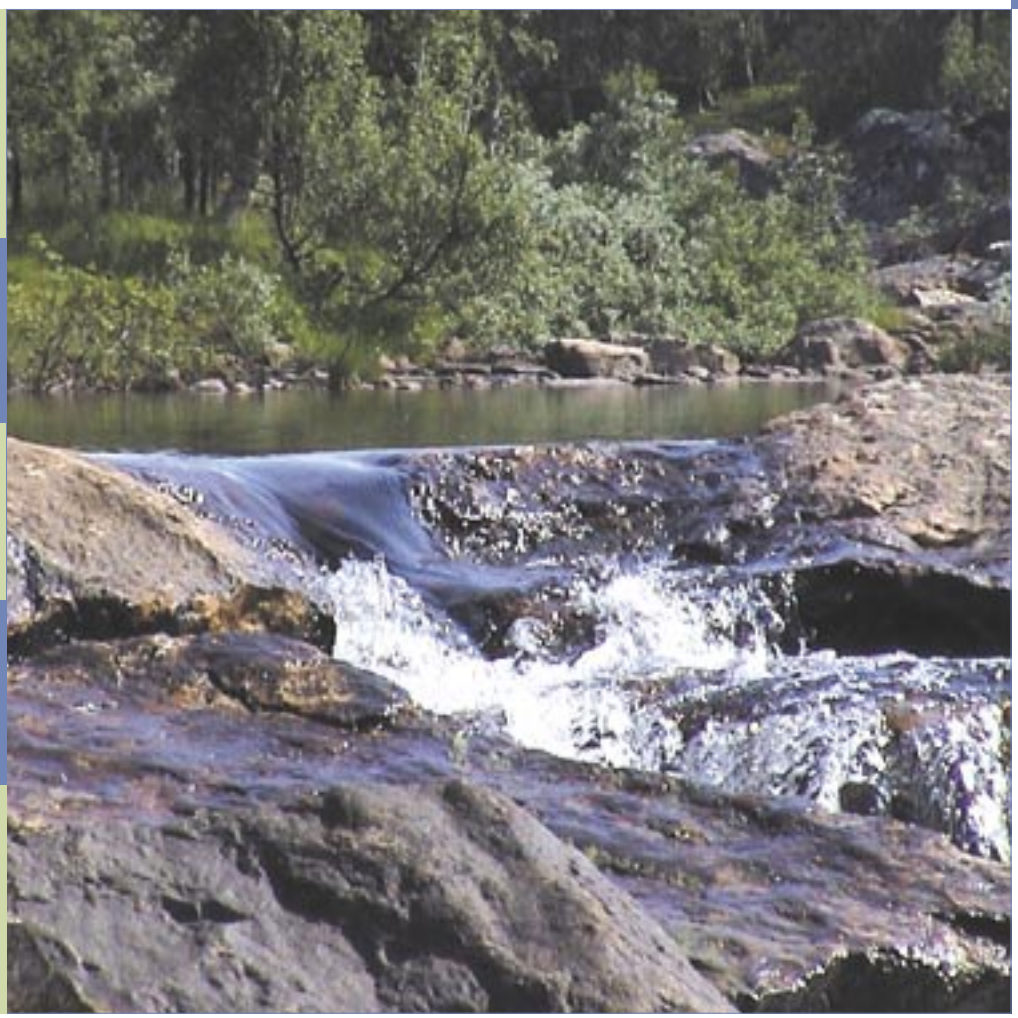
NVE

# Habitatforbedrende tiltak

## - geomorfologiske prosesser, sedimenttransport, erosjon og simulering av optimale forhold for fisk

*Hans-Petter Fjeldstad, SINTEF Energiforskning AS*
*Tharan Fergus, NVE*
*Nils Reidar Bøe Olsen, NTNU*

1
2005



RAPPORT MILJØBASERT VANNFØRING

**FoU-programmet Miljøbasert vannføring**

Programmet Miljøbasert vannføring har som mål å skaffe økt kunnskap om virkninger av sterkt redusert vannføring i vassdrag, slik at forvaltningen får et bedre faglig grunnlag for å fastsette vannføringen ved inngrep i vassdrag. Dette er aktuelt i forbindelse med nye vassdragskonsesjoner, revisjon av vilkår i gamle konsesjoner og som følge av den nye vannressursloven og EUs rammedirektiv for vann. Programmet finansieres av Olje- og energidepartementet og er forankret i Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Programmets fase I har en tidsramme på fem år (2001-2005). Programmet er organisert med en styringsgruppe, bestående av representanter fra NVE med lederansvar, energibransjen, naturforvaltningen og interesseorganisasjoner, og et fagutvalg der ulike fagområder er representert. Den daglige ledelse og administrasjon av programmet er knyttet til Vannressursavdelingen i NVE.

# Habitatforbedrende tiltak – geomorfologiske prosesser, sedimenttransport, erosjon og simulering av optimale forhold for fisk

Norges vassdrags- og energidirektorat
2005

# Rapport nr. 1 - 2005

# Habitatforbedrende tiltak – geomorfologiske prosesser, sedimenttransport, erosjon og simulering av optimale forhold for fisk

**Utgitt av:** Norges vassdrags- og energidirektorat

**Redaktør:** Hans-Petter Fjeldstad, SINTEF Energiforskning AS

**Forfattere:** Hans-Petter Fjeldstad, SINTEF Energiforskning AS
Tharan Fergus, Norges vassdrags- og energidirektorat
Nils Reidar Bøe Olsen, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

**Trykk:** NVEs hustrykkeri
**Forsidefoto:** Hans-Petter Fjeldstad
**ISSN:** 1502-234X
**ISBN:** 82-410-0520-2

**Sammendrag:** Prosjektet har hatt som mål å studere fysiske forhold i forbindelse med habitatforbedrende tiltak for fisk i regulerte vassdrag. I prosjektet er det benyttet numeriske modeller i stor utstrekning, kombinert med generell hydromorfologisk kunnskap, for å studere de hydrauliske forholdene rundt habitatforbedrende tiltak. Tiltakenes funksjon er analysert og visualisert. I tillegg er det gjort sammenlikninger av måledata og resultater fra numeriske beregningsmodeller. Dette har vist at hydrauliske modeller kan brukes for å beskrive stabilitet, erosjon og sedimentasjon i forbindelse med habitatjusteringer.

Etterundersøkelser av utførte biotopjusteringer i Dalåa og Grå-elva i Stjørdalsvassdraget har vist at flere av tiltakene har vært godt tilpasset de stedlige fysiske påkjenninger, mens enkelte av tiltakene har vært utsatt for enten erosjon og/eller sedimentering. Ved framtidige habitatjusteringer er det viktig at disse utformes med basis i biologisk kunnskap, i kombinasjon med vurdering av de fysiske forholdene ved hjelp av metoder som er beskrevet og utviklet i dette prosjektet.

**Emneord:** Fysisk habitat, habitatforbedrende tiltak, laks, hydraulisk modellering.

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Juli 2005

# Innhold

**Forord** ..... **5**

**Sammendrag** ..... **7**

**1. Innledning** ..... **9**

Modeller for habitatforhold ..... 10

Modellering av sedimenttransport ..... 10

**2. Studieområder** ..... **11**

Mandalselva ..... 11

Dalåa ..... 13

Gråelva ..... 14

**3. Data og analyser** ..... **15**

Generelt ..... 15

Habitatjusteringer i Mandalselva ..... 16

Habitatjusteringer i Dalåa ..... 17

Sedimenttransport i Gråelva ..... 19

**4. Resultater** ..... **20**

Modellering og visualisering av habitatjusteringer i Mandalselva ..... 20

Sedimenttransportberegninger ..... 25

Sedimentdeponering i habitatforbedrende tiltak i Dalåa ved Øyvollen . 25

Erosjon av gytegrus ..... 27

Undersøkelser av habitatjusteringer i Dalåa ved Nesheim ..... 30

**5. Diskusjon og konklusjoner** ..... **31**

**6. Referanser** ..... **32**

# Forord

I forbindelse med vassdragsreguleringer og andre inngrep i vassdrag stilles det ofte krav om habitatforbedrende tiltak for å redusere skadevirkninger. Det er imidlertid et sterkt behov for bedre kunnskap om virkninger av slike tiltak, både på kort og lang sikt.

Prosjektet ”Habitatforbedrende tiltak – geomorfologiske prosesser, sedimenttransport, erosjon og simulering av optimale forhold for fisk” har hatt som målsetting å studere fysiske forhold i forbindelse med habitatforbedrende tiltak for fisk i regulerte vassdrag. Prosjektet er tverrfaglig og gjennomført som et samarbeid mellom tre ulike miljøer; SINTEF, NTNU og NVE.

Prosjektet har kombinert numeriske modeller, hydromorfologisk kunnskap og nye visualiseringsmetoder for å studere de hydrauliske forhold rundt habitatforbedrende tiltak i Dalåa og Gråelva i Stjørdalsvassdraget. Habitatforbedrende tiltak er utsatt for fysiske påkjenninger. Prosjektet har vurdert langtidsvirkninger av disse, samtidig som det gis anbefalinger for utforming av framtidige tiltak. Dette vil være nyttig for forvaltningen i arbeid med å redusere skadevirkninger av inngrep i vassdrag.

Oslo, juli 2005

Haavard Østhagen
leder styringsgruppe

John Brittain
programleder

# Sammendrag

Prosjektet er et samarbeid mellom SINTEF, NTNU og NVE. Det har hatt som mål å studere fysiske forhold i forbindelse med habitatforbedrende tiltak for fisk i regulerte vassdrag.

Med de moderne simuleringsprogrammene SSIIM og River2D og nye visualiserings-metoder, er det vist hvordan habitatendringer kan iverksettes for å bedre vandrings-forholdene for voksen laksefisk der det er bygget vandringshindre i form av terskler og hvor vannføringen er redusert som følge av vannkraftregulering.

I prosjektet er det benyttet numeriske modeller i stor utstrekning, kombinert med generell hydromorfologisk kunnskap, for å studere de hydrauliske forholdene rundt habitatforbedrende tiltak. Tiltakenes funksjon er analysert og visualisert. I tillegg er det gjort sammenlikninger av måledata og resultater fra numeriske beregnings-modeller. Dette har vist at hydrauliske modeller kan brukes for å beskrive stabilitet, erosjon og sedimentasjon i forbindelse med habitatjusteringer.

Etterundersøkelser av utførte biotopjusteringer i Dalåa og Gråelva i Stjørdals-vassdraget har vist at flere av tiltakene har vært godt tilpasset de stedlige fysiske påkjenninger, mens enkelte av tiltakene har vært utsatt for enten erosjon og/eller sedimentering. Ved framtidige habitatjusteringer er det viktig at disse utformes med basis i biologisk kunnskap i kombinasjon med vurdering av de fysiske forholdene ved hjelp av metoder som er beskrevet og utviklet i dette prosjektet.

I prosjektet har vi vist hvordan modellen SSIIM kan benyttes for å beregne sediment-transport ved ulike habitatforbedrende tiltak, slik at disse i framtiden kan utformes slik at de opprettholder de ønskede fysiske kvaliteter under de gjeldende fysiske påvirkninger over tid.

# 1. Innledning

I mange regulerte vassdrag utføres det avbøtende tiltak for å redusere forventede negative konsekvenser av reguleringen, som for eksempel fiskeutsettinger og slipping av minstevannføring og bygging av terskler og andre habitatforbedrende tiltak. Flere undersøkelser har vist at effekten av fiskeutsettinger ikke svarer til forventningene (Fjellheim and Johnsen 2001), det samme gjelder trolig effekten av minstevannføring. Nyere forskning anbefaler ofte å legge til rette for variasjon i minstevannføring, ettersom naturen selv har en større grad av hydrologisk mangfold, samt å skape variasjon i habitatforholdene (Poff m. fl. 1997, Richter m. fl. 1998). Habitatforbedrende tiltak medfører vanligvis en endring i elvegeometrien og de hydrauliske forhold i elva. Slike tiltak kan være utsatt for både sedimentasjon og erosjon, og dermed endre funksjon over tid hvis de ikke er godt tilpasset de fysiske rammebetingelser slik som vannføring, isgang og sedimenttransport.

