

Sluttrapport for prosjekt 173143

Numerisk modellering av deltaer i vannkraftmagasiner

Populærvitenskaplig sammendrag

Vannkraftmagasiner som tilføres relativt store mengder sedimenter fra tilførselselvene vil få dannet deltaer. Det viktigste eksempelet i Norge er Øyern, som har det største ferskvannsdeltaet i Nord-Europa. Området danner et habitat for fugler, fisk og planter som er viktig fra et økologisk synspunkt. Deltaet ble i 1985 anerkjent som en våtmark av internasjonal betydning i Ramsar konvensjonen. Et viktig spørsmål er hvordan vannkraftreguleringen av magasinet påvirker den geometriske utformingen av deltaet. Dette vil inngå i vurderinger av søknaden om konsesjoner for videre drift av kraftverket som bruker Øyern som reservoar.

I dette prosjektet har vi videreutviklet en tredimensjonal numerisk modell for beregning av sedimentbevegelser i deltaer. Modellen kan brukes på alle typer deltaer, men vi har valgt å bruke data fra Øyern for uttestingen. Hovedgrunnen er at det eksisterer mye data fra Øyern siden dette deltaet er så viktig.

Arbeidet har bestått av flere deler. Innsamling av felldata fra Øyern samt tilrettelegging av denne for den numeriske modellen har vært en del. Selve modelleringen av deltaet samt videreutvikling av numerikken har vært en annen. I tillegg til dette har vi arbeidet med separate delprosjekter som er nyttige for deltaberegningene. En av disse er modellering av vegetasjon. En annen er modellering av strømminger i naturlige elvestrekninger, slik som grener av deltaet. Vi har også sett på modellering av sanddyner på bunnen av deltaet, noe som er viktig for beregning av friksjonsforhold mot bunnen, vannspeilets beliggenhet og sedimenttransportkapasiteten.

Resultatene er at vi har utviklet en modell som gir gode resultater for beregning av strømningsforholdene i Øyern deltaet og fordeling av vann i de forskjellige elvegrenene. Vi får også rimelige bra resultater for sedimentdeponeringsmønsteret etter flommen i 1995. Delprosjektene som har sett på tredimensjonale bevegelser av sanddyner har også gitt gode resultater, samt detaljerte beregninger av strømningsmønsteret i naturlige elver.

I prosjektet har vi samarbeidet med NVE og NGU, samt forskere i Tyskland, Storbritannia og Østerrike. Vi har publisert 8 artikler til tidsskrift og 10 artikler til konferanser, alle med peer review. Prosjektets doktorstudent regner med å bli ferdig med sin avhandling i 2011.

Dataprogrammet som er utviklet til å beregne strømningsforholdene og sedimenttransporten i deltaet kan lastes ned gratis fra web-siden <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim>. Vi har også noen resultater fra arbeidet på web-sidene: <http://folk.ntnu.no/nilsol/cases/oyern> og <http://folk.ntnu.no/nilsol/cfd>.

