

Sluttrapport for NFR prosjekt 191035

# **Numerisk modellering av sedimenttransport i vannkraftreservoarer**

Nils Reidar B. Olsen

Koblenz/Trondheim April 2013

## Populærvitenskaplig sammendrag

Sedimenter er små partikler som sand og leire. De blir transportert med elvene i varierende mengder. Spesielt i tropiske land kan konsentrasjonene bli svært høye. Når en bygger et vannkraftreservoar i slike land kan partiklene sedimentere på bunnen og fylle opp magasinene. Verdien av et reservoar er en funksjon av volumet, slik at sedimenteringen har store økonomiske konsekvenser. Det er derfor ønskelig å kunne beregne hvor mye av sedimentene som blir transportert gjennom reservoaret og hvor mye som deponeres.

Vannvolumet i et reservoar vil være fordelt på forskjellige høyder. Vannstanden i reservoaret vil variere over tid, og vannet i enkelte vanninnsjøer vil derfor være nyttigere enn andre nivåer. Det er derfor viktig å kunne beregne hvor i reservoaret sedimenteringen skjer, og dermed de økonomiske konsekvensene av det tapte volumet. I dette prosjektet har vi videreutviklet tredimensjonale numeriske modeller for å beregne deponeringen.

Den vanligste måten å fjerne sedimentene fra reservoarerne er å spyle de ut med friskeilsspyling. Denne metoden forutsetter at en har store luker i dammen. Når en åpner disse vil vannnivået i reservoaret gå ned og vannhastigheten øker. Dette fører til erosjon av sedimentene, som da blir spylt ut nedenfor dammen. En av målene med prosjektet vårt har vært å forbedre de numeriske modellene for spyleprosessen. Et dataprogram som kan simulere spylingen korrekt vil kunne brukes til å si noe om hvor effektiv spylingen vil være. Dette vil være viktig når reservoareieren bestemmer seg for om spyling skal foregå eller ikke. Spyling kan også gjøres med forskjellige vannføringer og lukeåpninger. Et fungerende dataprogram for spylingen vil være nyttig når dammeieren tar disse beslutningene.

I forskningsprosjektet har vi videreutviklet dataprogrammer som er nyttige for beregning av sedimenttransport i reservoarer. En av algoritmene beregner hvordan det frie vannspeilet forandrer seg over tid. Andre algoritmer beskriver sedimenttransportprosessene, for eksempel transportkapasiteten av partiklene. Det er også gjort mye arbeid med samling av felldata for verifisering og testing av dataprogrammet. Dette er gjort i Bodendorf reservoaret i Østerrike, samt i Angostura reservoaret i Costa Rica. Uttestingen har vist at programmet simulerer sedimentdeponering rimelig bra, uavhengig av kalibreringsparametre. Spyleprosessen er det vanskeligere å modellere. Ved kalibrering er det mulig å få et utspylt sedimentvolum som stemmer med observasjonene, men spylekanalene er noe smale i forhold til observasjonene. Effekter av sekundærstrømmer er også sterkere i den numeriske modellen enn observert i felten.

En doktorstudent, Stefan Haun, har arbeidet på prosjektet og tatt sin doktorgrad i denne forbindelse. Vi har også hatt tre MSc studenter som har tatt sin oppgave på Angostura prosjektet i Costa Rica. Prosjektet har hatt samarbeide med ICE kraftselskapet i Costa Rica, samt universitetet i Graz, Østerrike. Det er publisert 4 artikler i peer-reviewed internasjonale tidsskrift, og 7 internasjonale konferanseartikler med peer review. Ytterligere en artikkel er godkjent og en annen er under vurdering til internasjonale tidsskrift med peer review ordning.

Dataprogrammet vi har brukt kan lastes ned gratis fra web-siden: <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssim>. Det ligger også resultater fra arbeidet vårt på web-siden <http://folk.ntnu.no/nilsol/cases/angostura>. På denne siden ligger også PDF filer med de tre hovedoppgavene som har vært gjort på prosjektet, samt animasjoner av spyleprosessen.

## 1. Introduksjon

Dette prosjektet startet høsten 2009 med ansettelsen av Stefan Haun som doktorstipendiat. Han har vært lønnet av prosjektet i tre år, og disputerte høsten 2012. Det har ikke vært noen forsinkelser på prosjektet, men vi har fått noen måneders utsettelse med innlevering av sluttrapporten.

I tillegg til Stefan Haun har fire MSc studenter arbeidet på prosjektet: Lisa Hoven, Sigurd Løvfall, Halvor Kjærås og Laura Lizano. Studentene har arbeidet med feltmålinger og/eller numeriske beregninger.

I denne rapporten vil først de numeriske algoritmene bli beskrevet i Kapittel 2. Deretter vil en ta for seg de forskjellige prosjektene der datamodellen har vært testet ut, inkludert feltarbeidet som er gjort i denne forbindelse.

Programmet vi har brukt heter SSIIM 2. Til hjelp for de som leser denne rapporten og skal bruke programmet videre, har vi enkelte steder angitt hvilke data sett i input-filen *control* som en kan bruke for å benytte de nye algoritmene.



