

Skred i magasin

Simulering av overtopping

Ragnhild Hammeren

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Kiflom Belete, IVM
Fjola Gudrun Siggtrygsdottir, IVM
Sylfest Glimsdal, NGI

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Student: *RAGNHILD HAMMEREN*

Tittel: **SKRED I MAGASIN – SIMULERING AV OVERTOPPING**

1 BAKGRUNN

Skred ifrå dalsider og ned i vassmagasin har eit stort skadepotensiale for steinfallingsdammar. Sidan 2011 har det foregått forskning på fenomenet i Vassdragslaboratoriet på NTNU i Trondheim. Det er kartlagt at om lag 100 kraftverksmagasin kan vere eksponert for slik fare (NGI, 2009) og for tida arbeider Norges Geologiske Undersøkelser – NGU med eit detaljert studium av kvart enkelt potensielle område. NVE er Noregs skred-etat og leiar arbeidet med kartlegging og handtering av skadepotensialet. Det er framleis ønskje om meir grunnleggande kunnskap om fenomenet, samstundes som det må undersøkast i kvart enkelt tilfelle kva som er den reelle faresituasjonen.

Det er våren 2016 teikna kontrakt mellom NVE og NTNU på vidareføring av forsøk med skred i magasin, der utgangspunktet er steinskred ned i magasin med steinfallingsdam. Modellen i vassdragslaboratoriet er ein modifisert versjon av den tidlegare Åkenesmodellen (Sintef), og har registrering av vassnivå, bølger, overtopping og vassmengder som kjem frå overtopping. Modellen kan enkelt modifisert med annan geometri og anna måleutstyr. Modellen er fullt ut operativ f.o.m. 15. januar 2016.

Formålet med forskingsprosjektet er å finne klarare samanheng mellom skred, bølger og overtopping. Det er oppdaga store kanteffektar i form av «kilerenner» i tidlegare forsøk og det skal undersøkast vidare kva som er hovudparametrane for dette. I NVE-prosjektet skal det også undersøkast kva slag numeriske verktøy som kan nyttast til å berekne bølgeoppskylling og overtopping for slike situasjonar.

Det er tidlegare levert fleire masteroppgåver og kommersielle rapportar frå tidlegare forsøk og alt dette materialet er tilgjengeleg og vil saman med referansane danne grunnlaget for denne oppgåva. Det er to studentar som vil arbeide med skredmodellen i vårsemesteret 2016.

2 HOVUDPUNKT I MASTEROPPGÅVA

Masteroppgåva vil ha fokus på uttesting, kalibrering og simulering med ein numerisk modell frå NGI. Modellen er tidlegare brukt for simulering av oppskylling i Åkenesprosjektet. Det må køyrast forsøk i modellen i parallell med simuleringane.

Arbeidet vil innehalde følgjande hovudpunkt:

1. Gjennomgang av tidlegare innhenta grunnlagsmateriale i form av lærebøker, artiklar og rapportar.
2. Oppstart av simuleringsmodell.
3. Kalibrering og klargjering av numerisk modell saman med fysisk modell
4. Etablering av test- og simuleringsprogram. Utførast i samarbeid med rettleiarane og NGI.
5. Gjennomføring av forsøk og simuleringar
6. Vurdering av resultat
7. Rapportering

Innhaldet i masteroppgåva vil bli nærmare avgjort i samråd med rettleiar på basis av informasjon som kjem fram etter kvart som arbeidet går framover.

3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON

Formell rettleiar vil vere Professor Leif Lia på NTNU. Medrettleiarar vert Forskar Kiflom Belete, 1. amanuensis Fjola Gudrun Sigtryggsdottir og Seniorforskar Sylfest Glimsdal i NGI.

Diskusjon med, og bidrag frå, kollegaer og medarbeidarar med NTNU, SINTEF, NVE, NGI, NGU, kraftselskap og rådgivarar vert tilrådd. Bidrag som går inn i oppgåva, skal alltid refererast til på rett vis.

4 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei liste over figurer og tabellar, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som PDF i DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt. Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn den leveringsfristen som kjem fram i DAIM (20 veker + offentlege fridagar vårsemesteret).

Trondheim, 14. januar 2016

Leif Lia
Professor

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet for institutt for vann- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Den er det avsluttende arbeidet på sivilingeniørstudiet bygg- og miljøteknikk. Arbeidet ble utført mellom januar 2016 og juni 2016.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder Leif Lia for gode tilbakemeldinger og diskusjoner gjennom prosjektperioden, i tillegg til finansiering av ekskursjon til Vajont i Italia og besøk til NGI i Molde. Jeg ønsker også å takke medveileder Kiflom Belete for god hjelp til forståelse av laboratoriemodellen, Sylfest Glimsdal for innføring i numerisk modell og Fjola Gudrun Siggtrygsdottir. Til slutt vil jeg takke Geir Tesaker for hjelp til å modifisere laboratoriemodellen og Robert Mortensen og María José de las Llanderas Ramirez for samarbeidet ved gjennomføringen av forsøk.

Ragnhild Hammeren
Trondheim, 08.06.2016

SAMMENDRAG

Skred som ender i vann og danner flodbølger har stort skadepotensiale på naturområder, bygninger, infrastruktur og mennesker. Dersom skred går ned i vannmagasin med en damkonstruksjon kan skadeomfanget bli ytterligere større hvis dammen går til brudd. Det er særlig fyllingsdammer som er utsatt for dette. Kunnskap om hvor fremtidige skred kan gå og hvor stor en eventuell overtopping av en dam blir, er avgjørende i slike tilfeller for å begrense skadeomfanget ved å gjennomføre nødvendige sikringstiltak og lage beredskapsplaner. De mest nøyaktige metodene for å forutsi bevegelsene til skredgenererte flodbølger og overtoppinger som følge av dette er gjennom fysiske forsøk eller numeriske simuleringer. Fysiske forsøk er svært plasskrevende og tar tid å etablere. En numerisk modell har potensiale til å være mer effektiv når flere ulike magasin skal studeres. For dette prosjektet er det etablert en modell i Vassdragslaboratoriet ved NTNU for skredgenererte flodbølger. Modellen består av et magasin med steinfyllingsdam og en rampe hvor skred utløses ned i magasinet. Bølgebevegelsene og overtoppingen av dammen måles. Resultatene fra forsøkene blir sammenlignet med simuleringer med NGIs numeriske modell for flodbølger. Denne numeriske modellen er en kombinasjon av GloBouss som simulerer bølgepropageringen og MOST som simulerer overtopping. Hovedformålet med prosjektet er å evaluere GloBouss/MOST som verktøy for å estimere bølgebevegelser og overtopping. Både damgeometri og skredstørrelse er variert i forsøkene. Resultatene viser godt samsvar mellom overflatehevingene og overtoppingene i de fysiske forsøkene og simuleringene både når geometrien på dammen blir endret og ved ulike skredstørrelser. Det konkluderes med at GloBouss/MOST er en robust og tilstrekkelig nøyaktig modell for å anslå overtopping ved skredgenererte flodbølger.

ABSTRACT

Landslide generated impulse waves have a great potential of damaging nature, buildings, infrastructure and humans. Impulse waves in water reservoirs may cause dam failure, especially for rockfill dams, which may cause further damages of the downstream areas. Knowledge about future landslides and the following overtopping height and volume is crucial for minimizing the damages through implementing precautionary measures and contingency plans. The most useful methods for predicting the overtopping of a dam are hydraulic modelling or numerical simulations. A hydraulic model requires large areas and is time-consuming to establish. A numerical model is potentially more efficient when many different reservoirs are to be studied. For this project a hydraulic model for landslide generated waves is set up in the Hydraulic Laboratory at Norwegian University of Science and Technology (NTNU). The model consists of a reservoir with a rockfill dam and a ramp where landslides can be triggered down into the reservoir. Both propagation of waves and overtopping are measured. The results are compared with simulations with a numerical model for impulse waves developed by the Norwegian Geotechnical Institute (NGI). The numerical model is a combination of GloBouss, which simulates the generation and propagation of the waves, and MOST, which simulates the run-up and overtopping. The main objective of this project is to evaluate GloBouss/MOST as a tool for predicting wave propagation and overtopping. In the tests both the geometry of the dam and the size of the landslide are varied. The results show compliance between GloBouss/MOST and the experiments both when the geometry of the dam is changed as well as the size of the slide masses. The conclusion is that GloBouss/MOST is a robust model with reasonable accuracy for predicting the overtopping caused by landslide generated impulse waves.

INNHold

1	INTRODUKSJON	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Formål	2
1.3	Til leseren	2
2	HISTORISKE SKRED I VANN	3
2.1	Vajont	3
2.2	Loen og Tafjord	6
3	BEREGNING AV BØLGER	7
3.1	Generering av bølger	7
3.2	Bølgeutbredelse og oppskylling	8
3.3	Beregningsverktøy	10
3.3.1	Bølgeligninger	11
3.3.2	GloBouss og MOST	14
3.3.3	Andre numeriske modeller	15
3.3.4	Hellers metode	16
4	METODE	19
4.1	Modellforsøk	19
4.1.1	Fysisk modellskalering	19
4.1.2	Modelloppsett	20
4.1.3	Gjennomføring av forsøk	22
4.2	Numerisk modell	24
5	RESULTAT	27
5.1	De fysiske forsøkernes repeterbarhet	27
5.2	Konvergenstest for GloBouss	28
5.3	Resultater fra simuleringer og fysiske forsøk	28
6	DISKUSJON OG ANALYSE AV RESULTAT	33
6.1	Sammenligning av resultater	33

6.2	Usikkerheter ved fysisk modell og GloBouss/MOST	35
6.2.1	Feilkilder	35
6.2.2	Skalaeffekter	37
6.3	GloBouss/MOST og fysiske forsøk i forhold til prototype	38
7	KONKLUSJONER OG VIDERE ARBEID	39
7.1	Konklusjoner	39
7.2	Anbefalt videre arbeid	39
	Referanser	41
	Vedlegg	45

FIGURER

Figur 1	Modell av Vajont Dam, skala 1:300 (Foto: Ragnhild Hammeren)	5
Figur 2	Skredet i Vajont (Foto: Ragnhild Hammeren)	5
Figur 3	Flyfoto over Vajont dam etter skredet i 1963 (Foto: Ukjent)	5
Figur 4	Bilder tatt etter Loenulykkene	6
Figur 5	Bilder tatt etter Tafjordulykka	6
Figur 6	Generering av en bølge (1), bølgeutbredelse (2) og oppskylling (3) (Heller mfl. 2009)	7
Figur 7	Bølgeparametre (Heller mfl. 2009).	8
Figur 8	Illustrasjon av én søyle i beregningsområdet	11
Figur 9	Illustrasjon av vannvolum med bølger og ujevn bunn (Drange 2014)	12
Figur 10	Flytskjema Hellers metode. Referansene i figuren gjelder for manualen av Heller mfl. 2009	17
Figur 11	Oversiktsbilde fysisk modell	21
Figur 12	Skredrampe med én skredblokk	21
Figur 13	To av dammene brukt i modellforsøkene	22
Figur 14	Måleutstyr	22
Figur 15	Oversiktsbilde over den fysiske modellen generert fra scannede data	26
Figur 16	Topografien og batymetrien i den numeriske modellen.	26
Figur 17	Repeterbarhet for forsøk med oppsett B	27
Figur 18	Overflateheving ved sensor G5 og G8 for ulike oppløsninger	28
Figur 19	Oppsett C3, sensor G8	29
Figur 20	Oppsett C1, sensor G9	29
Figur 21	Oppsett A1, sensor G5	29
Figur 22	Oppsett A4, sensor G6	29
Figur 23	Oppsett B2, sensor G7	30
Figur 24	Oppsett A1, sensor OVenstre	31
Figur 25	Oppsett A2, sensor OMidt	31
Figur 26	Oppsett C4, sensor OMidt	31

Figur 27	Oppsett B1, sensor OHøyre	31
----------	-------------------------------------	----

TABELLER

Tabell 1	Ulike typer impulsbølger (Heller mfl. 2009; Heller mfl. 2011) . . .	10
Tabell 2	Skaleringsforhold for ulike parametre etter Froudes modellov (Aberle 2015)	20
Tabell 3	Gjennomførte forsøk	23
Tabell 4	Skredenes størrelse og form	24
Tabell 5	Nødvendig input i GloBouss	25
Tabell 6	Prosentvis forskjell i overflateheving når oppløsningen endres for sensor G5 og G8	28
Tabell 7	Avvik i overflateheving mellom simuleringer og forsøk for første bølgetopp.	30
Tabell 8	Avvik i overflateheving mellom simuleringer og forsøk for andre bølgetopp.	31
Tabell 9	Største overtopping for de ulike forsøksoppsettene.	32

SYMBOLER

a – Akselerasjon
A – Amplitude
 A_r, A_m, A_p – Areal, h.h.v. forhold, modell, prototype
 A_o – Karakteristisk amplitude
 α – Uttrykk for ikke-linearitet
b – Havbunn
c – Fasehastighet
 ϵ – Uttrykk for dispersjon
f – Volumkrefter
F – Treghetskrefter
 F_r – Froudetallet
g – Tyngdens akselerasjon
h – Høyde fra bunn til overflate
H – Stillevannsdybde
 H_b – Bølgehøyde
 H_o – Karakteristisk dybde
L – Bølgelengde
 L_r, L_m, L_p – Lengde, h.h.v. forhold, modell, prototype
 L_o – Karakteristisk bølgelengde
m – Masse
 M_r, M_m, M_p – Masse, hhv. forhold, modell, prototype
 η – Overflateheving
P – Trykkrefter
 P_r, P_m, P_p – Krefter, hhv. forhold, modell, prototype
 ρ – Densitet
 Q_r, Q_m, Q_p – Vannføring, hhv. forhold, modell, prototype
t – Tid
 t_r, t_m, t_p – Tid, hhv. forhold, modell, prototype
T – Bølgeperiode
 τ – Skjærkrefter
u – Partikkelhastighet i x-retning
U – Partikkelhastighet
v – Partikkelhastighet i y-retning
V – Volum
 V_r, V_m, V_p – Volum, hhv. forhold, modell, prototype
 V_s – Skredets hastighet
w – Partikkelhastighet i z-retning
x – Romlig koordinat
y – Romlig koordinat
z – Romlig koordinat

FORKORTELSER

ETH – Eidgenössische Technische Hochschule

MOST – Method of Splitting Tsunami

NGI – Norges Geotekniske Institutt

NGU – Norges Geologiske Undersøkelse

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

NTNU – Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

NVE – Norges vassdrags- og energidirektorat

INTRODUKSJON

1.1 BAKGRUNN

Skred fra fjellsider som ender opp i vann og genererer en flodbølge har uten tvil et stort skadepotensialet på infrastruktur, bygninger og personer som befinner seg i bølgens oppskyllingsområdet. Det er flere eksempler på dette gjennom historien, blant annet skredet i Vajont i Nord-Italia i 1963. Et vannmagasin for kraftproduksjon med en kapasitet på 169 mill. m³ ble fylt med stein og jord da 270 mill. m³ raste ned fjellsiden. Flodbølgen som oppstod skylte over magasinets dam og utslettet en hel landsby nedstrøms. Her i Norge har vi også hatt flere hendelser knyttet til skredgenererte flodbølger, for eksempel i Loen i 1905 og 1936 og i Tafjord i 1934.

