

2018:00074 - Åpen

Rapport

Utforming av opp- og nedvandringsanlegg for laks og ørret i Rafoss i Kvina

Forfattere

Hans-Petter Fjeldstad, SINTEF Energi
Torbjørn Forseth og Ana T. Silva, NINA



EMNEORD:
Vannkraft
Laks
Laksetrapp
Fiskevandring
Fisketrapp
Nedvandring

Rapport

Utforming av opp- og nedvandringsanlegg for laks og ørret i Rafoss i Kvina

VERSJON

DATO

2018-01-11

FORFATTERE

Hans-Petter Fjeldstad, SINTEF Energi
Torbjørn Forseth og Ana T. Silva, NINA

OPPDRAAGSGIVER(E)

Sira-Kvina kraftselskap

OPPDRAAGSGIVERS REF.

Kaspar Vereide

PROSJEKTNR

502001633

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

26

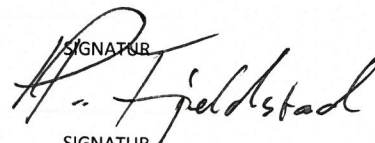
SAMMENDRAG

Sira-Kvina kraftselskap har fått konsesjon til å bygge kraftverk i Rafoss i Kvina. Rafoss er i dag den naturlige vandringsbarrieren for laks og anadrom ørret, og i forbindelse med utbyggingen skal det bygges laksetrapp forbi fossen, samt utformes løsninger for sikker nedvandring av smolt og vinterstøing av laks og ørret. Vandringsanleggene vil åpne nye produksjonsområder for anadrom fisk som etter tidligere beregninger vil bidra til å gi elva en produksjon av laks tilsvarende potensialet før Kvina ble regulert. Denne rapporten beskriver forslag til ny laksetrapp i Rafoss, samt nedvandringsløsninger som skal eliminere fiskedødelighet som følge av vandring gjennom turbinene. Den nye fisketrappa foreslås lagt i rør inne i tunnelen for vanntilførselen til kraftverket, eller i en separat tunnel. Slik blir det små inngrep i naturen langs fossen. Nedvandringsløsningene baseres på at det etableres en finmasket varegrind foran inntaket til kraftverket. Dette kan bli første gang en finmasket varegrind blir benyttet på en anadrom strekning i Norge, basert på anerkjent teknologi fra blant annet Sverige og Frankrike. Løsningen hindrer således fisken fra å vandre inn i kraftverket, og bidrar til at lakseproduksjonen på strekningen oppstrøms Rafoss kan utnyttes fullt ut.

Rapporten omtaler også mulighetene for et lakseobservatorium i tilknytning til kraftverket.

UTARBEIDET AV

Hans-Petter Fjeldstad

SIGNATUR


KONTROLLERT AV

Tor Haakon Bakken

SIGNATUR


GODKJENT AV

Knut Samdal

SIGNATUR




RAPPORTNR
2018:00074

ISBN
978-82-14-06663-0

GRADERING
Åpen

GRADERING DENNE SIDE
Åpen

Innholdsfortegnelse

1	Innledning og målsetning.....	4
2	Generelt om fisketrapper for anadrom fisk i Norge.....	5
3	Utforming av fisketrapp i Rafoss	6
3.1	Inngang og inngangsområde.....	7
3.2	Kulpetrapp i egen tunnel/trapp i rør i kraftverkstunnelen	10
3.3	Vanninntak og fisketelling.....	12
3.4	Drift og vedlikehold.....	13
4	Nedvandringsanlegg	14
4.1	Varegrind.....	14
4.1.1	Spalteåpning i inntaksrist	14
4.1.2	Ristas areal og vannhastigheter mot rista	15
4.1.3	Finristas helning og plassering.....	15
4.2	Nedvandringsutløp i Rafoss	16
5	Overlevelse for nedvandrende fisk i Rafoss	18
6	Utsetting av fisk.....	20
7	Lakseobservatorium	20
8	Referanser.....	22

1 Innledning og målsetning

Det er gitt konsesjon til Sira-Kvina kraftselskap (SKK) til bygging av nytt kraftverk i Rafoss i Kvina. Ved bygging av nytt kraftverk skal det etableres anlegg for vandring av ørret og laks opp og ned forbi kraftverket. Ny fisketrapp i Rafoss vil gi anadrom fisk 6 km med nye produksjonsområder oppstrøms kraftverket. Nedvandrende smolt skal ledes forbi vanninntaket til kraftverket, og det er et mål at ingen smolt skal vandre inn i inntaket eller forsinkes unødvendig i nærheten av dette. Tilsvarende skal laksetrappen effektivt tiltrekke seg voksen fisk og sørge for effektiv vandring opp forbi fossen. Det overordnede målet med vandringsanleggene er at Rafoss skal bli det mest laksevennlige kraftverket i Norge.

Slukeevnen i Rafoss kraftverk er $28 \text{ m}^3/\text{s}$. Inntaksmagasinet Stegemoen har et relativt konstant nivå på 125,4 moh, mens normalt undervannsnivå er ca. 80,4 moh. Høydeforskjellen for kraftverket og fisketrappa er således omkring 45 meter, mens lengden på trappa er ca. 440 meter. Det er et pålegg om minstevannføring i Rafoss på $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ om vinteren og $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$ om sommeren (1. mai – 1. oktober).



Figur1. Oversiktsskisse over kraftverket med Rafoss til venstre i bildet. Blå piler viser strømretning.

2 Generelt om fisketrapper for anadrom fisk i Norge

Bygging av ca. 440 trappeanlegg for anadrom laksefisk i Norge har vist at riktig konstruerte trapper effektivt kan få fisk forbi vandringshindre (Fjeldstad *et al.*, 2013). Flere forhold er viktige for at trappa skal fungere godt. Inngangen til trappa må plasseres riktig, det må være tilstrekkelig med vann i trappa, og utformingen må tilpasses vannføringa. I tillegg er fiskens kapasitet til å svømme og hoppe avhengig av vanntemperatur. Det har for eksempel vist seg at fisk ikke kan passere fosser og trapper før vanntemperaturen har kommet opp til 8-10° C. Det er således kjent at sportsfisket kan forsinkes ovenfor slike hindre ved lave vanntemperaturer. De fleste norske laksetrapper er bygget forbi naturlige vandringshindre (Grande, 2010), og anslagsvis 30 % er bygget forbi menneskeskapte hindre som for eksempel vannkraftdammer. Ved en gjennomgang av alle norske laksetrapper kom det fram at trapper forbi vannkraftverk har bedre funksjon enn trapper forbi naturlige hindre (Fjeldstad *et al.*, 2013). Årsaken til dette er trolig at både tilsyn og vedlikehold av trapper forbi kraftverk er bedre fordi dette er sikret gjennom konsesjonsvilkår eller andre avtaler. Generelt er manglende vedlikehold og tilsyn med trapper en hovedgrunn til at fisketrapper fungerer dårlig. Blant trapper som har dårlig funksjon av andre grunner, er feil plassering av inngangen den vanligste. Blant annet er det viktig at inngangen er plassert umiddelbart i nærheten av selve vandringshindret, på et sted hvor fisken enten samles eller naturlig velger å undersøke, slik som til siden for en fossefot. Trappa må skape en attraksjonsstråle, og når denne er vanskelig å finne kan fisken velge å ikke vandre inn i trappa (Croze *et al.*, 2008). Et kjent problem oppstår dersom inngangen til fisketrappa befinner seg et stykke nedenfor vandringshindret (Grande, 2010). Fisken søker seg nemlig oppover i hovedstrømmen inntil den ikke kommer videre, og kan bli stående i dette området. Forskjellige studier har også vist at utløp fra kraftstasjoner kan tiltrekke seg oppvandrende laks, og føre til at fisken forsinkes i sin vandring (Thorstad *et al.*, 2003). Spesielt er dette et problem dersom vannføringa fra kraftverket blir svært dominerende i forhold til vannføringen i den ønskede vandringsveien. For ørreten i Hunderfossen har det vist seg at fisketrappa fungerer best når det slippes vann gjennom den damluka som ligger nærmest inngangen til fisketrappa (Kraabøl, M., upublisert materiale). I en studie av 90 norske laksetrapper ble det ikke funnet en sammenheng mellom avstand mellom vandringshinder og inngangen til trappa og trappas funksjon (Fjeldstad *et al.*, 2013). Avstandene varierte her stort sett mellom 2 og 10 meter. I et tilfelle, i Fiskumfossen i Namsen, var avstanden 65 meter, og denne trappa fungerer godt, med opptil 2000 passeringer årlig. Det er likevel viktig å nevne at disse undersøkelsene ikke inkluderte nøyaktige vurderinger av om vandringen faktisk ble forsinket som følge av ugunstig plassering av

trappenes inngang. Dette krever omfattende atferdsstudier på den enkelte lokalitet, som må avklare om forsinkelsen skyldes trappa eller er en generell forsinkelse som er normalt ved de fleste stryk og fosser som er vanskelige å passere for fisken.