Prosjektets mål har vært å utvikle metoder og modeller for å gjennomføre habitat-forbedrende tiltak for fisk, på en slik måte at de fysiske tiltakene forbedrer leve-vilkårene for ungfisk på lang sikt. Dette innebærer at tiltakene må være tilpasset de fysiske rammebetingelsene gjennom året, med tanke på belastninger fra vann og is, samt at det taes hensyn til sedimenttransport. Et delmål har vært å tilrettelegge habitat-hydrauliske modeller for å vurdere effekter av alternative habitatforbedrende tiltak på elvestrekninger med minstevannføring eller miljøbasert vannføring. Videre har et delmål vært å vurdere hvorvidt en tredimensjonal numerisk modell kan brukes til å bestemme om det vil bli sedimentdeponering eller erosjon i habitatforbedrende tiltak i en elv.

Prosjektet har tatt i bruk nyutviklede dataverktøy for å studere fysiske forhold for fisk i regulerte vassdrag med tanke på å optimalisere planlegging av biotopjusteringer for å optimalisere forhold for oppvekst, gyting og vandring.

For å oppnå målene til prosjektet, er stabiliteten og biologisk funksjon til flere forskjellige typer fysiske habitatforbedrende tiltak på fire lokaliteter i to forskjellige vassdrag undersøkt. Både eksisterende, avbøtende tiltak og tiltak som ble anlagt i prosjektperioden ble undersøkt. Stabiliteten er undersøkt både ved oppmålinger og ved bruk av en tredimensjonal numerisk modell. Det er også vurdert hvorvidt en tredimen-sjonal numerisk modell kan brukes til å bestemme om det vil bli sedimentdeponering eller erosjon i habitatforbedrende tiltak i en elv. Resultatene fra modellen har blitt sammenlignet med feltmålinger for å se hvor godt modellen er egnet til dette formålet. Resultaten fra dette arbeidet ble presentert på 5th International Symposium on Eco-hydraulics (Olsen m.fl. 2004).

Funksjon er undersøkt ved å tilrettelegge og bruke habitathydrauliske modeller på de ulike strekningene med habitatforbedrende tiltak. Prosjektet har benyttet det som finnes av informasjon om habitatkrav og habitatbruk til ungfisk av laks og ørret og forenklet metoder for simulering av habitatforbedrende tiltak. Nylig gjennomførte habitat-forbedrende tiltak er fulgt opp med enkle etterundersøkelser for evaluering av tiltakene.

I forbindelse med arbeidet i Gråelva har vi hatt et nært samarbeid med Hans Mack Berger fra NINA. Følgende studenter ved Institutt for vann-og miljøteknikk, NTNU, har hatt tilknytning til prosjektet: Nils Rüther har jobbet ved Nesheim i Stjørdalsvassdraget som en del av sitt PhD-arbeid, mens Sten Enok Wersland (2003) har hatt Øyvollen som studieområde i sin hovedoppgave. Ingrid Pegg og Jerome Mollieux har tatt sine hovedoppgaver i Gråelva.

## Modeller for habitatforhold

Gjennom en rekke undersøkelser av fiskens habitatvalg og habitattilbud i flere norske elver, kjenner vi forholdsvis godt til hvilke habitatkrav ungfisk av laks og ørret stiller i sommerhalvåret (Heggenes 1996, Heggenes 1991, Harby m. fl. 1999). Selv om enkelte undersøkelser også dokumenterer habitatkrav om vinteren (Heggenes and Harby 1996, Heggenes og Fjeldstad 1999, Heggenes m.fl. 1993), kjenner vi mindre til habitatkrav i vinterhalvåret. Habitatkrav for andre livsstadier av laks og ørret enn parr og for andre arter er lite kjent i Norge. Dette prosjektet har likevel tatt utgangspunkt i kjente habitatkrav og brukt det best tilgjengelige materialet.

Modellverktøy for habitatforhold har stor internasjonal utbredelse, og er også brukt for eksempel til planlegging av elverestaureringer og biotopjusteringer. I Norge har habitatmodellering vært brukt i om lag 15 år, og i noen tilfeller også til planlegging og analyser av habitatforbedrende tiltak. I Norge er modellering av habitatforbedrende tiltak blant annet utført på delstrekningene Øyvollen (Harby og Arnekleiv 1994, Harby og Bakken 1996,) og Nesheim (Harby 2001) i Dalåa i Stjørdalsvassdraget, samt på deler av strekningen Laudal–Manflåvann i Mandalselva (Harby m.fl. 2001). Simuleringene fra Nesheim og Mandalselva er i hovedsak gjort med delmodellene SSIIM (Olsen og Stokseth 1995, Olsen 2004), og HABITAT (Harby og Heggenes 1995, Alfredsen 1999) i den videreutviklede Vassdragssimulatoren (Alfredsen m.fl. 1995, Harby m.fl. 1997).

## Modellering av sedimenttransport

Den engelske betegnelsen for tredimensjonal numerisk modellering av væskestrømmer kalles Computational Fluid Dynamics (CFD). Denne teknologien er i økende grad benyttet til mange strømningstekniske problemstillinger i dag, for eksempel vindstrømning rundt fly og biler, forberenning i motorer etc. Innenfor elvehyraulikken blir også CFD tatt mer og mer i bruk. CFD krever stor regnekraft, og det er derfor ikke før i de siste årene at en har hatt raske nok datamaskiner. Hovedprinsippet bak CFD er først å dele væskegeometrien i et nett av celler. For en elvestreng kan en typisk ha 1000 - 100 000 celler. For hver celle løser en først Navier-Stokes ligninger for å finne hastigheten. En bruker spesielle løsningsmetoder som er utviklet for disse ligningene, inkludert modeller for turbulens. Etter hastigheter og turbulensverdier er funnet for alle cellene, løser en konveksjons-diffusjonsligningen for sedimentkonsentrasjonen. Dette gir bl. a. hvor mye sedimenter som eroderer og deponerer for alle cellene som er nær bunnen innen et visst tidsskritt. En bruker så kontinuitetsligningen for sedimentene til å bestemme bunnforandringen i et tidsskritt. Når bunnen så blir forandret, får en et nytt

beregningsnett, med ny cellegeometri. Så løser en igjen Navier-Stokes ligninger for dette beregningsnettet. Dette skjer om igjen for hvert tidsskritt. Resultatet blir at bunn-forandringene blir beregnet over tid. En mer detaljert beskrivelse av modellen er gitt av Olsen (2004). Den numeriske modellen som er benyttet er tidligere blitt brukt til beregning av geomorfologiske forandringer i elver (Olsen m. fl., 2004, Olsen m. fl., 2005).

# 2. Studieområder

## Mandalselva

Mandalselva ligger i Vest Agder fylke og har utløp i sjøen ved Mandal. Vassdraget har et nedbørsfelt på 1800 $km^2$. Mandalselva var i tidligere tider en av Norges beste lakseelver, og er et av Agders største vassdrag. På grunn av forringet vannkvalitet som følge av sur nedbør døde laksestammen i vassdraget ut i første halvdel av 1900-tallet. Mandalsvassdraget ble siden regulert til vannkraftproduksjon i en periode da det ikke var en levedyktig laksestamme igjen i elva. Flere av de fysiske inngrepene som ble gjort i forbindelse med reguleringen er gjort på anadrome strekninger. Blant annet er Laudal kraftverk bygget med inntaksmagasin i Manflåvatn og utløp i Mandalselva 6 km ned-strøms. På strekningen Manflå – Laudal er det bygget 12 terskler, og om sommeren er det normalt en minimumsvannføring på 3 $m^3/s$ (Fjeldstad m. fl. 2004). I konsesjons-vilkårene er det nevnt at disse kan endres dersom laksen kom tilbake til elva. De siste årene er vannkvaliteten forbedret gjennom et stort kalkingsprosjekt, og laksen er kommet tilbake i sterk grad. De siste tre sesonger er det fanget mellom 5 og 10 tonn laks årlig, hvorav kun noen få hundre kilo oppstrøms minstevannføringsstrekningen.

I dette prosjektet er det gjennomført studier av flere delstrekninger på minstevann-føringsstrekningen for å se på muligheten for å bruke hydrauliske modeller samt visualiseringsverktøy for å forutsi virkningen av fysiske inngrep for å forbedre opp-vandringsforholdene for voksen laksefisk. Strekningen oppstrøms Manflåvatn anses som viktige produksjonsarealer, og i tidligere tider var det også gode fiskestrekninger her oppe.

*Figur 1. Oversiktsskisse  som viser den ca. 6 km lange minstevannføringsstrekningen fra Manflå til Laudal.*

Mandalselva har flere ganger tidligere vært brukt som forsøksvassdrag for å modellere habitatendringers virkning på fysisk habitat (Fjeldstad, 2001, Harby m.fl., 2001). I 2002 ble de foreslåtte tiltakene på en av de modellerte strekningene gjennomført. Dette er vist i figur 2. Tiltaket gikk ut på å senke en terskelkrone med ca. 40 cm, samt å grave en ”grøft” på den nedre og øvre delen av terskelbassenget for å øke dybden lokalt og øke vannhastighetene i grøfta.

*Figur 2. Bilde av en terskelkrone i Mandalselva med "elv i elva" sett fra siden ved en vannføring på ca. 1,5 $m^3/s$. Denne lokaliteten befinner seg på strekningen som er vist på figur 1. Ved litt høyere vannføring oppnås også betydelig større vanndekt areal.*

I prosjektet er det gjort videre beregninger på fire av de 12 terskelbassengene for å se på habitatjusteringer på ulike typer lokaliteter, og hvordan tiltakene kan fungere permanent med de stedlige fysiske betingelser.

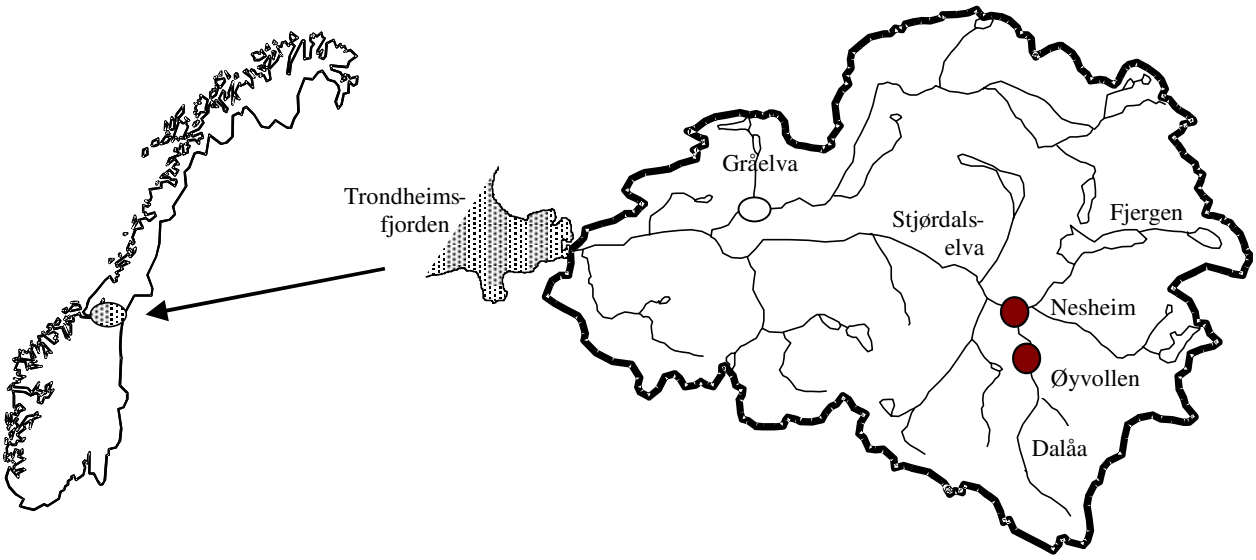
## Stjørdalselva

Stjørdalselva ligger i Nord-Trøndelag og har utløp ved Stjørdal. Nedbørsfeltet strekker seg fra svenskegrensen i øst og vestover til Trondheimsfjorden og har et areal på til sammen 2100 $km^2$. Habitatforbedrende tiltak i to sidevassdrag, Dalåa og Gråelva, er undersøkt.

### Dalåa

Dalåa ligger i de øvre deler av nedbørsfeltet, oppstrøms Meråker. Stjørdalselva er naturlig lakseførende opp til Nustadfoss i Meråker. Inntil 1994 var det 5 kraftverk i drift i Stjørdalsvassdraget: Funna, Nustadfoss, Turidfoss og Kopperå I og II. Kraftverkene ligger i hovedelva ved Meråker, i Kopperåa og i Funna. Innsjøene Funnsjøen og Fjergen tjener som reguleringsmagasiner. En omfattende utvidelse og tilleggsregulering var ferdig i 1994 i øvre deler av vassdraget. Elvene Tevla, Dalåa og Torsbjørka er nå regulert og overføres til et mindre magasin i Tevla. To nye kraftverk, Meråker og Tevla, erstatter nå Nustadfoss, Turidfoss, Kopperå I og II. Dalåa, Tevla og Torsbjørka har alle en minstevannføring nedstrøms inntaket. Minstevannføringene er fortsatt bestemt av et prøvereglement. Som kompensasjonstiltak for redusert lakseproduksjon settes det årlig ut yngel i Stjørdalselva, både nedstrøms og oppstrøms naturlig lakseførende del.