*Feltarbeide med LISST instrumentet i Angostura reservoaret, Costa Rica.*

## 2. Numeriske algoritmer

Dataprogrammet som er benyttet bygger på løsning av Navier-Stokes ligninger i tre dimensjoner på et ikke-ortogonalt ustrukturert grid. Turbulens løses med k-epsilon modellen, og trykket beregnes med SIMPLE metoden. Sedimenttransporten beregnes ved å løse en konveksjons-difusjonsligning for konsentrasjonen av partikler. Empiriske formler brukes for å bestemme erosjonen. Beregningene er tidsavhengige, og en kan derved bestemme hvordan bunnen av reservoaret forandrer seg over tid. Dette gjelder både for erosjon og deponering.

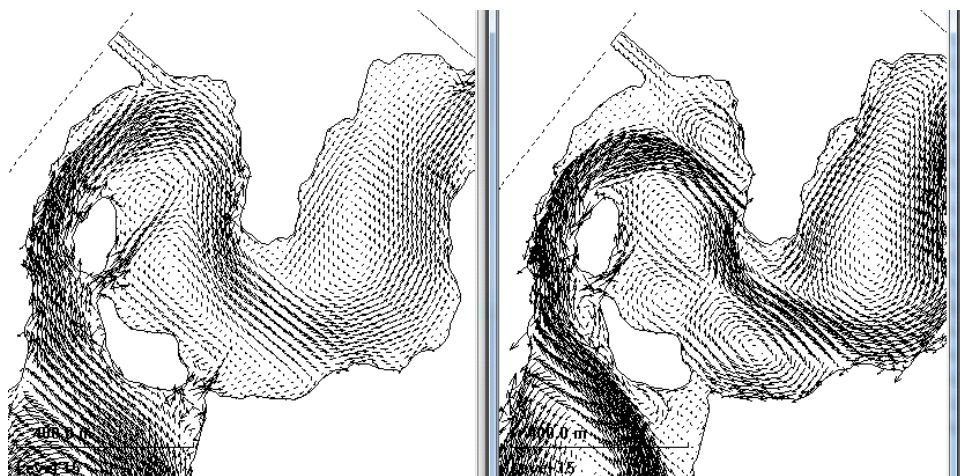
I reservoaret vil vannstanden variere over tid. Spesielt under spyling vil en ha en ekstrem vannstand der mesteparten av reservoaret er tørket opp. For å modellere dette brukes et grid som forandrer seg over tid, både i vertikal og horisontal retning. Celler fjernes der en har opptørking av reservoaret, og legges til der en får oppfylling. Antall celler i gridet vil da forandre seg under en simulering.

De numeriske algoritmene for løsning av Navier-Stokes ligninger er implisitte, noe som gjør at en kan velge å bruke et relativt langt tidsskritt. Dette er en fordel mhp regnetid. En kan modellere reservoardeponering over et år på en PC med en regnetid på under ett døgn. Men et problem er å finne en algoritme for bestemmelse av det frie vannspeilet som også kan brukes på relativt lange tidsskritt. Vanligvis vil vannspeilberegningen bestemmes av Courant tallet, som gir et kort tidsskritt. I prosjektet har vi arbeidet med implisitte vannspeilberegninger, og kommet frem til brukbare algoritmer for lange tidsskritt (Haun og Olsen, 2012b). Metoden er basert på differensialet av sammenhengen mellom trykk og vertikal distanse. Koden i SSIIM 2 er F 36 7.

Det er også arbeidet videre med algoritmer for sedimenttransport på en hellende skråning. Partiklene som beveger seg langs en skråning vil ikke følge retningen til vannstrømmen nær bunnen. Det eksisterer formler for avviket mellom disse to retningene. Enkelte av disse formelene er inkludert i vår modell. Metoden til Dey er kodet som F 182 5 i SSIIM 2, og metoden til Lane er kodet som F 182 7. Disse metodene gav tidligere gode resultater for modellering av lokalerosjon i kanaler.

Vi har også implementert to nye formler for sedimenttransport i programmet: Wu's formel og Mayer-Peter & Müllers (MPM) formel. Wu's formel har tidligere gitt gode resultater for Donau elven. MPM formelen er ofte brukt for bratte elver med grovere sedimentmateriale. Det er tenkt at dette kan være aktuelt for reservoarer i Østerrike. Modellene er kodet i SSIIM 2 som F 84 3 (Wu) og F 84 5 (MPM).

*Figurene til høyre viser hastighetsvektorer i Angostura reservoaret beregnet med et første ordens (venstre) og andre ordens (høyre) diskretiseringskjema.*



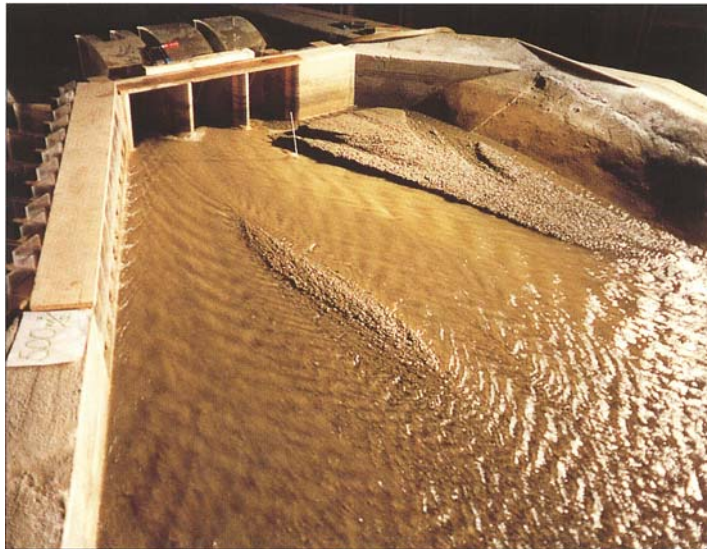
Vårt arbeide med Angostura modelleringen viste at resultatene var avhengige av diskretiseringsmetoden for de konvekterive leddene i Navier-Stokes ligningene. Vi har derfor implementert en rekke forskjellige høyere ordens metoder, blant de som er mest omtalt i litteraturen: QUICK, Cubic Upwind, SMART, H-QUICK, van Leer, Superbee og Minmod. Dette er kodet i K 6 data settet i SSIIM 2.