En fisketrapp kan konstrueres på mange forskjellige måter (Katopodis 1992; Clay 1995). Den typiske utformingen i Norge er støpte kulpetrapper i betong eller kulpetrapper sprengt i fjell med ca. 50 cm spranghøyde mellom kulpene. I internasjonal litteratur har denne trappetypen blitt kritisert fordi spranghøyden mellom kulpene ikke tillater småfisk eller fiskearter med lav svømmekapasitet å vandre. Voksen laks og ørret er derimot fisk med stor kapasitet til å hoppe og svømme, og erfaringen med kulpetrapper i Norge er generelt god. For å fungere må imidlertid kulpene ha tilstrekkelig størrelse og strømningsforholdene i og mellom kulpene må være gunstige. Ved valg av trappetrasé må man i tillegg ta hensyn til fysiske påkjenninger fra flommer og is, og konstruksjonene bør ha en estetisk tilpasning til terrenget. I mange tilfeller er det også viktig at oppvandringen overvåkes, som grunnlag for justeringer og utbedringer.

3 Utforming av fisketrapp i Rafoss

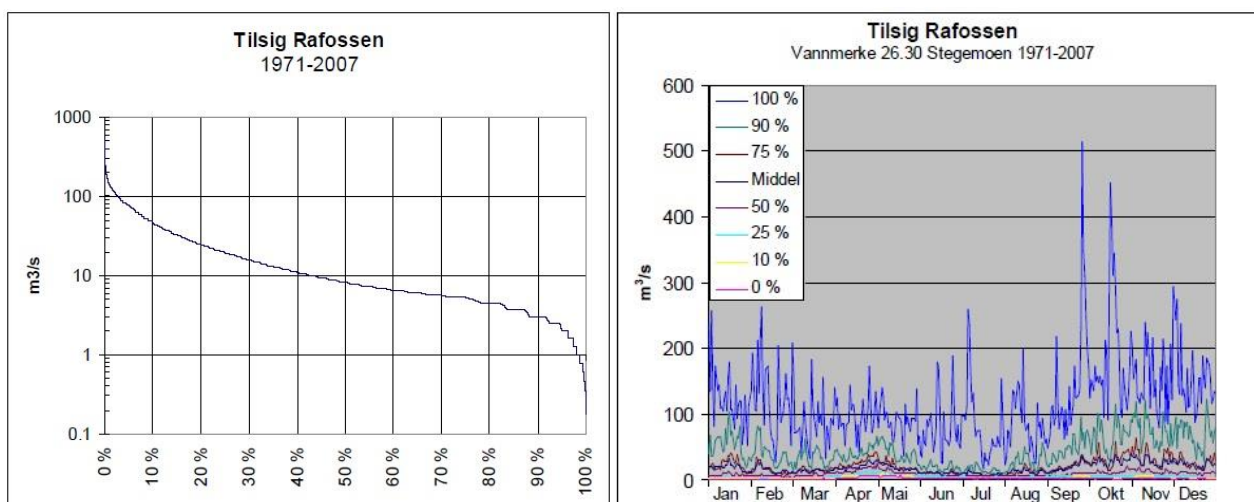
Flere løsninger for ny fisketrapp i Rafoss har vært aktuelle og felles for alle har vært at trappa skal gå i tunnel i samme område som tunnelen for driftsvannet til kraftstasjonen. SKK har hatt ønske om å la driftsvann og trapp gå i samme tunnel. Tunnelen vil være trykksatt, mens det vil være frittspeilsstrømning i røret. Den eneste løsningen har da vært å legge fisketrappa i et rør i tunnelen. Laks og ørret vandrer flere steder i fisketrapper i tunnel, men det har vært erfart at kunstig eller naturlig lys er nødvendig for effektiv vandring (Fjeldstad 2015). Vandring i rør er også en kjent løsning. I Hellandsfossen i Modalselva i Hordaland vandrer anadrom fisk i en 265 m lang rørtrapp av glassfiberarmert polyester (DN 2002). Her er rørets diameter 2,2 meter, mens kulpenes lengde og spranghøyde er henholdsvis 4 og 0,4 meter. Det er dermed god grunn til å tro at en rørtrapp vil fungere godt i Rafoss. Et ukjent aspekt er at den utvendige vannstrømmen kan skape lyd og vibrasjoner i røret. Dette må man søke å unngå ved at røret understøttes eller klamres tilstrekkelig.

Et alternativ til å la trappa gå i rør inne i driftstunnelen er å bygge den i rør i en separat tunnel. Trappa vil i øverste og nederste del gå i friluft, og bygges der som konvensjonell kulpetrapp eller spaltetrapp (vertical slot) i fjell/betong. De forskjellige løsningene beskrives og diskuteres videre i teksten, før en anbefaling gis i konklusjonen.

3.1 Inngang og inngangsområde

Foran utløpet fra kraftverket må det monteres ei varegrind som hindrer fisken i å svømme inn i utløpstunnelen. Varegrinda vil definere fiskens oppvandringshinder. Gitteret kan stå vertikalt eller horisontalt og må dekke hele tverrsnittsarealet av tunnelåpningen. En foreløpig anbefaling til lysåpning er 4-5 cm, men dette bør vurderes grundigere opp mot størrelsesfordelingen av gytevandrende laks og sjøørret i vassdraget. Resultater fra Szabo-Mezzaros *et al.* (2018) anbefales fulgt. Generelt sett bør det settes noe strengere marginer i forholdet mellom fiskens kroppsbredde og gitterets lysåpning ved oppgangssperrer sammenlignet med nedgangssperrer. Årsaken til dette er at oppvandrende fisk lettere kan presse seg gjennom lysåpninger som er mindre enn naturlig kroppsbredde som følge av at den genererer stor svømmekraft med halen og at brystfinnene klemmes lett inntil kroppen.

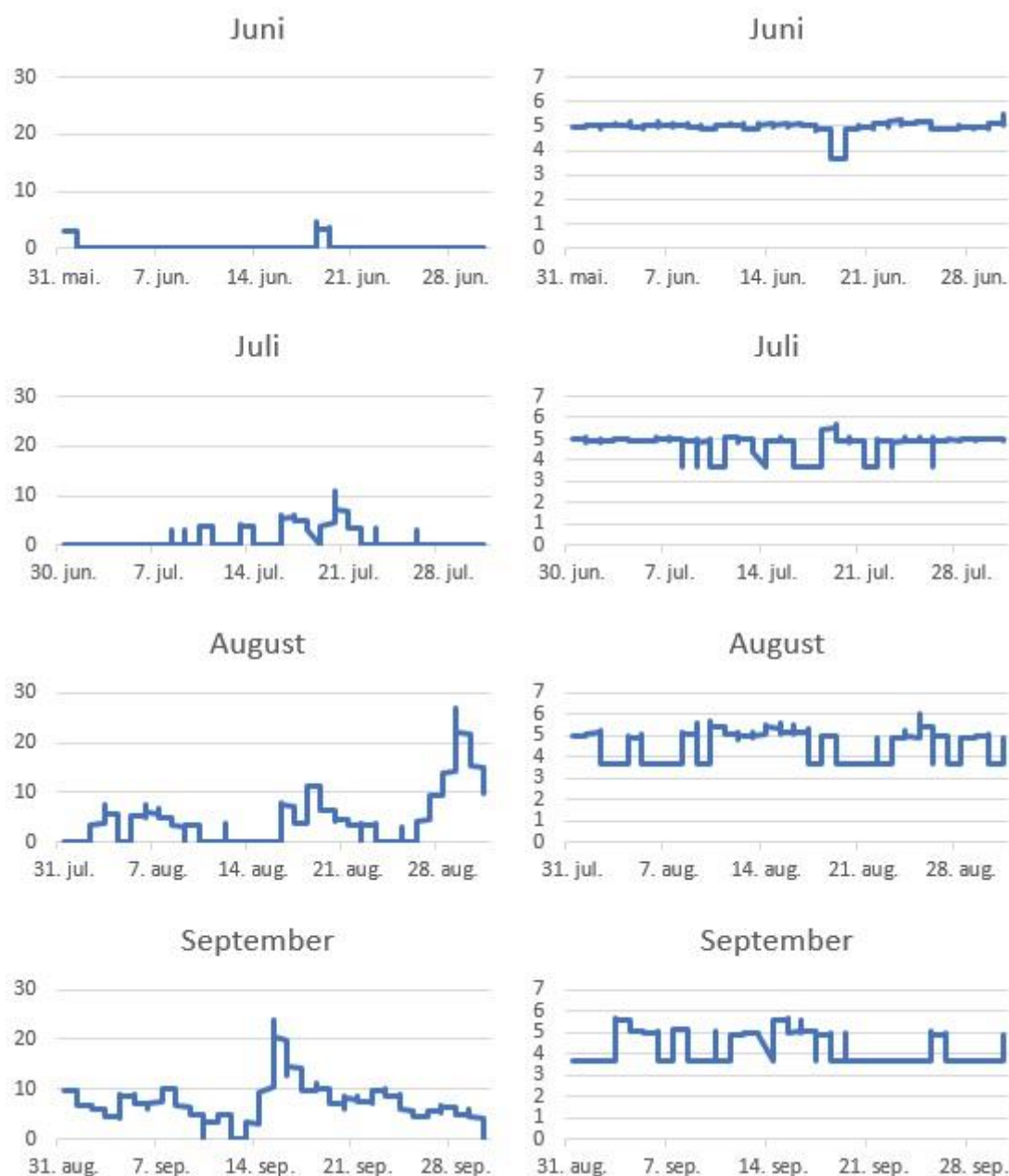
Avgjørende for at en fisketrapp for laks og ørret skal fungere godt er at inngangen plasseres umiddelbart i nærheten av oppgangshinderet. Vandringssesongen (juni-september) er dominert av lave vannføringer i Rafoss (se Figur 2).



