



# Skred i magasin - overtopping av fyllingsdam fra skredgenererte bølger i magasin

Oppsummering av modellforsøk i Vassdragslaboratoriet  
på NTNU og numeriske simuleringer utført av NGI

*Eirik Øvregård og Leif Lia*

66  
2018



R  
A  
P  
P  
O  
R  
T

## Rapport nr 66-2018

# Skred i magasin - overtopping av fyllingsdam fra skredgenererte bølger i magasin

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

**Redaktør:**

**Forfattere:** Eirik Øvregård og Leif Lia

**Trykk:** NVEs hustrykkeri

**Opplag:**

**Forsidefoto:** Roar Sivertsgård, NVE

**ISBN** 978-82-410-1721-6

**ISSN** 1501-2832

**Sammendrag:** Målet med FOU-prosjektet har vært å få mer kunnskap om bølgeopp skylking fra skred i magasin for fyllingsdammer, deriblant å utvikle en konkret metode for å beregne hvilke konsekvenser en overskylling har på fyllingsdammens sikkerhet. Fysiske modellforsøk på vassdragslaboratoriet ved NTNU ble sammenlignet med resultater fra numeriske simuleringer utført av NGI. Prosjektet viste bl.a. at NGIs numeriske bølgemodeller kan benyttes for beregning av overtopping av fyllingsdammer.

**Emneord:** Skred, magasin, bølge, bølgeopp skylking, fyllingsdam, modellforsøk, damsikkerhet

Norges vassdrags- og energidirektorat  
Middelthunsgate 29  
Postboks 5091 Majorstua  
0301 OSLO

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

## FORORD

Noen norske dammer er plassert i områder der det er fare for skred ned i magasinet. Ved kontroll av sikkerheten ved disse dammene må det gjøres vurderinger av om skredgenererte bølger kan skylle over dammene og hvilken betydning det eventuelt har for damsikkerheten. I et framtidig klima forventes det at sannsynligheten for skred kan øke. Forskning på området er derfor viktig.

Målet med dette prosjektet har vært å få mer kunnskap om bølgeoppskylning fra skred i magasin for fyllingsdammer, deriblant å utvikle en konkret metode for å beregne størrelsen på bølgene som vil skylle over dammene. Det var også ønskelig å få vurdert hvilke konsekvenser en overskylling har på fyllingsdammers sikkerhet.

Det ble utført en rekke fysiske modellforsøk i vassdragslaboratoriet ved NTNU, og resultatene ble sammenlignet med resultater fra numeriske simuleringer utført av NGI. Resultatene fra FOU-prosjektet er summert opp i NTNU rapporten «Skred i magasin - overtopping av fyllingsdammer fra skredgenererte bølger i magasin» (ISBN 978-82-7598-109-5).

Forsøkene indikerer at klasse 3 og 4 dammer som tilfredsstillende gjeldende sikkerhetskrav kan motstå skred på inntil ca 1 mill. m<sup>3</sup> dersom magasin vannstanden er på HRV eller lavere. Prosjektet viste også at NGIs numeriske bølgemodeller kan benyttes for beregning av overtopping av fyllingsdammer. I de utførte forsøkene er det forutsatt at skredet går vinkelrett på magasinet, og at magasinet er relativt smalt og med jevn dybde oppstrøms for dammen. I praktisk anvendelse må det tas hensyn til faktisk (antatt) skredstørrelse, plassering av skredfarlig område, magasinets utforming mv.

Resultatene fra prosjektet vil kunne bli brukt som innspill til revisjon av gjeldende retningslinjer/veiledere til damsikkerhetsforskriften

Oslo, juni 2018



Ingunn Åsgard Bendiksen  
direktør

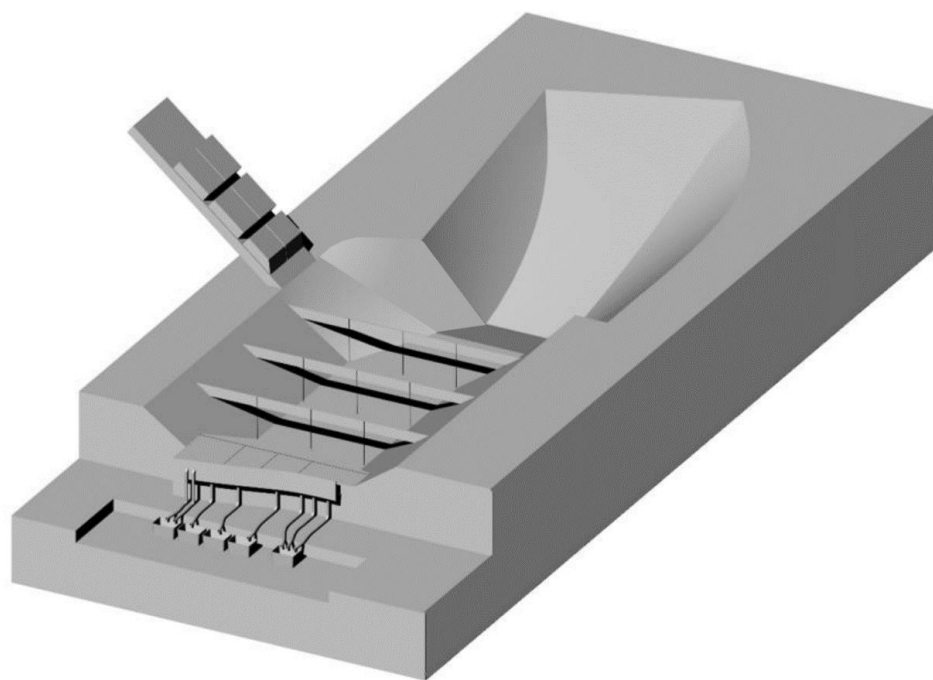


Lars Grøttå  
seksjonssjef

Eirik Øvregård og Leif Lia

# Skred i magasin – overtopping av fyllingsdam fra skredgenererte bølger i magasin

Oppsummering av modellforsøk i  
Vassdragslaboratoriet på NTNU og numeriske  
simuleringer utført av NGI



ISBN 978-82-7598-109-5  
IVM rapport B1-2018-02  
Trondheim, Januar 2018



**NTNU – Trondheim**  
Norwegian University of  
Science and Technology



## Sammendrag

I 2015 ble det startet et prosjekt mellom Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) og Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) for å studere hvordan skredgenererte bølger fører til overtopping av fyllingsdammer. Hovedmålet med studien er å samle kunnskap om hvordan forskjellige skred- og dampparametere påvirker overtopping. Denne kunnskapen vil bli brukt til å utvikle en metode for å beregne størrelsen på skredgenererte bølger og hvordan de påvirker fyllingsdammer.

Forsøkene ble utført som laboratorieeksperiment i Vassdragslaboratoriet ved NTNU, og resultatene ble sammenlignet med resultater fra numeriske simuleringer.

Modelltestene viser at fribord og skredstørrelse påvirker størrelsen på overtoppingen i betydelig grad. Retning på damkrona i forhold til aksene på magasinet har også betydning for oppskyllingen, men i mindre grad enn fribord og skredstørrelsen.

De eksperimentelle testene i laboratoriet har vært nyttige å kunne identifisere de viktigste parameterne som påvirker overtopping av fyllingsdammer fra skredgenererte bølger i magasin. På grunn av ulikt krav til fribord på dammer i ulike klasser, vil det også være ulik sannsynlighet for overtopping av ulike dammer med ellers like skred.

Det har ikke vært tilgjengelige felldata for kalibrering av modellforsøket, og det fører med seg en usikkerhet i modelleringen. Skaleringseffektene må vurderes nærmere når resultatene fra undersøkelsene skal brukes til praktiske formål.

Andre betingelser som gjelder er spesielt grensebetingelsene for magasinet, skredhastighet, helning på skred, posisjon til skred og kombinerte effekter av parameterne. Eksperimenter i forskjellige skalaer bør også utføres. For å minimere usikkerhet, bør modellen også kobles (kalibreres) mulig med noen feltmålinger av magasin, dam og skred. Slike feltmålinger finnes bl.a. i Sveits.

NGIs numeriske bølgemodeller er i en rekke sammenhenger validert m.h.t. oppskylling. Gjennom forsøkene beskrevet i denne rapporten har vi hatt anledning til å validere modellene mot laboratorieforsøk knyttet til overtopping av flodbølger mot fyllingsdammer i magasin. Resultatene viser at bølgemodellene også håndterer denne problemstillingen. NGI og NTNU vurderer nå at de numeriske beregningsverktøyene for overtopping av dammer er klar til operativt bruk.

For undersøkelser på utløpslengde og skred-dynamikk har det til nå for det meste blitt brukt blokkmodeller og statistisk/empiriske modeller (spesielt med tanke på utløpslengder). NGI jobber nå med mer komplekse modeller, men for fjellskred er det fortsatt mye som kan og bør gjøres, ikke minst for skredets oppførsel i vann.

## Innholdsliste

Figurliste .....	IV
Tabbelliste .....	VII
<b>1 INTRODUKSJON.....</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn for prosjektet .....	1
1.2 Mål for prosjektet.....	1
1.2.1 Spesifikke mål med prosjektet .....	2
1.3 Arbeid med prosjektet .....	2
<b>2 DEN FYSISKE MODELLEN .....</b>	<b>3</b>
2.1 Utvikling av den fysiske modellen .....	3
2.1.1 Modell 0 (2015) .....	3
2.1.2 Modell A (2016) .....	4
2.1.3 Modell B (2016-2017) .....	6
2.2 Instrumentering og metodologi .....	7
2.3 Forsøk og variabler .....	8
2.3.1 Modellforsøk prosjektfase 1 (Modell 0) .....	9
2.3.2 Modellforsøk prosjektfase 2 (Modell A) .....	9
2.3.3 Modellforsøk prosjektfase 3 (Modell A og B).....	12
<b>3 RESULTATER .....</b>	<b>14</b>
3.1 Forsøk prosjektfase 1 (Modell 0).....	14
3.1.1 Bølgegenerering .....	14
3.1.2 Skredkarakteristikk og damovertopping.....	14
3.1.3 Bølgegenerering og bølgehøyde.....	15
3.2 Forsøk prosjektfase 2 (Modell A) .....	17
3.2.1 Bølgemønster oppstrøms dammen.....	17
3.2.2 Overtoppingshøyde over damkrona.....	18
3.2.3 Overtoppingsvolum .....	19
3.2.4 Enhetsvannføring og stabilitet av plastring i fullskala.....	21
3.2.5 Usikkerhet i resultatene.....	22
3.3 Forsøk prosjektfase 3 (Modell A og B).....	22
3.3.1 Modelleffekter.....	22
3.3.2 Undersøkelser av påvirkning av skredhastighet på bølgehøyde og overtoppingsvolum .....	25

3.3.3	Dimensjonsanalyse .....	29
3.3.4	Damgeometri.....	30
3.3.5	Bølgehastighet under overtopping og vurdering av vannføring.....	30
<b>4</b>	<b>PÅVIRKNINGEN AV OVERTOPPINGSVANNFØRING PÅ STABILITETEN TIL STEINFYLLINGSDAMMER.....</b>	<b>31</b>
4.1	Stabilitet av nedstrøms plastring ved overtopping. Erfaringer fra feltforsøk.....	31
4.2	Overtopping av dammer i konsekvensklasse 3 og 4.....	32
<b>5</b>	<b>NUMERISKE SIMULERINGER .....</b>	<b>35</b>
5.1	Bakgrunn .....	35
5.2	Numeriske modeller og modelloppsett.....	35
5.3	Resultater fra den numeriske modellen.....	36
5.3.1	Forsøk prosjektfase 1 .....	36
5.3.2	Forsøk prosjektfase 2.....	42
<b>6</b>	<b>DISKUSJON OG KONKLUSJON .....</b>	<b>44</b>
6.1	Forsøk prosjektfase 1 (Modell 0).....	44
6.2	Forsøk prosjektfase 2 (Modell A).....	44
6.3	Forsøk prosjektfase 3 (Modell A og B).....	45
6.4	Sammenlikning av resultater fra forsøk og numerisk modellering .....	46
6.4.1	Forsøk prosjektfase 1 .....	46
6.4.2	Forsøk prosjektfase 2.....	46
6.5	Anbefalinger videre.....	47
<b>7</b>	<b>REFERANSER.....</b>	<b>48</b>

## Figurliste

<b>Figur 2.1:</b> Den fysiske modellen brukt i 2014 (1: Skredrampe, 2: Kontrollrom. 3, 4, 5: Plassering av vannstandsmålere; 6. Viddalsdammen (De hvite linjene indikerer hvor dammen er plassert). (Figur fra Lorås (2014)).	4
<b>Figur 2.2:</b> Oversikt over dammen med glatt og ru overflate i modellen (Kiflom et al. 2015)	4
<b>Figur 2.3:</b> Modell A. Helning skredrampe 40° (Mortensen, 2016).	5
<b>Figur 2.4:</b> Oversiktsskisse over Modell A i Laboratoriet (Kiflom et al., 2015)	6
<b>Figur 2.5:</b> Modell B. Helning skredrampe 50°. (Biedermann, 2017)	7
<b>Figur 2.6:</b> Oversiktsskisse av Modell B (Ponziani & Gardoni, 2017)	7
<b>Figur 2.7:</b> Målerplassering i Modell 0 og A (a) og Modell B (b) (Biedermann, 2017)	8
<b>Figur 2.8:</b> Skredkarakteristikk av skredscenario i modellforsøkene	8
<b>Figur 2.9:</b> Snitt av dam med helning på 1: 1,5, som strekker seg over bredden til magasinet	10
<b>Figur 2.10:</b> Rotert damakse, med klokka. Testet i laboratoriet med- og mot klokka, med helning på 1: 1,5	10
<b>Figur 2.11:</b> Rotert damakse, med klokka. Testet i laboratoriet med- og mot klokka, med helning på 1: 1,5	10
<b>Figur 2.12:</b> Rett dam, 1:1,5	11
<b>Figur 2.13:</b> Rotert dam, med klokka, 1:1,5	11
<b>Figur 2.14:</b> Chevron dam, 1:1,5, fra Mortensen (2016)	11
<b>Figur 2.15:</b> Oversiktsskisse over skredrampe. Po og L viser henholdsvis startposisjon og fallelengde til skredet (Sigtryggdóttir, 2017)	12
<b>Figur 2.16:</b> Forskjellige damprofiler analysert i 2017 (Biedermann, 2017)	13
<b>Figur 3.1:</b> Oversikt av målinger gjort ved vannstandsmåler 7 ved HRV	14
<b>Figur 3.2:</b> Målt overtoppingsvolum i prototypen (prototyp-skala)	15
<b>Figur 3.3:</b> Bølgehøyde målt nær dammen ved HRV	16
<b>Figur 3.4:</b> Bølgehøyder målt rett oppstrøms dammen ved magasin vannstand HRV – 10 m	16
<b>Figur 3.5:</b> Bølgehøyder målt rett oppstrøms dammen ved magasin vannstand HRV – 15 m	17
<b>Figur 3.6:</b> Bølgehøyde generert fra 1.5 mill. m <sup>3</sup> skredvolum, på Chevron-dam og klasse 4	18
<b>Figur 3.7:</b> Bølgehøyde generert fra 1.5 mill. m <sup>3</sup> skredvolum, på rotert dam, med klokka og	18
<b>Figur 3.8:</b> Maksimal overtoppingsdybde for ulike utforming av klasse 3- og 4 dammer	19
<b>Figur 3.9:</b> Overtoppingsvolum for ulike damtypene, fribord og skredstørrelse	20
<b>Figur 3.10:</b> Enhetsvannføring for ulike damtyper, fribord og skred	21

<b>Figur 3.11:</b> Modell A: Målt overtoppingshøyde og korresponderende estimert kumulativ overtoppingsvolum. Over: høyre side av dammen (måler 12). Nede: venstre side av dammen (måler 14). Resultatene er med 4 skredblokker og fribord lik 2,4 cm (Ponziani & Gardoni, 2017).....	23
<b>Figur 3.12:</b> Modell B: målt overtoppingshøyde og korresponderende estimert kumulativ overtoppingsvolum. Over: høyre side av dammen (måler 12). Nede: venstre side av dammen (måler 14). Resultatene er med 4 skredblokker og fribord lik 2,4 cm (Ponziani & Gardoni, 2017).....	24
<b>Figur 3.13:</b> Modell A: Fordelingen av overtoppingsvolumet langs damkrona. Presentert som prosent av totalt overtoppet volum i hvert forsøk. Segment 1 er på venstre side av dammen. Fribord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til form og størrelse av skredet (Ponziani & Gardoni (2017))......	25
<b>Figur 3.14:</b> Modell A: Fordelingen av overtoppingsvolumet langs damkrona. Presentert som prosent av totalt overtoppet volum i hvert forsøk. Segment 1 er på venstre side av dammen. Fribord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til form og størrelse av skredet (Ponziani & Gardoni (2017))......	25
<b>Figur 3.15:</b> Modell B (glatt damside, helning 1:1,5): Overtoppingshøyde mot skredhastighet. (Beskrivelsen til høyre: fribord /skredkonfigurering) (Mistenker feil på målingene med 4,5/6) (Biedermann, 2017).....	26
<b>Figur 3.16:</b> Modell B (glatt damside, helning 1:1,5): Overtoppet volum mot skredhastighet. (Beskrivelsen til høyre: fribord /skredkonfigurering) (Biedermann, 2017). .....	27
<b>Figur 3.17:</b> Modell A (Chevron dam, helning 1:1,5): Overtoppet volum mot skredhastighet (v) og avstanden mellom skredets senter og vannivået (h). (Ponziani & Gardoni, 2017).....	27
<b>Figur 3.18:</b> Modell A (Chevron dam): Overtoppet volum mot skredvolum, og fribord lik 2,4 cm(v) og 3,2 cm(h). (Ponziani & Gardoni, 2017). .....	28
<b>Figur 3.19:</b> Modell A (Chevron dam): Gjennomsnittet av alle resultatene av totalt overtoppet volum for forskjellige startposisjoner, og følgelig hastigheter. Fribord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til antall skredblokker og skredform (Ponziani & Gardoni, 2017).....	28
<b>Figur 3.20:</b> Modell B (Chevron dam): Gjennomsnittet av alle resultatene av totalt overtoppet volum for forskjellige startposisjoner, og følgelig hastigheter. Fribord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til antall skredblokker og skredform (Ponziani & Gardoni, 2017).....	29
<b>Figur 3.21:</b> Model B (glatt dam, helning 1:1,5): Totalt overtoppet volum mot IPP for maksimal bølgehøyde (Biedermann, 2017).....	30
<b>Figur 4.1:</b> Testdammen før (v) og under en enhetsvannføring på $8 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ .....	31
<b>Figur 4.2:</b> Enhetsvannføring over damkrona for klasse 3 og 4 dammer .....	33
<b>Figur 4.3:</b> Varighet av overtopping for klasse 3 og klasse 4 .....	34
<b>Figur 5.1:</b> Oversikt over den genererte modellen basert på scannet data fra den fysiske modellen i laboratoriet (Kiflom et al., 2015).....	36



<b>Figur 5.2:</b> Batymetri og topografi fra laserscanning brukt i den numeriske modellen.....	36
<b>Figur 5.3:</b> Stillbilde av overflatehøydene ved $t = 3$ s (Globouss) .....	37
<b>Figur 5.4:</b> Stillbilde av overflatehøyder ved $t = 5$ s (Globouss). Første bølgen har nådd dammen. .....	38
<b>Figur 5.5:</b> Tidsforløp ved vannstandsmålerne 1-3, med sammenlikning av overflatehøyder mellom modellforsøket (mod) og GloBouss-modellen (glob).....	39
<b>Figur 5.6:</b> Tidsforløp ved vannstandsmålerne 7-9, med sammenlikning av overflatehøyder mellom modellforsøket (mod), GloBouss-modellen (glob) og MOST-modellen (most).....	40
<b>Figur 5.7:</b> Tidsforløp ved vannstandsmålerne på toppen av dammen, med sammenlikning av vannstander mellom modellforsøket (mod) og MOST-modellen (glob).....	41
<b>Figur 5.8:</b> Digital terrengmodell av magasinet brukt under laboratorieforsøkene. Målepunktene 1-9 står i selve magasinet og måler overflatehevingen, mens ORight-Omid-OLeft måler vannsøylen på damkrona under eventuell overtopping. De tre rektanglene i svart, grønn og rød, er beregningsområdene for oppskyllingsmodellen MOST. SF og SM er henholdsvis posisjonen for skredets front og skredets midtpunkt før utløsning. Fargen i modellen gjenspeiler dybden målt i meter.....	42
<b>Figur 5.9:</b> Øyeblikksbilde av overflatehevingen (GloBouss modellen) tre sekunder etter at skredet startet.....	43
<b>Figur 5.10:</b> Eksempel på sammenlikning av vannhøyde på damkrona (punkt OLeft) for laboratorieforsøkene ("mod") og den numeriske modellen for oppskylling ("most").....	43

## Tabelliste

<b>Tabell 2.1:</b> Oversikt over den fysiske modellen og undersøkelsene siden 2014 (Sigtryggsdóttir, 2017).....	3
<b>Tabell 2.2:</b> Gjennomførte forsøk (Kiflom et al., 2015).....	9
<b>Tabell 2.3:</b> Testoppsett med varierende parametere (Ponziani & Gardoni, 2017) .....	10
<b>Tabell 2.4:</b> Fribord brukt i forsøkene med Modell A og Modell B (Skala 1:190) .....	12
<b>Tabell 2.5:</b> Forskjellige høyder skredet ble sluppet fra (Ponziani & Gardoni, 2017).....	12
<b>Tabell 3.1:</b> Maksimale målte skredhastigheter for alle forsøk utført i modell A og Modell B (Ponziani and Gardoni, 2017). .....	26
<b>Tabell 4.1:</b> Oppsummering av forsøksresultatene, enhetsvannføring ved kollaps .....	32
<b>Tabell 4.2:</b> Krav for dammer i klasse 3 og 4.....	32

# 1 Introduksjon

Denne rapporten oppsummerer eksperimentelle tester som er blitt utført under forskningsprosjektet «Skred i magasin» på NTNU i tidsrommet 2015-2017. Denne oppsummeringsrapporten er satt sammen av tre tidligere rapporter i prosjektet: Kiflom et al. (2015), Kiflom et al. (2016) og Sigtryggdóttir (2017). Oppsummeringsrapporten er satt sammen og skrevet av Eirik Øvregård og Leif Lia.

Prosjektet ble underskrevet i 2014, men forskningen ble startet i 2015. Den økonomiske støtten til prosjektet fra NVE var 396 000 NOK i 2015. Prosjektet ble utvidet i våren og høsten 2016. Utvidelsen i våren 2016 hadde et budsjett på 600 000 NOK, hvor 400 000 NOK ble tildelt til den hydrauliske modellen, og 200 000 NOK ble tildelt til Norges geologiske institutt (NGI) for utvikling av numeriske modeller. Den andre utvidelsen på høsten 2016 fikk videre bevilgninger på 150 000 NOK fra NVE for avsluttende undersøkelser i den fysiske modellen.

De forskjellige prosjektfasene vil for enkelthetskyld refereres til som prosjektfase 1, 2 og 3, i kronologisk rekkefølge, videre i rapporten.

## 1.1 Bakgrunn for prosjektet

Jordskred og steinras utgjør en trussel for noen kraftmagasin og dammer i Norge. Tidligere kartlegging av potensial for fjellskred viste at mange magasin i Norge kan ligge i skredutsatte områder med fare for skredgenererte bølger mot dammer, rapportert av Romstad et al., (2009). Skred og ras som går i magasin kan generere impulsbølger som potensielt kan overtoppe dammer, med katastrofale konsekvenser for dammer og for nedstrøms områder. Konsekvensene ved overtopping av fyllingsdammer vil mulig være enda verre, pga. muligheten for damkollaps under ekstreme lastsituasjoner. Det pågår per dags dato en nasjonal kartlegging av skredfare som vil gi et enda bedre grunnlag for å vurdere reell skredfare i magasin. I tillegg til økt kunnskap om hvilke dammer som kan være utsatt for skredfare og skredgenererte bølger, har det også siden 2009 blitt utviklet bedre metoder for beregning av bølgenes størrelse og hvordan de forplanter seg i et magasin/basseng. Det er imidlertid utført få studier av hvordan skredgenererte bølger påvirker den konstruktive sikkerheten av dammer, og det er så langt ikke funnet egnede metoder for beregning av overtopping over typiske norske fyllingsdammer pga. skredgenererte bølger.