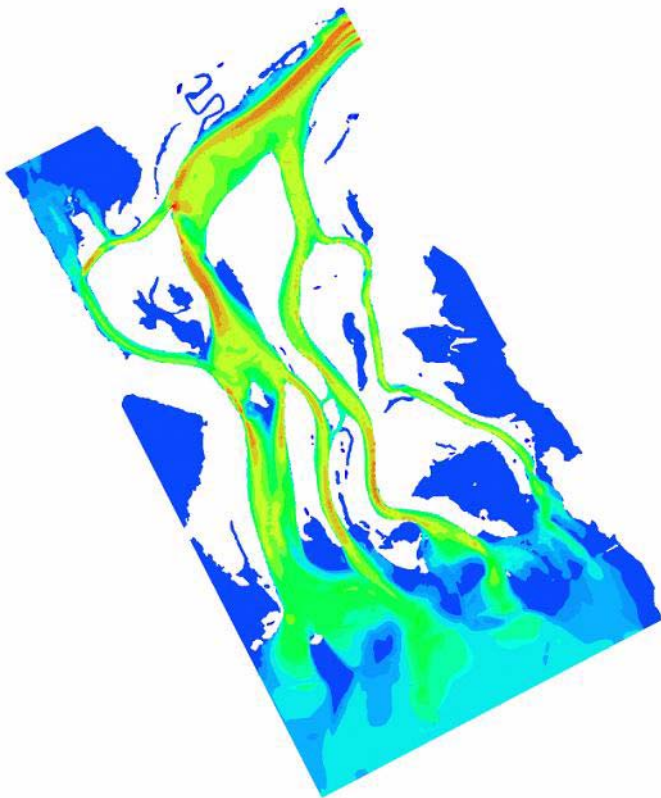
1. Introduksjon

Dette prosjektet ble startet i 2007 og det har gått over nesten fire år. Prosjektet har lønnet en doktorstipendiat i tre år, samt to post doktor stipendiater i tilsammen 4 år med halvtidsstilling. I tillegg har prosjektleder ansatt ved NTNU arbeidet på prosjektet, samt en diplomstudent

Rapporten er i det videre delt etter de forskjellige delprosjektene.

2. Modellering av Øyern-deltaet

Det viktigste delprosjektet var å modellere deltaet i Øyern. Alle de andre delprosjektene ble gjort for å støtte denne modelleringen. Arbeidet startet med å samle data for geometri, vannføringer, vannstand, sedimenttransport, vegetasjon etc. som input til den numeriske modellen. Data ble hentet fra bl. a. NVE og NGU (Eilertsen et al, 2008). Den første delen av modelleringen gikk ut på å se hvor godt vi klarte å predikere fordelingen av vannføringen i de forskjellige kanalene i deltaet. Dette viste seg å gå rimelig bra (Zinke et al, 2010).



Figuren til venstre viser den beregnede fordelingen av vannhastigheter ved overflaten av deltaet. Rødt er store hastigheter og blått er lave hastigheter. Vannet renner inn øverst i figuren, og Øyern er i den nedre delen av figuren.

Det viste seg at modelleringen av vegetasjon var meget viktig for vannstrømningen i deltaet under en flom. Etter mye innsamling av data og annen forskning på vegetasjon, ble sedimentdeponeringen under flommen i 1995 modellert (Zinke og Olsen, 2009). Det beregnede deponeringsmønsteret stemte bra med målingene på de fleste stedene i deltaet, selv om det også var noen steder det ikke stemte så bra. Dette kan delvis skyldes usikkerheter mhp den oppmålte geometrien, ruheter, bunnsedimentene og innstrømmende sedimentmengder. Den antatt største usikkerheten i

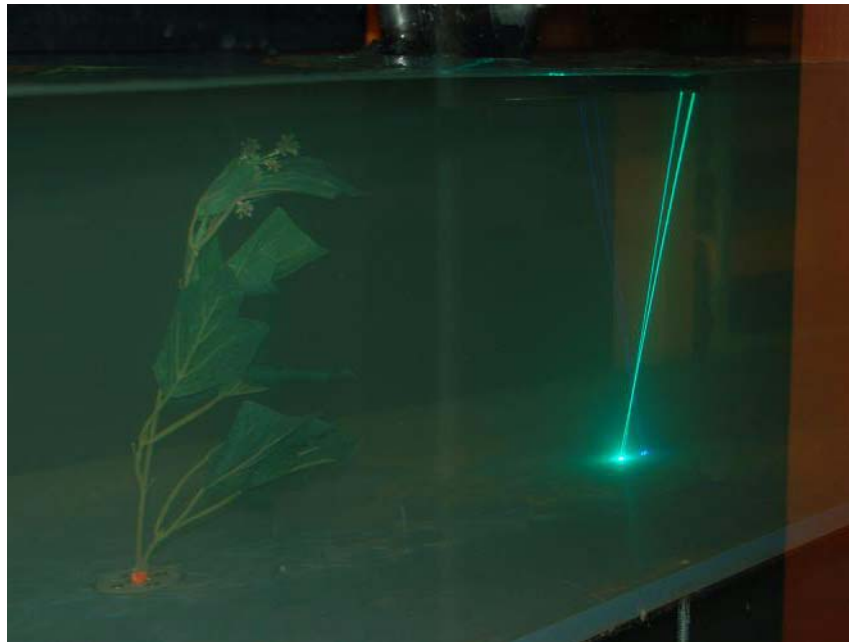
resultatene skyldes nøaktigheten av dataene for vegetasjonen og modelleringen av denne. Doktorstudenten har derfor fokusert mye av arbeidet sitt på dette temaet (Zinke og Olsen, 2010).