Figur 2. Varighetskurve (venstre) og tilsigsdata for Rafoss kraftverk. Hentet fra Theodorsen (2009).

I perioden 1. juni-1.oktober skal det slippes minimum 3,7 m³/s i Rafoss. Dette sammenfaller med laksens oppvandringsperiode. Den planlagte turbinen i kraftstasjonen har en kapasitet på maksimum 28 m³/s, og trenger minst 3 m³/s for å kunne produsere kraft. Dette betyr at det ikke kan produseres kraft før totalt tilsig til Rafoss er høyere enn 6,7 m³/s om sommeren. Basert på beregninger fra SKK er det laget en analyse på fordelingen av vann mellom fossen og kraftverket i laksens vandringsperiode (Figur 3). Analysen viser at det vil være liten kraftproduksjon i juni og juli, mens den øker på utover i august. I september vil vannføringa i kraftverket stort sett være høyere enn i fossen. I de periodene kraftverket står stille vil fossen trolig være

samlingsstedet for oppvandrende fisk, mens fisken antakelig vil søke seg mot utløpet av kraftverket når dette er i drift.

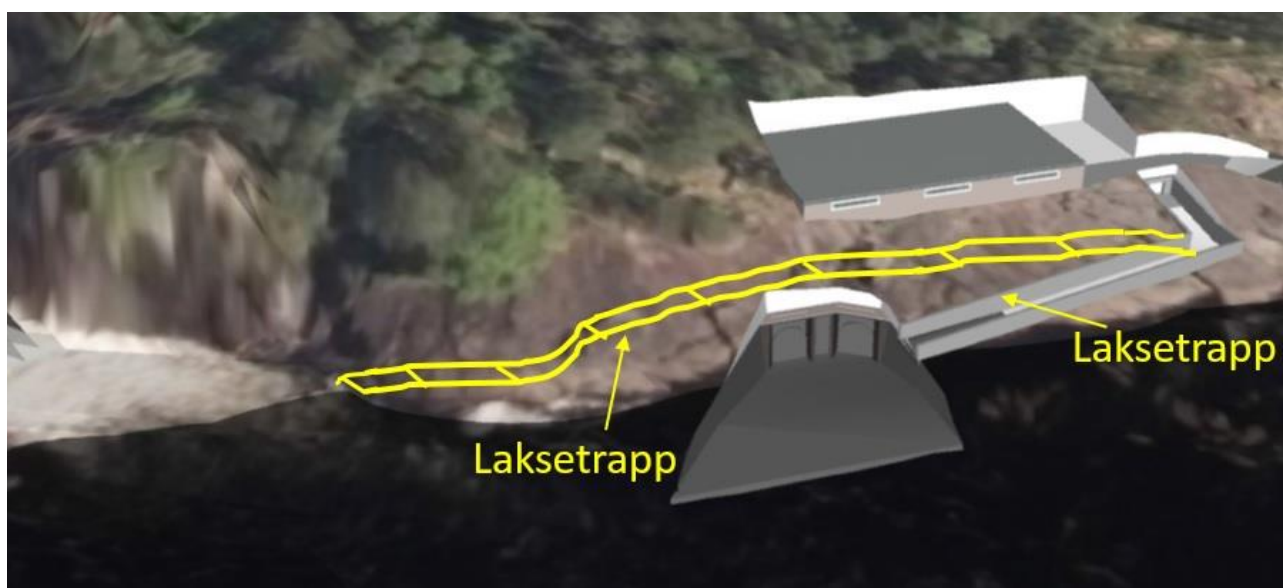


Figur 3. Beregnet vannføring (m^3/s) fra kraftverket (venstre) og i Rafoss (høyre). Kurvene viser median døgnerverdi for årene 2005-2015. (Summen av kurvene for fossen og kraftverket er derfor ikke identisk med kurven for totalt tilsig).

Situasjonen med at hovedvannføringen om sommeren vekselvis vil komme fra fossen og ut fra kraftverket skaper utfordringer for å lokke oppvandrende fisk inn i fisketrappa på alle vannføringer. Vi foreslår derfor følgende tre alternative løsninger:

1. Utløpet av kraftverket legges nærmere foten av Rafoss, slik at fisk som søker seg oppover vil finne inngangen til en trapp som har inngang ved utløpet av kraftverket.
2. Det bygges to trappeinnganger, en ved fossefoten og en ved utløpet av kraftverket ved den lokaliteten dette er planlagt. Vannføringen i trappeinngangen ved fossefoten bør være ca. $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, mens resten av vannet slippes via inngangen ved kraftverksutløpet. Uansett valg av inngang vil fisken møtes i en felles trapp som fører den videre oppover (Figur 4).
3. Det bygges én inngang ved utløpet av kraftverket ved den lokaliteten dette er planlagt (Figur 5), med ekstra tilførsel av vann. Ved vannføringer mellom $3,7$ og $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$ vil alt vannet i utgangspunktet renne i fossen, men $3 \text{ m}^3/\text{s}$ av dette er tilgjengelig og kan med dette alternativet slippes direkte fra produksjonstunnelen og ut i den nederste kulpen i fisketrappa. Denne kulpen må da gjøres større enn de andre. På den måten vil vannføringen fra inngangen i trappa øke sin attraktivitet, spesielt med tanke på at fossen og utløpet fra kraftstasjonen ligger kun 30 meter fra hverandre, og i samme kulp.

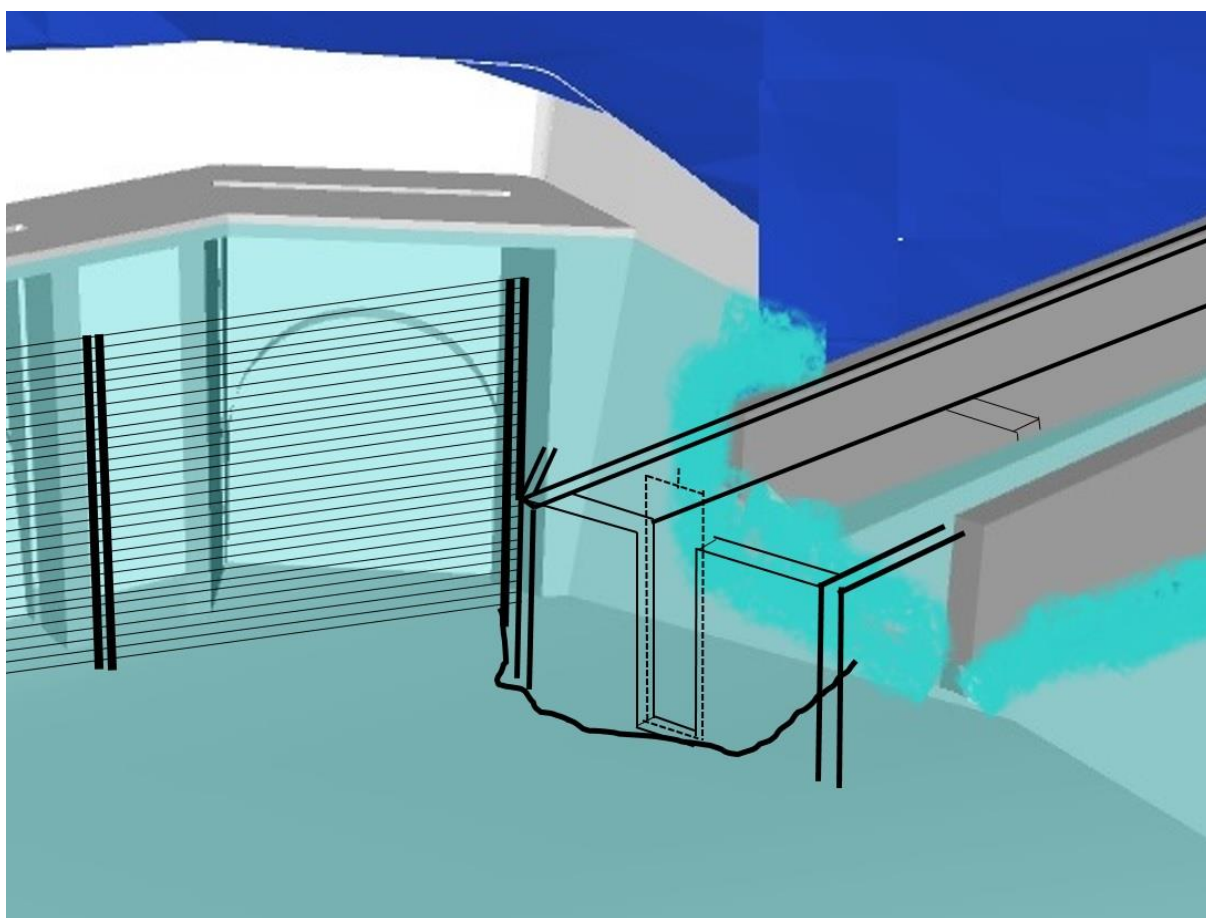
Hvilket alternativ som velges må avgjøres i forbindelse med detaljprosjekteringen.