I Norge er vannkraft den klart største kilden til elektrisitetsproduksjon og dette har ført til bygging av en rekke dammer for lagring av vann til kraftproduksjon. Dersom et skred går ned i et magasin med dam kan skadeomfanget bli ytterligere større enn i et vann uten en damkonstruksjon. Flodbølgen kan gjøre så stor skade på dammen at den går til brudd og enda større vannmengder strømmer ut av magasinet og gjør skade på området nedstrøms, i tillegg til tap av produksjon. Det er særlig fyllingsdammer som er utsatt for dette. Topografien i Norge, med bratte dalsider gjør at potensialet for skred er stort mange steder. Norges Geotekniske Institutt (NGI) har gjennomført en kartleggingsstudie av magasin i Norge større enn 0,1km² som kan være utsatt for skred (Romstad mfl. 2009). Denne kartlegging er kun basert på topografi og har resultert i en liste over de 100 mest skredutsatte magasinene i Norge. Disse må studeres videre for å kartlegge de geologiske forholdene som er avgjørende for skredfaren. Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) er nå i gang med den videre analysen av disse 100 områdene, i samarbeid med NVE, for å avdekke det geologiske raspotensialet.

Siden 2010 har det pågått forskning i Vassdragslaboratoriet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) innen skred i magasin og fjorder for å finne en klar sammenheng mellom skred, bølger og oppskylling/overtopping. Forskningen er forespurt av NVE for å øke kunnskapen om flodbølger generert av steinskred i sammenheng med damsikkerhet for steinfyllingsdammer. Samarbeidet mellom NVE og NTNU er videreført for våren 2016 og som en del av forskningen er det ønskelig å finne et numerisk verktøy som kan brukes til å beregne bølgeoppskylling og overtopping ved skred i magasin. Et slikt verktøy kan gjøre det

raskere og rimeligere å simulere skred i ulike norske magasin i forhold til fysisk modellering av hvert enkelt tilfelle. Når en vet hvor stor en eventuell overtopping kan bli kan sikringstiltak og beredskapsplaner vurderes og utføres. NGI er inkludert i samarbeidet mellom NVE og NTNU for å bidra med sitt beregningsverktøy for skredgenererte flodbølger.

1.2 FORMÅL

Formålet med denne oppgaven er å teste ut NGIs numeriske modell for simulering av skredgenererte flodbølger for å se om denne er egnet for simulering av skred i norske magasin med steinfyllingsdam. Denne numeriske modellen er en kombinasjon av de to numeriske modellene GloBouss og Method of Splitting Tsunami (MOST). Det er gjennomført forsøk i Vassdragslaboratoriet og resultatene fra dette blir sammenlignet med simuleringer med den numeriske modellen. Det er etablert et forsøks- og simuleringsprogram med fokus på ulike damgeometrier og skredstørrelser for å vurdere egnetheten av den numeriske modellen. NGI har gjennomført simuleringene. I oppgaven er det fokusert på følgende punkter:

- Hvor godt den numeriske modellen gjengir bølgebevegelsene i den fysiske modellen.
- Hvor godt den numeriske modellen håndterer ulike damgeometrier.
- Hvor godt den numeriske modellen håndterer ulike skredstørrelser.
- Hvor godt egnet den numeriske modellen er til å forutsi største overtopping.

1.3 TIL LESEREN

I forbindelse med denne oppgaven ble det gjennomført to reiser. En ekskursjon til Vajont dam i Italia med befaring av skredområdet og dammen, og presentasjon om ulykken i 1963 av energiselskapet ENEL. Bildet på forsiden av oppgaven er tatt i forbindelse med denne ekskursjonen og viser fjellsiden skredet gikk fra. Det ble også gjennomført et besøk til NGI i Molde hvor en innføring til NGIs numeriske modell ble gitt av Sylfest Glimsdal. Avsnitt 3.3.2 og 4.2 som omhandler den numeriske modellen er basert på informasjonen som ble gitt under dette besøket.

Den første delen av denne rapporten, kapittel 2, beskriver historiske hendelser knyttet til skred i vann. Videre, i kapittel 3 blir bølge teori og noen beregningsverktøy kort presentert før metoden benyttet i dette prosjektet beskrives i kapittel 4. Kapittel 5 viser resultatene fra de fysiske forsøkene og simuleringene. Til slutt evalueres og diskuteres resultatene i kapittel 6 og konklusjoner og videre arbeid blir presentert i kapittel 7.

HISTORISKE SKRED I VANN

Gjennom historien er det flere eksempler, både nasjonalt og internasjonalt, på hvordan skredgenererte flodbølger har oversvømt landområder, gjort store skader på bygninger og infrastruktur og tatt flere menneskeliv. I forbindelse med dette prosjektet ble det gjennomført en ekskursjon til Longarone og Vajont dam i Nord-Italia som ble rammet av et stort skred og flodbølge i 1963. Presentasjon og omvisning ble holdt av kraftselskapet ENEL. I dette kapittelet blir denne katastrofen beskrevet ut fra informasjonen som ble gitt under ekskursjonen. I tillegg er tre skred som har forårsaket flodbølger i Norge presentert.

2.1 VAJONT

Vajont Dam er en 262 m høy hvelvdam nord i Italia i den sørvestre delen av Dolomittene. Den er eid av det italienske kraftselskapet ENEL og ble bygd som del av et større vannkraftprosjekt med kraftstasjonene Pontesei, Gardona og Soverzene. Dammen skulle ha som hensikt å danne et vannmagasin i Vajontdalen for å kunne regulere elva Piave med dens sideelver Boite, Maé og Vajont. Magasinet skulle bli det største i systemet med en kapasitet på 168,7 mill. m³. Magasinet er omgitt av fjell og Mt. Toc ligger ved den sørlige siden. Den dominerende bergarten i området er kalkstein. Byggingen av dammen startet i 1958 med Carlo Semenza som leder for prosjektet. Det ble gjennomført geologiske undersøkelser før byggestart med fokus på områdene rundt vederlagene, mens områdene oppstrøms damkonstruksjonen ikke ble undersøkt da det ble sett på som unødvendig. I mars 1959 gikk det et skred med volum på 3 mill. m³ i magasinet Pontesei et par mil fra Vajont, noe som økte fokuset på stabiliteten også i Vajontmagasinet. Carlo Semenzas sønn Edoardo Semenza var geolog i prosjektet og satte i gang grunnundersøkelser i magasinet. Det ble gjennomført grunnboringer og fire målinger med piezometer, hvor tre av de ikke viste tegn til ustabilitet i grunnen. Den fjerde piezometermålingen viste et høyere vanntrykk enn forventet, men denne ble ignorert på bakgrunn av at de andre testene var normale. Et slikt økt poretrykk er et tegn på endring i lagdelingen i grunnen. Det ble også installert måleutstyr for å kunne følge med på bevegelsene i berget. Da dammen var ferdigstilt i 1960 begynte fyllingen av magasinet. Kort tid etter raste 700 000 m³ bergmasser ut fra fjellet Mt. Toc og en 0,5-1 m bred sprekk ble dannet høyere opp i fjellsiden. Denne sprekken var formet som en "M" og var omtrent 1,8 km lang. Etter dette ble det besluttet å senke vannstanden og hva som skulle gjøres videre ble diskutert. Avgjørelsen om å fortsette prosjektet ble tatt, men bevegelsene i berget

skulle holdes under kontroll. Sikringstiltak ble vurdert, men var ikke mulig å gjennomføre. En bypass-tunnel ble imidlertid bygd for å kunne lede vann fra oppstrøms side forbi et eventuelt nytt skred og ned i vassdraget nedstrøms dammen. Det ble også etablert en modell av magasinet for testing av mulig skredscenario. Modellen ble bygd i skala 1:300, figur 1. 22 forsøk ble gjennomført hvor vannivået og hastigheten til skredet ble variert. På bakgrunn av at skredet i Pontesei tok omtrent 2 min ble det antatt at det potensielle skredet i Vajont ville ta 2-8 min ettersom det ville være større enn i Pontesei og derfor bevege seg saktere. For modellforsøkene ble den minste mulige tiden satt til 60 s, som en konservativ antagelse. Fra forsøkene ble det konkludert med at den største mulige bølgen som kunne inntreffe på grunn av skredet ville være 22 m høy og 25 m lang. Dette ga en viss trygghet om at så lenge dammen hadde fribord på 25 m ville det gå bra og magasinet ble igjen fylt. I løpet av oppfylling kjentes flere seismiske rystelser, men oppfyllingen av magasinet fortsatte. Vanndybden nærmet seg 245 m, som bare gir 16,6 m fribord. Endringene i berget økte og hadde nå en hastighet på 35 mm/døgn. Ingeniørene og geologene besluttet å senke vannstanden igjen, slik at 25 m fribord ble oppnådd, men istedet for at bevegelsene minket, som forventet, økte de kraftig. I løpet av de neste 2 ukene fortsatte bevegelsene å øke fram til 300 mm/døgn den 9.oktober 1963. 25m fribord var nå oppnådd og en eventuell flodbølge ville ikke overtoppe dammen, etter simuleringene. Arbeiderne i kraftselskapet var så sikre på at oppskyllingen ble mindre enn 25 m høy at ingen i områdene nedstrøms eller oppstrøms dammen ble evakuert, til tross for at arbeiderne i kraftselskapet nå visste at skredet var en realitet. De hadde rett i at skredet gikk, hele 270 mill. m³ raste ut og ned i magasinet, men i stedet for å danne en 22 m høy bølge, ble den virkelige bølgen omtrent 10 ganger så stor, 250 m høy og med en masse på 50 mill. m³. Bølgen overtoppet dammen og oversvømte hele den lille byen Longarone nedstrøms og deler av byene Casso og Erto oppstrøms damkonstruksjonen. Rundt 2000 mennesker mistet livet, men damkonstruksjonen bestod med svært lite skader.

I ettertid har geologer og ingeniører spurt seg hvordan denne katastrofen kunne skje. Hva var det som gikk galt, da bølgen ble såpass mye større enn forventet? Dersom en betrakter den fysiske modellen av magasinet kan det antas å være to hovedproblemer. Det første dreier seg om skredmaterialene og det andre om hastigheten på skredet. Materialet som ble brukt var et nett med steiner. Det vil si at det ikke var en helt kompakt masse, men siden falltiden var såpass kort var materialets oppførsel omtrent som en kompakt masse. Dette blir derfor ikke sett på som en feil eller problem ved modellen. Når det gjelder hastigheten på skredet ble det som nevnt, gjort et konservativt estimat på at skredmassene ville bevege seg nedover i 60 s. Til tross for dette viste det seg at skredet beveget seg enda raskere i realiteten. Fra skredet løsnet til det lå stille i magasinet tok det ikke mer enn 45 s. Semenza og hans teams estimerer baserte seg på erfaringer fra skredet i Pontesei og at det var kalkstein som var den dominerende bergarten. Det de ikke tok med i betraktningene var et leirelag under hele skredet. Dette laget lå dypere ned enn dybden på de gjennomførte grunnboringene, men det var dette laget som forårsaket det høye poretrykket i det ene piezometeret. Når leire blir mettet med vann endres egenskapene. Leiren blir mer kompakt og det dannes små spekker i laget. Dette førte til at hele laget ble ustabil og massene over

skled på leiren. I tillegg til oppfylling og nedtapping av magasinet var dette laget påvirket av nedbøren, slik at kun nedtapping av magasinet ikke var nok til reversere bevegelsene. I figur 2a vises dammen i 2016, 53 år etter at skredet gikk. Det er ikke lenger noe magasin, da skredmassene fylte volumet. I figur 2b vises det 1,8 km lange skredsåret. Figur 3 viser et flyfoto over området.



(a) Dammen sett fra nedstrøms side

(b) Oversikt fra oppstrøms ende

Figur 1: Modell av Vajont Dam, skala 1:300 (Foto: Ragnhild Hammeren)



(a) Dammen stt fra oppstrøms side

(b) Mt. Toc og det ca. 2km lange skredsåret

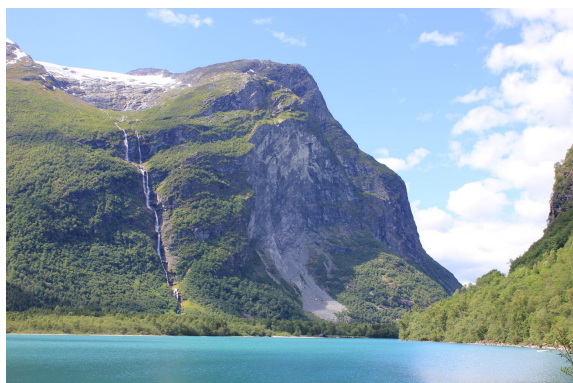
Figur 2: Skredet i Vajont (Foto: Ragnhild Hammeren)



Figur 3: Flyfoto over Vajont dam etter skredet i 1963 (Foto: Ukjent)

2.2 LOEN OG TAFJORD

Her i Norge har det vært flere naturkatastrofer knyttet til skred i vann. Eksempler på dette er skredene i Loen i 1905 og 1936 og skredet i Tafjord i 1934. Begge skredene i Loen ble utløst fra Ramnefjellet på vestsiden av Lovatnet, figur 4a, og raste ned i innsjøen. Skredet i 1905 startet med at en berghammer på 50 000 m³ løsnet og dro videre med seg 300 000 m³ med ur og morene nedover fjellsiden (Bryhni 2015). Det ble generert en flodbølge som forplantet seg innover innsjøen og oversvømte bygdene Nesdal og Bødal med en største oppskylling på 40 m, figur 4b. 61 mennesker omkom, noe som utgjorde omtrent halvparten av befolkningen i de to bygdene (Bryhni 2015). I 1936 løsnet en annen berghammer fra Ramnefjellet med et enda større volum. 1 mill. m³ bergmasse raste ned i vannet og forårsaket en flodbølge med en oppskylling på 74 m (Høeg mfl. 2014). Denne gangen ble hele bygda Bødal, med sine gårder, skole og forsamlingshus utslettet. Totalt mistet 74 personer livet i denne ulykken (Bryhni 2015). Ved Tafjordulyken i 1934 raste omtrent 2 mill. m³ ut i fjorden fra Langhammeren, figur 5a, og dannet en bølge som hadde største oppskylling på 62 m. Ulykken kostet 40 mennesker livet i bygdene Tafjord og Fjørå, figur 5b. Disse to er de største ulykkene knyttet til skred i vann i Norge, men i nyere tid har det også forekommet flodbølger som følge av skred med mindre skadeomfang.



(a) Ramnefjell (Foto: Sundgot)



(b) Ruiner etter ulykkene (Foto: Ukjent)

Figur 4: Bilder tatt etter Loenulykkene



(a) Langhammeren (Foto: Arkivet, Aalesunds Museum)

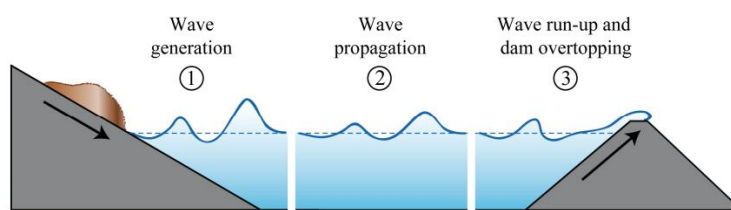


(b) Gravferd etter ulykken (Foto: Johannes Sponland)

Figur 5: Bilder tatt etter Tafjordulykka

 BEREGNING AV BØLGER

En flodbølge, eller impulsbølge, går gjennom tre steg i sitt livsløp. Det første steget er generering av bølgen. Dette kan for eksempel skje ved utløsning av et skred, en isbre som kalver eller et jordskjelv. Neste steg er bølgeutbredelsen, propagering, og siste steg er bølgeopp skylning på land eller overtopping av for eksempel en dam, se illustrasjon i figur 6. I dette kapitlet vil disse tre stegene bli beskrevet med fokus på skredgenererte impulsbølger, i tillegg til eksisterende verktøy for beregning av bevegelsene.