## 1.2 Mål for prosjektet

Med denne bakgrunnen bestemte Norges tekniske - naturvitenskapelige universitet (NTNU) og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) seg for å samarbeide om et forskningsprosjekt om påvirkningen av skredgenererte bølger på fyllingsdammer. En del av forskningsprosjektet ble utført i en eksperimentell storskala fysisk modell i vassdragslaboratoriet ved NTNU. Modellen hadde en fortid som fjordmodell for det potensielt store Åkenes-skredet, men ble bygget om for dette prosjektet. Prosjektet har et endelig mål om å etablere en metode for å beregne bølgene som vil skylle over en fyllingsdam som følge av skred i magasin, og for å vurdere hvilken konsekvens en overskylling har på fyllingsdammens sikkerhet. Resultatene skal videre brukes til å ende opp med beregningsmetoder som kan anslå størrelsen på bølgene ved overtopping av fyllingsdam ved et gitt skred i magasinet.

Denne rapporten oppsummerer eksperimentelle tester gjengitt i tidligere rapporter og masteroppgaver i forskningsprosjektet. Resultatene fra laboratorie-eksperimentene er sammenlignet med tilsvarende resultat fra numeriske modeller. Resultatene fra prosjektet vil bli brukt til å evaluere hva dammer utformet etter dagens forskriftskrav tåler av skredgenererte

bølger, samt å vurdere og gi innspill til kommende praksis for håndtering av skredgenererte bølger.

### 1.2.1 Spesifikke mål med prosjektet

Det innledende prosjektet og utvidelsene av prosjektet hadde forskjellige mål, men skulle fokusere på hvordan forskjellige parametere påvirket høyden og volumet på overtoppingen. I kontraktene var det også antatt at valg av parametere, f.eks. helning på damside og fribord, skulle følge kravene for fyllingsdammer i konsekvensklasse 3 og 4 (OED, 2009; NVE, 2012).

Det innledende prosjektet i 2015 skulle undersøke følgende parametere:

- Skredstørrelse og -volum
- Bølgehøyde og overtoppingshøyde
- Forskjellige helninger på oppstrøms damside (ru og glatt)
- Fribord og magasin dybde

Den første utvidelsen av prosjektet i 2016 fokuserte på følgende parametere:

- Skredstørrelse
- Fribord
- Orientering av damakse
- Ruhet på damside (plastring)

Den siste utvidelsen av prosjektet i 2017 skulle fokusere på:

- Eventuelle modelleffekter på resultatene
- Påvirkningen av forskjellige skredhastigheter på overtopping av dammer.
- Andre parametere av interesse

I tillegg skal de eksperimentelle resultatene fra det innledende prosjektet og fra den første utvidelsen sammenliknes med resultater fra numeriske beregninger.

## 1.3 Arbeid med prosjektet

Prosjektet «skred i magasin» har tiltrukket seg et stort antall studenter både fra NTNU og internasjonale universitet. I tillegg har flere vitenskapelige ansatte på NTNU deltatt i prosjektet. Følgende personer har vært involvert:

#### Bacheloroppgaver:

- Maria Josè de las Llanderas Ramirez (2016)

#### Masteroppgaver:

- Sunniva Lorås (2014)
- Joakim Svendsby (2014)
- Matteo Bolzoni (2015)
- Ragnhild Hammeren (2016)
- Robert Mortensen (2016)
- Lorenza Ponziani & Martina Gardoni (2017)
- Jöel Biedermann (2017)

#### Ph.D. kandidater:

- Netsanet Nigatu Tessema (2017)

#### Forskere ved NTNU:

- Kiflom Belete
- Leif Lia
- Fjóla G. Sigtryggdóttir
- Jochen Aberle

#### Forskere fra NGI:

- Sylfest Glimsdal
- Carl Harbitz

## 2 Den fysiske modellen

Den eksperimentelle delen av studien ble gjennomført i en storskala fysisk modell i vassdragslaboratoriet ved NTNU. Modellen ble laget ut av den gamle Storfjord-modellen. Modellen i laboratoriet består av et magasin, en skredrampe, en fyllingsdam i magasinet og måleinstrumenter. Modellen er utstyrt med ei skredrampe der skredet kan utløses og slipper på gravitasjon ned i magasinet. Rampa er omtrent en meter bred og 3 meter lang og skredet består av blokker slik at både volum og masse kan varieres ved å redusere eller øke antallet blokker.

### 2.1 Utvikling av den fysiske modellen

I 2014 ble Geiranger-seksjonen av Storfjord-modellen isolert (se Figur 2.1) og en modell av oppstrøms damside ble satt inn. Denne damside skulle representere Viddalsdammen. Modellen gikk videre gjennom flere oppgraderinger for de forskjellige delprosjektene. Tabell 2.1 viser en oversikt over den fysiske modellen gjennom tidsløpet til prosjektet. Sigtryggdóttir (2017).

**Tabell 2.1:** Oversikt over den fysiske modellen og undersøkelsene siden 2014  
(Sigtryggdóttir, 2017)

Prosjektfase	År/Periode	Modell
1	Før 2014	Storskala modell av Storfjorden for å studere skredgenererte tsunamibølger i fjorder
	2014	Geiranger-seksjonen av Storfjord-modellen isolert med en oppstrøms damside som representerer Viddalsdammen. (se Lorås, 2014; Svendsby, 2014). (Se figur 2.1) (Modellskala: 1:158)
	2015	Samme modell men med varierende helning på oppstrøms damside. (Se: Bolzoni, 2015; Kiflom and Lia, 2015) (Se figur 2.2)
2	2016 Vår	Model A (se figur 3.3) (se: Mortensen, 2016; De las Llanderas Ramirez, 2016; Hammeren, 2016, and Kiflom et al, 2016.) (Modellskala: 1:190)
3	2016 Høst	Modell A og Modell B. Forskjellig plassering av skredrampe, med konstant geometri på oppstrøms damside. (se: Ponziani & Gardoni, 2017) (se figur 2.3, figur 2.4 og figur 2.5) (Modellskala: 1:190)
	2017 Første halvår	Modell B. Varierende damparametere. (se: Biedermann, 2017; Nigatu, 2017) (se figur 2.4 og figur 2.5) (Modellskala: 1:190)

#### 2.1.1 Modell 0 (2015)

Siden påvirkningen av gravitasjon er dominerende i skredgenererte bølger ble modellen av Viddalsdammen bygget med utgangspunkt i Froudes modellov. Lengden på magasinet til Viddalsdammen ble målt til 3,3 km på kartet. Tilgjengelig lengde på modellen var 21 m, tilgjengelig bredde på damstedet var 2,7 m og tilgjengelig bredde ved rampen var 3,5 m. Som følge av modellens dimensjoner ble Viddalsdammen bygget i skalaen 1:158. I dette modellforsøket ble skalaen brukt for å modellere bølgeforplantning og bølgegenerering, men skalering av steiner på dammen vil sannsynligvis bli vanskelig.



Figur 2.1 viser det generelle oppsettet for modellen under den første testen i 2015. Med dette arrangementet ble tre forskjellige damkonstruksjoner med forskjellig oppstrøms helning brukt, 1:1,6, 1:2, og 1:2,4. Høyden på dammen var 62 m og kronebredden var 5 m for alle dammene. Det ble utført forsøk med to forskjellige vannstander i magasiner for alle damhelningene. Altså var fribordet for dammene enten 5 m eller 12 m.

Figur 2.2 viser hvordan dammene også ble testet med ru oppstrøms side. Dette ble gjort med å lime stein til damsiden.



**Figur 2.1:** Den fysiske modellen brukt i 2014 (1: Skredrampe, 2: Kontrollrom. 3, 4, 5: Plassering av vannstandsmålere; 6: Viddalsdammen (De hvite linjene indikerer hvor dammen er plassert). (Figur fra Lorås (2014)).



**Figur 2.2:** Oversikt over dammen med glatt og ru overflate i modellen (Kiflom et al. 2015)

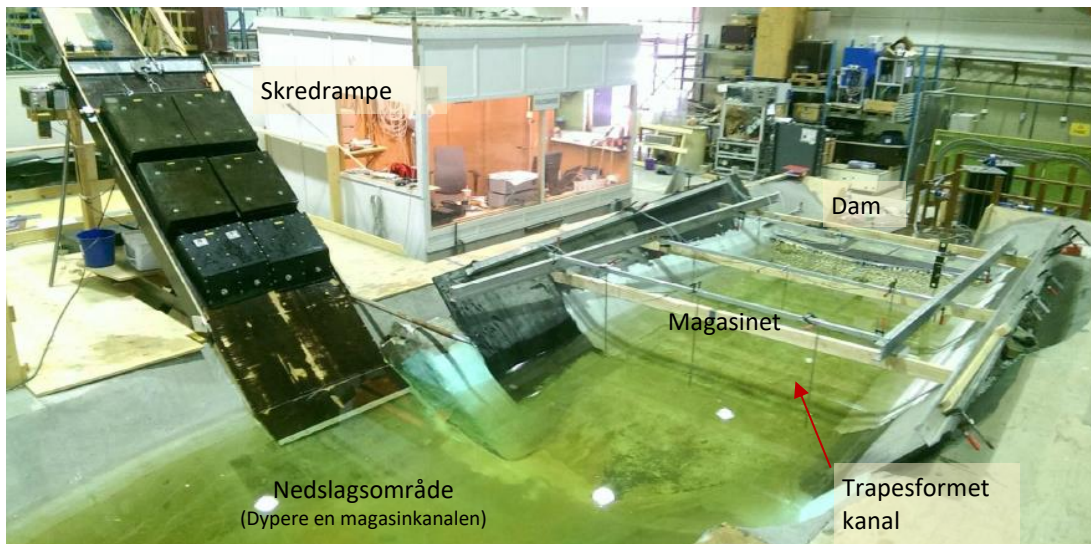
### 2.1.2 Modell A (2016)

Modellen ble modifisert før undersøkelsene i 2016. Den modifiserte modellen er referert til som Modell A, vist i figur 2.3. Flere tester ble gjennomført i modell A og kan finnes i Mortensen (2016) og De las Llanderas Ramírez (2016). De numeriske modellene laget av NGI kan finnes i Hammeren (2016) og i Kiflom et al (2016).

Som vist på Figur 2.3, er magasinet enkelt utformet med jevne, skrå sider og flat bunn, bortsett fra en dypere sone under skredrampen. Magasinet har omtrent 4,5 m lengde og 1,7 m bredde i bunn

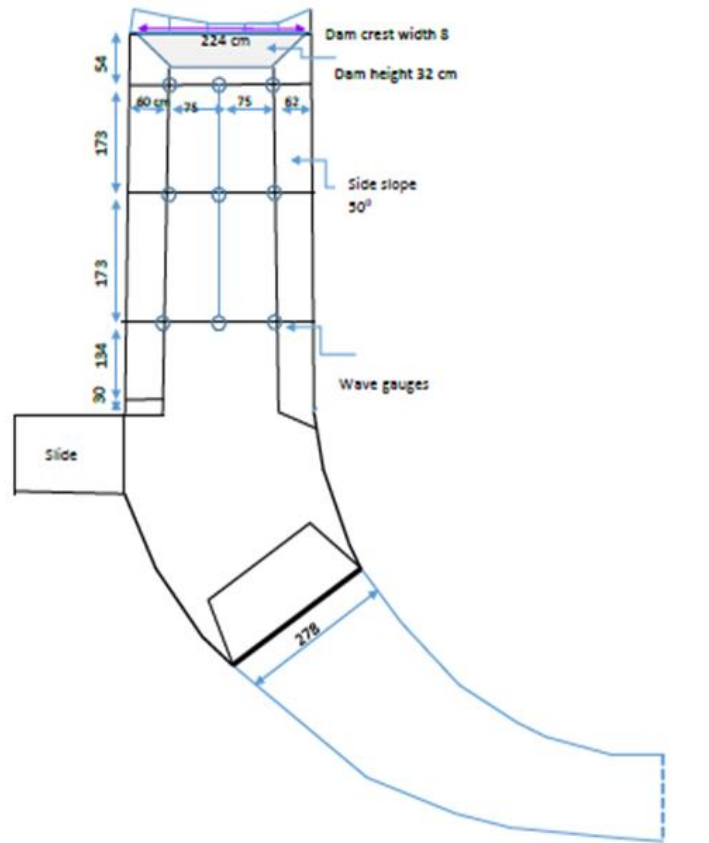
nederst og 2,2 m bredde på damkrone-nivå. Dypet er 0,33 m ved HRV. Modellskalaen er 1: 190 sett i forhold til selve damkonstruksjonen.

Rampa står montert på venstre side av modellen (sett mot fyllingsdammen). Skredrampa har en helning på 40 grader. Dammen i modellen er ei treplate med på-limte steiner som hydraulisk sett representerer en steinfyllingsdam med plastring på oppstrøms side. Geometrien til dammen blir variert i forsøkene ut ifra hvordan norske fyllingsdammer er bygd.



**Figur 2.3:** Modell A. Helning skredrampe 40° (Mortensen, 2016).

Figur 2.4 viser et oversiktsskisse over modellen med mål.



**Figur 2.4:** Oversiktsskisse over Modell A i Laboratoriet (Kiflom et al., 2015)

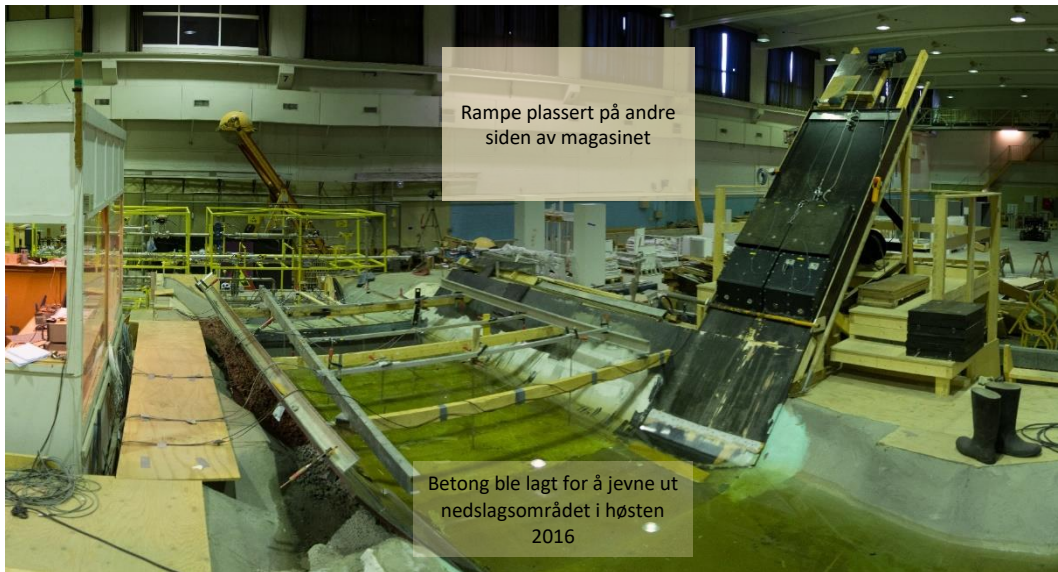
### 2.1.3 Modell B (2016-2017)

Modell B er lik modell A, men med rampa på andre siden av magasinet. Etter forsøkene i modell A ble det reist spørsmål om betydelige modelleffekter som følge av at skredets nedslagsområde var dypere enn magasinet.

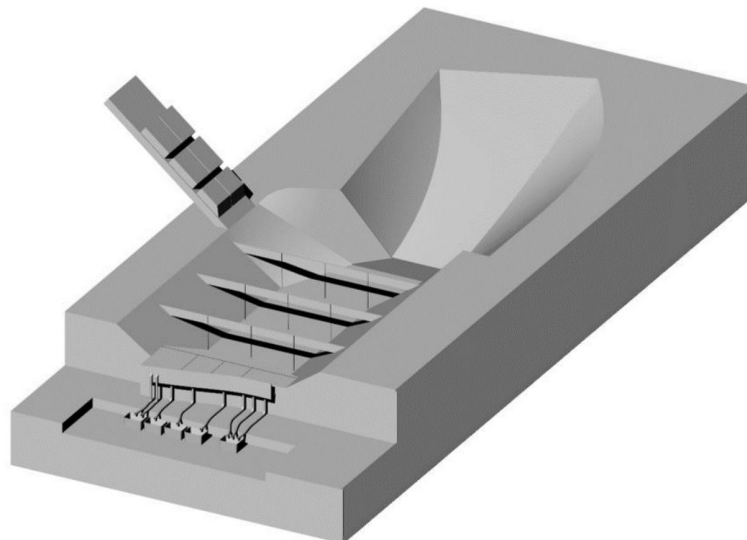
1. Generering av impulsbølger nære kanter og andre forstyrrelser kan potensielt påvirke bølgepropagasjon og føre til modelltypiske bølgemålinger som følge av refraksjon, diffraksjon og refleksjon.
2. Forskjellen i dybde fra nedslagsområdet og bassengkanalen i modell A kan potensielt føre til økt bølgehøyde.

Med bakgrunn i dette ble plasseringen av skredrampen plassert på motsatt side og nedstrøms nedslagsområdet. Modifiseringen av Modell A kan ses i Figur 2.5 og Figur 2.6.





**Figur 2.5:** Modell B. Helning skredrampe 50°. (Biedermann, 2017)



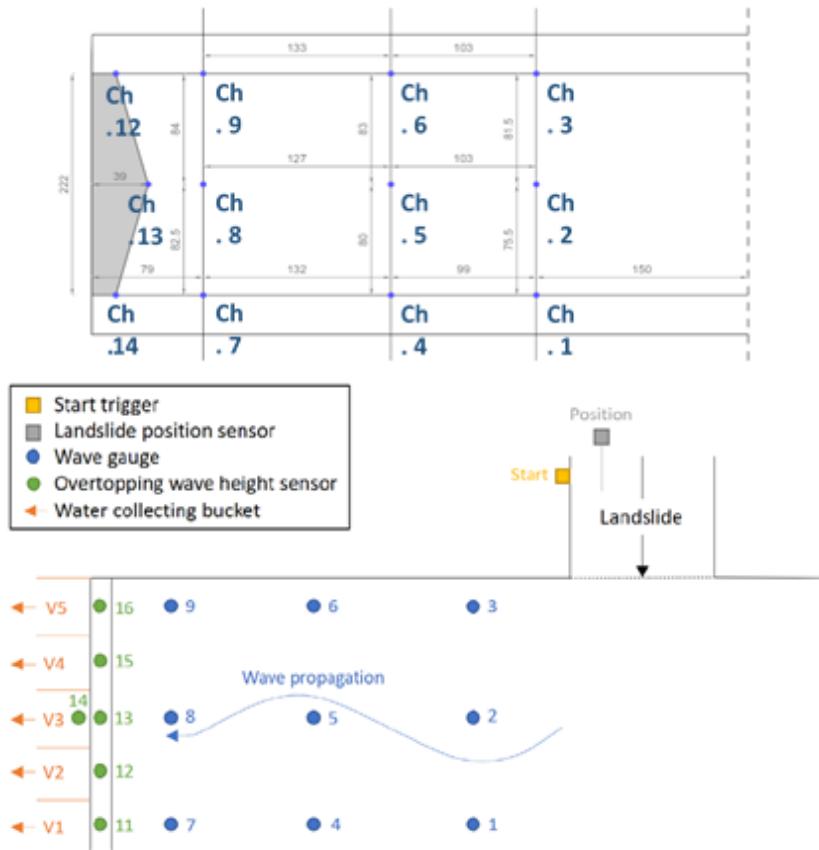
**Figur 2.6:** Oversiktsskisse av Modell B (Ponziani & Gardoni, 2017)

Verken Modell A eller Modell B representerer en spesiell dam eller et spesielt magasin, men kan begge ses på konseptuelle modeller. Skaleringen av modellene er vurdert til 1:190.

## 2.2 Instrumentering og metodologi

Modellen ble utstyrt med hastighetssensorer for å måle bevegelsen til skredet. Akustiske vannstandsmålere ble installert for å måle bølgehøyder og endringer i vannstanden. Ultrasoniske sensorer ble benyttet for å måle vannivået over krona på dammen for å bestemme dybden på overtoppingen. Som figur 2.7 viser, ble 9 vannstandsmålere plassert i magasinet mellom skredapparatet og dammen. En vannstandsmåler ble plassert i oppstrøms ende av magasinet nær svingen.

I forsøkene før 2017 ble fire beholdere plassert nedstrøms dammen for å måle vannvolumet som overtopper dammen. Hver tank ble koblet med nedstrøms side av dammen via fleksible plastslanger som var plassert langs damaksen. I forsøkene til Biedermann (2017) ble fem beholdere brukt, i tillegg ble fire ekstra målere lagt til. Endring i målerplassering kan ses i Figur 2.7.



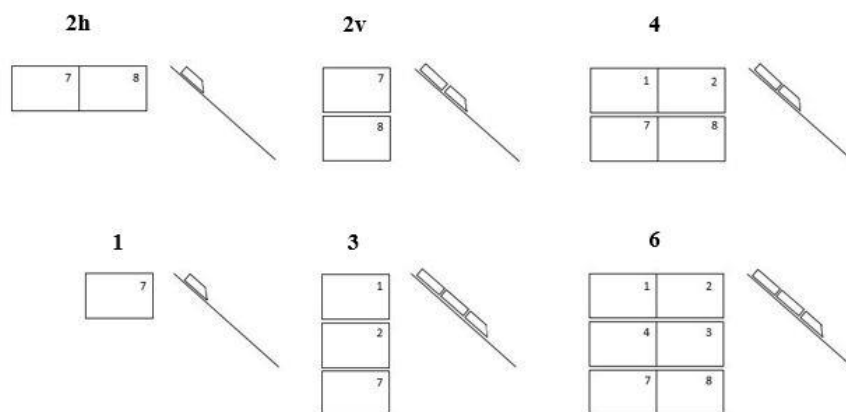
a) Målerplassering for testene for modell 0 og A. (Ponziani & Gardoni (2017).

b) Målerplassering for modell B og forsøkene i 2017. (Biedermann, 2017). Damkrona har blitt delt opp i 5 seksjoner for å få mer detaljerte målinger av distribusjonen av overtoppingshøyde og overtoppingsvolum. Måler 14 ble lagt til for å estimere hastigheten på overtoppingsbølgen

Figur 2.7: Målerplassering i Modell 0 og A (a) og Modell B (b) (Biedermann, 2017)

## 2.3 Forsøk og variabler

I løpet av forsøkene ble seks forskjellige skredvolum brukt. Skredet ble simulert ved hjelp av en, to, fire eller seks blokker. En blokk tilsvarer omtrent 0,25 mill. m<sup>3</sup>. Figur 2.8 viser en figur av hvert skredscenario og hvordan blokkene er plassert i forhold til hverandre når man ser på blokkene ovenfra og fra siden. De nederste blokkene representerer fronten av skredet, vist med skrånende front, som først treffer vannoverflaten.



Figur 2.8: Skredkarakteristikk av skredscenario i modellforsøkene



### 2.3.1 Modellforsøk prosjektfase 1 (Modell 0)

For å finne en mulig korrelasjon mellom skredstørrelse, overtoppingsvolum og oppstrøms damhelning, ble 17 forsøk utført med å variere følgende parametere:

- Skredvolum: 2, 4 og 6 blokker
- Fribord: 5 m og 12 m
- Damhelning: 1:1,6, 1:2, 1:2,4
- Oppstrøms damside med ru (plastring) eller glatt overflate

De 17 gjennomførte forsøkene er systematisert i

Tabell 2.2: Gjennomførte forsøk.

**Tabell 2.2:** Gjennomførte forsøk (Kiflom et al., 2015)

TEST NR.	VANNIVÅ	SKREDVOLUM	DAMHELNING	OPPSTRØMS DAMSIDE
1	HRV	4 blokker	1:1.6	Glatt
2	HRV	2h blokker	1:1.6	Glatt
3	HRV	6 blokker	1:1.6	Glatt
4	LRV	6 blokker	1:1.6	Glatt
5	LRV	4 blokker	1:1.6	Glatt
6	HRV	4 blokker	1:2	Glatt
7	HRV	2h blokker	1:2	Glatt
8	HRV	6 blokker	1:2	Glatt
9	LRV	6 blokker	1:2	Glatt
10	LRV	4 blokker	1:2	Glatt
11	HRV	4 blokker	1:2.4	Glatt
12	HRV	2h blokker	1:2.4	Glatt
13	HRV	6 blokker	1:2.4	Glatt
14	LRV	6 blokker	1:2.4	Glatt
15	LRV	4 blokker	1:2.4	Glatt
16	LRV	4 blokker	1:2.4	Ru
17	HRV	4 blokker	1:2.4	Ru

### 2.3.2 Modellforsøk prosjektfase 2 (Modell A)

Modellforsøkene ble utført med følgende parametere:

- Retning av damakse
  - Normalt på magasinaksen
  - Rotert med klokka
  - Rotert mot klokka
  - Chevron dam (med knekk mot magasinet)
- Skredvolum (1, 2, 4 og 6 blokker)
- Oppstrøms damskråning (1:1,5)
- Fribord, i hovedsak fokusert på dam i klasse 3 og 4, med henholdsvis 4,5 m og 6 m.

