

Rapport

Fjerning av terskler ved Laudal i Mandalselva

Hydrauliske forhold og fysiske tiltak for laks

Forfattere

Hans-Petter Fjeldstad, Peggy Zinke og Ana Adeva Bustos (SINTEF Energi)

Sven Erik Gabrielsen og Bjørnar Skår (UNI Miljø, Bergen) Torbjørn Forseth, (NINA)



Foto: Anders Martinsen

SINTEF Energi AS

Vannressurser

2014-12-01

Rapport

Fjerning av terskler ved Laudal i Mandalselva

Hydrauliske forhold og fysiske tiltak for laks

EMNEORD:

Laks
Terskl fjerning
Vannkraft
Fiskevandring
Minstevannføring

VERSION

1

DATO

2014-12-01

FORFATTERE

Hans-Petter Fjeldstad, Peggy Zinke og Ana Adeva Bustos (SINTEF Energi)
Sven Erik Gabrielsen og Bjørnar Skår (UNI Miljø, Bergen) Torbjørn Forseth, (NINA)

OPPDRA GSGIVER

Agder Energi

OPPDRA GSGIVERS REF.

Aleksander Andersen

PROSJEKTNR

502000574

ANTALL SIDER:

30

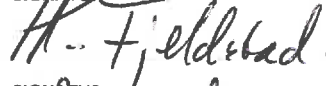
SAMMENDRAG

I denne rapporten er minstevannføringsstrekningen mellom Mannflåvann og Kleveland bru studert. Basert på målinger av vannivå og topografi er det laget en hydraulisk modell for fire delstrekninger tilsvarende en elvestrekning på ca. 1700 meter, og disse gir en god beskrivelse av hvordan minstevannføringsstrekningen vil framstå uten terskler. Det er gjennomført simuleringer ved to vannføringer ved dagens forhold, og deretter ved tilsvarende vannføringer etter at modellene er endret for å tilsvare de fire strekningene uten dagens terskler. I tillegg er det gjort nøyaktige undervannsundersøkelser av gyteområdene på hele den 4,5 km lange strekningen. Simuleringene viser at vannhastighetene øker betydelig dersom tersklene fjernes, og ved 6 m³/s er de høyere enn med 15 m³/s med dagens terskler. Vanndekket areal vil reduseres med mellom 5 % og 30 % ved terskl fjerning, avhengig av strekning og vannføring. Dette indikerer at strekningene fortsatt vil framstå som godt vanndekket uten terskler. Gyteområdene vil utvides betydelig og oppvekstforholdene for ung fisk hos laks vil bli bedre om tersklene fjernes. I kombinasjon med foreslåtte fysiske tiltak, viser analysene at terskl fjerning vil øke produksjonen av smolt med 40-45 % på strekningen og i tillegg eliminere forsinkende barrierer for oppvandrende fisk.

UTARBEIDET AV

Hans-Petter Fjeldstad

SIGNATUR



KONTROLLERT AV

Håkon Sundt

SIGNATUR



GODKJENT AV

Knut Samdal

SIGNATUR



RAPPORTNR

TR F7450

ISBN

GRADERING

Fortrolig

GRADERING DENNE SIDE

Fortrolig

Innholdsfortegnelse

1	Bakgrunn.....	4
2	Mål	4
3	Metodikk	6
3.1	Topografiske målinger	7
3.2	Gyteområder.....	10
3.3	Hydrauliske beregninger	11
4	Resultater	15
4.1	Vanndekket areal	15
4.2	Vannhastigheter og vanndyp	15
4.3	Gyteplasser og forslag til tiltak.....	20
4.3.1	Generelt	20
4.3.2	Forslag til utlegg av gytegrus rett nedstrøms dam Mannflå	21
4.3.3	Strekningen nedstrøms Solkrona.....	22
4.3.4	Biotopjustering på strekning 4	23
4.3.5	Utlegg av kålhoder/små blokker på strekningene 4 og 5	25
4.4	Terskelfjerning og produksjon av laks.....	26
4.5	Vandring	26
5	Konklusjoner og diskusjon	28
6	Referanser.....	30

1 Bakgrunn

Laudal kraftverk ble satt i drift på begynnelsen av 1980-tallet og i den forbindelse ble det bygget 10 terskler på den 6 km lange strekningen mellom inntaket og utløpet hvor det etter utbyggingen ble et minstevannføringsregime. Laudal kraftverk hadde opprinnelig et manøvreringsreglement som fastsatte minstevannføringen til 250 liter per sekund. Det ble tidlig på 90-tallet etablert en avtale om å slippe henholdsvis 1,5 og 3 m³/s vinter og sommer, i tillegg til lokkevannføring i fiskesesongen. Tersklene har gitt minstevannføringsstrekningen et betydelig økt vanndekket areal på lave vannføringer, og dermed også en estetisk effekt, men samtidig svært lave vannhastigheter utenom perioder med flomspill fra Mannflåvann. Dette er ugunstig for laksen, som etter utbyggingen og forbedring av vannkvaliteten i vassdraget har etablert en ny, levedyktig bestand. Fra og med 2013 ble Agder Energi pålagt en betydelig høyere minstevannføring (OED 2013), gjennom et femårig prøvereglement. Reglementet innebærer økt slipp av vann for å bedre forhold for laks på strekningen. Økt minstevannføring medfører høyere vannhastigheter og økt vanddyp og vanndekket areal, som kan være gunstig for vandring, gyting og oppvekst hos laks. Vannslippet innebærer samtidig et betydelig kraftproduksjonsstap. Til tross for en reduksjon av vanndekket areal vil fjerning av tersklene kunne gi tilsvarende, positive virkninger som en økt vannføring. En analyse av terskelfjerning kan gjøres ved å modellere de hydrauliske forholdene med en ny bunntopografi. Ytterligere analyser av konsekvensene for fisk kan deretter gjennomføres med egnede mekanistiske modeller, hvor de fysiske forholdene koples mot fiskens preferanser i ulike livsfaser. Gjennom forsknings- og utviklingsprosjektet "Miljødesign Mandalselva" ønsker Agder Energi å finne løsninger som optimalisere forholdene for laks i vassdraget samtidig som vannressursene kan utnyttes i best mulig grad for vannkraftproduksjon. Prosjektet ledes av Norsk institutt for Naturforskning (NINA), og er et samarbeid mellom NINA, SINTEF, NTNU og UNI Research i Bergen. Prosjektet bygger videre på gjennomførte undersøkelser og forskning i Mandalselva de siste 10-15 årene, samt internasjonal forskning innen fagfeltet. Prosjektpartnerne har et betydelig datagrunnlag å bygge videre på, i tillegg til lange tidsserier av fysiske variable, slik som vannføring og vassdragsstemperatur, som til enhver tid registreres av regulanten, Agder Energi. Prosjektet har også hatt et tett samarbeid med øvrige interesser i vassdraget, slik som grunneiere og fiskeinteresser.

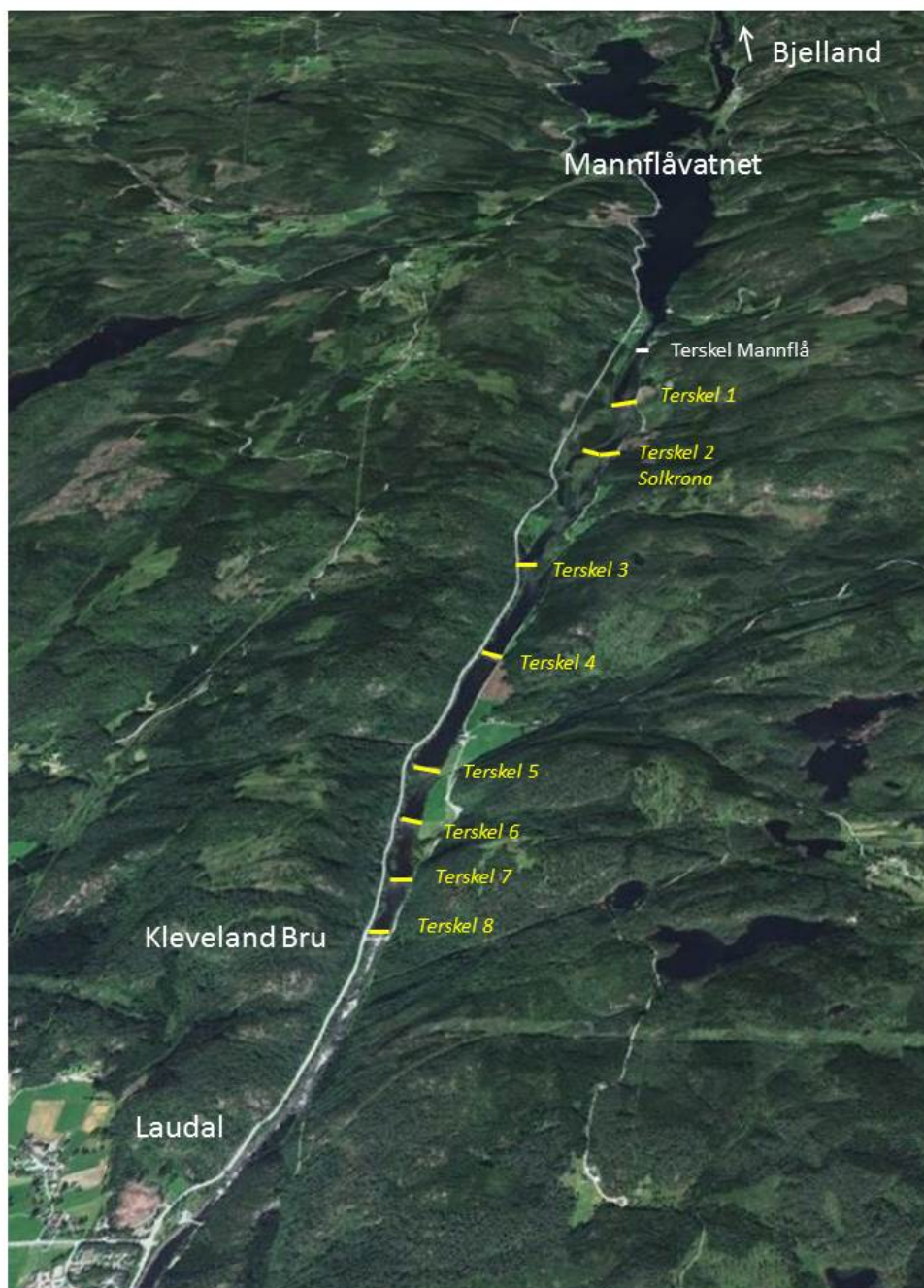
2 Mål

Denne rapporten er en delleveranse i prosjektet "Miljødesign Mandalselva" (MM), og oppsummerer resultatene av hydrauliske analyser på viktige delstrekninger av minstevannføringsstrekningen mellom Mannflåvann og Kleveland bru, samt forslag til tiltak for å øke produksjonen av laks i denne delen av vassdraget. Målet med dette arbeidet er å finne en optimalisert løsning for produksjon og vandring hos laks på den ene siden, og vannkraftproduksjon på den andre siden. Rapporten tar utgangspunkt i metodikken i Miljøhåndboka (Forseth og Harby 2013), utarbeidet i forskningsprogrammet CEDREN. Kjernespørsmålet i analysene er hvor stor vannføring man trenger gjennom året for å optimalisere fiskeproduksjonen, og om man alternativt kan benytte fysiske tiltak for å kompensere for deler av vannslippet. Svaret på dette spørsmålet er viktig fordi produksjon av fisk kan bli redusert ved for lite vannslipp, mens det vil ha negative økonomiske og samfunnsmessige konsekvenser om man slipper unødvendig store mengder vann forbi turbinene. Det finnes i dag ikke generelle, anerkjente metoder som kan benyttes for å fastslå miljøriktige vannføringer i regulerte laksevassdrag. Derimot finnes det gode metoder for å beskrive de fysiske forholdene for fisk, og konsekvensene vannføring har på laksepopulasjoner. I disse metodene kan man vurdere biologisk

respons på fysiske endringer som følge av forskjellig vannføring, men også tilsvarende endringer som følge av fysiske tiltak i elva, slik som økt tilgang på gyteplasser, og endringer i strømningsforhold gjennom endring av elvetopografien. I dette prosjektet er målet at kombinasjonen av fysiske tiltak og tilpasset vannføring kan gi en optimalisert løsning i forhold til ensidig økt vannføring i den eksisterende topografien, som antas å være suboptimal som følge av tidligere terskelbygging.