Figur 6: Generering av en bølge (1), bølgeutbredelse (2) og oppskylning (3) (Heller mfl. 2009)

3.1 GENERERING AV BØLGER

Det er som nevnt flere ulike årsaker til dannelsen av en flodbølge, men i denne oppgaven er det fokusert på skredgenererte bølger. Et skred er et fenomen hvor tyngdekraften fører til en massebevegelse av for eksempel stein eller jord ned en skråning (Bargel 2006). Skred kan deles inn i ulike typer etter hva slags masse som er i bevegelse. Det kan være snø, stein, jord og/eller vegetasjon. Disse skredtypene kan igjen deles inn i undergrupper hvor fjellskred og steinsprang er eksempler på bevegelse av steinmasser, og jordskred er eksempel på bevegelse av jord. Skred kan også deles inn etter volum og hastighet (Bargel 2006) eller hvordan massebevegelsen foregår, som glidning eller som en strøm av masse.

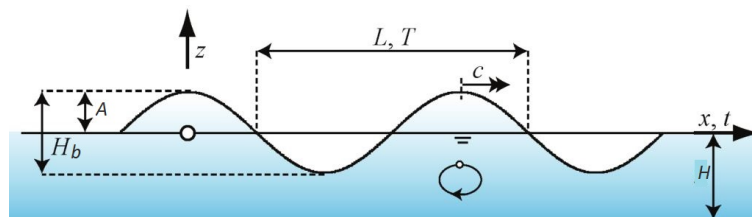
Det er skråningsstabiliteten som avgjør om et skred utløses eller ikke. Skred utløses når en skråning ikke lenger er stabil, det vil si når de destabiliserende kreftene blir større enn de stabiliserende. De lokale geologiske, geomorfologiske og hydrologiske forholdene er avgjørende for stabiliteten, i tillegg til tektonisk aktivitet og menneskelige inngrep. En skråning blir ustabil enten ved at de stabiliserende kreftene

reduseres, ved for eksempel økt porevanntrykk, oppsprekking eller forvitring, eller ved at de destabiliserende kreftene øker ved for eksempel økt ytre belastning, frostsprengning eller senking av ytre vannstands nivå (Høeg mfl. 2014). Ved skred i vann skiller man gjerne mellom undersjøiske skred, delvis dykkede skred eller overflateskred. Alle disse typene vil kunne forårsake en flodbølge. I dette prosjektet er det sett på steinskred som utløses over vannflaten.

Bølgens størrelse og form avhenger av skredets karakteristikk. Skredets volum, form og hastighet er viktige parametre. Volumet av fortrenget vann og skredets frontareal bestemmer, i hovedsak, bølgehøyden mens hastigheten har innvirkning på bølgens lengde. Når et fjellskred treffer vann beveger det seg som oftest med overkritisk hastighet (Høeg mfl. 2014), det vil si Froudetallet $F_r = \frac{V_s}{c} > 1$, hvor V_s = skredets hastighet, c = bølgens forplantningshastighet. Når $F_r > 1$ vil skredet legge bølgene som genereres bak seg og bølgehøyden begrenses (Høeg mfl. 2014). Bølgehastigheten øker med vanddyppet og skredhastigheten vil etterhvert avta. Oppbyggingen av bølger vil være kraftigst når $F_r = 1$ og dersom $F_r < 1$ vil bølgen som dannes bevege seg raskere vekk fra skredet og bli lengre enn når $F_r = 1$ (Høeg mfl. 2014).

3.2 BØLGEUTBREDELSE OG OPPSKYLLING

Skredgenererte flodbølger er gravitasjonsbølger. Det vil si at bølgenes bevegelse er drevet av tyngdekraften. For å beskrive utbredelse og oppskylling av skredgenererte flodbølger er det nødvendig med en kort forklaring av noen parametre og uttrykk knyttet til bølger. I figur 7 presenteres ulike bølgeparametre på en ideell sinusbølge som følger lineær bølgeteori. I denne figuren er H_b = bølgehøyde, A = amplitude, T = bølgeperiode, L = bølgelengde, c = bølgehastighet (fasehastighet) og H = stille vannsdybde. I tillegg til disse brukes også ofte begrepet overflateheving om vannivået i forhold til stille vannsdybden til en hver tid.



Figur 7: Bølgeparametre (Heller mfl. 2009).

H_b = bølgehøyde, A = amplitude, T = bølgeperiode, L = bølgelengde, c = bølgehastighet (fasehastighet) og H = stille vannsdybde

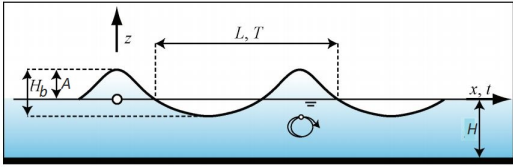
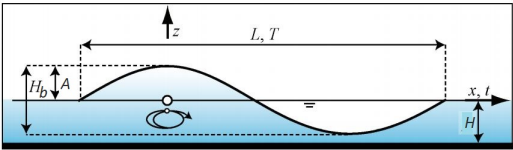
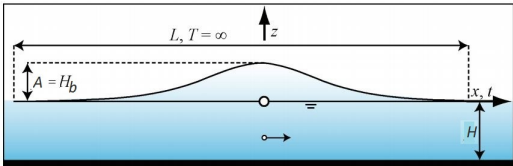
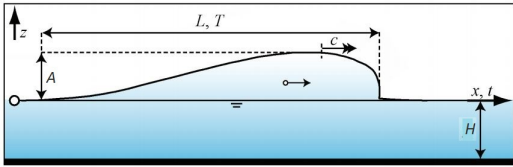
Dersom $H < L/20$ blir bølgen definert som gruntvannsbølge og dersom $H > L/2$ blir den definert som dypvannsbølge, mellom dette kalles det bølger på endelig dypt vann. Videre er viktige begreper som følger:

- Dispersjon
- Linearitet/ikke-linearitet
- Oscillerende/translatorisk bevegelse
- Periodisk/ikke-periodisk bevegelse

Dispersjon er et uttrykk som beskriver hvordan bølgens forplantningshastighet er avhengig av bølgelengden. Dersom fasehastigheten avhenger av bølgelengden sies bølgene å være dispersive, mens bølger er ikke-dispersive dersom fasehastigheten er uavhengig av bølgelengden. Denne effekten vil ha størst innvirkning på dypt vann. Når lange bølger, slik som flodbølger hvor bølgehastigheten alltid vil være avhengig av bølgelengden, kommer inn mot grunnere vann vil effekten av dispersjon avta og nærme seg null. Bølgers linearitet eller ikke-linearitet beskriver bølgens fasong. Lineære bølger vil ikke endre form ved konstant dyp. Den ikke-lineære effekten gjør bølgen brattere i front når den beveger seg inn på grunnere vann og bølgen kan bryte. Oscillerende eller translatoriske bevegelser beskriver vannpartiklens bevegelse. Ved oscillerende bølger beveger vannpartiklene seg i elliptiske baner og medfører ingen massetransport. Ved translatoriske bølger beveger partiklene seg horisontalt med bølgens bevegelsesretning, slik at bølgen transporterer masse (Heller 2007). Dette er lange bølger med liten amplitude. Periodiske bølger er regelmessige eller gjentakende, mens ikke-periodiske bølger er uregelmessige.

Etter Valentin Hellers forskning ved universitetet Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) i Zürich (Heller 2007) ble det funnet at skredgenererte flodbølger er ikke periodiske og som oftest sterkt ikke-lineære, men bølgene kan også være lineære i følge Harbitz mfl. 1993. Bølgebevegelsene er som regel mer translatoriske enn oscillerende og de defineres som gruntvannsbølger eller bølger på endelig vandyp. Generelt kan flodbølgene være av fire ulike typer; stokebølge, cnoidalbølge, singelbølge eller bore. Se beskrivelse i tabell 1. Parametrene i illustrasjonene er de samme som i figur 7.

Tabell 1: Ulike typer impulsbølger (Heller mfl. 2009; Heller mfl. 2011)

Type bølge	Illustrasjon	Beskrivelse
Stokebølge		Flere symmetrisk bølger med noe bratte bølgetopper. Endelig dyp- til dypvannsbølger med liten massetransport.
Cnoidalbølge		Periodiske bølger på endelig dypt vann. I hovedsak oscillerende bevegelse, men de har også noe massetransport.
Singelbølge		Bølge med kun én bølgetopp og ingen svingning. Oppstår som følge av jordskjelv. Gruntvannsbølge med stor massetransport.
Bore		Bølge med vertikal front som oppstår ved rask tidevannstigning eller bølgebrytning. Gruntvannsbølge med stor massetransport.

3.3 BEREGNINGSVERKTØY

Det finnes flere ulike metoder for beregning av bølger generert av skred. Generelt kan man dele disse inn i fem ulike typer (Heller mfl. 2009):

- Empiriske formler utledet fra modellforsøk
- Empiriske formler utledet fra data fra felt
- Analytiske beregninger
- Fysiske modellforsøk
- Numeriske simuleringer

Av disse fem metodene er det kun de to siste, fysiske modellforsøk og numeriske simuleringer, som gir et nøyaktig resultat, men disse er også de mest tidkrevende og kostbare metodene (Heller mfl. 2009). Empiriske formler utviklet etter modellforsøk er mindre tidkrevende, men resultatene vil ikke bli like nøyaktig som de to sistnevnte metodene, og nøyaktigheten vil avhenge av hvor godt tilpasset de empiriske formlene er i forhold det aktuelle tilfellet. Fysiske modellforsøk er spesielt tidkrevende da alle prototyper er ulike og en modell må gjennom omfattende modifiseringer for å gi gode resultater for hvert enkelt magasin. En god numerisk modell vil være fordelaktig når det er ønskelig å beregne bølgebevegelse, oppskylling og overtopping for flere ulike magasin, men den bør benytte ligninger som gir et

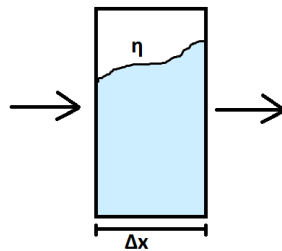
nøyaktig og godt resultat samtidig som de ikke er for kompliserte og tidkrevende. Det eksisterer i dag ulike numeriske modeller for slik eller lignende simuleringer, men hvor godt de fungerer ved overtopping av en dam og spesielt for norske magasin er ikke godt dokumentert. I det følgende blir ligninger benyttet i numeriske verktøy presentert før NGIs numeriske modell blir beskrevet, i tillegg til tre andre numeriske modeller. Hellers metode for overtopping, som er en modell basert på empiriske formler utviklet fra modellforsøk, blir også presentert.

3.3.1 Bølgeligninger

Bølgebevegelser er tredimensjonale bevegelser som kan være krevende å simulere. For å kunne simulere bevegelsene deles beregningsområdet inn i søyler (Høeg mfl. 2014), se figur 8. Hver søyle er Δx bred og har både inn- og utstrømning av vann. η beskriver overflatehevingen i hver søyle. Denne overflatehevingen blir beregnet ved hjelp av kontinuitetsligningen og momentumsligningen, som i én dimensjon og lineært hydrostatisk tilfelle utledes til ligning 1, hvor u = partikkelhastigheten, t = tid og x = romlig koordinat. Denne ligningen kalles også lineær gruntvannsligning.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad , \quad \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (1)$$

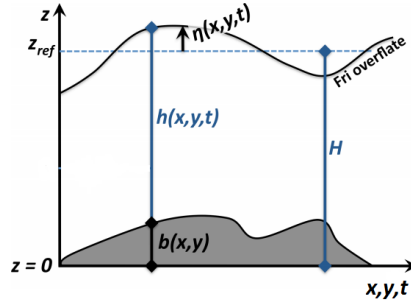
Når overflatehevingen i en søyle er kjent oppdateres strømningshastighetene ved hjelp av bevegelsesligninger og overflatehevingen for neste søyle beregnes. Når alle søyler i det romlige beregningsområdet er beregnet gjentas prosessen for neste tidssteg. Typiske bevegelsesligninger som benyttes til bevegelser for flodbølger er gruntvannsligningene og Boussinesq-ligninger. Disse er begge utledet fra Navier-Stokes og har ulike egenskaper.



Figur 8: Illustrasjon av én søyle i beregningsområdet

Kvaliteten på en numerisk modell avhenger av hvor godt den kan beregne de ulike situasjonene knyttet til bølgeutbredelse. Det er behov for ulike matematiske ligninger ved beregning av bølger på åpent, dypt vann, på grunnere vann, ved brytning av bølger og oppskyllingen på tørt land. Generelt kan man si at en modell som inkluderer dispersjon er avgjørende for bølgeutbredelse på dypere vann. Ikke-linearitet blir viktig på grunnere vann når bølgefronten blir brattere og bølgen kan bryte (Pedersen 2008). For bølgeopp skylking er også ikke-linearitet viktig, mens dispersjon er mindre viktig. I dette avsnittet vil Navier-Stokes-ligninger,

gruntvannsligninger og Boussinesq-ligninger bli presentert. I figur 9 repeteres noen parametre som er viktig for å forstå ligningene som blir vist. I denne figuren er H = stillevannsdybden, b = havbunnen, η = overflatehevingen fra stillevannsdybde, h = høyde fra bunn til overflate, t = tid og x, y, z er romlige koordinater.



Figur 9: Illustrasjon av vannvolum med bølger og ujevn bunn (Drange 2014)

Navier-Stokes ligninger er av de grunnleggende ligningene i fluidmekanikk (Ormestad mfl. 2015) og beskriver bevegelsene til viskøse væsker. De har mange bruksområder, som for eksempel strømning i rør eller bølgebevegelser. De er ikke-lineære differensialligninger, gitt på vektorform i ligning 2.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \nabla \vec{U} \right) = -\nabla P + \nabla \tau + \vec{f} \quad (2)$$

De to leddene på venstre side av ligningene beskriver henholdsvis transient (tidsbestemt) og konvektiv (romlig) akselerasjon. Første ledd på høyre side, $-\nabla P$, beskriver trykkrefter, $\nabla \tau$ beskriver skjærkrefter, som er knyttet til viskositeten, og \vec{f} er volumkreftene på væsken. Navier-Stokes ligninger utledes ved å bruke Newtons 2.lov på en fluidpartikkel eller et lite kontrollvolum, og dividere med volumet (V), ligning 3. I ligningen er F = treghetskrefter, m = masse og a = akselerasjon.

$$\frac{\Sigma F}{V} = \frac{m \vec{a}}{V} \quad (3)$$

Høyre side av ligning 3 utgjør de to akselerasjonsleddene, mens venstre side omfatter alle kreftene som følge av trykk- og skjærspenninger og andre krefter som måtte virke på kontrollvolumet. I kartesiske koordinater i tre dimensjoner blir ligning 2 skrevet ut som i ligning 4, hvor ρ er densitet, u, v og w er hastighet i henholdsvis x -, y - og z -retning og g er tyngdens akselerasjon.