Deltaet er meget stort, og cellestørrelsen for praktiske beregninger er omtrent 20 meter i horisontal retning. Dette er for stort for å kunne modellere mange av prosessene i deltaet i detalj. En av hensiktene med delprosjektene var å kunne fokusere på enkeltprosesser og modellere de med et finere grid.

I enkelte områder av deltaet forekom det lateral erosjon av elvebreddene. I prosjektet samlet vi inn endel felldata om dette, og gjorde også noe initiell forskning om numerisk modellering av lateral erosjon. Imidlertid kom vi ikke så langt at vi modellerte den laterale erosjonen i deltaet. Dette vil være et tema for videreføring av prosjektet.

3. Modellering av vegetasjon

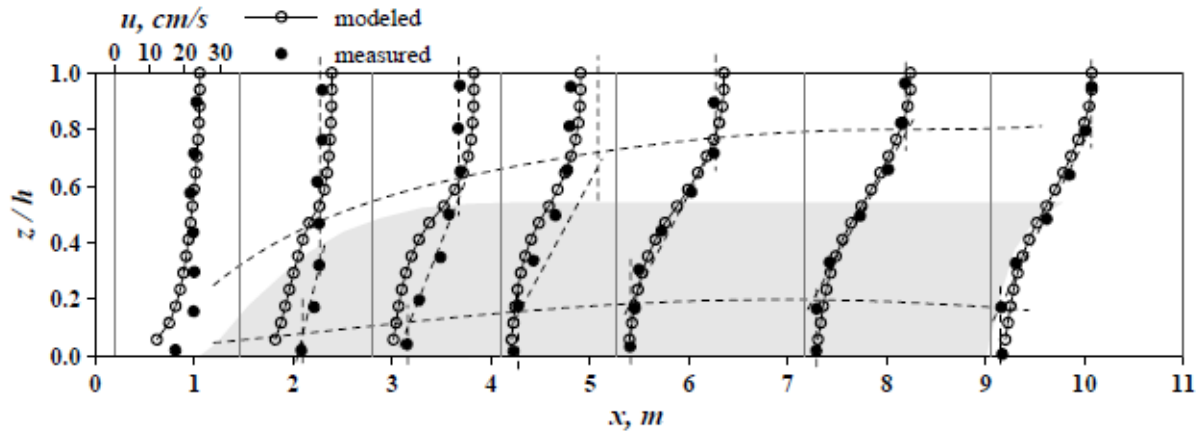
En av usikkerhetsfaktorene når en modellerer deltaet under flommer er hvor mye vegetasjonen påvirker strømningsforholdene. Interaksjon mellom vegetasjon og vannstrømning er for tiden et meget aktivt forskningsfelt, med mange internasjonale forskergrupper involvert. Vi har samarbeidet med universitetene i Cardiff og i Braunschweig på dette området, samt Institutt for Ferskvannsekologi og Innenlandsk Fiskeri i Berlin. Bildet under er fra et laboratorieeksperiment ved Universitetet i Braunschweig, der de bruker laser til å studere strømforhold og turbulens rundt planter.



der de bruker laser til å studere strømforhold og turbulens rundt planter.

Vårt samarbeide med denne forskningsgruppen gjorde at vi fikk tilgang til deres data som beskriver forholdene mellom krefter fra plantene mot vannet, vannhastighet og turbulens. Formler som vi utledet fra dette ble kodet i den numeriske modellen og brukt for vegetasjonen i Øyerndeltaet. Vi fikk også tilsvarende data fra Universitetet i Cardiff samt vår samarbeidspartnere i Berlin. Siden det er mange forskjellige plantetyper, gir de forskjellige eksperimentene et bedre grunnlag for den variasjonen av planter som vi ser i Øyern.

Samarbeidet i Berlin gikk også ut på å modellere en del av elven Spree, der vi hadde tilgang på data for sedimentdeponeringen i et område med vegetasjon (Zinke et al, 2008).