3 Metodikk

Studiestrekningen er vist på Figur 1 og omfatter minstevannføringsstrekningen mellom utløpet (dammen) av Mannflåvann og betongterskelen ved Kleveland bru, dvs. ca. 4,5 km av den totale strekningen på 6 km med minstevannføring. Den øvrige delen, fra Kleveland bru og ned til utløpet av Laudal kraftverk er ikke med i studien, hovedsakelig fordi den i stor grad består av fosser og bratte stryk, uten påvirkning av terskler.



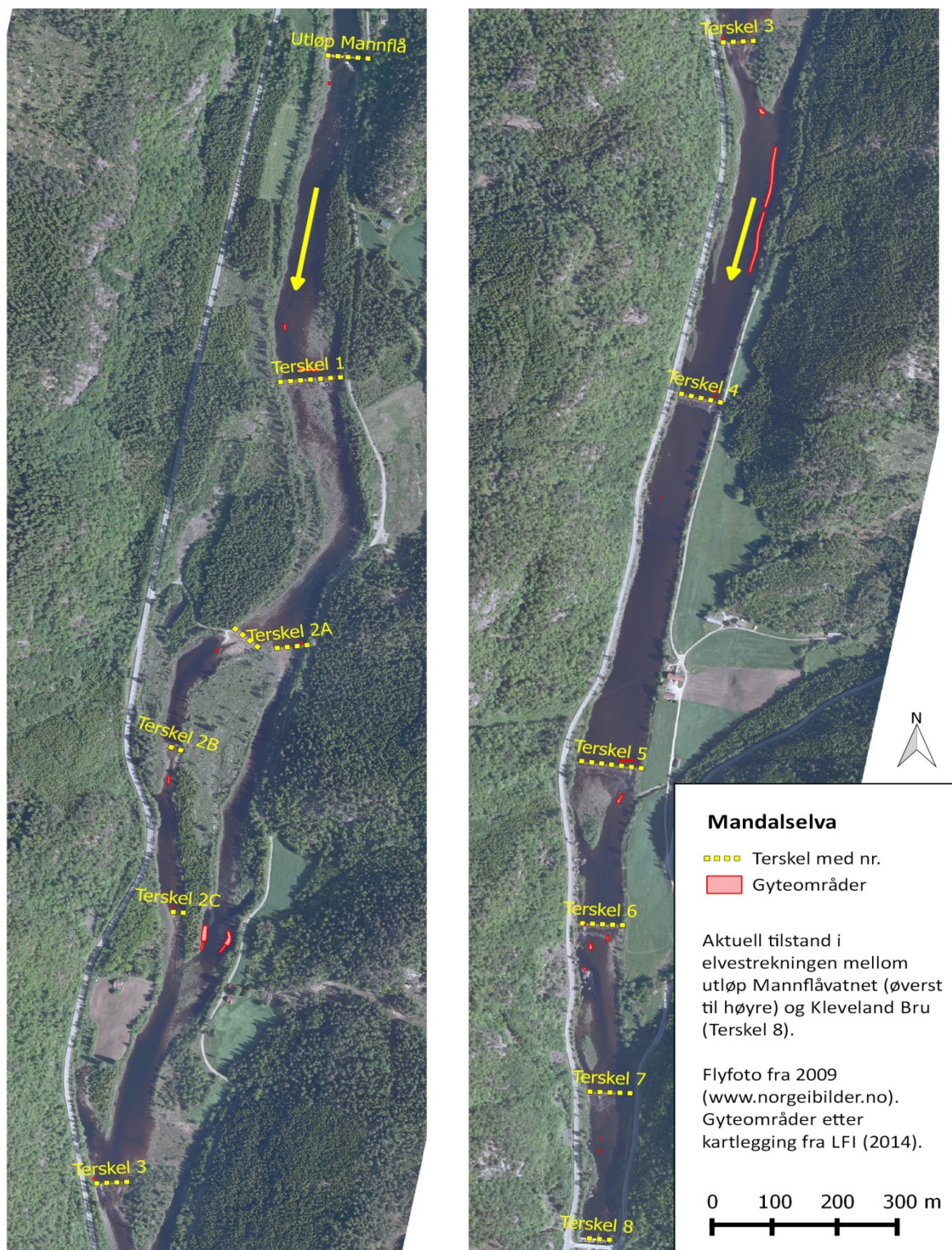
Figur 1. Oversikt over minstevannføringsstrekningen mellom inntaket i Mannflåvatn og utløpet av Laudal kraftverk.

Tersklene på strekningen er nummerert fra 1 til 8, og i den videre teksten benyttes eksempelvis begrepet "strekning 8" om elvestrekningen fra terskel 8 og opp til neste terskel (7). De 8 delstrekningene har forskjellige egenskaper både topografisk og som leveområder og oppvandringsområder for laks. Tersklene har således forskjellig påvirkning på de respektive delstrekninger, og det var innledningsvis nødvendig å vurdere hvilke terskler som ble ansett å påvirke fisken negativt i størst grad. Denne prioriteringen resulterte i at terskel 3 og 4, samt terskel 6-8 ble foreslått revet i sin helhet og elveleiet tilbakeføres til en topografi tilsvarende slik den var før tersklene ble bygget. For å anslå effekten av terskelriving på gyting og oppvekst hos laks skulle de hydrauliske konsekvensene studeres ved endimensjonale hydrauliske analyser i programvaren HEC RAS ved to vannføringer (6 og 15 m³/s), og resultatene visualiseres ved bruk av GIS. Terskel 5 ble utfra fiskehensyn antatt å ha negative konsekvenser, mens de estetiske kvalitetene som terskelen skaper har vært betraktet som positive. Det var derfor aktuelt å vurdere om deler av terskelhøyden kunne beholdes og at dette kunne analyseres nærmere. Etter hydrauliske modellanalyser framkom det at strekning 5 er den strekningen som får de minste endringer i vanndekket areal ved terskelfjerning (9 % ved 6 m³/s). Beregninger av mellomalternativer ble derfor vurdert som uaktuelt.

3.1 Topografiske målinger

For å gjennomføre gode hydrauliske beskrivelser av en elvestrekning er det avgjørende med en god beskrivelse av elvetopografien. Agder Energi gjennomførte egne manuelle målinger med differensiell GPS og ekkolodd av tre delstrekninger (strekning 1, 7 og 8) i studieområdet i 2003 (Figur 2). På strekning 7 var det noe mangelfulle data i øvre del, som medførte at det måtte gjøres manuelle tilpasninger. Dette har gitt en større usikkerhet i resultatene for denne strekningen.

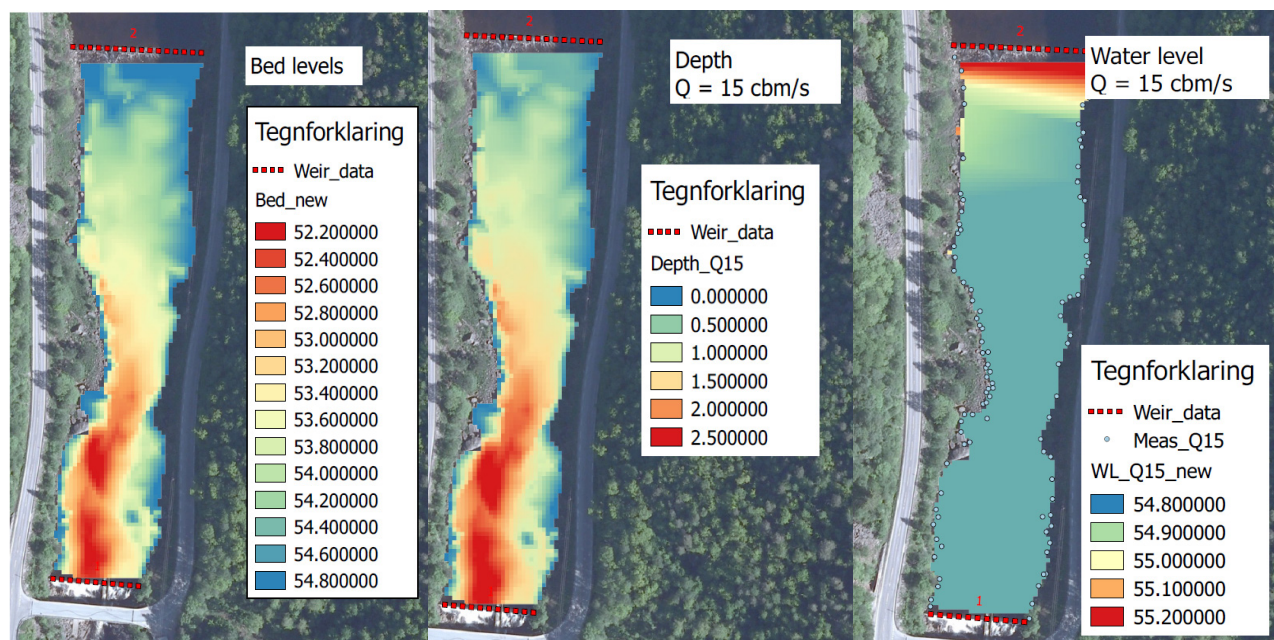
Vannkanten ble i 2003 delvis målt inn ved en vannføring på 15 m³/s. I juli 2014 ble i tillegg vannkanten på begge sider av elva målt inn på hele strekningen ved en vannføring på 6 m³/s. Målinger ble gjort med to Topcon DGPS roverstasjoner med målinger med ca. 3-15 meters mellomrom, avhengig av de stedlige forhold. En lokal basestasjon ble opprettet på Kleveland og koordinatene ble korrigert mot våre egne fastpunkter (RTK-GPS-målinger med en nøyaktighet på 3 cm.) på Kleveland bru. I september 2014 ble det gjennomført nye topografiske målinger av elvebunnen. For å måle inn topografi i elveleiet og vannhastigheter for kalibrering av de hydrauliske beregningene ble det benyttet en Sontek M9 River Surveyer med RTK GPS-funksjon. Instrumentet logget dyp, posisjon og vannhastighet hvert sekund, og ble montert foran en gummibåt med påhengsmotor, på en slik måte at målingene ikke skulle påvirkes av forstyrrelser fra gummibåten (Figur 4). Hele strekning 5 og en stor del av strekning 4 ble målt inn. Omtrent to tredjedeler (den nederste delen) av strekning 4 ble målt inn fra båt, mens det ble gjort manuelle dybdemålinger av dykkere på hele strekningen. Dybdene ble referert til koordinater med håndholdt GPS, som har en nøyaktighet på anslagsvis 1-10 meter. For hydraulisk modellering av strekning 4 ble det utformet en bunntopografi basert på disse dybdemålingene. I tillegg ble resultatene gjennomgått manuelt med tanke på dette området sin funksjon som gyteområder. I kapittelet om resultater er dette delområdet behandlet spesielt. Målet var også å måle inn strekning 3 og 6, men på grunn av vanskelige værforhold (flom) lot dette seg ikke gjøre.



Figur 2. Plassering av dagens terskler og angivelse av gyteplasser (både eksisterende og potensielle) på minstevannføringsstrekningen mellom Mannflåvann og Kleveland bru.

Tidligere innmålte data var av varierende kvalitet og var oppgitt i forskjellige dataformat, koordinatsystem og høydereferanser. For transformasjon av geodetisk datum, ble det antatt at HREF var lik 41.8 m.

Vi opprettet et GIS-prosjekt (QGIS) hvor alle data ble lagt inn i koordinatsystemet ETRS89/ETRS-TM32 og NN1954. Figur 3 viser et eksempel på innlagte GIS-datalag basert på eksisterende måledata for strekning 1.