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (4)$$

Navier-Stokes-ligningene kan være krevende å benytte i en numeriske modell fordi de er tredimensjonale og høyoppløselig. Ved å redusere fra de tredimensjonale

Navier-Stokes-ligningene til de todimensjonale gruntvannsligningene blir beregningene mindre omfattende og enklere å behandle. Gruntvannsligningene kan utledes fra Navier-Stokes-ligningene ved å integrere Navier-Stokes med hensyn på dybde for et tilfelle hvor den vertikale dybden er mye mindre enn den horisontale utstrekningen (bølgelengden) (Dawson mfl. 2008) og den vertikale partikkelhastigheten er neglisjerbar, det vil si at problemet kan reduseres med én dimensjon. Gruntvannsligningene kan også utledes på en mer fysisk måte gjennom bevarelse av masse, impuls og energi gjennom et kontrollvolum (Vikan 2009). Ligningene er vist under, ligning 5, på ikke-lineær form. Den første ligningen er kontinuitetsligningen og de to neste er horisontale momentumsligninger i x- og y-retning. Det første leddet i disse ligningene beskriver endringene i volumet som betraktes. De to neste leddene beskriver massefluksen i x- og y-retning ut av det betraktete volumet og leddet på høyre side beskriver havbunnen.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial u^2 h + \frac{1}{2}gh^2}{\partial x} + \frac{\partial uvh}{\partial y} &= -gh \frac{\partial b}{\partial x} \\ \frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial v^2 h + \frac{1}{2}gh^2}{\partial y} &= -gh \frac{\partial b}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

Disse ligningene kan, som nevnt, benyttes ved tilfeller hvor den horisontale utstrekningen er mye større enn den vertikale dybden. Det vil i bølgesammenheng si gruntvannsbølger. De er basert på at i slike lange bølger på grunt vann beveger vannpartiklene seg i langstrakte ellipsebaner og har mye større horisontal hastighet enn vertikal (Pedersen mfl. 2005). Ligning 5 er ikke-lineære, men de kan også lineariseres. Ligning 1 er egentlig gruntvannsligningene uten dispersjon og ikke-linearitet. Ledd for Corioliskrefter kan legges til gruntvannsligningene, men effekten av dispersjon kan ikke inkluderes. Derfor er ikke alltid gruntvannsligningene godt egnet til beregning av bølgeutbredelse, men ved beregning av bølgeoppstyling derimot, er gruntvannsligningene de mest benyttede (Pedersen 2008).

Boussinesq-ligninger er en tilnærming til svakt ikke-lineære og svakt dispersive bølger med bevegelse i to retninger fra punktet hvor de ble generert (Johnson 1997). Boussinesq-ligninger er gruntvannsligninger, men de er videreutviklet og inkluderer effekten av dispersjon (Kirby mfl. 1998). Boussinesq-ligningene er ytterligere utviklet og dette har resultert i flere ulike typer Boussinesq-ligninger. Disse ulike typene har forskjellige egenskaper, for eksempel forbedret ikke-lineær tilnærming eller forbedret dispersjon, som er de mest avgjørende egenskapene for beregning av utbredelse av skredgenerte flodbølger (Pedersen mfl. 2008). En type Boussinesq ligninger er gitt i ligning 6 (Peregrine 1972).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x}((H + \alpha\eta)u) \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \alpha \frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{2}u^2) &= -\frac{\partial \eta}{\partial x} + \epsilon \left(\frac{1}{2}H \frac{\partial^2}{\partial x^2} (H \frac{\partial u}{\partial t}) - \frac{1}{6}H^2 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Den første av ligningene over er kontinuitetsligningen og den andre er momentumsligningen. I ligningene er $\alpha = \frac{A_0}{H_0}$ og $\epsilon = (\frac{H_0}{L_0})^2$, hvor A_0 , H_0 og L_0 er

henholdsvis karakteristisk amplitude, dybde og bølgelengde. ϵ er derfor et uttrykk for dispersjonen og α et uttrykk for ikke-lineariteten.

3.3.2 *GloBouss og MOST*

NGI har selv utviklet et verktøy for simulering av bølger forårsaket av skred. Denne modellen er en kombinasjon av de to numeriske modellene GloBouss og MOST. MOST er utviklet av Titov og Synolakis for NOAA/University of South California, mens GloBouss er utviklet av Pedersen ved Universitet i Oslo (UiO) i samarbeid med Løvholt ved NGI. Modellen er tidligere benyttet ved Numerisk simulering av Åkerneset i Stranda kommune, Møre og Romsdal. GloBouss blir benyttet først til generering og utbredelse av bølgen. Videre blir MOST benyttet til bølgeoppskylning. GloBouss er basert på prosessen beskrevet i forrige avsnitt med at beregningsområdet deles inn i søyler og overflatehevingen i hver søyle beregnes hver for seg i rom og tid. Før kjøring av modell defineres randbetingelsene. Disse kan enten være lukkede, som en vegg som reflekterer bølgene, eller åpne, slik at bølgene kan gå igjennom uten å reflekteres. Dette gjøres ved at det defineres en ramme rundt beregningsområdet som fungerer som en svamp. Avstanden mellom beregningsområdet og rammen rundt avgjør om bølgene går helt ut av modellen eller om de kun blir dempet, dersom avstanden er kort. Modellen kan beregne etter lineære gruntvannsligninger, lineært dispersive ligninger eller Boussinesq-ligninger som inkluderer både ikke-linearitet og dispersjon. Dersom en ønsker å bruke dispersive ligninger på dypt vann og ikke-lineære på grunt vann, benyttes ligninger med begge leddene gjennom hele beregningsområdet, da leddene for ikke-linearitet vil påvirke lite på dypt vann der dispersjon er viktig og tilsvarende for dispersjon på grunt vann. I tillegg kan ledd for Corioliskrefter inkluderes.

Instabilitet kan oppstå i modellen, som i alle numeriske modeller. Dette er forhold som gjør at modellen ikke oppfører seg etter fysikken. Dette kan, for flodbølgemodeller, skje ved veldig bratt terreng eller dersom et område nær strandlinjen, som normalt er dekket med vann, blir lagt tørt av en bølgedal. I slike tilfeller kan modellen få problemer og det kan dannes små bølger som over noe tid eskalerer til ufysikalske bølger. For å unngå instabiliteter må man først å sørge for at Courantallet $C = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$, hvor c = bølgens hastighet. Dette gjøres ved å endre tidssteget, Δt , eller det romlige intervallet, Δx . Dersom dette ikke er tilstrekkelig kan batymetrien endres ved for eksempel å jevne bratt terreng.

GloBouss er utviklet for bølger på åpent hav, fjorder eller innsjøer uten mulighet for å simulere bølgeoppskylning på tørt land og er derfor kombinert med MOST. MOST kan også beregne både generering og utbredelse av bølger, men NGI bruker altså kun delen for bølgeoppskylning. MOST er basert på ikke-lineære gruntvannsligninger inkludert ledd for effekten av Corioliskrefter (Glomsdal mfl. 2006), og er derfor godt egnet til beregning av bølgeoppskylning. Denne modellen benytter en metode med 3 nøstede gitter (grids) for å jobbe seg fram til resultater med høy oppløsning. Det første gitteret, kalt A, vil være regionalt med relativt lav oppløsning, det neste, B, har middels høy oppløsning og det siste, C, er zoomet inn til studieområdet og har høy

oppløsning. Bølger kan legges inn i modellen på to ulike måter. Enten ved at bølgens overflate og hastighet defineres som initialbetingelser eller som tvungen input langs en av modellens grenser (boundaries) (Glimsdal mfl. 2006). Koblingen mellom GloBouss og MOST skjer gjennom en enveis prosess hvor MOST leser resultatene for overflateheving og partikkelhastighet i x- og y-retning fra GloBouss for hver tidsenhet (Løvholt mfl. 2010). Resultater fra hele GloBoussmodellen er input i gitter A i MOST. Dette bearbeides i gitter A og output fra gitter A blir input for gitter B, og tilsvarende prosess mellom B og C. Output fra gitter C blir resultatene fra modellen. Modellen er anerkjent og godt dokumentert. Den er enkel og bruke og robust slik at den ikke fanger opp unødvendig detaljerte forhold. Brukergransesnittet til MOST er kalt ComMIT, Community Model Interface for Tsunami.

3.3.3 Andre numeriske modeller

Eksempler på andre numeriske modeller for bølgegenerering, propagering og oppskylling er Geowave, Cornell Multigrid Coupled Tsunami model (COMCOT) og GeoClaw. Geowave er en numerisk modell utviklet av den amerikanske bedriften Applied Fluids Engineering. Geowave beregner bølgegenerering, forplantning og oppskylling ved å kombinere modellene Tsunami Open and Progressive Conditions System (TOPICS) og Funwave. I TOPICS simuleres skredet som generer flodbølgen i 3D. Ulike typer skred kan benyttes, steinskred eller løsmasseskred, og skred utløst over vannflaten eller under vannflaten. Alternativt kan flodbølgen genereres av jordskjelv (Applied Fluids Engineering 2009). Skredets posisjon og hastighet fra TOPICS er input i Funwave som beregner bølgeforplantningen og oppskylling basert på Boussinesq tilnærminger (Applied Fluids Engineering 2009). Boussinesq-ligningene er i denne modellen ikke-lineære og tilpasset slik at de inkluderer dispersjon for bølger på dypt vann. De er også utviklet slik at brytning av bølger kan beregnes. Bølgeoppskyllingen på tørt land beregnes ved hjelp av å la strandlinjen være "flyttbar". Dette innebærer å beskrive de tørre landområdene som slisset og permeable framfor faste og impermeable. Dette tillater vannivået å ligge under nivået for tørt land, og der hvor vannflaten skjærer sjøbunnen vil, til enhver tid, være strandlinjen (Kirby mfl. 1998). Det foreligger en rekke rapporter og case studier hvor Geowave er blitt benyttet. Etter et skred i Three Gorges magasinet i Kina, Gognjiafangskredet i 2008, ble Geowave benyttet for å sammenligne beregnede verdier for bølgeforplantningens hastighet, bølgenes amplitude og bølgeoppskylling mot verdier funnet ut fra videoopptak av hendelsen. I denne studien ble bølgehastigheten beregnet til 18,5m/s mot den antatte 18,36m/s fra videoen. Høyeste amplitude ble beregnet til 31,5m sammenlignet med 31,8m fra video og ved sammenligningen av oppskyllingshøyde var gjennomsnittlig avvik 6,5% (Huang mfl. 2012). Denne studien, blant flere andre, viser at Geowave er et godt verktøy ved simulering av skredgenererte bølgeforplantninger og -oppskylling.

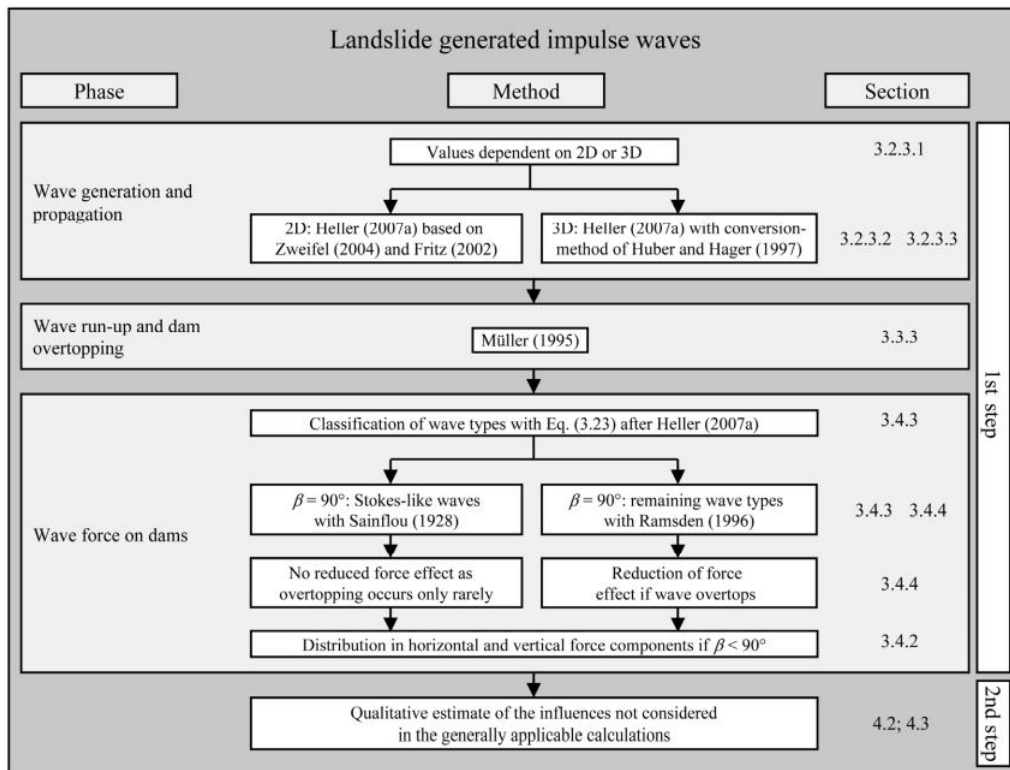
COMCOT ble først etablert av koreanske forskere (Woo og andre), og ble så videreutviklet av Liu og Lantz ved Cornell University (Glimsdal mfl. 2006). COMCOT er en modell som simulerer hele flodbølgescenariet fra generering til propagering og oppskylling (Cornell University 2016). Den er basert på gruntvannsligningene og det

kan velges om lineære eller ikke-lineære ligninger skal benyttes (Glimsdal mfl. 2006). Bølgene genereres av enten skred, jordskjelv eller overflateheving. Modellen benytter et fleksibelt gitter (grid) slik at lav oppløsning velges på åpent hav, mens høyere oppløsning velges nærmere oppskyllingsområdene, for at modellen skal være mest mulig effektiv og nøyaktig (Cornell University 2016).

GeoClaw er en videreutvikling av TsunamiClaw som er utviklet av David L. George ved Washington University og er en del av ClawPack, en samling verktøy basert på bevaringslover (Clawpack 2015). GeoClaw benytter ikke-lineære gruntvannsligninger og benytter adaptive gitter framfor nøstede, slik at områder ikke påvirket av bølger beregnes med lav oppløsning, mens områder med brattere bølger vil simuleres med høyere oppløsning (Glimsdal mfl. 2006). Bølgene kan generes av skred, jordskjelv eller overflateheving (Glimsdal mfl. 2006).

3.3.4 *Hellers metode*

Hellers beregningsmetode er utviklet ved universitetet ETH i Zürich, gjennom fysiske forsøk med løsmasseskred i bølgekanal og bølgebasseng, og ulike omregningsmetoder for bølgeutbredelse. Dette har resultert i et regnearkbasert program til å beregne bølgegenerering, forplantning, oppskylling og overtopping. Metoden er delt inn i to steg, hvor steg 1 er beregning av bølgebevegelsene etter ideelle forhold, det vil si et løsmasseskred utløst fra over vannoverflaten ned i et magasin med rette flater og jevnt bunnivå (Svendsby 2014). I dette steget benyttes ulike formler og metoder for beregning av generering og forplantning av bølger avhengig av om magasinet har avlang form som en kanal (2D) eller er bred form som et basseng (3D). Bølgekreftene som virker på dammen beregnes også ut fra ulike metoder, avhengig av størrelse og type bølger. Hvilke metoder som benyttes går fram av figur 10 som viser et enkelt flytskjema over Hellers metode. Referansene kan finnes i Heller mfl. 2009. Steg 2 gjennomføres utenom regnearket og i dette steget estimeres effekten av avvik i prototypen i forhold til det ideelle (Svendsby 2014). Det vil si hvordan skredet eller skredets bevegelse avviker fra det definerte løsmasseskredet eller hvordan magasinet avviker fra den ideelle geometrien til et kanalformet eller bassengformet magasin. Det er blitt foreslått å bruke denne metoden også i Norge siden norske magasin ligner sveitsiske magasin med tanke på geometri og den bratte topografien rundt, men etter studier ved NTNU av Svendsby 2014 og Bolzoni 2015 er Hellers metode lagt vekk. Begge studiene gikk ut på å gjennomføre fysiske forsøk for å finne overtoppingsvolum over en dam i et magasin med geometri tilsvarende et typisk norsk fjellmagasin og sammenligne resultater fra dette med beregnede verdier ved hjelp av Hellers metode. Begge prosjektene viste dårlig korrelasjon mellom beregnet overtoppingsvolum og volumet målt ved fysiske forsøk. Det er dog verdt å nevne at videre utvikling av Hellers metode er gjennomført av Heller selv. Denne forskningen går på effekten av skredtype (Heller mfl. 2013) og effekten av magasingeometrien (Heller mfl. 2015; Heller mfl. 2016) i modellen.