Figur 4. Skisse som antyder trase for en ekstra inngang for laksetrapp etter alternativ 2

Uansett valg av alternativ må det etableres en hovedinngang til fisketrappa, lokalisert umiddelbart til side for varegrinda foran utløpet til kraftverket. Et forslag til plassering av inngangen er vist på Figur 5. Fra tidligere studier ved Eivindstad kraftverk i Nidelva i Agder (Fjeldstad, upubliserte data) har det vist seg at laks og ørret vegret seg for å gå inn i trappa når inngangen til trappa var plassert over et dypt kraftverksutløp. En hypotese at den dype, trygge utløpskanalen var et mer attraktivt oppholdssted for fisken enn vannstrålen fra trappa i overflaten ved siden av. For å unngå en slik situasjon bør inngangen til trappa plasseres umiddelbart til side for varegrinda, og på samme dyp som fisken samler seg foran utløpet. Denne detaljen kan være

avgjørende for trappas effektivitet, og det kan være nødvendig med tilpasninger av inngangen i ettertid, for eksempel ved at inngangen utføres som en vertikal spalte i full dybde i stedet for et overløp som i en tradisjonell fisketrapp. I den nederste terskelen bør det derfor monteres en dyp åpning med muligheter for å tilpasse utløpsutforming. Fra inngangen og videre oppover til trappa går inn i fjellet foreslås det at trappa utformes som en spaltetrapp, fordi dette gir en god fleksibilitet i forhold til vannivå og vannføring i trappas nedre del. For å betjene utløpsåpningen bør det bygges en plattform over utløpet med talje/vinsj. Vannhastigheten fra trappa og ut i utløpskanalen bør til enhver tid være mellom 2,0 og 3,5 m/s (Grande 2010).



Figur 5. Utforming av inngang til laksetrapp og varegrind foran kraftverksutløp.

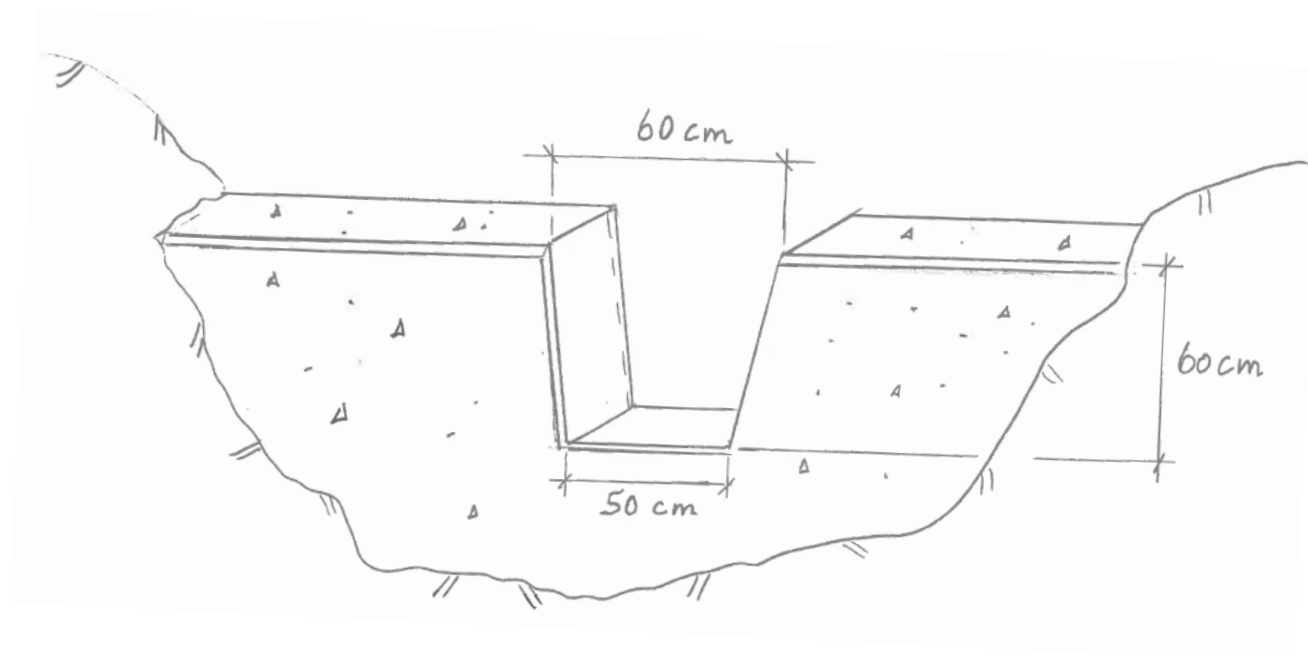
3.2 Kulpetrapp i egen tunnel/trapp i rør i kraftverkstunnelen

Når fisken/trappa går inn i fjellet er det 2 alternative traseer:

1. I en separat tunnel, enten i rør eller som tradisjonell kulpetrapp
2. I et rør inne i kraftverkstunnelen

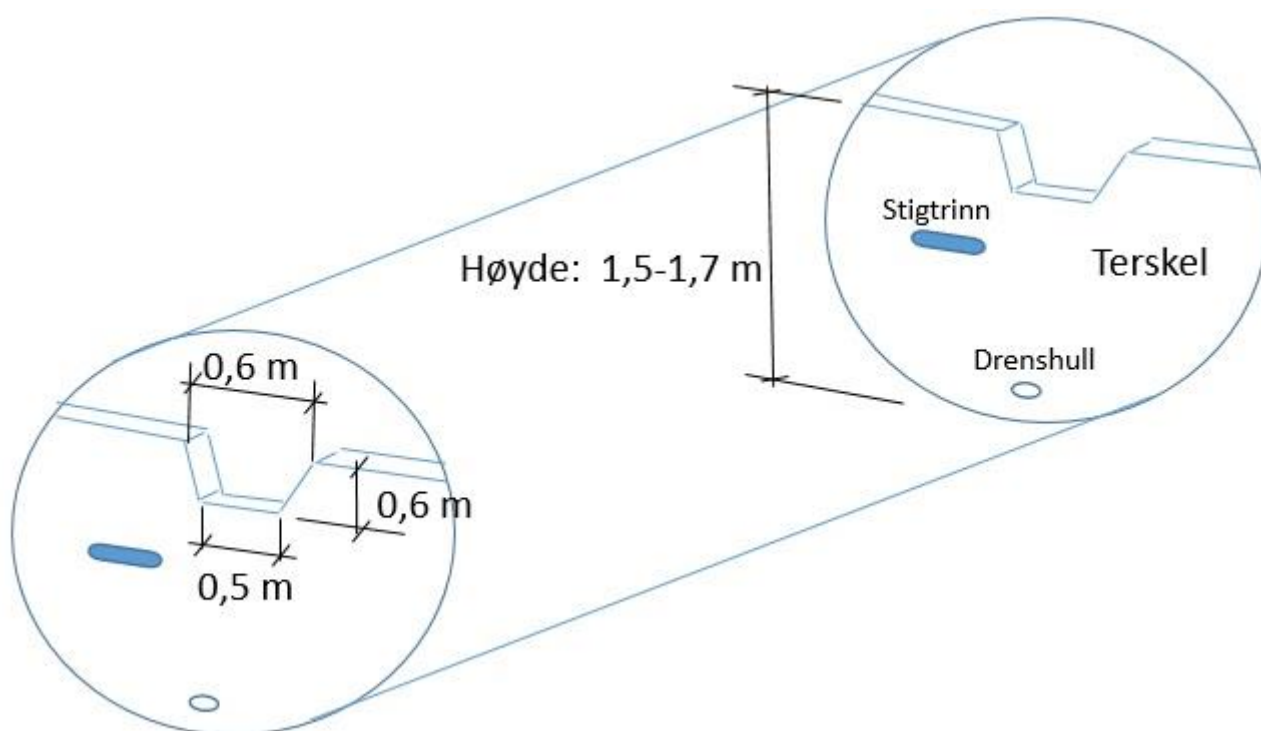
En trapp i henhold til Alternativ 1 kan utformes i tradisjonelle kuper, enten sprengt i fjell eller støpt i betong, og med terskler i betong. Typiske mål for kulpene vil være bredde x lengde x dybde lik 2,2 x 3,5 x 1,3 m³. En