Figur 3: Visualisering av tilpasning av eksisterende måledata. Bunntopografi, dyp (m) (ved $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$) og vannivå (moh) (ved $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$) er vist for strekning 8 (mellom terskelen ved Kleveland bru og terskelen ovenfor).

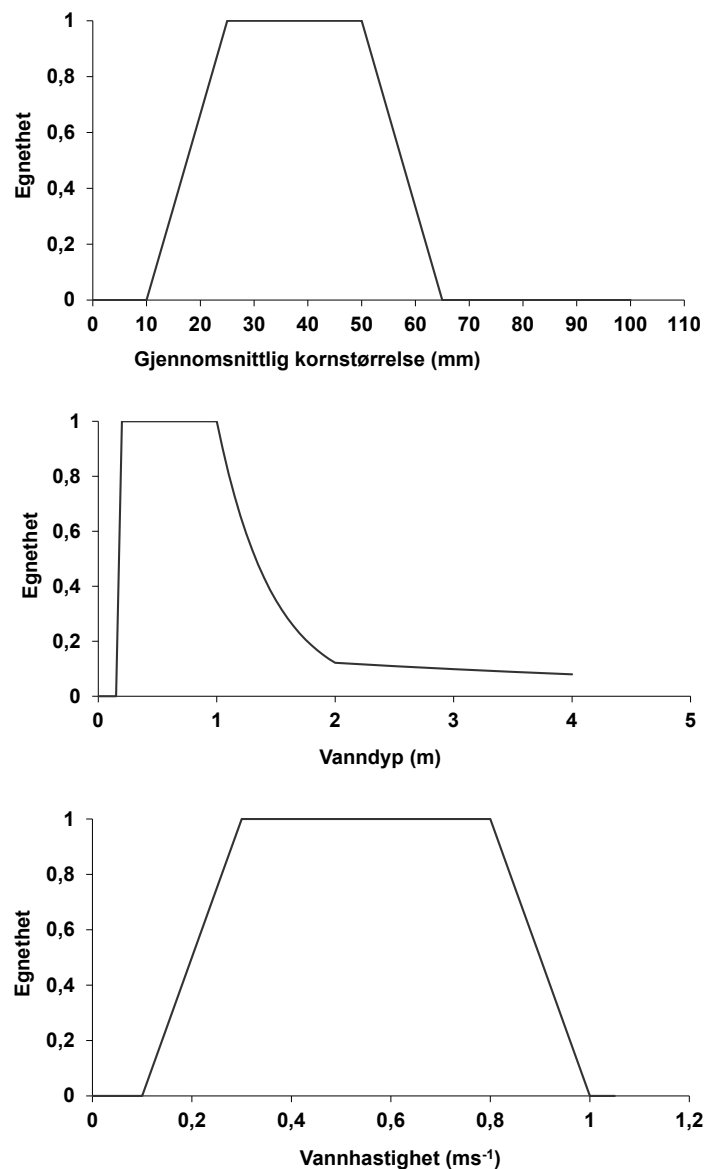
I tillegg til de nevnte målingene er det i løpet av de siste 15 år gjort en del separate topografiske målinger på forskjellige delstrekninger, og i forskjellige koordinatsystemer. I dette prosjektet er det laget et nytt, sammenhengende datasett fra og med strekning 2, til og med det østre løpet ned til strekning 3. Dette datasettet omfatter ca. 2700 innmålte punkter på en ca. 750 meter lang elvestrekning, men er foreløpig ikke benyttet i de videre hydrauliske analysene fordi den aktuelle strekningen i liten grad påvirkes av terskelfjerning.



Figur 4. Innsamling av data for posisjon, vannhastigheter og vanndyp med instrumentet Sontek M9 montert foran båt.

3.2 Gyteområder

Både i 2009 og i juli 2014 ble det gjort registrering av gyteplasser ved hjelp av dykkere på hele strekningen. Gyteplasser som har vært benyttet av laks de siste årene, samt potensielle gyteområder ble koordinatfestet. Potensielle gyteplasser innebærer at de kan tas i bruk dersom for eksempel vannhastighetene økes, men at de under dagens forhold ikke blir benyttet. I forbindelse med forslag til fjerning av tersklene ble det også vurdert hvilke lokaliteter som kan omgjøres til nye gyteplasser når tersklene er fjernet, og som i dag ikke kan benyttes til gyting. I denne vurderingen inngikk generell kunnskap om laksens preferanser for fysiske forhold på gyteplassen, slik som kornstørrelse på gytegrusen, vanndyp og vannhastighet (Figur 5).



Figur 5. Laksens generelle preferanser for kornstørrelse på gytegrus, vanddyb og vannhastighet. Y-aksen viser egnethet for den enkelte variabel, der verdien "1" angir den høyeste egnetheten. (Uni Miljø LFI, egne data).

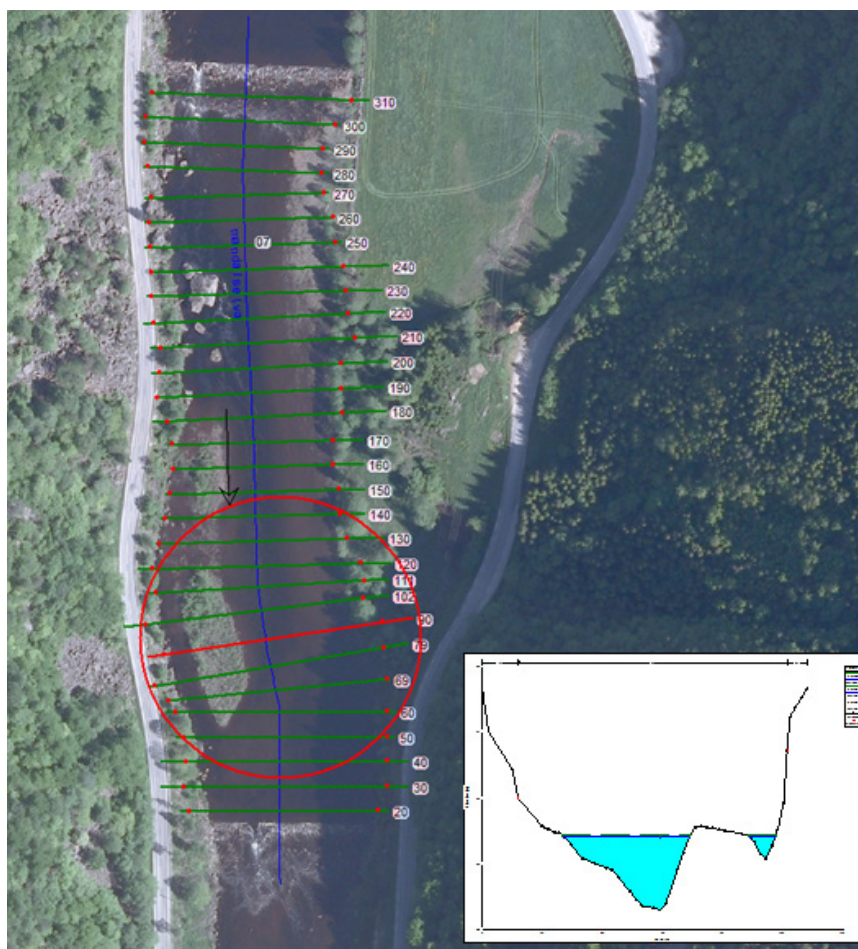
3.3 Hydrauliske beregninger

Grunnlaget for å analysere virkningene av de fysiske modifikasjonene (fjerning av terskler) i Mandalselva, var i hovedsak topografiske data for elvebunnen og elvebreddene, vannivå og vannføring. De ulike innsamlede data ble benyttet til kalibrering av hydrauliske modeller for de enkelte delstrekningene på i studieområdet. Dette omfattet tre hovedtrinn, (1) HEC-GeoRAS pre-prosessering av data, (2) HEC-RAS modellering, og (3) HEC-GeoRAS etterbehandling. Fra innsamlede topografidata ble først et 2 meters celleraster generert for elvebunnen ved hjelp av GIS-applikasjonen QGIS. HEC-GeoRAS (USACE 2010) ble

benyttet til denne prosessen. Disse dataene ble videre importert til HEC-RAS, som gjorde det mulig å generere en endimensjonal (1D) modell av elva og simulere de hydrauliske effektene av fjerning av terskler. HEC-GeoRAS (USACE 2010) ble benyttet til å generere elvetverrsnitt fra terrengmodellen. Etter hydraulisk modellering i HEC-RAS ble dataene post-behandlet i GIS med HEC-GeoRAS for å analysere og visualisere resultatene.

På et arbeidsmøte mellom Agder Energi og forskergruppa ble det gjort en gjennomgang av hvilke terskler som skulle prioriteres for riving. Det ble bestemt at terskel 1 (se Figur 2) skulle bestå som i dag, da de negative effektene av terskelen på fisk ble vurdert til å være mindre enn fordelene. For terskel 2 ble det foreslått at den i hovedsak skulle bestå, men at den kunne modifiseres slik at det renner ca. $2 \text{ m}^3/\text{s}$ i det vestre løpet når det er en totalvannføring på $6 \text{ m}^3/\text{s}$. For terskel 5 er det vært forskjellige ønsker om fjerning eller ikke. Det var derfor ønske om å anskueliggjøre om det kan finnes en mellomløsning for terskel 5, men dette ble vurdert som uaktuelt fordi resultatene av modellering uten terskel viste små endringer i forhold til modellering med terskel. Ut fra hensyn til fisk ble det bestemt at det skal planlegges fjerning av terskel 8, 7, 6, 4 og 3 (Figur 2), samt at de to små tersklene (2B og 2C) i det vestre løpet mellom terskel 2 og terskel 3 også blir fjernet. De hydrauliske analysene skulle gi svar på om de foreslåtte tiltakene hadde ønsket effekt, eventuelt om det var mer hensiktsmessig å la tersklene bestå.

Fire strekninger har blitt analysert, dvs. strekning 8, 7, 5 og 4. Strekning 4 ble analysert med noe mangelfulle oppmålinger i øvre del, men fordi denne strekningen ble antatt å ha viktige, potensielle gyteområder ble det besluttet å gjøre inngående studier her. Figur 6 viser et eksempel på hvordan en delstrekningen blir modellert ved å dele inn strekningen i tverrsnitt.



Figur 6. Tverrsnittsinndeling for den hydrauliske modellen på strekning 7. Nederst til høyre vises et tilfeldig tverrsnitt (sett nedover), med referanse til den innsirklete røde linjen i kartet.