Figur 10: Flytskjema Hellers metode. Referansene i figuren gjelder for manualen av Heller mfl. 2009

METODE

I dette prosjektet er det gjort forsøk i Vassdragslaboratoriet ved NTNU og simuleringer med NGLs numeriske modell, GloBouss/MOST. Resultatene er så sammenlignet og evaluert. Modellen i Vassdragslaboratoriet ble i 2010 etablert som en modell av Hellesylt og Geirangerfjorden i Stranda kommune. Modellen ble brukt under en konsekvensstudie av et potensielt ras fra Åkerneset i Stranda. Senere ble modellen bygget om til å tilsvare Viddalsmagasinet i Aurland kommune og er blitt benyttet ved flere masteroppgaver knyttet til skred i magasin. Modellen er nå ytterligere modifisert ved at magasinet er gjort smalere og bunnivået hevet noe. I forhold til et typisk norsk magasin er modellen i skala 1:190. I dette kapittelet er metoden for de fysiske forsøkene og de numeriske simuleringene beskrevet.

4.1 MODELLFORSØK

4.1.1 *Fysisk modellskalering*

Når en modell skal bygges er det viktig at skalering i forhold til prototypen blir gjort rett. Geometrisk, kinematisk og dynamisk likedannethet må oppnås. Geometrisk likedannethet betyr at forholdet mellom alle korresponderende dimensjoner i modell og prototype er like. Kinematisk likedannethet indikerer likedannethet i vannbevegelsene, det vil si at strømningslinjene i modellen til enhver tid er like som i prototypen og at forholdet mellom hastighetene i modell og prototype er like. Dynamisk likedannethet går ut på at kreftene og massene i modellen tilsvarer de i prototypen i hvert punkt (Aberle 2015). For skredgenererte flodbølger er det fem relevante krefter en må ta hensyn til ved dynamisk skalering (Heller 2011):

- Treghtetskrefter
- Gravitasjonskrefter
- Viskøse krefter
- Krefter som følge av overflatespenning
- Krefter som følge av elastisk kompresjon

Det er ikke mulig å oppnå likedannethet mellom modell og prototype for alle disse fem samtidig. Derfor må det vurderes hvilke krefter som er dominerende og hvilke som kan neglisjeres, og dermed velge hvilken modellov som skal benyttes. I de fleste modeller av vassdrag og hydrauliske komponenter blir Froudes modellov brukt fordi

strømningene er drevet av gravitasjonskrefter. Froudetallet er roten av forholdet mellom treghetskrefter og gravitasjonskrefter. I andre tilfeller, hvor viskositeten er sentral kan Reynolds modellov benyttes. Reynoldstallet beskriver forholdet mellom treghetskrefter og viskøse krefter. Webers lover benyttes når overflatespenninger er dominerende, mens Cauchys lover benyttes ved elastisk kompresjon (Aberle 2015). Modellen i dette prosjektet er skalert etter Froudes modellov, slik at Froudetallet i modellen alltid skal være likt som i prototypen. Modellen er bygd i skala 1:190. Det betyr at lengdeforholdet $L_r = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{190}$, hvor L er lengde og r, m og p er henholdsvis forhold (ratio), modell og prototype. Andre skaleringsformler er gitt i tabell 2.

Tabell 2: Skaleringsforhold for ulike parametre etter Froudes modellov (Aberle 2015)

Parameter	Skaleringsforhold
Areal	$A_r = \frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = L_r^2$
Hastighet	$V_r = \sqrt{L_r}$
Tid	$t_r = \frac{t_m}{t_p} = \frac{L_m V_p}{L_p V_m} = \sqrt{L_r}$
Vannføring	$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{V_m A_m}{V_p A_p} = L_r^{2,5}$
Kraft	$P_r = \frac{P_m}{P_p} = \frac{M_m L_m T_p^2}{M_p L_p T_m^2} = \frac{\rho L_m^3 L_m T_p^2}{\rho L_p^3 L_p T_m^2} = L_r^3$

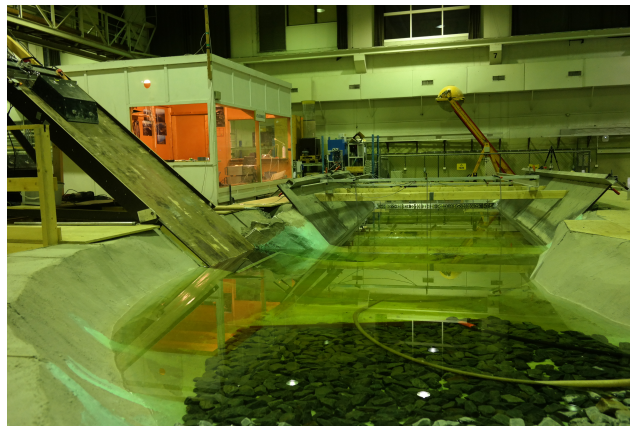
Det kan oppstå enkelte ulikheter mellom modell og prototype som følge av at det ikke er mulig å oppfylle likedannethet mellom modell og prototype for alle typer krefter samtidig. Slike ulikheter kalles skalaeffekter. I en Froudeskalert modell for skredgenererte flodbølger som i dette prosjektet vil eventuelle skalaeffekter oppstå dersom effekten av overflatespenninger, viskositet eller elastisk kompresjon er for stor til å neglisjeres.

4.1.2 Modelloppsett

Figur 11 viser et oversiktsbilde over modellen i laboratoriet. En skisse av modellen med mål er lagt ved oppgaven i vedlegg A. Modellen består av et magasin, en skredrampe, en fyllingsdam i magasinets smale ende lengst vekk i figur 11 og en dalside med steiner i nærmeste ende i figuren. Skredrampen har en helning på 40 grader, se figur 12. Skredet består av blokker slik at både volum og masse kan varieres ved å redusere eller øke antallet blokker. Hver blokk har noe ulik masse, mellom 37,6 kg og 42,4 kg. Volumet av hver blokk er 0,032 m³. Skredet utløses ved å trekke i en snor festet til skredblokkenes oppheng, som løser ut blokkene. Blokkene kan heises opp igjen ved hjelp av en wire og vinsj. Magasinet er enkelt utformet med jevne, skrå sider og flat bunn, bortsett fra en dypere sone under skredrampen. Plasseringen til skredrampen er trukket noe tilbake i forhold til sidene i magasinet. Dammen i modellen er en treplate med pålimte steiner som representerer en steinfyllingsdam, se figur 13. Geometrien til dammen blir variert i forsøkene og er valgt etter hvordan norske fyllingsdammer er bygd. Det er brukt tre ulike dammer, to rette dammer med

helning 1:2 og 1:1,5 og en skråstilt dam med helning 1:1,5. Den skråstilte dammen har en vinkel på 20 grader ut i magasinet.

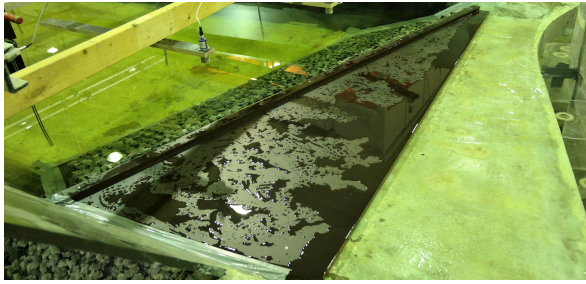
Modellen er utstyrt med flere ulike måleinstrumenter. Skredets hastighet blir målt ved hjelp av en rotasjonssensor montert på skredrampen. Denne måleren er koblet til en snor festet på skredblokkene. I magasinet er det 9 sensorer som logger bølgebevegelsene, sensor G1-G9 i figur 14a. Disse sensorene er av typen DHI Wave Meter 102E og måler den elektriske konduktiviteten mellom to delvis dykkede elektroder. Resultatet fra målingene gis i volt og denne spenningen er proporsjonal med den neddykkede lengden av elektrodene slik at vanndybden til en hver tid kan finnes. Sensorene har en målefrekvens på 200 Hz og en nøyaktighet på ± 1 mm. Over damkrona er det montert tre sensorer som måler avstanden fra sensoren ned til damkrona eller vannflaten når dammen overtoppes ved hjelp av ultralyd, sensor OHøyre, OMidt og OVenstre i figur 14a. Disse sensorene er av typen mic+35/IU/TC, som har en nøyaktighet på ± 1 % (Microsonic 2015). Nedstrøms dammen er det plassert 5 beholdere som samler opp vannet etter overtopping, figur 14b. Vannivået i hver beholder måles også med en sensor mic+35/IU/TC og volumet av overtopping kan beregnes. Hvert forsøk blir også filmet fra to retninger for å ha visuell dokumentasjon fra forsøkene.



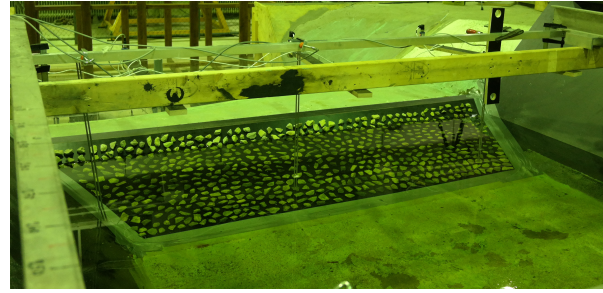
Figur 11: Oversiktsbilde fysisk modell



Figur 12: Skredrampe med én skredblokk

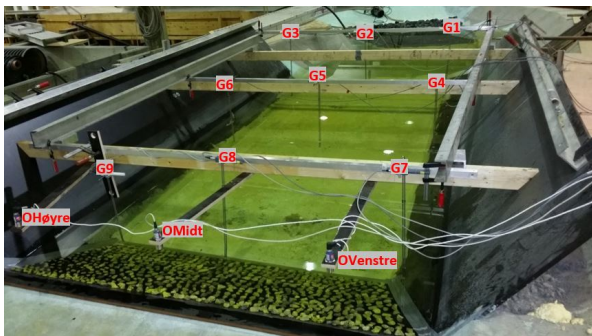


(a) Skråstilt dam med helning 1:1,5



(b) Rett dam med helning 1:2

Figur 13: To av dammene brukt i modellforsøkene



(a) Sensorer med navn



(b) Beholdere til oppsamling av vann

Figur 14: Måleutstyr

4.1.3 Gjennomføring av forsøk

Første steg ved gjennomføringen av forsøk er å kalibrere sensorene. Dette gjøres ikke før hvert enkelt forsøk, men i forkant av hver økt med forsøk. Hastighetssensoren, bølgesensorene og sensorene over damkrona måler i volt, men konverteres til m/s og m i etterkant. Ved kalibreringen av hastighetssensoren måles spenningen når snoren festet til rotasjonssensoren er i en nullposisjon og deretter når den er trukket ut 1 m, for å finne hvor mange volt 1 m tilsvarer. Dette varierer lite, størrelsesorden 0,01 V, fra gang til gang det gjøres forsøk. Ved kalibrering av bølgesensorene stilles alle sensorene til 0 V når sensorene er plassert i nullposisjon. Deretter henholdsvis heves og senkes sensorene 50 mm og spenningen måles med et voltmeter. Til slutt settes sensorene tilbake til nullposisjon og spenningen leses av og noteres. Opprinnelig tilsvarer 50 mm 1 V, men spenningen som leses av når sensorene står i nullposisjon viser avviket fra dette. Resultatene korrigeres i etterkant. Avviket er typisk i størrelsesorden hundredeler. De tre sensorene over damkrona er ikke nødvendig å kalibrere, da resultatene fra kalibreringen varierer svært lite for hver gang. Målingen blir gitt i volt og 1 V tilsvarer her 21 mm. Vannivået i beholderene nedstrøms dammen måles direkte i millimeter og krever ikke kalibrering. Avstanden mellom sensor og vannflate måles slik at vannvolum kan beregnes når en vet beholderens lengde, bredde og høyde. Etter at sensorene er kalibrert er det klart for å gjøre forsøk. I forkant av hvert enkelt forsøk må filmkameraene og dataloggingen startes før skredet

utløses. I etterkant av hvert forsøk stanses dataloggingen og kameraene og skredet heises opp fra magasinet. Magasinet etterfylles til ønsket vannivå igjen og en må vente til vannflaten er helt uten bevegelse før neste forsøk kan startes.

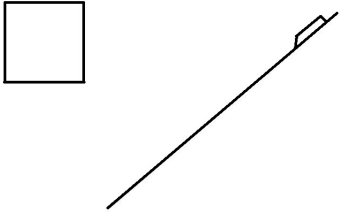
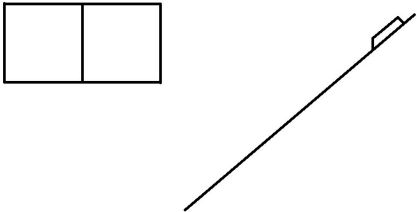
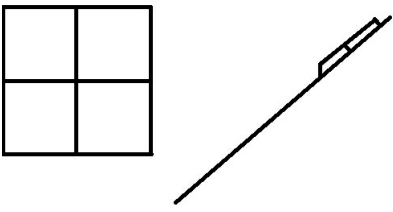
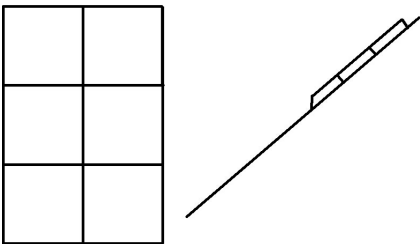
Data fra hastighetssensor, bølgesensorer og sensorer over damkrona registreres med dataprogrammet "the Agilent Measurement Manager" og lagres som kommaseparerte ASCII-filer. Etter at forsøkene er gjennomført må resultatene konverteres fra volt til m/s og mm for å enklere kunne sammenligne de med resultater fra den numeriske modellen.