- Damskråning med ruhet (plastring)

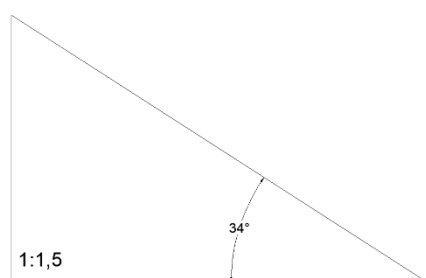
Tabell 2.3 viser forsøksoppsettet med kombinasjon av variabler og parametere som ble gjennomført.

**Tabell 2.3:** Testoppsett med varierende parametere (Ponziani & Gardoni, 2017)

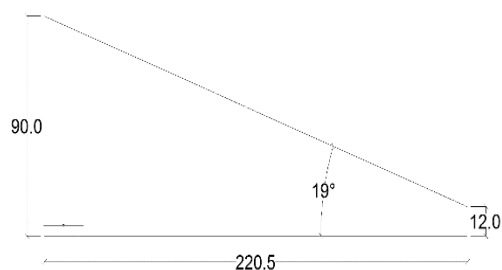
Damparametere (Utforming dam / retning)	Fribord (m)	Skredstørrelse Volum (millioner m <sup>3</sup> )			
Rett dam 1:1.5	4.5	0.25	0.50	1.00	1.50
Rett dam 1:1.5	6	0.25	0.50	1.00	1.50
Rotert dam, med klokka, 1:1.5	4.5	0.25	0.50	1.00	1.50
Rotert dam, med klokka, 1:1.5	6	0.25	0.50	1.00	1.50
Rotert dam, mot klokka, 1:1.5	4.5	0.25	0.50	1.00	1.50
Rotert dam, mot klokka, 1:1.5	6	0.25	0.50	1.00	1.50
Chevron dam, 15°, 1:1.5	4.5	0.25	0.50	1.00	1.50
Chevron dam, 15°, 1:1.5	6	0.25	0.50	1.00	1.50
Chevron dam, 15°, 1:1.5 ***	4.5	0.25	0.50	1.00	1.50
Chevron dam, 15°, 1:1.5 ***	6	0.25	0.50	1.00	1.50

\*\*\* Med ruhet på magasinvegger/ -side

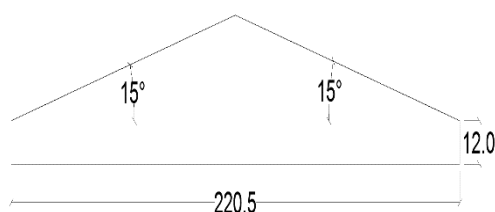
Geometrien til dammen blir variert i forsøkene og er valgt etter hvordan norske fyllingsdammer er bygd. Som vist på Figur 2.9, Figur 2.10, Figur 2.11 og tabell 2.3, er det brukt tre ulike dammer, to rette dammer en skråtilt dam med helning 1: 1,5. Den skråstilte dammen har en vinkel på 20 grader ut i magasinet. Figurer fra Mortensen (2016).



**Figur 2.9:** Snitt av dam med helning på 1: 1,5, som strekker seg over bredden til magasinet.



**Figur 2.10:** Rotert damakse, med klokka. Testet i laboratoriet med- og mot klokka, med helning på 1: 1,5.



**Figur 2.11:** Plansnitt av chevron-dam (chevron = «knekt» damakse). Hoveddamakse ligger vinkelrett på magasinet. Fronthellingen var 1:1,5.

Som vist på figur 2.12, figur 2.13 og figur 2.14, har alle dammer stein med  $d = 16-35$  mm for simulere ruhet tilsvarende plastring. Effekten av disse steinene var knapt målbar. Dybden av

magasinet i modellen var 0,33 m, og fribord på dammene var 24 mm og 32 mm. Bølgen går også synlig langs sidene av magasinet. I ett oppsett brukes ruhet på magasinsidene, men det gav heller ingen signifikant effekt.

Chevron-damutformingen ble valgt på bakgrunn av utformingen av 24 eksisterende dammer i Norge, funnet i "Klimaendring og damsikkerhet: En pilotstudie av 24 Dammer" (NVE 2014).



**Figur 2.12:** Rett dam, 1:1,5



**Figur 2.13:** Rotert dam, med klokka, 1:1,5



**Figur 2.14:** Chevron dam, 1:1,5, fra Mortensen (2016)

Figur 2.12, 2.13 og 2.14 er hentet fra Mortensen (2016)

### 2.3.3 Modellforsøk prosjektfase 3 (Modell A og B)

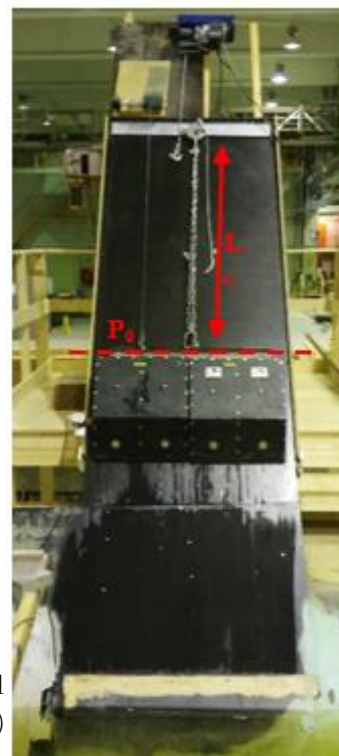
I testene gjort i Modell A før modifiseringen til Modell B ble Chevron-dammen brukt. Følgende parameter ble variert:

1. Fribord (se Tabell 2.4)
2. Skredvolum og skredform. Figur 2.8.
3. Høyden skredet ble sluppet fra, og dermed skredhastigheten. Se Tabell 2.5 og Figur 2.15.

Forsøkene i Modell B:

1. Fribord (se Tabell 2.4)
2. Skredvolum og skredform. Se Figur 2.8.
3. Høyden skredet ble sluppet fra, og dermed skredhastigheten. Se Tabell 2.5 og Figur 2.15.
4. Damgeometri. Figur 2.16.

**Figur 2.15:** Oversiktsskisse over skredrampe.  $P_0$  og  $L$  viser henholdsvis startposisjon og fallelengde til skredet (Sigtryggdóttir, 2017)

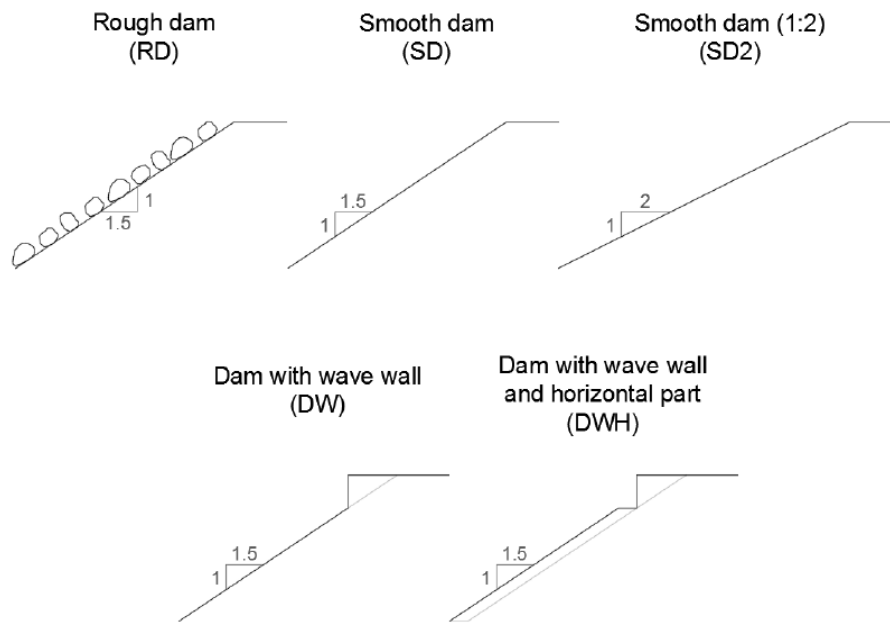


**Tabell 2.4:** Fribord brukt i forsøkene med Modell A og Modell B (Skala 1:190)

Konsekvensklasse	Fribord i prototyp [m]	Fribord modell [cm]	Vannstand i modell [cm]
3	4.5	2.4	29.5
4	6	3.2	28.7

**Tabell 2.5:** Forskjellige høyder skredet ble sluppet fra (Ponziani & Gardoni, 2017).

<i>Modell A – 40° rampehelning</i>		
$P_0$ ID	$L_c$ [cm]	$L_p$ [m]
I <sub>A</sub>	15	30
II <sub>A</sub>	65	120
III <sub>A</sub>	115	220
<i>Modell B – 50° rampehelning</i>		
$P_0$ ID	$L_c$ [cm]	$L_p$ [m]
I <sub>B</sub>	130	250
II <sub>B</sub>	147	280
III <sub>B</sub>	178	340
IV <sub>B</sub>	90	170



**Figur 2.16:** Forskjellige damprofiler analysert i 2017 (Biedermann, 2017).

## 3 Resultater

### 3.1 Forsøk prosjektfase 1 (Modell 0)

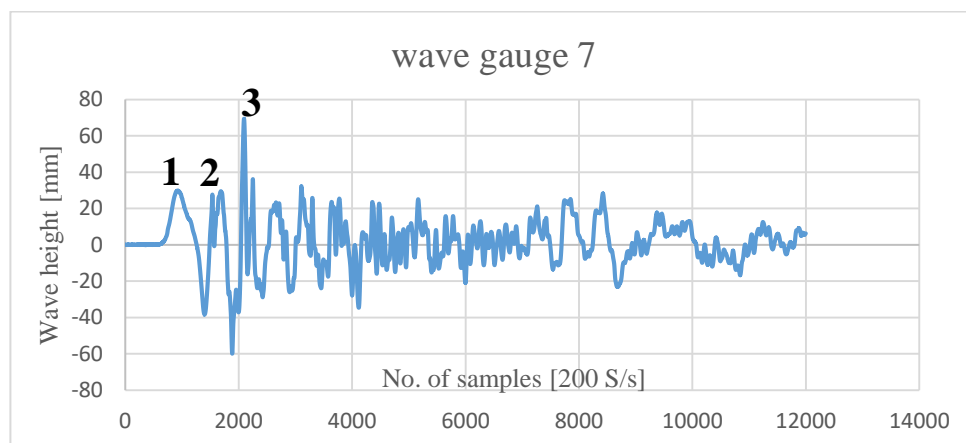
Alle resultater og figurer i dette delkapittelet er hentet fra Kiflom et al. (2015)

#### 3.1.1 Bølgegenerering

I løpet av modellforsøkene ble tre distinkte overtoppingsbølger observert. Dette fenomenet ble antatt å være et produkt tre mulige bølgegenereringsmekanismer. Den første som et resultat av impuls kraften fra fronten av skredet når skredblokkene kolliderer med vannoverflaten. Skredblokkene forskyver vannet ved sammenstøtet og fører til den første impulsbølgen.

Den andre bølgen kommer som følge av igjenfylling av tomrommet etter skredblokkene. Disse forholdene i magasinet skapte også en refleksjonsbølge fra veggen på motsatt side av skredet. Størrelsen på refleksjonsbølgen var av betydelig størrelse.

Den tredje mulige bølgemekanismen er når skredet fortsetter bevegelsen sin under vann til bunnen av bassenget og presser vannet fremover. Vannstandsmåler 7 er plassert på samme side som skredet nær dammen. Figur 3.1 viser målingene fra vannstandsmåler 7, med de tre distinkte overtoppingsbølgene markert.



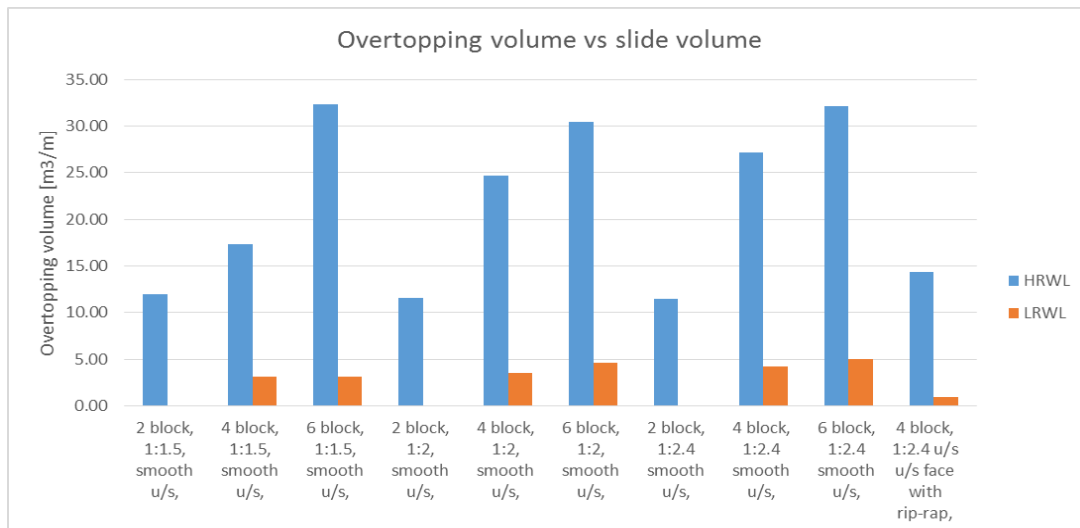
Figur 3.1: Oversikt av målinger gjort ved vannstandsmåler 7 ved HRV

#### 3.1.2 Skredkarakteristikk og damovertopping

Resultatene fra modellforsøkene viser at det største skredvolumet (seks blokker) gav det største overtoppingsvolumet. Dette viser at et større skred forflytter større mengder vann ved sammenstøt, og igjen skaper større bølger. Modellforsøket indikerer også at en dobling av skredvolum resulterer i omtrent dobling av overtoppingsvolum.

Sammenlikningene mellom skred med samme volum men hvor skredene hadde forskjellige bredde og lengde viste at formen hadde påvirkning på resultatene. En økning i volum i bredden økte overtoppingsvolumet. Dette betyr at en økning i skredvolum i horisontal retning fører til at en større del av skredarealet treffer vannoverflaten samtidig, noe som produserer større forflyttelse av vannet i bassenget.

Forsøket gav grunnleggende innsikt i forholdet mellom skredvolum, overtopping og damkarakteristikk. Likevel påpekes behovet for videre forskning og forsøk for bekrefte og konsolidere resultatene fra dette modellforsøket, i tillegg til systematisk testing og detaljert måling av parametere som påvirker overtopping. Figur 3.2 viser overtoppingsvolumet i prototypen per meter dam for hvert forsøk med varierende skredvolum og oppstrøms damside.



**Figur 3.2:** Målt overtoppingsvolum i prototypen (prototyp-skala)

Som vist i Figur 3.2 genererer skredene med seks blokker tre ganger så stort overtoppingsvolum som skredene med to blokker ved HRV. Ved LRW er forskjellen derimot ubetydelig. Dette indikerer at magasin vannstanden har stor effekt på overtoppingsvolumet. Jo høyere vannstanden er i magasinet, jo større blir overtoppingsvolumet som følge av skredgenererte bølger.

Testresultatene med hensyn på oppstrøms damhelling viser liten til ingen forskjell i overtopping fra skred med to blokker. Med fire blokker øker derimot overtoppingsvolumet med slakere helling, mens det med seks blokker ikke påvises noen tendens.

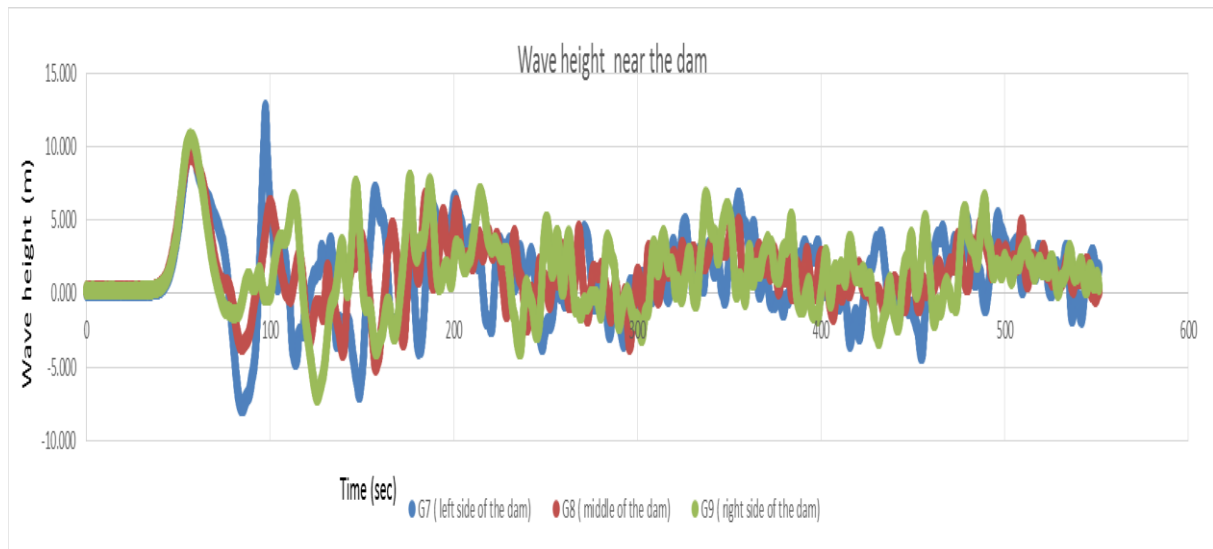
Figur 3.2 viser at overtoppingsvolumet for dammen med plastring på oppstrøms damside var mindre enn for dammene uten plastring. Dette indikerer at ruheten på oppstrøms damside påvirker overtoppingsvolumet.

### 3.1.3 Bølgegenerering og bølgehøyde

Figur 3.3 viser målingene fra målerne 7, 8, og 9 nærmest damkrona. Hele damkrona ble jevnt overtoppet av den første bølga som genereres av sammenstøtet mellom skredet og magasinet. Dette kan observeres fra Figur 3.3 hvor alle målerne måler lik vannstand ved første bølge.

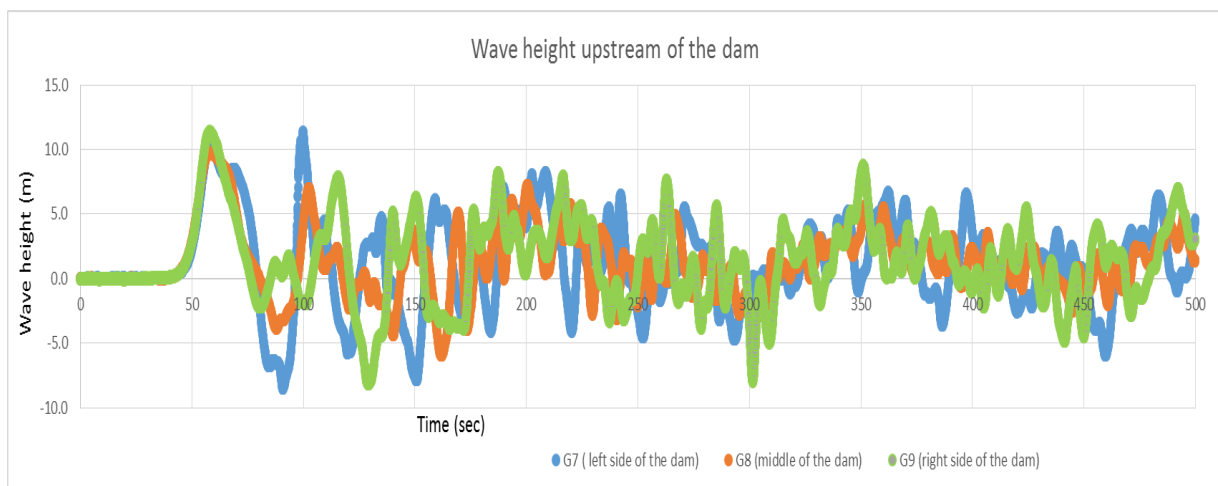
Den andre, og største, bølgetoppen ble generert som følge av returstrømninger fra motsatt vegg til tomrommet skapt av sammenstøtet mellom skredet og magasinet. Etter å ha reflektert mot motsatt side propagerte bølgen hovedsakelig langs venstre side av magasinet.

Det er antatt at de mest relevante målingene relatert til overtopping kommer fra målerne nærmest damkrona (7, 8 og 9). Siden hovedmålet med forsøkene ikke var å studere bølgegenerering og bølgeforplantning er ikke målingene, og påfølgende analyser, fra de resterende vannstandsmålerne tatt med i rapporten.



**Figur 3.3:** Bølgehøyde målt nær dammen ved HRV

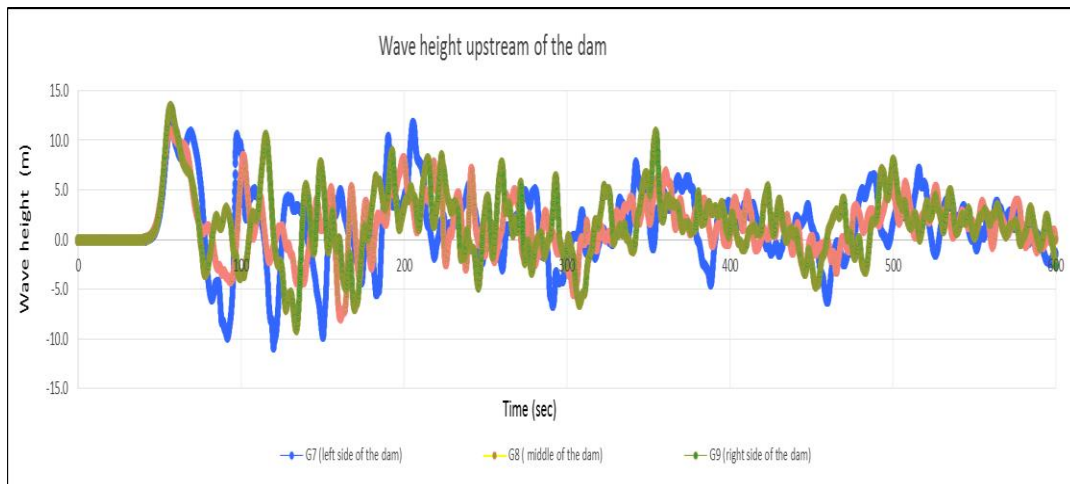
Figur 3.3 viser målingene fra vannstandsmålerne rett oppstrøms dammen. Magasin vannstanden var satt til HRV og skredvolumet var 1,5 mill. m<sup>3</sup>. Den høyest målte bølgen var 12,4 m i prototypen og ble målt av måler 7 på venstre side av dammen.



**Figur 3.4:** Bølgehøyder målt rett oppstrøms dammen ved magasin vannstand HRV – 10 m

Figur 3.4 viser vannstandsmålingene rett oppstrøms dammen. Magasin vannstanden var 10 meter under HRV, og skredvolumet var 1,5 mill. m<sup>3</sup>. Den høyeste bølgen målt tilsvarer 11 m i prototypen.





**Figur 3.5:** Bølgehøyder målt rett oppstrøms dammen ved magasin vannstand HRV – 15 m

Figur 3.5 viser vannstandsmålingene rett oppstrøms dammen. Høyeste bølge ble målt til 14 m. Magasin vannstanden var 15 meter under HRV og skredvolumet var 1,5 mill. m<sup>3</sup>.