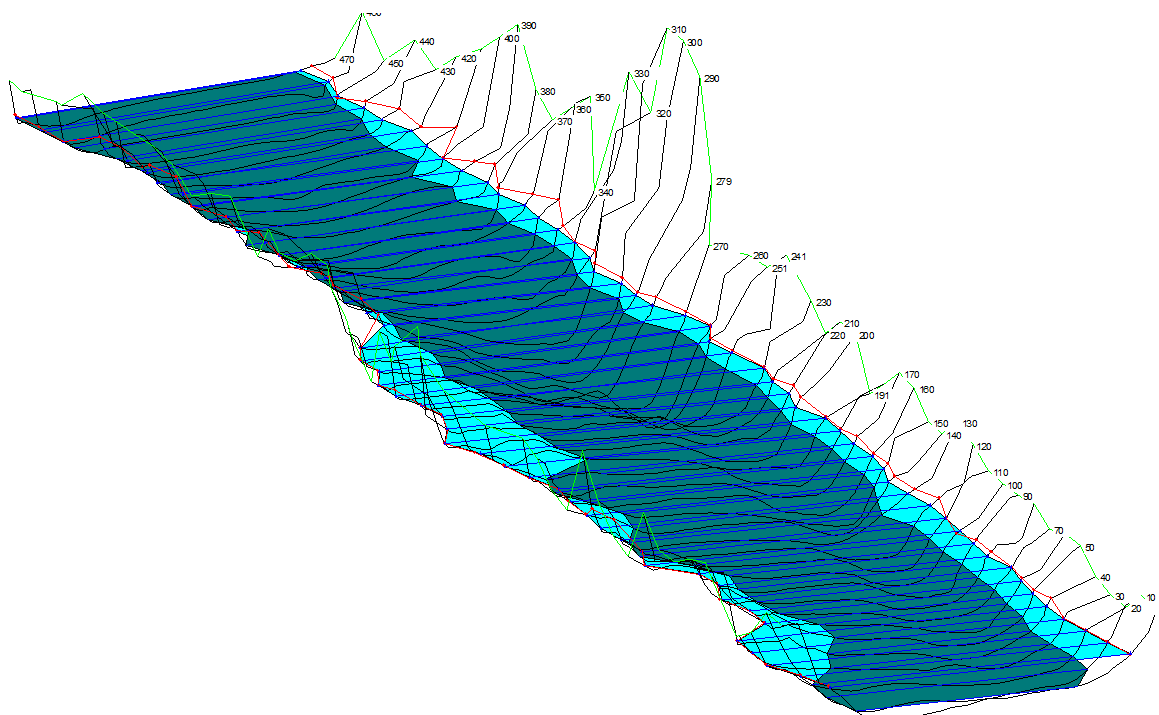
De enkelte strekningene ble studert med hydrauliske modeller ved vannføringer på 6 m³/s og 15 m³/s. De hydrauliske modellene ble kalibrert med målte vannlinjedata. Når modellen var kalibrert i den aktuelle situasjon (med terskler), var det neste trinnet å simulere fjerning av terskler. Tabell 1 viser vannivået (moh) i nedstrøms ende av hver av de modellerte strekningene.

Tabell 1. Nedstrøms vannivå (moh) ved forskjellige vannføring før og etter terskelfjerning.

Vannføring (m ³ /s)	Før terskelfjerning		Etter terskelfjerning	
	6	15	6	15
Strekning 8	54,83	54,85	53,23	53,51
Strekning 7	55,30	55,40	54,73	54,86
Strekning 5	58,0	58,1	57,47	57,63
Strekning 4	59,11	59,22	57,95	58,14

For å simulere fjerning av terskler måtte grensebetingelsene endres i nedstrøms del av hver strekning, ved at man ved forskjellige teknikker bestemmer seg for hvor mye terskelen hever vannivået ovenfor, og at man senker vannivået med en tilsvarende verdi. Den nedre randbetingelsen som ble brukt for situasjonen "etter

fjerning av terskelen" var "normalstrømning" i første eller andre tverrprofil ovenfor terskelen. Hele beregningen ble kjørt for underkritiske strømningsforhold. Modellene kunne deretter kjøres på nytt for $6 \text{ m}^3/\text{s}$ og $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Fra HEC-RAS kan man til slutt trekke ut data for vannoverflaten høyde, vanndekket areal, vannhastigheter, som ved hjelp av GIS-programvaren kan benyttes for å illustrere endringer før og etter fjerning av tersklene. Et eksempel er vist i Figur 7.



Figur 7. Perspektivskisse som viser eksempel fra arbeidet med den hydrauliske modellen av strekning 4. Bildet viser modellert vanndekket areal ved en vannføring på $15 \text{ m}^3/\text{s}$ før (lys blå) og etter (mørk blå) fjerning av terskelen.

4 Resultater

I de påfølgende delkapitler presenteres resultater fra de hydrauliske simuleringene. Det er viktig å bemerke at resultater for situasjoner uten terskler er basert på beregninger uten mulighet for kontroll av vannivå, mens situasjoner under dagens forhold med terskler er basert på modeller som er kalibrert for reelt vannivå (målinger).

4.1 Vanndekket areal

De hydrauliske analysene og målingene viser at tersklene gir et relativt likt vanndekket areal ved 6 og 15 m³/s (Tabell 1). På strekning 7 er forskjellen 14,6 % mens på de tre øvrige strekningene er forskjellen mindre enn 3 %. Forskjellen for strekning 7 kan skyldes tidligere nevnte usikkerhet pga. manglende bunndata. Dette bekrefter uansett hensikten med at tersklene skal opprettholde et visuelt vannspeil. Når tersklene fjernes reduseres det vanndekkete arealet med 10- 30 % ved 6 m³/s og med 5-19 % ved 15 m³/s. Endringene er minst på strekning 5 ved begge vannføringer.

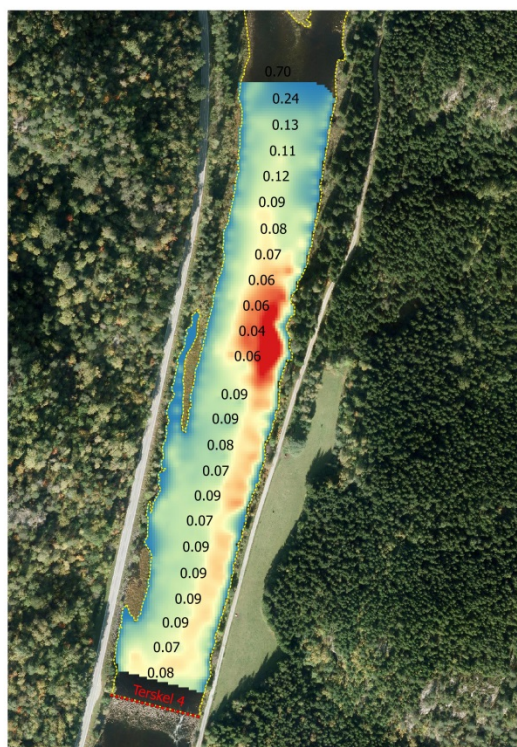
Tabell 2. Vanndekket areal modellert ved forskjellige vannføring før og etter terskelfjerning oppgitt i m². I en egen kolonne er det angitt prosentvise forskjeller i vanndekket areal mellom 6 og 15 m³/s før terskelfjerning. De to høyre kolonnene viser prosentvis forandring av vanndekt areal før og etter terskelfjerning for henholdsvis 6 og 15 m³/s.

Strekning	Før terskelfjerning			Etter terskelfjerning			
	Vannføring (m³/s)			Vannføring (m³/s)			
	6	15	Diff (%)	6	15	Diff. ved 6 m³/s(%)	Diff. ved 15 m³/s (%)
8	12 970	13 020	0,4	9 094	10 510	30	19
7	14 524	16 643	14,6	12 561	15 818	14	5
5	47 687	48 987	2,7	43 540	46 502	9	5
4	31 375	32 259	2,8	22 125	27 223	29	16

4.2 Vannhastigheter og vanndyp

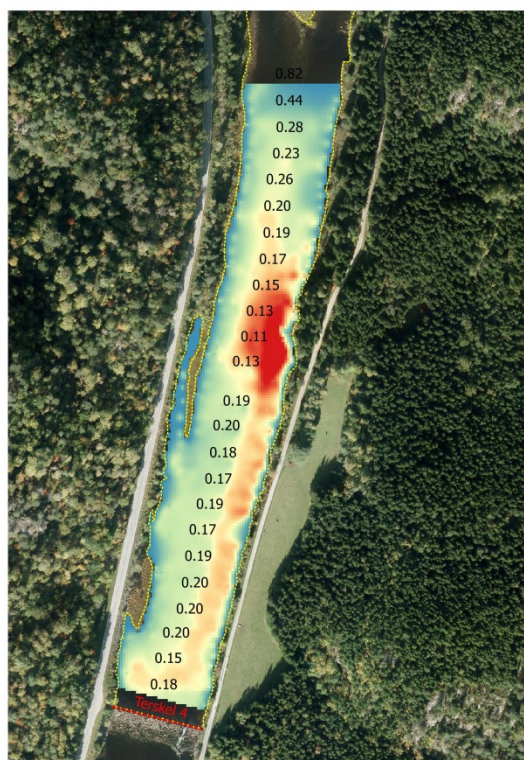
Figurer 8-11 viser modellerte vannhastigheter, vanndyp og vanndekket areal på strekning 4, 5, 7 og 8. Vannhastighetene er angitt som gjennomsnittlig verdi for hvert enkelt tverrsnitt. Generelt vil vannhastighetene avta ut mot breddene og være høyest langs elvas djupål. Denne variasjonen framkommer ikke i en 1D modell, men modellresultatene kan tolkes for de enkelte tverrsnitt, for eksempel i forbindelse med planlegging av fysiske tiltak for fisk.

Før fjerning av terskelen

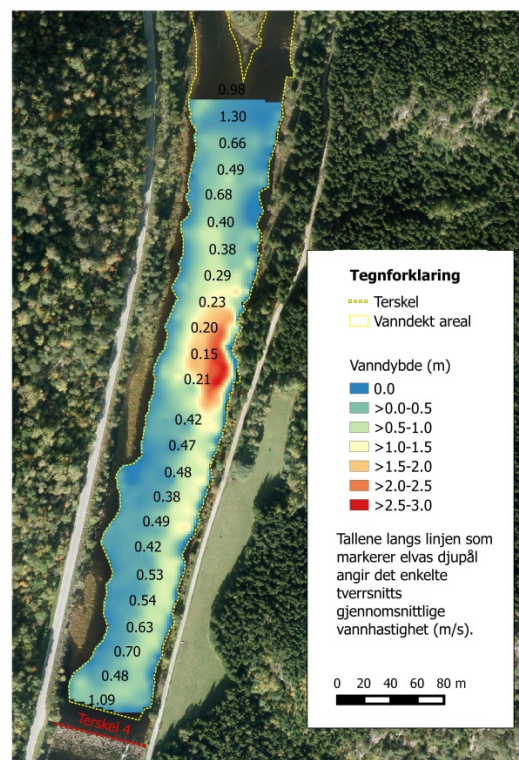


Q6

Etter fjerning av terskelen



Q15



Tegnforklaring

- Terskel
- Vanndekt areal

Vanndybde (m)

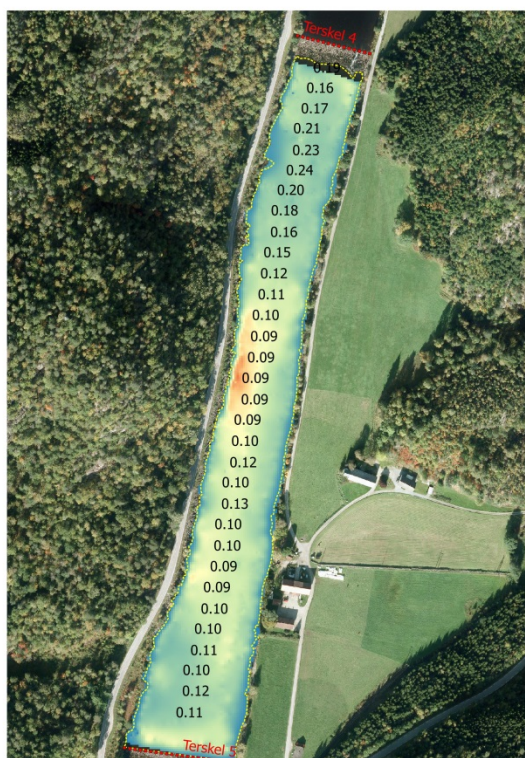
- 0.0
- >0.0-0.5
- >0.5-1.0
- >1.0-1.5
- >1.5-2.0
- >2.0-2.5
- >2.5-3.0

Tallene langs linjen som markerer elvas djupål angir det enkelte tverrsnitts gjennomsnittlige vannhastighet (m/s).