Det er i alt gjennomført 12 ulike forsøk. Skredets størrelse, det vil si dets volum og masse, er variert i tillegg til geometrien til dammen. Forsøkene er utført slik at kun én parameter er variert av gangen, mens de andre er beholdt konstante. Det vil si at dammens geometri er beholdt konstant, mens skredstørrelsen er variert. Skredene i forsøkene har vært av størrelsene 1, 2, 4 og 6 blokker. Når forsøk med alle skredstørrelsene er fullført endres damgeometrien og nye forsøk med de ulike skredene gjennomføres. De ulike damgeometriene som er blitt benyttet er, som nevnt, rett dam med helning 1:2, rett dam med helning 1:1,5 og skråstilt dam med helning 1:1,5. Vanndybden er holdt konstant for alle forsøk, 285 mm i den delen av modellen hvor dammen er plassert. For å øke gyldigheten av resultatene er hvert forsøk gjennomført tre ganger. Det er ønskelig at disse tre gjennomføringene av et forsøk ikke skjer rett etter hverandre, men i en tilfeldig rekkefølge. Til sammenligning med den numeriske modellen er ett av de tre forsøkene valgt ut tilfeldig. Repeterbarheten til forsøkene er vist i avsnitt 5.1, hvor resultater fra de tre gangene et forsøk er gjennomført er plottet for en tilfeldig valgt sensor. Tabellen under, tabell 3, viser et sammendrag av hvilke forsøk som er blitt gjort og tabell 4 viser størrelse og form på skredene. De ulike damgeometriene er for enkelhets skyld, gitt navnene A, B og C og de ulike skredstørrelsene 1, 2, 3 og 4, forklart i tabell 3. Resultatene fra forsøkene sammen med beregnede resultater fra den numeriske modellen er vist i avsnitt 5.3.

Tabell 3: Gjennomførte forsøk

Navn på forsøksoppsett	Geometri dam	Antall blokker
A1	Rett, helning 1:2	1
A2	Rett, helning 1:2	2
A3	Rett, helning 1:2	4
A4	Rett, helning 1:2	6
B1	Rett, helning 1:1,5	1
B2	Rett, helning 1:1,5	2
B3	Rett, helning 1:1,5	4
B4	Rett, helning 1:1,5	6
C1	Skråstilt, helning 1:1,5	1
C2	Skråstilt, helning 1:1,5	2
C3	Skråstilt, helning 1:1,5	4
C4	Skråstilt, helning 1:1,5	6

Tabell 4: Skredenes størrelse og form

<p>1 blokk</p> <p>Volum (m³):</p> <p>Densitet (kg/m³):</p> <p>Avstand vannoverflate (m):</p>	<p>Modell</p> <p>0,032</p> <p>1178</p> <p>2,0</p>	<p>Prototype</p> <p>219 488</p> <p>1178</p> <p>380,0</p>	
<p>2 blokker</p> <p>Volum (m³):</p> <p>Densitet (kg/m³):</p> <p>Avstand vannoverflate (m):</p>	<p>Modell</p> <p>0,063</p> <p>1195</p> <p>2,0</p>	<p>Prototype</p> <p>432 117</p> <p>1195</p> <p>380,0</p>	
<p>4 blokker</p> <p>Volum (m³):</p> <p>Densitet (kg/m³):</p> <p>Avstand vannoverflate (m):</p>	<p>Modell</p> <p>0,139</p> <p>1151</p> <p>1,40</p>	<p>Prototype</p> <p>953 401</p> <p>1151</p> <p>266,0</p>	
<p>6 blokker</p> <p>Volum (m³):</p> <p>Densitet (kg/m³):</p> <p>Avstand vannoverflate (m):</p>	<p>Modell</p> <p>0,215</p> <p>1138</p> <p>0,81</p>	<p>Prototype</p> <p>1 474 685</p> <p>1138</p> <p>153,9</p>	

4.2 NUMERISK MODELL

Det er gjennomført simuleringer tilsvarende alle laboratorieforsøkene med de numeriske modellene GloBouss og MOST, beskrevet i avsnitt 3.3.2. Simuleringene er gjennomført av NGI, ved Sylfest Glimsdal, og resultatene er levert som kommaseparerte ASCII-filer med overflateheving og tid. Plasseringen til målesensorene i laboratoriemodellen er lagt inn i den numeriske modellen, slik at resultater er hentet ut ved disse plasseringene. Hver plassering får hver sin resultatfil. GloBouss er benyttet til å simulere bølgegenerering og bølgeutbredelse, mens MOST er benyttet til simulering av overtopping. Disse to modellene blir kjørt separert, hvor output fra GloBouss blir input i MOST.

For å klargjøre GloBouss for beregninger er det nødvendig med noe input. En oppsummering av dette er gitt i tabell 5. Først og fremst trengs det informasjon om det aktuelle magasinet topografi og batymetri. I dette prosjektet vil det si en scan av laboratoriemodellen. Denne scanningen ble gjennomført av NTNU med

laserscanneren TOPCON GLS-1000 og levert til NGI som ASCII-fil. Måleinstrumentene i laboriemodellen inkluderes i scannen for å vite nøyaktig hvor data fra den numeriske modellen skal hentes ut for sammenligning. En illustrasjon av scannen er vist i figur 15. Referansenivå for vannflaten er også nødvendig input, det vil si stille vannsdybden i modellen på 285 mm. Randbetingelsene i GloBouss må defineres. Alle sidekantene i modellen er definert som lukkede slik at bølgene reflekteres når de møter en kant framfor å bevege seg gjennom kantene. Selv om steinene i dalsiden oppstrøms skredutløpet har en dempende effekt på bølgene er den også definert som en reflekterende vegg, men steinene vises i scannen og gir derfor en viss dempende effekt i GloBouss også. Når det gjelder skredet, er det nødvendig å vite dets størrelse og form, avstanden fra nedre kant av skredet til vannflaten og horisontalhastigheten til skredet. Hastigheten blir målt for hvert forsøk i laboriet og leveres som excel-fil til NGI. Figur 16 viser et bilde fra oppsettet i GloBouss, med topografi og batymetri.

Tabell 5: Nødvendig input i GloBouss

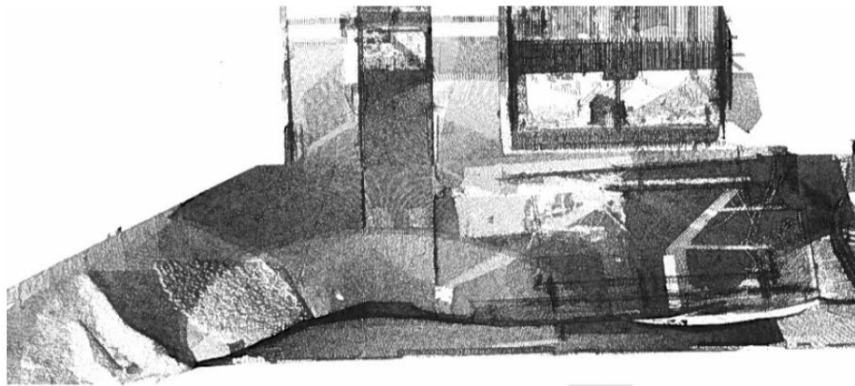
Nødvendig informasjon	Input for dette prosjektet
Topografi/batymetri	Laserscan av laboriemodell
Vanndybde	Målt i laboriemodell, 285mm
Randbetingelser	Lukkede, reflekterende sidekanter
Skredets hastighet	Horisontalhastigheten, fra resultater fra modellforsøk
Skredets geometri	Målt i laboriet, se tabell 4
Avstand skred-vannflate	Målt i laboriet, se tabell 4

En oppløsning på 50 mm er blitt brukt i prosjektet. Denne oppløsningen er valgt etter når modellen konvergerer, det vil si når en økning i oppløsning ikke lenger gir mer nøyaktige bergeneringer. Resultater fra konvergenstest er vis i avsnitt 5.2. Tidssteget for beregningene velges ut fra Courantallet, slik at instabiliteter unngås. Før beregningene startes må det også velges hva slags beregninger som skal gjennomføres, hvilke ligninger som skal benyttes. I dette prosjektet er det i hovedsak brukt ligninger som inkluderer dispersjon, og ikke ikke-linearitet, da dette viste seg å korrelere best med resultatene fra laboriet. GloBouss beregner overflateheving og vannbevegelsenes hastighet i to retninger, x og y. Til dette prosjektet er det kun sett på overflatehevingen.

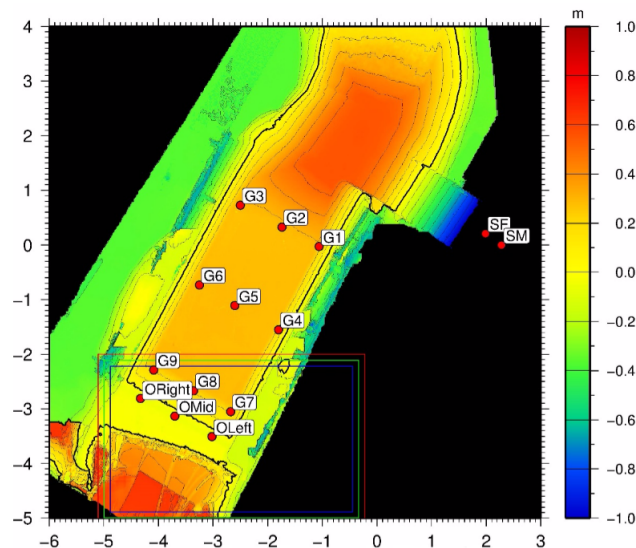
Når damgeometrien i GloBouss skal endres blir det mest nøyaktig å gjennomføre en ny scan av den fysiske modellen, men det er også mulig å endre dammens koordinater i dataene fra tidligere scan, manuelt. I dette prosjektet ble en fullstendig scanning av modellen gjort da dammen med helning 1:2 var montert og da den skråstilte dammen var montert. Dammen med helning 1:1,5 ble lagt inn i den numeriske modellen med scannen fra dam med helning 1:2 som grunnlag. Plasseringen til damkrona ble målt inn med målebånd og kunne, sammen med

helningen på dammen, legges inn i filen fra scanningen etter at den opprinnelig dammen var klippet ut.

Ved kjøring av MOST er det nødvendig med en inputfil med resultater fra GloBouss som inkluderer overflateheving og hastighet i x-og y-retning, og en fil med batymetri for hvert av de tre gitrene, A, B og C. I tillegg defineres det et tidssteg for beregningene og hvor ofte beregninger skal utføres for hvert gitter. I dette prosjektet er det valgt at gitter C beregnes for hvert tidssteg, $\Delta t = 0,05$ s, gitter B beregnes for hvert fjerde tidssteg og gitter A for hvert åttende. Det er valgt at resultater skrives til fil fra gitter C etter hvert åttende tidssteg, altså hvert 0,4 s.



Figur 15: Oversiktsbilde over den fysiske modellen generert fra scannede data



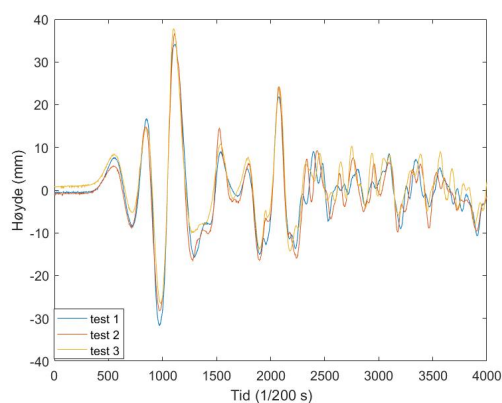
Figur 16: Måleinstrumentene i magasinet og over dam er merket. SF og SM betegner front og midt på skredet, 2 blokker ble brukt her. De tre rektanglene, rød, grønn og blå, viser de tre gitterne i MOST.

RESULTAT

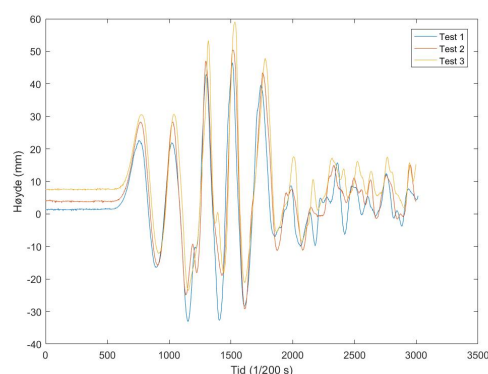
I dette kapittelet presenteres laboratorieforsøkernes repeterbarhet, resultater fra konvergenstest for GloBouss og resultater fra laboratorieforsøkene sammen med resultatene fra simuleringene. Navn på de ulike forsøksoppsettene er gitt i tabell 3.

5.1 DE FYSISKE FORSØKENES REPETERBARHET

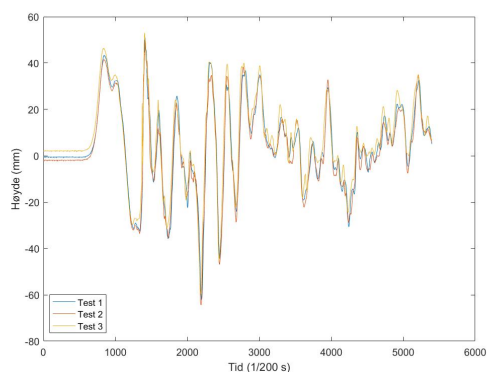
De tre gjentakelsene av hvert forsøk med oppsett B for en tilfeldig valgt sensor vises i figur 17. Høyden på overflatehevingen eller overtoppingen er gitt i mm på y-aksen og x-aksen viser målingene i tid, 200 målinger per sekund. Når de tre ulike kurvene i hvert plott er omtrent like er repeterbarheten god. Repeterbarheten for oppsett A og C vises i vedlegg D.



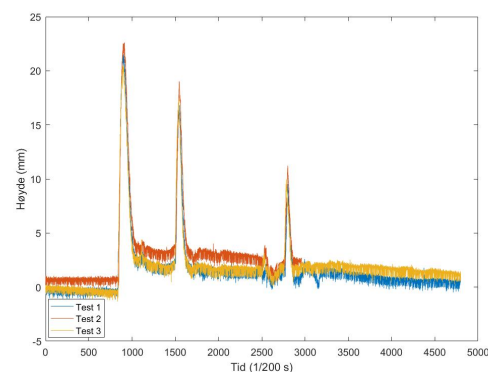
(a) Oppsett B1, sensor G4



(b) Oppsett B2, sensor G2



(c) Oppsett B3, sensor G7

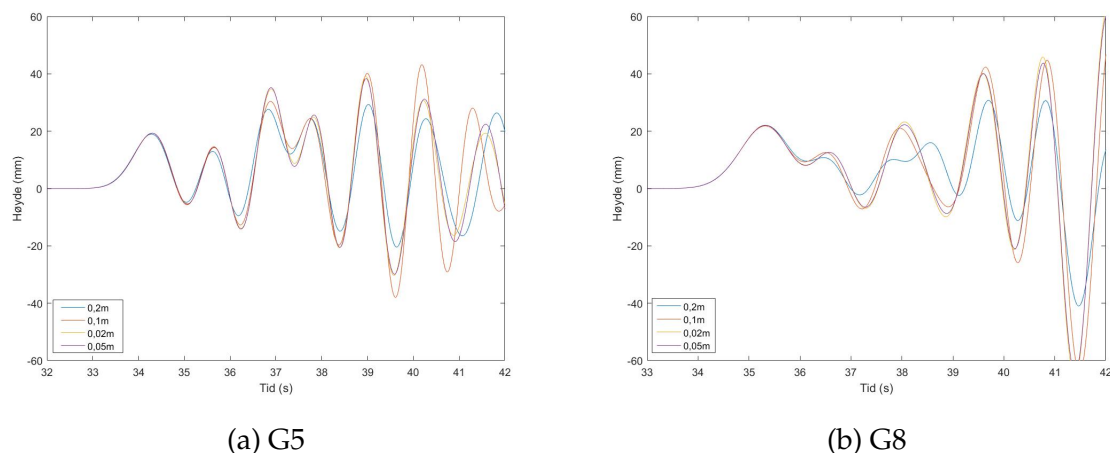


(d) Oppsett B4, sensor OMidt

Figur 17: Repeterbarhet for forsøk med oppsett B

5.2 KONVERGENSTEST FOR GLOBOUSS

Figur 18 viser overflatehevingen beregnet med GloBouss ved sensor G5 og G8 ved simulering med ulike oppløsninger fra 0,2 m til 0,02 m. Tabell 6 viser prosentvis forskjell i overflateheving mellom to oppløsninger for de fire første bølgetoppene. Det vises at forskjellen minker når oppløsningen økes og at forskjellen er svært liten når oppløsningen økes fra 0,05 m til 0,02 m, slik at nøyaktigheten på beregningene ikke øker nevneverdig når oppløsningen økes fra 0,05 m til 0,02 m.