For å forbedre lakseproduksjonen på strekningen med redusert vannføring i Dalåa, ble det i 1993 startet et arbeid med habitatforbedrende tiltak på utvalgte prøvestrekninger på lokaliteten Øyvollen. (Harby m. fl. 1994, Harby og Arnekleiv 1994, Arnekleiv 1996, Harby og Bakken 1996). Tiltakene på Øyvollen gikk i hovedsak ut på å skape større variasjon på en relativt ensformig strekning, ved å skape to kulper med strykområder mellom, som kunne sammenliknes med en ensformig referansestrekning ovenfor. Laksunger har hele tiden blitt satt ut på noen prøvestrekninger med god overlevelse (Arnekleiv 2001). Nord-Trøndelag E-verk har ønsket å gjennomføre liknende tiltak andre steder i Dalåa. En delstrekning av Dalåa ved Nesheim ble valgt ut av Nord-Trøndelag E-verk. Også her ble det gravd to små kulper, samt at strekningen ble innsnevret med en deflektor øverst i 2001. Før tiltaket framsto strekningen som bred og grunn, uten høye vannhastigheter eller dypområder. Figur 3 viser et kart over vassdraget med plassering av Nesheim og delstrekningen Øyvollen der simulering med Vassdrags-simulatoren fant sted i 1993-94 (Harby m. fl. 1994).




*Figur 3. Kart over nedbørfeltet til Stjørdalselva med plassering av Gråelva og Nesheim og Øyvollen i Dalåa.*

## Gråelva

Gråelva er et annet sidevassdrag til Stjørdalselva som ligger ca 15 km fra utløpet i Trond-heimsfjorden. Gråelva er ikke regulert for kraftproduksjon.. Gråelva har et relativt lite nedslagsfelt, men er svært viktig for reproduksjon av sjøørret. På grunn av stabilitetsproblemer med kvikkleire i nedbørsfeltet har NVE de siste 10 årene erosjons-sikret Gråelva ved å plastre bunn og sider med stein over en strekning på ca. 10. kilometer. Samtidig er det gjennomført forsøk med opparbeidelse av kulper og utlegging av gytegrus på i alt 10 stasjoner (Berger m. fl. 2001). I prosjektet er det gjort studier av en lokalitet med utlagt gytegrus for å verifisere sedimenttransport med en hydraulisk beregningsmodell ved hjelp av nøyaktig oppmåling før og etter flom-episoder.

*Figur 4. Utlagt gytegrus med gyteplasser i Gråelva. De gule linjene antyder områdene med de to utlagte grusfraksjonene. Foto: Anders Lamberg..*

# 3. Data og analyser

## Generelt

Habitatforbedringer omfatter vanligvis en endring i elvegeometrien. Et eksempel er terskelbygging, der en ønsker å øke det vanndekte arealet på en strekning av elven. Et annet eksempel er bygging av buner på en ellers rett strekning. Dette vil føre til større variasjonsområde for vanndybde og vannhastighet, som igjen kan føre til forbedret habitat. I tillegg er substratet viktig for det fysiske habitatet. Det er ønskelig for ungfisk av laks og ørret at en har områder med grus- og steinfraksjoner. I fall slikt substrat ikke finnes allerede kan det være et tiltak å deponerer grus i elva for å forbedre habitatet. Et problem er at elva naturlig fører med seg endel sedimenter. Dette kan være både grus, sand og finstoff. Sedimentene kan legge seg i fordypningene som er konstruert. Finstoff kan også legge seg i grusområdene slik at effektivt substrat for fisken blir finere. Hvis en stor mengde sedimenter deponerer i områder der en har gjort tiltak, vil geometrien forandres, og en får ikke de samme hastighets-/ dybdeforhold som tiltaket var utformet for. Sedimentene kan da føre til minsket effekt av de habitatforbedrende tiltakene. Tilsvarende effekt vil det kunne ha dersom de fysiske tiltakene eroderes bort av flommer eller isgang.

# Habitatjusteringer i Mandalselva

Tidligere studier av, og forslag til, restaureringstiltak på minstevannføringstrekningen i Mandalselva (Harby m. fl. 2001) er brukt som basis i prosjektet. Noen av tiltakene ble gjennomført og studert i 2003 for å se hvordan tiltakene stemte med beregningene. En ”grøft” ble anlagt gjennom en terskel. Det ble da bestemt å ikke gjennomføre verifiserende topografiske oppmålinger fordi det viste seg at tiltakene var gjort mer omfattende enn det som var modellert. Det var også vanskelig å si om tiltaket ga ønsket effekt på oppvandring hos voksen fisk, ettersom det studerte tiltaket kun representerer èn av i alt 12 terskler. Skjønnsmessig ble tiltaket vurdert som svært vellykket. Dette ble også uttalt fra lokale interesser. Det var påfallende hvordan strømningsbildet stemte med de modellerte verdiene på en slik måte at grøfta fungerte som en ”elv i elva”.

I prosjektet har vi gått videre med utviklingen av planleggingsmetoder for restaurering, og i tillegg til modellen SSIIM har vi tatt i bruk den todimensjonale modellen River2D (University of Alberta). Fire typiske delstrekninger er modellert for to forskjellige sommervannføringer, 3 og 15 $m^3/s$. Disse ble visualisert for å danne grunnlag for å analysere følgene av habitatjusteringstiltak med mål om å øke oppvandringsmotivasjon hos voksen laks og ørret. Stasjonene er målt inn med nøyaktige data for topografi, vanndekt areal og vannivå for de to vannføringene. De innmålte dataene er benyttet til å sette opp hydrauliske modeller. I disse modellene er det først gjort beregninger av dagens forhold, og deretter er det gjort fiktive endringer i topografien på de enkelte strekningene for å beregne og visualisere virkningen av fysiske tiltak som antas å gi bedre vandringsforhold for fisk. Beregningene er visualisert for å gi et riktig inntrykk av tiltakenes effekt.

I Mandalselva har det vært et mål å beregne strømningsforholdene i egnete datamodeller. I den sammenheng er det nødvendig med inngangsdata for topografi og hydraulikk for modellering og validering. Følgende data er målt inn på de forskjellige strekningene:

*Tabell 1. Utførte målinger på de fire stasjonene i Mandalselva. På alle stasjonene er det gjort nøyaktige topografiske opmålinger i tillegg til vannhastighetsmålinger og posisjonering av vannkant ved to vannføringer.*

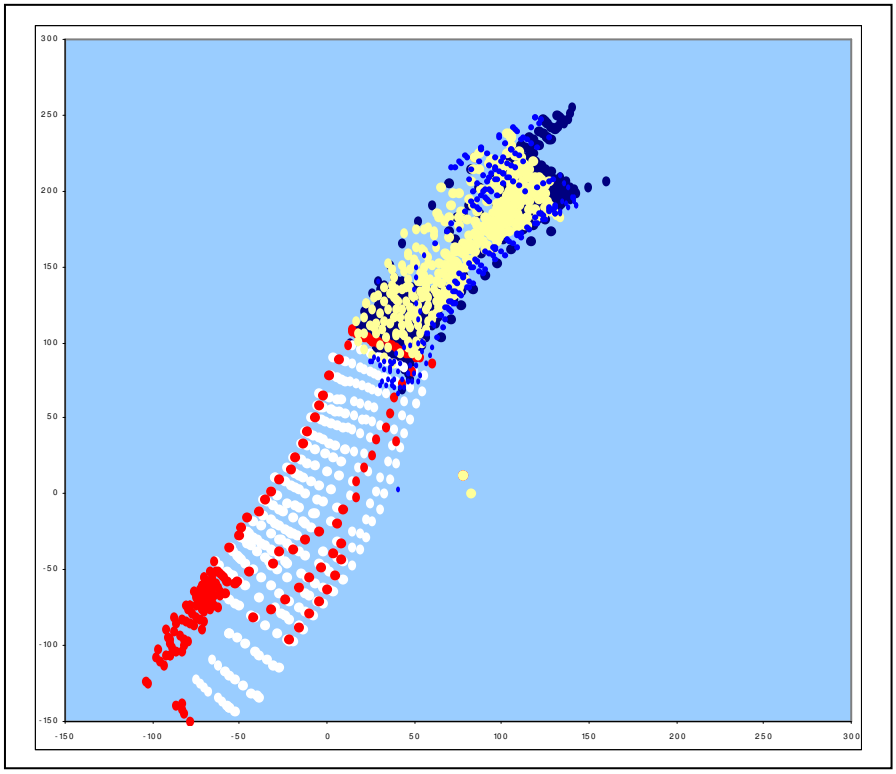
| Område | Manflå | Nedre Kleveland | Øvre Kleveland | Laudal |
|---|---|---|---|---|
| **Topografikoordinater** | 579 punkt | 331 punkt | 1261 punkt | 800 punkt |
| **Substrat** | Kart | Kart | Kart | Kart |
| **Hastighetsmålinger ved 3 m3/s** | | | | |
| **Hastighetsmålinger ved 15 m3/s** | 22 målinger | 9 (to målinger per dyp) | 24 (to målinger per dyp) | 24 målinger ved 13 m3/s |
| **Vannkant 3 m3/s** | | | | |
| **Vannivå 3 m3/s** | ja | ja | Ja | |
| **Vannkant 15 m3/s** | 154 | 95 | 73 | |
| **Vannivå 15 m3/s** | ja | ja | ja | |
| **Andre pkt** | laksetrapp og terskel | laksetrapp og terskler | Terskler | |

Målinger av topografi er utført med GPS der dette var mulig. Ellers er det benyttet direkte innmåling med totalstasjon. Instrumenttyper som ble benyttet var Leica GPS system 500 og AGA Geodimeter system 400. Dybdemålinger ble utført delvis manuelt og delvis med ekkolodd type Atlas 470. Vannhastighetsmålingene ble utført med Ott 10.002 flygel. Substratet ble registrert visuelt fra land og ved vading, og tegnet inn på kart.

Når man ønsker å studere det fysiske leveområdet (habitatet) for fisk, analyseres blant annet dybdeforhold, vannhastigheter og bunnsubstrat. På den aktuelle strekningen i Mandalselva er det særlig de stillestående forholdene som preger bildet av vassdraget. Dette skyldes lav vannføring pga. kraftproduksjon i kombinasjon med oppdemmingen med terskler. For å bedre forholdene for oppvandring for laks har det vært fokusert på å øke vannhastighetene og konsentrasjon av vannstrømmen.

## Habitatjusteringer i Dalåa

I juli 2002, juli og november 2003 og november 2004 ble det samlet feltdata fra stasjonene Øyvollen og Nesheim i Dalåa. I Dalåa er det gjort hydrauliske beregninger i SSIIM for å studere stabilitet og sedimenttransport i eksisterende biotopjusteringer på delstrekningene Nesheim og Øyvollen. Beregningsmodellene er kalibrert med hastighetsmålinger utført med Ott C2 miniflygel og Sontek Flowtracker akustisk doppler-velocimeter, samt vannlinjemålinger og topografiske registreringer med Sokkisha og Leica 307 totalstasjon. Alle terrengmålinger er gjort i det samme koordinatsystem fra måling til måling. Det ble tatt 3 sedimentprøver fra Nesheim og Øyvollen. Disse ble analysert ved NVE sitt laboratorium og brukt til beregningene i den tredimensjonale numeriske modellen. Det ble også lagt ut 3 rader med malte markørsteiner for å undersøke bevegeligheten av bunnmaterialet ved Nesheim i 2003.

