gear Turbine" fra VATEch er planlagt installert. Typiske data er gitt i **Tabell 3**. Antall ledeskovler er kun halvparten av det som er brukt på Kaplan turbinen, men det kommer av at radiusen er mye mindre og dermed trengs det færre skovler. Inntaksgrinda har en stavtykkelse på 10 mm og lysåpninger på 60 mm.

Tabell 3. Sentrale data for Skotfoss II

		Skotfoss II, Agg. 1	Skotfoss II, Agg. 2
Turbintype	Enhet	Bevel Gear Turbine	Bevel Gear Turbine
Fallhøyde	[m]	9.8	9.8
Volumstrøm	[m ³ /s]	30	30
Effekt	[MW]	2.6	2.6
Turtall	[rpm]	247	247
Antatt virkningsgrad	[%]	90.1	90.1
Navdiameter	[mm]	870	870
Løpehjulsdiameter	[mm]	2150	2150
Antall løpehjulskovler	[-]	4	4
Antall ledeskovler	[-]	12	12

2.2 Forventet kjørestrategi

Pr. i dag kjøres Skotfoss I (agg. 1 og 2) ut fra vannføringen opp til 309 m³/s. Ved større vannføringer åpnes lukene og overflødig vann slippes forbi uten å gå gjennom turbinene. Etter at de nye turbinene er igangsatt vil Skotfoss II med agg. 1 og 2 blir startet først siden disse har mye høyere virkningsgrad. Ut ifra varighetskurven, basert på de ti siste driftsårene, vil dette tilsi at begge de to nye turbinene vil gå kontinuerlig. Ved vannføring over 70 – 80 m³/s vil Skotfoss I, agg. 2 bli startet og Skotfoss I, agg. 1, vil bli koblet inn til slutt, og i praksis ta flomtoppene.

2.3 Beregningsgrunnlag

Beregningene er basert på data fra turbinene (**Tabell 2 og 3**), og etter anbefaling fra Montén (1985) er bare midlere løpehjulsradius vurdert. Rotasjonshastigheten, u , til løpehjulet beregnes som:

$$u = \omega \cdot r_m = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right) \cdot \left(\frac{r_y + r_i}{2} \right) = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right) \cdot \left(\frac{d_y + d_i}{4} \right) \quad (\text{Ligning 1})$$

Aksialhastigheten, c , finnes fra volumstrømmen som:

$$c = Q / A_t = Q / (\pi(r_y^2 + r_i^2)) = Q / \left(\frac{\pi}{4} (d_y^2 + d_i^2) \right) \quad (\text{Ligning 2})$$

Dersom en antar at skovltykkelsen for skovlen opptar omtrent 5 % av arealet, så gir dette en økning i aksialhastigheten på 5 %.

Ledeskovlstillingen er ukjent på alle turbinene. På Skotfoss II er det oppgitt en maksimal åpning på ca. 70°. Hvilken ledeskovlvinkel som brukes på beste operasjonspunkt er ukjent, og vi antar derfor at ledeskovlene har 50° åpningsvinkel på dette driftspunktet (gjelder kun for Skotfoss II).

For Skotfoss I er brutto arealet ved ledeskovltappene

$$A_L = 2\pi d_l \cdot b_l = 2\pi \cdot 5.850 \cdot 2.020 = 74.2 \text{ m}^2 \quad (\text{Ligning 3})$$

Ledeskovlens største tykkelse er 0,168 m og dersom vi antar at ledeskovlinnstilling ved beste driftspunkt er 20° (tilsvarer omtrent 30°, siden ledeskovlene ikke ligger langs tangenten ved stengt tilstand), er det effektive strømningsarealet estimert til:

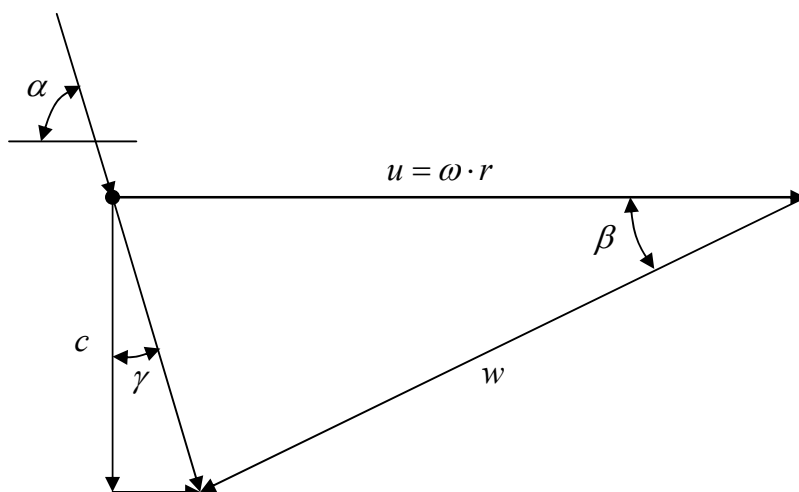
$$A_L \approx 74.2 - 28 \cdot (2.020 \cdot 0.168 / \sin(30^\circ)) = 55.2 \text{ m}^2 \quad (\text{Ligning 4})$$

Vi regner med at spinnets i vannet etter ledeapparatet er omtrent konstant (ser bort fra friksjonen, slik at ikke spinnets reduseres). Siden arealet reduseres fra ledeapparatet til løpehjulet, vil også vinkelen inn på løpehjulet reduseres. Arealet inn på løpehjulet er:

$$A_R = \left(\frac{\pi}{4} (d_y^2 + d_i^2) \right) = 15.26 \text{ m}^2 \quad (\text{Ligning 5})$$

På Skotfoss I reduseres arealet med en faktor på 3,6 fra ledeapparatet til løpehjulet, dvs. en akselerasjon og retningsendring av vannet inn mot løpehjulet. Da vi ikke har kjennskap til ledeskovlåpningen ved Skotfoss I, har vi antatt en åpning på 20° ved beste driftspunkt. Dette gir en vinkel inn på løpehjulet på $(90^\circ - 30^\circ) / 3.6 = 16.6^\circ = \gamma$.

Et antatt hastighetsdiagram kan da settes opp for beste operasjonspunkt for Skotfoss I (**Figur 3**). Skovlvinkelen er ikke oppgitt, og regnes ut etter en sammenheng gitt i Montèn (1985), hvor vi tar utgangspunktet i forhold u/c og finner β . For alle turbinene er rotasjonshastigheten, u , omtrent lik 17-18 m/s. Ellers er de andre hastighetene like siden dette bestemt av turtall og tilgjengelig fallhøyde.



Figur 3. Antatt hastighetsdiagram for Skotfoss I.

Tabell 4. Sentrale data for Skotfoss I og II

	Skotfoss I, Agg. 1	Skotfoss I, Agg. 2	Skotfoss II, Agg. 1/2
Turbintype	Full reg. Kaplan	Full reg. Kaplan	Bevel Gear Turbine
Rotasjonshastighet, u	18.77	19.01	19.53
Aksiell hastighet, c	10.5	10.5	9.9
Antatt Skovlvinkel, β	31.4	31.4	29.3
Løpehjulsdiameter	4800	4875	2150
Antall løpehjulskovler	4	4	4
Antall ledeskovler	28	24	12