En ny metode for bestemmelse av ruhet er utviklet. Vanligvis vil ruheten i modellen enten måtte gies inn av brukeren i en kalibreringsprosedyre. Det finnes også formler for sammenhengen mellom bunnmaterialets størrelse og ruheten. Den nye metoden bygger på de målte verdiene av bunnen av reservoaret. Ved sonarmålingenene kan det være flere punkter innenfor hver bunncelle. Det går an å regne ut standardavviket mellom disse og bruke dette som et mål på bunnuheten. Parametrene for denne algoritmen i SSIIM 2 er F 2 K og F 295.

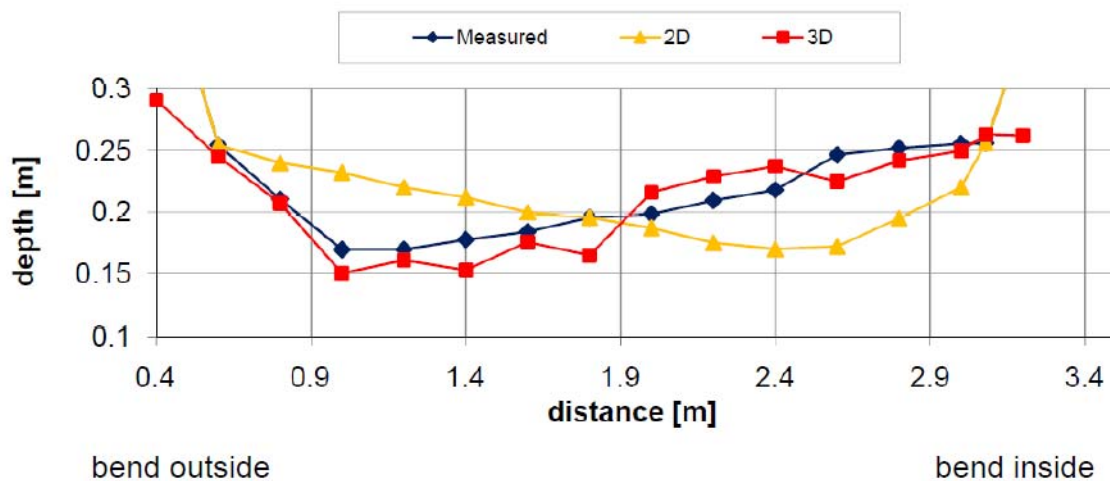
### 3. Kali Gandaki reservoaret

Kali Gandaki reservoaret ligger i Nepal. På 1990-tallet ble det foretatt en fysisk modellstudie av resevoaret ved SINTEF-NHL. Det ble her modellert utspyling av sedimenter fra reservoaret. Dataene fra denne studien har vært brukt til å teste vår numeriske modell for spyleprosessen. Spesielt algoritmene for fritt vannspeil har blitt uttestet med denne modellen.

Fotografiet til høyre er fra den fysiske modellstudien av Kali Gandaki reservoaret som ble foretatt ved SINTEF-NHL. Bildet viser nedstrøms område med spylelukene.  
Foto: SINTEF.



Reservoaret ligger i en sving i Kali Gandaki elven. Dette faktumet gjør reservoaret meget interessant for vårt formål, i og med at vi vil kunne se om den numeriske modeller predikerer korrekte bunnforandringer i svinger. Her vil sekundærstrømninger oppstå og disse vil igjen påvirke erosjonen og bunntopografien etter spylingen. Våre resultater viser at en todimensjonal modell ikke klarer å beregne bunntopografien i svingen korrekt. Den todimensjonale modellen gir at dypeste område blir på innsiden av svingen, mens observasjonene fra den fysiske modellen og resultatene fra den tredimensjonale modellen gir at den største erosjonen skjer i yttersvingen. Dette stemmer også med klassisk teori og observasjoner fra naturlige elver.



