



# Analyse av dambruddsbølger

Grethe H Midttømme (red.)

12  
2009

R  
A  
P  
P  
O  
R  
T



# **Analyse av dambruddsbølger**

# Rapport nr. 12/2010

## Analyse av dambruddsbølger

**Utgitt av:** Norges vassdrags- og energidirektorat  
**Redaktør:** Grethe Holm Midttømme  
**Forfatter:** Wolf Marchand, Øyvind Lier, Hilde Marie Kjellesvig og Kjetil Vaskinn, Sweco

**Trykk:** NVEs hustrykkeri  
**Opplag:** 50  
**Forsidefoto:** Hallvard Berg, NVE

**ISSN:** 1501-2832  
**ISBN:** 978-82-410-0720-0

**Sammendrag:** Formålet med prosjektet har vært å forbedre kunnskap om og metodikk for dambruddsbølgeberegninger i forhold til dagens praksis og NVEs gjeldende krav. Bakgrunnen var erfaringer fra flommen i Trøndelag i 2006 som indikerte at NVEs retningslinjer ikke var godt nok tilpasset små og/eller erosjonsutsatte vassdrag.

Prosjektet har vist at erosjonsprosesser kan ha minst like store konsekvenser som selve dambruddsflommen, og at detaljeringsgrad mht terrengdata og valg av ruhet har betydning for resultatene i et vassdrag som Lauvsnesvassdraget. Det er også vist at resultatene fra bruk av 2D-modell kan avvike betydelig fra resultater fra 1D-modell.

Det gis anbefalinger for oppdatering av retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger.

**Emneord:** FoU-prosjekt, dambruddsbølgeberegninger, små vassdrag, erosjon

Norges vassdrags- og energidirektorat  
Postboks 5091 Majorstua  
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95  
Telefaks: 22 95 90 00  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

Juni 2010

# Innhold

<b>Forord</b> .....	<b>4</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Bakgrunn</b> .....	<b>7</b>
2.1 Beskrivelse av vassdraget .....	7
2.2 Teoretiske beregninger og flom 2006.....	9
<b>3 Mål</b> .....	<b>11</b>
<b>4 Gjennomføring</b> .....	<b>12</b>
4.1 Tema 1: Topografiske data .....	12
4.2 Tema 2: Endimensjonal (1D) kontra todimensjonal (2D) hydraulisk modell .....	12
4.3 Tema 3: Erosjonsprosesser .....	13
4.4 Tema 4: Følsomhetsanalyse for variasjon av ruhet i 1D-modellen	13
<b>5 Modellvalg</b> .....	<b>13</b>
<b>6 Inngangsdata</b> .....	<b>15</b>
6.1 Hydrologi/tilsig .....	15
6.2 Nedstrøms grensebetingelse .....	15
6.3 Oppstrøms grensebetingelse .....	15
6.4 Topografiske data .....	15
6.4.1 Simulering med grovere kartdata .....	17
6.5 Ruhet.....	19
<b>7 Modellbeskrivelse</b> .....	<b>19</b>
7.1 MIKE 11 .....	19
7.2 MIKE 21 .....	20
<b>8 Resultat</b> .....	<b>21</b>
8.1 1D-modell .....	21
8.1.1 Modellruhetens påvirkning på resultatet .....	21
8.2 2D-modell .....	21
8.2.1 Modellerte vannhastigheter .....	22
8.3 Betydningen av økt ruhet .....	23
8.4 Betydning av terrengmodellens nøyaktighet .....	23
8.5 MIKE 11 sammenlignet med MIKE 21.....	25
8.6 Erosjon .....	25
<b>9 Konklusjoner</b> .....	<b>27</b>
<b>10 Videre arbeid</b> .....	<b>28</b>
<b>11 Referanser</b> .....	<b>29</b>

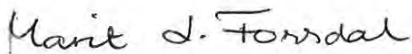
# Forord

NVE er de siste årene tilført midler for å støtte FoU-prosjekter med formål å utvikle teknologi og kunnskap for en mer effektiv utnyttelse av små vannkraftressurser. Midlene kan også benyttes til FoU-prosjekter innen opprustning og utvidelse av eksisterende større vannkraftverk eller til øvrige prosjekter for bevaring og videreutvikling av norsk vannkraftkompetanse.

De fleste prosjektene som er støttet er utført av konsulenter eller utdanningsinstitusjon (NTNU) på oppdrag fra NVE.

Denne rapporten er en av mange som er et resultat av disse bevilgningene.

Oslo, juni 2010



Marit Lundteigen Fossdal  
avdelingsdirektør



Torodd Jensen  
seksjonssjef

# Sammendrag

Formålet med prosjektet har vært å forbedre kunnskap om og metodikk for dambruddsbølgeberegninger i forhold til dagens praksis og NVEs gjeldende krav. Bakgrunnen var erfaringer fra flommen i Trøndelag i 2006 som indikerte at NVEs retningslinjer ikke var godt nok tilpasset små og/eller erosjonsutsatte vassdrag.

For å oppnå målet har det blitt jobbet med følgende temaer:

1. Betydningen av nøyaktighet i kartgrunnlaget for resultatene av en dambruddsbølgeberegning.
2. Forbedringer som kan oppnås ved å benytte 2D-modeller isteden for 1D-modeller.
3. Betydningen av erosjonsprosesser for resultatet i vannlinjeberegninger.
4. Følsomhetsanalyse for variasjon av ruhet i 1D-modellen.

Lauvsnesvassdraget har blitt brukt som eksempel i denne studien. Eksemplet illustrerer at dambruddsbølgeberegninger slik de utføres i dag kan være grovt unøyaktige. I tillegg viser eksemplet at erosjonsprosesser kan ha minst like store konsekvenser som selve flommen.

Mer nøyaktig modellering av terrenget gir større variasjoner i beregnet vannlinje. Maksimal avvik mellom detaljert og grov beregning er i størrelsesorden 0,4 m.

2D-modellering gir mer variasjoner av vannstanden. Avvik mellom 1D og 2D-modellen er i størrelsesorden 1,0 m. 2D-modellen gir et detaljert bilde av vannhastighet, i motsetning til 1D-modellen. Retningslinjene må justeres for å tilrettelegge for bruk av 2D-modeller.

Valg av ruhet (Manningstall) har stor påvirkning på beregnet vannlinje. Variasjon mellom  $M = 30$  og  $M = 16$  gir avvik på opp til 1,0 m.

Enkle betraktninger av beregnede vannhastigheter og stedlig skrånings- og bunnmateriale kan gi en god indikasjon på erosjonsfare. En enkel metode for beregning av erosjonsfaren bør inkluderes i retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger.

# 1 Innledning

Dambruddsbølgeberegninger benyttes som grunnlag for å lage beredskaps- og evakueringsplaner i vassdrag med dammer som er plassert i konsekvensklasse 2, 3 eller 4 i samsvar med forskrifter om sikkerhet ved vassdragsanlegg (OED 2010). Disse beregningene er også grunnlag for å klassifisere dammene, dersom det er vanskelig å vurdere bruddkonsekvenser vha kart, data om dam og magasin og enklere beregninger.

Dam Lauvsnesvatn er en ca. 3 m høy betongdam ved utløpet av Lauvsnesvatnet (HRV = 17,8 moh). Elveløpet fra dammen til utløpet i havet er ca. 800 m. Det er mye løsmasser i området og elva svinger seg kraftig ned mot sjøen. Sweco utførte dambruddsbølgeberegning for Lauvsnesvassdraget i 2003. I dagene 31. januar-2. februar 2006 opplevde dette vassdraget en flom som tilsvarte beregnet dimensjonerende flom ( $Q_{1000}$ ) ved dam Lauvsnesvatnet. Kort oppsummert genererte denne flommen vannstander i elva som var like, eller høyere, enn det Sweco hadde beregnet som maksimalvannstander med en dambruddsbølge, til tross for at maksimalvannføringen i dambruddsbølgen var beregnet å være ca dobbelt så stor som  $Q_{1000}$ . Under flommen ble det dessuten observert betydelig erosjon av elvebunn og sideskråninger, som medførte at en veifylling, to bruer og ei rørgate kollapset og ett hus ble sendt på fjorden. Erosjonsprosessene initiert av flommen forårsaket betydelig større skader enn flomskadene som var beskrevet som konsekvens av en dambruddsbølge. En mer detaljert sammenligning av dambruddsbølgeberegningen og den observerte flommen er gitt i kapittel 2.2.

Dagens retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger (NVE 2009) er utviklet med hensyn til typiske problemstillinger som gjelder for store dammer og/eller større vassdrag. Det forutsettes i tillegg at beregningsmodellen (terrengmodellen) er konstant, dvs at det tas ikke hensyn til erosjon i beregningene. En dambruddsbølgeberegning, der man bare vurderer/beregner hydraulikken i vassdraget, beskriver bare en begrenset del av det som virkelig skjer ved et dambrudd. I erosjonsutsatte vassdrag blir en slik dambruddsbølgeberegning utilstrekkelig (evt. misvisende), og er ikke et tilfredsstillende grunnlag for utarbeidelse av beredskapsplaner eller vurdering av bruddkonsekvenser for klassifisering av dammer. I mindre vassdrag med middels og små dammer, er det også sannsynlig at resultatene påvirkes sterkt av kvaliteten på terrengdata som er brukt i modellen.

Flommen i Lauvsnesvassdraget initierte en dialog mellom NVE og Sweco hvor begge parter ønsket å forbedre kunnskapen om dambruddsbølgeberegninger, om metoden generelt og spesielt hvordan den er tilpasset små og/eller erosjonsutsatte vassdrag. Ved hjelp av FoU-midler fra både NVE og Sweco ble et felles prosjekt innen det nevnte fagområdet startet. Sweco har gjennomført prosjektet med følgende personer: Wolf Marchand, Øyvind Lier, Hilde Marie Kjellesvig og Kjetil Vaskinn.