Figur 18: Overflateheving ved sensor G5 og G8 for ulike oppløsninger

Tabell 6: Prosentvis forskjell i overflateheving når oppløsningen endres for sensor G5 og G8

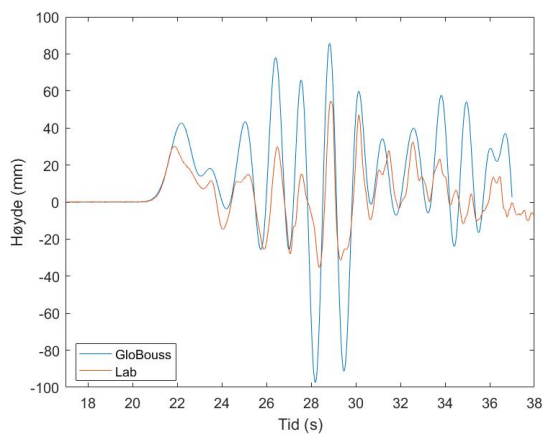
Sensor	Endring i oppløsning	Bølgetopp 1	Bølgetopp 2	Bølgetopp 3	Bølgetopp 4
G5	0.2m-0.1m	1.67	11.23	9.08	0.36
	0.1m-0.05m	0.06	1.38	13.56	4.89
	0.05m-0.02m	0.20	1.17	1.36	3.06
G8	0.2m-0.1m	1.03	14.07	51.86	62.22
	0.1m-0.05m	1.22	0.35	5.35	5.70
	0.05m-0.02m	0.07	0.11	4.25	0.29

5.3 RESULTATER FRA SIMULERINGER OG FYSISKE FORSØK

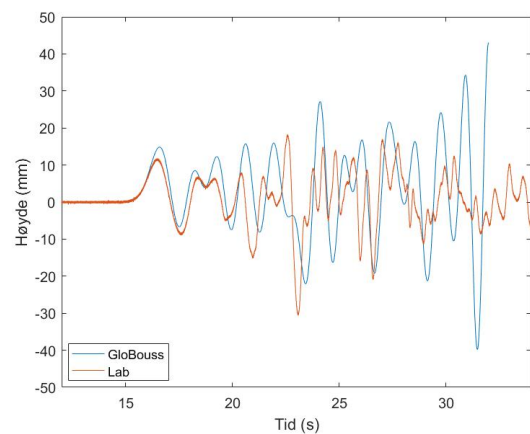
Alle resultatene fra hver sensor i laboriemodellen er plottet sammen med tilsvarende fra simuleringene. I det følgende er noen av disse figurene vist, figur 19, 20, 21, 22 og 23 for GloBouss og figur 24, 25, 26 og 27 for MOST. Resten av plottene er presentert i vedlegg C. I disse figurene er overflateheving og overtopping fra de fysiske forsøkene vist med rød farge og fra GloBouss og MOST med henholdsvis blå og grønn farge. Høyden på overflateheving og overtopping er vist i mm på y-aksen og tiden er vist på x-aksen i sekunder. I tillegg er det i tabell 7 og 8 vist hvor stor ulikheten mellom overflatehevingene i laborieforsøkene og i simuleringer er for

de ulike sensorene for første og andre bølgetopp. Verdiene i disse tabellene er gjennomsnittet av ulikhetene for de tre sensorene på samme rad, hvor avviket er gitt som absoluttverdien til forskjellen i overflatehevingen for GloBouss og fysiske forsøk.

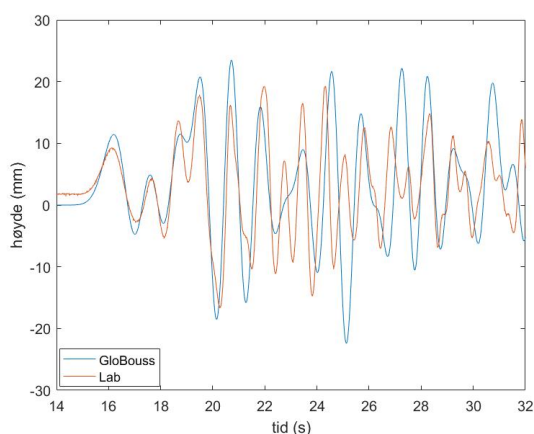
Forskjellen mellom største overtopping i laboratorieforsøk og i simuleringene er vist i tabell 9. Positive verdier i tabell 9 betyr at overtoppingen simulert med MOST er større enn i det fysiske forsøket, mens negative verdier tilsier at overtoppingen i det fysiske forsøket er størst. For alle forsøkene er det størst overtopping ved magasinets venstre side, slik at det er resultater fra sensoren OVenstre som blir presentert. I tabellen er også mengden vann som overtopper dammen notert. Denne mengden er vannet som overtopper dammen på venstre side for hele forsøket. Vannmengden måles kun etter hvert forsøk slik at vannmengden for hver enkelt overtopping ikke er kjent.



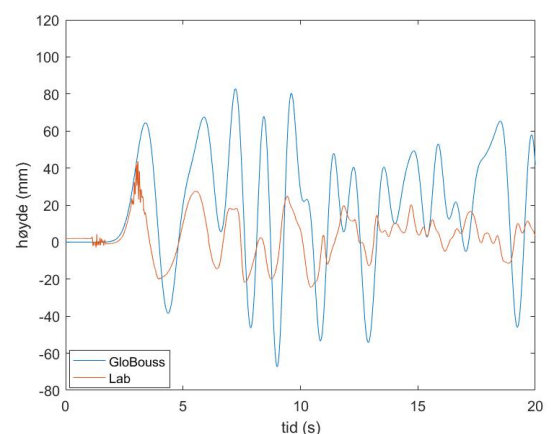
Figur 19: Oppsett C3, sensor G8



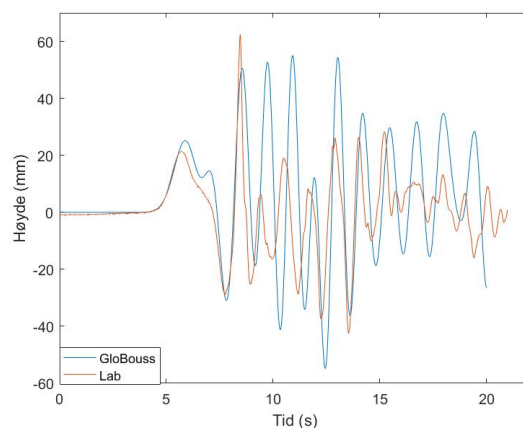
Figur 20: Oppsett C1, sensor G9



Figur 21: Oppsett A1, sensor G5



Figur 22: Oppsett A4, sensor G6



Figur 23: Oppsett B2, sensor G7

Tabell 7: Avvik i overflateheving mellom simuleringer og forsøk for første bølgetopp.

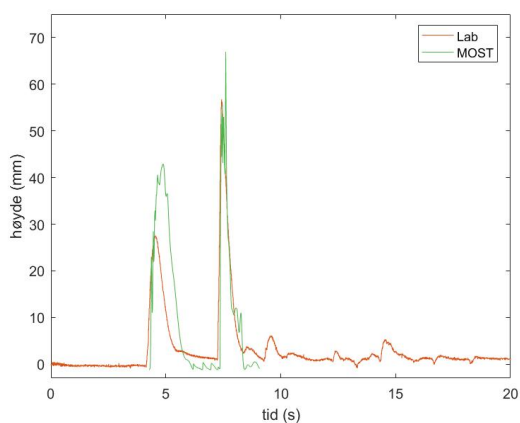
Forsøksoppsett	G1-G3 (%)	G4-G6 (%)	G7-G9 (%)
A1	29,4	33,1	32,4
A2	20,8	41,7	37,7
A3	23,2	35,1	37,3
A4	26,4	34,8	43,3
B1	38,1	37,8	39,5
B2	27,7	10,2	10,0
B3	18,5	13,0	6,5
B4	30,1	18,2	16,1
C1	19,2	20,8	26,7
C2	7,5	21,6	16,6
C3	12,5	13,8	23,7
C4	11,1	16,4	28,2

Avviket er gitt som gjennomsnitt av de tre sensorene på hver rekke og viser hvor stor forskjell det er mellom bølgetoppene i GloBouss og i laboratoriet.

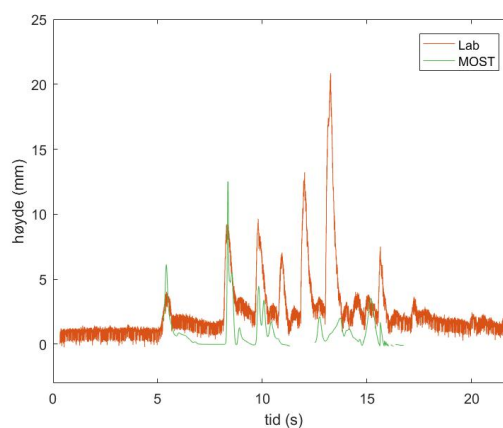
Tabell 8: Avvik i overflateheving mellom simuleringer og forsøk for andre bølgetopp.

Forsøksoppsett	G1-G3 (%)	G4-G6 (%)	G7-G9 (%)
A1	19,7	35,2	72,4
A2	14,1	25,5	25,3
A3	23,2	58,6	61,2
A4	49,6	137,9	59,2
B1	61,6	36,1	29,4
B2	39,4	18,4	40,7
B3	37,9	52,1	33,2
B4	44,9	34,3	42,2
C1	19,2	20,8	26,7
C2	9,2	21,6	16,6
C3	40,5	53,0	33,4
C4	25,2	26,2	44,1

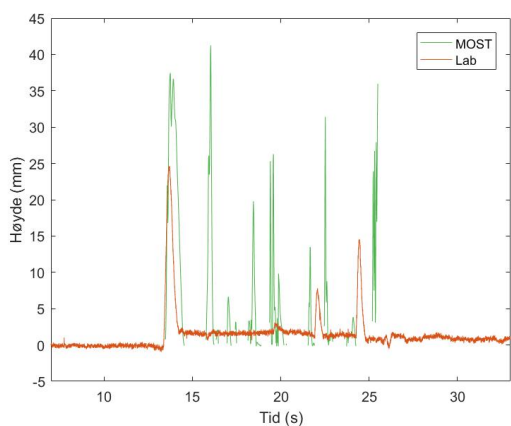
Avviket er gitt som gjennomsnitt av de tre sensorene på hver rekke og viser hvor stor forskjell det er mellom bølgetoppene i GloBouss og i laboratoriet.



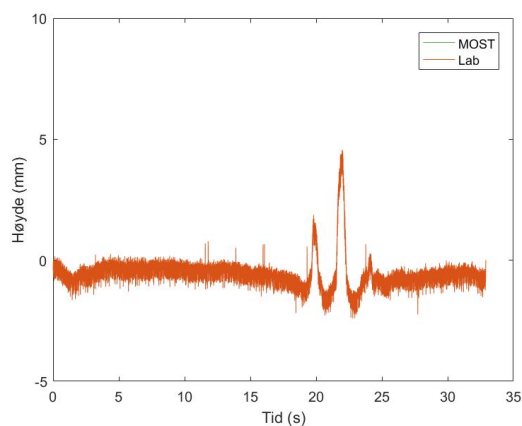
Figur 24: Oppsett A1, sensor OVenstre



Figur 25: Oppsett A2, sensor OMidt



Figur 26: Oppsett C4, sensor OMidt



Figur 27: Oppsett B1, sensor OHøyre

Tabell 9: Største overtopping for de ulike forsøksoppsettene.

Forsøksoppsett	Største overtopping			
	MOST (mm)	Lab (mm)	Avvik (%)	Vannmengde, lab (liter)
A1	19,6	12,3	37,2	1,7
A2	30,8	44,9	-45,8	Resultat mangler
A3	53,5	47,3	11,6	15,5
A4	67,0	56,7	15,4	16,8
B1	7,8	6,8	12,8	0,3
B2	26,0	46,0	-76,9	6,7
B3	60,9	54,9	9,9	11,8
B4	70,2	59,8	14,8	20,4
C1	9,1	4,8	47,3	0,5
C2	29,0	23,7	18,3	5,3
C3	49,2	37,8	23,2	12,3
C4	51,1	40,8	20,2	19,8

Avviket viser hvor mange prosent større overtoppingen er i MOST enn i laboratoriet.

DISKUSJON OG ANALYSE AV RESULTAT

For å kunne vurdere ulike sikringstiltak og beredskapsplaner for fyllingsdammer i Norge, er simulering av den største mulige overtoppingen av dammen som følge av skred i magasin, sentralt. En nødvendig del av å kunne forutsi størrelsen på denne overtoppingen er å vite hvordan bølgegenereringen og forplantningen foregår. Det er derfor viktig å ha et simuleringsverktøy som gjengir bølgebevegelsene etter et skred på en pålitelig måte. I dette kapitlet vil en sammenligning og vurdering av resultatene fra laboratoriet og GloBouss/MOST bli gjort med fokus på bølgebevegelsene og overtoppingen. I tillegg vil ulike feilkilder og skaleffekter bli drøftet.

6.1 SAMMENLIGNING AV RESULTATER

GloBouss

Det er i hovedsak to ting å observere ved sammenligning av resultatene fra laboratorieforsøk med simuleringer med GloBouss; hvor godt den numeriske modellen følger bevegelsene fra laboratorieforsøkene og hvor stort avvik det er i overflatehevingenes høyde. Ved å studere resultatene fra forsøkene ser man at bølgebevegelsene fra simuleringene følger bevegelsene fra de fysiske forsøkene godt. Dette vises godt i figur 19. Bølgetopper og bølgedaler inntreffer på samme tid. Dette gjelder spesielt for de første bølgetoppene. Etter de første bølgene vil det oppstå uroligheter i vannet på grunn av at de første bølgene reflekteres og forstyrrer bevegelsene til de neste og bevegelsene blir kaotiske og mer uforutsigbare, se figur 20. Når det gjelder overflatehevingene er disse så godt som alltid høyere i simuleringene enn i forsøkene, men det er stort sett god overensstemmelse mellom numerisk modell og laboratorieforsøk for de ledende bølgene. Lenger ute i tidsseriene blir avviket større, figur 20. I simuleringene forblir bølgene relativt høye, mens de dempes raskere i laboratoriemodellen og blir relativt små etter kort tid. Dette er fordi bølgene reflekteres og påvirker de påfølgende bølgene, men dette gjelder for både den numeriske og den fysiske modellen. Effektene av refleksjon kan likevel være større i laboratoriet enn i den numeriske modellen og være en årsak til at bølgene dempes raskere. Andre årsaker kan være skalaeffekter eller urenheter i vannet, drøftet i avsnitt 6.2.