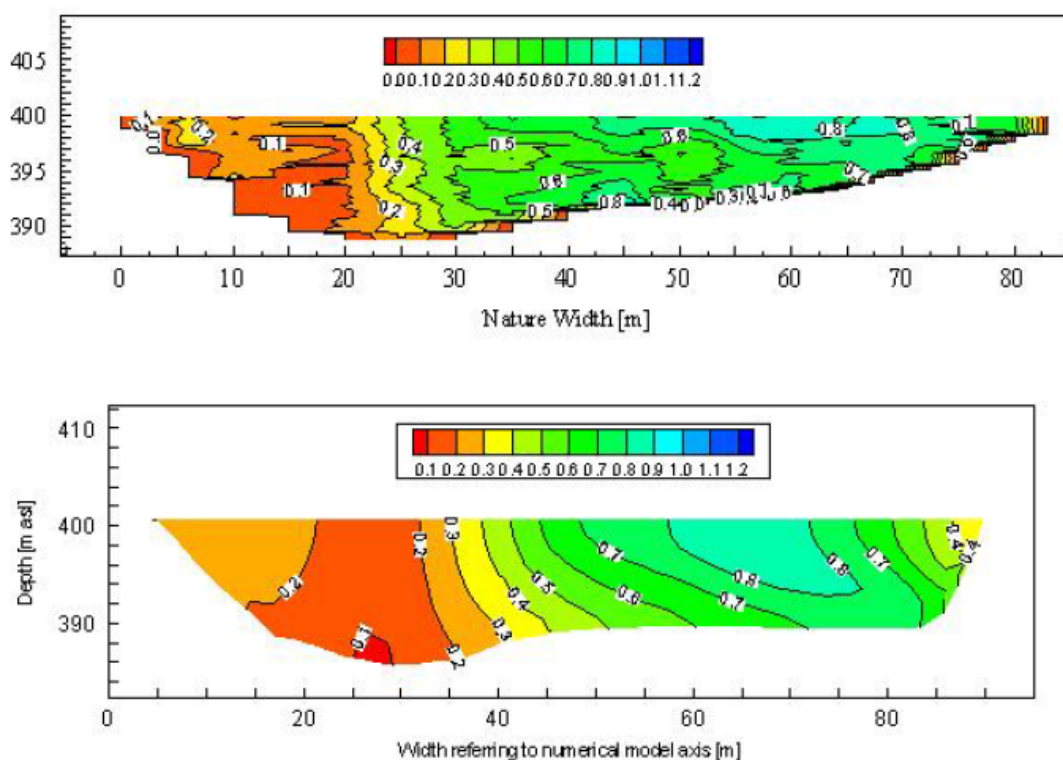
Figuren over viser et tverrprofil i reservoaret etter spylingen. Målte verdier er fra den fysiske modellen. Opprinnelig bunnivå før spylingen var på 0.28 meter i den fysiske modellen, og horisontalt. Vi ser at utspytt volum blir omtrent riktig både for en 2D og en 3D beregning. Men den tredimensjonale modellen beregner at den største dybden blir i yttersvingen.

Beregningene fra Kali Gandaki er publisert av Haun og Olsen (2012b).

## 4. Reservoarer i Østerrike

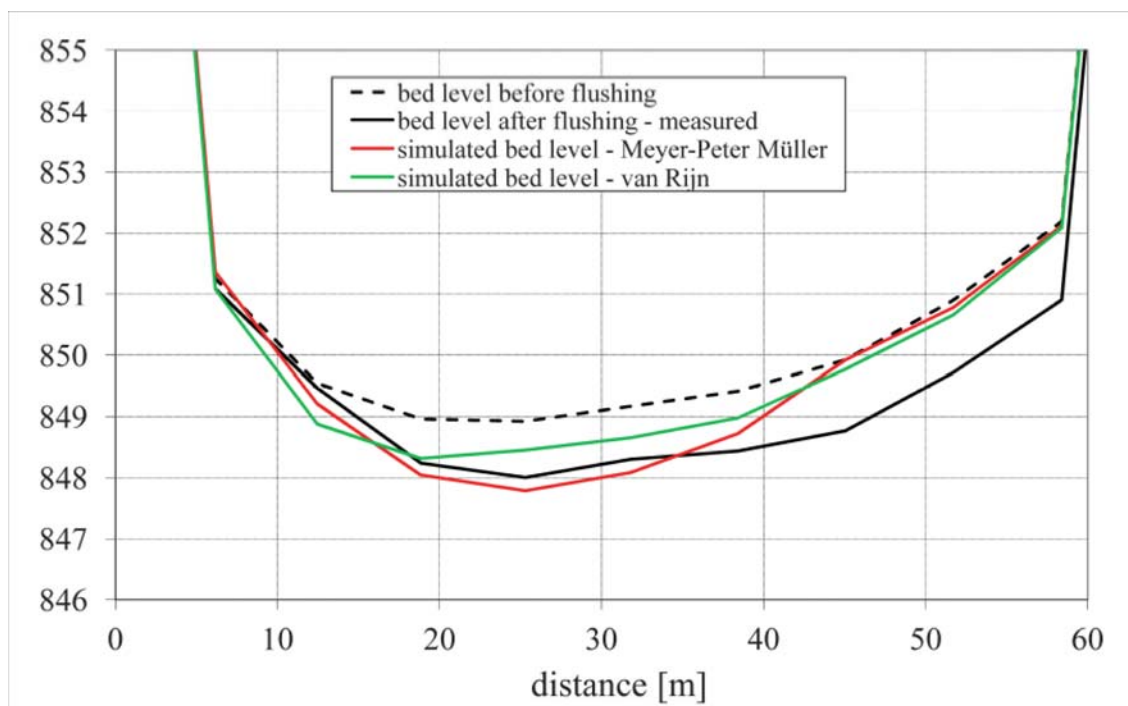
I samarbeide med Universitetet i Graz har vi arbeidet med to reservoarer i Østerrike: Bodendorf og Schönau. For Schönau reservoiret er det modellert både deponering og en lett spyling, der vannivået kun blir trukket noe ned. En lett spyling brukes der en ikke kan ha for store sedimentkonsentrasjoner nedstrøms reservoiret av økologiske årsaker. Universitetet i Graz har hatt en fysisk modell av Schönau reservoiret, der sedimentene er modellert med plastkuler. Derved er det mulig å bestemme deponerings og erosjonsmønsteret i reservoiret. Sammenligninger mellom verdiene fra laboratoriet og den numeriske modellen viser rimelig god overensstemmelse (Harb et al, 2011).