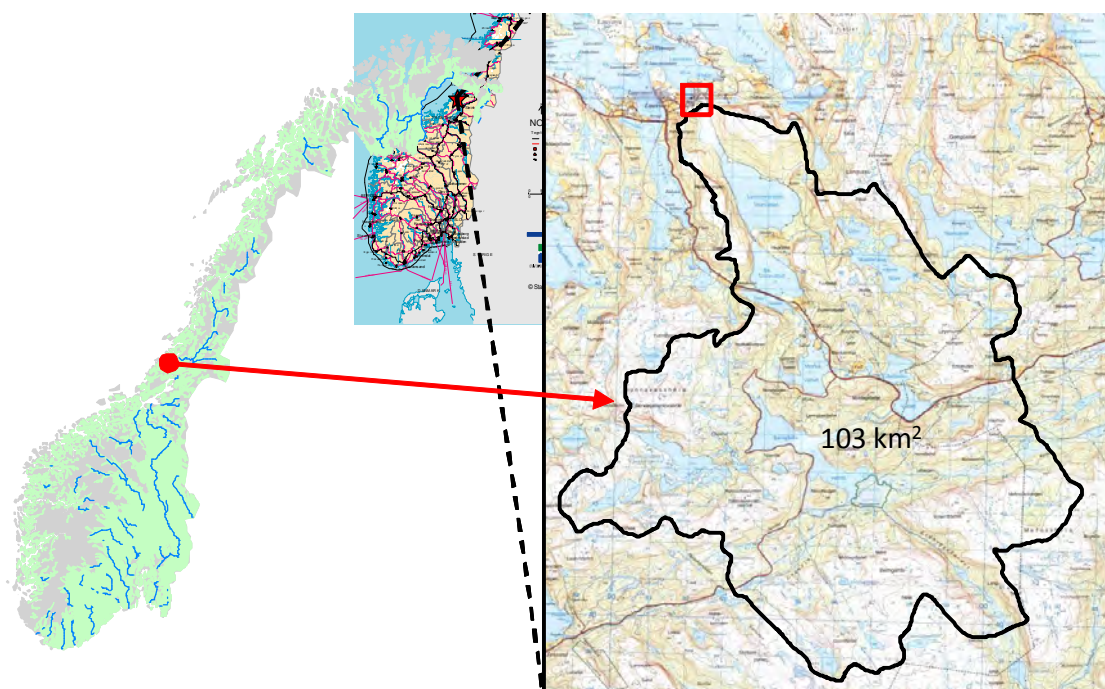
Grethe Holm Midttømme og Jan Slappgård har vært medvirkende og kontaktpersoner i NVE. Anne Marit Ruud og Ingebrigt Bævre fra Statkraft har vært med i referansegruppen.

## 2 Bakgrunn

### 2.1 Beskrivelse av vassdraget

Lauvsneselva fra dammen i Lauvsnesvatnet og ned til fjorden er brukt som eksempel vassdrag. Lauvsnesvatnet ligger nederst i Lauvsnesvassdraget i Flatanger kommune (Figur 2-1). Lauvsnesvatnet har et tilsigsareal på totalt 114 km<sup>2</sup> med en middelvannføring på ca 3,9 m<sup>3</sup>/s. Avløpet fra Lauvsnesvatnet går i en ca. 800 m lang elvestrekning ned til utløp i fjorden ca 1 km øst for Lauvsnes tettsted (Figur 2-3). Bilder av vassdraget er presentert i Vedlegg 1 til 3.

Datamaterialet fra dambruksbølgeberegningen i 2003 for dam Lauvsnesvatn (Figur 2-2) er brukt som basis for prosjektet. Videre eksisterer det god dokumentasjon av hva som skjedde under flommen i 2006. Lauvsnesvassdraget er et vassdrag der det potensielt kan skje betydelig erosjon under en flom.

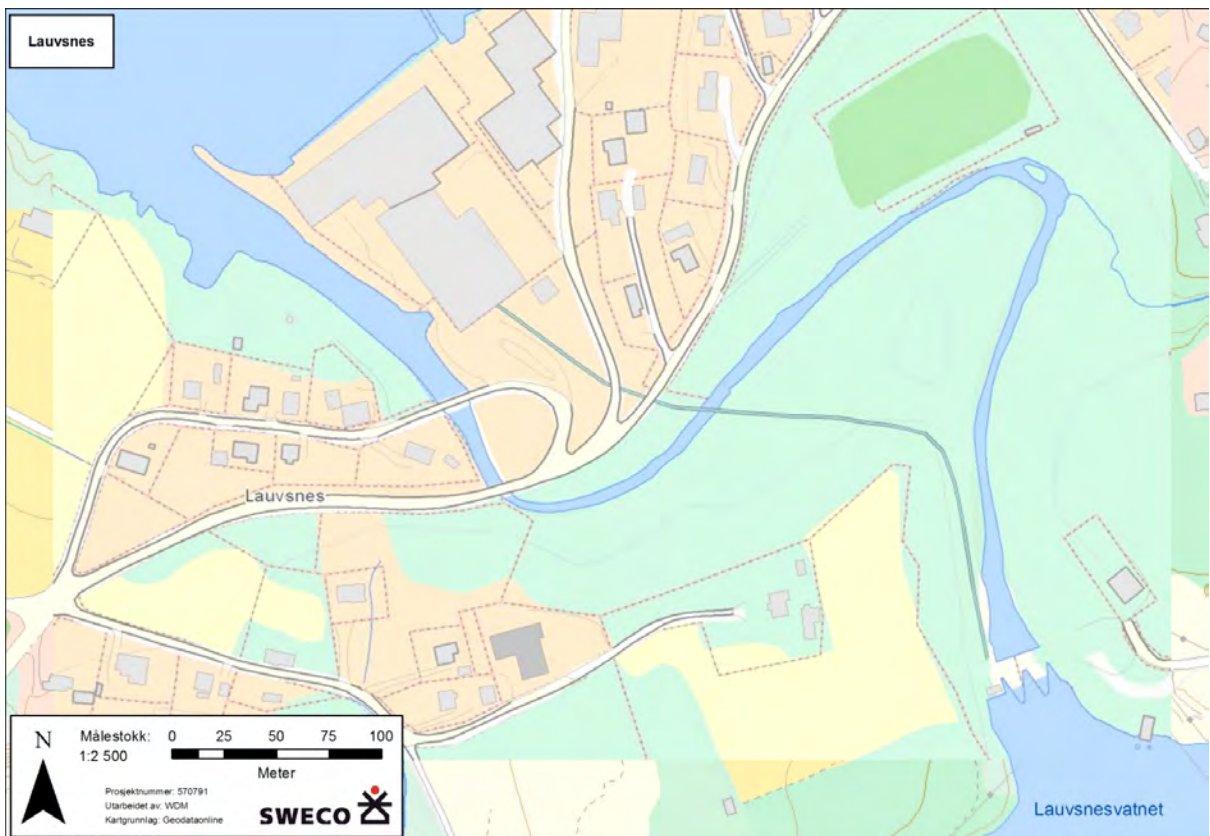


Figur 2-1 Beliggenhet og nedbørfelt til Lauvsnesvassdraget. Modellområdet er markert med rødt og vist i Figur 2-3.





Figur 2-2 Dam Lauvsnesvatn (Foto: Sweco)



Figur 2-3 Lauvsneselva med Lauvsnesvatnet, dam og utløp til havet.

## 2.2 Teoretiske beregninger og flom 2006

Som nevnt i innledningen var det forholdet mellom dambruddsbølgeberegning fra 2003 og observert flom 2006 en tankevekker som initierte dette forskningsprosjektet. Dette diskuteres nærmere her. Sentrale verdier for vannføring i elva og magasin vannstander er som følger:

$$Q_{\text{middel}} = 3,9 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (årsmiddelvannføring, NVE Atlas, 1961-1990)}$$

$$Q_{1000} = 138 \text{ m}^3/\text{s} \quad H = 1,23 \text{ m} \text{ (flomfrekvensanalyse 1993)}$$

$$Q_{1000+\text{DBBB}} = 282 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (DBBB 2003)}$$

$$Q_{\text{flom 2006}} = 136 \text{ m}^3/\text{s}, H = 1,15 \text{ m} \text{ (beregning NVE)}$$

Dimensjonerende flom for dam Lauvsnesvatnet tilsvarer  $Q_{1000}$ . Vannføringen som oppstod under flommen er i samme størrelsesorden som vannføringen beregnet i flomfrekvensanalysen fra 1993. I dambruddsbølgeberegningen i 2003 kom vannføringen fra dambruddet i tillegg til flomvannføringen. Den totale vannføringen brukt i dambruddsbølgeberegningen var dermed mye større (ca dobbelt så stor) enn flomvannføringen. Allikevel er forventede skader, som er listet opp i dambruddsbølgeberegningen, veldig moderate i forhold til skadene som faktisk oppstod under flommen 2006. Mye av skadene som oppsto skyldtes erosjon.

NVE har i etterkant av flommen gjennomført en ny flomfrekvensanalyse som førte til at den tidligere 1000-årsflommen nå er justert til ca. en 200-årsflom. Beregnede verdier er (NVE 2006):