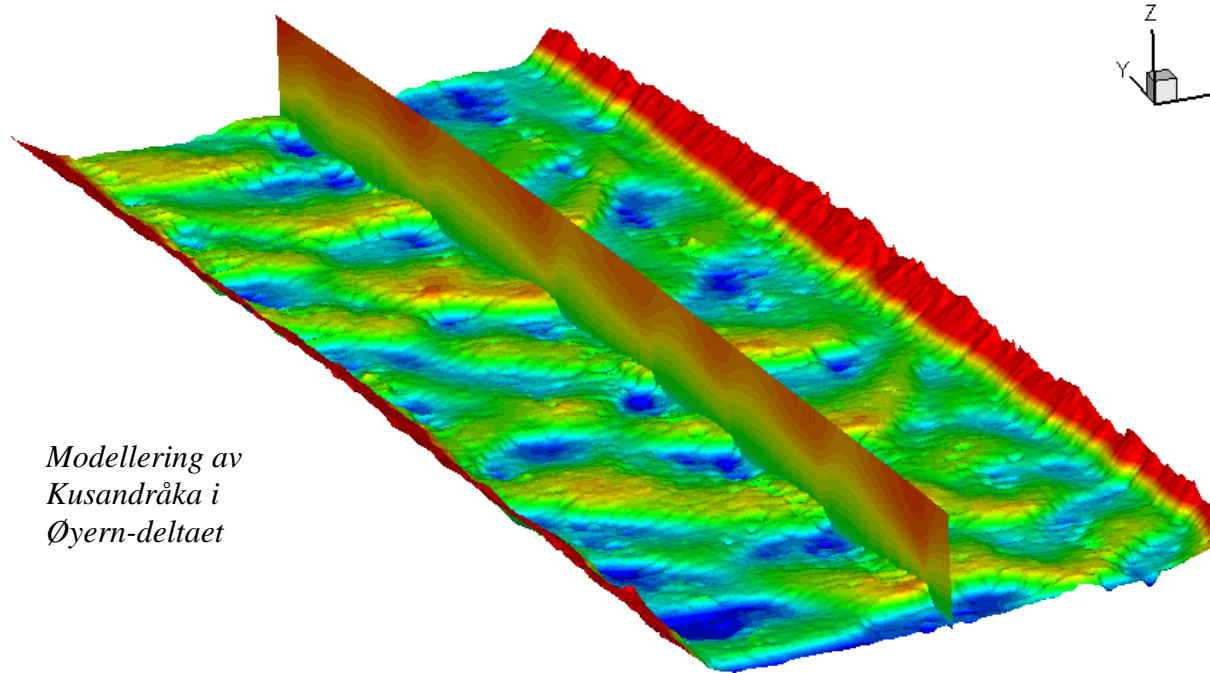


Figuren over viser et lengdeprofil i elven med målte og beregnede vannhastigheter. Det grå området er vegetasjon. Som figuren viser, ble resultatene meget gode. Initiale tester av algoritmene for sedimentdeponering i vegetasjonsområder ble også gjort med laboratedata (Zinke og Olsen, 2007), noe som også gav bra resultater.

4. Modellering av bunnformer

Bunnformer er sanddyner som beveger seg på bunnen av en elv. Målinger fra NGU viste at Øyern-deltaet hadde store bunnformer, med høyder rundt en meter. For å kunne forstå mer av fysikken bak hvordan de ble dannet og beveget seg, ble de modellert i detalj som en del av prosjektet. Dette kunne kun skje på en liten del av deltaet på grunn av det store behovet for regnekraft. En strekning i en av sidegrenene, Kusandråka, ble derfor valgt ut. Tilgangen på regnetid på Njord clusteret var også nødvendig for å kunne utføre denne tunge beregningen.