I tillegg er det gjort feltmålinger av hastighetene i reservoiret med et akustisk instrument (AD-CP). Figurene under (Harb et al, 2011) viser målte og beregnede vannhastigheter i et tverrprofil i reservoiret med forskjellige farger. Profilet er tatt i en sving, der en har størst vannhastighet i yttersvingen. I figurene er yttersvingen på venstre side. Den øverste figuren er målte hastigheter, og den nederste beregnede verdier. Vi ser at det er rimelig god overensstemmelse mellom resultatene fra den numeriske modellen og feltmålingene.



Bodendorf reservoiret er et relativt langt og smalt reservoir, med noen mindre svinger. Det er mye sedimentdeponering i reservoiret, og det spyles med ujevne mellomrom. På grunn av miljømessige forhold, har en ikke love å spyle på en slik måte at en får veldig høye konsentrasjoner nedstrøms reservoiret. I prosjektet vårt har vi modellert spyling av sedimenter og sammenlignet resultatene med målinger fra felten. Dette er gjort for bunnegeometrien før og etter spyling. Et typisk tverrprofil er vist i figuren på neste side. Dette profilet er tatt i en sving i reservoiret, der venstre side er yttersving. Den numeriske modellen gir et rimelig estimat, men beregner mer erosjon i yttersving enn i innersving. Observasjonene fra felten viser at det eroderer

like mye i yttersving som i innersving. Den numeriske modellen predikerer derfor også en smalere spylekanal enn det som er observert, samt mindre totalt erodert materiale.



*Tverrprofil av bunnen i sving i Bodendorf reservoaret. Venstre side er yttersving. Stiplet linje er før spyling, og heltrukken linje er målt bunnivå etter spylingen. De to fargede linjene er resultater fra den numeriske modellen med forskjellige sedimenttransportformler.*

Normalt vil en elv erodere i yttersving og deponere i innersving. Det er derfor logisk at den numeriske modellen gir mer erosjon i yttersving enn i innersving. Spørsmålet er hvorfor denne effekten ikke vises i feltmålingene. En mulig årsak kan være effekter fra antidyner, som reduserer sekundærstrømmingene. Men det kan også være at tykkelsen av sedimentlaget i reservoaret er anderledes enn det som er modellert. Dette er vanskelig å vite da vi mangler gode feltdata for sedimentene.

En annen interessant observasjon fra Bodendorf reservoaret er at bunnivået på høyre side rett oppstrøms dammen stiger etter spylingen. Den mest sannsynlige grunnen til dette er ras fra elvebanken under spylingen. Det ble også observert mange ras under spylingen i 2007.

Resultatene fra Schönau og Bodendorf er presentert i artiklene Haun and Olsen (2012), Harb et al (2011) og Harb et al (2012).

## 5. Angostura reservoiret

Angostura kraftverket ble satt i drift i år 2000. Det har et reservoar som hadde et initielt volum på 20 millioner m<sup>3</sup>, men dette minsker stadig på grunn av sedimentering. Reservoaret eies av Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) som er en statlig kraftverksorganisasjon i Costa Rica. Vårt institutt har hatt samarbeide med ICE siden begynnelsen av 1990-tallet, og var med på planleggingen av Angostura reservoiret.

*Bildet til høyre er fra spylingen av Angostura reservoiret. Bølger som sannsynligvis kommer fra antidyner vises i elven. En raskant vises også. Foto: S. Haun.*



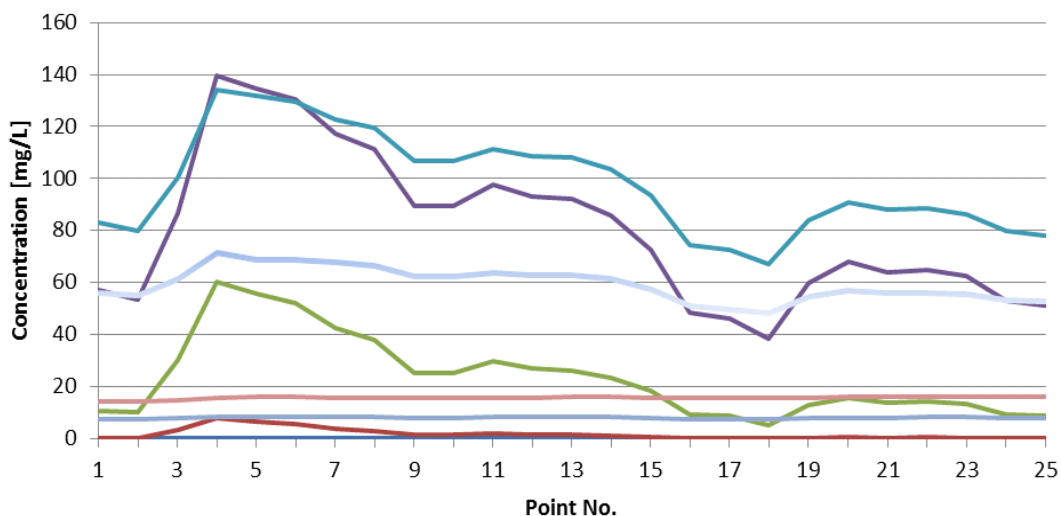
Reservoaret spyles vanligvis to ganger i året: tidlig og sent på høsten. Før og etter spylingen blir det gjort målinger av bunntopografien med ekkolodd. Dette gjør at en kan måle hvor mye sediment som har deponert i reservoiret i løpet av ett år, og en ser også hvor mye som er spylt ut. Topografimålingene gjøres av ICE, og vi får dataene via en skriftlig avtale mellom dette firmaet og NTNU. Topografien brukes som input-data for generering av beregningsnett for simuleringene. I tillegg brukes data for vannføring, vannstand i reservoiret og målte sedimentkonsentrasjoner i innstrømmende elver.