$$Q_{200} = 136 \text{ m}^3/\text{s}$$

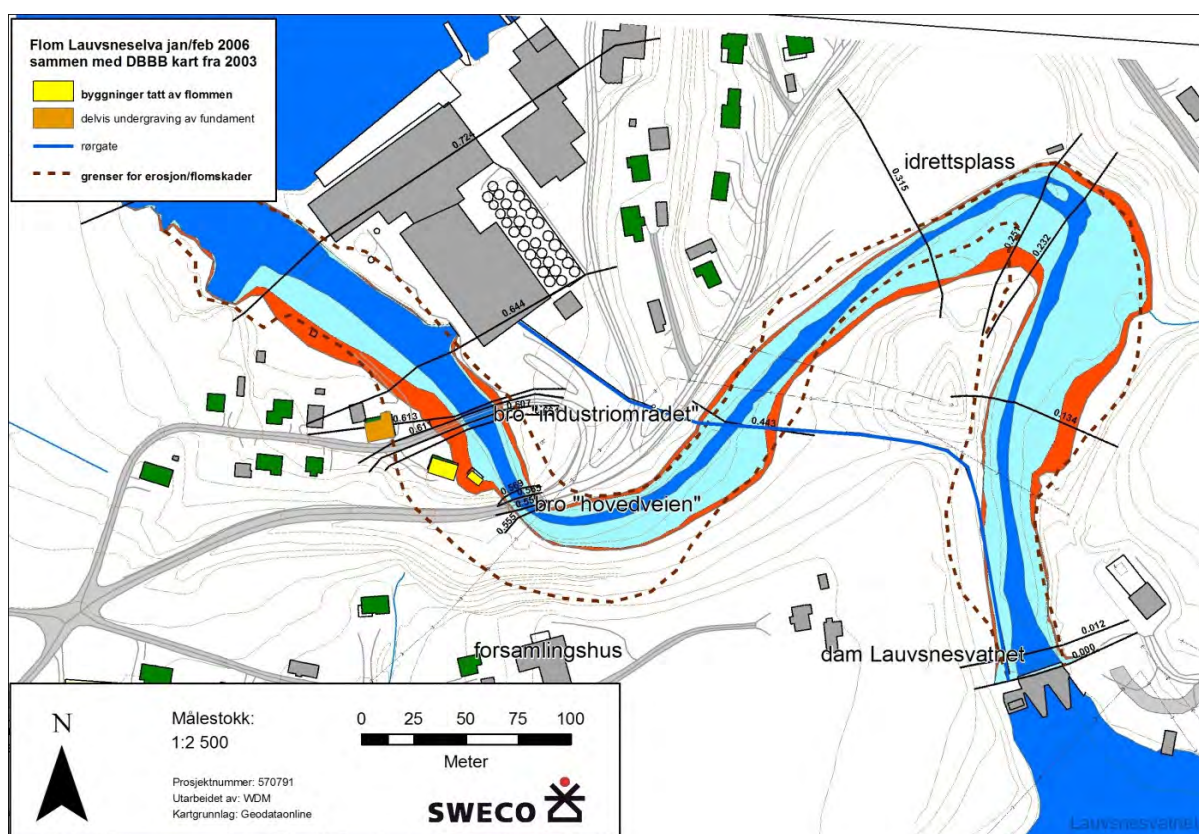
$$Q_{1000} = 179 \text{ m}^3/\text{s}$$

En kort oppsummering av noen viktige konklusjoner fra dambruddsbølgeberegningen 2003 er presentert i Tabell 2-1. De beregnede vannstander langs elva stemmer omtrent overens med vannstander som ble observert under flommen 2006. Mulig fare for erosjon er imidlertid bare nevnt i sammenheng med rørgata nedstrøms dammen. Her oppstod det faktisk erosjon som antatt, men ingen av de omfattende skadene langs elva for øvrig er kommentert eller forutsett. Siden den beregnede vannføringen for dambruddsbølgen inklusiv flom er ca dobbelt så stor som den observerte flommen, burde vannstanden i dambruddsbølgeberegningen ha vært høyere og skadeomfanget burde vært enda større.

En sammenligning mellom beregnet utbredelse av dambruddsbølgen og skader etter flommen i 2006 er presentert i Figur 2-4. Skadene er videre beskrevet ved hjelp av et flybilde i Figur 2-5.

Tabell 2-1 Forventede konsekvenser nevnt i rapport fra dambruddsbølgeberegningen 2003

Konstruksjon/infrastruktur	Kommentar
Rørgate nedstrøms dammen	Rørledning blir delvis oversvømt. Mulig fare for erosjon og undergraving av fundamenter.
Idrettsplass	Idrettsplassen blir ikke oversvømt ved dambrudd.
Rørgate krysser elva	Maksimal vannstand ca 0,15 m over underkant av rørgate.
Bru, lokal veg	Maksimal vannstand 2,1 m under underkant av brubjelker.
Bolighus, vestre side	Oversvømmelse inntil bolighus og uthus.
Bru på industriområde	Maksimal vannstand ca 0,2 m under underkant av brubjelker.



Figur 2-4 Kart fra dambruddsbølgeberegningen 2003 (blå og rød sone viser utbredelse av hhv Qdim og DBB) og skader fra flommen 2006 (erosjonsområder markert med stiplet strek)



Figur 2-5 Flybilde med skader fra flommen 2006

### 3 Mål

Formålet med prosjektet er å forbedre kunnskap om og metodikk for dambruddsbølgeberegninger i forhold til dagens praksis og NVEs gjeldende krav og anbefalinger. For å oppnå dette målet har det blitt jobbet med følgende fire tema:

1. Betydningen av nøyaktighet i kartgrunnlaget for resultatene av en dambruddsbølgeberegning.
2. Forbedringer som kan oppnås ved å benytte todimensjonale hydrauliske modeller (2D-modeller) isteden for endimensjonale hydrauliske modeller (1D-modeller).
3. Betydningen av erosjonsprosesser for resultatet i vannlinjeberegninger.
4. Følsomhetsanalyse for variasjon av ruhet i 1D-modellen. Dette tema var ikke med i den opprinnelige prosjektplanen, men en slik analyse er nødvendig for å undersøke om resultater fra dambruddsbølgeberegningen 2003 kunne har vært riktigere ved bruk av større ruhet.

# 4 Gjennomføring

I det følgende beskrives hva som har blitt gjort innen de definerte fire tema.

## 4.1 Tema 1: Topografiske data

*Betydningen av nøyaktighet i kartgrunnlaget for resultatene av en dambruddsbølgeberegning.*

Den opprinnelige planen var å produsere en ny digital terrengmodell (DTM) for beregningsstrekningen på grunnlag av tilgjengelig bildemateriale fra før flommen i 2006. Fylkeskartkontoret i Nord-Trøndelag hadde bekreftet at det skulle være mulig å konstruere en ny DTM med bedre nøyaktighet enn den DTM som ble benyttet som grunnlag for dambruddsbølgeberegningen i 2003. Planen var å ta utgangspunkt i flyfoto fra 2000, men dessverre var det for mye vegetasjon på flyfotoene.

Etter som terrenget ved Lauvsnesvassdraget ble forandret betraktelig under flommen og NVE har gjort omfattende forbygningsarbeid i ettertid, ble det nødvendig med en detaljert oppmåling av vassdraget etter avsluttet anleggsarbeid. Oppmåling ble gjennomført sommeren 2008 av Terratec, ved hjelp av laserskanning. Resultatet var en meget detaljert DTM til bruk i prosjektet (se Figur 6-2 og Figur 6-3).

For å kartlegge betydningen av nøyaktighet i kartgrunnlaget, ble dambruddsbølgeberegninger gjennomført på nytt med 1D-modell med geometrien fra detaljert DTM. Deretter ble detaljeringsgrad i DTM'en redusert, og en ny dambruddsbølgeberegning ble gjennomført med 1D-modell med geometrien fra den grovere DTM'en. Resultatene fra begge dambruddsbølgeberegningene ble sammenlignet.

## 4.2 Tema 2: Endimensjonal (1D) kontra todimensjonal (2D) hydraulisk modell

*Forbedringer som kan oppnås ved å benytte 2D-modeller isteden for 1D-modeller.*

Ved dambruddsmodellering er 1D-modeller ofte følsomme for endringer i inndata og kan fort bli ustabile, selv med små endringer. Erfaringer viser at ustabiliteten blir mindre ved bruk av 2D eller 3D-modeller. 3D-modeller krever imidlertid stor regnekapasitet og er kostbare. Videre er beliggenhet av vannstrømmen i 1D-modeller styrt av brukeren, mens en 2D-modell bestemmes vannstrømmen og oversvømt areal ut ifra en "nøytral" terrengmodell.

Som grunnlag for anskaffelse av 2D-modellen ble det gjort forundersøkelse mht. hvilke modeller som er best egnet til å simulere hydrauliske prosesser i et vassdrag ved flom og dambrudd. Etter valg og installasjon av modell ble en 2D-modell for Lauvsneselva satt opp (fra dam Lauvsnesvatn til utløp i fjorden). Dambruddsbølgeberegning for dam Lauvsnesvatnet ble utført på nytt med 2D-modellen og mest nøyaktige DTM. Resultater fra beregningen med 2D-modellen ble sammenlignet med resultater fra beregningen med 1D-modellen (fra Tema 1, detaljert 1D modell).

## 4.3 Tema 3: Erosjonsprosesser

### Betydningen av erosjonsprosesser under flom.

I fase 3 av dette prosjektet var planen å implementere en 2D-modell med funksjonalitet for å modellere både hydrodynamikk og erosjonsprosesser/materialtransport, med forbedret DTM for Lauvsneselva. Med en slik modell skulle en simulering av januar 2006-flommen i Lauvsneselva gjennomføres. En slik øvelse ville demonstrere i hvor stor grad det er mulig å beregne de totale konsekvensene av store flommer og vassdragsulykker som for eksempel dambrudd.

Det viste seg imidlertid at en full modellering av sedimenttransport og erosjon ville være for omfattende og dyrt (programvare) innenfor prosjektets rammer. Det samme ville også gjelde generelt for gjennomføring av dambruddsbølgeberegninger utenfor prosjektet. Det ble besluttet å undersøke om man med noen enkle betraktninger, av f.eks. vannhastighet og materialer i elvebunn, kunne forutse om det er fare for erosjon langs vassdraget.

## 4.4 Tema 4: Følsomhetsanalyse for variasjon av ruhet i 1D-modellen

Vannstander som var beregnet i dambruddsbølgeberegningen 2003 var for lave i forhold til observasjoner under flommen 2006. For å undersøke om resultater fra dambruddsbølgeberegningen 2003 kunne ha vært riktigere ved bruk av større ruhet, ble 1D-modellen kjørt med forskjellige ruheter. Større ruhet, dvs. mindre Manningstall vil gi økte vannstander. Følgende modellkjøringer ble sammenlignet:

- Manningstall  $M = 30$  (som brukt i den opprinnelige modellen fra DBBB 2003) ble sammenlignet med
- Manningstall  $M = 16$  (større ruhet)

## 5 Modellvalg

For å gjennomføre de planlagte beregningene var det nødvendig å anskaffe en hydraulisk 2D-modell (1D-modellen var allerede tilgjengelig). Det ble bestemt å fokusere på kommersielt tilgjengelige 2D-modeller, dvs. man så bort ifra modeller som bare benyttes i forskningssammenheng. Videre ble det stilt krav om at modellen må ha en dambruddsmodul og mulighet for kobling mot et geografisk informasjonssystem (GIS), slik at digitale kart kan benyttes både som inngangsdata og visualisering av oversvømt område. Aktuelle, tilgjengelige modeller er gitt i Tabell 5-1.

Av de fire modellene som er listet opp i Tabell 5-2 falt Wallingfords modell ut pga tungt brukergrensesnitt og Flo-2D pga at den er relativt uprøvd.

Delfts modell virket lovende, men har den en del begrensninger i forhold til hva slags grid man kan konstruere. Dette kan føre til meget lange beregningstider for omfattende modeller (Carrivick, 2006).