2.4 Skovlpasseringer

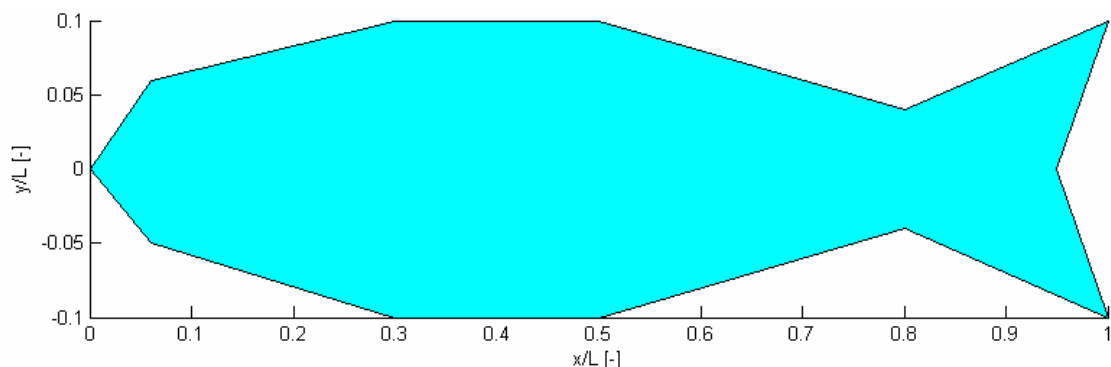
Det er skovlpasseringene som avgjør om fisk kommer seg levende gjennom turbinen, eller om den blir drept/skadd. Dess større avstand det er mellom skovlene dess større sannsynlighet er det for at fisken kommer uskadd gjennom turbinen. For både Skotfoss I og II er hastighetene, både aksial og radial, omtrent like. Imidlertid er forskjellen i turtall stor, fra 107 til 247 rpm. Dette gjenspeiler at Skotfoss II er mindre enn turbinene på Skotfoss I. Den radielle avstanden mellom hver skovl er $\pi \cdot D_m/4 = 2.631$ m for Skotfoss I, mens den er redusert til 1.186 m for Skotfoss II. Uttrykt i forhold til normale smoltlengder ($L = 120$ mm) er avstanden henholdsvis ca 23 og ca 10 ganger smoltlengden (L), og det er således mye trangere i Skotfoss II enn i Skotfoss I.

2.5 Fiskens oppførsel i turbinen

Det er antatt at fisken passivt vil følge vannstrømmen i turbinen. Vannhastighetene er høye og akselerasjonen er i deler av systemet høy, og vi vet ikke om fisken vil søke eller makter å opprettholde en bestemt posisjon i vannet. Vi har derfor antatt en vilkårlig posisjon på fisken, slik at når fisken kommer inn i turbinen er retningen tilfeldig.

2.6 Fiskens størrelse

Normal smoltstørrelse er antatt å være 120 mm, med et standardavvik på 15 mm. Dette innebærer at minste fisk er antatt å være 95 mm mens den største er 170 mm. Dette er imidlertid ikke den største fisken som kan komme inn i turbinen, noe som er bestemt av lysåpningen på varegrindene som er 90 eller 60 mm. Dersom en grovt antar at fisken har en bredde som er omtrent 50 % av høyden og som igjen er 20 % av lengden, så kan fisk med lengde opp mot 90 cm komme inn i turbinene. Utgytt laks kan således gå i turbinene. Fisken er antatt å ha en form som vist i Figur 4.



Figur 4. Normalisert fisk. L er fiskens relative lengde. Normal smoltlengde er 120 mm.

2.7 Treffsannsynlighet

Fordi det i praksis ikke er mulig å si noe presist om en fisk som passerer turbinene vil overleve en turbinpassering, har vi basert oss på å beregne treffsannsynlighet. I dette arbeidet er det gjort en del viktige antakelser eller forenklinger:

- Fisken følger passivt med strømmen, slik at den har strømningsretning med samme vinkler og hastighet som vannet.
- Fiskens posisjon er tilfeldig.
- Fisken defineres som truffet dersom den er nærmere enn $4L$ når fisken kommer fremfor skovlen, eller dersom fisken er nærmere enn $2L$ når skovlen har passert.
- I hver simulering er avstanden fra laveste aksielle punkt på fisken og spissen på skovlen (en av de fire) som bestemmer den radielle avstanden.
- Tidssteget er satt slik at fisken beveger seg $L/3$ lengde inn mot turbinen i hvert tidssteg og radiell avstand sjekkes når aksial avstand til skovlspissen er mindre enn $L/2$.

2.8 Simulerte treffsannsynligheter og dødelighet

Skotfoss I

3000 smolt med lengde 120 mm, ble sluppet tilfeldig gjennom turbinen. Smolten antas død dersom den radielle avstanden fra skovlspissen, a , var i intervallet $[-2L, 4L]$ når smolten passerer innløpet på turbinen. Det ble utført tre simuleringer med følgende resultat:

Simulering 1		Simulering 2		Simulering 3	
Treff	Hel	Treff	Hel	Treff	Hel
824(27,4 %)	2176	813 (27,1 %)	2187	826 (27,5 %)	2174