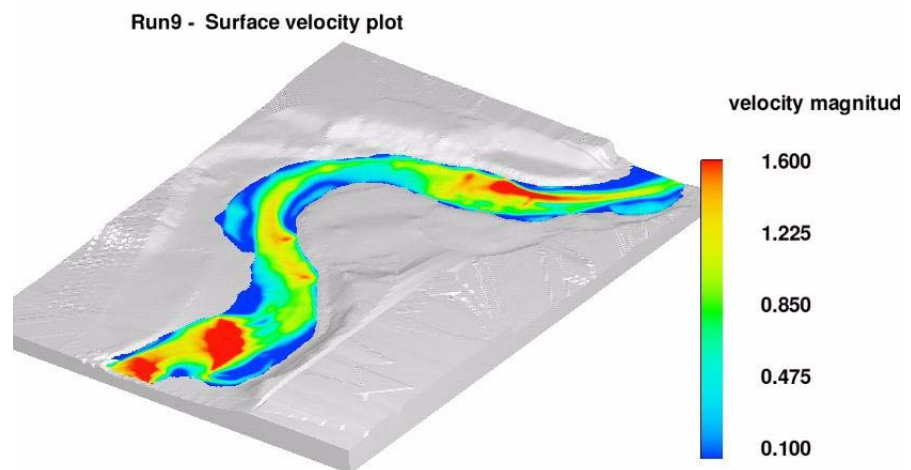
Figuren på neste side viser bunnen av den beregnede strekningen, der rødt er høyt bunnivå og blått er lavt bunnivå. Det er også vist et snitt midt i kanalen, der fargene viser vannhastigheten. Rødt er der høy vannhastighet, mens blått er lav vannhastighet. Resultatet fra beregningene stemte bra med målinger med en side-scan sonar, gjort av NGU. Hastighetene sanddynene bevegde seg med var rimelig bra modellert (Ruether et al, 2008). Dette er de første beregningene som er gjort i verden av sanddyner i naturlige elver.



5. Modellering av vannstrømning i naturlige elver

Et delta består av flere elvegrener. For at modellen skal kunne beregne strømmingen i deltaet, må den derfor også beregne strømmingen i hver enkelt gren.

Et delprosjekt var derfor å se på hvor god den numeriske modellen kunne beregne strømningsforholdene i en naturlig elv. I prosjektet hadde vi tilgjengelig data for Nidelva i Trondheim, der Insittutt for Geografi ved NTNU hadde gjort oppmålinger. Dette inkluderte hastighetsprofiler målte med et ADCP



instrument. En strekning ble modellert med SSIIM programmet, som vi også brukt til deltaet. I tillegg gjorde diplomstudent Jens Jacobsen en beregning med programmet FLOW-3D, som vist på figuren over. Resultatene fra de to dataprogrammene ble sammenlignet med hasitighetsmålingene, og relativt god overenstemmelse ble funnet (Ruther et al, 2010). Strømningsmønsteret i svinger og bakevjer stemte bra med feltmålingene. Dette var en god indikasjon på at den numeriske modellen også kunne beregne strømforholdene i deltaet.

I samarbeide med Universitet i Cardiff gjorde vi også en modellering av spredning av en tracer i en laboriemodell av en meandrerende kanal. Resultatene fra konsentrasjonsmålingne stemte bra med våre beregninger (Wilson et al. 2007). Dette var positivt for våre videre studier av suspenderte sedimenter i deltaet.

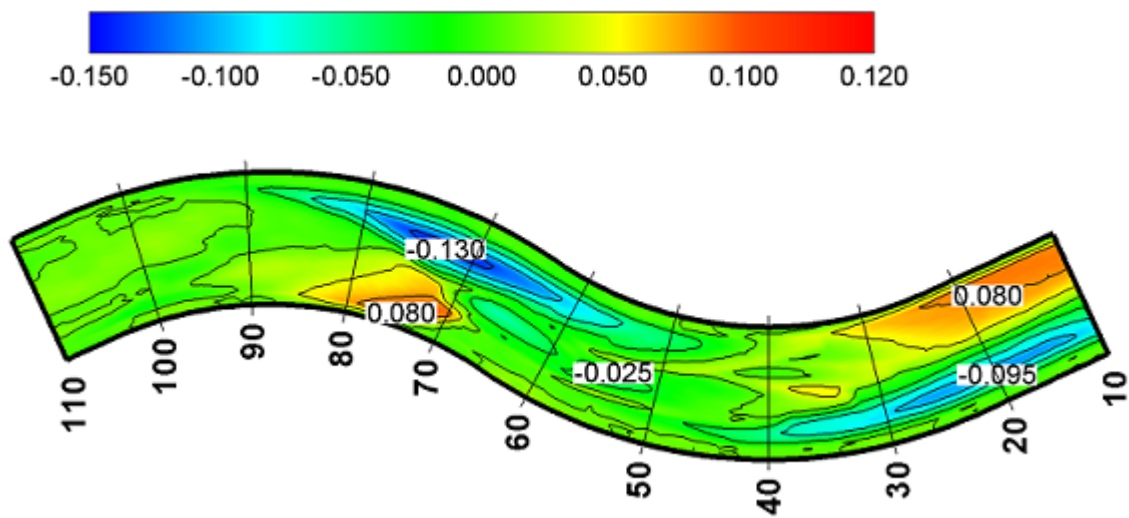
6. Modellering av bunnbevegelser i naturlige elver