Tabell 5-1 2D-modeller, hentet fra ICOLD 1999 og oppdatert

Produsent	Modell	Oppdatert?
(IWHR), PR China	DBK 2	Ingen nyere informasjon
Royal Institute of Technology, Stockholm	COMSOL	Uegnet
Cemagref	RUBAR 20	Utvikling av program pågår
Delft Hydraulics	SOBEK/ DELFT 2 D	Ja, 2007
ENEL Centro di Ricerca Idraulica	FLOOD 2D	Ja, RESCDAM
Danish Hydraulic Institute	MIKE Flood	Ja, 2007
ETH Zürich	2D-MB	Ikke dambrudd
HR Wallingford	TELEMAC-2D	Ja
Flo 2D software inc	Flo 2D	Ja, 2006

Tabell 5-2 Aktuelle modeller, rangert etter kjennskap.

Navn/produsent	Pris	Tilgjengelige moduler	Kobling mot GIS
DHI MIKE Flood	168.000	MIKE 11, 21 og Urban, Hydrologi, Dambrudd, GIS	ja
Delft SOBEK (2D)	95.000	Hydrodynamikk 1D urban/rural, 2D rural, Hydrologi U/R, Real time: R	ja
HR Wallingford / Telemac		Sedimentmodul	ja
Flo-2D	15.000	Sedimentmodul	ja

MIKE Flood modellen består av MIKE 11 (1D) og MIKE 21 (2D). MIKE 21 har en bra metode for å konstruere gridet slik at det er mulig å oppnå bra nøyaktighet (høy oppløsning) i områder som er viktig og lav oppløsning i områder som er mindre viktig. Dette fører til kortere beregningstider, i forhold til høy opplysning for hele området. DHI sin MIKE 11 modell er mye benyttet i Norge og Sverige i forbindelse med dambruddsbølgeberegninger, og kompetansen på modellen er god i Sweco.

Med bakgrunn i disse vurderinger ble DHI sin Mike Flood modell valgt.

# 6 Inngangsdata

Både 1D og 2D-modellen bygger på samme grunnlagsdata (terreng, vannføring, ruhet, etc.). Grunnet modellenes karakter må inngangsdataene bearbeides forskjellig. Deretter tolker modellene dataene på ulike måter, avhengende av antall dimensjoner i modellen.

## 6.1 Hydrologi/tilsig

Inngangshydrogrammet er hentet fra den opprinnelige dambruddsbølgeberegningen (Sweco, 2003) som refererer til flomanalysen for Lauvsnesvassdraget (Ødegaard & Grøner AS, 1990). Det samme hydrogrammet brukes for begge modellene (1D og 2D).

I følge NVE (2009) skal dambruddsbølgeberegning gjennomføres for to ulike situasjoner:

1. Initialvannføring i vassdraget settes lik dimensjonerende flom ( $Q_{1000}$ )
2. Initialvannføring i vassdraget settes lik middelflom ( $Q_m$ )

I flomanalysen for Lauvsnesvassdraget er det beregnet dimensjonerende tilløpsflom ( $Q_{1000}$ ) til Lauvsnesvatn på grunnlag av en frekvensanalyse av observerte flommer ved vannmerke 138.1 Øyungen. Beregnet dimensjonerende tilløpsflom for Lauvsnesvatnet er vist i Figur 6-1. Kulminasjonsverdi er beregnet til  $147 \text{ m}^3/\text{s}$ .

I flomanalysen for Lauvsnesvassdraget er det ikke utført beregninger av middelflom for Lauvsnesvatnet. Middelflommen må derfor estimeres på annen måte.

Flomfrekvensanalysen for vannmerke 138.1 Øyungen gir et forholdstall mellom  $Q_{1000}$  og  $Q_m$  (middelflom) lik 3.1. Tilsigsfeltene til vannmerke 138.1 Øyungen og Lauvsnesvatnet har store likheter topografisk og morfologisk. Spesifikt avløp er hhv.  $51$  og  $46 \text{ l/s/km}^2$ , effektiv sjøprosent er hhv.  $1.2 \%$  og  $1.5 \%$ . En noe større effektiv sjøprosent skulle tilsi noe større flomdempning i Lauvsnesvassdraget enn i Øyungen, men forskjellen er antageligvis neglisjerbar.  $Q_m$  for Lauvsnesvatnet (tilløpsflom) blir da  $147/3,1 = 47,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 6.2 Nedstrøms grensebetingelse

Vannstand i sjøen nedstrøms modellstrekningen settes til  $0,0 \text{ moh}$ , som i den opprinnelige beregningen.

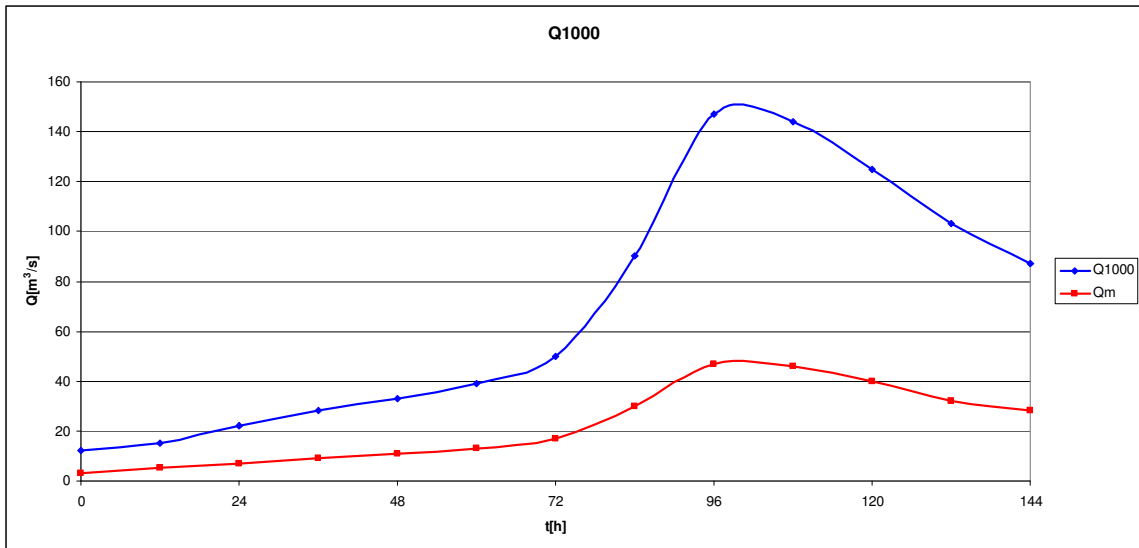
## 6.3 Oppstrøms grensebetingelse

Start av modellstrekningen legges til dammen som blir en naturlig oppstrøms grensebetingelse, dvs. kontroll via kritisk strømning.

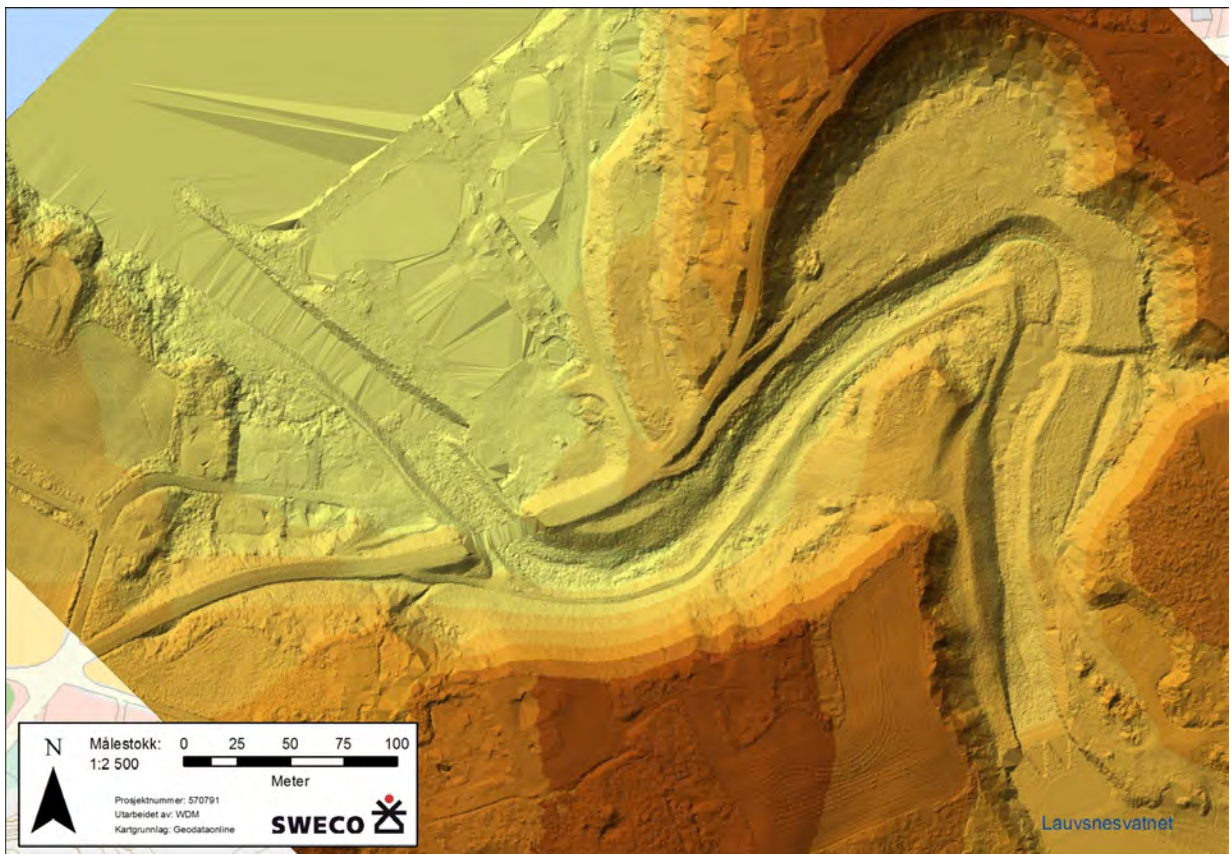
## 6.4 Topografiske data

Området ble laserscannet fra luften sommeren 2008 (Terratec). Denne oppmålingen resulterte i en punktsky av data med x, y og z koordinat. Dette datasettet ble brukt til å konstruere en triangulert terrengmodell (TIN) (Figur 6-2) og en raster terrengmodell (DEM) (Figur 6-3).