Dette stemmer godt overens med forenklede anslag (Montèn 1985) for dødeligheten på $S \approx 6/23 = 26 \%$, basert på forholdstallet mellom relativ (i smoltlengder) risikoavstand ($-2L$ til $+4L$) og totalavstand mellom skovlene (også i smoltlengder)

Skotfoss II

Den radielle avstanden mellom hver skovl på innløpet er $\pi \cdot D_m/4 = 1,1859$ m. Siden rotasjons-hastigheten til skovlen er omtrent den samme som Skotfoss I, vil fisken ha mye større risiko for å treffe en skovl i denne turbinen. Det forenklede anslaget på dødeligheten basert på Montèn (1985) er $S \approx 6/10 = 60 \%$.

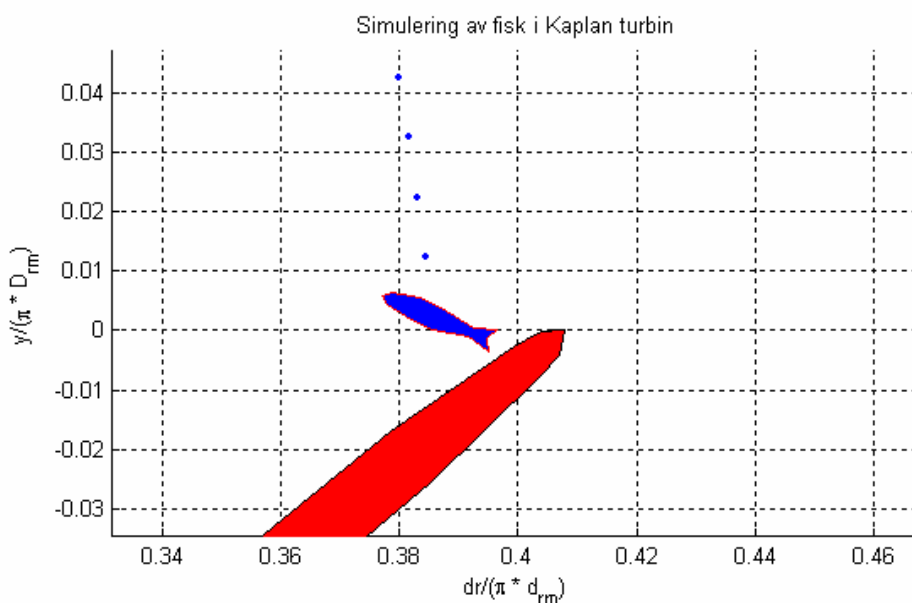
Det ble utført tre simuleringer av strømmingen i Skotfoss II med følgende resultat:

Simulering 1		Simulering 2		Simulering 3	
Treff	Hel	Treff	Hel	Treff	Hel
1756 (58,5 %)	1244	1723 (57,4 %)	1277	1705 (56,8 %)	1295

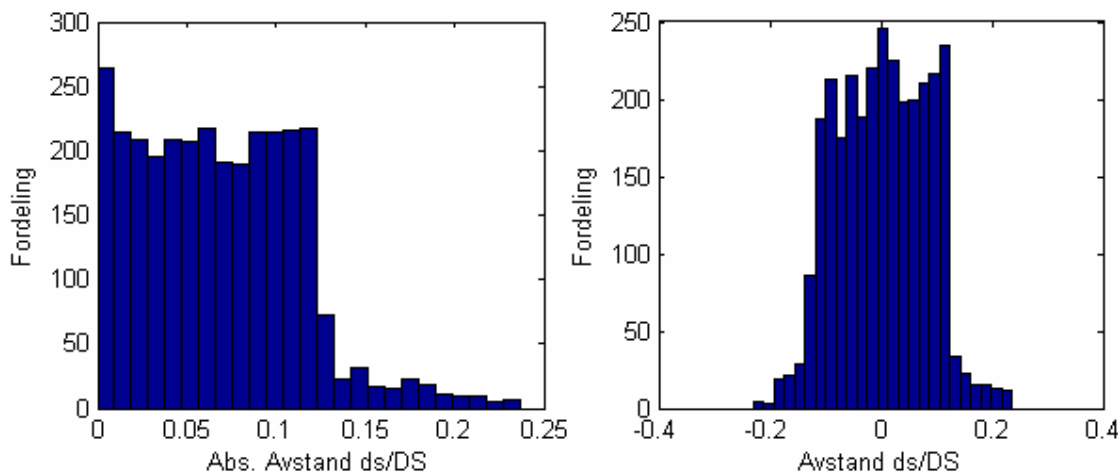
Det ble også gjennomført simuleringer med større fisk (opp til 75 cm), og dødeligheten øker raskt og er total for de største fiskene. Basert på Montèn (1985) sitt forenklede anslag vil man nærme seg total dødelighet for fisk på 43 cm i Skotfoss I og 20 cm i Skotfoss II.