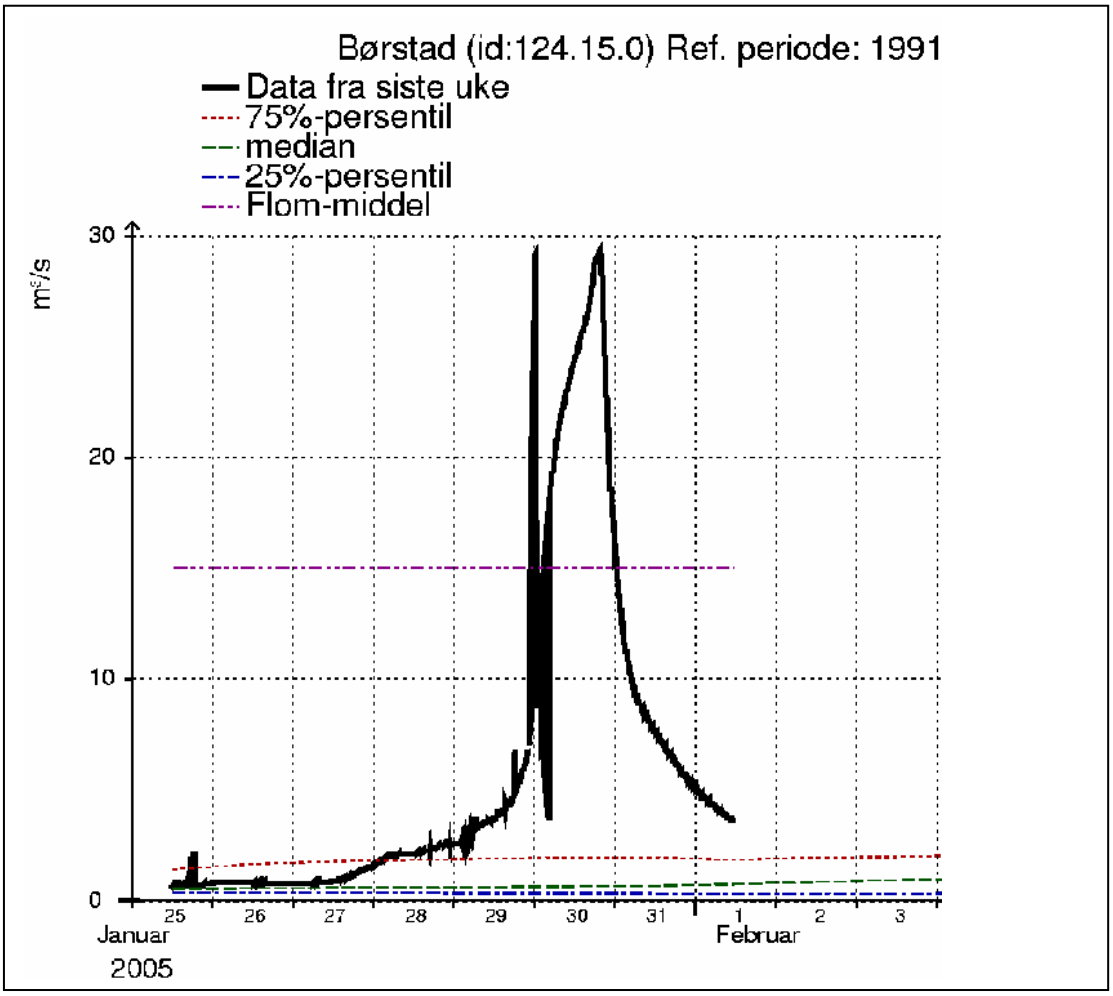



*Figur 5. Skisse som viser topografiske målepunkt fra forskjellige feltmålinger ved Nesheim i Dalåa. De forskjellige fargene viser oppmålte punkter ved de forskjellige oppmålingstidspunktene, og viser at enkelte områder er innmålt flere ganger.*

De topografiske forholdene og vannlinjer ved Øyvollen er målt inn med en Leica 307 totalstasjon. Vannføring er beregnet med målte vannhastigheter fra et Ott C2 mini-flygel. Dette er gjort i 1993, 2002, 2003 og 2004. Hver oppmåling har beskrevet bunn-forholdene på den ca 100 meter lange strekningen med ca 600 topografiske punkt for hver oppmåling. Alle disse målingene er benyttet som inngangsdata for den hydrau-liske modellen SSIIM med mål om å tilpasse modellen for å beskrive sedimenttransport og erosjon på de eksisterende habitatjusteringene. For Øyvollen ble det laget et beregningsnett i modellen SSIIM i tre dimensjoner basert på geometriske data fra feltmålingene. En benyttet den hydrologiske stasjonen Trøa, som ligger noen kilometer nedstrøms Øyvollen til å kalibrere vannføringen, samt å finne ut hvor store flommer som har påvirket stasjonen mellom innmålinger av topografi. En flomvannføring på 38 $m^3/s$ over ett døgn ble brukt i beregningene. Ruheten på bunnen ble funnet fra felt-dataene, der størrelsen på steinene var målt. Vannstanden ble beregnet med HEC-2, og denne ble brukt til å generere overflaten i beregningsnettet.

## Sedimenttransport i Gråelva

NVE har etablert en egen stasjon i Gråelva, som registrerer vannføring og vannkvalitet. Et eksempel på vannføringsmålinger er vist i figur 6, der det blant annet er registrert en stor vinterflom. Data fra denne stasjonen er benyttet for å verifisere egne målinger.




*Figur 6. Eksempel på vannføringsmåling i Gråelva*

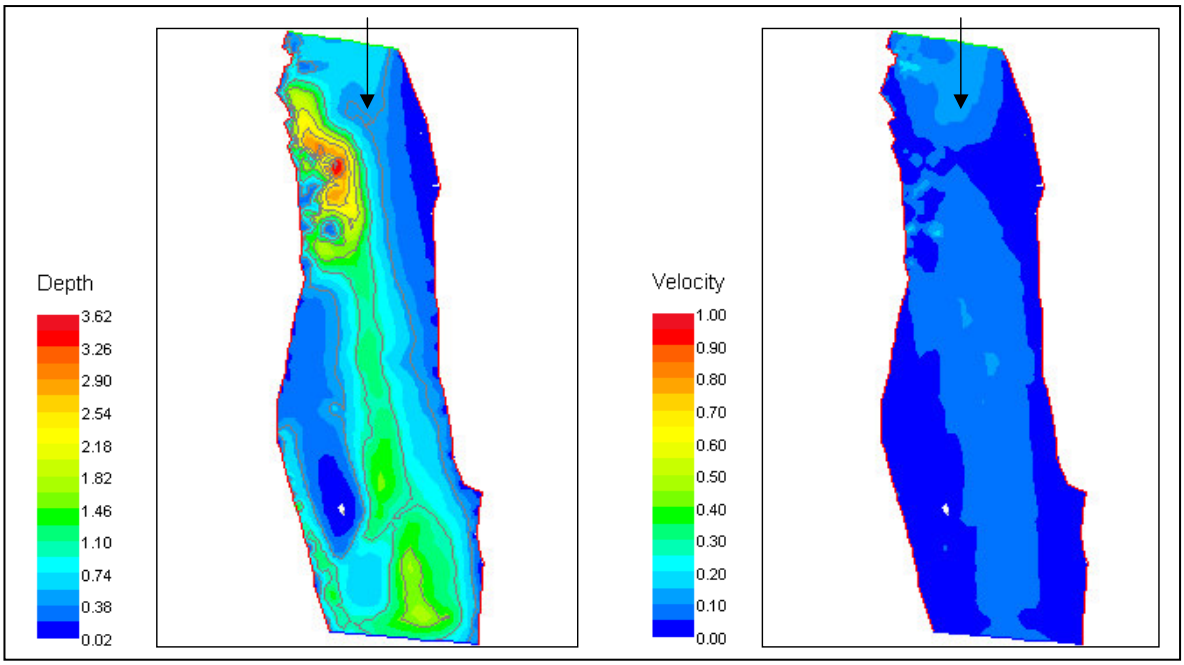
En stasjon i Gråelva, NVE stasjon 8, er overvåket siden det ble lagt ut gytegrus i 1999 og fram til 2004, med nøyaktig oppmåling av topografi minst en gang i året. Oppmålingen har bestått i å måle inn ca. 200 punkter av bunnen med en Leica 307 totalstasjon, samt at vannføring er beregnet med målte vannhastigheter fra et Ott C2 miniflygel. Disse oppmålingene har vært grunnlag for hydrauliske beregninger av den samme stasjonen med modellen SSIIM. Målet for beregningene var å analysere hvordan beregningene stemte overens med målinger av topografi før og etter flomhendelser. Det ble gjort beregninger av sedimenttransport, der en laget et beregningsnett basert på feltdata og en vannlinje beregnet med modellen HEC-2.

# 4. Resultater

## Modellering og visualisering av habitatjusteringer i Mandalselva

Av de fire strekningene som er studert i Mandalselva har vi i det følgende kapittel vist resultater fra karakteristiske problemstillinger som er studert i prosjektet.

Stasjonen Øvre Kleveland består av det som ser ut som en naturlig dypål med store grunne områder langs hver bredd. På den øvre delen finnes et dypt område, mens opp mot den øvre terskelen er det grunt og lite vandringsvennlig for voksen laks og ørret ved lav vannføring.

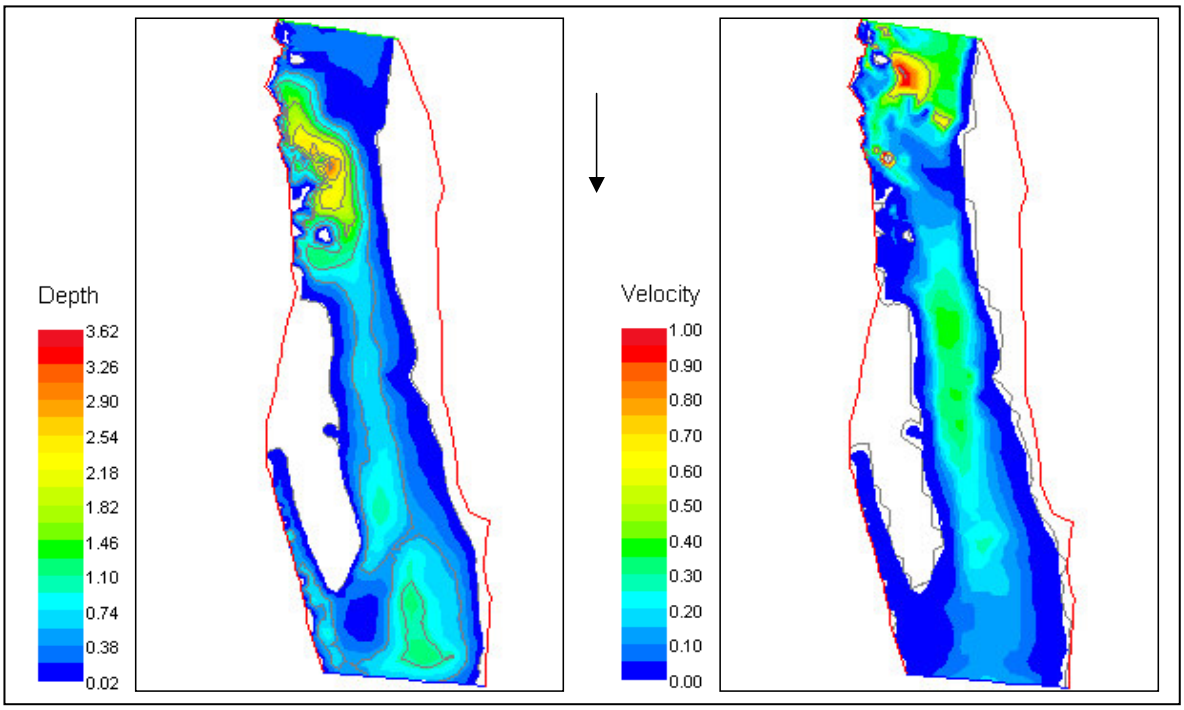



*Figur 14. Øvre Kleveland med dagens dybdeforhold til venstre og dagens vannhastighetsfordeling til høyre beregnet i River2D med en vannføring på 3 $m^3/s$*

Figur 14 viser topografien og strømningsforholdene på Øvre Kleveland. Vannhastighetene er svært lave som følge av lav vannføring, og fordi den nedre terskelen demmer opp et vannspeil på anslagsvis en halv meter. Substratet på strekningen består for en stor del av rund stein med en diameter på ca. 0,1 meter. Dersom vi tenker oss at den eksisterende dypålen fungerer som ei "elv i elva" vil det være fordelaktig å legge ut storstein eller steinansamlinger med jevne og ujevne mellomrom oppover i denne renna. Erfaringsmessig vil det lønne seg å bruke relativt stor stein, og heller grave dem litt ned i de eksisterende massene for at de ikke skal fjernes av naturlige påkjenninger.