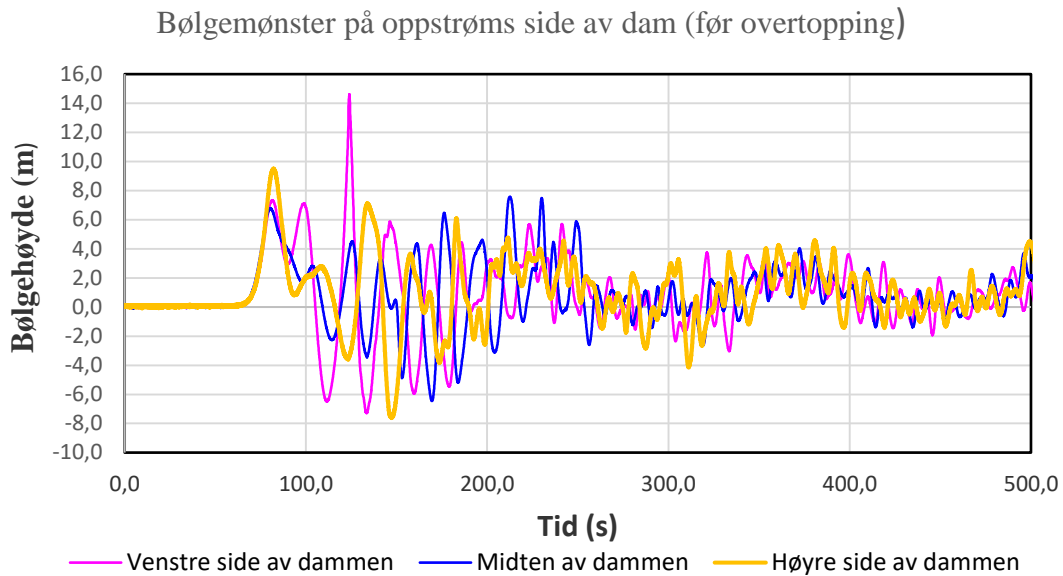
Bølgehøydemålingene over indikerer en trend med økende bølgehøyde med økende magasin vannstand. På grunn av forskjellen i fribord er det betydelig forskjell i vannvolum per lengde meter som overtopper damkrona. Overtoppingsvolumet var 1200 m<sup>3</sup>, 480 m<sup>3</sup> og 270 m<sup>3</sup> for henholdsvis 5 m, 10 m og 15 m fribord. Altså fører høyere fribord til mindre overtoppingsvolum, som antatt.

## 3.2 Forsøk prosjektfase 2 (Modell A)

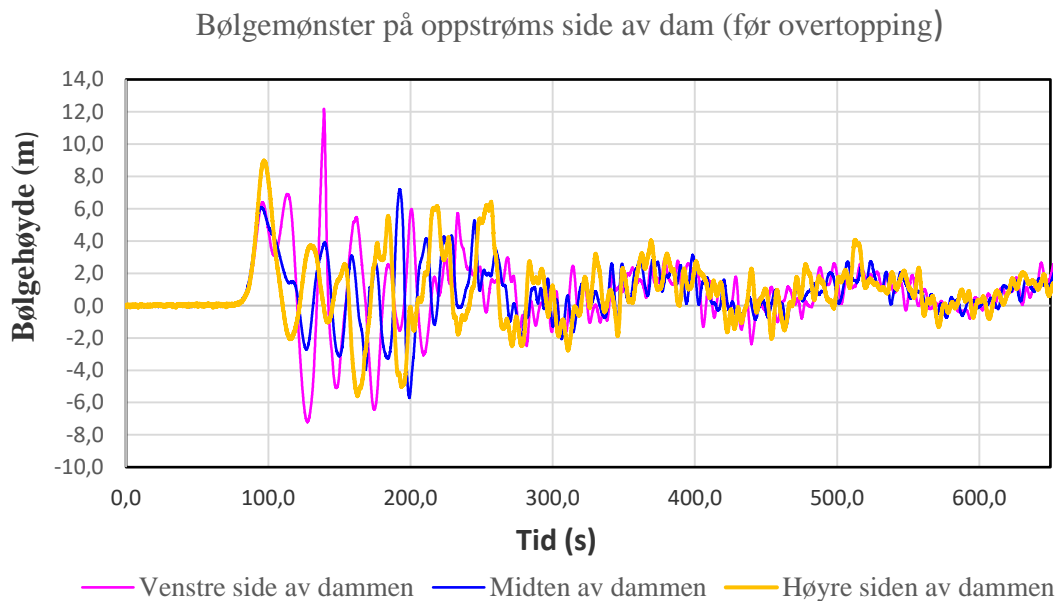
Hovedresultatene og figurene fra Kiflom et al. (2016) er presentert i denne oppsummeringen, men mer detaljert informasjon finnes i masteroppgavene til Hammeren (2016) og Mortensen (2016).

### 3.2.1 Bølgemønster oppstrøms dammen

Som det har blitt beskrevet etter tidligere forsøk, var bølgemønsteret i hovedsak påvirket av skredstørrelse og fribord. Større skredstørrelse og høyere vannstand i magasinet gir større bølgehøyde og det betyr større oppskylling over dammen. Som vist på Figur 3.6 og Figur 3.7 var det mer enn to bølger som overtoppet dammen fra hvert enkelt skred. Det er heller ikke den første, men den tredje bølgen som gir størst oppskylling over damkrona. Dette mønsteret var typisk for alle dammene, vannstander og skred av alle størrelser. Selv om størrelsene var forskjellige, var mønsteret av samme trend.



**Figur 3.6:** Bølgehøyde generert fra 1,5 mill. m<sup>3</sup> skredvolum, på Chevron-dam og klasse 4



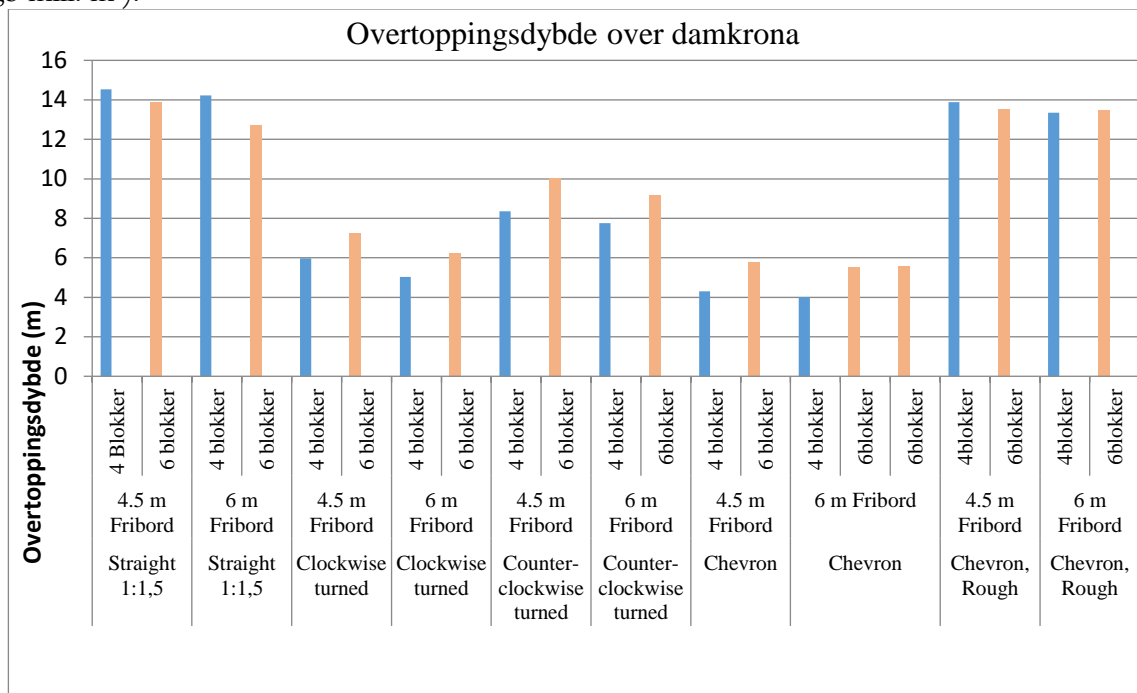
**Figur 3.7:** Bølgehøyde generert fra 1,5 mill. m<sup>3</sup> skredvolum, på rotert dam, med klokka og klasse 4

I alle tester ble den høyeste bølgen registrert på venstre side av dammen. Denne bølgen er en bølge som genereres fra refleksjonen i magasinveggen på motsatt side av skredet. Denne bølgen gir større overtopping enn de andre. Vi kjenner til at dammer med smale magasin blir utsatt for større overtopping enn dammer som ligger i brede magasin.

### 3.2.2 Overtoppingshøyde over damkrona

Det er blitt forklart tidligere at større skred gir større overtopping. For å vise variasjon i overtoppingsdybde, er de største skredene brukt som eksempel.

Figur 3.8 viser den høyeste målte overtoppingsdybde over damkrona for ulike damtyper og varierende fribord for en bølge generert fra et skredvolum på 4 blokker (1 mill. m<sup>3</sup>) og 6 blokker (1,5 mill. m<sup>3</sup>).



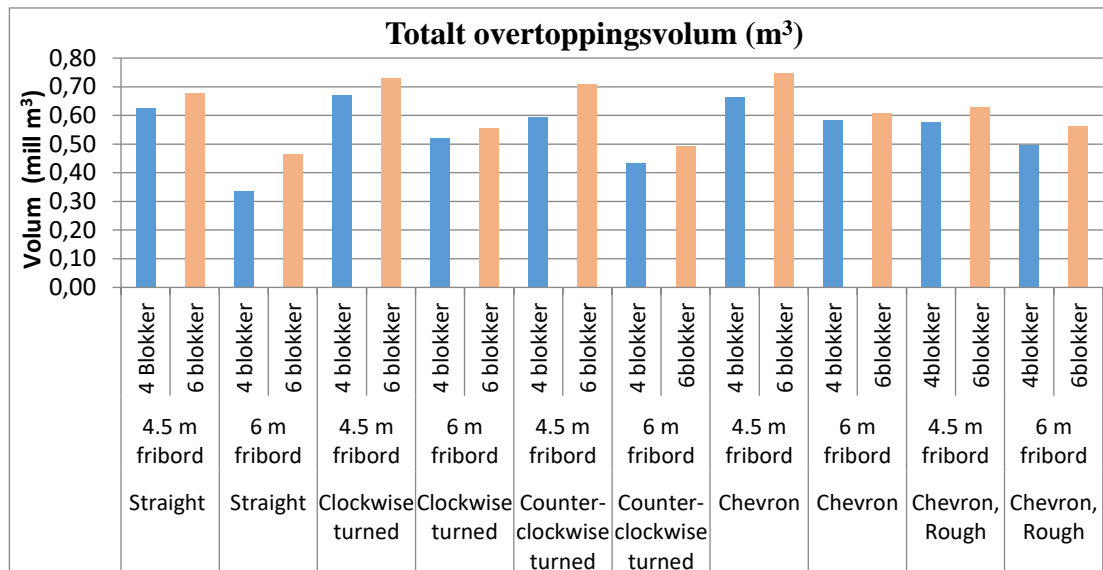
**Figur 3.8:** Maksimal overtoppingsdybde for ulike utforming av klasse 3- og 4 dammer

For skred varierende mellom 1 – 1,5 mill. m<sup>3</sup> viser modellforsøkene en høyeste overtoppingsdybde mellom 4 – 14 m. Det er dammer med damakse normalt på magasinaksen og Chevron dammer som gir høyest overtopping. Med samme skredvolum vil et økt fribord fra 4,5 m til 6 m reduseres overtoppingsdybde over damkrona med 4 % for Chevron dam og med 3 % for rotert (med klokka) dam, med 9 % for rotert (mot klokka) dam og med 8 % for rett dam. Den rette damaksen har høyest overtoppingsdybde, men dammer med rotert damakse er mer følsomme for endring av skredstørrelse. Bredden på damkrona er noe forskjellig med de ulike dammen og dette kan ha påvirket den målte vanddybden over dammen, vist i Figur 3.3, Figur 3.4 og Figur 3.5.

### 3.2.3 Overtoppingsvolum

Det er registrert totalt volum som kommer med overtoppingen for de ulike damtypene med varierende fribord. Det er brukt skredvolum på 4 blokker (1 mill. m<sup>3</sup>) og 6 blokker (1,5 mill. m<sup>3</sup>).

Som vi ser på Figur 3.9, har både fribord og skredstørrelse en klar påvirkning på overtoppingsvolumet. Dammen som får størst overtoppingsvolum, er Chevron dam, som har en utforming som leder bølgene i "kilerenner" på begge sider. Dammen med rett damakse er mer følsom for endringer av fribord i forhold til andre dammer. Prosentvis endring av overtoppingsvolum med endring av fribord og skredstørrelse er presentert videre, fortsatt med utgangspunkt i fribordverdiene for klasse 3 og klasse 4 dammer.



**Figur 3.9:** Overtoppingsvolum for ulike damtypene, fribord og skredstørrelse

### Rett damakse

Når fribord øker fra 4,5 m til 6 m, reduseres overtoppingsvolumet med 46% og 31% for skredstørrelse på 1 mill. m<sup>3</sup> og 1,5 mill. m<sup>3</sup>, henholdsvis. Når skredstørrelsen økes fra 1 mill. m<sup>3</sup> til 1,5 mill. m<sup>3</sup>, øker overtoppingen med 13% og 8% for fribord på 4,5 m og 6 m, henholdsvis.

### Rotert damakse, med klokka

Når fribordet økes fra 4,5 m til 6 m, reduseres overtoppingen med 22% og 24% for skredstørrelse på 1 mill. m<sup>3</sup> og 1,5 mill. m<sup>3</sup>, henholdsvis. Når skredstørrelsen økes fra 1 mill. m<sup>3</sup> til 1,5 mill. m<sup>3</sup>, økes overtoppingen med 8 % og 6 % for fribord på 4,5 m og 6 m, henholdsvis.

### Rotert damakse, mot klokka

Når fribordet økes fra 4,5 m til 6 m, reduseres overtoppingen med 22% og 30 % for skredstørrelse på 1 mill. m<sup>3</sup> og 1,5 mill. m<sup>3</sup>, henholdsvis. Når skredstørrelsen økes fra 1 mill. m<sup>3</sup> til 1,5 mill. m<sup>3</sup>, økes overtoppingen med 16 % og 12 % for fribord på 4,5 m og 6 m, henholdsvis.

### Chevron dam

Når fribord økes fra 4,5 m til 6 m, reduseres overtoppingen med 12% og 19% for skredstørrelse på 1 mill. m<sup>3</sup> og 1,5 mill. m<sup>3</sup>, henholdsvis. Når skredstørrelsen økes fra 1 mill. m<sup>3</sup> til 1,5 mill. m<sup>3</sup>, økes overtoppingen med 11% og 4% for fribord på 4,5 m og 6 m, henholdsvis.

### Chevron dam med ruhet på sideveggene

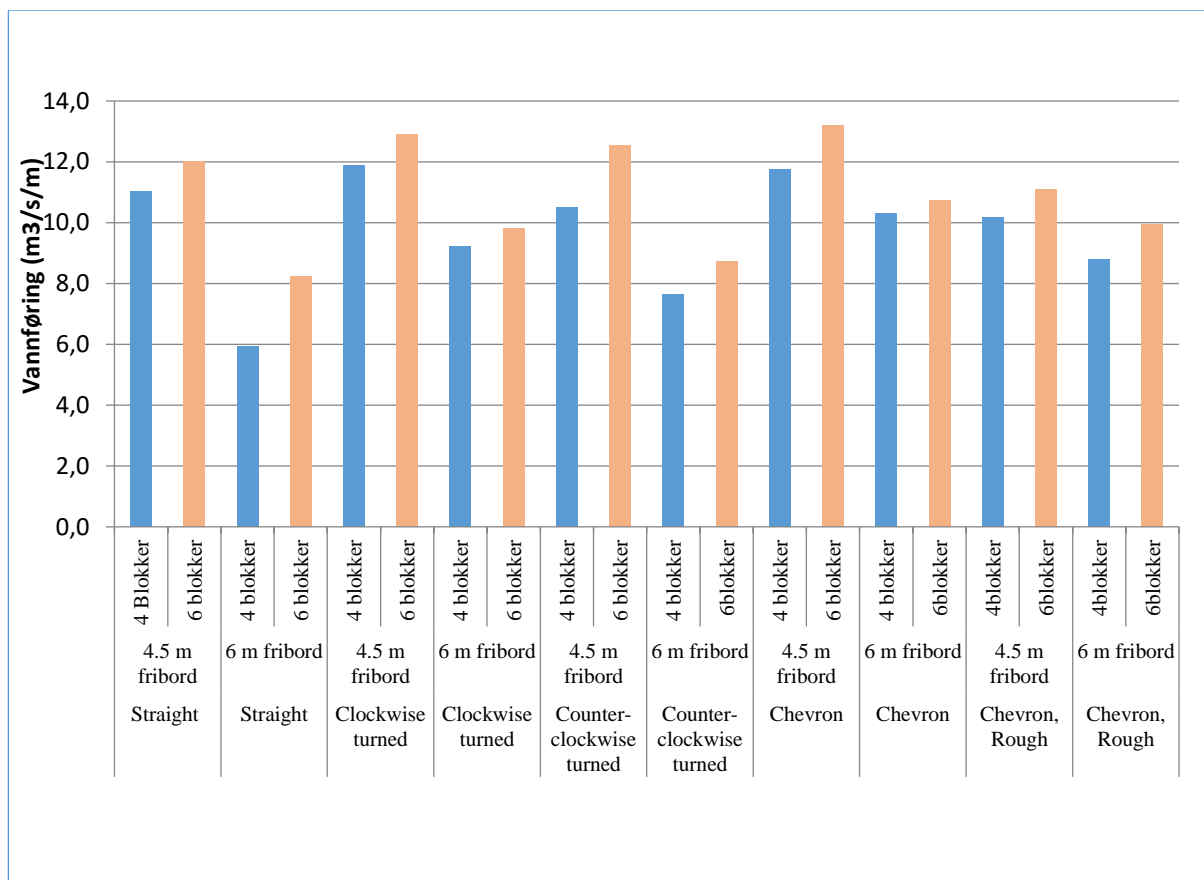
Når fribord økes fra 4,5 m til 6 m, reduseres overtoppingen med 13% og 10% for skredstørrelse på 1 mill. m<sup>3</sup> og 1,5 mill. m<sup>3</sup>, henholdsvis. Når skredstørrelsen økes fra 1 mill. m<sup>3</sup> til 1,5 mill. m<sup>3</sup>, økes overtoppingen med 8% og 12% for fribord på 4,5 m og 6 m, henholdsvis.

Det ble ikke observert noen signifikant forskjell mellom Chevron dam med glatte vegger og vegger med ruhet med skredstørrelse på 1,5 mill. m<sup>3</sup> og fribord på 6 m, men det er en merkbar forskjell med fribord på 4,5 m. Forskjellene er små med de andre dammene som ble testet. Dette viser at ruheten på sideveggene har liten effekt på overtoppingsvolumet.

### 3.2.4 Enhetsvannføring og stabilitet av plastring i fullskala

Den maksimale enhetsvannføring over damkrona var  $q = 13 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Overtoppingens varighet var i gjennomsnitt 110 sekunder med skredstørrelse  $1,5 \text{ mill. m}^3$ . Som vist på Figur 3.10, var den høyeste enhetsvannføringen av alle dammer registrert når fribordet var 4,5 m, skredstørrelse  $1,5 \text{ mill. m}^3$  og Chevron dam. Forskjellen i prosent mellom Chevron dam og andre dam typer var 2% - 9%.

IVM-rapporten Kiflom et. Al (2015) beskriver et forskningsprosjekt som ble utført for å studere stabiliteten av plastring på fyllingsdammer. Forskningen ble utført med både modellforsøk og med fullskala forsøk i felt. I feltforsøkene ble det kjørt fullstendig brudd på dammer, der brudd skjedde med typisk enhetsvannføring på  $6 - 8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Enkelte forsøk hadde enhetsvannføring på  $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , men de har mindre grad av dokumentasjon enn de øvrige.



Figur 3.10: Enhetsvannføring for ulike damtyper, fribord og skred.

Kravene til bygging av dammer for konsekvensklasse 3 og 4 dammer er plastring med steinstørrelse på minimum 0,8 m og 1 m, henholdsvis. I felttesten varierte steinstørrelse  $d_{50}$  fra 0,4 m til 0,65 m. Dette indikerer at alle dammer i klasse 3 og 4 med steinstørrelse på 0,8 m og 1 m i damkrona kan motstå en enhetsvannføring som genereres fra et skred med størrelse rundt  $1 \text{ mill. m}^3$ , som tilsvarer  $9 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

### 3.2.5 Usikkerhet i resultatene

Det finnes ikke relevante felldata for kalibrering av denne modellen, og det vil derfor ligge en relativt stor usikkerhet i resultatene i forhold til vanlige hydrauliske modellforsøk. Feilkilder inkluderer både skalaeffekter, modelleffekter og rene feil i oppsettet. Likevel brukes data fra modellsimuleringene til nokså grove vurderinger og derfor kan den forventede usikkerheten aksepteres.

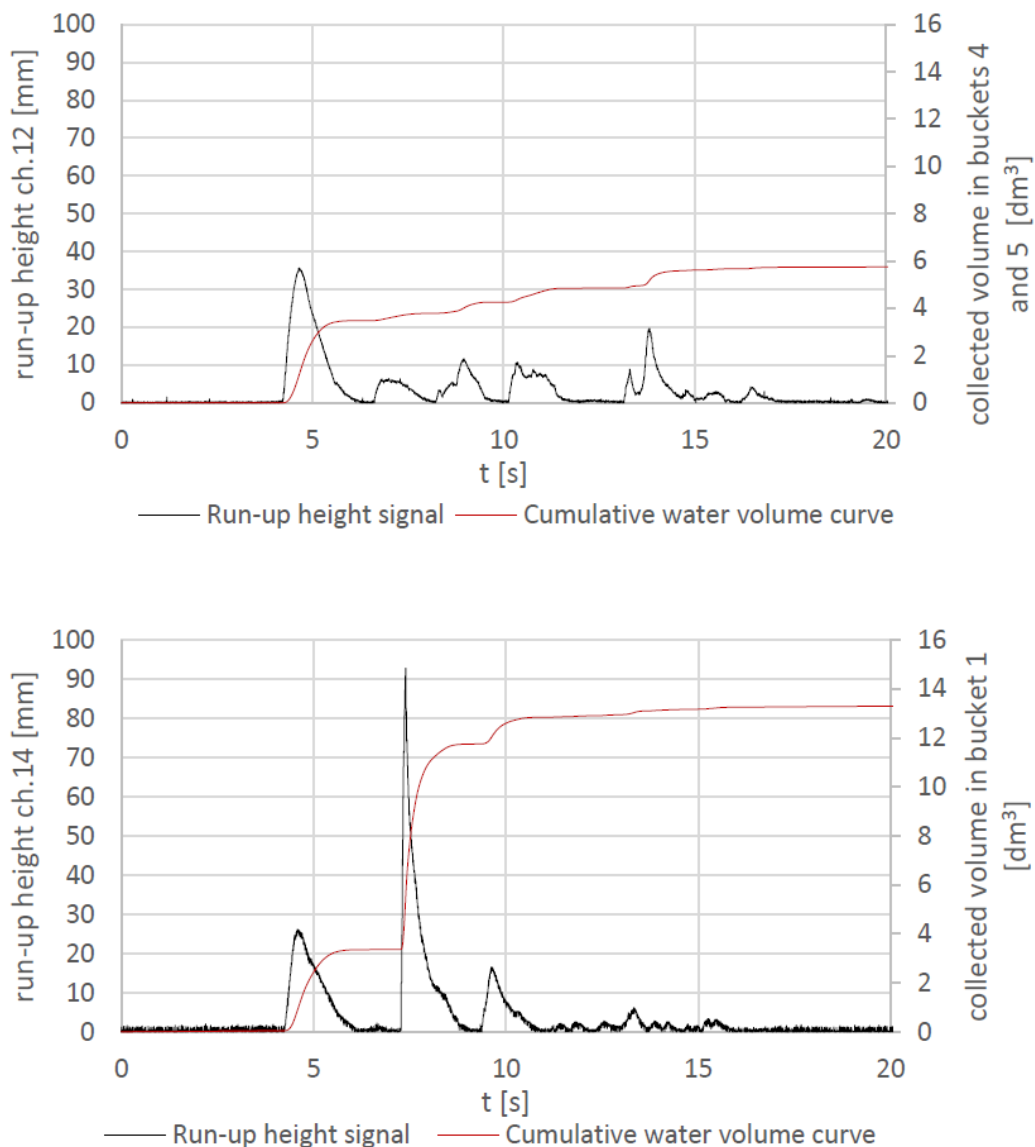
Den største feilen i oppsettet er bruk av rette vegger i magasinet uten topografiske variasjoner. Dette er ulikt et naturlig magasin som har kurver og buktninger som gir en demping av bølgene. Om denne dempingen vil bli større enn dempingen i laboratoriet kommer an på hvor stor innvirkning andre feilkilder og skalaeffekter har.