2.9 Vurdering av simuleringsresultatene

Å bestemme hvor nært fisken kan være skovlen uten å bli skadet eller drept er vanskelig, uten å gjøre praktiske forsøk. I våre beregninger er det antatt at det vil være farligere å komme inn i turbinene når skovlen kommer inn mot fisken fra venstre (sett fra utsiden), enn om fisken kommer inn i turbinen når skovlen nettopp har passert som vist i **Figur 5**. Fiskens vridning vil også ha noe å si for mulighetene for å komme uskadd gjennom turbinen. Det er antatt at når fisken ligger horisontalt vil treffprosenten være lavere enn om fisken står vertikalt eller følger strømmen, fordi den radiale forflyttingen er lengre på den tiden det tar fra fiskens lengde å entre kanalen mellom turbinskovlene. Fordelingen av hvor fisken er i forhold til skovlspissen er vist i **Figur 6**.



Figur 5. Skisse av fisk og turbinskovl ved tiden t . Skovlen går fra venstre mot høyre.

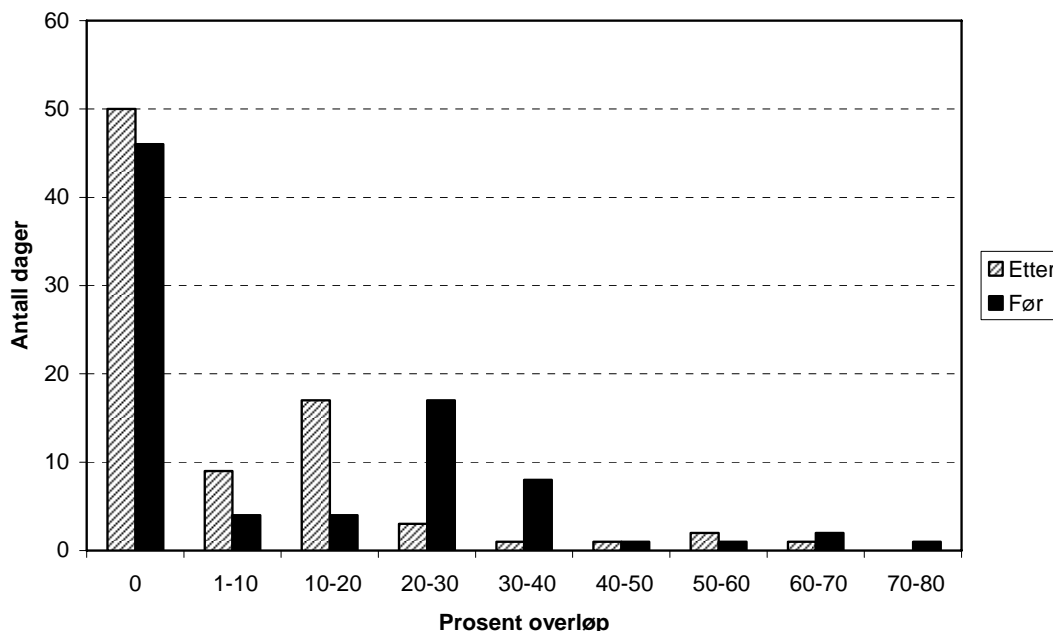


Figur 6. Simuleringsresultater fra Skotfoss II: frekvensfordeling av avstand fra skovl når fisken entrer turbinkanalen. DS er avstanden mellom hver skovl.