Det neste steget etter å ha beregnet vannstrømningsmønsteret i en naturlig elv er å beregne sedimenttransporten og bunnbevegelser. Dette har vi gjort i en naturlig elv og i tre laboriemkanaler. Det meste av dette arbeidet er gjort som videreføring av tidligere forskning og i samarbeide med andre forskningsgrupper.

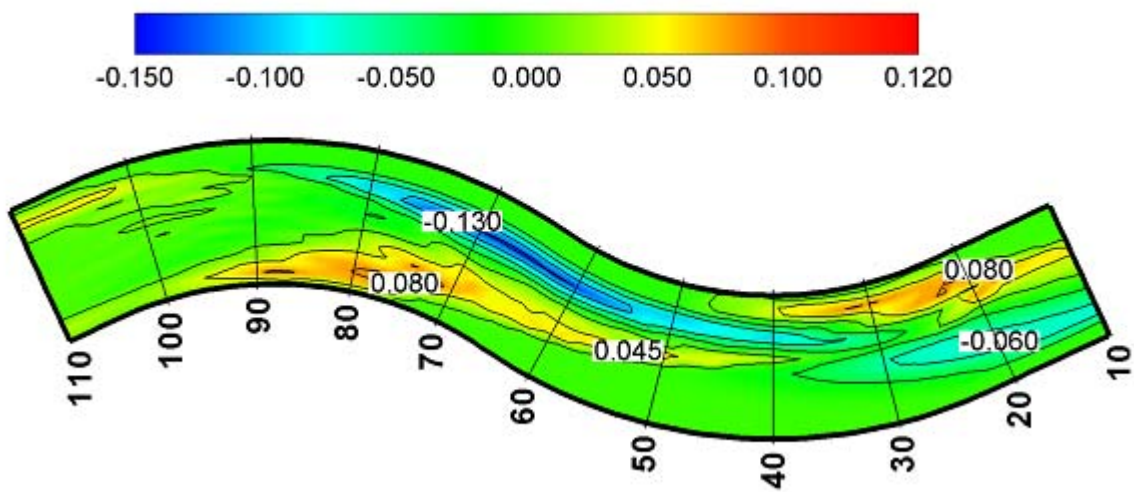
Den naturlige elven som vi har modellert er en 5.5 km strekning av Donau i Østerrike. Dette er gjort i samarbeide med det Tekniske Universitetet i Wien. De har hatt adgang til deltajerte feltmålinger av bunnforandringene. Denne modellering er den første i verden der en 3D modell har blitt brukt til å beregne bunnforandringer i en elv der en har sammenlignet med detaljerte feltmålinger. Relativt gode resultater ble funnet, men beregningene var ganske følsomme for empiriske parametere i sedimenttransportformlene (Fischer-Antze et al, 2008). En figur med resultater fra disse beregningene er gitt på neste side.

I tillegg til dette arbeidet, beregnet vi også vertikale bunnbevegelser i to laboriemkanaler. En av disse er en 180 graders sving (Fischer-Antze et al, 2009). Det andre er en meandrerende kanal (Feurich og Olsen, 2010; Feurich og Olsen, 2011) fra laboriet ved Universitetet i Innsbruck, som Robert Feurich brukte i sin doktorgradsavhandling. Resultatet fra denne beregningen er gitt på figurene på neste side. Begge beregningene gav rimelig gode resultater. Som beregningene i Donau, var de empiriske parametrene i sedimenttransportformlene viktige. Det var også interessant å se hvordan sekundærstrømningen påvirket bunnforandringene i de to tilfellene.