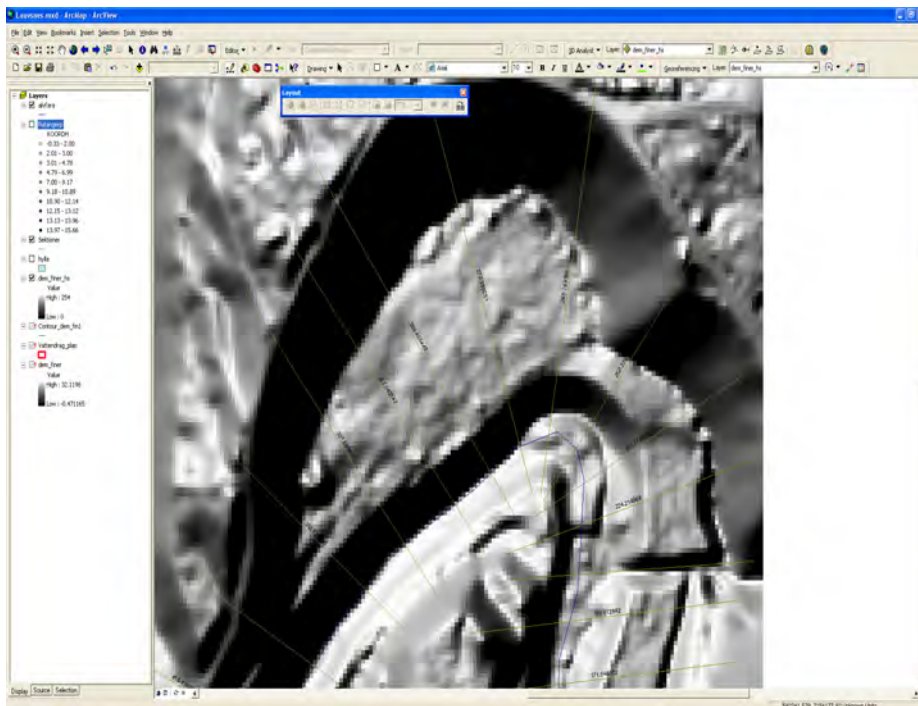
Figur 6-1 Hydrogram for tilløpsflom  $Q_{1000}$  og  $Q_m$  for Lauvsnesvatnet.  $Q_{1000}$  er  $147 \text{ m}^3/\text{s}$ .  $Q_m$  er  $47,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figur 6-2 Triangulært terrengmodell (TIN) utledet fra laserdata.

Terrengmodellen i Figur 6-2 viser tydelig at det har forekommet store flommer i dette vassdraget. De bratte gryteformede skråningene i nordøst (ved den tidligere idrettsplassen) ligger i rasvinkel og er et tegn på tidligere erosjon.

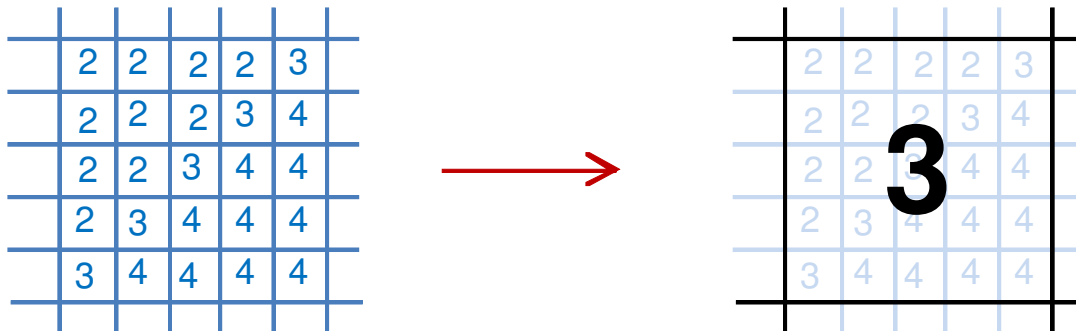
I MIKE 21 simuleringen kan terrengmodellen benyttes direkte, mens MIKE 11 forutsetter tverrprofiler som informasjon om topografien. En rekke tverrprofiler ble valgt ut (se Figur 6-3) og en modellfil generert ut ifra disse.



Figur 6-3 Raster terrengmodell (DEM) utledet fra laserdata og tverrprofiler langs elva.

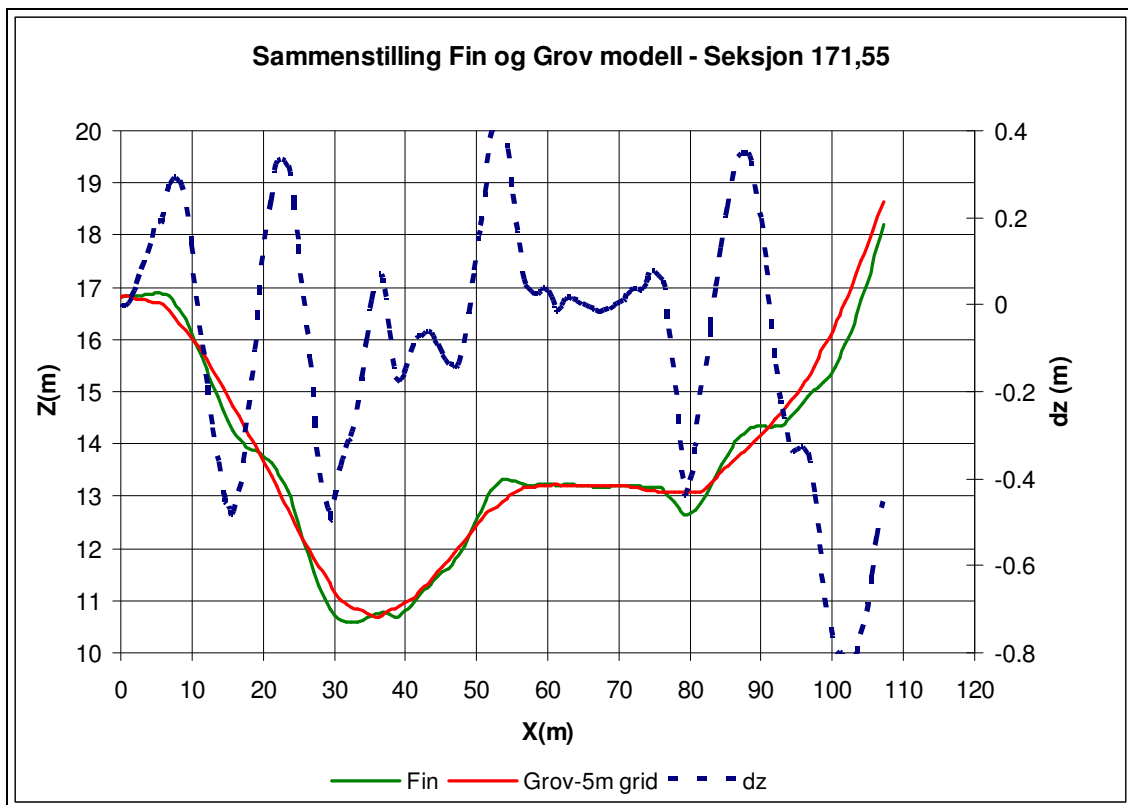
#### 6.4.1 Simulering med grovere kartdata

For mange norske vassdrag er tilgjengeligheten til gode digitale topografiske data begrenset. For å simulere topografisk modellering i vassdrag som har en grovere kartlegging, ble en alternativ terrengmodellens opprettet, der oppløsningen ble redusert til 5 meter, tilsvarende eksempelet i Figur 6-4.



Figur 6-4 Eksempel på reduksjon av oppløsning, her erstattes 5x5 gridceller med en gjennomsnittsverdi.

I grafene under kan man se et vilkårlig profil, 171.55, der profilet fra laserscanningen er sammenlignet med en simulert 5-meters modell. Summert over profilet er ikke avviket stort (-9 cm), men enkeltavvikene er forholdsvis store (over 80 cm).



Figur 6-5 Profiler for 171,55. Superposisjonering av profilene (rød og grønn linje) og avvik over profilet (blå stiptet linje).

## 6.5 Ruhet

I den opprinnelige dambruddsbølgeberegningen ble Mannings M satt til 30, som er en vanlig ruhet for elver med lite sidevegetasjon eller større steiner.

I et forsøk på å gjenskape vannstander som ble observert under flommen ble ruheten økt ved å sette Mannings M til 16 for hele modellstrekningen. Dette er en ruhet som gjenspeiler at det finnes større steiner i elveleiet, samt noe kantvegetasjon. Når det gjelder 1D-modellering brukes også friksjonsruheten til å kompensere indirekte for andre typer ruhet (typisk turbulenser) som modellen ikke direkte kan ta hensyn til.

# 7 Modellbeskrivelse

Den benyttede modellen, MIKE Flood fra DHI, er en kobling av en 1D-modell (MIKE 11) og en 2D-modell (MIKE 21). Formålet med å koble disse to modeller sammen er at den mest hensiktsmessige modelleringsmåten kan brukes etter behov. For eksempel kan trange kanalformede elveløp med fordel modelleres endimensjonalt, mens vide flomsletter modelleres best med todimensjonale modeller. En viktig forskjell er at ved endimensjonal modellering må brukeren på forhånd bestemme hvor vannet skal strømme, siden tverrprofiler må etableres før hydrauliske beregninger kan gjennomføres. Bestemmelse av relevante tverrprofiler kan være vanskelig for flomsletter. Ved todimensjonale modeller bestemmes beliggenhet av vannstrømmen i modellen ut ifra terrengmodellen, dvs. uten direkte medvirkning av brukeren.

De to modellene skiller seg i hvilken teori som ligger til grunn i modelleringen og hvilke algoritmer som benyttes i løsningen av det underliggende formelverket. Noen av de viktigste forutsetninger for begge modeller er beskrevet i de to følgende avsnitt. For mer detaljert informasjon om modellene henvises det til DHI (2007) og DHI (2008).

## 7.1 MIKE 11

Modellen ble satt opp med profiler og grensebetingelser som nevnt ovenfor. Tidsskrittet på beregningene var 30 sekunder og resultatene uten større avvik.

Hvor nøyaktig en 1D-modell er, bestemmes mye av hvordan den håndterer St. Venant likninger om moment-konservering.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(I_x - I_f) = 0$$

Da modellen er kvasi-statisk gjøres det en del tilnærminger, slik at likningen for underkritisk strømning blir som følger.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

Strømlinjene forutsettes vinkelrett på tverrseksjonene.

## 7.2 MIKE 21

MIKE 21 deler vannmassene inn i vertikale vannprofil (integrerer over elvens tverrsnitt). Deretter benytter 2D-modellen Navier-Stokes formler for å beregne fordeling av vannmassene, de resulterende hastigheter etc. Hastigheten beregnes som et gjennomsnitt i hver vertikal seksjon. Derfor beregnes momentet også bare av en gjennomsnittlig verdi. Friksjon og turbulens beregnes i 2 dimensjoner (x,y).