## 3.3 Forsøk prosjektfase 3 (Modell A og B)

Resultatene i dette delkapittelet er hentet og oversatt fra Sigtryggdóttir (2017)

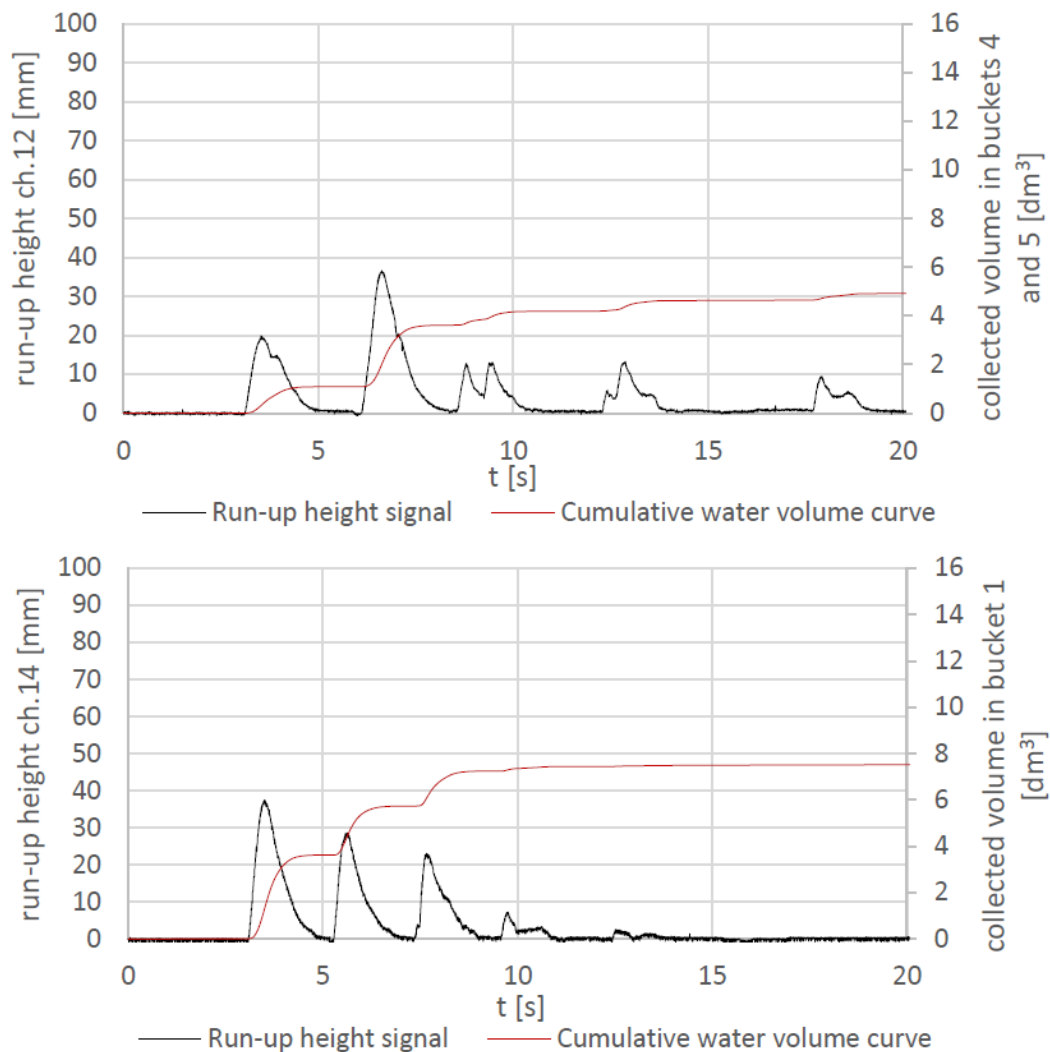
### 3.3.1 Modelleffekter

Potensielle modelleffekter ble undersøkt ved å sammenligne bølgeforplantning og tilløpshøyder i Modell A (skred på venstre side sett i retning dammen) og Modell B (skred på høyre side). En dataanalyse ble gjennomført av Ponziani og Gardoni (2017) for et bestemt scenario (4 skredblokker og fribord på 2,4 cm). Analysen av resultatene fra modell A viser at at skredet forårsaker en en-dimensjonal bølge som strekker seg over hele magasinbredden med litt høyere amplitude på høyre side av magasinet (sett mot dammen fra oppstrøms side). Videre ble det observert en ekstremt stor overtoppingsbølge på venstre side av dammen (måler 14) noen sekunder etter sammenstøtet mellom skredet og magasinet. Dette kan ses i Figur 3.11. Denne ekstreme bølgen oppstår sannsynligvis pga. modelleffekter, muligens forårsaket av utstikkende elementer i sidene på magasinet og/eller nedsenkningen i magasinet. I tillegg kan det skyldes interferens mellom forskjellige genererte bølgene.

*Model A***Figur 3.11:**

Modell A: Målt overtoppingshøyde og korresponderende estimert kumulativ overtoppingsvolum. Over: høyre side av dammen (måler 12). Nede: venstre side av dammen (måler 14). Resultatene er med 4 skredblokker og fribord lik 2,4 cm (Ponziani & Gardoni, 2017)

Analysen av resultatene for Modell B indikerer en noe komplisert bølgepropagasjon. I tillegg til impulsbølgen ble det generert flere små bølger som følge av refleksjoner i magasinet, muligens med betydelige energitap. For det bestemte scenarioet (4 skredblokker og fribord 2,4 cm) hadde impulsbølgen den største amplituden og skapte den største overtoppingsbølgen over hele damkrona. Den største overtoppingsbølgen ble observert på venstre side av dammen. Den ekstreme bølgen som ble observert i Modell A, ble ikke observert i Modell B. Som Figur 3.12 viser ble det observert en stor refleksjonsbølge på høyre side av dammen (måler 12) som var større enn impulsbølgen på samme sted, og like stor som impulsbølgen på venstre side. Dette er likevel ikke en ekstrembølge innenfor rammene i forsøket. Refleksjonsbølgen på høyre side (samme side som skredet) i Modell B tilsvarer ekstrembølgen på venstre side i Modell A (samme side som skredet).

*Model B***Figur 3.12:**

Modell B: målt overtoppingshøyde og korresponderende estimert kumulativ overtoppingsvolum. Over: høyre side av dammen (måler 12). Nede: venstre side av dammen (måler 14). Resultatene er med 4 skredblokker og fribord lik 2,4 cm (Ponziani & Gardoni, 2017)

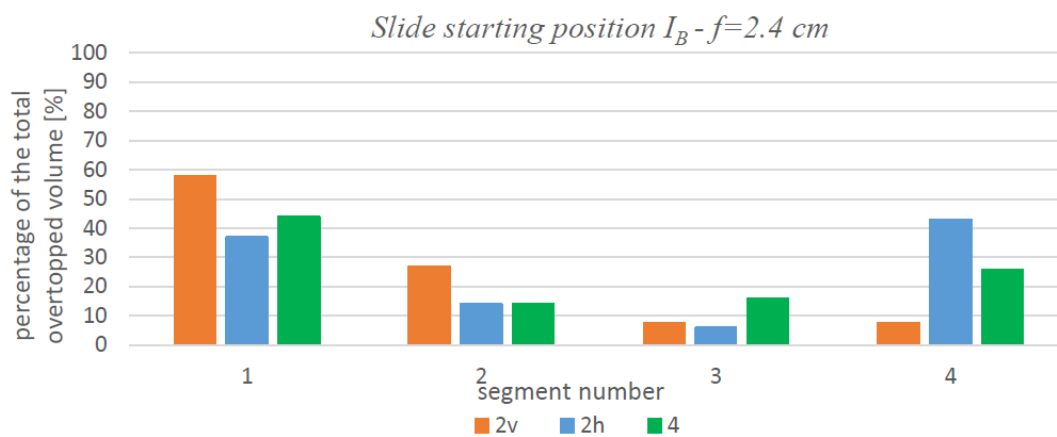
I Modell A ble det observert langt større overtoppingsvolum på venstre side av dammen (samme side som skredet går) sammenlignet med resten av dammen. Dette kommer klart frem i Figur 3.13. Dette fenomenet ble observert i forsøkene gjort våren 2016 (Mortenson, 2016), og videre bekreftet av forsøkene gjort høsten 2016 (Ponziani & Gardoni, 2017).

Fordelingen av overtoppingsvolumet langs damkrona i forsøk gjort med Modell B er vist i Figur 3.14. I dette tilfelle viser resultatene at det største overtoppingsvolumet kan forekomme på begge sider av dammen, og virker å være styrt av formen på skredet. Skred med større volum og/eller avlang form gir større overtoppingsvolum på venstre side, altså motsatt side av skredet. For skred med mindre volum og videre form fordeles overtoppingsvolumet likt på begge sidene av dammen. Mesteparten av overtoppingsvolumet forekommer på sidene av dammen.



**Figur 3.13:**

Modell A: Fordelingen av overtoppingsvolumet langs damkrona. Presentert som prosent av totalt overtoppet volum i hvert forsøk. Segment 1 er på venstre side av dammen. Fribrord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til form og størrelse av skredet (Ponziani & Gardoni (2017)).

**Figur 3.14:**

Modell A: Fordelingen av overtoppingsvolumet langs damkrona. Presentert som prosent av totalt overtoppet volum i hvert forsøk. Segment 1 er på venstre side av dammen. Fribrord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til form og størrelse av skredet (Ponziani & Gardoni (2017)).

Det er indikasjoner på at det er betydelige modelleffekter i Modell A som påvirker resultatene. Tolkningen av data må ta høyde for dette. Modifiseringen av Modell A til Modell B har tilsynelatende redusert modelleffektene. Men geometrien til magasinet påvirker også resultatene fra Modell B så diskusjon og konklusjon av resultatene må ta hensyn til dette.

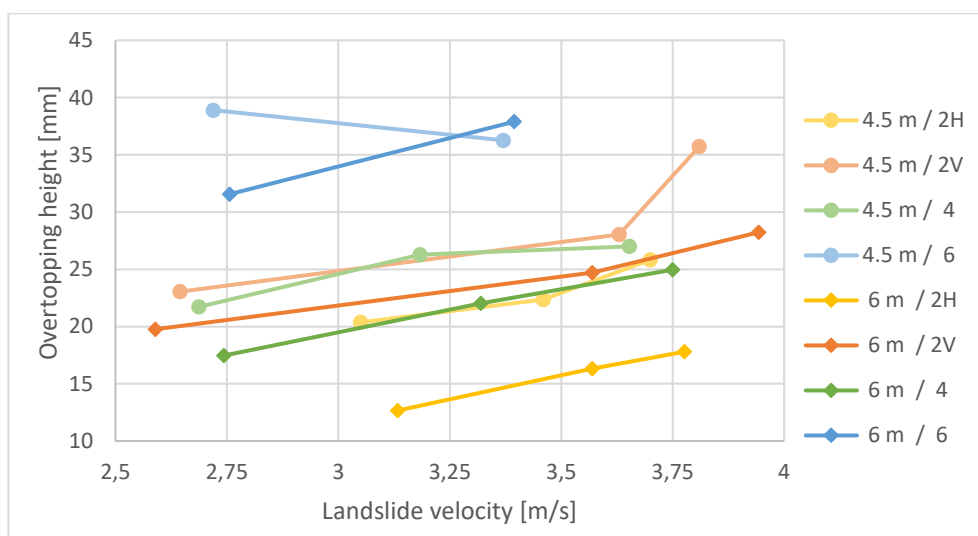
### 3.3.2 Undersøkelser av påvirkning av skredhastighet på bølgehøyde og overtoppingsvolum

Effekten av varierende skredhastighet ble undersøkt i både Modell A og Modell B. Skredhastigheten ble variert ved å endre startposisjonen til skredene på rampa. Tabell 3.1 viser beregnede maksimale skredhastigheter for forskjellige skredformer og startposisjoner (Ponziani og Gardoni, 2017).

**Tabell 3.1:** Maksimale målte skredhastigheter for alle forsøk utført i modell A og Modell B (Ponziani and Gardoni, 2017).

<i>Slide impact velocity [m/s]</i> <i>Model A</i>				<i>Slide impact velocity [m/s]</i> <i>Model B</i>							
	<b>I<sub>A</sub></b>	<b>II<sub>A</sub></b>	<b>III<sub>A</sub></b>		<b>I<sub>B</sub></b>	<b>II<sub>B</sub></b>	<b>II<sub>B_6</sub></b>	<b>III<sub>B</sub></b>	<b>III<sub>B_6</sub></b>	<b>IV<sub>B</sub></b>	<b>IV<sub>B_6</sub></b>
<b>2h</b>	4.37	3.75	3.03	<b>2h</b>	4.15	4.10	4.02	3.68	3.39	-	-
<b>2v</b>	3.90	3.37	2.43	<b>2v</b>	3.58	3.18	3.14	2.97	2.71	-	-
<b>4</b>	3.85	3.32	2.46	<b>4</b>	3.58	3.32	3.33	3.10	2.55	-	-
				<b>1</b>	-	3.89	3.83	-	-	-	-
				<b>3</b>	-	-	-	-	-	3.30	3.17
				<b>6</b>	-	-	-	-	-	3.76	3.80

Skredhastigheten ble observert til å påvirke amplituden til impulsbølgen i magasinet i Modell B. Likevel er det skredvolumet og skredformen som dominerer bølgegenereringen (Ponziani & Gardoni, 2017). Det samme ble observert av Biedermann (2017). En økning i skredhastighet resulterer i en økning i overtoppingshøyden, se Figur 3.15. Helningen på kurvene i Figur 3.15 indikerer et lineært forhold mellom skredhastighet og overtoppingshøyde uansett form på skredene. Det er derimot noen unntak som trenger videre undersøkelser for å forklares. En økning i skredhastighet på 20%-40% fører til en økning i overtoppingshøyde på omtrent 20% eller mer.



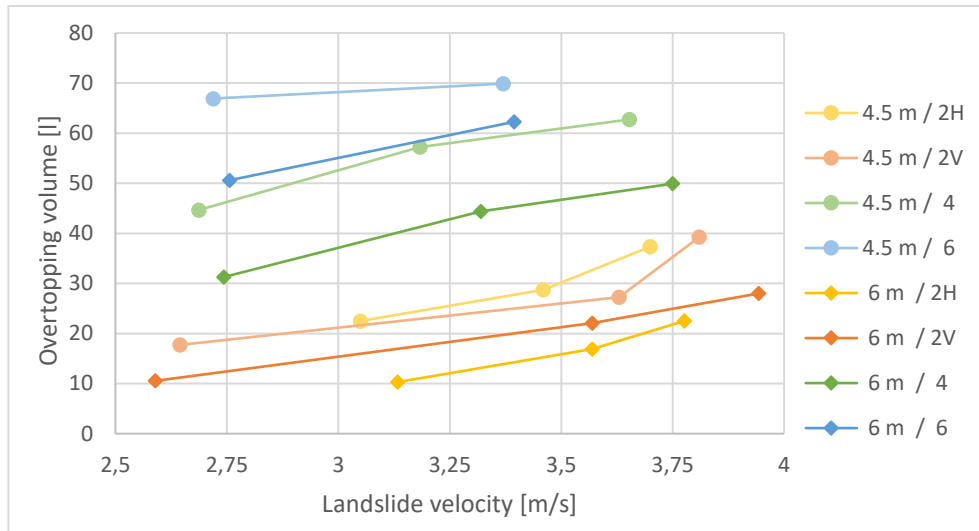
**Figur 3.15:**

Modell B (glatt damside, helning 1:1,5): Overtoppingshøyde mot skredhastighet. (Beskrivelsen til høyre: fribord /skredkonfigurering) (Mistenker feil på målingene med 4,5/6) (Biedermann, 2017).

Biedermann (2017) undersøkte påvirkning av skredhastighet på overtoppingsvolum. Han brukte Modell B og en glatt damside med helning 1:1,5 for å få resultatene vist i Figur 3.16. En økning i skredhastighet på 20% kan føre til en økning i overtoppingsvolum på minst 20% til over 100%, avhengig av formen til skredet.

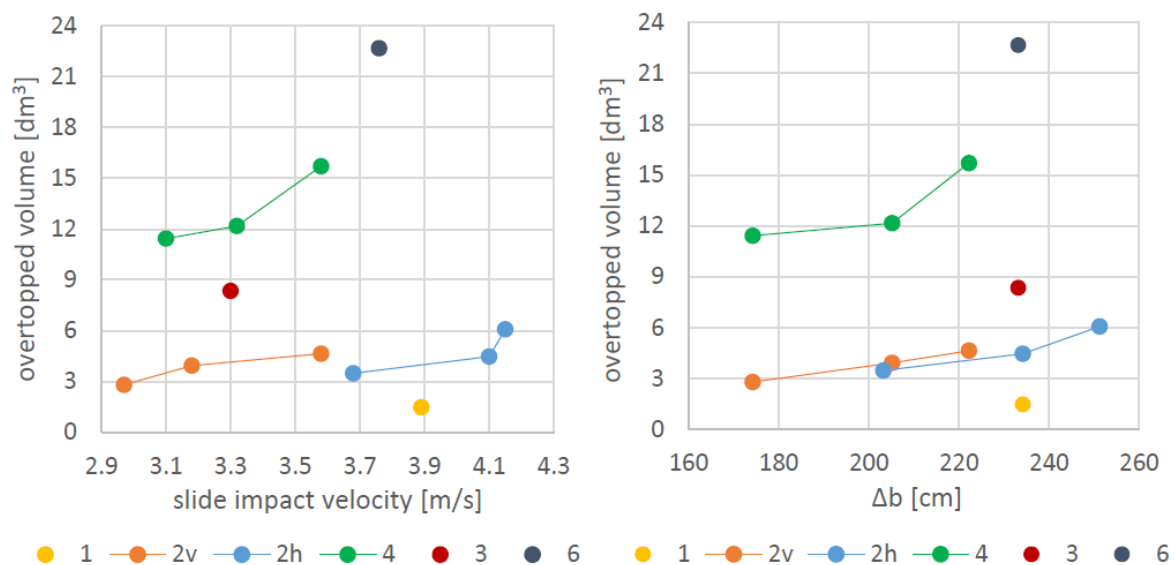
Ponziani & Gardoni (2017) undersøkte forholdet mellom overtoppingsvolum, skredhastighet og skredvolum. Resultatene er presentert i Figur 3.17 og figur 3.18. Figur 3.18 viser en mer direkte

sammenheng mellom skredvolum og overtoppingsvolum, i tillegg vises påvirkning av fribord. I figuren representerer datapunkter med samme farge forskjellige skredhastigheter. I dette perspektivet ser man at påvirkningen av skredhastighet på overtoppingsvolum er mye mindre en påvirkningen av skredvolum. Denne påvirkningen er videre undersøkt av Ponziani og Gardoni (2017) i en dimensjonsanalyse.



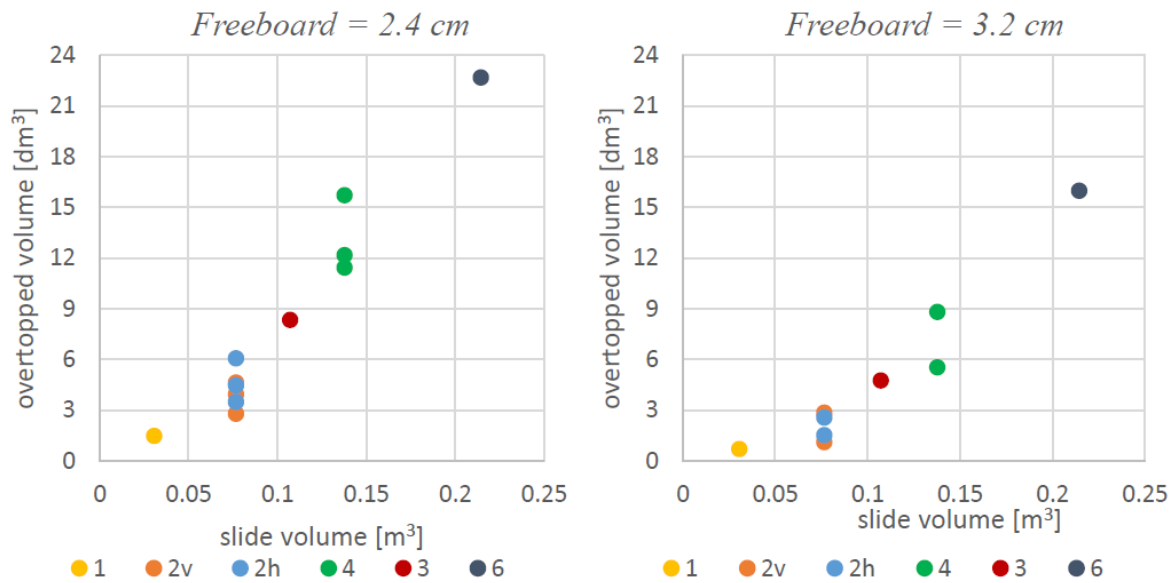
**Figur 3.16:**

Modell B (glatt damside, helning 1:1,5): Overtoppet volum mot skredhastighet. (Beskrivelsen til høyre: fribord / skredkonfigurering) (Biedermann, 2017).



**Figur 3.17:**

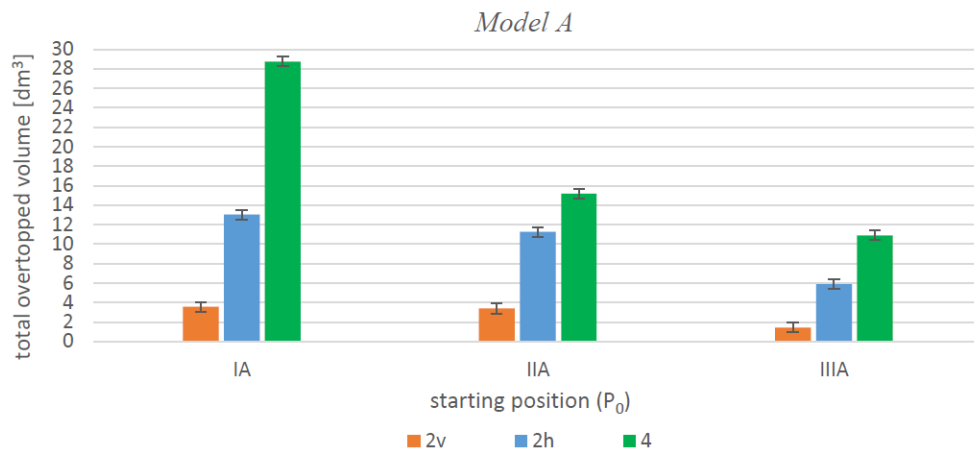
Modell A (Chevron dam, helning 1:1,5): Overtoppet volum mot skredhastighet (v) og avstanden mellom skredets senter og vannivået (h). (Ponziani & Gardoni, 2017).



**Figur 3.18:**

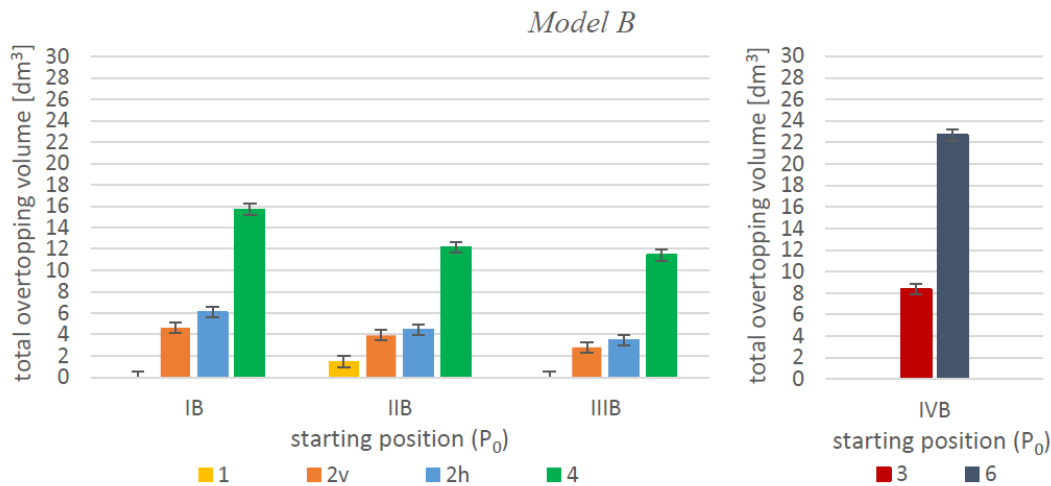
Modell A (Chevron dam): Overtoppet volum mot skredvolum, og fribord lik 2,4 cm(v) og 3,2 cm(h). (Ponziani & Gardoni, 2017).