Vi har også arbeidet med å modellere lateral erosjon. Det første arbeide på dette temaet ble gjort av Ruether og Olsen (2007), men da med et meget grovt beregningsnett. Post-doc Robert Feurich har arbeidet videre med problemstillingen. De beste dataene fra slike prosesser kommer fra laborieforsøk, da disse er mer nøyaktige enn feltdataene. Vi modellerer derfor et laborieforsøk fra Universitetet i München. Dette arbeidet er ikke ferdig pr. dags dato, men fortsetter etter at delta prosjektet er ferdig.



Figuren over viser de målte bunnforandringene i kanalen fra laboratoriet i Innsbruck, sett ovenfra. Vannet renner fra venstre mot høyre. Fargene viser erosjon og deponering i meter. Figuren under viser samme situasjonen beregnet med den numeriske modellen (Feurich og Olsen, 2011). Som figurene viser er det rimelig god overenstemmelse mellom resultatene. Det viste seg at modellering av flere sedimentfraksjoner gav bedre resultat enn en fraksjon, selv om kornfordelingen var relativt uniform. Også bruk av hiding/exposure funksjoner gav forbedret resultat.



7. Konklusjon

I prosjektet har vi utviklet mange nye forbedrede numeriske algoritmer for tredimensjonal modellering av prosesser i deltaer. Vi har testet ut algoritmene på mange forskjellige datasett. Innsamlig av felldata fra deltaet i Øyern er gjort, og i dette deltaet er det modellert vannstrømmer og sedimentdeponering under flom. Relativt gode resultater er oppnådd. Prosjektet har frembrakt ny kunnskap om numerisk modellering og strømningsforhold i Øyern-deltaet. Vi har også publisert en rekke artikler, og en stipendiat har arbeidet med sin doktorgrad på dette prosjektet.

8. Videre arbeide

Vi fortsetter arbeidet som ble startet i dette prosjektet. Datoen for doktorstudentens disputas er satt til 14. september i år. Vår forskningsgruppen ved NTNU arbeider videre med å utvikle numeriske modeller for nøstede grid og lateral erosjon. I et annet prosjekt for Forskningsrådet startet en post. dok. stipendiat i januar 2011 starte med å modellere erosjonsskader under flommer ved å bruke et nøstet grid. Denne teknologien kan også brukes i senere prosjekter til å modellere lateral erosjon eller bevegelser i erosjonsgropene i Øyern deltaet.

Vårt institutt har av NTNU fått strategimidler som blir bruk til prosjekter som er relevante for modellering av deltar. Dette finansierer bl. a. en doktorstudent som akkurat har startet et forskningsprosjekt på lateral erosjon i elver. Han gjør en rekke feltmålinger som vil være nyttige under utviklingen av numeriske modeller for disse prosessene. I CEDREN prosjektet er det også to andre doktorstudenter som arbeider med tredimensjonal numerisk modellering av elver. Og i et annet NFR finansierte prosjekt startet en doktorstudent i fjor med en studie om numerisk modellering av sedimenter i vannkraftreservoarer. Han vil modellere sedimentdeponering og spyling av sedimenter fra reservoirene. Noen av de numeriske algoritmene som blir utviklet under hans arbeide vil være til nytte i det videre arbeidet med modellering av geometriske forandringer i deltaer. En post. doc forsker vil fortsette noe av dette arbeidet med finansiering fra strategiske midler fra NTNU. Vi har også startet et samarbeide med Bundesanstalt für Gewässerkunde i Tyskland der vi modellerer kohesive sedimenter i reservoarer. Dette inkluderer algoritmer for flokkulering og endringer i tettheten av sedimentene på bunnen. Dette er prosesser som også skjer i deltaet.

Vårt institutt planlegger å sende inn en ny søknad til NFR om videreføring av arbeidet i Øyern deltaet.

Regneressurser

Vi har for en stor del benyttet Njord maskinen ved NTNU til beregningene. Vi har fått CPU tid av både NOTUR og lokalt av NTNU. Vi ville ikke klart å gjennomføre prosjektet vårt uten dette. Støttesystemene for Njord har fungert meget bra, og vi har fått god hjelp hele tiden.

Publikasjoner fra prosjektet

Eilertsen, R., Olsen, N. R. B., Ruether, N. and Zinke, P. (2008) "River bed changes in the Lake Øyeren delta distributaries over a three-year period (2004 - 2007) as revealed by interferometric multibeam", International Geological Congress (IGC2008) Oslo, Norway.