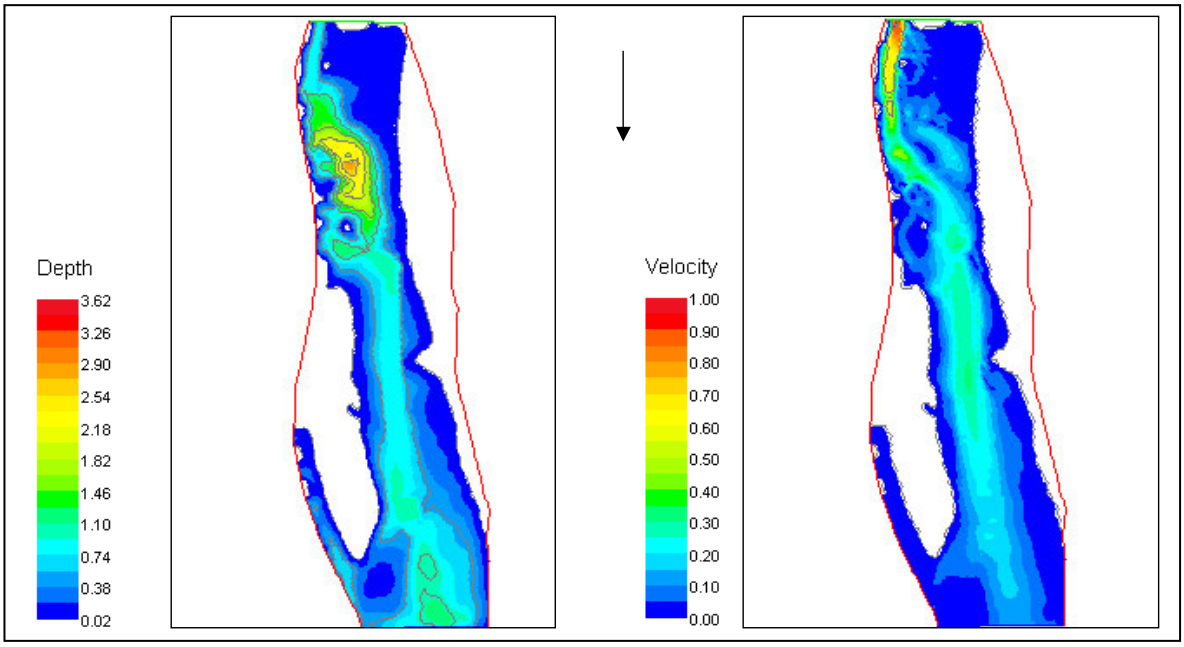
Siden Manflåvatn fungerer som et sandfang for denne delen av Mandalselva er det liten sannsynlighet for at slike tiltak ved Øvre Kleveland vil utsettes for sedimentasjon, og med andre ord vil tiltaket være stabilt.

For å bedre vandringsforholdene kan det se ut til at vi generelt bør få opp vann-hastighetene, og dermed også få mer turbulens og følgelig bedre hydraulisk skjul. Vi har derfor gjort en beregning med senking av vannivået i terskelbassenget med 0,5 meter. Dette er visualisert i figur 15.



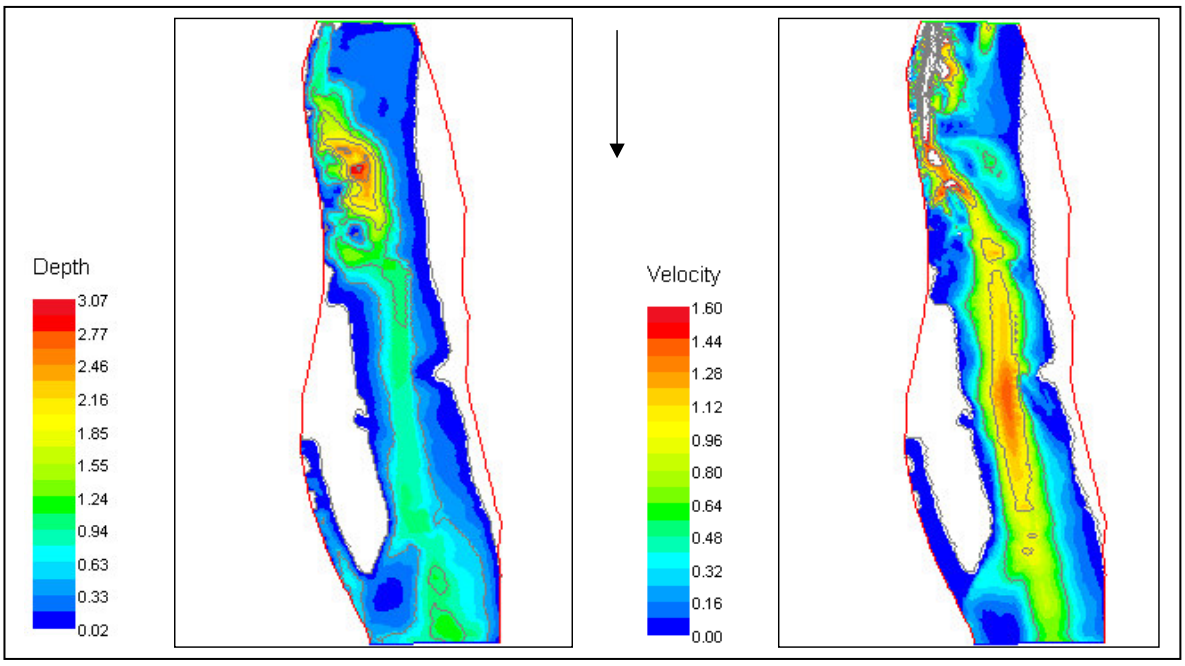

*Figur 15. Kart som viser vanndyp og vannhastigheter på Øvre Kleveland beregnet i River2D ved en vannføring på 3 $m^3/s$ etter en terskelsenking på 0,5 meter.*

Ved et slikt tiltak ser vi at det vanndekte arealet blir betydelig redusert, i motsetning til det som har vært tilfellet ved de to andre strekningene. Vi ser også at vannhastighetene har økt betydelig, og opp mot øvre terskel kan det se ut som det danner seg en slags ”steinrøys”, som ikke er ønskelig med tanke på at voksen fisk skal passere uhindret. Lokalt ser vi at det blir en liten, grunn ”terskel” på den nedre delen av strekningen. Dette skaper naturlig variasjon, men det bør vurderes om det lages en liten åpning i denne. For å forbedre de fysiske forholdene for vandring øverst på strekningen har vi gjort beregninger med en fordypning over mot den vestre bredden. Figur 16 visualiserer beregnet dyp- og hastighetsfordeling med en slik ”elv i elva” samt vannstands-reduksjon med 0,5 meter.




*Figur 16. Kart som viser vanndyp og vannhastigheter på Øvre Kleveland beregnet i River2D ved en vannføring på 3 $m^3/s$ etter en terskelsenking på 0,5 meter og "elv i elva" på den øvre delen av stasjonen.*

Vi ser at en slik fordypning vil samle vannet og skape en markant strømstråle på den øvre delen. Denne strålen peker mot det dype området som gir naturlig skjul for fisk, og vil forhåpentlig gi økt motivasjon for fisk til å passere den øvre terskelen. På figur 17 har vi forsøkt tilsvarende beregninger, men med en vannføring på 15 m3/s.

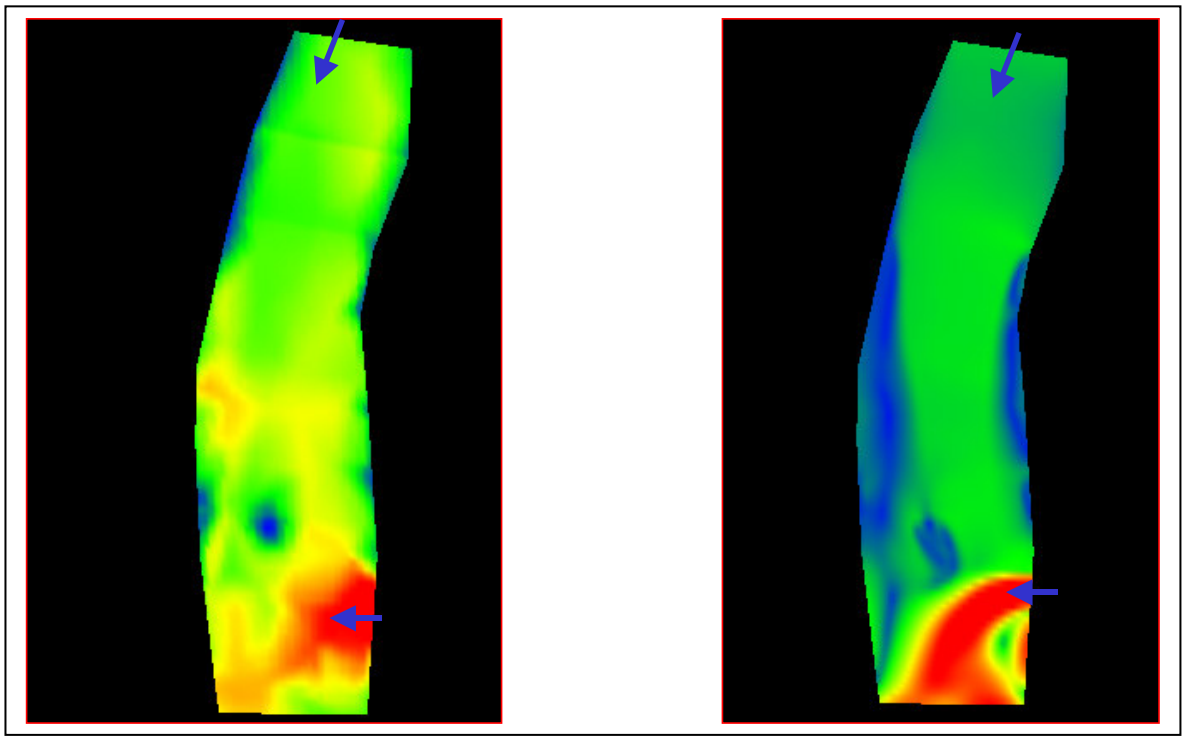



*Figur 17. Kart som viser vanndyp og vannhastigheter på Øvre Kleveland beregnet i River2D ved en vannføring på 15 $m^3/s$ etter en terskelsenking på 0,5 meter og "elv i elva" på den øvre delen av stasjonen.*

På figur 17 ser vi at store deler av strekningen får høye vannhastigheter, og med det relativt ensgraderte substratet som nevnt tidligere vil det på de grunneste delstrekningene igjen kunne være være gunstig med utlegging av storstein. Dette er ikke studert nærmere i prosjektet.

Tidligere undersøkelser har vist at tunnelutløpet ved Laudal representerer et problem med tanke på oppvandring av voksen laks (Thorstad og Heggberget, 1997 og Thorstad og Hårsaker 1998). Her kommer inntil 110 $m^3/s$ vann ut av tunnelen, mens kun 3 $m^3/s$ renner i den opprinnelige elven store deler av sommeren.