0 20 40 60 80 m

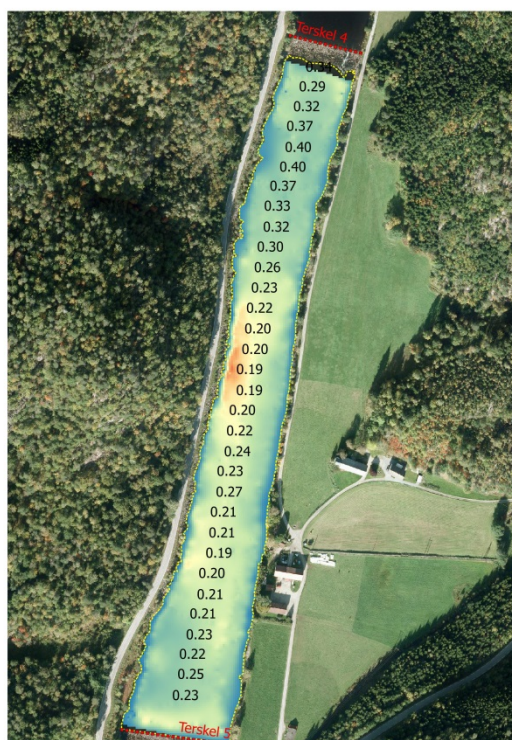
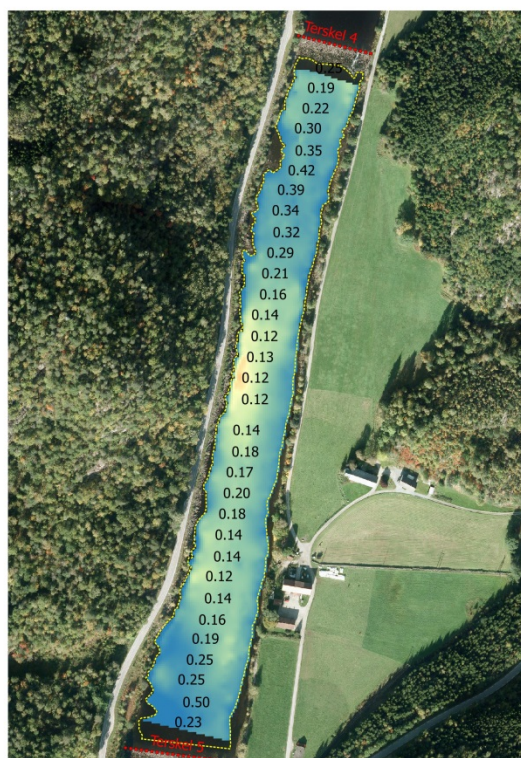
Figur 8. Strekning 4 – Vanndyp (se tegnforklaring), vanndekket areal og gjennomsnittlig vannhastighet (m/s angitt som tall på bildene) i hvert tverrsnitt før (venstre) og etter (høyre) fjerning av terskelen, for $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ (oppe) og $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ (nede).

Før fjerning av terskelen

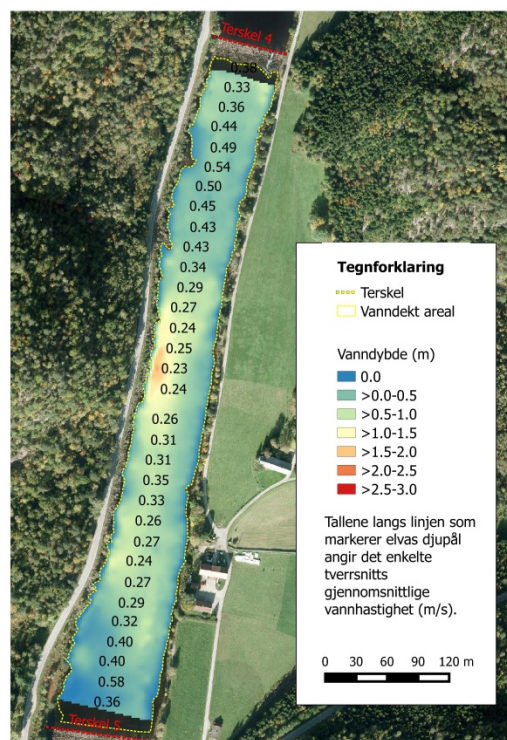


Q6

Etter fjerning av terskelen

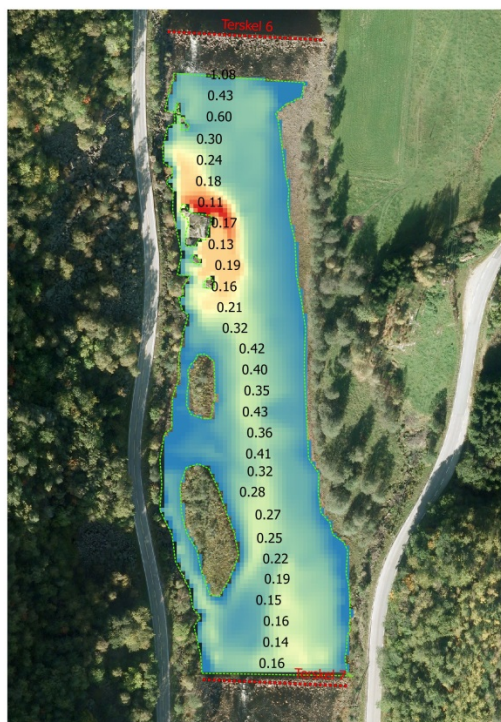


Q15



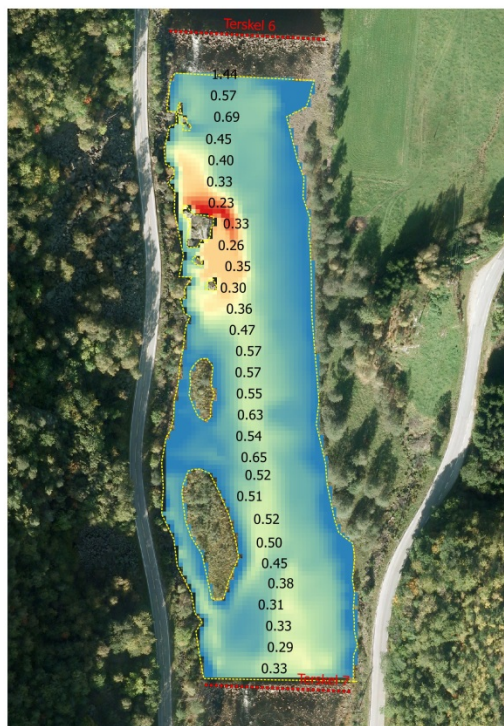
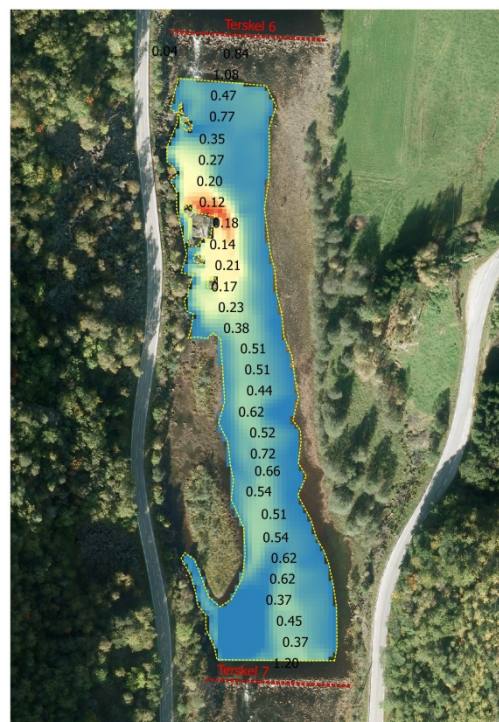
Figur 9. Strekning 5 – Vanddyb (se tegnforklaring), vanddekket areal og gjennomsnittlig vannhastighet (m/s angitt som tall på bildene) i hvert tverrsnitt før (venstre) og etter (høyre) fjerning av terskelen, for $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ (oppe) og $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ (nede).

Før fjerning av terskelen

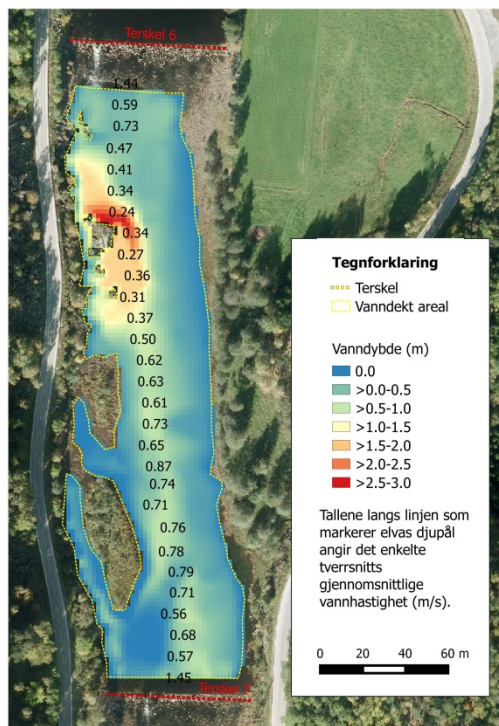


Q6

Etter fjerning av terskelen



Q15



Tegnforklaring

- Terskel
- Vanndekt areal

Vanndybde (m)

- 0.0
- >0.0-0.5
- >0.5-1.0
- >1.0-1.5
- >1.5-2.0
- >2.0-2.5
- >2.5-3.0

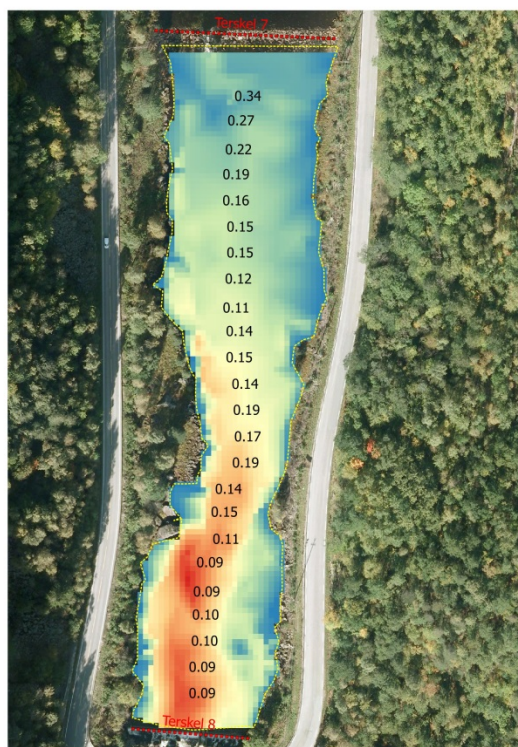
Tallene langs linjen som markerer elvas dypål angir det enkelte tverrsnitts gjennomsnittlige vannhastighet (m/s).

0 20 40 60 m

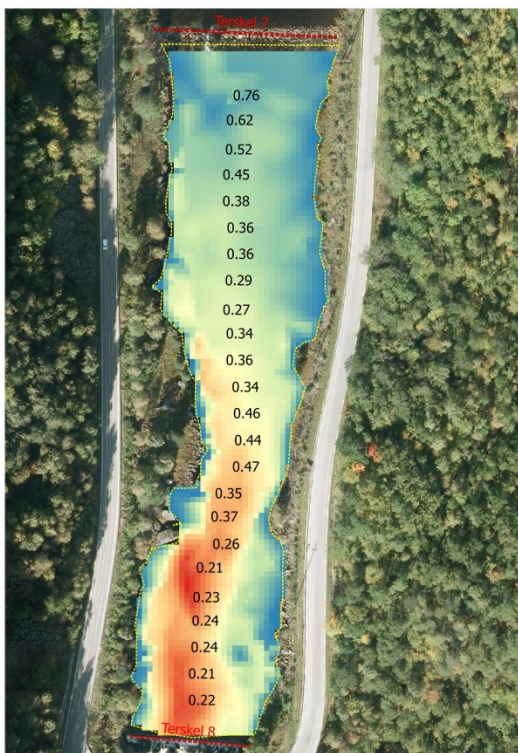
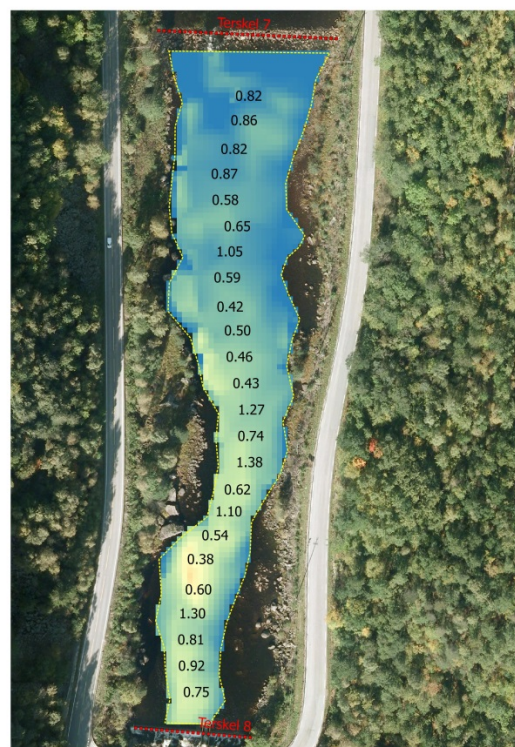
Figur 10. Strekning 7 – Vanndyp (se tegnforklaring), vanndekket areal og gjennomsnittlig vannhastighet (m/s angitt som tall på bildene) i hvert tverrsnitt før (venstre) og etter (høyre) fjerning av terskelen, for $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ (oppe) og $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ (nede).