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{p^2}{h})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{pq}{h} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q + fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

Etter Mike21HD, Scientific Documentation, 2008, kan leddene i likningen forklares i rekkefølge som:

1. Endring av avrenning per tidsenhet
2. Moment i x-retning
3. Moment i y-retning
4. Stasjonært vanntrykk
5. Friksjonsledd
6. Trykkledd som kommuniserer mellom cellene.
7. Koreolis-kraft
8. Vindfriksjon
9. Endring av vannstrøm over vannprofil.

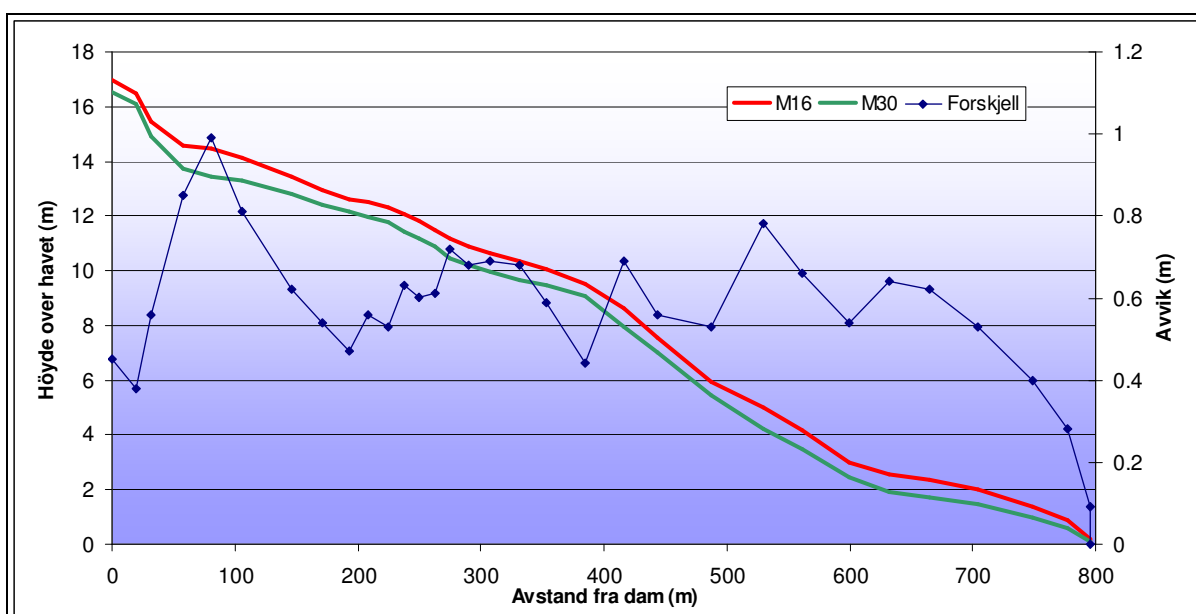
# 8 Resultat

## 8.1 1D-modell

MIKE 11 gir en vannlinje, dvs nivået på vannoverflaten i hvert tverrprofil som ble valgt ut fra terrengmodellen. Vannstanden kan sees som et gjennomsnitt i det gjeldende tverrprofilet.

### 8.1.1 Modellruhetens påvirkning på resultatet

Virkning av elvebunnens ruhet i modellen endres ved å velge ulike verdier på Mannings M. For å undersøke hvilken effekt ruheten har på resultatet ble modellen kjørt med  $M=16$  (som tilsvarer en relativt ru overflate) og med  $M=30$  (relativt vanlig verdi for elvestrekninger). Ved å velge  $M=16$  stemte den opprinnelige modellen bedre med de vannstander som ble observert under flommen i 2006.



Figur 8-1 Sammenligning mellom de to kjøringene i MIKE 11 med  $M=16$  (rød) og  $M=30$  (grønn). Forskjellen mellom resultatene er i blått, med verdier på andreaksen

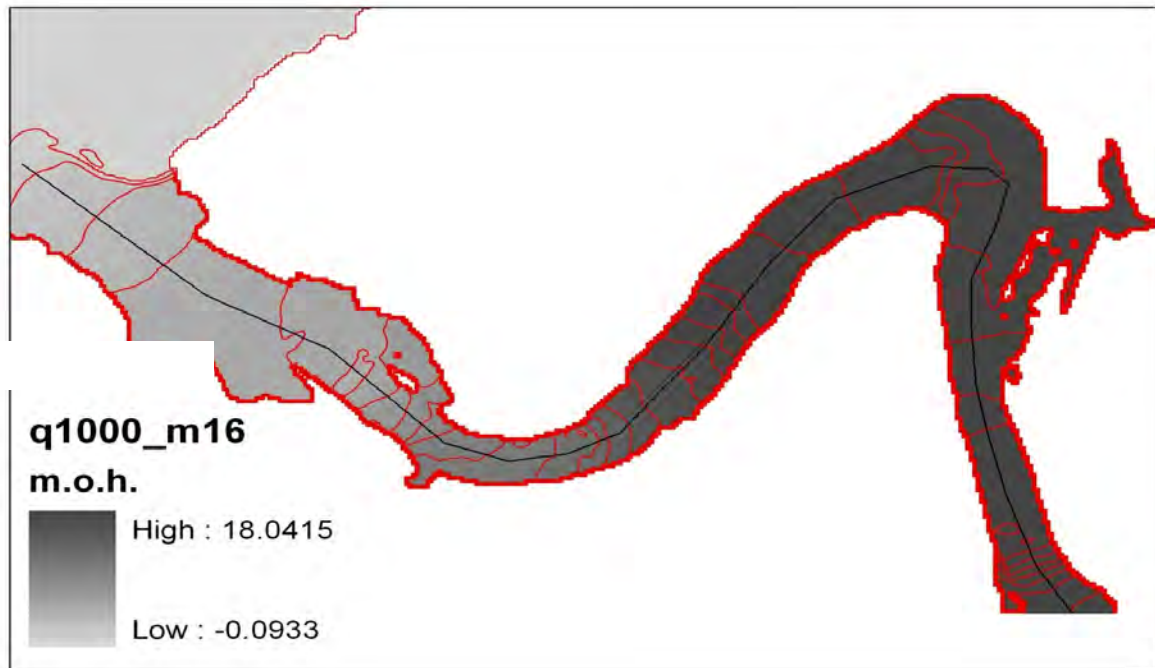
Som man kan se i Figur 8-1 påvirker ruheten modellens resultat ensidig. Ved  $M=16$  ligger vannflaten høyere enn ved  $M=30$ . Dette er som forventet, siden økt ruhet betyr mindre hastighet og dermed behov for mer tverrsnittsareal for å avlede samme vannmengde. Det som er interessant er størrelsesordenen på avviket mellom de to modelleringene. Avviket er stort sett større enn 0,5 m og ved noen profiler opp til 1 m.

## 8.2 2D-modell

MIKE 21 utvider beregningsgrunnlaget til å inkludere elvens bunntopografi i to dimensjoner. Dette gjør at man ikke lenger ser på elven i bestemte tverrsnittsprofiler som

MIKE 11 gjør. Dette resulterer i at oppsettet av modellen blir mer objektiv, da vannet påvirkes kontinuerlig av bunntopografien og denne prosessen er ikke styrt av personen som setter opp modellen.

Resultatet fra den hydrauliske beregningen blir gitt for overflaten av elva i to dimensjoner og som man ser i figuren under gjør dette at gradienten i vannoverflaten ikke nødvendigvis ligger vinkelrett på elvens retning.



Figur 8-2 Overflate på elven i m.o.h. Konturer i rødt markerer isolinjer for vannoverflaten.

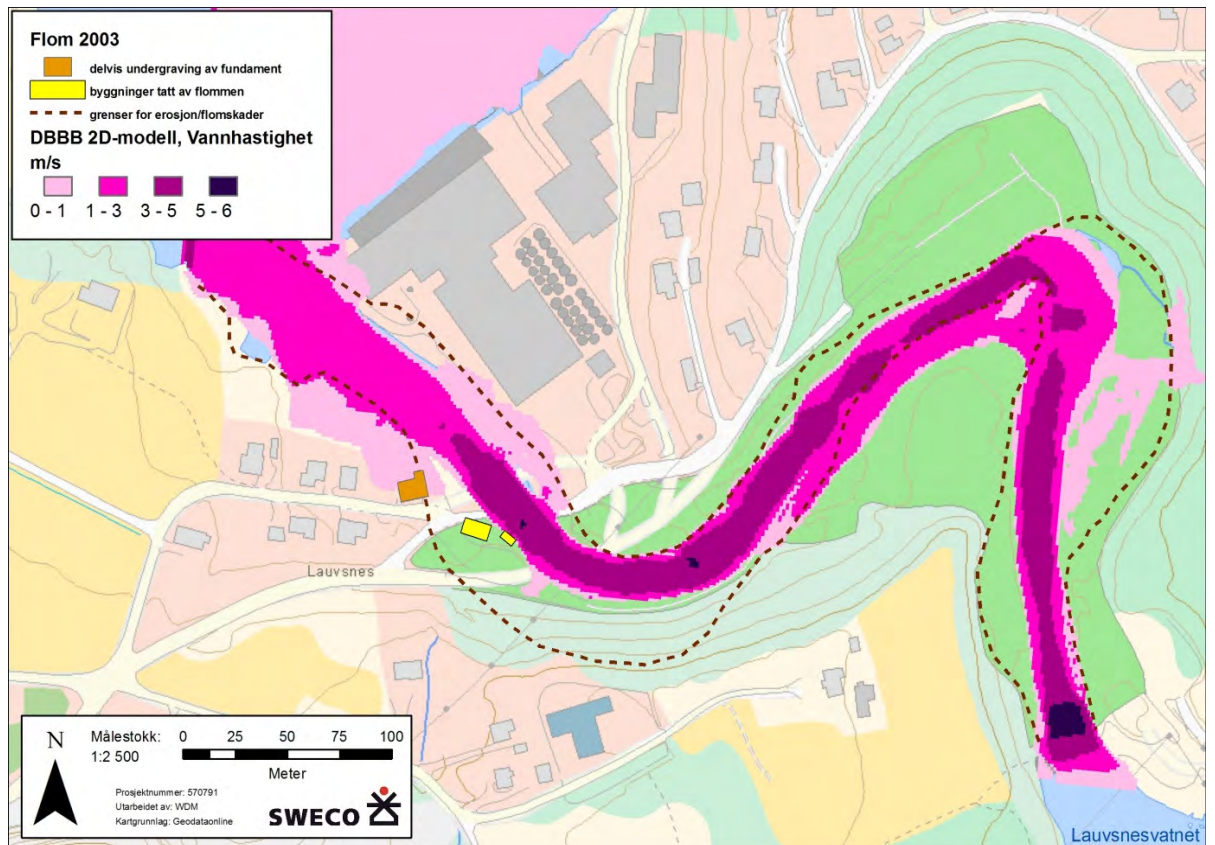
For å kunne sammenligne verdiene mellom modellene i en enkel graf, er resultatet for MIKE 21 modellen forenklet gjennom å se på verdiene langs elvens senterlinje. Resultatet kan sees i Figur 8-7.