Figur 3.19 og Figur 3.20 viser forholdet mellom totalt gjennomsnittlig overtoppingsvolum og skredhastighet for Modell A og Modell B. Sammenliknes figurene viser de at skredhastigheten har mye større påvirkning i Modell A enn i Modell B. Modelleffektene beskrevet tidligere i kapittelet kan være en forklaring på denne forskjellen. Videre viser Figur 3.20 påvirkningen av skredvolum på overtopping.



**Figur 3.19:**

Modell A (Chevron dam): Gjennomsnittet av alle resultatene av totalt overtoppet volum for forskjellige startposisjoner, og følgelig hastigheter. Fribord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til antall skredblokker og skredform (Ponziani & Gardoni, 2017).



**Figur 3.20:**

Modell B (Chevron dam): Gjennomsnittet av alle resultatene av totalt overtoppet volum for forskjellige startposisjoner, og følgelig hastigheter. Fribord lik 2,4 cm. 2v, 2h og 4 viser til antall skredblokker og skredform (Ponziani & Gardoni, 2017).

### 3.3.3 Dimensjonsanalyse

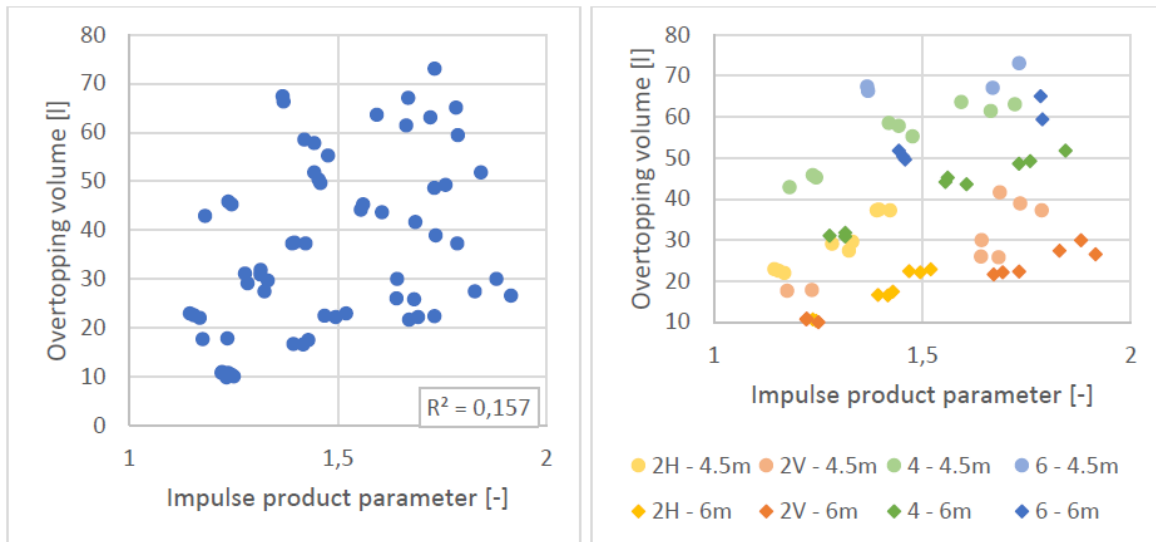
Et av formålene med forskningen i 2017 var å undersøke effekten av skredhastighet på de øvrige parameterene for overtopping. Det er likevel slik at en stor mengde parametere påvirker hverandre, og de er alle med i dimensjonsanalysen beskrevet her.

Heller og Hager (2010) innførte en «samlet impuls parameter» for å bestemme maksimal bølgehøyde, bølgeperiode og forsinkelser i bølgefôrplantningen. Samtidig defineres flere styrende parametere som stille vannstand i nedslagsområdet for skredet, skredvolumet, skredbredden, skredtykkelsen, steinstørrelse i skredet, innfallsvinkel på skredet, skredhastighet, tetthet på skredet, egenvekt på vann, tyngdens akselerasjon, lengde fr nedslagspunktet til skredet og tid ifra skredet traff vannet. Av de nevnte parameterne er det stille vannstand, skredhastighet og egenvekt på vann som er listet som «uavhengige» størrelser. Tydeligvis er det mange parametere som påvirker karakteristikken og effekten av skredet på bølgene og bruk av bare skredhastighet er derfor en altfor forenklet metode.

«Samlet impuls parameter» (IPP), definert av Heller og Hager (2010), er utledet fra et forsøk i en trapesformet kanal og fokus i forsøkene var selve bølgegenereringen. Derfor har ikke IPP noen direkte innvirkning på overtoppingsvolum eller andre deler av overtoppingen. Det viser seg i både Modell A og Modell B at fasongen på magasinet har stor betydning for bølgefôrplantningen og overtoppingsvolumet. I figur 3.21 er totalt overtoppingsvolum plottet mot IPP. Det viser en viss sammenheng for gitt utforming, men fanger ikke opp variasjonene i denne.

Dimensjonsanalysen utført av Ponziani & Gardoni (2017), presentert i deres masteroppgave viser at IPP definert av Heller og Hager (2010) ikke viser noen sammenheng for overtoppingsvolum. De definerte en ny dimensjonsløs parameter som tar med seg parametere som i størst grad påvirker overtoppingen; skredvolum og – hastighet. Dessverre tar ikke den nye parameteren med seg fribord og fasong på skredet.

Oppsummert er det observert at skredets hastighet når det treffer magasinet påvirker den maksimale bølgehøyden i magasinet og overtoppingshøyden. Økt skredhastighet resulterer også i økt totalvolum som overtopper dammen. Likevel er det observert at skredvolumet har større påvirkning på totalt overtoppingsvolum. Hydrauliske modell- og skalaeffekter ventes å innvirke på konklusjonen.



**Figur 3.21:**

Model B (glatt dam, helning 1:1,5): Totalt overtoppet volum mot IPP for maksimal bølgehøyde (Biedermann, 2017)

### 3.3.4 Damgeometri

Det ble gjort forsøk med flere damgeometrier, vist i Figur 2.8. Forsøkene ble kjørt med fribord tilsvarende 4,5 m og 6 m i prototypen, og forskjellige skredformer og konfigurasjoner (Biedermann, 2017). Hovedfunnene fra forsøkene oppsummert:

- Ruhet på oppstrøms damside har neglisjerbar effekt på overtopping.
- Oppstrøms damhelning påvirker totalt overtoppingsvolum med 12%-24% med helning 1:2 i forhold til helning 1:1,5
- Introduksjon av en vertikal vegg under damkrona på oppstrøms side reduserer overtoppingsvolumet med 13% - 30% for helning 1:1,5.

Størrelsen på fribord har en betydelig påvirkning på overtoppingsvolum for Chevron-dammen i Modell B. Dette vises tydelig i Figur 3.18. Effekten av større fribord ble også undersøkt med sidehelning 1:1,5. I dette tilfelle gir et fribord på 6 m (32 mm i modellen) en reduksjon i overtoppingsvolum på 11% - 54% i forhold til fribord på 4,5 m, avhengig av størrelse og form på skredet.

### 3.3.5 Bølgehastighet under overtopping og vurdering av vannføring

En vurdering av sikkerheten for fyllingsdammer som utsettes for overtopping, må inkludere vannføringen under overtopping. Beregningene utført av Ponziani & Gardoni (2017) for overtoppingsvolum som funksjon av tid har blitt oppsummert tidligere. Deres arbeid ble videreført av Biedermann (2017). Oppdeling av overtoppingen over krona ble delt ytterligere opp i enda flere kanaler og hver inndeling fikk en egen sensor for å måle overtoppingshøgda. Videre ble en ekstra sensor installert over damkrona for å måle bølgehastigheten over krona. Biedermann (2017) beregnet bølgehastigheten over krona og brukte dette sammen med overtoppingshøyden til å beregne gjennomsnittlig vannføring langs damkrona, i tillegg til maksimal vannføring under overtoppingen. Det må likevel poengteres at bølgehastighet ikke er det samme som vannhastighet. Likevel gir metoden interessante opplysninger om gjennomsnittlig vannføring. Resultatene fra denne analysen er presentert i Biedermann (2017). Videre analyse av vannhastighet og vannføring er viktig for damsikkerhetsvurderinger og vurderinger for nedstrøms område. Dette bør undersøkes i videre forskning.

## 4 Påvirkningen av overtoppingsvannføring på stabiliteten til steinfyllingsdammer

Et forskningsprosjekt utført på NTNU fokuserte hovedsakelig på å skape forbedre designkriterier for arrangering av plastring på steinfyllingsdammer med bratte sidehelninger. Forskningen er basert både på modeller i vassdragslaboratoriet ved NTNU og stor-skala eksperimenter i felt (Hiller, 2015).

### 4.1 Stabilitet av nedstrøms plastring ved overtopping. Erfaringer fra feltforsøk.

Dette avsnittet er inkludert for å gi en oversikt over påvirkningen av overtopping på stabiliteten av steinfyllingsdammer.

Figur 4.1 viser bilder av feltforsøk utført ved utløpstunnelen fra flomløpet til magasinet Svartevatnet. Flomløpet ved Svartevatnet er utstyrt med luker slik at vannføringen ut av utløpet kunne bestemmes ut ifra lukeåpningen, magasin vannstanden og kalibrasjonskurvene til lukene. En 3 m høy og 12 m bred (9,5 m bred ved fundamentet) testdam ble bygget rett nedstrøms utløpet.

I forsøkene med plassert plastring ble de første steinene erodert med enhetsvannføringer mellom 4 og 5  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  mens kollaps av dammen inntraff først ved enhetsvannføringer mellom 6 og 8  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ . For å få et inntrykk av strømningsforholdene er bilder av dammen før og under forsøket med kritisk vannføring vist i figur 4.1. Sammenliknet med lagt plastring så kollapset tilfeldig plassert plastring med enhetsvannføringer på ca. 1  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ . Bruddkriteriet sammenfaller med erosjon av den første steinen.



**Figur 4.1:** Testdammen før (v) og under en enhetsvannføring på 8  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  (Hiller et. al, 2015).

**Tabell 4.1:** Oppsummering av forsøksresultatene, enhetsvannføring ved kollaps

Test nr.	Plastringsstørrelse $d_{50}$ [m]	Helning på plastringstein $a$ [°]	Enhetsvannføring $q$ [m <sup>3</sup> /s/m]
1, 2012	0,65	Tilfeldig	2,1
2, 2012	0,65	37	5,1
3, 2012	0,65	63	6,3 – 8,3 *
4, 2012	0,65	71	> 8,3 *
1, 2013	0,55	61	6,5
2, 2013	0,55	60	2,0
1, 2015	0,37	53	6,2
2, 2015	0,37	55	8,0
3, 2015	0,37	Tilfeldig	0,6 – 1,1

\* Utført med plastring som ble refusert p.g.a. dårlig utførelse

Resultatene fra forsøkene er oppsummert i tabell 4.1, og viser ved hvilken enhetsvannføring damkollaps inntraff med forskjellig plastringstørrelse og -helning.

Resultatene fra skredmodellforsøket viser at enhetsvannføringen over damkrona varierte fra 0,5 m<sup>3</sup>/(s·m) til 14 m<sup>3</sup>/(s·m) når dammen hadde en ru oppstrøms side med helning 1:1,5. Skredvolumet var i området 0,26 mill. m<sup>3</sup> til 1,5 mill. m<sup>3</sup>.

Sammenliknet med resultatene i tabell 4.1 gir skredmodellforsøket betydelig større enhetsvannføringer enn det som førte til kollaps i feltforsøket. Det kan stilles spørsmål om hvor riktig det er å sammenlikne forsøkene med tanke på at steinene i feltforsøket er mye mindre enn i prototypen, men resultatene fra skredmodellforsøket indikerer at overtopping som følge av et skred kan ha stor påvirkning på sikkerheten til steinfyllingsdammer.

## 4.2 Overtopping av dammer i konsekvensklasse 3 og 4

Det er særskilte krav til konstruksjon av damkrona for dammer i konsekvensklasse 3 og 4. Kravene i dette tilfellet er steinstørrelse [m], damkronebredde [m] og fribord [m]. Med å bruke resultatene i tabell 4.1 kan det avledes en ekstrapolert kapasitet for overtopping av steinfyllingsdammer sin følge av tsunami-liknende bølger.

**Tabell 4.2:** Krav for dammer i klasse 3 og 4

Beskrivelse	Klasse 3	Klasse 4
Minimum kronebredde	5,5 m	6,5 m
Minimum fribord	4,5 m	6 m
Minimum størrelse plastringstein	0.5 m <sup>3</sup> (≈ 0.8 m)	1 m <sup>3</sup> (≈ 1 m)



Likning 1 fra «Veileder for fyllingsdammer» (nr. 4/12) estimerer minimum steinstørrelse skråningsvernet som funksjon av helning og enhetsvannføring:

$$D_{min} = 1,0 \cdot S^{0,43} \cdot q^{0,78} \quad \text{Likning 1}$$

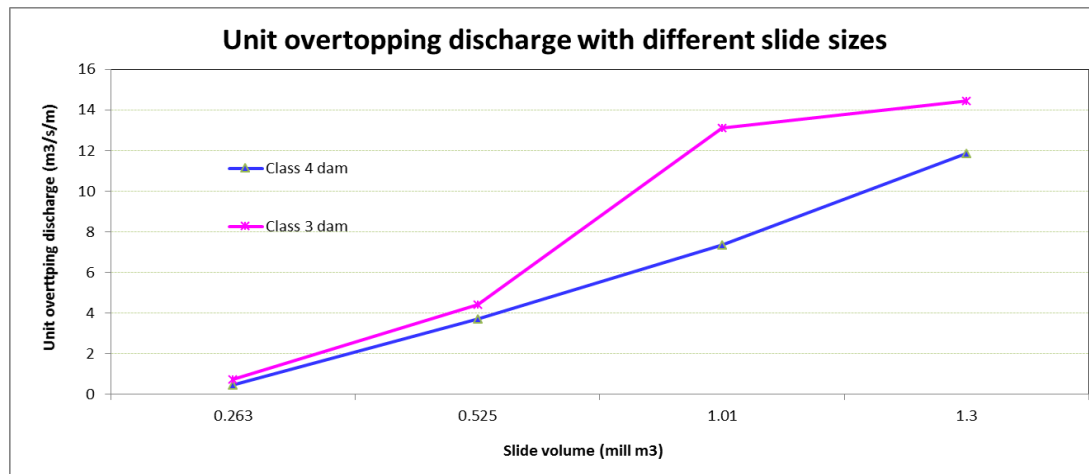
Hvor:

$D_{min}$  = minimum diameter på stein [m]

S = helningsvinkel [°]

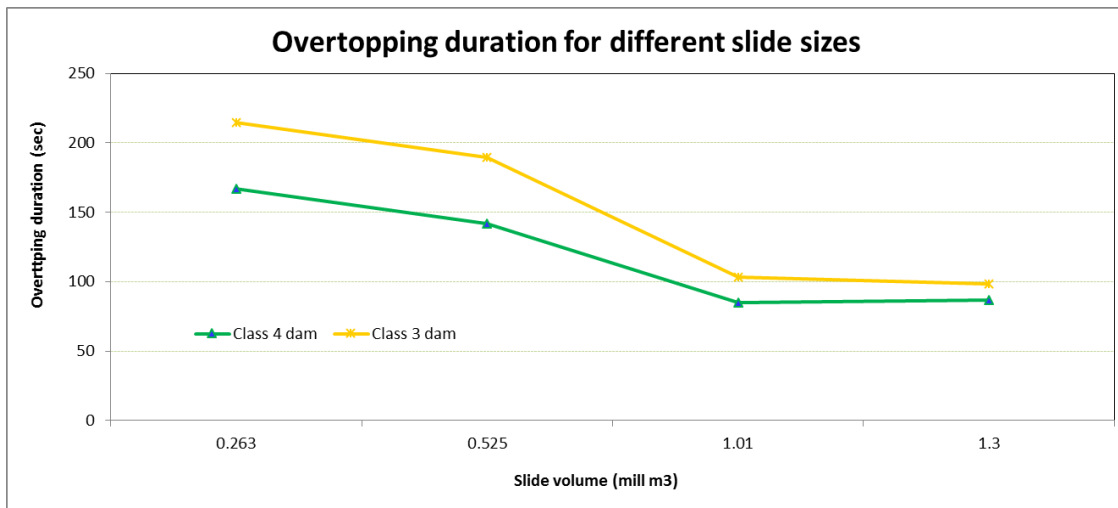
q = enhetsvannføring ( $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ )

Figur 4.2 viser at den høyeste målte enhetsvannføringen var  $14 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  for en klasse 3 dam og  $11 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  for en klasse 4 dam.



**Figur 4.2:** Enhetsvannføring over damkrona for klasse 3 og 4 dammer (Modell A, Kiflom et al. (2016))

Figur 4.3 viser varigheten på overtoppingen mot størrelsen på skredene for begge konsekvensklassene. Varigheten på overtoppingen var større for klasse 3 enn for klasse 4 for alle skredvolumene. Med et skredvolum på  $1,5 \text{ mill. m}^3$  var over overtoppingsvarigheten for klasse 3 og klasse 4 henholdsvis 100 s og 90 s.



**Figur 4.3:** Varighet av overtopping for dammer i klasse 3 og klasse 4 (Modell A, Kiflom et al. (2016))

Ved å bruke resultatene i Figur 4.2 i likning 1 kan minimums steinstørrelse for plastring estimeres for dammer i konsekvensklasse 3 og 4, og sammenliknes med verdiene i Tabell 4.2: Krav for dammer i klasse 3 og 4. Resultatene må ekstrapoleres til aktuelle steinstørrelser større enn i tabell 4. Undersøkelsene her viser motstand i samme størrelsesorden som i kapittel 3.2.4. Klasse 3 og 4 dammer vil derfor ha behov for økt oppmerksomhet med tanke på steinstørrelse i skråningsvern og fribord. Tabell 4.1 viser at økende vinkel på plastringssteinene øker evnen dammen har til å motstå stor vannføring over krona og plastringen.

## 5 Numeriske simuleringer

### 5.1 Bakgrunn

NGI har gjennom flere tiår bygget opp kompetanse på og kunnskap om flodbølger og er i dag ledende i Norge på dette området. For beregninger av flodbølger inngår flere fagfelt fra dannelsen av slike bølger via ulike typer skred til hydrodynamiske beregninger av selve bølgen og videre oppskylling på land. I dette prosjektet er laboratorieforsøkene i 2015 og 2016 (Modell A) sammenlignet med numeriske beregninger hvor NGIs modeller er anvendt

Inngangsdata for de numeriske modellene er skreddynamikken med hastighet, retning på skred, skredets form, samt en digital terrengmodell av magasinet inkludert dam og skredbane, se Figur 5.8. Den digitale terrengmodellen ble framskaffet av NTNU ved hjelp av laserskanning. Videre ble posisjonene for alle målepunkter fra laboratorieforsøkene innmålt, slik at punktene i de numeriske beregningene sammenfaller med forsøkene. I de numeriske beregningene er det antatt at skredene følger en rett linje. Dette er tilnærmet riktig i forhold til forsøkene, og mest riktig i den viktigste første fasen etter at skredet går i vannet, der oppbyggingen av bølgen er sterkest. Hastighetsforløpet til skredene ble målt ved hjelp av en snor på enden av skredet, og sammen med formen på skredet danner dette nødvendig input til de numeriske modellene.

### 5.2 Numeriske modeller og modelloppsett

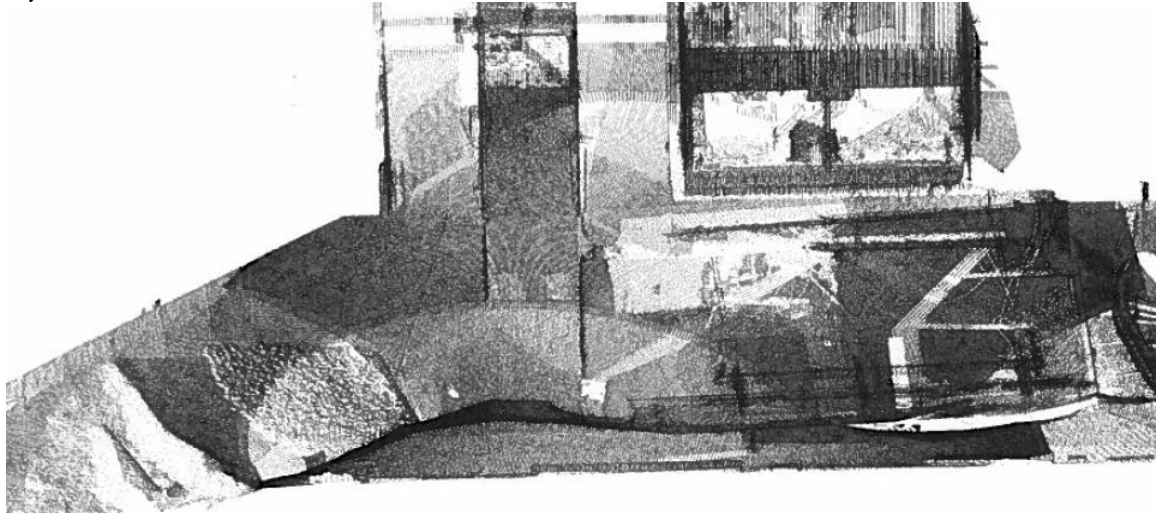
GloBouss er en regnemodell utviklet ved Universitetet i Oslo og NGI for flodbølger som følge av skred eller jordskjelv. Modellen er dybdemidlet (benytter langbølgelikninger) og beskriver blant annet ikke-lineære og dispersive (ikke-hydrostatiske) effekter. Modellen beskriver ikke oppskyllingsfasen (se neste avsnitt).

GloBouss er med godt resultat sammenlignet med analytiske løsninger og andre numeriske modeller, Pedersen og Løvholt (2008). Den har også gitt gode resultater i forbindelse med Åknes/Tafjord-prosjektet hvor den er sammenliknet med skalamodellen av Hellesylt og Geirangerfjorden ved SINTEF Kyst- og havneteknikk i Trondheim, NGI (2010), se også neste avsnitt. For mer informasjon om modellen henviser vi til Pedersen og Løvholt (2008).

Oppskyllingsmodellen MOST tar hensyn til ikke-lineære effekter og håndterer bølgebrytning. Den tillater også at vann beveger seg inn på områder som i utgangspunktet ikke var våte. Det er ikke tilfelle med modellen for bølgeforplantning (GloBouss) som reflekterer bølgen ved strandlinjen. MOST er den mest brukte oppskyllingsmodellen internasjonalt i dag. Den er grundig verifisert ved hjelp av laboratorieforsøk og standardiserte tester (benchmark tests). MOST leser data (partikkelhastighet og overflateheving) fra GloBouss og beregner oppskylling i angitte områder. MOST beregner bølger og oppskylling på tre ulike nivåer, "nested grids". Tettheten av beregningspunkter i gitteret på hvert nivå har ulik oppløsning hvor data fra GloBouss leses inn på det groveste, mens selve oppskyllingen beregnes på det fineste. Modellen er beskrevet av Titov og Gonzalez (1997).

Modelloppsettet som er kombinasjonen av GloBouss og MOST, er beskrevet av Løvholt et al. (2010). I tillegg til testene av GloBouss er oppsettet grundig testet og sammenliknet med laboratorieforsøkene ved SINTEF Kyst- og havneteknikk i forbindelse med beregningene av flodbølger dannet av steinskred fra Åknes. Resultatene er oppsummert av NGI (2010), mens laboratorieforsøkene er beskrevet av SINTEF (2008).

Figur 5.1 viser den fysiske modellen generert av scannet data. Modellen ble scannet, og generert av «ScanMaster Office Software» fra Topcon. 3D-kartesiske punkter ble gitt til NGI i .csv format for å bli benyttet i den numeriske modellen.