Feurich, R. and Olsen, N. R. B. (2011), Three-Dimensional Modeling of Nonuniform Sediment Transport in an S-shaped Channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137, 493 (2011); doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000321.

Feurich, R. and Olsen, N. R. B. (2010) "Computation of bed deformation in an S-shaped channel using 3D numerical simulation", 1st Conference of the European section of the IAHR, Edinburgh, Scotland.

Fischer-Antze, T., Ruether, N., Olsen, N. R. B and Gutknecht, D. (2009) "3D modeling of non-uniform sediment transport in a channel bend with unsteady flow", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No. 5, pp. 670-675.

Fischer-Antze, T., Olsen, N. R. B. and Gutknecht, D. (2008) "Three-dimensional CFD modeling of morphological bed changes in the Danube River", *Water Resources Research*, 44, W09422, doi:10.1029/2007WR006402.

Rüther, N., Jacobsen, J., Olsen, N. R. B. and Vatne, G. (2010) "Prediction of the three dimensional flow field and bed shear stresses in a regulated river in Mid-Norway", *Hydrology Research*, Vol, 41, No. 2, pp. 145-152.

Rueter, N., Olsen, N. R. B. and Eilertsen, R. (2008) "3D modeling of flow and sediment transport over natural dunes", *RiverFlow 2008, International Conference on Fluvial Hydraulics*, Cesme, Izmir, Turkey, Vol. 2, pp. 1479-1485.

Ruether, N. and Olsen, N. R. B. (2007) "Modelling free-forming meander evolution in a laboratory channel using three-dimensional computational fluid dynamics", *Geomorphology*, No. 89, pp. 308-319.

Zinke, P., Olsen, N. R. B. and Bogen, J. (2011), 3D numerical modeling of levee depositions in a Scandinavian freshwater delta, *Geomorphology* 129 (2011), pp. 320-333; doi:10.1016/j.geomorph.2011.02.027.

Zinke, P., Ruether, N., Olsen, N.R.B., Eilertsen, R.S. (2009) "3D Modelling of morphodynamics in deltas due to Hydropower regulation", Proc. of the Annual Conference on Hydraulic Engineering: "Water power and climate change", Dresdner Wasserbauliche Mitteilung, Technical University Dresden, Germany.

Zinke, P. and Olsen, N. R. B. (2009) "Numerical modeling of water and sediment flow in a delta with natural vegetation", 33rd IAHR Congress, Vancouver, Canada.

Zinke, P. (2009) "Hydrodynamic properties of delta vegetation in the context of 3D numerical modelling", 6th Int. Conference on River, Coastal and Estuary Modelling, Santa Fe, Argentina.

Zinke, P., Olsen, N. R. B. and Sukhodolova, T. (2008) "Modeling of hydraulics and morphodynamics in a vegetated river reach", RiverFlow 2008, International Conference on Fluvial Hydraulics, Cesme, Izmir, Turkey, Vol. 1, pp. 367-376.

Zinke, P., Olsen, N. R. B. and Ruether, N. (2008) "3D Modelling of the flow distribution in the delta of Lake Øyern (Norway)", International Conference on Hydroscience and Engineering, Nagoya, Japan, pp. 270-280.

Zinke, P., Olsen, N. R. B., Bogen, J. and Røther, N. (2010) "3D modelling of the flow distribution in the delta of Lake Øyern, Norway", Hydrology Research, Vol, 41, No. 2, pp. 92-103.

Zinke, P. and Olsen N.R.B. (2007) "Modeling of sediment deposition in a partly vegetated open channel", 32nd IAHR Congress, Venice, Italy.

Wilson, C. A. M. E., Guymer, I., Boxall, J. B. and Olsen, N. R. B. (2007) "Three-dimensional numerical simulation of solute transport in a meandering self-formed river channel", Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 5, pp. 610-616.

Planlagt publikasjon i tidsskrift med peer review:

Prosjektets doktorstudent har laget ferdig en artikkel om effekt av vannkraftreguleringen på geometrien i Øyern deltaet, som vil bli sendt inn i løpet av 2011. Vi planlegger også å lage en artikkel om modellering av bevegelser til sanddyner i Øyern-deltaet.