### 8.2.1 Modellerte vannhastigheter

MIKE 21 gir hastighet i to vektorplan. I dette tilfellet er vi kun interesserte i resultatanten, da det er denne som gir flombølgens påvirkning på omgivelsene. Denne er beregnet som

$$v_{\text{resultant}} = \sqrt{v_x^2 + u_y^2}$$

Hastighetsfordelingen langs elva er vist i Figur 8-4. Som man kan se har området ovenfor og nedenfor broen høyere hastigheter enn ellers i elvestrekningen, utenom rett nedstrøms dammen. Dette bidrar til å forklare de store erosjonsskader i dette området, hvor begge bruer og flere bygninger ble erodert bort samt at den store skråningen mot samfunnshuset ble betydelig utgravd.



Figur 8-3 Resulterende hastigheter langs elva fra 2D-modellen og skader fra flommen 2003.

En annen interessant observasjon er at hastighetsfordelingen i profilene ikke direkte er koblet mot vannflaten. Ett eksempel, se tverrprofilen merket med svart ring i Figur 8-4, viser en profilgraf med superelevasjon på 25 cm i en yttersving. Om man sammenlikner dette med hastighetsfeltet kan man ikke se noe sammenheng.

### 8.3 Betydningen av økt ruhet

Forskjellen i resultatet for Mannings  $M=30$  og  $M=16$  er tydelig. En del nye oversvømte områder tilkommer når ruheten øker fra 30 til 16, samt at vannstanden generelt er litt høyere. Oversvømmelsene blir som vist i Figur 8-5.

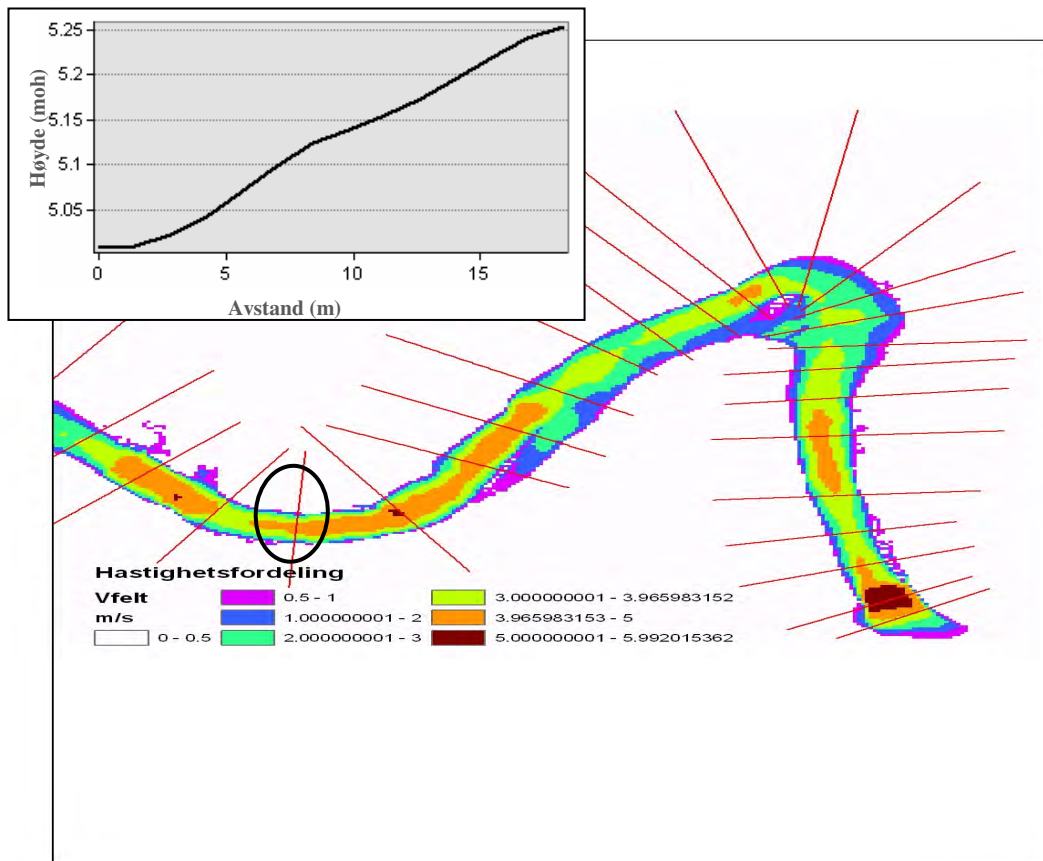
### 8.4 Betydning av terrengmodellens nøyaktighet

Som vist tidligere, simulerer vi et dårligere kartgrunnlag med en grovere terrengmodell.

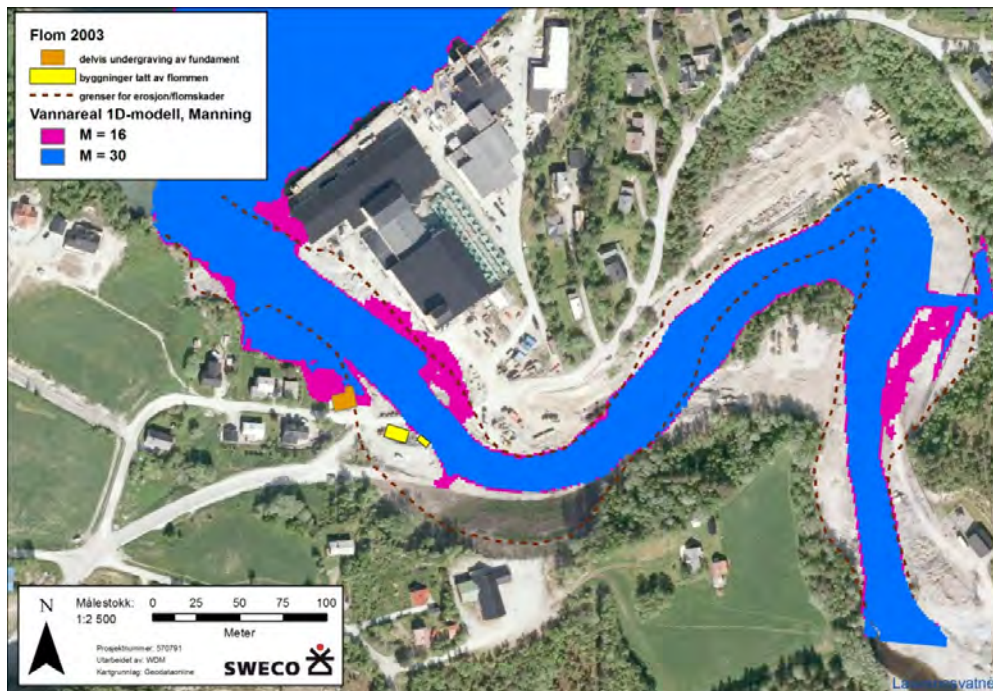
MIKE 11 er deretter kjørt med underlaget fra terrengmodellen med 5 meters oppløsning og sammenlignes deretter med resultatene fra den finere modellen.

Resultatet vises i Figur 8-6, og som man kan se er avvikene størst øverst i strekningen med et resulterende avvik på 35 cm.

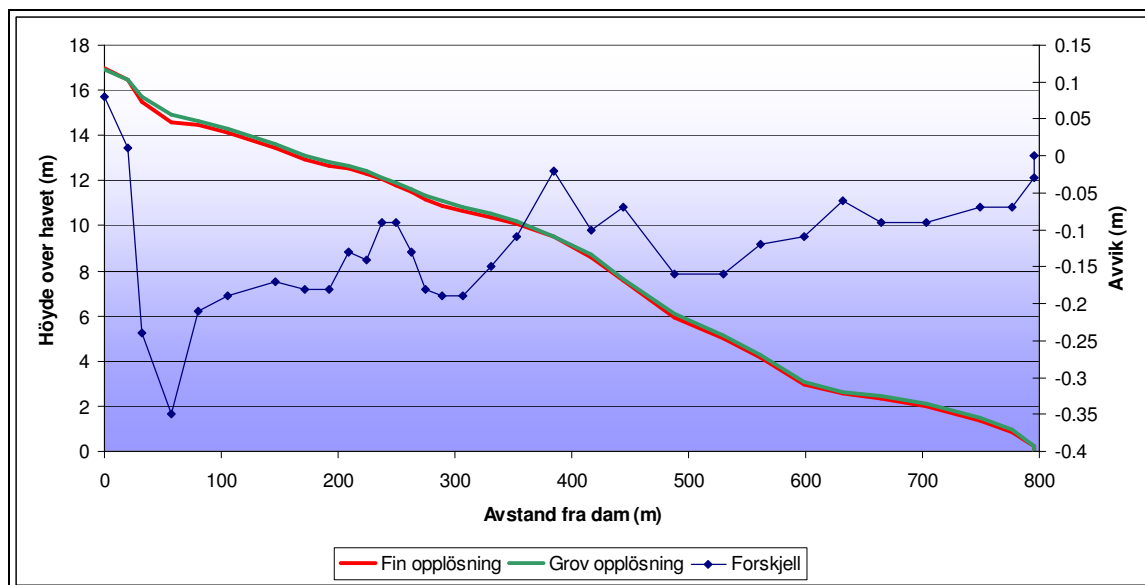




Figur 8-4 Resulterende hastigheter langs elva og tverrprofiler. Profilgraf øverst til venstre viser vannflatens høyde over havet (m) for tverrprofilen som er merket med en svart ring. X-aksen er profilens lengde fra venstre til høyre, sett fra nedstrøms side (m).



Figur 8-5 Sammenligning av oversvømt området (1D-modell) med Manningstall M=16 og M=30.



Figur 8-6 MIKE 11 modell med fin (rød) og grov (grønn) terrengmodell.