Ved dellast, dvs. lavere vannføring enn beste driftspunkt, vil ledeskovlvinkelen reduseres, samtidig som volumstrømmen reduseres. Vi antar at vannføringen ved beste operasjonspunkt er 80 % av full vannføring. Dellast er antatt å være ved 50 % vannføring, dvs. at volumstrømmen er 5/8 av maksimal vannføring. Siden både Skotfoss I og II er fullregulert, dvs. at løpehjulsskovlene er vribare, så vris skovlene for å optimalisere virkningsgraden på de ulike driftspunktene. Turtallet er imidlertid fast, slik at løpehjulsskovlene har den samme radielle farten. Tiden det tar for fisken å forflytte seg aksialt er imidlertid lengre, på grunn av lavere vannhastigheter, slik at sannsynligheten for at fisken skal bli truffet øker noe. På den annen side reduseres kollisjonshastigheten litt, slik at det er vanskelig å trekke en klar konklusjon på hva som skjer ved dellastkjøring.

3 Endringer i overløp

Økt slukeevne (fra 310 til 370 m³/s) i Skotfoss kraftverk ved bygging av Skotfoss II vil redusere overløpet (vann som ikke går gjennom turbinene) i dammen. Ut fra at smoltutvandring sannsynligvis vil foregå i løpet av mai måned har vi analysert daglige vannføringsdata fra Skotfoss fra mai 2004, 2005 og 2006. Vi har tatt utgangspunkt i totalvannføringen, og antatt at kapasiteten i kraftverkene blir utnyttet maksimalt. Av totalt 84 dager med data blir det bare syv flere dager uten overløp om man hadde hatt Skotfoss II i drift i denne perioden. Fordi smoltens valg av utvandningsrute (overløp eller kraftverk) kan være påvirket av andelen vann som går i overløp (Uglem et al. 2005), har vi sett på hvordan antall dager med ulik andel overløp endres fra dagens situasjon (før) til etter at Skotfoss II eventuelt blir bygd (etter). Antall dager med små overløp (1-20 % av totalvannføringen) vil øke mens antall dager med overløp på mellom 20 og 40 % vil bli strekt redusert (**Figur 7**). Antall dager med store overløp (over 40 %) endres lite.



Figur 7. Antall dager i mai måned med fra null til 80 % overløp (av totalvannføringen) i Skotfoss med dagens kraftverk (før) og etter bygging av nytt kraftverk (etter) basert på data fra 2004-06.

4 Diskusjon

Den totale smoltdødeligheten (sett bort fra dødelighet knyttet til økt oppholdstid i magasinet) forbi en kraftverksdam er bestemt av hvor stor andel av smolten som går i kraftveket, og dødeligheten i turbinene. Basert på data fra litteraturen og egne simuleringer av treffsannsynlighet anslår vi dødeligheten for smolt (snittstørrelse 120 mm, SD 15 mm) som går inn i de eksisterende turbinene (Skotfoss I) til å ligge mellom 20 og 25 %. Simuleringene antyder noe høyere dødelighet, mens litteraturverdiene antyder noe lavere (men er basert på større turbiner). Andelen av den utvandrende smolten som går inn i kraftverket er ikke kjent, og vi har ikke lokal informasjon egnet til å vurdere dette. Vi vet fra studier i Orkla (Hvidsten & Johnsen 1997) og Mandalselva (Uglen et al. 2005) at andelen av totalvannføringen som går i kraftverket kan påvirke valget av utvandningsrute. Det er imidlertid trolig at lokale strømningsforhold og typen overløp (bunn eller overflate) også kan ha betydning.

De to nye turbinene, som forventes å være i kontinuerlig drift under normale forhold, vil gi betydelig større dødelighet (ca dobbel så høy) for de fiskene som går inn. Hovedårsaken til dette er at turbinene er relativt små, og det er mye mindre plass i disse enn i de to eksisterende turbinene. Selv om våre anslag for turbindødelighet skulle være noe feil, er vi rimelig sikre på at den relative forskjellen i dødelighet i de gamle og nye turbinene gir et korrekt bilde. Ut fra ønsket om å minimalisere dødeligheten for smolt vil derfor en stor turbin være betydelig bedre enn to små.