Før fjerning av terskelen

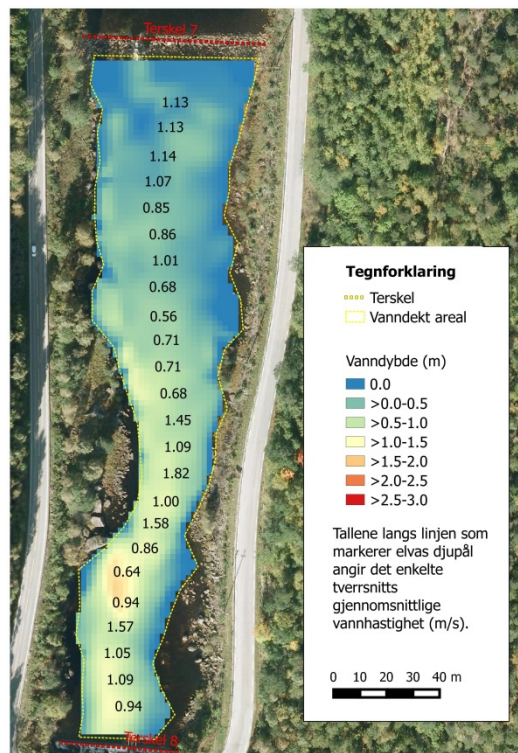
Etter fjerning av terskelen



Q6



Q15



Tegnforklaring

..... Terskel
 Vanndekt areal

Vanndybde (m)

0.0
 >0.0-0.5
 >0.5-1.0
 >1.0-1.5
 >1.5-2.0
 >2.0-2.5
 >2.5-3.0

Tallene langs linjen som markerer elvas dypål angir det enkelte tverrsnitts gjennomsnittlige vannhastighet (m/s).

0 10 20 30 40 m

Figur 11. Strekning 8 – Vanndyp (se tegnforklaring), vanndekket areal og gjennomsnittlig vannhastighet (m/s angitt som tall på bildene) i hvert tverrsnitt før (venstre) og etter (høyre) fjerning av terskelen, for $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ (oppe) og $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ (nede).

Figur 8-11 viser at vannhastighetene øker som en naturlig følge av terskelfjerning. Tabell 3 viser gjennomsnittlige vannhastigheter for alle fire strekninger ved de fire modellerte situasjonene. Verdiene er utregnet som et gjennomsnitt av de modellerte vannhastighetene i alle tverrsnittene på hver enkelt strekning.

Tabell 3. Gjennomsnittlige vannhastigheter (m/s) før og etter terskelfjerning.

Strekning	Før terskelfjerning		Etter terskelfjerning	
	Vannføring (m ³ /s)		Vannføring (m ³ /s)	
	6	15	6	15
8	0,15	0,36	0,78	1,03
7	0,30	0,57	0,62	0,81
5	0,12	0,15	0,22	0,35
4	0,11	0,17	0,37	0,50

Vi ser at vannhastighetene øker betydelig når tersklene fjernes. Ved en vannføring på 6 m³/s er økningen mellom 55 % (strekning 5) og 140 % (strekning 8). Ved 15 m³/s er den tilsvarende vannhastighetsøkningen mellom 32 og 60 %. Det er også viktig å se at vannhastighetene på alle de modellerte strekningene er høyere ved en vannføring på 6 m³/s etter terskelfjerning, enn ved en vannføring på 15 m³/s ved dagens forhold med terskler.

Verdiene i Tabell 3 gir en oversikt over hvordan de hydrauliske forholdene varierer på strekningsnivå ved forskjellige situasjoner, og kan eksempelvis gi en beskrivelse av områdene som oppvekstområder for fisk. Hvilken effekt dette har på fiskepopulasjonen kan igjen modelleres, for eksempel ved hjelp av data-verktøyet IBSalmon (Hedger m. fl. 2013). Når det gjelder lokale hydrauliske forhold, som er viktige ved vurdering av gyteplasser, må det gjøres mer nøyaktige vurderinger av enkelttverrsnitt eller enkeltområder.

4.3 Gyteplasser og forslag til tiltak

Gyteplassene, eksisterende og potensielle, på hele minstevannføringsstrekningen er vist på Figur 2. For å vurdere om potensielle gyteplasser vil tas i bruk når tersklene fjernes, kan lokalitetene sammenholdes med modellerte vannhastigheter som vist på figurene 8-11. De foreslåtte tiltakene listes opp i de videre kapitlene fra øverst (strekning 1) og nedover.

4.3.1 Generelt

For alle modellerte strekninger vil vannhastighetene være egnet for gyting, men siden oppgitte verdier for vannhastighet er gitt som gjennomsnittlig hastighet i tverrsnittet, kan vannhastigheten være en annen over f.eks. de to store potensielle gyteområdene på strekning 4. Modelleringen gir i tillegg indikasjoner på at vannhastighetene på strekning 4 vil bli i helt nedre grense av hva som er egnet til gyting etter en terskelfjerning og ved en vannføring på 6 m³/s. Basert på en skjønnsmessig vurdering, er det sannsynlig at fiskene vil ta i bruk de to store, viktige gyteområdene på strekningen. Vi observerte flere steder at hunfisker hadde prøvegravd her høsten 2014. Etableringen av strukturer som strømsettere vil ytterligere øke egnetheten her. Uansett bør innsatsen legges til strekning 4 og 5 («elv i elv» design) som i dag fremstår som de strekningene som potensielt vil ha størst positiv effekt av en biotopjustering. Av modelleringen kan det synes som at noe

av det realiserte gyteområder helt øverst på strekningen tørlegges (se Figur 14), spesielt ved $6 \text{ m}^3/\text{s}$, men dette kan skyldes usikkerheten knyttet til modellering av vanndekket areal på den øvre delen av strekning 4. Blant annet var det enkelte uoverensstemmelser mellom dybdemålinger utført av dykkere med relativt unøyaktige koordinater. I metodekapitlet er dette omtalt i forbindelse med at dette området hadde mangelfulle topografiske måledata. Vårt inntrykk, basert på undervannsobservasjoner, er at dette området fortsatt vil være vanndekket. Det store urealiserte gyteområdet på strekningen framstår som en del av den opprinnelige dypålen og er trolig det viktigste gyteområdet for alle undersøkte strekninger. Det er derfor sannsynlig at de områdene som i modellen har en usikkerhet knyttet til vanddyp vil forbli vanndekket, og vil være viktige som gyteområder.

Nedstrøms strekning 5 og ned til Kleveland bru, har de aller fleste gyteområdene blitt tatt i bruk, selv uten terskelfjerning, og med $6 \text{ m}^3/\text{s}$ vannføring. Fra Kleveland bru og ned til Laudal kraftstasjon, er oppvekstforholdene gode.

Det vil forekomme flekkvis gyting utover de registrerte gyteområdene vi har kartlagt med en fjerning av tersklene. Vi ser ikke behov for å legge ut ytterligere gytegrus nå i første omgang. Vi foreslår en oppfølging og evaluering av de foreslåtte tiltak (se under) ved å registrere gytegroper og finne eggoverlevelsen i tiltaksområdene.

4.3.2 Forslag til utlegg av gytegrus rett nedstrøms dam Mannflå

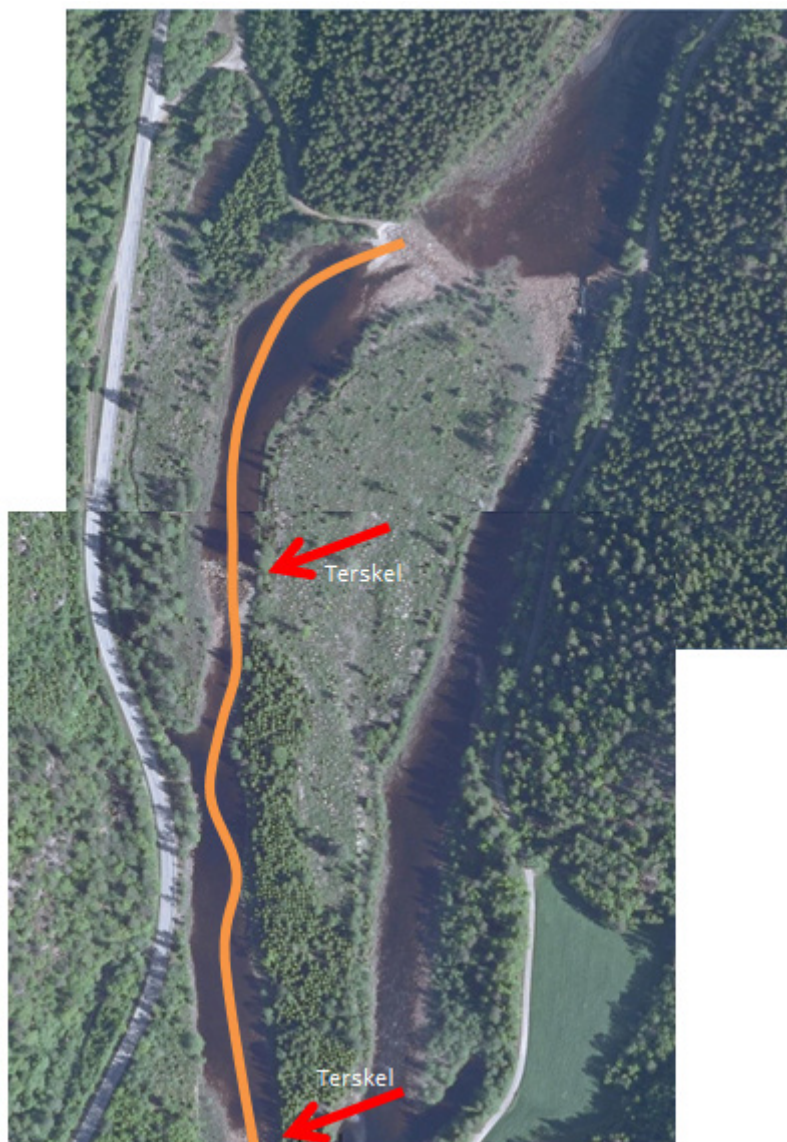
Dette er et mindre gyteareal, ca. 50 m^2 , men er fordelaktig fordi det ligger helt øverst oppe i strekning 1, rett nedstrøms dammen (Figur 12). Strekning 1 er ikke modellert, men undersøkt ved dykkerobservasjoner. Dyp ved en vannføring på $6 \text{ m}^3/\text{s}$ var ca. mellom 70 og 150 cm, med en vannhastighet på rundt 50 cm/s. Stedvis var det noe høyere vannhastighet i overflaten, men lavere vannhastighet i mikrohabitatet ved bunn. Det lå noe grus i området og dette kan virke som en lokal plass som trolig er skjermet for utspyling. Vi anbefaler et 30 cm tykt lag, noe som skulle tilsvare et behov for ca. $16\text{--}17 \text{ m}^3$ med egnet gytegrus. Det er viktig at grusen anvises på riktig plass ved utlegg, fordi grusen må legges bak noen store blokker og langs en renne i elva som ikke er så lett å finne uten maske og snorkel.