typisk terskel er vist i Figur 6 og det er viktig at alle betongkanter fases av med trekantlister eller hulkilslister på alle kanter hvor fisk skal passere. Dette for å unngå ytre skader på fisken. Trappa kan alternativt gå i et rør i denne tabellen, utformet som vist i Figur 7, og som beskrives nærmere under Alternativ 2.



Figur 6. Prinsippskisse for terskel i kulpetrapp.

Utforming av en fisketrapp i rør etter Alternativ 2 bygger i stor grad på en vanlig kulpetrapp. Med 42 meter fall trengs det 84 kulper. Terskelen mellom kulpene utformes i utgangspunktet med samme mål som vist i Figur 6. Også her er det viktig at alle kanter i fiskens vandringsvei avrundes, slik at fisk ikke skades. En prinsippskisse for en kulp i rørtrapp er vist på Figur 7. Når trappa er i drift vil vannstanden i hver kulp nå opp til toppen av terskelen. Når trappa skal inspiseres stenges vanntilførselen, og hele trappa vil kunne tømmes dersom man har et drenshull med diameter ca. 5 cm ved bunnen av hver terskel. Dersom hullet monteres litt opp fra bunnen vil det stå igjen litt vann så fisk kan overleve. Den eneste muligheten for å inspisere trappa er å gå gjennom fra en av rørets ender, og ta seg over hver av tersklene. Det foreslås derfor at det lages ett eller flere stigtrinn på hver side av tersklene, samt stigtrinn i bunnen av røret. Disse må utformes og plasseres slik at de ikke forstyrrer vannstrømmen eller skader fisk, ved at fisken for eksempel setter seg fast eller får ytre skader.



Figur 7. Prinsippskisse for en kulp i rørtrapp, med terskel i hver ende.

Den tekniske utformingen av en tett rørgjennomføring omtales ikke videre her. I Tabell 1 er det oppgitt nøkkeltall for de to alternativene.

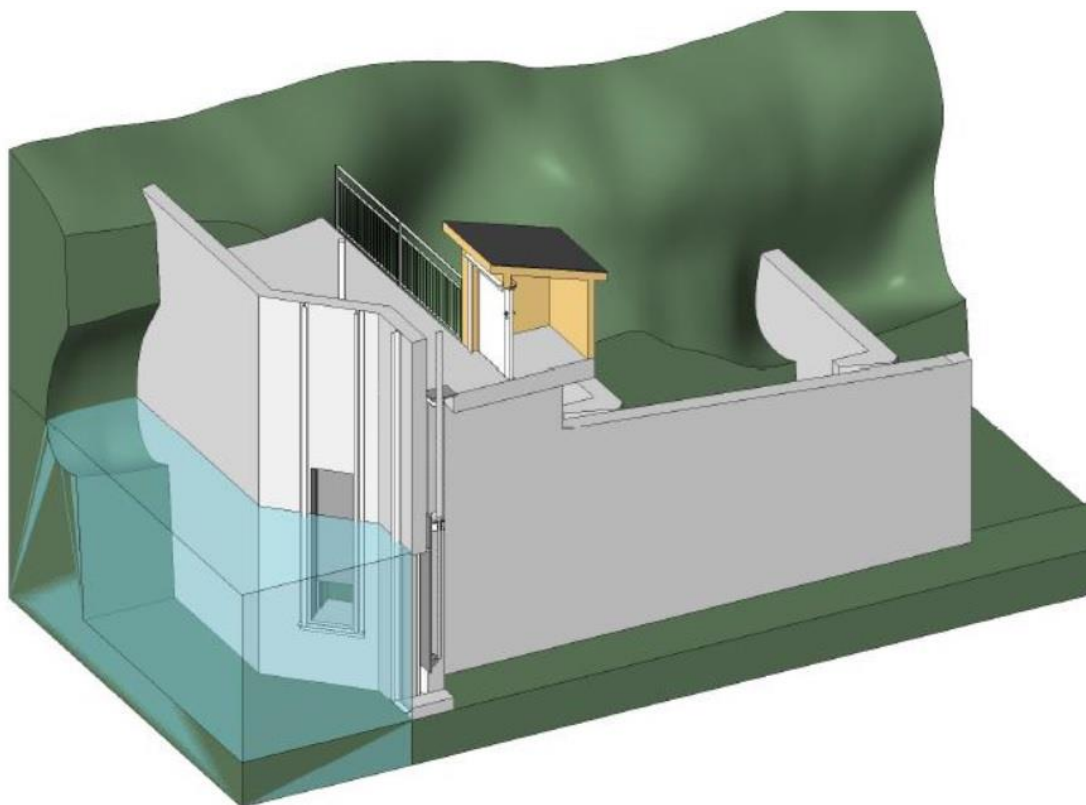
Tabell 1. Nøkkeltall for fisketrapp i rør for to alternative løsninger.

Alternativ	Lengde tunnel (m)	Høydeforskjell og helning (m/%)	Rørdiameter innvendig (m)	Kulplengde (m)	Terskelhøyde (m)	Spranghøyde (m)	Energiomsetning (W/m ³)
Rørtrapp i driftstunnel	370	42 / 11,1	2,3	4,4	1,7	0,5	202
Rør i separat tunnel	440	42 / 9,5	2,3	5,2	1,5	0,5	204

3.3 Vanninntak og fisketelling

Den øverste delen av fisketrappa vil gå i friluft og utformes som en tradisjonell kulpetrapp. I den øverste terskelen må det lages en luke som både kan stenges helt, og som regulerer vannet inn i trappa. Den enkleste måten å gjøre dette på er å montere en glideluke som stenges ovenfra. Ved normal vannstand i inntaksbassenget Stegemoen kan luka stå helt åpen, og ved økende vannstand senkes luka til det går høvelig

vannføring i trappa. Se også prinsipper vist på Figur 8. Montert på oversiden av trappas nest øverste terskel (i trappas øverste kulp) er det naturlig å plassere fisketeller og eventuell videoovervåking. Om ønskelig kan man også stenge fiskens videre vandring ved å periodevis sette ned en varegrind i den øverste terskelen, slik at fisk kan samles og håndteres i den øverste kulpen.



Figur 8. Prinsippskisse for vanninntak med glideluke øverst i fisketrappa. Figuren er hentet fra Bendixby et al. (2017).

3.4 Drift og vedlikehold

Det bør legges til rette for at personer kan bevege seg inne i laksetrappa for inspeksjon og vedlikehold. Dette ivaretas med stigtrinn som beskrevet tidligere. Laksetrappa vil kun være vannførende under oppvandringsperioden og man vil dermed ha mange måneder uten vann til å gjennomføre inspeksjon og vedlikehold. Det vil installeres lys i laksetrappa, både for å øke fiskevandringen og for inspeksjon og vedlikehold. Det kan vurderes å bygge laksetrappen med demonterbare terskelvegger, slik at disse kan byttes om laksevandring ikke forekommer.

Laksetrappa planlegges stengt under store flommer. Dette for å unngå at sedimenter flommer inn i laksetrappa. Dette vil trolig ha liten påvirkning på laksevandringen ettersom laksen under store flommer vil samle seg under det naturlige bekkefareet når den største vannføringen går her.