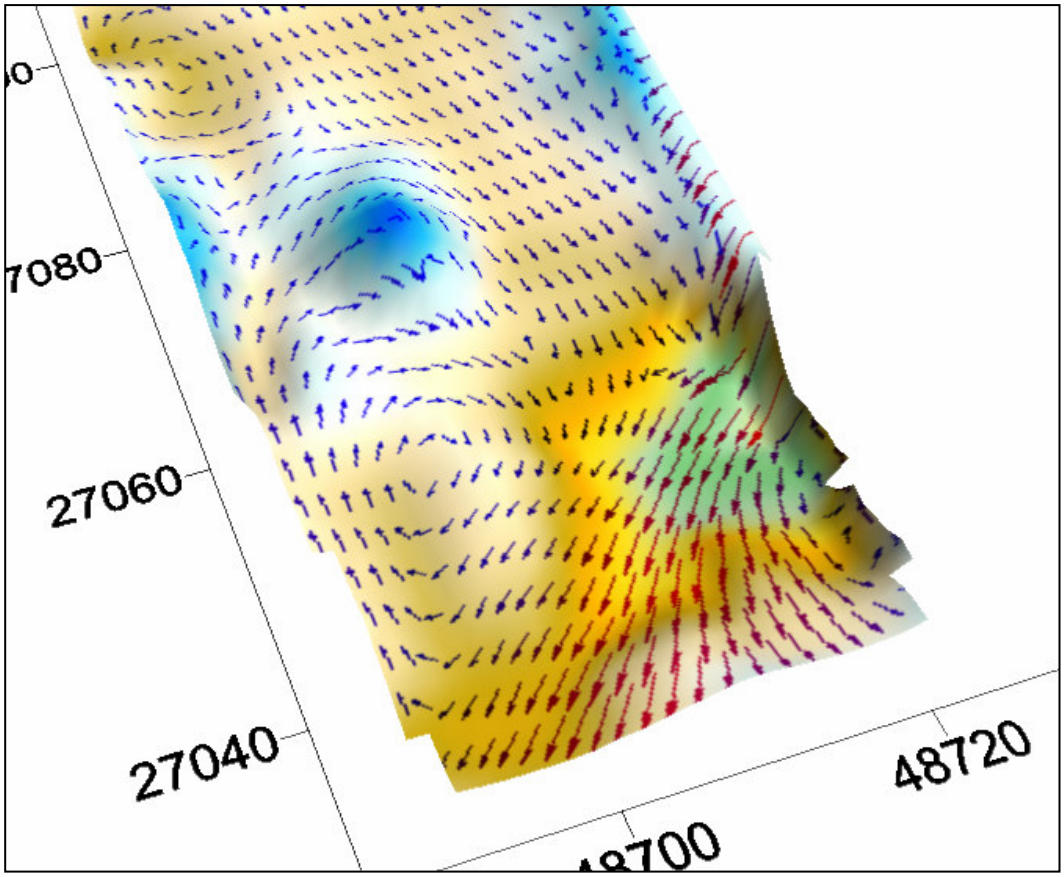
Figur 18 viser dybde- og hastighetsforholdene ved kraftverksutløpet, beregnet i strømningsmodellen SSIIM. Modellen er forenklet ved at produksjonsvannet kommer inn nesten vinkelrett på elva, men vi ser likevel den store dominansen dette har i strømningsmønsteret.



*Figur 18. Dybdeforhold (til venstre) og hastighetsfordeling ved utløpet av Laudal kraftverk. Beregningene er gjort med SSI med en vannføring på 5 $m^3/s$ i minstevannføringsløpet og 50 $m^3/s$ ut fra kraftverket. Rød farge angir høye verdier, dvs. stort dyp eller høy vannhastighet. Blått angir de laveste verdiene.*

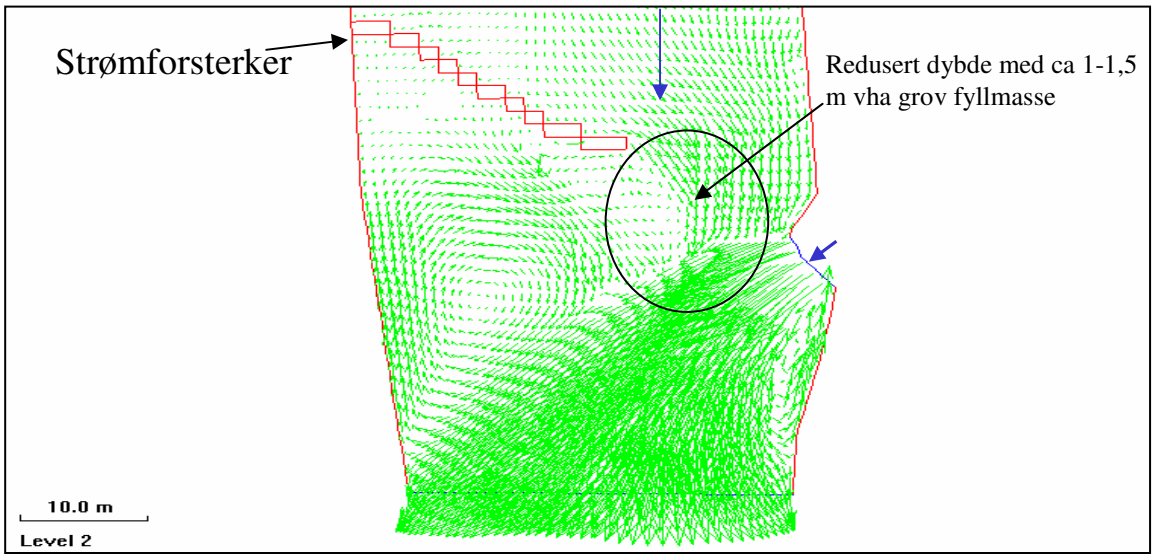
Det er vanskelig å tenke seg at denne situasjonen kan endres vesentlig uten fysiske tiltak. For regulanten er det naturlig å tenke seg løsninger med minst mulig tap av kraftproduksjon, dvs at det fortsatt er lite vann til rådighet for å lokke laksen opp elva. Vi har derfor sett på om det er mulig å konsentrere dette vannet mot fiskens standplass foran varegrinda etter samme prinsipp som utløpet av vann fra laksetrapper.

På figur 19 ser vi beregnede vannhastigheter ved tunnelutløpet med 5 $m^3/s$ vannføring i elva og 50 $m^3/s$ ut av tunnelen ved dagens forhold. Vi ser hvordan tunnelvannet dominerer, men på figur 18 kan vi også legge merke til det grunne partiet midt i elva rett oppstrøms utløpet. Dette området er allerede i dag med på å dreie vannet mot utløpet.




*Figur 19. Beregnede vannhastigheter i SSIIM ved dagens topografi ved Laudal med 5 $m^3/s$ i elva og 50 $m^3/s$ i tunnel.*

Vi har på bakgrunn av den beskrevne situasjonen gjort forsøk på å modellere bunn-topografien på en slik måte at elvevannet blir presset mot tunnelutløpet der laksen står og "stanger". Dette er deretter lagt inn i strømningsmodellen SSIIM. Endringene har gått ut på å konstruere en strømkonsentrator fra vestre bredd over gruntområdet. Deler av konstruksjonen, den østre delen, er dykket med et dyp på 1,0-1,5 meters dyp mindre enn det er i dag. Figur 20 viser området som er manipulert, med grønne hastighets-vektorer som viser beregnede vannhastigheter.



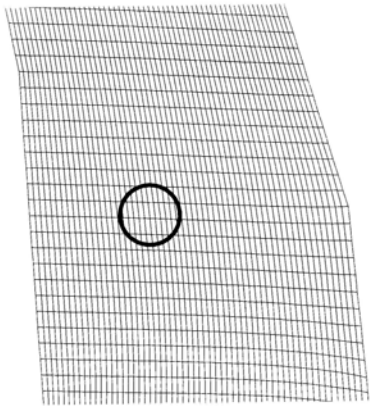

*Figur 20. Skisse som viser modellerte topografiendringer*

Resultatene fra beregningene i Mandalselva viser at senking av tersklene, etablering av dype renner samt utlegging av storstein i renna gjør vannhastighetsforholdene mer varierte. Ut fra de modellerte resultatene kan det ut fra et skjønnsmessig standpunkt se ut som om tersklene som oppvandrings-hindre får mindre negativ innvirkning, men her eksisterer det for lite kunnskap til å kunne si noe sikkert om laksens vandrings-motivasjon vil øke.

# Sedimenttransportberegninger

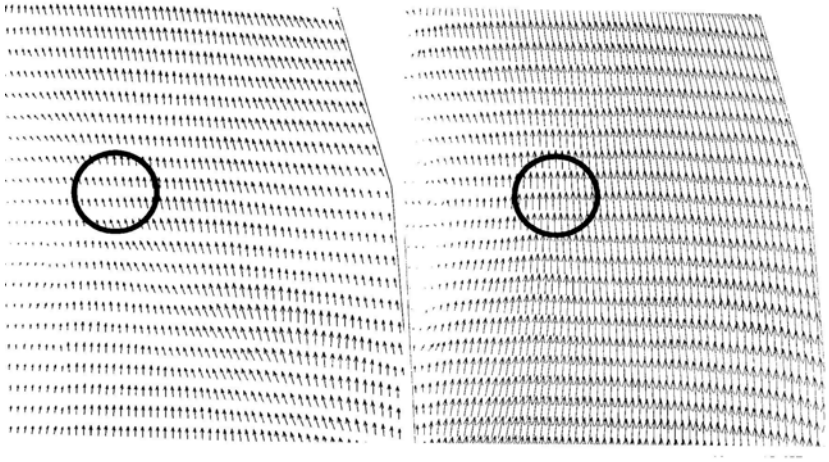
## Sedimentdeponering i habitatforbedrende tiltak i Dalåa ved Øyvollen

Den numeriske modellen ble testet på strekningen Øyvollen i Stjørdalselva (Olsen et al, 2004). På denne strekningen var det blitt utført habitatforbedrende tiltak. En kanal var gravd i elven, inkludert en kulp. Feltobservasjoner indikerte at det deponerte finkornede sedimenter i kulpen. Kornstørrelsen på sedimentene ble målt, og dataene ble brukt som input til den numeriske modellen. Det ble også gjort målinger av geometrien i elven, vannføringen under den største flommen som ble observert samt en estimert vannlinje. Gridet rundt deponeringsområdet er vist i figuren 21, der sirkelen markerer deponeringsområdet.



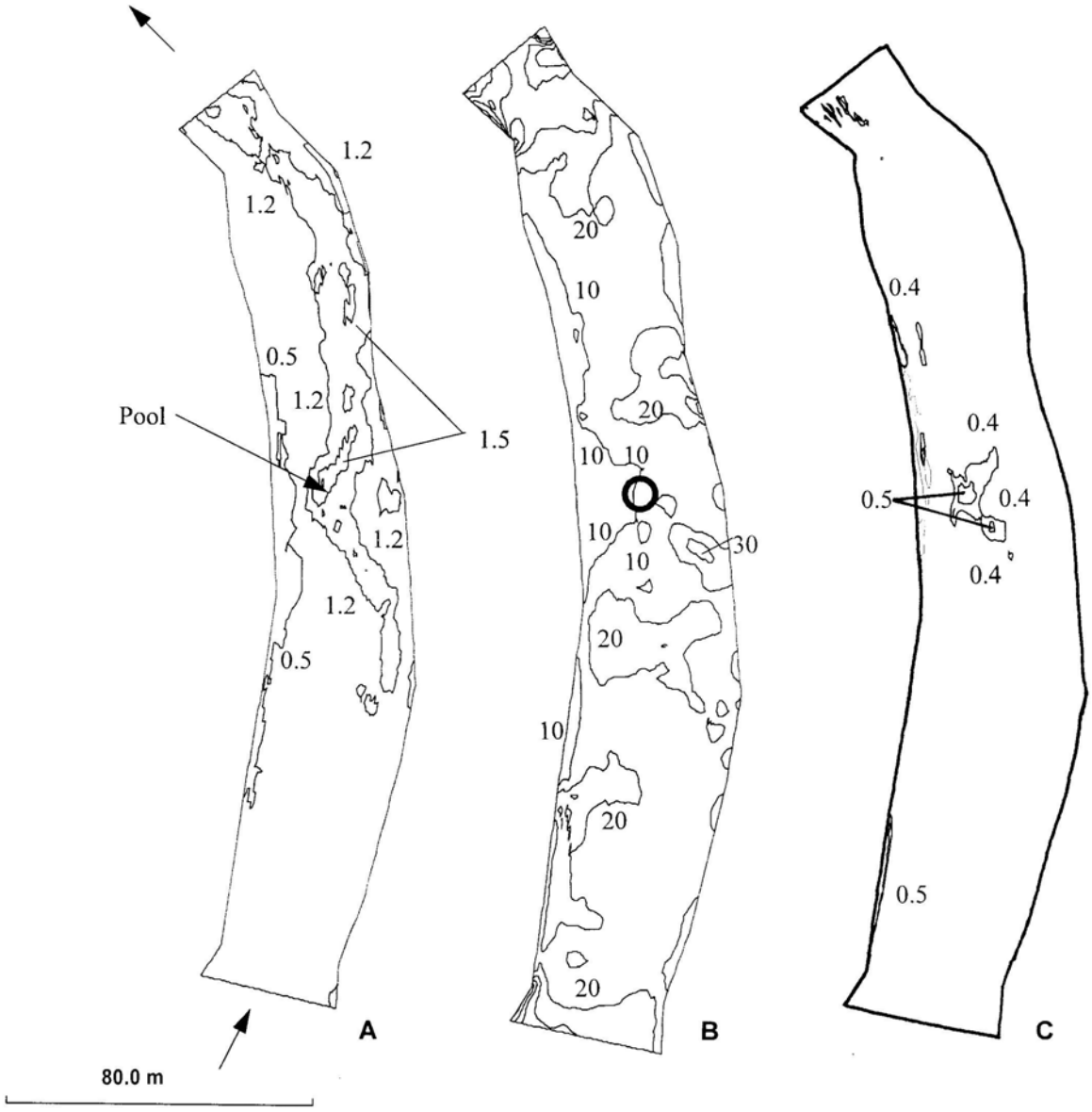
*Figur 21. Rutenett rundt deponeringsområdet ved Øyvollen*

Kulpen er laget i innersvingen av en sving i elven. Sekundærstrømninger i elva vil føre sedimentene mot innsiden av svingen og inn mot kulpen. Sekundærstrømmen vises i figuren 22, der venstre figur viser hastighetsvektorene ved bunnen og høyre figur viser hastighetsvektorene ved overflaten. Det at bunnvektorene peker mer mot venstre enn overflatevektorene viser sekundærstrømningen.