Vi har hatt flere feltmålinger i Angostura reservoiret, der vi har målt både vannhastigheter og sedimentkonsentrasjoner. I 2011 arbeidet de to MSc studentene Hallvor Kjærås og Sigurd Løvfall sammen med Stefan Haun med feltmålingene. Det ble da tatt en rekke tverr- og lengdeprofiler av sedimentkonsentrasjonene med et laser-basert instrument. Målingene ble brukt til å verifisere vår numeriske modell, for å se om sedimentkonsentrasjonsberegningene ble riktige. Figuren på neste side er publisert i Journal of Hydrology og viser målte og beregnede konsentrasjoner i reservoiret. Resultatene er rimelig gode, selv om de målte verdiene viser større variasjoner enn beregningene. Dette er vanlig i feltmålinger, og kan komme av for eksempel kompleks topografi eller ikke-stasjonær strømning av sedimenter og vann.

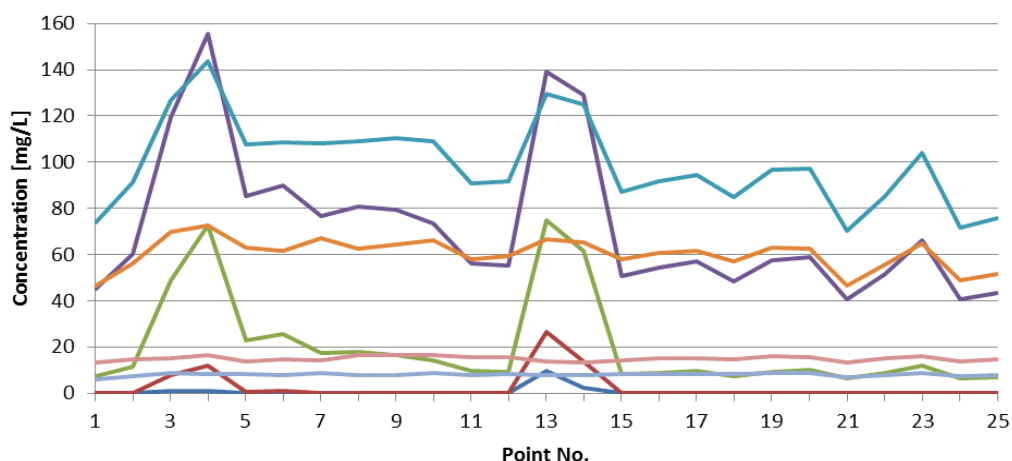
I tillegg til deponeringsberegningene er det også foretatt spyleberegninger for Angostura reservoiret. Disse viser i likhet med beregningene for Bodendorf at den beregnede spylekanalen blir noe for smal. Antidyner er observert i Angostura reservoiret under spylingen, som vist på bildet over. Det er mulig at disse gjør at kanalen blir bredere enn det som er beregnet, siden den numeriske modellen ikke tar med effekten av antidyner.



Resultatene fra sedimentdeponeringen i Angostura reservoaret er publisert av Haun et al (2013), mens studien av sedimentspylingen er publisert av Haun og Olsen (2012a).



Figurene over og under viser et lengdeprofil gjennom Angostura reservoaret, der konsentrasjoner av forskjellige sedimentfraksjoner vises med hver sin farge. Figuren over er beregnede verdier, mens figuren under er målte verdier fra LISST instrumentet. Punkt 1 er mest oppstrøms, mens punkt 25 er mest nedstrøms.



## 6. Konklusjoner

I prosjektet er det utviklet nye numeriske algoritmer for forskjellige prosesser som påvirker sedimenttransport i vannkraftreservoarer: Høyere ordens diskretiseringsmetoder, algoritmer for bestemmelse av fri overflate, bunnlastformler, formler for sedimenttransport på hellende bunn og ruhetsalgoritmer. De nye metodene har blitt testet på flere reservoarer i Østerrike og Costa Rica, for sedimentdeponering og spyling. Prosjektet har også gjennomført tester mot resultater fra fysiske modellforsøk.

Den numeriske modellen simulerer sedimentdeponering i reservoiret rimelig bra. Variasjon i forskjellige numeriske algoritmer og parametre har liten innvirkning på resultatene under deponering. Det er mulig å kjøre med lange tidsskritt, som gjør at en kan simulere ett års drift av reservoiret i løpet av et døgn på en PC.

Nøyaktigheten på modelleringen av spyleprosessen med erosjon av sedimenter er mer usikker. Vi observerer bredere og grunnere spylekanaler i forhold til hva SSIIM 2 programmet gir. Sekundærstrømmer fører til at det blir mer erosjon i yttersving enn i innersving. Dette observeres i SSIIM 2 resultatene, men i mindre grad i feltdataene. Vi er her usikre på hvorfor dette avviker oppstår. En mulighet er at antidyner reduserer effekten av sekundærstrømmingene.