4 Nedvandningsanlegg

En elvestrekning på ca. 6 km ovenfor Rafoss vil bli produksjonsområder for laks og sjøørret når områdene blir tilgjengelig via den nye laksetrappen. Beregninger viser at dette vil øke dagens produksjon av laks i Kvina med inntil 50 % (Forseth *et al.* 2012). En slik produksjonsøkning kan ta tid, men utsetting av for eksempel befruktet rogn oppstrøms fossen kan akselerere denne økningen. For at denne gevinsten skal kunne realiseres må smolt og utgytt laks og ørret fra områdene oppstrøms Rafoss kunne vandre fritt forbi det nye inntaket til Rafoss kraftverk, dvs. ikke inn i kraftverket, men ned det opprinnelige elveleiet. For å oppnå dette må man etablere et vandringsanlegg som 1) hindrer fisk i å svømme inn i kraftverksinntaket og 2) etablere en attraktiv vandringsvei forbi inntaksdammen og videre ned elva.

4.1 Varegrind

4.1.1 Spalteåpning i inntaksrist

Spalteåpningen i ei finrist må være så stor som mulig, men likevel liten nok til at fisk ikke svømmer i mellom spilene. I senere tid er det gjort laboratorieforsøk for å forstå de hydrauliske forholdene rundt finrister (Raynald *et al.*, 2013-a 2013-b; Szabo-Meszaros *et al.*, 2018). Generelt anbefales derfor lysåpninger som er ned mot 7 % av fiskens kroppslengde dersom varegrinda skal fungere som en effektiv barriere for fisk (Larinier & Travade, 2002). Større relative lysåpninger som tilsvarende 14% - 25% av fiskens lengde har vist seg å kunne fungere relativt godt til å avvise nedvandrende smolt av laks og sjøørret under forutsetning av at vannstrømmen ikke faller vinkelrett inn mot varegrinda. I slike tilfeller er det en klar forutsetning at det dannes en tverrgående (tangentiell) vannstrøm foran varegrinda som lett oppfattes av nedvandrende ungfisk som da beveger seg langs varegrinda i stedet for å passere direkte gjennom elementene (Larinier & Travade, 2002).

I Sverige har man tatt utgangspunkt i spalteåpninger på 20 mm foran kraftverksinntak (Calles *et al.* 2013), mens finrister tilpasset og utprøvd med god funksjon for fisk har hatt åpning på 18 mm (Calles *et al.*, 2012; Calles *et al.*, 2013). Flere nye fisketilpassede finrister har åpninger på 14–15 mm, men ennå har ingen av disse blitt overvåket. I Danmark er største tillatte spalteåpning i turbininntak 10 mm, mens 6 mm kreves for vanninntak til fiskeoppdrett (DTA Aqua, 2011). Også i Tyskland har 20 mm vært et vanlig krav, men ny kunnskap har resultert i at man nå ofte krever 12 mm for å hindre 120 mm lang laksesmolt fra å passere (DWA, 2005), noe som samsvarer med 12,7 mm som anbefales for laksesmolt med samme størrelse i deler av USA. Skal laksesmolt fysisk

utestenges med en finrist bør spalteåpningen ikke være mer enn 10 mm (DTU Aqua, 2011). Ut fra disse tre kildene anses at den beste mulige teknikken er en spalteåpning på 10–15 mm om man ikke kan vise at samme resultat kan oppnås med ei rist med spalteåpning opp til 18 mm, som kan være tilfellet for fisketilpassede, skråstilte rister, fordi den lave helningen da ser ut til å medføre at fisken unnviker risten.

4.1.2 Ristas areal og vannhastigheter mot rista

Vannstrømmen i forkant av varegrinda bør ideelt sett være skråstilt i forhold til varegrinda (Kraabøl 2013). Dersom den likevel faller vinkelrett mot varegrinda må den være betydelig lavere enn den aktuelle artens (og fiskestørrelsens) normale svømmehastighet. Dette vil tillate fisken å gjennomføre søk på tvers av strømmene etter alternative nedvandningsveier. Dersom vannhastigheten er for høy kan fisk som utmattes under dette søket kile seg fast mellom to spiler (elementer) på varegrinda og dø av respirasjonsproblemer eller andre skader (Calles *et al.*, 2012). Vanligvis bestemmes maksverdien for den anbefalte vinkelrette vannhastigheten (APV) om lag 10 cm foran varegrinda, og beregnes med følgende formel (etter Videler, 1993);

$$APV = 0,15 \times 2,4KL \text{ (m/s)}$$

(KL = fiskens kroppslengde målt i m)

For laks og ørret har denne beregningsmetoden gitt anbefalte maksverdier på 15 cm/s for fisk under 6 cm og 50 cm/s for smolt mellom 15 og 20 cm (Aitken *et al.*, 1966; Clay, 1995; ASCE 1995). Vannhastigheter over 50 cm/s anbefales generelt aldri dersom det vandrer fisk forbi kraftverket (Larinier & Travade, 2002). Med dette utgangspunktet kan man regne ut nødvendig areal av finrista.

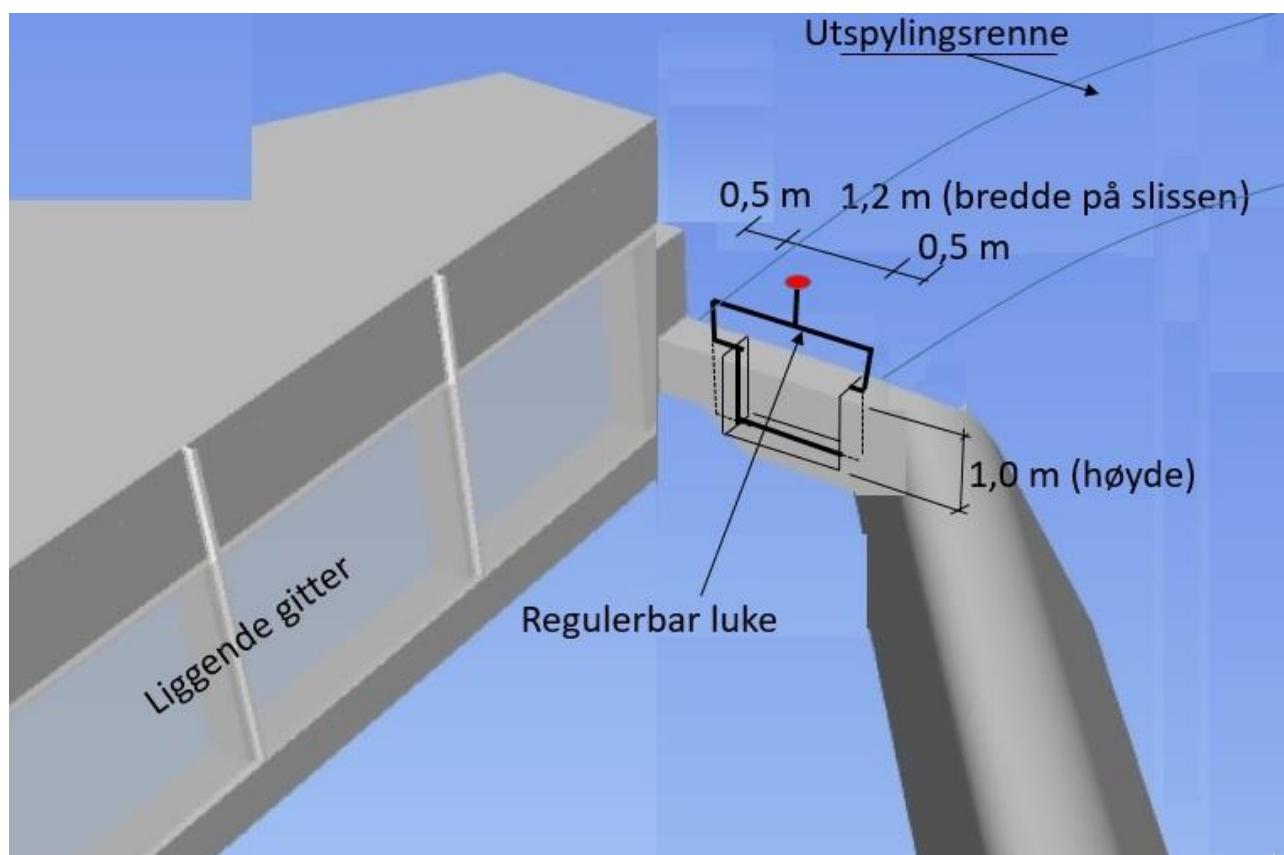
4.1.3 Finristas helning og plassering

For å minimere finristas areal bør den plasseres umiddelbart foran vanninntaket til turbinene. Helning av rista i horisontal- eller vertikalplan bidrar til å redusere vannhastighetene mot rista og øke sveiphastigheten (vannhastighetskomponenten parallelt med rista) langs rista, og tilfredsstillende helning anses som meget fordelaktig for fiskens evne til å lokalisere et tappeløp. Valg av helning henger også sammen med utforming av fiskeavledningssystem, noe som er

avhengig av de stedlige forhold. Det er avgjørende at fisken ledes enten sideveis eller i vertikalplanet, slik at fisken senere kan ledes trygt videre og forbi inntaket, dvs. at en vertikalt hellende rist bør ha en vinkel på under 30-40° mot elvebunnen.