Figur 12. Det anbefales utlegging av gytegrus øverst på strekning 1, i området som er skravert oransje.

4.3.3 Strekningen nedstrøms Solkrona

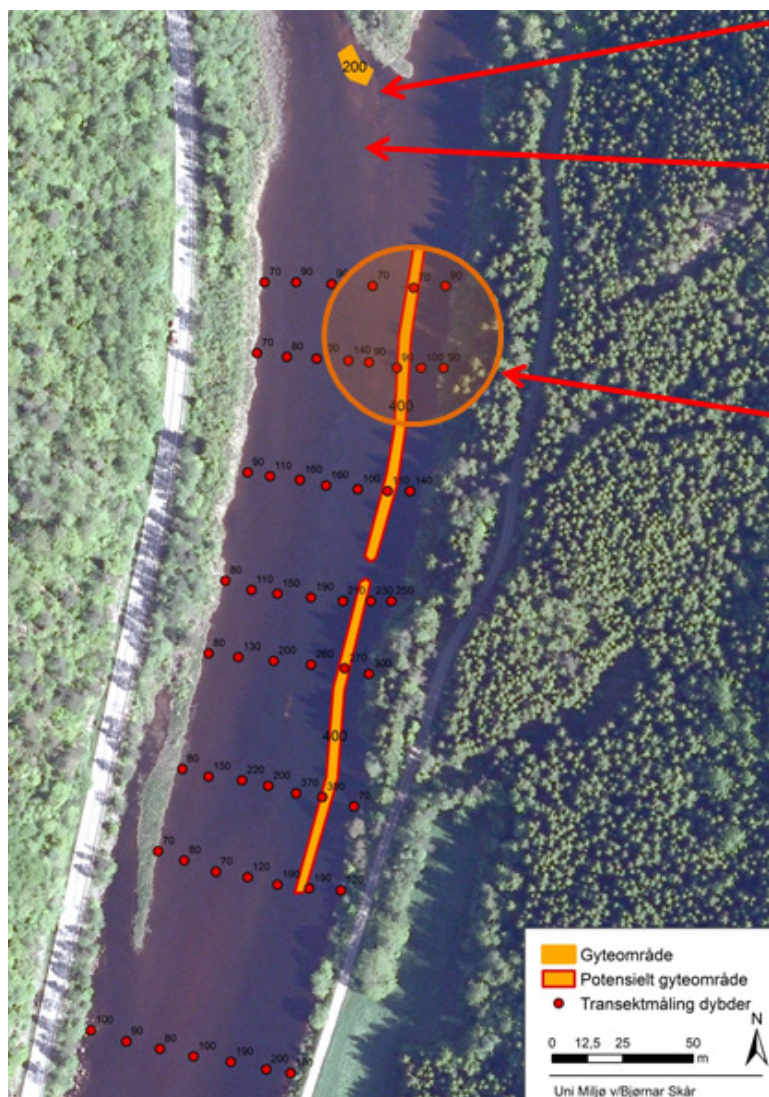
Oppstrøms de modellerte strekningene finner vi også terskelen ved Solkrona (Terskel 2), hvor det er foreslått å modifisere terskelen slik at en større del av minstevannføringen vil gå i det vestre løpet. Her finnes i dag noen små gyteområder. Det må forventes at denne sidekanalen vil øke sitt potensial, både for gyting og oppvekst hos laks. Det er godt med skjul (hulrom) for ungfisk i området samt ett realisert og to potensielle gyteområder. Siden det er relativt få og små gyteområder i øvre del av strekningen er det viktig å sikre gyting i dette sideløpet. Det finnes to mindre terskler i dette sideløpet og vi foreslår at disse fjernes, fordi de ikke har noen klar funksjon med økt vannføring som foreslått, men hindrer gyting. Dette er to små terskler hvor blokker enkelt kan plukkes ut og vurderinger kan gjøres på stedet. Erfaringsmessig vil det naturlig forekomme stor grad av flekkvis gyting i dette sideløpet med mer egnet vannhastighet. Tiltaksområdet er angitt i Figur 13.



Figur 13. Kartutsnitt som viser eksisterende terskler og et sideløp som antas å kunne benyttes til gyting og oppvekst for ungfisk nedenfor terskel 2.

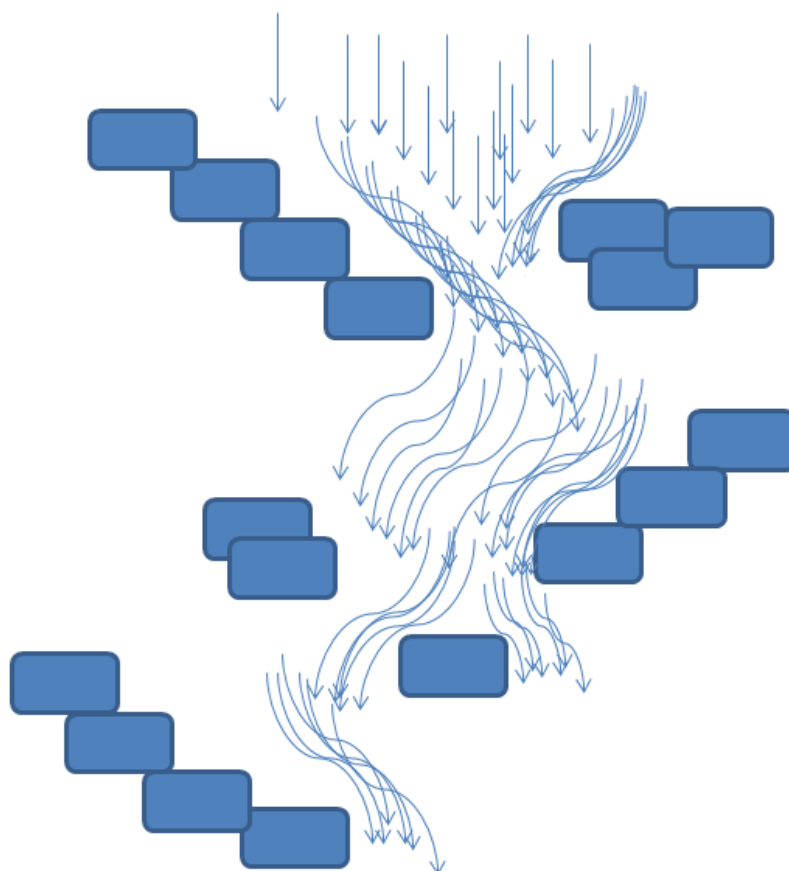
4.3.4 Biotopjustering på strekning 4

Som nevnt i den generelle delen over kan det fra modellarbeidet i Figur 8 synes som at noe av det realiserste gyteområdet helt øverst på strekning 4 tørregges. Men den øvre delen i Figur 8 ble ikke modellert (dvs. den er "uten vanndyp"), og den er fortsatt innenfor det antatte vanndekte arealet og ikke tørrlagt. Vårt inntrykk basert på undervannsobservasjoner, er også at dette tidligere har vært den opprinnelige dypålen og er trolig en del av det viktigste gyteområdet for alle undersøkte strekninger. Det kan her være aktuelt å lede mer vann over til østre bredd med en ledebune dersom fjerning av terskelen viser seg å påvirke gyteområdet negativt. Figur 14 viser et mindre område helt øverst, og det store, potensielle området for gyting nedenfor, og langs vestre bredd. Vi tror at mesteparten av det øverste området fremdeles vil være vanndekt etter terskelfjerning, og trolig vil dette gyteområdet utvide seg nedover.



Figur 14. Eksisterende gyteområde på strekning 4 med antatt utvidelsesretning er vist i oransje farge og rød linjeøverst i figuren. To andre potensielle gyteområdene er angitt med oransje farge og rød linje. Dybdemålinger er angitt med små, røde sirkler

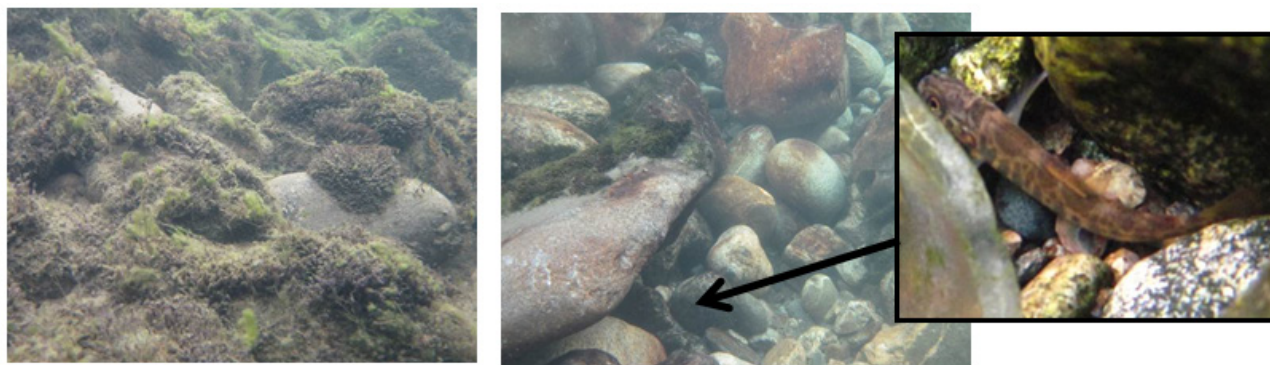
Det foreslås at blokkene som plukkes ut av terskel 4, legges direkte på de potensielle gyteområdene. De skal danne strømsettere og i tillegg kan de plasseres ut enkeltvis eller i grupper på 2 eller 3. Dette vil bedre dynamikken og øke egnetheten for gyting i området betydelig. I tillegg vil det gi standplasser for gytefisk og skjul for ungfisk. Et eksempel på blokkutlegging er vist i Figur 15.



Figur 15. Prinsippskisse for utlegging av steinblokker for å danne egnete standplasser og gunstig strømningsmønster for gyte plassene på strekning 4.

4.3.5 Utlegg av kålhoder/små blokker på strekningene 4 og 5

I tillegg til strømsettere og blokker på de potensielle gyteområdene, kan massene i tersklene som fjernes brukes til å øke kvaliteten på leveområdene for ungfisk. Tidligere undersøkelser har vist at hulromkapasiteten var lavt på strekningen fra Kleveland bru og opp til Skåleneset/Lislestræde. Hulrom er svært viktig som skjul for ungfisk, spesielt i vinterhalvåret. En økning av hulrom vil, i tillegg til å øke tilgjengelig gyteareal, øke smoltproduksjonen i tiltaksområdet. Kålhodestor stein til små blokker er egnet til å danne hulrom og finnes mest sannsynlig som fyllmasse i tersklene. Disse kan plasseres ut nedstrøms gyteområdene og bør følge de dypere partiene av elva. I tillegg til utlegg av kålhoder/små blokker, er «ripping» av elvebunnen en mulighet. I Aurlandselva er store deler av elvebunnen løsnet ved å bruke en «ripper» på gravemaskin (se bilde neste slide). Spesielt strekning 5 kan være en aktuell strekning for dette. Her er elvebunnen pakket og med lav hulromscore. Ved økt vannhastighet og store flommer, vil trolig elvebunnen bli bearbeidet og naturlig elvedynamikk opprettholdes i fremtiden ved at tersklene er fjernet. I tillegg vil det kanskje være hensiktsmessig å tenke designløsning «elv i elv» på denne strekningen i.h.h.t. håndbok for miljødesign (Forseth og Harby 2013). Et eksempel på hulrom for fisk er vist i Figur 16.