Bygging av et nytt kraftverk innebærer også at mindre vann vil gå i overløp (gjennom luker). Fordi vi ikke vet om smolt går i kraftverket eller i overløp i dagens situasjon, er det vanskelig å si noe sikkert om hvordan et nytt kraftverk vil påvirke smoltens utvandningsrute. Ut fra andre studier fra Orkla (Hvidsten & Johnsen 1997) og Mandalselva (Uglen et al. 2005), er det imidlertid grunn til å anta at andelen av totalvannføringen som går til overløp er av betydning. Antall dager helt uten overløp endres lite, men antall dager med moderat stort overløp vil uten tiltak bli betydelig lavere. Dersom en andel av smolten i dagens situasjon velger å gå i overløp når dette utgjør 20 til 40 % av totalvannføringen, vil det bli få slike mulige utvandningsdager med Skotfoss II på plass. Uten tiltak er det således mer sannsynlig at et nytt kraftverk i Skotfoss vil føre mer smolt inn i turbiner enn at det ikke gjør det.

Det er mulig å gjennomføre tiltak som reduserer andelen smolt som går i turbinene. Det eneste tiltaket som er evaluert i særlig grad er å øke andelen av totalvannføringen som går til overløp i smoltens vandringsperiode. Ved å etablere smoltutvandningsmodeller (Uglen et al. 2005) som ut fra miljøvariable forutsier når smolten vandrer, eller ved observasjoner av den faktiske utvandringen (video eller feller), kan man optimalisere kjørestrategien for å få mest mulig smolt ut på kortest mulig tid. Et slikt oppsett er imidlertid kunnskapskrevende, og er i liten grad utprøvd i praksis. Det er også mulig å lede eller skremme smolt med ulike innretninger, men det finnes få (om noen) gode og dokumenterte eksempler med store effekter. Disse tiltakene krever at smolten har en alternativ vandringsrute, utenom turbinene.

I tillegg til utvandrende smolt og oppvandrende laks, vil også utgytt laks og sjøaure (vinterstøinger) prøve å passere dammen på Skotfoss. En god del av fisken som har gytt overlever og vil vandre tilbake til havet. Noen av disse vil igjen kunne komme tilbake for å gyte en gang til (og i sjeldne tilfeller en tredje gang). Kunnskapen om utvandring av vinterstøing er liten, men radiomerkeforsøk viser at noen går ut om høsten, mens mange ser ut til å gå ut om våren samtidig med smolten. Vinterstøinger av laks vil normalt være minst 50 cm lange (sjøauren kan være mindre), og om de ikke finner overløp å gå i vil de bli drept i turbinene eller bli igjen i magasinet.

5 Konklusjoner

- Smolten i Skiensvassdraget antas ut fra resultatene fra undersøkelsene i nærliggende Numedalslågen å vandre ut i løpet av mai måned, men passering av de store innsjøene kan forsinke utvandringen.
- På grunn av betydelig bedre virkningsgrad i de nye turbinene, vil disse bli startet før de gamle, og i følge Skien kraftproduksjon i praksis gå kontinuerlig.
- For vannføringer i vassdraget opp til 60 m³/s vil dette medføre at smoltdødeligheten for smolt som går inn i turbinene mer enn dobles fra dagens situasjon.
- For høyere vannføringer (over 60 m³/s) vil ekstratapet gradvis reduseres, gitt at smolten ikke viser preferanse for det nye inntaket. Tapet vil imidlertid alltid bli større enn ved eksisterende turbinløsninger.
- Økt total slukeevne i kraftverket vil uten tiltak medføre at mindre vann går til overløp, og mer vann går gjennom turbinene selv ved flom. Dette øker smoltdødeligheten for anlegget.
- Vi vurderer de relative smoltdødelighetstallene for Skotfoss I og II som sannsynlige, mens det absolutte nivået er mer usikkert. Antagelsen om at fisken dør dersom avstanden er i området $-2L < ds < 4 L$ er kanskje litt for pessimistisk, og smoltdødeligheten kan være litt for stor i våre beregninger.
- En større turbin av samme type i stedet for to relativt små turbiner vil redusere ekstratapet ved utvidelse av kapasiteten i Skotfoss.
- Utvandrende vinterstøing av laks og sjøaure vil ikke overleve passering av turbinene (dersom de kommer gjennom grindene), og vil bare kunne passere Skotfoss levende ved overløp.