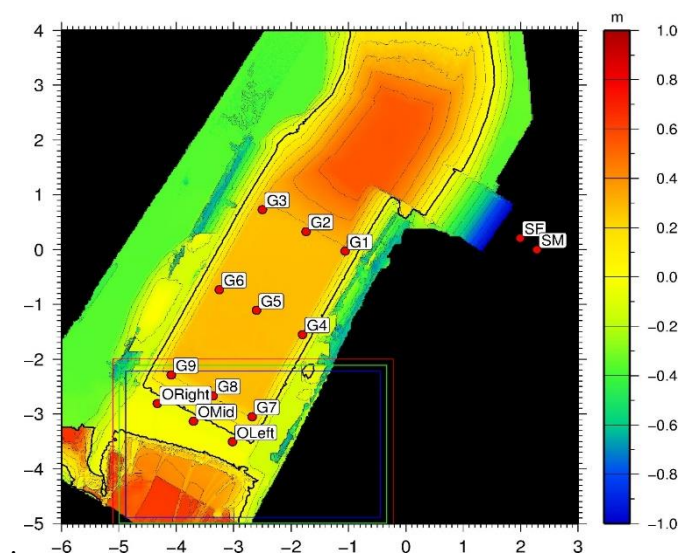
**Figur 5.1:** Oversikt over den genererte modellen basert på scannet data fra den fysiske modellen i laboratoriet (Kiflom et al., 2015)

## 5.3 Resultater fra den numeriske modellen

### 5.3.1 Forsøk prosjektfase 1

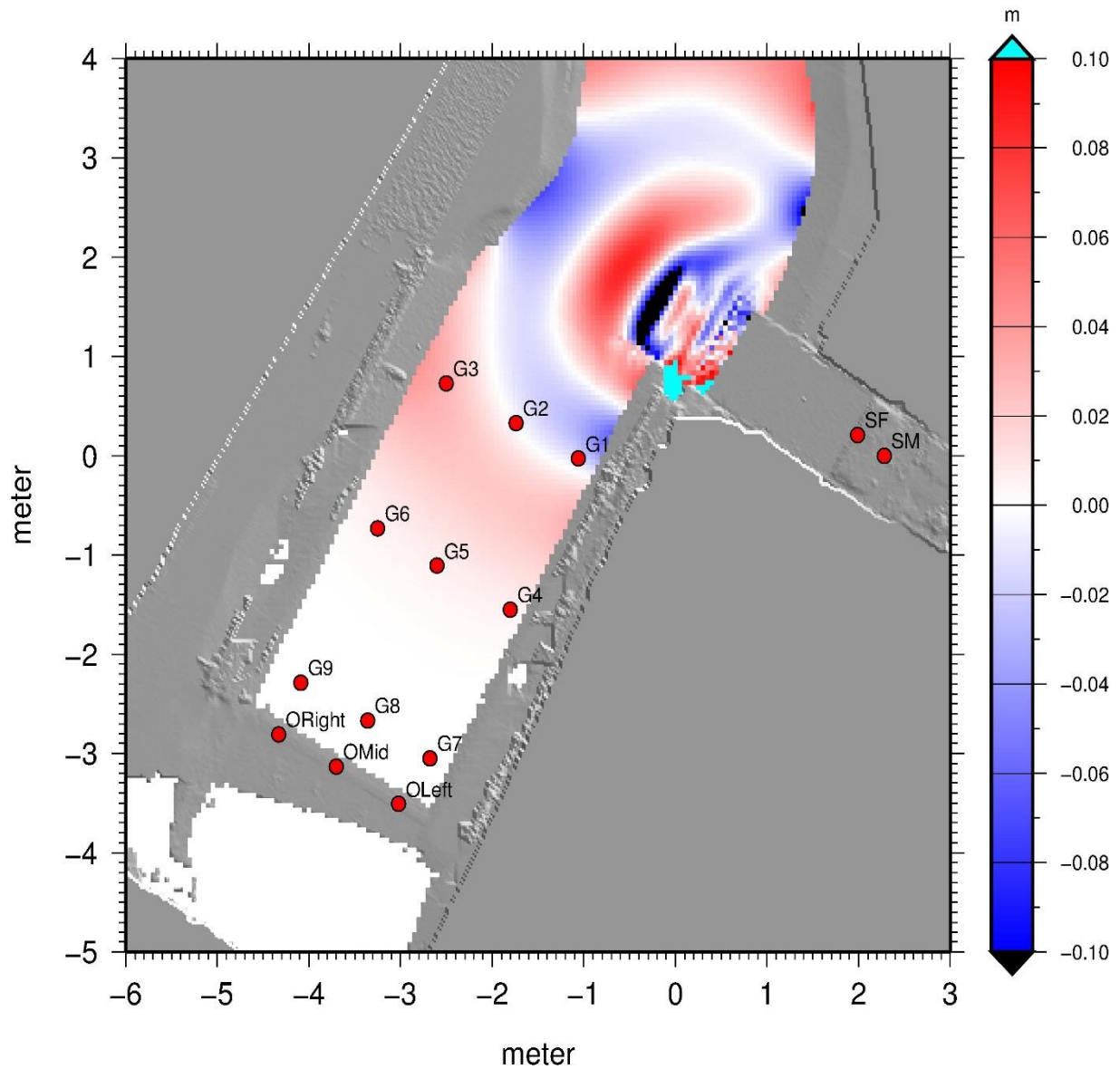
Resultatene og figurene i dette delkapittelet er hentet og oversatt fra Kiflom et al. (2015).

Figur 5.2 viser en oversikt over plassering av målere, batymetri/topografi og omrisset av «griddene». SF markerer fronten av skredet, mens SM markerer midten av skredet. De tre røde, grønne og blå rektanglene er omrisset av «the three nested grids» i MOST-modellen.

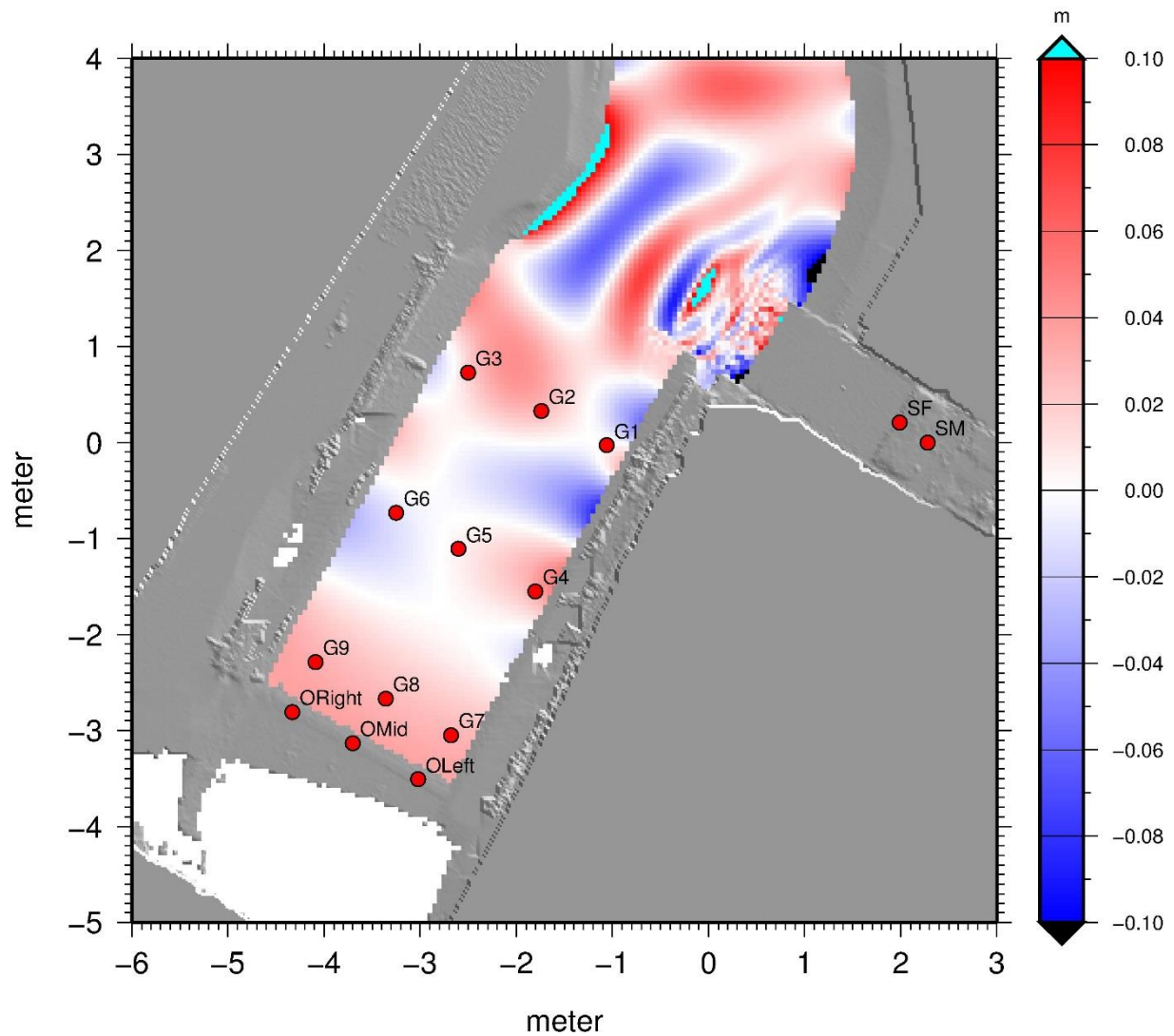


**Figur 5.2:** Batymetri og topografi fra laserscanning brukt i den numeriske modellen.

To stillbilder av overflatehøydene fra Globouss-modellen ved  $t = 3s$  og  $t = 5s$  er vist i Figur 5.3 og Figur 5.4.



Figur 5.3: Stillbilde av overflatehøydene ved  $t = 3$  s (Globouss)

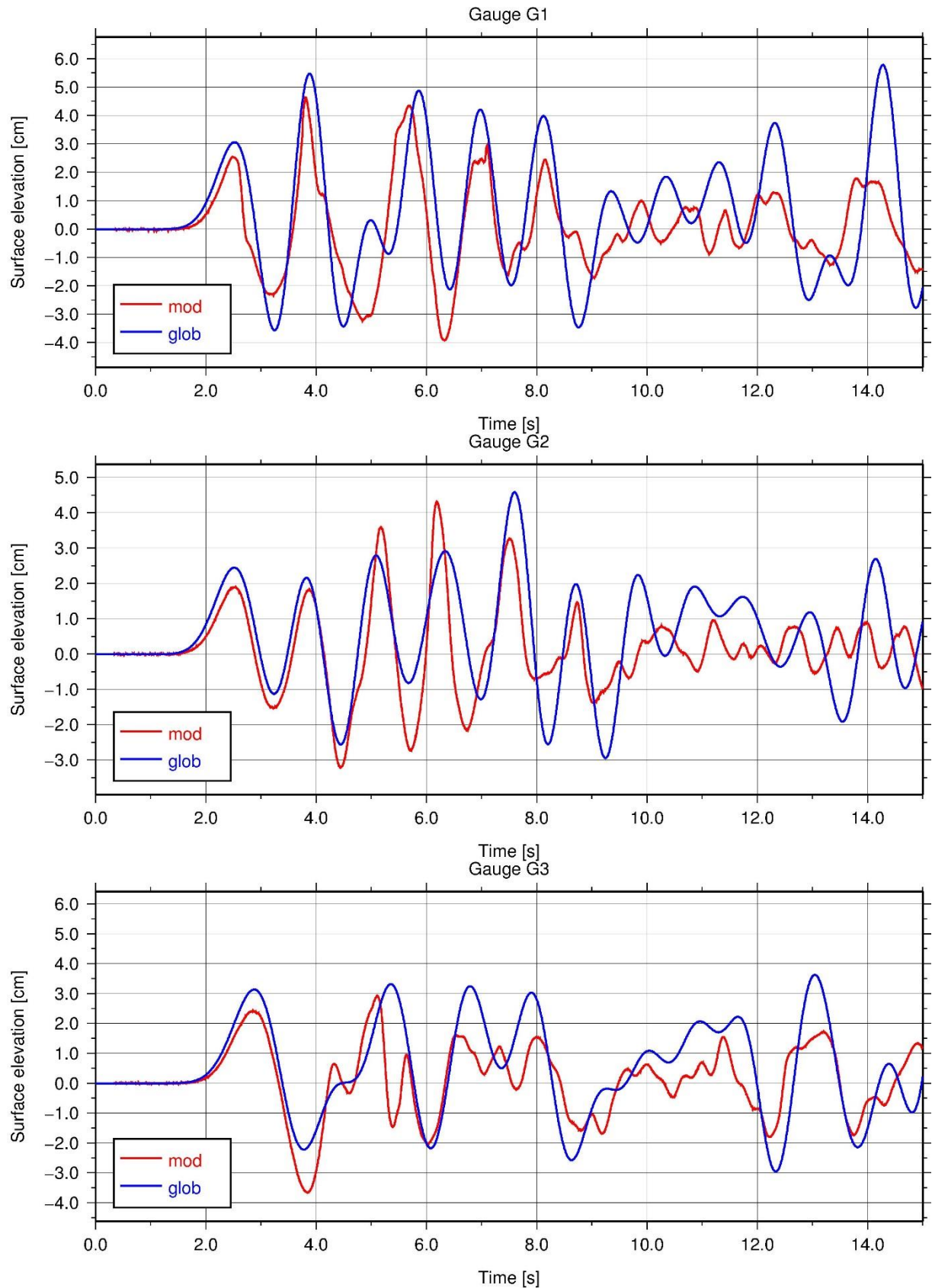


**Figur 5.4:** Stillbilde av overflatehøyder ved  $t = 5$  s (Globouss). Første bølgen har nådd dammen.

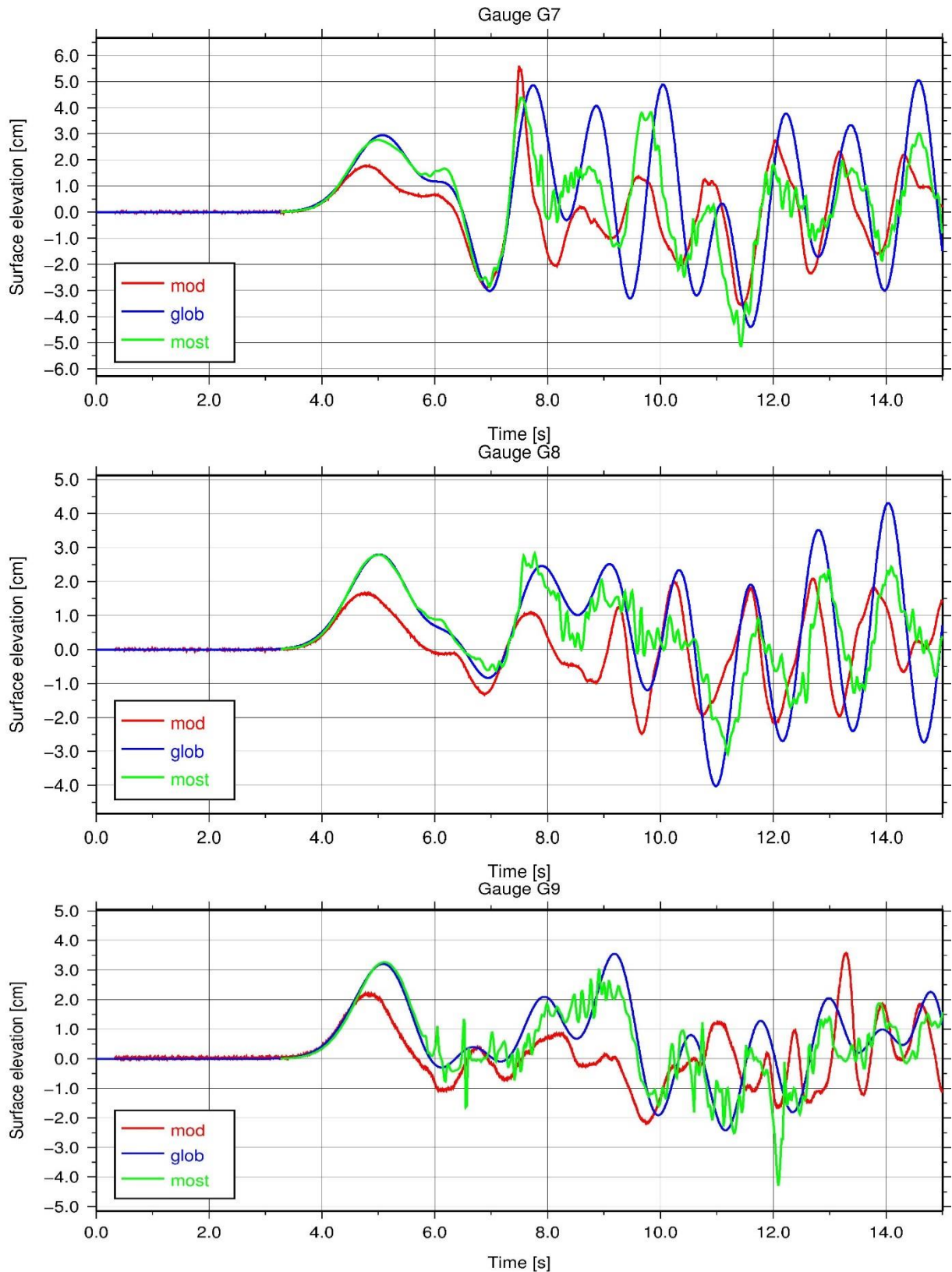
Figur 5.5 viser en sammenlikning mellom resultatene fra modellforsøket og GloBouss ved G1-G3. Resultatene fra GloBouss- og Most-modellen er sammenliknet med resultatene fra laboratorieforsøket i Figur 5.6, mens den målte vannhøyden over damkrona er sammenliknet med resultatene fra MOST-modellen i Figur 5.7.

Globouss-modellen er kjørt med en oppløsning på 0,2 mm når «linear dispersive mode» er brukt (høyere ordens spredning og ikke-lineariteter er ekskludert). Oppløsningen i MOST simuleringene er 0,015 m for det fineste nettet.



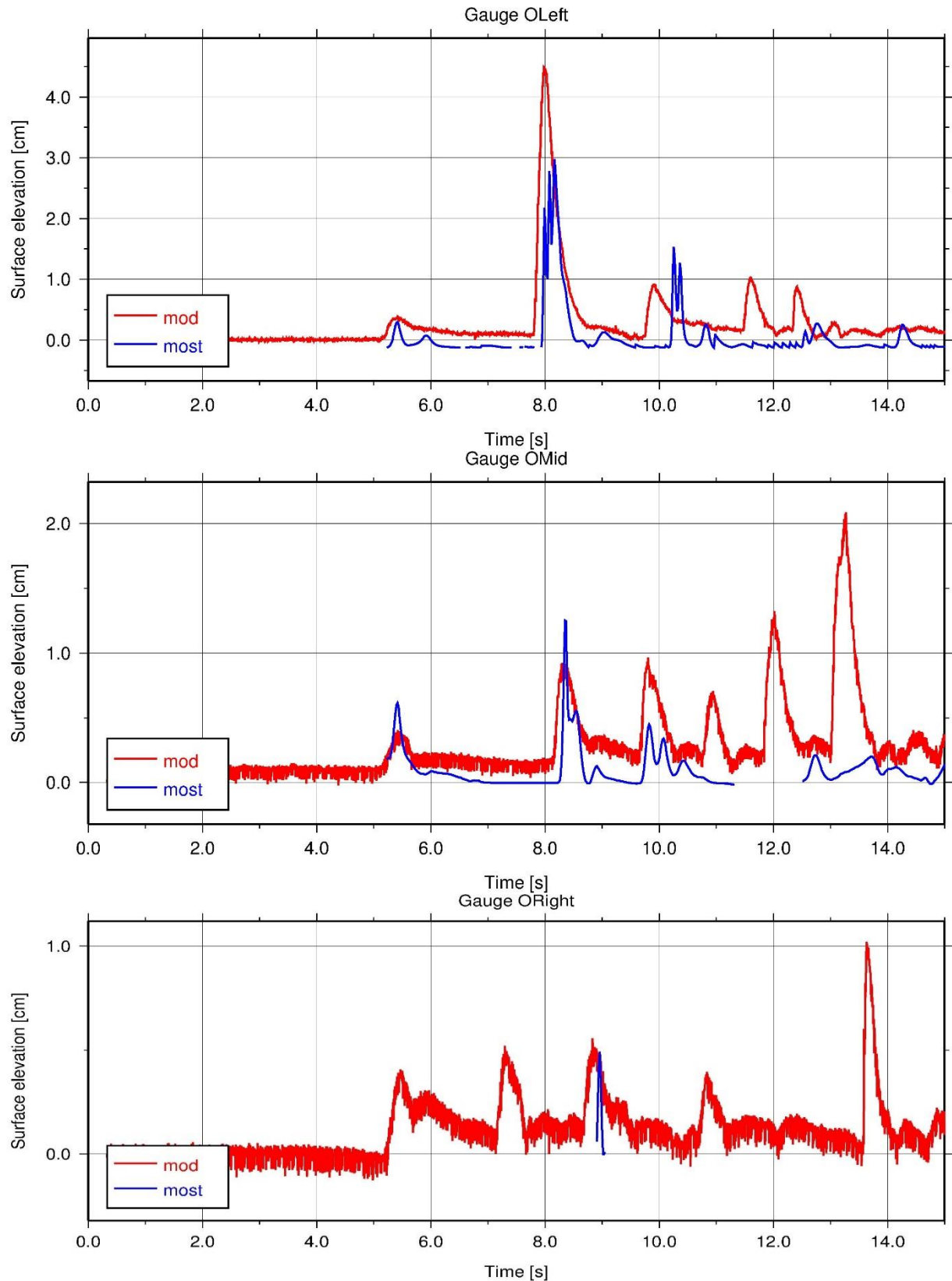


**Figur 5.5:** Tidsforløp ved vannstandsmålerne 1-3, med sammenlikning av overflatehøyder mellom modellforsøket (mod) og GloBouss-modellen (glob)



**Figur 5.6:** Tidsforløp ved vannstandsmålerne 7-9, med sammenlikning av overflatehøyder mellom modellforsøket (mod), GloBouss-modellen (glob) og MOST-modellen (most).





**Figur 5.7:** Tidsforløp ved vannstandsmålerne på toppen av dammen, med sammenlikning av vannstander mellom modellforsøket (mod) og MOST-modellen (glob)

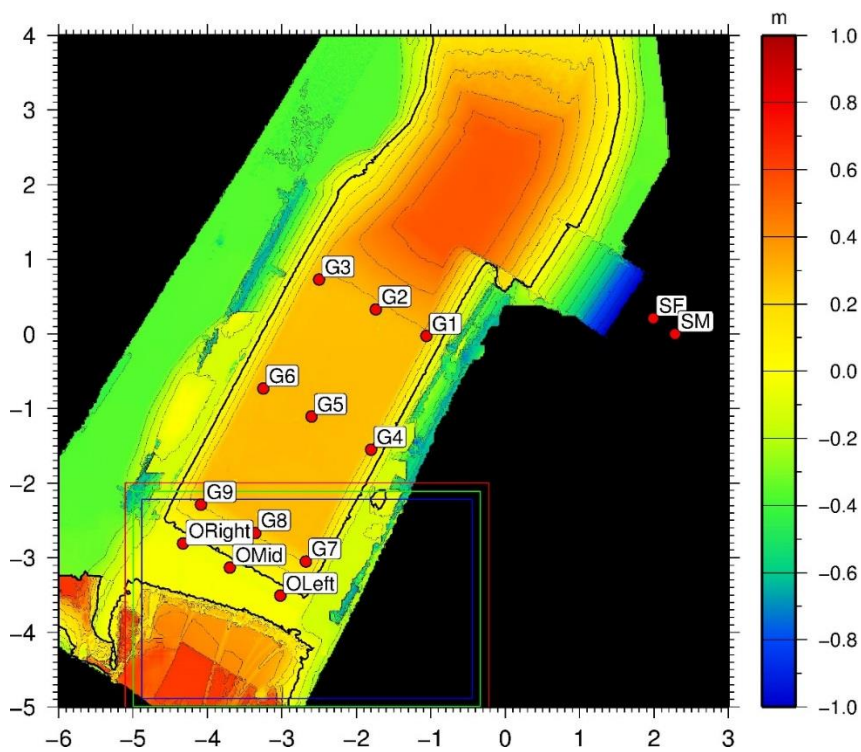
### 5.3.2 Forsøk prosjektfase 2

Resultatene og figurene i dette delkapittelet er hentet fra Kiflom et al. (2016).