*Figur 22. Sekundærstrømmer langs bunnen til venstre og ved overflaten til høyre.*

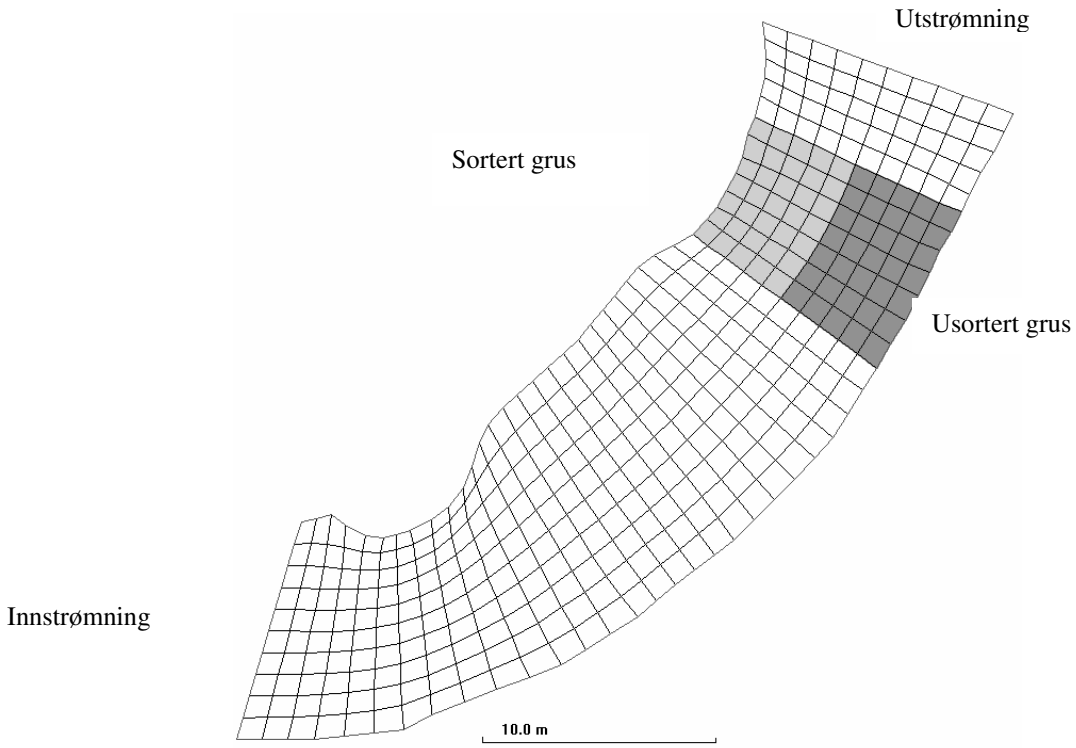
Figur 23 viser hele den modellerte strekningen sett ovenfra. Figuren til venstre viser et dybdekart der konturlinjene er gitt i meter. Den utgravde kanalen og kulpen vises. Figur i midten viser de beregnede skjærspenningene på bunnen i Pascal. Den beregnede skjærspenningen er mindre i kulpen enn ellers i elva. Dette betyr at det er større sjanse for deponering i dette området. Figuren til høyre viser de beregnede bunnforandringene i meter. Disse har maksimal verdi i kulpen, og dette samsvarer med feltobservasjonene. Den numeriske modellen har derfor klart å beregne den horisontale beliggenheten av de deponerte sedimentene. Feltobservasjonene gir imidlertid ikke noe nøyaktig størrelse på tykkelsen av deponeringen. Det er derfor ikke mulig å gi et kvantitativt estimat på hvor nøyaktig den numeriske modellen kan estimere sedimenttykkelsen.




*Figur 23. Dybdekart til venstre, beregnede skjærspenninger i midten og beregnede bunnforandringer til høyre på den modellerte strekningen ved Øyvollen.*

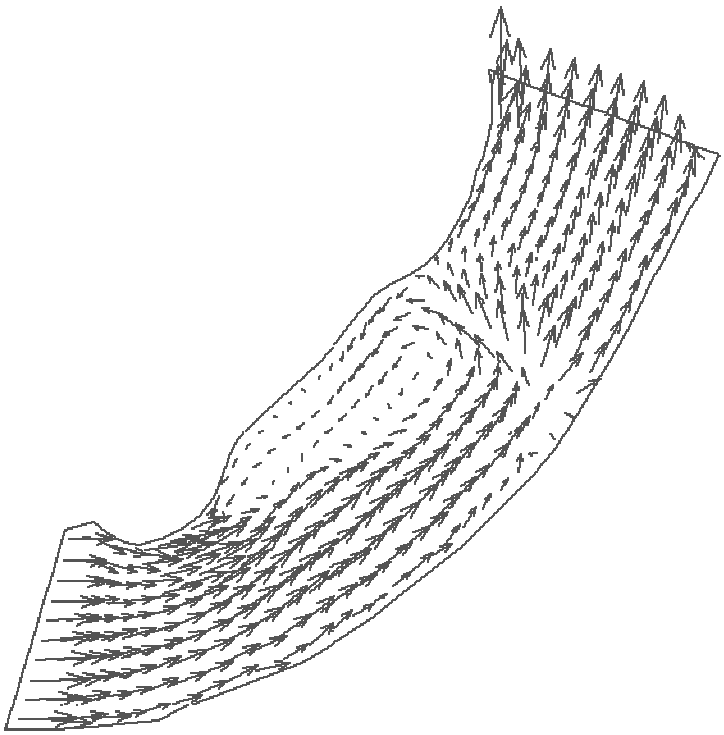
## Erosjon av gytegrus

Den numeriske modellen SSIIM ble også testet ut på en strekning i Gråelva, der det var lagt ut gytegrus (Olsen m. fl., 2005). To typer grus var lagt ut: sortert grus med relativt grovt materiale og usortert grus med mer finstoff. Den usorterte grusen var lagt i yttersvingen av strekningen, mens den sorterte grusen var lagt i innersvingen. Dette vises i figur 24, der også beregningsgridet er vist, sett ovenfra. Ut- og innstrømnings-områdene er også markert på figuren.



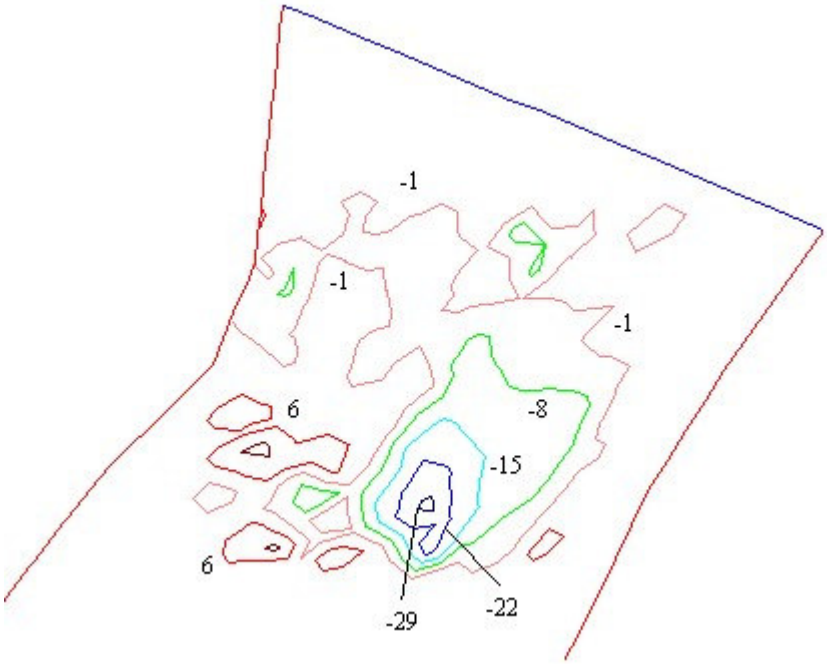

*Figur 24. Grusutlegging angitt i beregningsgridet i Gråelva.*

Figur 25 viser hastighetsvektorene langs bunnen av elva. Den numeriske modellen beregner en resirkulasjonssone i svingen.

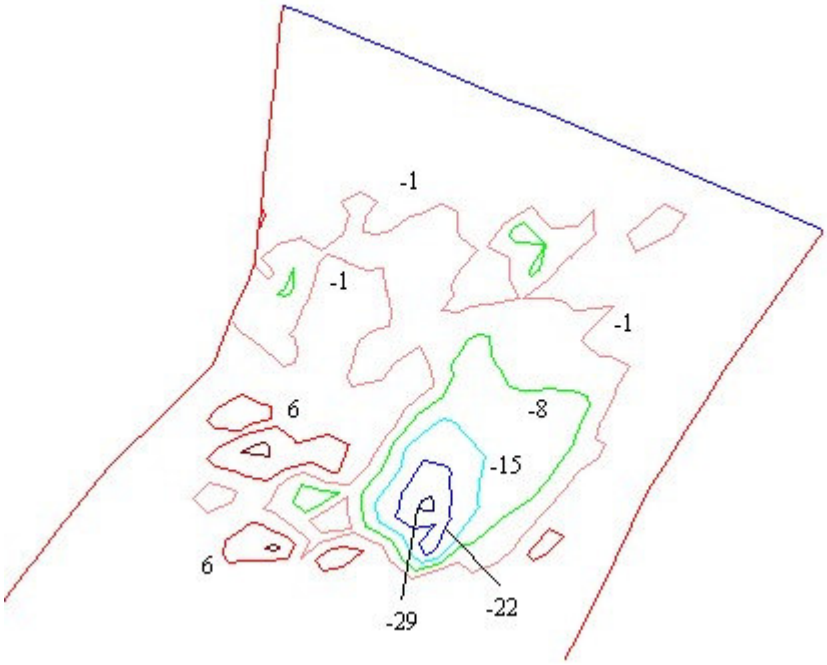


*Figur 25. Beregnede vannhastigheter langs bunnen.*

Bunnforandringene i elva ble også beregnet, og sammenlignet med feltmålingene. Dette er vist i de to figurene under. Figuren 26 viser målte bunnforandringer, mens figur 27 viser beregnede bunnforandringer. Verdiene er gitt som konturplott, der verdiene er i cm.




*Figur 26. Målte bunnforandringer (centimeter).*




*Figur 27. Beregnete bunnforandringer (centimeter).*

Sammenligninger mellom målte og beregnede bunnforandringer viser at den numeriske modellen klarer å beregne at erosjonen for det meste skjer i den usorterte grusen i yttersvingen. Maksimal erosjonsdybde og mengden erodert materiale er også rimelig godt beregnet. Imidlertid er den horisontale beliggenheten av den maksimale erosjonsdybden ikke helt godt beregnet. Variasjoner i input-parametre og forskjellige numeriske algoritmer gir omtrent det samme resultatet. En mulighet for avviket kan være unøyaktigheter i feltmålingene.

## Undersøkelser av habitatjusteringer i Dalåa ved Nesheim

Oppmålingene ved Nesheim i Dalåa i juli og november 2003 samt november 2004 etter gjennom-føring av tiltakene anbefalt av Harby m. fl. (2001) har vist at topografien stemmer godt med de planlagte tiltakene og at det har vært liten endring siden de ble utført. Markørsteinene som ble lagt ut har ikke flyttet seg nevneverdig og det ser ut til å være relativt liten bevegelse av bunnen her. Det har skjedd en marginal sedimentasjon av finstoff i den ene kunstige kulpen. Maksimumsvannføringen i 2003 og 2004 ved stasjonen Trøa oppstrøms Nesheim i Dalåa var henholdsvis 9,7 $m^3/s$ og 10,6 $m^3/s$. Maksimumsvannsføring ved denne stasjonen etter regulering i 1993 var 30,8 $m^3/s$ (1998). Gjennomsnitt av den årlige maksimumsvannføring (gjennomsnittlig årsflom) etter regulering er 19 $m^3/s$. De relativt lave vannføringene i observasjonsperioden gjør det vanskelig å si om tiltakene som er utført ved Nesheim vil være stabile også ved større påkjenninger.