Et annet problem med spylingene er at sedimenter transporteres fra sidene av reservoiret inn mot kanalen med geotekniske ras. Slike ras må modelleres i spesielle rasrutiner, og disse må utvikles i fremtidige prosjekter.

## 7. Videre arbeide

For å øke nøyaktigheten av spyleberegningene er det mulig å gjøre endel forbedringer i den numeriske modellen og også kartlegging av sedimentene i reservoiret.

### 7.1 Kartlegging av sedimenter i reservoarer

Når en skal gjøre en spyleberegning er det viktig å kjenne kornfordelingen til sedimentene i reservoiret, og hvordan denne varierer romlig. Det er også viktig å vite hvor mye kohesjon det er i sedimentene, og hvor stor sedimenttykkelsen er. Disse parameterene vil også variere romlig i reservoiret. Denne informasjonen vil være nødvendig hvis en skal gjøre en fysisk eller en numerisk modellstudie av spylingen. Firmaer som har flere reservoarer med sedimentproblemer vil kunne ha nytte av å tilegne seg kunnskap og erfaring i hvordan slike målinger gjøres.

*Bildet til høyre viser en "Sonobot", som er en fjernstyrt modellbåt som har side-scan sonar og ekkolodd som trenger igjennom sedimentene på bunnen og måler tykkelsen av disse. Et slikt instrument vil muliggjøre en hurtig kartlegging av sedimenttykkelsen på reservoirenbunnen, samt gi geometrisk informasjon som kan brukes til å lage inputdata for en numerisk modell.*



En kartlegging av sedimentene vil være en kostbar operasjon. Et mulig alternativ er å beregne parametrene med en tredimensjonal numerisk modell. Modellen vil beregne sedimentdeponeringen inkludert kornfordeling og sedimenttykkelse. En utfordring vil være å estimere kohesjonen i sedimentene. Den numeriske modellen vil kunne beregne hvor mye finstoff det er i sedimentene, og også tiden sedimentene har vært i reservoiret. Den vil også kunne bestemme

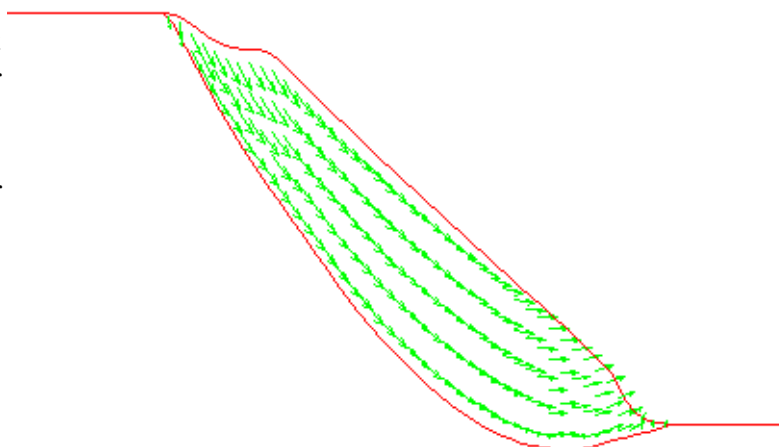
hvor mye tid sedimentene har vært tørrlagt. Det er mulig å korrelere disse parametrene med kohesiviteten på sedimentene, gitt omfattende feltmålinger og data fra litteratur.

## 7.2 Rasrutiner

Som vist på bildet fra Angostura reservoiret i Kap. 5, skjer det stadig ras i reservoirene under spylingen. Rasene er viktige for å transportere sedimenter fra sidene og inn mot spylekanalen, og bidrar til å øke effekten av utspylingen og utspylt volum. En god numerisk algoritme for rasbevegelsen vil kunne øke nøyaktigheten av resultatene fra modelleringen av reservoirstpylingen.

Den vanligste rasrutinen som brukes er å anta at sedimentene er ikke-kohesive, og at en derfor vil ha maksimum rasvinkel på sideskråningene. Hvis sideskråningene blir brattere, lages et ras ved at vinklene på skråningshelningen endres. I algoritmen må en også forsikre seg om at kontinuitet er tilfredsstillende, slik at mengden sedimenter som raser ut må være lik mengden som deponerer.

En mer avansert algoritme er å dele inn jordskråningen i vertikale segmenter, og se på kreftene på disse. Der opptredende krefter overskrider bruddkriteriet for løsmassene får en brudd. Etter bruddplanet er beregnet kan en modellere bevegelsen av jordmassene. I eksempelet til høyre er det antatt at rasmassene beveger seg som en fluid, og at en bruker samme numeriske løsningsmetode for raset som for vannet. En må imidlertid ha en algoritme som beregner når raset stopper. Dette kan gjøres ved å se på kreftene på vertikale segmenter, liknende det som ble brukt til å bestemme bruddplanet. Fordelen med denne mer avanserte metoden er at en kan ta med kohesjonen i materialet i beregningen, og også krefter fra grunnvannsgradienter. Disse to momentene er viktige for ras i reservoier under spyleprosessen.