Figur 16. På venstre bilde vises pakket og fast bunnssubstrat med få hulrom, mens bildet i midten viser dannelse av store mengder hulrom for fisk i det samme substratet etter harving

4.4 Terskelfjerning og produksjon av laks

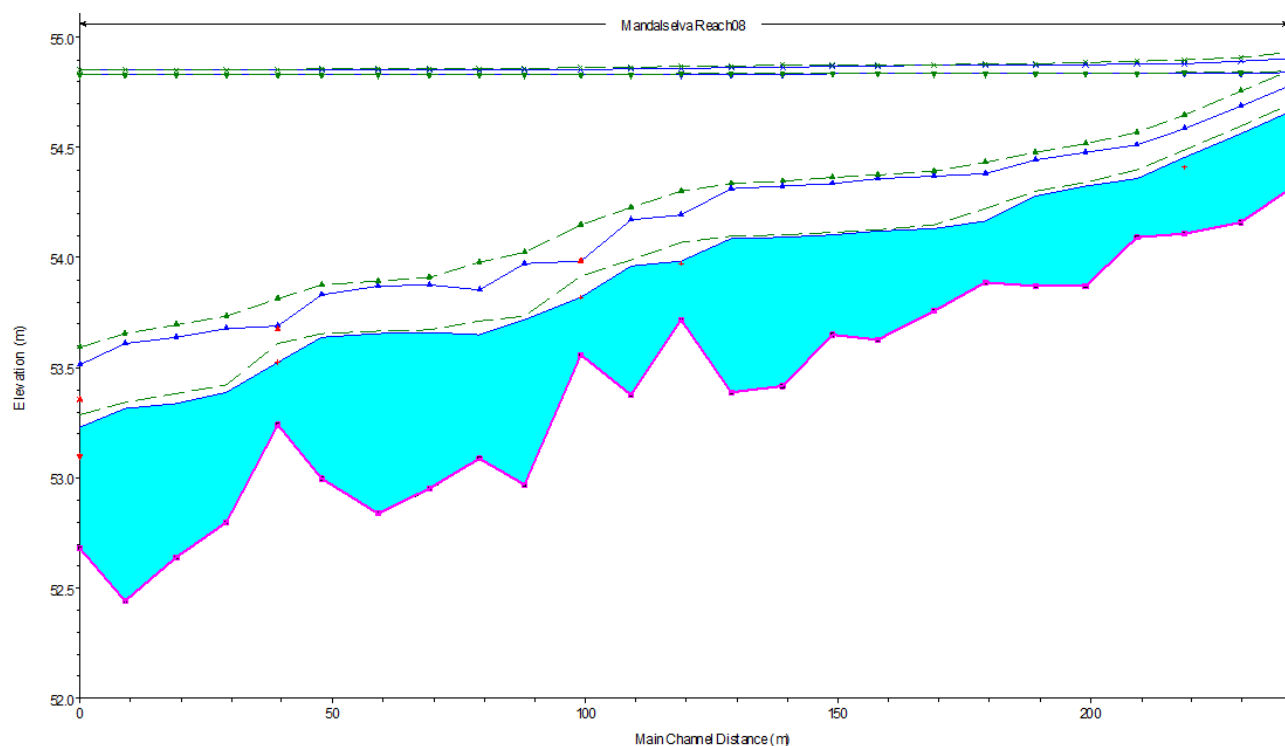
Kartlegging av skjul og dagens tilgjengelige gyteområder satt inn i diagnoseverktøyet i miljøhåndboka (Forseth & Harby 2013) tilsier at det aller meste av strekningen kan klassifiseres som lavproduktiv med tersklene. Et grovt estimat tilsier en smoltproduksjon på mellom 5 000 og 10 000 smolt (om lag 2 til 4 smolt pr 100 m²). Når tersklene fjernes (i samsvar med forslaget), et nytt gyteområde etableres rett nedstrøms Dam Mannflå og mye av terskelmaterialet brukes til å lage skjulplasser, vil produktiviteten i flere delstrekninger øke fra lavproduktive til moderat produktive. Det vanndekte arealet (regnet på en vintervannføring på 6 m³/s) vil reduseres med ca 13 %, men på grunn av bedre habitatkvalitet tilsier et forsiktig estimat at smoltproduksjonen vil øke med 40-45 %, til mellom 8000 og 14 000 smolt. Tiltakene kan altså gi en smoltgevinst på mellom 2500 og 4000 smolt. I en masteroppgave (Ana Adava Bustos 2014, NTNU) har modellering av samme strekning ved hjelp av bestandsmodellen IB Salmon vist lignende gevinster ved terskelfjerning og habitattiltak. Det er trolig mulig å supplere tiltakene etter at tersklene er fjernet for å øke gevinsten. Vi har heller ikke tatt hensyn til at de nye gyteområdene som kan tas i bruk etter fjerning av tersklene i nedre halvdel av strekningen kan bidra til økt produksjon i de store strekningene nedstrøms Kleveland bru, hvor det er mye skjul men trolig lite gyteplasser.

4.5 Vandring

Tersklene som barrierer for oppstrøms vandring hos laks var opprinnelig en hovedårsak til at man ønsket å fjerne tersklene, men vurdering av forhold for opp- og nedvandring for fisk har ikke vært en spesifikk oppgave i denne rapporten. Det kan likevel understrekes at tersklene i tidligere telemetristudier på strekningen har vist seg å forsinke oppvandringen hos laks (Thorstad m. fl. 1997, 1998). Andre studier har vist at fjerning av terskler kan gi økt oppvandringshastighet hos laks (Fjeldstad m.fl. 2012). En forventet konsekvens av å fjerne tersklene i Mandalselva er at fisken ikke lenger vil forsinkes av disse barrierene. Figur 17 viser et modellert lengdteverrsnitt av strekning 8 (rett ovenfor Kleveland bru), og illustrerer hvordan habitatet endrer seg fra et innsjøliknende basseng til en mer naturlig elvestrekning, noe som er gunstig for oppvandring hos voksen laks.

Foreløpige resultater fra radiomerkeforsøk av 22 voksne laks sommeren 2014 (NINA, upubliserte data) antyder at betongterskelen ved Kleveland bru er en vandringsbarriere ved de vassføringsforhold som rådet

(generelt mellom 15 og 25 m³/s), men at fisken hadde normal vandringshastighet over de øvrige tersklene oppover.



Figur 17. Modellert vannivå på strekning 8. De to øverste blå og grønne linjene viser vannivået ved 6 og 15 m³/s med dagens terskel, mens de to nederste blå og grønne linjene viser vannivået uten terskel ved de samme vannføringene. Vannet strømmer fra høyre mot venstre.

5 Konklusjoner og diskusjon

Gjennom flere sesonger er det gjennomført innsamling av data for topografi, hydrauliske forhold og gyte-områder, på minstevannføringsstrekningen mellom dam Mannflå og Kleveland bru. I denne rapporten er det gjort inngående analyser av strekningen med mål om å vurdere strekningens forhold for laks dersom tersklene fjernes. På fire delstrekninger er det laget endimensjonale, hydrauliske modeller for å beskrive strømningsforholdene før og etter fjerning av tersklene ved vannføringer på 6 og 15 m³/s. Resultatene på de modellerte strekningene viser at det vil bli en betydelig økning i vannhastigheter. Ved en vannføring på 6 m³/s er økningen mellom 55 % (strekning 5) og 140 % (strekning 8) og ved 15 m³/s er den tilsvarende vannhastighetsøkningen mellom 32 og 60 %. Dette er svært gunstig for både gyting og oppvekst hos laks fordi den studerte strekningen i dag mangler slike kvaliteter og består av lengre strekninger med lave vannhastigheter. For alle modellerte strekninger vil vannhastighetene være egnet for gyting etter terskel-fjerning, selv om vannhastighetene på strekning 4 vil bli i nedre grense av hva som er egnet ved en vannføring på 6 m³/s.

Ved fjerning av tersklene viser modelleringsarbeidet at det vanndekkete arealet på delstrekningene vil reduseres med 10- 30 % ved 6 m³/s og med 5-19 % ved 15 m³/s. Endringene er minst på strekning 5 ved begge vannføringer, og visualisering av resultatene viser at alle modellerte strekninger generelt vil framstå som vanndekket, men mer naturlig elv.

Fire av åtte terskler er modellert. Terskel 1 foreslås beholdt som i dag, mens terskel 2 foreslås justert. Strekningene oppstrøms de to sistnevnte er derfor ikke modellert. Det var et mål å modellere terskel 3 og 6, men pga. høy vannføring lot det seg ikke gjøre å innhente nødvendige data i tide. Variasjonen i de fire strekningene som er modellert i denne rapporten, og resultatene fra disse analysene, tilsier at vi kan forvente oss omtrent de samme typiske endringer av vanndekket areal og vannhastigheter ved fjerning også av terskel 3 og 6.

Det er utarbeidet undersøkelser og analyser av områder for gyting på hele strekningen, både med dagens terskler og basert på modellerte beskrivelser av strekninger etter terskelfjerning. En kombinasjon av realisering av potensielle gyteområder som følge av terskelfjerning, og foreslåtte fysiske tiltak på gyte-områdene, vil gi en god utbredelse av gyteplasser for laks ved en vannføring på 6 m³/s. På strekning 4 kan det være nødvendig å i tillegg legge ut ei bune og steinblokker for å oppnå tilstrekkelige vannhastigheter. I tillegg til foreslåtte tiltak for å skape gyteplasser er det foreslått å øke omfanget av hulrom for å bedre skjulforholdene for ungfisk av laks. Dette kan gjøres ved å "snu" eksisterende masser på strekning 4 og 5, samt legge ut masser fra dagens terskler.

Det vanndekte arealet (regnet på en vintervannføring på 6 m³/s) vil reduseres med ca. 13 % ved fjerning av tersklene, men på grunn av bedre habitatkvalitet tilsier et forsiktig estimat at smoltproduksjonen på strekningen mellom Dam Mannflå og Kleveland bru vil øke med 40-45 %, til mellom 8000 og 14 000 smolt. Tiltakene kan altså gi en smoltgevinst på mellom 2500 og 4000 smolt.

Analysene i denne rapporten er gjort for vannføringer på 6 og 15 m³/s. Analyser av forhold for laks ved lavere vannføringer, for eksempel oppvekstforhold for ungfisk, bør baseres på ytterligere modellering av de

hydromorfologiske forholdene. Dette kan gjøres med tilpasning av eksisterende modeller for de fire studerte strekningene. I tillegg bør det gjøres analyser med populasjonsmodeller, slik som beskrevet i Hedger m. fl. (2013).

6 Referanser

Adeva, A. B. 2014. Modeling the trade-off between production of Atlantic salmon (*Salmo salar*) and power at Laudal Hydropower plant. Masteroppgave innlevert til Institutt for Vann og Miljøteknikk, NTNU. 1-71 s.

Fjeldstad, H. P., Barlaup, B. T., Stickler, M., Gabrielsen, S. E. & Alfredsen, K. 2012. Removal of weirs and the influence on physical habitat for salmonids in a Norwegian river *River Research and Applications* **28**: 753-763.

Forseth, T. & Harby, A. (red.). 2013. Håndbok for miljødesign i regulerte laksevassdrag. NINA Temahefte **52**, 1-90 s.

Hedger, R., Sundt-Hansen, L. E.B., Forseth, T., Diserud, O. H. Ugedal, O., Finstad, A. G. 2013. Modelling the complete life-cycle of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) using a spatially explicit individual-based approach. *Ecological Modelling*. Volum 248.

OED 2013. (Endring av konsesjonsvilkår for Laudal kraftverk i Mandalsvassdraget). Kongelig resolusjon 14. juni 2013.

Thorstad, E., Heggberget, T. G.. 1997. Vandring hos radiomerket laks i Mandalselva i for hold til minste vannføring, lokkeflommer, terskler og kalking. NINA Oppdragsmelding 470

Thorstad, E., Hårsaker, K. 1998. Vandring hos radiomerket laks i Mandalselva i for hold til minste vannføring, lokkeflommer, terskler og kalking- videreføring av tidligere undersøkelser. NINA Oppdragsmelding 541

USACE 2010. US Army Corps of Engineers. Hec-RAS River Analysis System. Users's Manual, Version 4.1. Lastes ned fra: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf.



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no