Oppmåling og befaring under vinterforhold viser at det bygger seg opp is i strykene og at dette igjen medfører at vann renner andre veier enn om sommeren. Blant annet oversvømmes en deflektor slik at en del av elveleiet som var foreslått tørrlagt blir vanndekt. Tiltakene fungerer derfor ikke som planlagt under vinterforhold. Dette må man legge mer vekt på ved fremtidige restaureringstiltak.

# 5. Diskusjon og konklusjoner

Prosjektet har sett på metoder for å tilpasse fysiske tiltak for å forbedre vandrings-forholdene til voksen laks og ørret på fire delstrekninger av Mandalselva. Resultatene viser at arbeidsmetoden og teknikkene som er brukt er velegnet for å visualisere virkninger av fysiske endringer. Her er tradisjonelle og utprøvde datateknikker kombinert med visualiseringsverktøy for å se på fysisk restaurering i vassdrag. Spesielt er metodene godt egnet i sammenhenger der flere faggrupper og interesser ønsker å diskutere seg fram til løsninger, og hvor nye endringer kan foreslås på bakgrunn av det man ser fra de første forsøkene.

Biologiske undersøkelser har tidligere vist at habitatjusteringer kan gi gode resultater for laksefisk. Etterundersøkelser av utførte biotopjusteringer i Dalåa og Gråelva i Stjørdalsvassdraget har vist at flere av tiltakene har vært godt tilpasset de stedlige fysiske påkjenninger, mens enkelte av tiltakene har vært utsatt for enten erosjon og/ eller sedimentering. Ved framtidige habitatjusteringer er det viktig at disse utformes med basis i biologisk kunnskap i kombinasjon med vurdering av de fysiske forholdene ved hjelp av metoder som er beskrevet og utviklet i dette prosjektet. Metode-utviklingen vil være et sentralt arbeidsområde i tiden som kommer og trolig vil utviklingen gå parallelt med at flere prosjekter tar metodene i bruk og ser fordelene av å forutsi fysiske endringer i vassdrag.

Dette forskningsprosjektet har vist at tredimensjonale numeriske modeller er et viktig verktøy ved vurdering av sedimentering og erosjon i habitatforbedrende tiltak i en elv. Modellen SSIIM har blitt testet på to case, et med erosjon og et annet med sediment-deponering. I begge tilfellene har modellen gitt resultater som samsvarer med observa-sjoner i felten når det gjelder enkelte karakteristiske trekk ved bunnforandringene. Det har imidlertid vært vanskelig å finne et kvalitativt meget godt samsvar mellom størrelsen på observerte og beregnede maksimale bunnforandringer. Dette kan skyldes usikkerheter i feltmålingene. Videre forskning er nødvendige for å gi en bedre vurdering av nøyaktigheten til den numeriske modellen.

# 6. Referanser

Alfredsen, K. 1999. An object oriented framework for application development and integration in hydroinformatics. Doktor ingeniør thesis. Institute for hydraulic and environmental engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Alfredsen K., Bakken T.H. og Killingtveit, Å.(editors) 1995. The River System Simulator. User's Manual. SINTEF NHL report.

Arnekleiv, J.V. 1996. Effekt av habitatjusteringer på fisk i Dalåa. Kompendium fra Fiskesymposiet 1996, Trondheim, Norway. Energiforsyningens Fellesorganisasjon, EnFO. ISBN 82-436-0215-1.

Berger, H. M., Lamberg, A., Flemming, I.A., Hindar, K. og Fjeldstad, H.-P. 2001. Etablering av gyteområder for sjøaure og laks i Gråelva i Stjørdal i Nord-Trøndelag 1999-2000. – NINA Oppdragsmelding 678:1-27.

Bogen, J., Bønsnes, T. E. og Benjaminsen, H. 1997. Suldalslågen, sedimentkilder og sedimenttransport. Lakseforsterkningsprosjektet i Suldalslågen. Fase II. Rapport nr. 35. Statkraft Engineering.

Fjeldstad, H.-P. 2001. Numerical modelling tools for predicting physical habitat adjustments. In: T. Taugbøl and J.H L'Abèe-Lund (red.). Physical habitat restoration in canalised watercourses - possibilities and constraints. NVE Report 7-2001.

Fjeldstad, H.-P., Stickler M.,og Ugedal O. 2004. Modellering av habitatforbedrende tiltak i Mandalselva. SINTEF rapport TR A6058.

Fjellheim, A. and Johnsen, B.O. 2001. Experiences from stocking salmonids fry and fingerlings in Norway. Nordic Journal of Freshwater Research 75: 20-36.

Harby, A. 2001. Simulering av habitatforbedrende tiltak i Dalåa ved Nesheim, Nord-Trøndelag. SINTEF Energiforskning rapport TR A5485.

Harby, A., Alfredsen, K., Erlandsen, A.H., Halleraker, J.H., Heggenes, J., Killingtveit, A., Lingaas, O., Saltveit, S.J. and Vaskinn, K.A. 1999. Methods and applications of fish habitat modelling in Norway. *Presented* at 3rd International Symposium on Ecohydraulics, Salt Lake City, USA.

Harby A., Alfredsen K., Bakken T.H. og Sæther B. 1997. Videreutvikling av Vassdragssimulatoren til et brukervennlig system på PC. SINTEF rapport STF22 F97409, Trondheim, Norway.

Harby, A. og Bakken, T.H. 1996. Habitatjusteringer i Dalåa ved bruk av Vassdrags-simulatoren. Kompendium fra Fiskesymposiet 1996, Trondheim, Norway. Energiforsyningens Fellesorganisasjon, EnFO. ISBN 82-436-0215-1.

Harby A. and Heggenes J. 1995. HABITAT User's Manual. Alfredsen K., Bakken T.H. og Killingtveit (editors).

Harby A. og Arnekleiv J.V. 1994. Biotope improvement analysis in the river Dalåa with the River System Simulator. Proceedings, IAHR 1st International Symposium on Habitat Hydraulics, Trondheim 18-20 August 1994: 513-520.

Harby, A., Fjeldstad, H.P. og Lamberg, A. 2001. Økologisk forbedring av elveløp i Mandalselva. Resultater pr 2001-06-11. Åpent notat fra SINTEF Energiforskning.

Hardy, T.B. 1998. The future of habitat modeling and instream flow assessment techniques. Regulated Rivers 14: 405-420.

Heggenes, J. 1996. Habitat selection by Brown trout (*Salmo trutta*) and young Atlantic salmon (*Salmo salar*) in streams: Static and dynamic modelling. Regulated Rivers 12:155-170.

Heggenes, J. og Harby, A. 1996. Skjønnmessig vurdering av habitatforhold for laksunger og ørret i hele Suldalslågen. Lakseforsterkningsprosjektet i Suldalslågen, Fase II. Rapport nr. 22. 17 s.

Heggenes, J. og Fjeldstad, H.P. 1999. Habitatvalg til laksunger og ørret i Stjørdalselva ved Gudå, Nord-Trøndelag, og modellerte konsekvenser av varierende vannføring ved lav temperatur. Rapport 191, Laboratorium for ferskvannsøkologi og innlandsfiske (LFI), Universitetet i Oslo, Oslo.

Heggenes, J., Krog, O.M..W., Lindaas, O.R., Dokk, J.G. og Bremnes, T. 1993. Homeostatic behavioural responses in a changing environment: Brown trout (S*almo trutta*) become nocturnal during winter. *Journal of Animal Ecology* 62: 295-308.

Heggenes, J. 1991. Habitat utilization and preferences in brown trout (S*almo trutta*) and juvenile Atlantic salmon (*salmo salar*) in streams. Dr. philos. thesis. University of Oslo, Oslo. 319 p.

Olsen, N.R.B. (2002). http://www.bygg.ntnu.no/~nruther/nesheim/.

Olsen, N.R.B.(2003). http://www.bygg.ntnu.no/ivb/forskn/prosjekt/nils-r/oyvollen/.

Olsen, N.R.B. (2004) “Hydroinformatics fluvial hydraulics and limnology”, Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU. (Kan lastes ned fra http://www.ntnu.no/~nilsol/cfd).

Olsen, N.R.B., Pegg I., Alfredsen K., Fergus T. og Fjeldstad H.-P. 2004. ”3D CFD modelling of sediment deposition in habitat improvement structures”, 5th International Symposium on Ecohydraulics, Madrid, Spania.

Olsen, N.R.B., Pegg I., Molliex, J., Berger, H. M. og Fjeldstad, H-P. 2005 ”3D CFD modelling of sediment erosion in habitat improvement gravel”, Blir sendt til den 31 kongressen til International Association for Hydraulic Engineering and Research in Seoul, Korea.

Olsen, N. R. B. og Stokseth, S. 1995 "Three-dimensional numerical modeling of water flow in a river with large bed roughness". IAHR Journal of Hydraulic Research 33: 571-582.

Poff, N.L., Allan, D., Bain, M., Karr, J.R., Prestegaard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C. 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. BioScience 47 : 769-784.

Richter, B. D., Baumgartner, J.V., Braun, D.P., Powell, J. 1998. "A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network." Regulated Rivers: Research and Management 14: 329-340.

Thorstad, E.B. og Heggberget, T. G. 1997. Vandring hos radiomerket laks i Mandalselva i forhold til minstevannføring, lokkeflommer, terskler og kalking. Oppdragsmelding 470, NINA.

Thorstad, E.B. og Hårsaker, K. 1998. Vandring hos radiomerket laks i Mandalselva i forhold til minstevannføring, lokkeflommer, terskler og kalking – videreføring av tidligere undersøkelser. Oppdragsmelding 541, NINA.

University of Alberta, Canada. http://www.river2d.ualberta.ca/.

Wersland, S. E. 2003. "Utvikling av lavnivå interaktiv vassdragseditor". Diplomoppgave ved institutt for vann og miljøteknikk, NTNU.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

**Utgitt i rapportserien Miljøbasert vannføring:**

Nr. 1-02 Thomas Skaugen, Marit Astrup, Zelalem Mengistu, Bjarne Krokli: Lavvannføring - estimering og konsesjonsgrunnlag (28 s.)

Nr. 1-03 Eva B. Thorstad, Finn Økland, Nils Arne Hvidsten, Peder Fiske, Kim Aarestrup: Oppvandring av laks i forhold til redusert vannføring og lokkeflommer i regulerte vassdrag (51 s.)

Nr. 2-03 Per Ivar Bergan, Carsten S. Jensen, Finn R. Gravem, Jan Henning L'Abée-Lund, Anders Lamberg, Peder Fiske: Krav til vannføring og temperatur for oppvandring av laks og sjøørret (63 s.)

Nr. 1-04 Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Panagiotis Dimakis: Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z) Rapport 1. Formål og metoder (67 s.)

Nr. 2-04 Hervé Colleuille, Tor Simon Pedersen, Panagiotis Dimakis, Bjørn Frengstad: Elv og grunnvann. Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 2. Materiale og feltmålinger (113 s.)

Nr. 3-04 Hervé Colleuille, Wai Kwok Wong, Panagiotis Dimakis: Analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z). Rapport 3. Grunnvannsmodellering (114 s.)

Nr. 4-04 Bjørn Ove Johnsen og Nils Arne Hvidsten: Krav til vannføring i sterkt regulerte smålaksvassdrag (68 s.)

Nr. 5-04 Torulv Tjomsland: Abiotiske effekter i reguleringsmagasiner. Temperatur- og isforhold i Follsjøen og i vassdraget nedenfor (25 s.)

Nr. 6-04 Svein Jakob Saltveit, Peder Fiske, Åge Brabrand, Harald Sægrov, Ola Ugedal: Bruk av fangst statistikk for å belyse effekt av endret vannføring på fisk (46 s.)

Nr. 7-04 Peder Fiske, Arne Johan Jensen: Mot en modell for sammenhengen mellom vannføring og fiskeproduksjon. Fase 1 - Evaluering av presmoltsammenhenger (30 s.)

Nr. 1-05 Hans-Petter Fjeldstad, Tharan Fergus, Nils Reidar Bøe Olsen: Habitatforbedrende tiltak - geomorfologiske prosesser, sedimenttransport, erosjon og simulering av optimale forhold for fisk (34 s.)