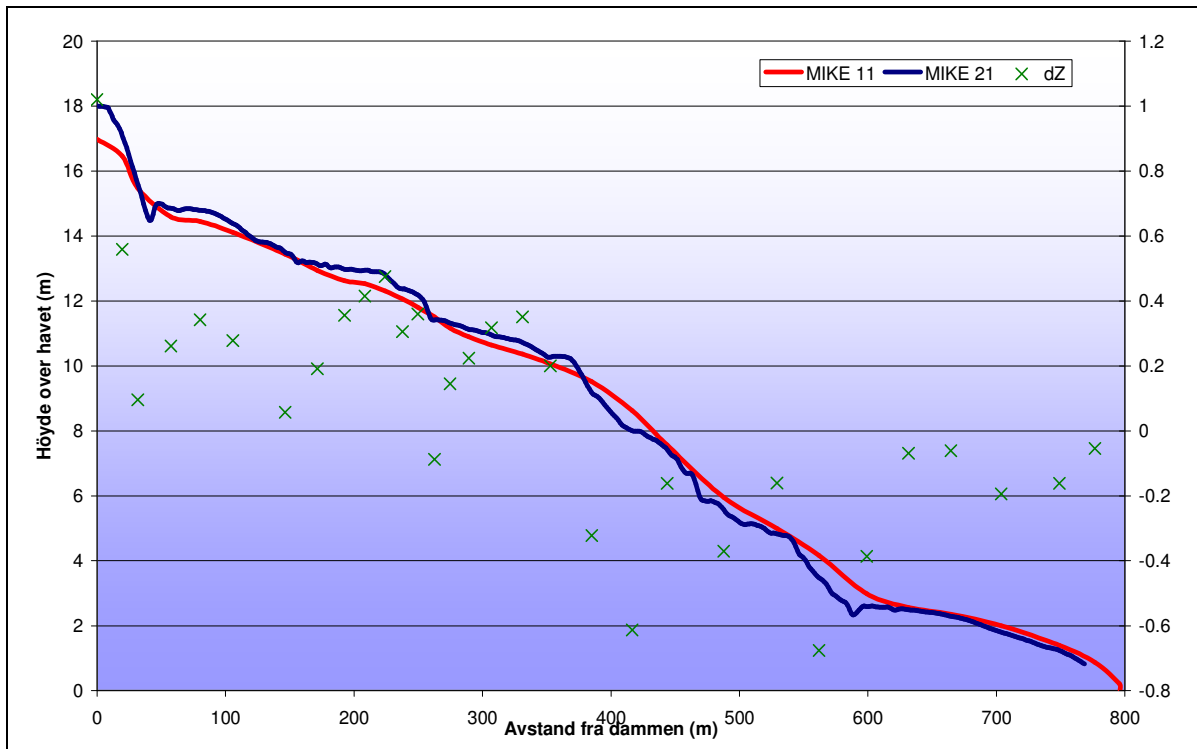
## 8.5 MIKE 11 sammenlignet med MIKE 21

Resultatene fra MIKE 11 og MIKE 21 med samme inndata er superposisjonert for sammenligning (Figur 8-7). For begge modeller er Manningstall 16 og  $Q_{1000}$  brukt i beregningen.

Resultatet viser at MIKE 21 gir høyere vannstand i den øvre delen av strekningen, mens MIKE 11 har en høyere vannstand i den lavere delen.

## 8.6 Erosjon

I flommen 2006 forekom det stedvis mye erosjon. I svingen ned mot broen er modellerte vannhastighetene over 3 m/s (opp mot 6 m/s i midten av elva). Om man beregner minimum størrelse på steinen på ytterkant/venstre elvebredd vil denne være forholdsvis stor. HEC-11 metoden gir  $d_{50}$  på 0,4 meter. Om man tar hensyn til at materialet ligger i en yttersving og i tillegg ønsker sikkerhetsfaktorer må steinstørrelsen være enda større, for å unngå å bli erodert bort.



Figur 8-7 MIKE 11 (rød) sammenlignet med MIKE 21 (blå) modell. Avvik er plottet som kryss (grønne) på den sekundære akse.

## 9 Konklusjoner

Flommer og dambruddsbølger er hendelser med stort potensial for både menneskelige, materielle og økonomiske skader. Økt kunnskap rundt modellering og håndtering av slike hendelser vil gi økt sikkerhet. Eksemplet fra Lauvsnes illustrerer at dambruddsbølgeberegninger slik de utføres i dag kan være grovt unøyaktige. I tillegg viser eksemplet at erosjonsprosesser kan ha minst like store konsekvenser som selve flommen.

Mer nøyaktig modellering av terrenget gir større variasjoner i beregnet vannlinje. Maksimal høydeforskjell mellom detaljert og grov beregning er i størrelsesorden 0,4 m. Denne verdien er imidlertid metodeavhengig, dvs. avhengig av hvordan en mindre detaljert modell defineres.

2D-modellering gir mer variasjoner i vannstanden enn 1D-modellering. Avvik mellom 1D og 2D-modellen er i størrelsesorden 1,0 m. 2D-modellen gir et detaljert bilde av vannhastighet, i motsetning til 1D-modellen.

Valg av ruhet (Manningstall) har stor påvirkning på beregnet vannlinje. Variasjon mellom  $M = 30$  og  $M = 16$  gir avvik på opp til 1,0 m.

Variasjonene, om man ser hver faktor isolert, er ikke store i gjennomsnitt, men med betydelige lokale avvik.

Resulterende maksimal variasjon i vannstanden under modelleringen kan oppsummeres som følger:

- Valg av ruhet ( $M=16$  eller  $M=30$ ): 1,0 meter
- Valg av terrengmodell: 0,4 m
- Modellvalg (1D eller 2D): 1,0 meter

En enkel vurdering av gjennomsnittshastigheter og steinstørrelser kan benyttes for å indikere erosjonsfare i utsatte deler av elva. Det er enklest å bruke resultater fra 2D-modellen til en slik vurdering, siden denne modellen viser fordeling av hastigheter mer detaljert enn 1D-modellen.

Retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger (NVE 2009) sier følgende om erosjon:

*"...det ikke skal regnes med profilendringer pga erosjon."* Dette er akseptabelt, siden en beregning med profilendringer ville kreve en meget omfattende modellering, og fordi enkle betraktninger kan gi et tilstrekkelig svar.

Videre beskriver retningslinjen hva en rapport fra en dambruddsbølgeberegning må inneholde, bl.a.: *"Vurdering av behov for videre analyser, samt beskrivelse av andre fareområder – for eksempel spesielle erosjons- og rasfarlige områder, samt kartlagte områder med stor usikkerhet."* Dette betyr i praksis at en enkel beregning av erosjonsfaren må inkluderes i beregningene.

Konklusjonene fra dette prosjektet gjelder generelt, men betydningen av de forskjellige forholdene som er vurdert vil naturligvis variere fra vassdrag til vassdrag.

# 10 Videre arbeid

Utviklingen innen hydrauliske modeller går stadig fremover, og det finnes muligens flere alternative beregningsverktøy. En sammenligning av flere alternative beregningsverktøy ville være av interesse.

Resultater presentert i denne analysen er spesifikk for en elv. Lauvsneselva er sterkt påvirket av forbygningsarbeidet som har blitt gjennomført etter flommen i 2006 og dette vil påvirke resultatene. Før man kan overføre erfaringer fra analyser for Lauvsnes til andre elver, er det nødvendig med beregninger for flere elver med varierende karakteristikk. Lauvsneselva mangler også store flomsletter og det ville være interessant å modellere en elv med slike flomsletter. Antageligvis ville 2D-modellering i en slik elv være enda mer fordelaktig enn i Lauvsneselva.

Retningslinjene for dambruddsbølgeberegningen (2009) er ikke tilrettelagt for bruk av 2D-modeller. Kravet for presentasjon av beregningsresultatene er basert på tverrprofiler langs elva og det er lite hensiktsmessig å redusere resultater fra en 2D-modell til tverrprofiler. Her er det nødvendig med en diskusjon og en gjennomgang av retningslinjene for å fastslå hvilke endringene som er nødvendig for å tilrettelegge for bruken av 2D-modeller.

# 11 Referanser

- OED (2010). Forskrifter om sikkerhet ved vassdragsanlegg.
- NVE (2006). Flomfrekvensanalyse for Lauvsnesvassdraget, Oppdragsrapport A nr 8-2006, forf. B. Sæther, Norges vassdrags- og energidirektorat
- NVE (2009). Retningslinjer for dambruddsbølgeberegninger, Norges vassdrags- og energidirektorat
- Sweco Grøner (2003). Dambruddsbølgeberegning for Dam Lauvsnesvatn, prosjekt nummer 562341
- DHI (2007). Hydraulic Reference Manual, MIKE 11
- DHI (2008). Hydraulic Reference Manual, MIKE 21
- Carrivick (2006). Application of 2D hydrodynamic modeling to high-magnitude outburst floods. An example from Kverkfjöll, Iceland.



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

## Utgitt i Rapportserien i 2010

- Nr. 1 Tor Arnt Johnsen (red.): Kvartalsrapport for kraftmarkedet. 4. kvartal 2009
- Nr. 2 Tilgangen til fornybar energi i Norge - et innspill til Klimakur 2020 (30 s.)
- Nr. 3 Klimagassutslipp fra fjernvarme: Tiltak og virkemidler- et innspill til Klimakur 2020 (30 s.)
- Nr. 4 Tiltak og virkemidler for redusert utslipp av klimagasser fra norske bygninger - et innspill til Klimakur 2020 (120 s.)
- Nr. 5 Årsrapport for tilsyn 2009 (30 s.)
- Nr. 6 Klimautfordringer i kraftsektoren frem mot 2100. Sammendragsrapport (13 s.)
- Nr. 7 Thomas Skaugen (red.) Norges hydrologiske stasjonsnett –analyse og strategi (56 s.)
- Nr. 8 Kulturminner i vassdrag. Flom- og erosjonssikring, kanaler og miljøtiltak (96 s.)
- Nr. 9 Jørn Opdahl, Hervé Colleuille: Landsomfattende mark- og grunnvannsnett. Drift og formidling 2009 (39 s.)
- Nr. 10 Tor Arnt Johnsen (red.): Kvartalsrapport for kraftmarkedet. 1. kvartal 2010
- Nr. 11 Anne Haugum (red.): Årsrapport for utførte sikrings- og miljøtiltak i 2009 (45 s.)
- Nr. 12 Grethe H Midttømme (red.): Analyse av dambruddsbølger





Norges  
vassdrags- og  
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29  
Postboks 5091 Majorstuen,  
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