6 Referanser

- Avellan, F. 2004. Introduction to cavitation in Hydraulic Machinery, The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, Romania, October, 2004
- Forseth, T., Fiske, P., Hvidsten, N.A. & Saltveit, S.J. 2003. Smoltoverlevelse i Suldalslågen - miljøfaktorer som påvirker smoltutvandring og overlevelse i fjorden. - Suldalslågen - Miljørapport (30). 59pp. Statkraft SF, Lilleaker.
- Hansen, L.P. & Johnsen, B.O. 2005. Mandalselva- effekter av Laudal Kraftverk på overlevelse av utsatt smolt. Framdriftsrapport, I rapport, Reetablering av laks på Sørlandet. Årsrapport fra Reetableringsprosjektet 2004. – Direktoratet for naturforvaltning, utredning 2005-10.
- Hvidsten, N.A., Jensen, A.J., Vivås, H., Bakke, Ø. & Heggberget, T.G. 1995. Downstream migration of Atlantic salmon smolts in relation to water flow, water temperature, moon phase and social interaction. *Nordic Journal of Freshwater Research* 70: 38-48.
- Hvidsten, N.A. & Johnsen, B.O. 1997. Screening of descending Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts from a hydro-power intake in the river Orkla, Norway. - *Nordic J. Fresh. Res.* 73: 44-49.
- Hvidsten, N.A., Heggberget, T.G. & Jensen, A.J. 1998. Sea water temperatures at Atlantic salmon smolt entrance. *Nordic Journal of Freshwater Research* 74: 79-86.
- Jepsen, N., Aarestrup, K., Rasmussen, G. and Økland, F. 1998. Survival of radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* L) and trout (*Salmo trutta* L) smolts passing a reservoir during seaward migration. – *Hydrobiology*. 371-372; 347-353.
- Jonsson, B. & Ruud-Hansen, J. 1985. Water temperature as the primary influence on timing of seaward migrations of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42:593-595.
- Mills, D.H. 1964. The ecology of young stages of the Atlantic salmon in River Bran, Rosshire.- Dept. Ag. Fish for Scotland, *Freshw. Salm. Fish. Res.* 32. 58 p.
- Montén, E. 1985. Fisk og turbiner; om fiskars møyligheter att uskadda passera gjennom kraftverksturbiner. ISBN 01-7186-243-9. Vattenfall. 114s.
- Muir, W.D., Smith, S.G., Williams, G.J., & Sandford, B.P. 2001. Survival og juvenile salmonides passing through bypass systems, turbines, and spillways with and without flow deflectors at Snake River dams. –*North American Journal of Fisheries Management* 21; 135-146.
- Rivinoja, P. 2005. Size dependent power-station induced mortality of smolts (*Salmo* sp.) and the potential effects on the spawning stock. In *Migration Problems of Atlantic salmon (Salmo salar L) in Flow regulated Rivers*, 13pp. Doctoral Thesis No. 2005:114 Faculty of Forest Sciences. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Thorstad, E.B., Arnekleiv, J.V., Forseth, T., Sandlund, O.T., Jensen, A.J. & Næsje, T.F. 2006. Fiskevandring og effekter av endringer i vannføring. S. 100-119 i *Økologiske forhold i vassdrag – konsekvenser av vannføringsendringer. En sammenstilling av dagens kunnskap*. S.J. Saltveit (red.). Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.
- Uglen, I., Økland, F., Forseth, T., Diserud, O., Fiske, P., Thorstad, E.B., Hvidsten, N.A. & Berger, H.M. 2005. Smoltutvandring forbi Laudal kraftverk i Mandalselva. - NINA Rapport 13. 31 s.

NINA Rapport 193

ISSN:1504-3312

ISBN 10: 82-426-1753-8

ISBN 13: 978-82-426-1753-8



Norsk institutt for naturforskning

NINA Hovedkontor

Postadresse: NO-7485 Trondheim

Besøks/leveringsadresse: Tungasletta 2, NO-7047 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00

Telefaks: 73 80 14 01

Organisasjonsnummer: 9500 37 687

<http://www.nina.no>