## 7.3 Antidyner

Antidyner forekommer der en har stor sedimenttransport og Froude tallet går over 0.7. Dette er typisk for en spylesituasjon. Antidynene kan observeres som store bølger på overflaten av kanalen. Dette fører til endret friksjonsforhold i kanalen, større energitap og endret sedimenttransportkapasitet. Det er også mulig at antidynene påvirker sekundærstrømningene i spylekanalen. Dette vil i så fall igjen påvirke erosjonsmengden og hvor i reservoiret det blir erosjon. En ønsker å finne en god formel for å beregne hvor store antidynene blir, og hvordan de påvirker friksjonsforhold og sedimenttransportkapasitet. En formel for hvor stor påvirkning de har på

sekundærstrømningene er også ønskelig. Antidynene kan med fordel studeres i fysiske modeller.

*Antidyneser i Bodendorf reservoaret. Dynene strekker seg over hele bredden av reservoaret.*



#### **7.4 Fritt vannspeil**

Når en skal modellere spyleprosessen er det nødvendig å ha en numerisk modell som klarer å beregne vannoverflaten ved relativt store Froude tall. Et problem kan være at vannspeilet senkes under bunnen av reservoaret. Dette er en naturlig prosess for de grunneste delene av reservoaret. Når vannspeilet senkes, vil disse områdene tørke opp. Hvis algoritmene for vannspeilet ikke er gode nok, kan denne opptørkingen skje over et område som strekker seg på tvers av elven. Dette vil føre til at beregningsgridet deler seg i to, noe som er en ikke-fysisk numerisk prosess. En såkalt grid splitting vil føre til at de numeriske beregningene divergerer. Det er derfor nødvendig å utvikle algoritmer der en slik prosess ikke skjer.

I dette prosjektet er det laget forbedringer i algoritmene for fritt vannspeil. Imidlertid er det fremdeles mulig å få grid splitting hvis en bruker relativt lange tidsskritt. Hvis en skal modellere sedimentering og erosjon i et reservoar over mange år er det ønskelig å kunne bruke lange tidsskritt. Det vil derfor være en fordel med ytterligere forbedringer av algoritmene for fritt vannspeil.

### **8. Publikasjonsliste fra prosjektet**

Harb G., Dorfmann C., Schneider J., Haun S. and Badura H. (2012), "Numerical analysis of sediment transport processes in a reservoir", Proceedings of the 6th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2012, San José, Costa Rica, 2012.

Harb G., Haun S., Ortner S., Dorfman C. and Schneider J. (2011), "The influence of secondary currents on reservoir sedimentation - experimental and numerical studies", Proceedings of the 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia, 2011, pp. 1733-1739.

Haun S. (2012), Three-dimensional numerical modelling of sediment transport during the flushing of hydropower reservoirs, PhD avhandling, Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU, ISBN 978-82-471-3906-6, ISSN 1503-8181.

Haun S., Kjærås H., Løvfall S. and Olsen N.R.B. (2013), Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir, *Journal of Hydrology*, Vol. 479, pp. 180-188.

Haun S., Olsen N.R.B. and Feurich R. (2011), Numerical modelling of flow over trapezoidal broad-crested weir, *Journal of Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 3, pp. 397-405.

Haun S. and Olsen N.R.B. (2012a), Three-dimensional numerical modelling of reservoir flushing in a prototype scale, *International Journal of River Basin Management*, Vol. 10, No. 4, pp. 341-349.

Haun S. and Olsen N.R.B. (2012b), Three-dimensional numerical modelling of the flushing process of the Kali Gandaki Hydropower Reservoir, *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, Vol. 17, No. 1, pp. 25-33.

Haun S. and Olsen N.R.B. (2012c), Numerical simulation of sediment deposition in a hydropower reservoir, Proceedings of the 18th IAHR Asia-Pacific Congress, Jeju-Island, South Korea, 2012.

Haun S., Olsen N.R.B., Rodríguez Meza C.R. and Lizano L. (2012), 3D numerical simulation of the flushing process in the Angostura reservoir, Proceedings of the 6th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2012, San José, Costa Rica, 2012.

Haun S., Dorfmann C., Harb G. and Olsen N.R.B. (2012), 3D Numerical Modelling of the Reservoir Flushing of the Bodendorf Reservoir, Austria, Proceedings of the 2nd IAHR European Congress, Munich, Germany, 2012.

Haun S., Hoven L.E., Olsen N.R.B., Rodríguez Meza C.R. and Lizano L. (2011), 3D numerical modelling of sediment deposition and flushing in the Angostura reservoir, Costa Rica, Proceedings of the 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia, 2011, pp. 1740-1746. (*Award for the Best Paper Presentation*)

Hoven, L. (2010) "Three-dimensional numerical modelling of sediments in water reservoirs", MSc oppgave, Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU.

Kjærås, H. (2012) "Sediments in Angostura Hydropower Reservoir", MSc oppgave, Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU.

Løvfall, S. (2011) "Three-dimensional numerical modelling of sediment deposition in the Angostura hydropower reservoir", MSc oppgave, Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU.

Olsen N.R.B. and Haun S. (2010), "Free surface algorithms for 3D numerical modelling of reservoir flushing", Dittrich et al. Preprints of the River Flow Conference 2010: Bundesanstalt für Wasserbau, Braunschweig, September 8 - September 10, 2010, pp. 1105-1110.

I tillegg er følgende artikkel godkjent men enda ikke publisert:

Harb, G., Haun, S., Schneider, J. and Olsen, N. R. B. (2013) "Numerical Analysis of Synthetic Granulate Deposition in a Physical Model Study", International Journal of Sediment Research.