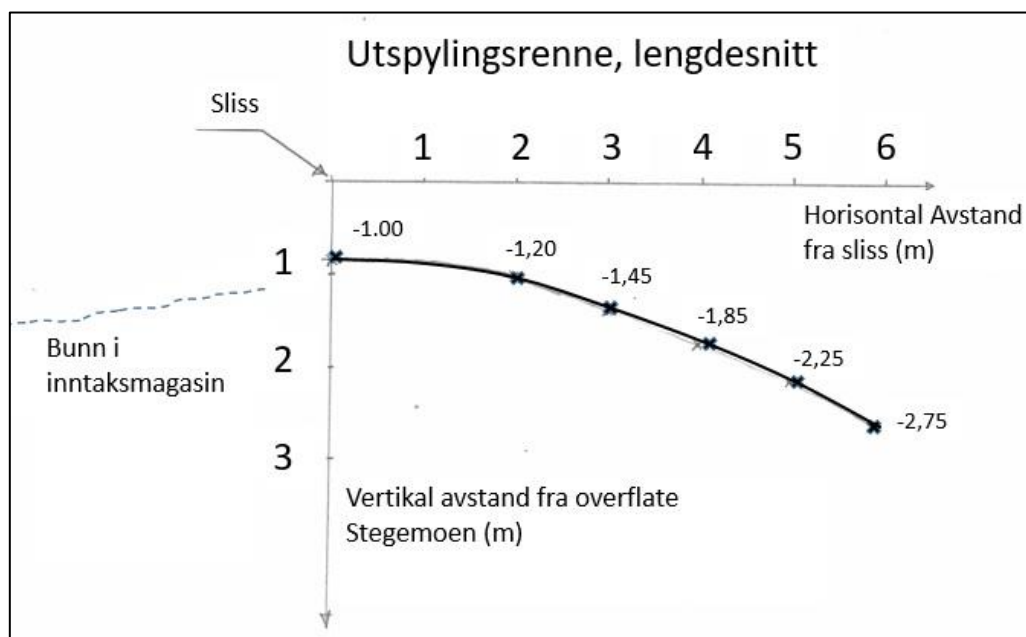
4.2 Nedvandringsutløp i Rafoss

En løsning for nedvandringsløsning i Rafoss er vist i Figur 9. Utløpsåpningen bør trekkes helt inn til avslutningen på inntakets varegrind. Den opprinnelige terskelen er vist nede til høyre i figuren, og antas å representere vannivået i inntaksbassenget i Stegemoen. Utløpsåpningen utformes slik at bunnen i åpningen kommer på om minimum 1 meter under normalt vannivå i inntaksbassenget. Alle kanter i åpningen må avrundes for å ikke skade fisk og for å skape jevne strømningsforhold. Med en bredde på 1,2 meter vil vannføringen gjennom åpningen kunne justeres mellom anslagsvis 0 - 4 m³/s (må detaljprosjekteres). Det foreslås at det monteres en overløpsluke som senkes utover under åpning. Luka kan også brukes til å spyle sedimenter og drivgods som samler seg i inntaksbassenget og på varegrinda. Åpningen plasseres så nært som mulig inntil stolpen som markerer enden på varegrinda. Denne tilpasningen må skje ved detaljprosjektering. Når vannstanden stiger over normalt i inntaksbassenget vil inntaksterskelen oversvømmes og fisk kan i praksis vandre ned andre steder enn gjennom utslippsåpningen. Dette anses ikke som et problem og fisken vil antakelig velge åpningen selv om vannstanden stiger flere desimeter over terskelen fordi åpningen representerer en markant vannstrøm og befinner seg i det området fisken søker langs varegrinda.



Figur 9. Prinsippskisse for utløpsåpning (bypass) for nedvandring av smolt og utgytt fisk forbi inntaket til Rafoss kraftverk.

Nedstrøms utløpsåpningen bør det monteres en utspydingsrenne, som sørger for at vannet akselerer med en jevn hastighet på ca. 1 m/s pr løpemeter spylerenne. Dette sikrer at fisken ikke snur tilbake, men vandrer villig ut av åpningen. Et vertikalsnitt av en utspydingsrenne er vist på Figur 10. Det er viktig at utspydingsrenna ligger beskyttet mot skader fra flommer og is og at den munner ut på et sted hvor fisken ikke skades mot fjellet. For eksempel kan den med fordel munne ut i en kulp.



Figur 10. Helning på spylerenne nedstrøms utslippsåpning.

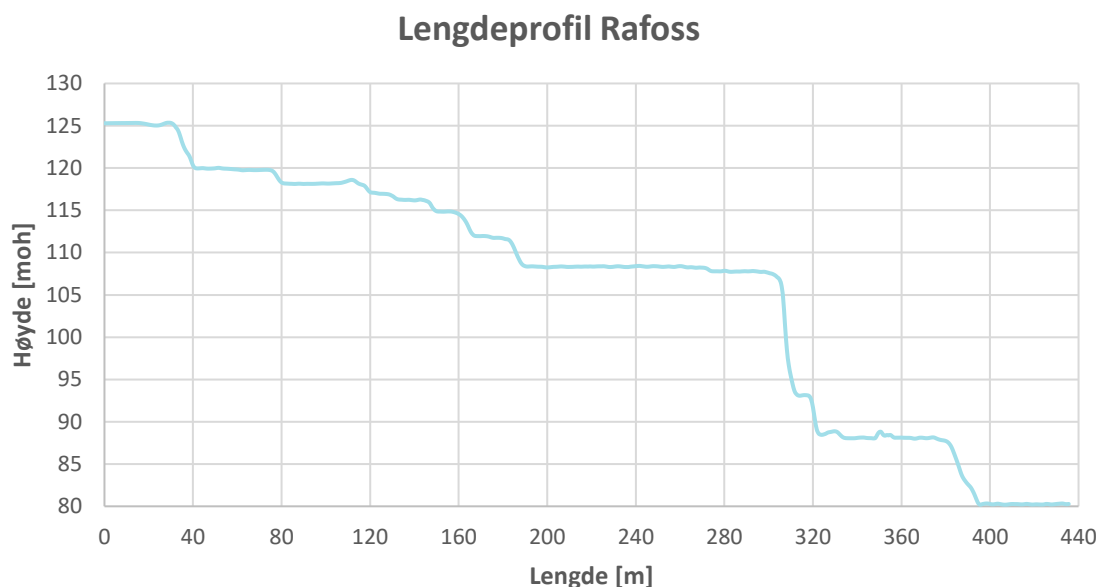
5 Overlevelse for nedvandrende fisk i Rafoss

Det har vist seg at laksesmolt tåler nedvandring i store fossefall, og at de er relativt trygge dersom ikke fallhøyden overstiger 10-12 meter. (Johnson & Dauble, 2006). Dette betinger at fisken vandrer i frie vannmasser og ikke treffer berg eller steinur. I slike tilfeller vil dødelighet øke ved en fallhøyde på 5-6 meter i henhold til den samme studien. Studier av overlevelse hos fisk i flomoverløp ved dammer har vist stor overlevelse og en stor undersøkelse av ungfisk av stillehavslaks i Snake River viste en overlevelse på mellom 95 og 100% i flomløp med et fall på mellom 12 og 41 meter (Muir *et al.* 2001). Mer anekdotiske observasjoner fra Niagara Falls (50 meters fall) antyder høy overlevelse hos voksenfisk av diverse fiskearter som vandrer ned fossen. Det totale fallet i Rafoss er ca. 45 meter, og består av en rekke mindre fosser og fossefall (Figur 11 og 12). Ut fra de nevnte studiene er det grunn til å anta at nedvandrende fisk vil ha høy overlevelse i fossen, og det er ikke grunnlag for å gjøre fysiske tiltak for å endre fossen med tanke på fisk.

Nedenfor utløpet fra inntaksmagasinet Stegemoen bør det tas spesielt hensyn til at nedvandrende fisk slippes ned i en kulp, og ikke ned på berg eller i steinur. Om nødvendig kan det her gjennomføres fysisk tilrettelegging i forbindelse med øvrig anleggsarbeid, slik at fisken får en skånsom "landing" nedenfor inntaksdammen.



Figur 11. Fossefall under nedvandring i Rafoss markert med røde sirkler.



Figur 12. Lengdeprofil av vannspeilet i Rafoss, lastet ned fra Høydedata.no.