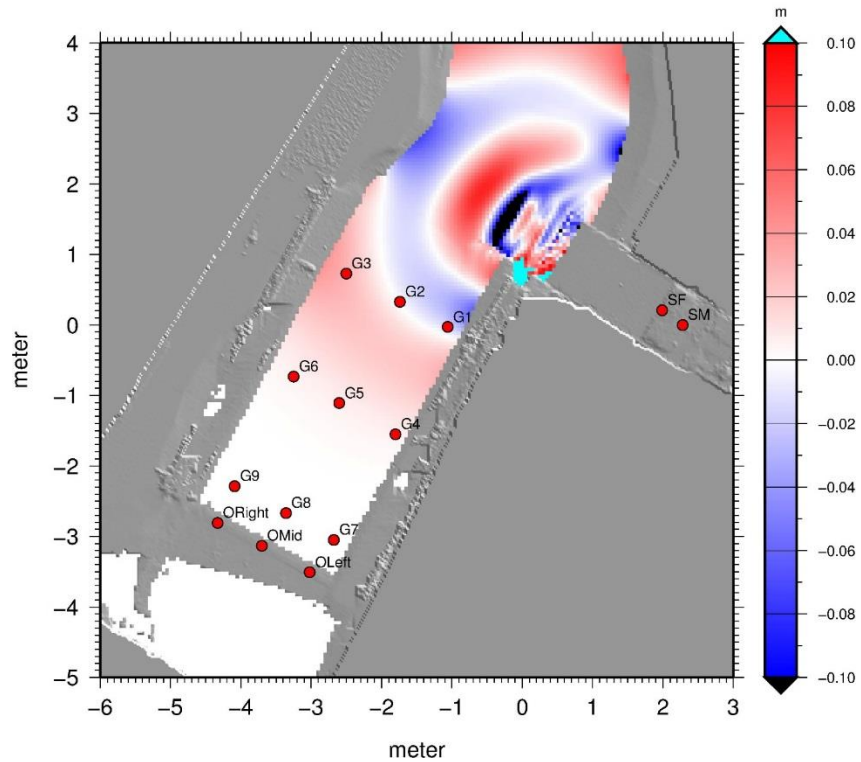
De numeriske modellene er anvendt for ulike skredscenarier og utforming av dammen. For hvert enkelt tilfelle er det sammenlignet overflateheving i målepunktene 1-9, samt overtoppingen på de tre punktene på damkrona.

Resultatene på damkrona viser at den numeriske modellen i de fleste tilfellene gir 10 - 20% høyere verdier enn det som er målt i laboratoriet, noe som må ses på som akseptabelt avvik. I tre tilfeller av totalt ti ulike forsøk er det større avvik. Blant annet kan man få store utslag i prosent når overtoppingen er liten, og små variasjoner gir dermed store relative avvik målt i prosent. Det kan se ut som om det er noe større demping av bølgene under laboratorieforsøkene enn i de numeriske modellene, noe som også samsvarer med funnene fra tilsvarende sammenligninger etter skred fra Åkneset, NGI (2011). Noe av grunnen kan være skalaeffekter i laboratorieforsøkene. Hva som er mest riktig av numeriske beregninger eller modellforsøkene, har vi ikke klart å definere.

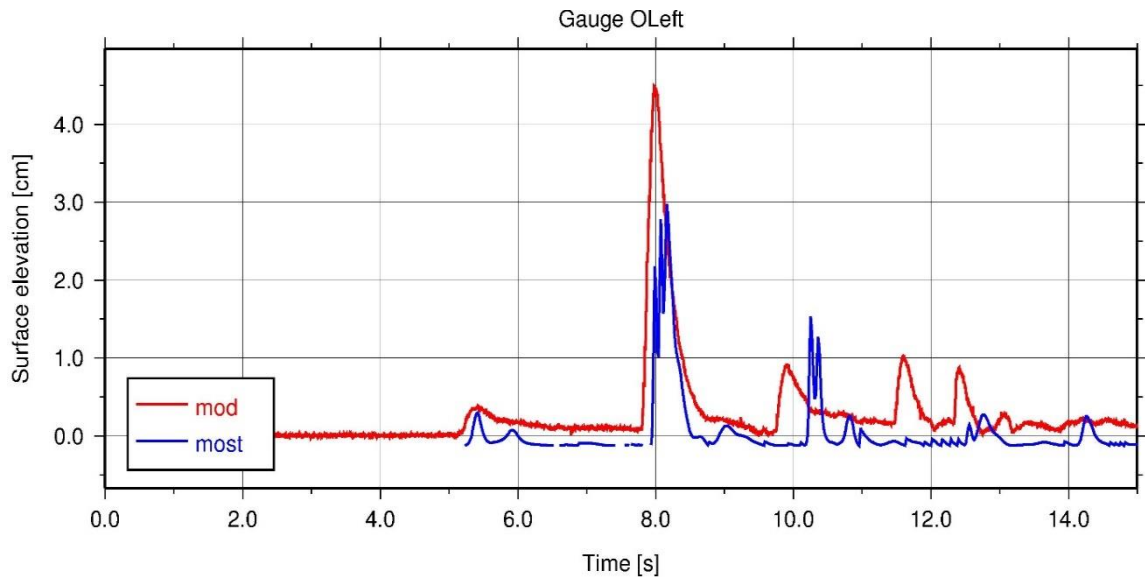
Konklusjonen er at resultatene vi har funnet i dette prosjektet viser at den numeriske modelleringen og forsøkene har godt samsvar. Resultatene her understreker funnene fra NGI (2011) hvor de numeriske modellene ble sammenlignet med laboratorieforsøkene for Åkneset. I praksis er oppskylling innover tørt land (Åkneset) og overtopping av en dam modelleringsmessig tilsvarende problemstillinger.



**Figur 5.8:** Digital terrengmodell av magasinet brukt under laboratorieforsøkene. Målepunktene 1-9 står i selve magasinet og måler overflatehevingen, mens ORight-OMid-OLeft måler vannsøylen på damkrona under eventuell overtopping. De tre rektanglene i svart, grønn og rød, er beregningsområdene for oppskyllingsmodellen MOST. SF og SM er henholdsvis posisjonen for skredets front og skredets midtpunkt før utløsning. Fargen i modellen gjenspeiler dybden målt i meter.



**Figur 5.9:** Øyeblikksbilde av overflatehevingen (GloBouss modellen) tre sekunder etter at skredet startet.



**Figur 5.10:** Eksempel på sammenligning av vannhøyde på damkrona (punkt OLeft) for laboratorieforsøkene ("mod") og den numeriske modellen for oppskylling ("most").

## 6 Diskusjon og konklusjon

### 6.1 Forsøk prosjektfase 1 (Modell 0)

Dette delkapittelet er i sin helhet hentet og oversatt fra Kiflom et al. (2015).

Ekperimentelle forsøk har blitt utført med flere forskjellige scenarier. Undersøkelsene gir innsikt i samspillet mellom flere parametere og deres påvirkning på overtopping av en dam. Som følge av dette har undersøkelsene vært viktige for å utvide kunnskapen om og bedre forståelsen av hvordan skredgenererte bølger oppfører seg og hvordan de påvirker overtopping av dammer.

Undersøkelsene har også generert ekperimentelle data som kan bli brukt som input i prosessen med å utvikle beregningsmetoder som er nyttige for å bedre sikkerheten til fyllingsdammer.

Resultatene fra modellforsøkene indikerer at enhetsvannføringen var i fullskala i området  $0,5 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  til  $14 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ . Varigheten av overtoppingen i snitt rundt 100 sekunder med skredvolum i området  $0,25 \text{ mill. m}^3$  til  $1,5 \text{ mill. m}^3$ . Enhetsvannføringen og varigheten indikerer betydningen av påvirkningen skredgenererte bølger har på en fyllingsdam.

Feltforsøket beskrevet i kapittel 6.1 viser at med å bruke en steinstørrelse  $d_{50}$  i området  $0,4 \text{ m}$  til  $0,65 \text{ m}$ , lagt som plastring, så vil første stein begynne å erodere ved enhetsvannføringer mellom  $4$  og  $5 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ . Fullt dambrudd skjer ved større enhetsvannføring, mellom  $6$  og  $8 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ . I dette tilfellet var steinstørrelsen mindre enn anbefalt for dammer i konsekvensklasse 3 og 4. Dette indikerer at dammer med større plastringstørrelse kan motstå en enhetsvannføring over dammen fra et skred med volum på  $1,0 \text{ mill. m}^3$ .

Modellforsøket viste at de viktigste parameterne som påvirket overtopping av dammer var størrelsen på skredet, oppstrøms helning og fribord (magasin vannstand). For å videreutvikle forståelsen av hvordan parameteren påvirker hverandre og overtopping av dammer, er det nødvendig med ytterligere gjentatte og systematiske forsøk. I tillegg til de identifiserte parameterne er det nødvendig med fremtidige undersøkelser av andre parametere som påvirker overtopping av dammer og de andre parameterne. Dette er f.eks. formen på damkrona, ruhet på oppstrøms damside, grensebetingelser for magasin, skredhelning og skredmateriale.

Sammenlikningen av modellforsøket og de numeriske modellene laget av NGI viser lovende takter i å estimere resultatene fra modellforsøket. Overtoppingen på venstre side av magasinet viste en sterkere korrelasjon mellom modellforsøket og de numeriske modellene enn for målingene midt på og til høyre for dammen. Dette krever videre undersøkelser for å verifisere de numeriske modellene.

### 6.2 Forsøk prosjektfase 2 (Modell A)

Dette delkapittelet er i sin helhet hentet fra Kiflom et al. (2016).

Laboratorietestene har vært nyttige for å få kunnskap for å identifisere de viktigste parametere som påvirker overtopping fra skredgenererte bølger. Undersøkelsen gjelder spesielt dammer typiske for klasse 3 og 4. Resultatene fra modellforsøkene er bruk til å utvikle og teste/kalibrere en numerisk modell. Konklusjoner fra dette arbeidet er presentert i kapittel 5.

Dammer med damakse rotert mot klokka får størst overtoppingshøyde. Dammer med Chevron damakse før størst overtoppingsvolum. Vannet fanges der i to kilerenner.

Maksimal enhetsvannføring i overtopping er  $13 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Overtoppingens varighet var i gjennomsnitt 110 sekunder med skredstørrelse  $1,5 \text{ mill. m}^3$  og med fribord  $4,5 \text{ m}$ . Chevron dammer viser den høyeste enhetsvannføringen, forskjellen i prosent mellom Chevron og andre damtyper var i  $2\% - 9\%$ .

Modellforsøkene indikerer også at klasse 3- og 4 dammer kan motstå en enhetsvannføring under overtopping fra en skredstørrelse på 1 mill. m<sup>3</sup>.

### 6.3 Forsøk prosjektfase 3 (Modell A og B)

Dette delkapittelet er i sin helhet hentet fra og oversatt fra Sigtryggdóttir (2017).

Over 300 forsøk ble gjort i 2017, hvorav 261 forsøk ble vurdert som pålitelige. Konklusjonene fra forsøkene er:

- Modelleffektene i Modell A (brukt i forsøkene våren 2016) ble undersøkt ved å gjennomføre tester i Modell B (brukt høst 2016 og vår 2017) og sammenlikne resultatene. Hovedforskjellen mellom modellene er forskjellig plassering av skredrampen. Følgende konklusjoner ble trukket fra undersøkelsen:
  - Det er sterke indikasjoner på modelleffekter i Modell A som påvirker resultatene og skaper ekstremverdier. Resultatene var i stor grad spesifikke for modellen og kan ikke brukes generelt. Tolkning og anvendelse av resultatene må ta høyde for dette.
  - Modifiseringen av Modell A til Modell B har vist seg å redusere modelleffektene. Resultatene fra Modell B er mer moderate og har ikke ekstremverdier. Likevel må man ta høyde for modellspekifikke preg ved resultatene, og som må tas høyde for ved videre bruk.
- Økt skredhastigheten fører til større høyde på impulsbølgen, og følgelig overtoppingsbølgen. Økt skredhastighet fører også til litt større overtoppingsvolum. Men det er skredvolumet som har størst påvirkning på overtoppingsvolumet.
- De andre parameterne som er inkludert i forsøkene er damprofil, dimensjonsanalyse og undersøkelser av overtoppingsvannføring, fordeling av overtoppingsvolumet langs damkrona og hastigheten til overtoppingsbølgen. Hovedkonklusjonene fra forsøkene:
  - Dimensjonsanalysen viste at økt skredvolum resulterer i en økning av overtoppingsvolum uansett verdi på andre parametere.
  - Ruheten på oppstrøms damside har neglisjerbar påvirkning på overtopping. Helningen på damside har betydelig påvirkning på overtopping. Brattere helning på oppstrøms side fører til en reduksjon i overtoppet volum. I tillegg viser resultatene at ved å introdusere en bølgevegg under damkrona reduseres overtoppet volum.
  - Større fribord resulterer i mindre overtoppet volum.
  - For et magasin med samme form som modellene i dette prosjektet hvor et skred går parallelt med damaksen, vil de største overtoppingsbølgene opptre på sidene av dammen. Større skredvolum og/eller avlang skredform gjør det mer sannsynlig at det største overtoppingsvolumet opptrer på motsatt side av skredet.
  - Undersøkelsene av overtoppingsvannføring gav interessante resultat, selv om det var forsøk av foreløpig karakter. Vannhastigheten har stor betydning for erosjon av stein på damkrona og derfor damsikkerheten.

Instrumenteringen og modelloppsettet gjorde at det bare var mulig å måle totalt volum som overtoppet de forskjellige seksjonene av dammen. Med tanke på damsikkerhet er det viktig å ha kontroll på størrelsen og omfanget av den første overtoppingsbølgen, og påfølgende

overtoppingsvolum og vannføring. Individuelle bølger og deres maksimale enhetsvannføring representerer mulige ulykkeslaster. Vannføringen er også viktig for å evaluere potensiell nedstrøms flom. Derfor er det nødvendig med videre undersøkelser som fokuserer på damsikkerhet, med fokus på overtoppingsvannføring. Kombinasjon av hydrauliske forsøk og numerisk modellering vil forbedre forståelsen.

## 6.4 Sammenlikning av resultater fra forsøk og numerisk modellering

### 6.4.1 Forsøk prosjektfase 1

- Ved vannstandsmålerne 1-3 sammenfaller resultatene fra den numeriske modellen og målingene fra modellforsøket i stor grad. Avviket for den første bølgen var mindre enn 20-25%, mens avviket var enda mindre for de etterfølgende bølgene.
- Ved vannstandsmålerne 7-9 er det et stort avvik mellom beregnet og målt første bølge (opp mot 40 %), men mindre for de etterfølgende bølgene (10 - 20% for bølgetopp nummer 2 og 3)
- Bølgene i modellforsøket viser betydelig demping på veien mot dammen i forhold til de numeriske modellene. Årsaker kan være skalaeffekter eller urent vann.
- Effekten av ikke-linearitet i modellforsøket er mindre enn i de numeriske modellene (ikke visualisert i figur)
- Resultatene fra målerne på damkrona er avhengig av plassering, og resultatene fra de numeriske modellene fulgte resultatene fra modellforsøkene tett.
- Resultatene fra de numeriske modellene antyder at modellene kan brukes til å estimere verdier som er tilfredsstillende nøyaktige i forhold til modellforsøk.

### 6.4.2 Forsøk prosjektfase 2

NGIs bølgemodeller er i en rekke sammenhenger validert mht. oppskylling. Gjennom forsøkene beskrevet i denne rapporten har vi hatt anledning til å validere modellene mot laboratorieforsøk knyttet til overtopping av flodbølger mot dammer i kraftverksmagasin. Resultatene viser at bølgemodellene også håndterer denne problemstillingen.

## 6.5 Konklusjon

NGI og NTNU vurderer nå at de numeriske beregningsverktøyene for overtopping av dammer er klare til operativt bruk. NGSs numeriske modeller er verktøyet som i hovedsak bør benyttes for vurdering av konsekvenser for skred i magasin. Fysiske modeller bør benyttes i tilfeller som krever spesiell oppmerksomhet.

Dammer bygget og drevet etter kravene i klasse 3 og 4 i Norge vil kunne stå i mot et skred på omtrent 1 mill. m<sup>3</sup> dersom magasinet holdes på HRV.

Forskningen og resultatene viser at mange parametere som skredstørrelse og – hastighet, fribord, magasinets utforming og dyp m. fl. har stor innvirkning på både overtoppingshøyde og – volum. Den viktigste parameteren er fribord og dersom det er spesielt stor risiko for skred > 1 mill. m<sup>3</sup> i magasinet til spesifikke dammer, bør det legges på et ekstra krav til fribord. Øvrige parametere har mindre innvirkning på sikkerheten.

## 6.6 Anbefalinger videre

Videre forsøk bør i hovedsak fokuseres inn på tre områder

- Studie av vannhastighet under overtopping og hvordan denne påvirker stabiliteten av damkrona
- Forsøk og simuleringer med flere variasjoner i magasingeometri
- Høyere vitenskaplighet i målinger og forsøk for å kunne publisere resultatene i peer-review journaler og/eller dr.-gradsavhandlinger.

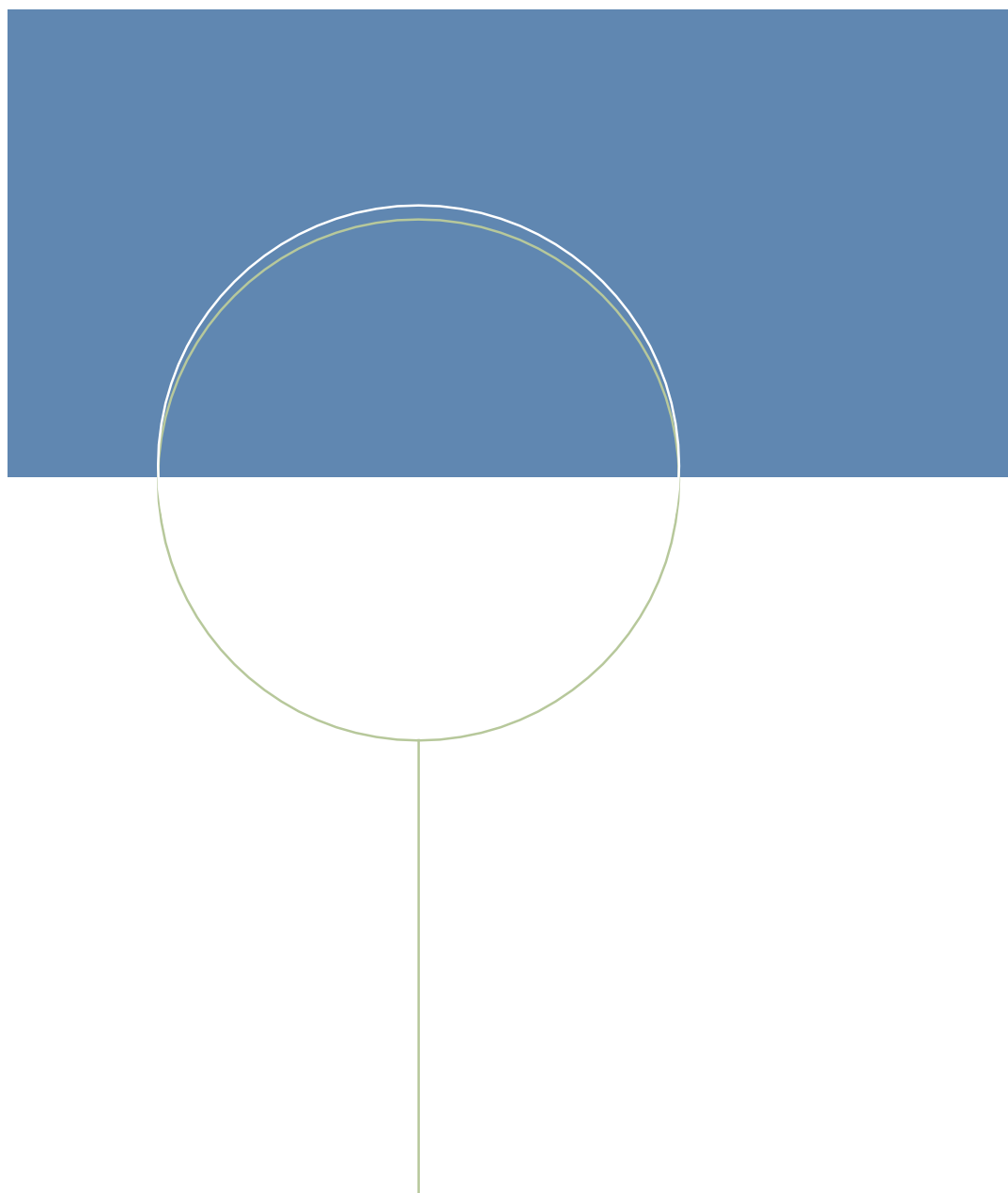
## 7 Referanser

- Bolzoni, M. (2015). Physical model study on impacts of landslide generated wave action on embankment dams. Master thesis. Trondheim: NTNU.
- De las Llanderas Ramírez, M. J, (2016) “Studies on impacts of landslide generated wave action on embankment dams”, bachelor project work, Hydropower and Hydraulic Engineering, Specialization Project, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim
- Kiflom, B; Lia, L. (2015). Physical model test on dam overtopping due to landslide generated waves in reservoirs. Trondheim: NTNU 2015 30 s. NTNU
- Kiflom, B; Glimsdal, S., Lia, L. (2016) Skredgenererte bølger i magasin - Modellforsøk og numeriske simuleringer av oppskylling over fyllingsdam. Norway: NTNU 2016 23 s. ; NGI NTNU
- Hammeren, R. (2016). Skred i magasin – Simulering av overtopping. Masteroppgave. Trondheim: NTNU.
- Heller, V., Hager, W. H., (2010) “Impulse Product Parameter in Landslide Generated Impulse Waves”, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 136(3): 145-155
- Hiller, H.P, (2015), Field test of placed riprap as erosion protection against overtopping and leakage, un published paper, Trondheim, NTNU
- Lorås, S. (2014). Skred i magasin-Fastsettelse av relevante skredegenskaper for generering av bølger med hensyn til overtopping av fyllingsdammer. Masteroppgave. Trondheim: NTNU.
- Løvholt F., Pedersen G., og Glimsdal S. (2010). Coupling of dispersive tsunami propagation and shallow water coastal response, Open Oceanography Journal, Caribbean Waves Special Issue, Vol 4, 71-82, doi: 10.2174/1874252101004020071, available online from <http://www.bentham.org/open/toocaj/openaccess2.htm>
- Mortensen, R., (2016) “Landslide generated waves in reservoirs embankment dam overtopping”, Master Thesis, Hydropower and Hydraulic Engineering, NTNU, Trondheim; Retrieved from <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2433637>
- NGI (2011). Numerical simulations of tsunamis from potential and historical rock slides in Storfjorden; Hazard zoning and comparison with 3D laboratory experiments. NGI rapport 20051018-00-1-R, rev. 01.
- NVE, 2012. Veileder for fyllingsdammer, nr. 4/12. NVE, 2012.
- NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat). (2012). Veileder for fyllingsdammer. 4/2012, NVE, Oslo.
- NVE, 2014. Klimaendring og damsikkerhet: En pilotstudie av 24 dammer. NVE Rapport 89, NVE, 2014



- OED (Olje- og energidepartement) (2009). Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften). FOR 2009-12-18 nr. 1600
- Pedersen, G. og Løvholt, F. (2008). Documentation of a global Boussinesq solver, Preprint Series in Applied Mathematics 1, Dept. of Mathematics, University of Oslo, Norway,
- Ponziani, L., & Gardoni, M. (2017). Landslide generated waves in dam reservoirs - Experimental investigation on a physical hydraulic model. Master Thesis, Hydropower and Hydraulic Engineering, NTNU, Trondheim; Retrieved from <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2442995>
- Romstad, B., C.B. Harbitz, and U. Domaas, 2009. "A GIS method for assessment of rock slide tsunami hazard in all Norwegian lakes and reservoirs." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 2009: 353-364.
- Sigtryggisdóttir, Fjóra G. (2017). Landslides into reservoirs. Overtopping of embankment dams. Trondheim: NTNU 2017 34 s.
- SINTEF (2008). Notat – rasmodell, datert 2008-09-12
- Svendsby, J.N., (2014). Test av Hellers beregningsmetode for estimering av skredgenererte impulsbølger mot forsøk i skalert modell med norske forhold. Masteroppgave, Trondheim: NTNU, 2014
- Svendsby, Joakim (2014), Skred i magasin: Fastsettelse av relevante skredegenskaper for generering av bølger med hensyn til overtopping av fyllingsdam, NTNU Trondheim, in Norwegian
- Titov, V.V. and Gonzalez, F.I. (1997). Implementation and testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) model. NOAA. Technical Memorandum ERL PMEL-112, 11 pp







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)