6 Utsetting av fisk

Ny fisketrapp i Rafoss åpner en ny strekning på ca. 6 km for lakseproduksjon oppstrøms fossen. Potensialet for smoltproduksjon på denne strekningen er beregnet til 11 000 - 21 000 smolt pr. år (Bremset *et al.* 2008). For å oppnå dette så raskt som mulig kan det settes ut befruktet rogn eller yngel på strekningen før naturlig gyting finner sted. Bremset *et al.* (2008) foreslår to mulige løsninger:

- Samle fisk i ordinært fiske (primært, evt. supplert med stamfiske om høsten) – oppbevaring fram til stryking (det finnes gode erfaringer med not i sjøen, alternativt et kar på land med ikke for varmt vann), stryking og et enkelt midlertidig anlegg for oppbevaring av rogn fram til øyerognstadiet og utsetting i januar/februar (i Viber-bokser eller kasser).
- Oppbevaring av gytefisk fram til gytetidspunktet og transport av fisken ovenfor Rafoss.

Larsen *et al.* (2005) fant at ungfisken i Kvina vokser raskt og at smoltalderen dermed er lav, med et gjennomsnitt på mellom 2 og 3 år. Utvandring av smolt kan dermed forventes fra den tredje sommeren etter rognplanting/gyting.

7 Lakseobservatorium

Det har vært et ønske om å vurdere etablering av et lakseobservatorium i forbindelse med det nye kraftverket. Dette har ingen forbindelse med fisketrappa, og bør heller ikke være en del av

vandringsanleggene, men det er flere fordeler med å anlegge et observatorium i nærheten av laksetrappa. Flere norske elver har sine lakseobservatorier, deriblant Namsen og Lærdalselva (Figur 13). Felles for disse er at de er en del av en turistattraksjon med ulike andre severdigheter. I Granfossen i Verdalselva er det montert glassvegger i selve laksetrappa hvor man kan betrakte oppvandrende fisk som holdes tilbake i en av kulpene ved at trappa kan sperres for videre oppvandring. Dette innebærer at all oppvandrende fisk må holdes tilbake og forsinkes i sin oppvandring, samt at trappa må røktes jevnlig. I nevnte Lærdalselva og Namsen er observatoriet plassert i separate tanker i omgivelser som likner naturlige elveseksjoner. Her er man avhengig av at det er gjennomstrømning av vann via rørsystemer etc. Fordelen med en slik løsning er at fisken kan oppbevares uavhengig av oppvandring i fisketrappa. Fisk som skal til eller fra observatoriet kan fanges og settes ut i trappa. Utforming av et lakseobservatorium må bli en separat del av detaljprosjekteringen, hvor flere elementer i et besøkssenter vurderes, slik som:

- Størrelse
- Atkomst, parkering
- Andre fasiliteter, slik som "museum", toaletter
- Samlokalisering med behandlingsanlegg for fisk



Figur 13. Lakseobservatoriet i Lærdal. (Foto: Norsk Villakssenter).

8 Referanser

Aitken, P.L., Dickerson, L.H. og Menzies, W.J.M. 1966. Fish passes and screens at water works. *Proc. Inst. Civ. Eng.* **35**; 29-57.

ASCE. 1995. Fish passage and protection. I: Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants. *American Society of Civil Engineers*, New York, side 469-499.

Bendixby, L., Bergsager, H., Lind, J. og Willassen, J. 2017. Ny fisketrapp i Laksforsen i Vefsna-Forprosjekt. Norconsult, Oppdragsnummer 5164833- J01, 41 pp.

Bremset, G., Forseth, T., Ugedal, O., Gjemlestad, L. J. og Saksgård, L. 2008. Potensial for produksjon av laks i Kvinavassdraget. Vurdering av tapsefaktorer og forslag til kompensasjonstiltak. NINA Rapport 321, 37 s.

Calles O., Karlsson S., Hebrand M. og Comoglio C. 2012. Evaluating technical improvements for downstream migrating diadromous fish at a hydroelectric plant. *Ecological Engineering*. **48**; 30–37.

Calles, O., Rivinoja, P. og Greenberg, L. 2013. A historical perspective on downstream passage at hydroelectric plants in Swedish rivers. in: Ian Maddock A.H., Paul Kemp and Paul Wood, ed. *Ecohydraulics: an integrated approach*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-97600-5. 446 s.

Calles, O., Karlsson, S., Vezza, P., Comoglio, C. og Tielman, J. (In press). Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology*.

Clay, C. H. 1995. *Design of Fishways and Other Fish Passage Facilities*, 2nd edn., Lewis Publishers, Ann Arbor, MI. ISBN 1566701112.

Croze, O., Bau, F. og Delmouly, L. 2008. Efficiency of a fish lift for returning Atlantic salmon at a large-scale hydroelectric complex in France. *Fisheries Management and Ecology* **15**; 467–476.

DN (Direktoratet for naturforvaltning). 2002. Fisketrapper i Norge. DN-notat 2002-3, 29 s.

DTU Aqua. 2011. En opdatert og udbygget vurdering af afgittringskravet ved dammbrug i ferske vandsystemer med focus på utvalgte rødliste- og habitatarter af fisk, herunder lampretter. PM 2011-06-11, 30 s.

DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, 2005. Fish protection technologies and downstream fishways. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (www.dwa.de), 226 s.

Fjeldstad, H.-P., Alfredsen, K. og Forseth, T. 2013. Atlantic salmon fishways: The Norwegian experiences. VANN 02-2013.

Fjeldstad, H.-P. og Kraabøl, M. 2014. Opprusting og utvidelse av Palmafossen kraftverk i Raundalselva i Vossovassdraget. SINTEF Rapport TR A7396, 28 s.

Fjeldstad, H.-P. 2015. Fiskevandring forbi Reinforsen i Rana – Tiltaksstudie. SINTEF Rapport TR A7454, 19 s.

Forseth, T., Robertsen, G., Gabrielsen, S.E., Sundt, H., Skår, B. og Ugedal, O. 2012. Tilbake til historisk smoltproduksjon i Kvina. En utredning av mulighetene - NINA Rapport 847. 60 s.

Grande, R. 2010. Håndbok for fisketrapper. Tapir forlag. 105 s.

Johnson, G. E. og Dauble, D. D. 2006. Surface flow outlets to protect juvenile salmonids passing through hydropower dams. Reviews in *Fisheries Science* **14**; 213-244.

Katopodis, C. 1992. Introduction to Fishway Design. Working Document, Freshwater Institute, Fisheries and Oceans Canada, Winnipeg, Manitoba, 67 s.

Kraabøl, M. 2013. Varegrinder foran turbininntak ved elvekraftverk; barrierer eller inngangsport for fisk? VANN 01-2013.

Larinier, M og Travade, F. 2002. Downstream migration: problems and facilities. I: Larinier, M. Travade, F. & Porcher, J.P. (Red.). Bull. Fr. Peche Piscic. 364 s.

Larsen, B. M., Berger, H. M. Forseth, T. og Johnsen, B. O. 2005. Yngel- og ungfiskundersøkelser i nedre del av Kvina i 2004. NINA Rapport nr. 5, 28 s.

Muir, W. D., Smith, S. G., Williams, J. G., og Sandford, B. J. 2001. Survival of Juvenile Salmonids 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

Raynald, S., Courret, D., Chatellier, L., Larinier, M. og David, L. 2013-a. An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 1. Inclined trashracks. *Journal of Hydraulic Research*: **51**; No. 1, pp. 56–66.

Raynald, S., Courret, D., Chatellier, L., Larinier, M. og David, L. 2013-b. An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 2. Angled trashracks. *Journal of Hydraulic Research*: **51**; No. 1, pp. 67–75.

Solvang, G., Bendixby, L., Bossel, E., og Teigland, A. 2017. Rafoss Kraftverk - Overordnet design. Norconsult rapport 5167620-d03, 37 s

Szabo-Meszaros, M., Navaratnam, C. U., Aberle, J., Silva, A. T., Forseth, T., Calles, O., Fjeldstad, H.-P. og Alfredsen, K. 2018. Experimental hydraulics on fish-friendly trash-racks: an ecological approach. *Ecological Engineering* **113**, pp 1-20.

Theodorsen, A. 2009. Skisseprosjekt Rafossen, Kraftverk og Laksetrapp. SWECO rapport 680891-01. 41 s.

Thorstad, E. B., Økland, F., Kroglund, F. & Jepsen, N. (2003). Upstream migration of Atlantic salmon at a power station on the River Nidelva, Southern Norway. *Fish Management Ecology* **10**; 139–146.

Videler, J. 1993. Fish swimming. Chapman & Hall, Fish and Fisheries Series 10, 260 s.



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no