Fra tabell 7 og 8 observeres det at det er et mindre avvik i overflatehevingen for sensorene nærmest skredet, G1-G3, mens avviket øker frem mot dammen, sensor G7-G9. Dette tyder på at simuleringene med GloBouss har en tendens til å bli mer unøyaktige lenger unna skredet. Det er ikke observert noen nevneverdige forskjeller i overensstemmelsene ved høyre og venstre side av magasinet, som indikerer at GloBouss fanger godt opp at bølgeforløpet er noe forskjellig på hver av sidene. Overflatehevingene er høyere på venstre side av magasinet enn høyre i den fysiske modellen, men dette gjenspeiles altså i GloBouss. Det er verdt å merke at når overflatehevingen er liten vil det prosentvise avviket mellom den numeriske og den fysiske modellen kunne få stort utslag, slik at tabell 7 og 8 bør sees sammen med plottene fra de aktuelle forsøkene i vedlegg C. Når det gjelder de ulike skredstørrelsene, ser det ut til at avviket i overflateheving mellom simuleringer og forsøk er mindre ved skred med 1 blokk enn ved flere, og det er størst avvik for 6 blokker. Dette kan observeres fra tabell 7 og 8 og ved å studere grafene fra bølgebevegelsene i avsnitt 5.3. For de ulike damgeometriene ser det ut til at resultatene samsvarer bedre for forsøkene med oppsett C enn med oppsett A, tabell 7 og 8. En av årsakene til dette kan være at i de første simuleringene med oppsett A ble helningen på skredrampen oppgitt til å være 46° framfor 40° som er den faktiske helningen. Dette vil påvirke resultatene fra GloBouss, men denne påvirkningen vil trolig være liten. For oppsett B ble ikke modellen scannet slik at plasseringen av dammen er upresis. Resten av modellen og plasseringen til måleutstyret er rett, da disse er det samme som for oppsett A. At modellen ikke ble scannet vil derofr ikke ha noen innvirkning på resultatene fra GloBouss i forhold til de fysiske forsøkene. Dette blir bekreftet av resultatgrafene, hvor de de samme observasjonene som for oppsett A og C gjelder for oppsett B.

Til tross for at det mest interessante med hensyn på damsikkerhet er hvor stor en eventuell overtopping av en dam blir er nøyaktigheten til GloBouss også viktig. Resultatene fra GloBouss er input i MOST som beregner overtoppingen, slik at nøyaktigheten til beregningene i MOST avhenger av nøyaktigheten på beregningene med GloBouss. Vurderingen av om GloBouss er et nøyaktig nok verktøy for simulering av skred i magasin må derfor sees i sammenheng med simuleringene med MOST.

MOST

Ved sammenligning av resultater fra sensorene over damkrona med simuleringer med MOST ser man at overtoppingen i laboratoriet og i MOST som oftest inntreffer på samme tid, figur 24. Overtoppingen er stort sett størst i MOST, men i noen tilfeller er det flere overskyllinger i laboratoriet, se figur 25. Det hender også at MOST har flere overtoppinger enn i laboratoriet, se figur 26. For alle oppsettene, A, B og C ser det ut til at overtoppingen er størst i MOST for forsøk med 1, 4 og 6 blokker, mens for forsøk med 2 skredblokker er overtoppingen i laboratoriet større enn i MOST.

For å vite hvor mye dammen vil bli overtoppet er det mest relevant å se på den største overtoppingen for hvert forsøk. Dette er listet opp i tabell 9, sammen med forskjellen

mellom laboratorieforsøkene og MOST. Det observeres at det varierer hvor godt laboratorieforsøkene og MOST stemmer overens, fra et avvik på 9,9 % til 76,9 %. Begge disse ytterpunktene er for oppsett B, hvor modellen ikke ble scannet og plasseringen til dammen derfor er upresis. Resultatene er derfor mer usikre enn resultatene fra forsøk med oppsett A og C. For oppsett A og C varierer avviket mellom MOST og fysiske forsøk fra 15,4 % til 47,3 %. Dette avviket er akseptabelt når resultatene fra MOST er større enn resultatene fra laboratoriet. På den måten er den numeriske modellen konservativ i forhold til laboratoriet. Dette gjelder for de aller fleste forsøkene, men for ett av forsøkene, A2, ligger overtoppingen i laboratoriet hele 45,8 % over MOST og enda større avvik er det for forsøk B2, hvor overtoppingen i laboratoriet er 76,9 % større enn med MOST. Dersom MOST hadde anslått en overtopping som er så mye mindre enn en overtopping i virkeligheten ville dette kunne fått store konsekvenser. Det er ønskelig at MOST anslår overtoppingen konservativt, for å være på den sikre siden, men likevel ikke så konservativt at det fører til unødvendig omfang på eventuelle sikringstiltak og beredskapsplaner.

Den største overtoppingen er stort sett den første overtoppingen for forsøk med 1 og 2 blokker, mens for 4 og 6 blokker er det den andre overtoppingen som er størst. Dette betyr at det er de første bølgetoppene som bidrar til overtoppingen. Resultatene fra GloBouss viser at avviket i overflateheving mellom fysiske forsøk og simuleringene er større lenger ut i serien, men denne usikkerheten vil altså ikke påvirke den største overtoppingen. For 4 og 6 blokker overtoppes hele damaksen ved den første overtoppingen, mens den andre overtoppingen, som blir den høyeste, er størst på venstre side av dammen. På midten av dammen og på høyre side er det mindre eller ingen overtopping. Dette gjelder for alle oppsettene, A, B og C, og betyr at det kan gå mer vann over dammen ved den første overtoppingen selv om den andre overtoppingen gir høyest høyde over damkrona, men ved å studere høyden på overtoppingene for første og andre overtopping kan det antas at den andre overtoppingen likevel vil gi størst vannvolum.

6.2 USIKKERHETER VED FYSISK MODELL OG GLOBOUSS/MOST

Usikkerheter knyttet til laboratorieforsøkene innebærer ulike feilkilder i modellen, skalaeffekter og måleinstrumentenes nøyaktighet, nevnt i avsnitt 4.1.2. For den numeriske modellen er det også enkelte feilkilder.

6.2.1 Feilkilder

I modellforsøk vil det alltid være enkelte ting som forstyrrer nøyaktigheten av resultatene. Mulige kilder til forstyrrelser i de fysiske forsøkene i dette prosjektet er:

- Bevegelse på modellen under forsøk eller bevegelse i vannet i magasinet før start forsøk.
- Urent vann, partikler i vannet.
- Lekkasje innunder og på sidene av dammen og gjennom modellen generelt.
- Noe ulikt vannivå ved hvert forsøk.
- Dam ikke tilstrekkelig festet for oppsett B.

Bevegelse i modellen under forsøkene på grunn av at personer går på modellen eller lignende, gjør at målingene ikke blir "jevne", men får noen forstyrrelser. Disse forstyrrelsene ser imidlertid ikke ut til å påvirke resultatene nevneverdig, da de blir så små at de ikke er synlig når en plotter resultatene som i avsnitt 5.3. Urent vann og partikler i vannet kan påvirke resultatene på samme måte som bevegelse på modellen under forsøkene. Resultatene kan bli noe ujevne og enkelte steder gjøre synlige utslag på resultatene. Likevel er ikke dette en betydelig usikkerhet da dette lett kan observeres og vannets bevegelse og heving fortsatt kommer godt nok fram ved plotting av resultatene. På den første bølgetoppen og rett før den første bølgetoppen i figur 22 er grafen taggete og mer ujevn enn slik vann beveger seg. Dette tyder på at noe i vannet, for eksempel en liten isoporbit som ble observert i vannet under enkelte av forsøkene har kommet nær sensoren og forstyrret målingene rett før bølgebevegelsene og ved den første bølgetoppen. Etter den første toppen har denne biten trolig blitt med bølgene vekk fra sensoren. Lekkasjen i modellen blir sett på som liten, da det er kort tid fra magasinet fylles til ønsket vannivå til et forsøk kjøres. Denne usikkerheten antas derfor å være neglisjerbar. Mellom hvert forsøk etterfylles magasinet slik at vannivået hele tiden skal være det samme. Det fylles opp til vannivået når et valgt punkt på modellen slik at vanddybden blir 285 mm. Det er likevel sannsynlig at vannivået blir noe ulikt fra gang til gang fordi det er vanskelig å få nøyaktig det samme vannnivået hver gang. Dette påvirker resultatene når de sammenlignes med den numeriske modellen. I den numeriske modellen er vannivået alltid nøyaktig 285 mm, slik at dette vil være nullpunktet bølgene beveger seg om. Dette nullnivået blir noe forskjellig i laboratoriemodellen fordi vannivået avviker noe fra 285 mm. I tillegg blir sensorene kun kalibrert før første forsøk for dagen, ikke før hvert enkelt forsøk. Dette kan føre til unøyaktigheter i korrigeringsfaktoren til resultatene. Dette utgjør altså en feilkilde for resultatenes nullnivå, men har nok lite å si for selve bølgebevegelsene. Forskjellen i nullnivå mellom laboratorieforsøk og simuleringer kan korrigeres ved at resultatene fra laboratorieforsøkene justeres ned eller opp slik at de starter på samme nivå som simuleringene. Et eksempel på ulikt nullnivå i laboratoriet og numerisk modell er vist i figur 21, hvor målingene i laboratoriet starter nesten 2 mm over simuleringene med GloBouss. En siste feilkilde i den fysiske modellen er at det for oppsett B er observert i filmene fra forsøkene at dammen beveger seg når bølgene slår mot den. Dette tyder på at dammen ikke er godt nok festet. Disse bevegelsene gjør utslag på sensorene over dammen slik at det ser ut som om overtoppingen er større enn den faktisk er. Dette gjelder spesielt for forsøk B1 og B2 og vises godt i figur 27 hvor det er målt en overtopping, men i filmen fra forsøket går det ikke vann over damkrona.

For den numeriske modellen vil eventuelle feil være knyttet til inndata. Dersom opplysningene som mates inn i en numerisk modell er upresise, vil resultatene være tilsvarende upresise. Det er tre slike usikkerheter i dette prosjektet. For det første ble det brukt en helning på 46° på skredrampen i stedet for 40° , som er det korrekte, for noen av simuleringene med oppsett A. For det andre kunne det være vanskelig å se den nøyaktige plasseringen til bølgesensorene i scannen, slik at disse plasseringene kan avvike noe fra plasseringene i laboratoriet. Begge disse usikkerhetene har trolig liten innvirkning på resultatene. Den tredje usikkerheten knyttet til inndata i

GloBouss/MOST er plasseringen til dammen med helning 1:1,5 som ikke ble scannet. Posisjonen til damkrona var noe høyere enn dammen med helning 1:2. Z-koordinaten ble justert med 200 mm, mens x- og y-koordinatene ble beholdt. Denne innmålingen er mer unøyaktig enn ved en scanning av plasseringen, slik at resultatene fra disse simuleringene ikke blir helt rett. Det er resultatene fra MOST som vil bli påvirket av dette. Resultatene fra MOST med oppsett B har derfor en begrenset gyldighet i forhold til resultatene med oppsett A og C.

En begrensning i GloBouss er at 3D-effekter ikke blir tatt hensyn til. Det vil si at dersom en bølge bryter slik at en posisjon i planet (x- og y-koordinat) får to verdier i z-retning, vil ikke GloBouss kunne simulere dette. Ved generering av bølgene, når skredet treffer vannet kan det oppstå slike tilfeller. Det blir et plask som GloBouss ikke får med seg i simuleringene og kan påvirke resultatene videre. Andre mulige feilkilder kan være ulikhet mellom den fysiske og den numeriske modellen i oppskyllingen på motsatt side av skredrampen. I laboriemodellen er denne veggen skrå, mens i GloBouss er den rett. Dette har trolig lite å si for de videre resultatene fordi bølgene er lange og helningen på veggen har dermed liten innvirkning på hva som skjer når bølgen møter veggen. Det ble også oppdaget, ved å studere filmene fra forsøkene at noen av skredene får en liten rotasjon i retning mot dammen etter at skredet har truffet vannflaten. I GloBouss beveger skredet seg i en rett bane. Dette kan derfor føre til ulikheter i resultatene fra GloBouss og laboriemodellen.

6.2.2 Skalaeffekter

Gjennom modellen vil de ulike prosessene generering av bølger, propagering og oppskylling/overtopping kunne medføre ulike problemer med tanke på skalaeffekter. Skalaeffektene vil være knyttet til elastisitet, viskositet og/eller overflatespenning. Viskositeten vil være høyere i en modell enn i prototypen og forårsaker at bølgene dempes raskere i modellen (Heller 2007). I følge Heller 2007 vil effekten av ulik viskositet kunne neglisjeres ved Reynoldstall i modellen $Re \geq 300000$. Reynoldstallet kan ha vært lavere enn dette i forsøkene og medfører, i så fall, en klar demping av bølgene. Dette kan derfor være en årsak til at bølgene i den numeriske modellen er større enn i laboriemodellen. Når det gjelder overflatespenning er luftbobler i vannet sentralt. Luftbobler blir relativt større i en modell enn i prototypen, slik at de vil utgjøre en økning i effekten av overflatespenning (Heller 2007). I dette prosjektet kan bobler blandes inn i vannet i området hvor skredet treffer vannet og bølgene genereres. Luftbobler kan også dannes ved bølgebrytning, men dette er ikke like relevant i dette prosjektet. Overflatespenningen vil påvirke bølgenes forplantningshastighet og vil ha størst effekt på korte bølger med lav hastighet. I forsøkene i dette prosjektet er bølgene lange, slik at effekten av ulik overflatespenning i modell og prototype vil mest sannsynlig være neglisjerbar, i tillegg til at det trolig vil være meget lite bobler innblandet i vannet. Overflatespenning har også størst effekt ved svært små dybder, ikke så store dybder som i modellen i dette prosjektet.

6.3 GLOBOUSS/MOST OG FYSISKE FORSØK I FORHOLD TIL PROTOTYPE

I dette prosjektet blir simuleringer sammenlignet med laboratorieforsøk, men i realiteten er det ønskelig å vite om simuleringene samsvarer med en prototype. Når det er avvik mellom forsøk og simuleringer er det derfor viktig å reflektere over om det er forsøkene eller simuleringene som vil gjengi virkeligheten best mulig. En modell vil alltid inneholde skalaeffekter, slik at den alltid vil avvike noe fra en prototype. Hvor mye modell og prototype avviker fra hverandre avhenger av hvor stor innvirkningen av skalaeffekter og andre usikkerheter er. Disse kan ha en betydelig effekt, men kan også være neglisjerbare. Én feilkilde mellom den fysiske modellen i dette prosjektet og et naturlig magasin er at her benyttes et rektangulært magasin med helt jevne sidekanter. Dette er ulikt et naturlig magasin som har kurver og buktninger som gir en dempning av bølgene. Om denne dempningen vil bli større enn dempningen i laboratoriet kommer an på hvor stor innvirkning andre feilkilder og skalaeffekter har, men i forhold til en numerisk modell vil et naturlig magasin gi større dempning av bølgene. Et naturlig magasin vil være mer komplekst og uforutsigbart enn en idealisert numerisk modell.

Gjennom dette studiet og tidligere studier gjennomført av NGI, hvor virkelige skred i vann er blitt etterregnet med GloBouss/MOST, viser GloBouss/MOST seg som en god numerisk modell for simulering av bølgegenerering, bølgepropagering og oppskylling/overtopping. Det er enkelte usikkerheter og begrensninger ved modellen, men disse vil ikke være så store at det påvirker resultatene nevneverdig i forhold til usikkerheten som er knyttet til informasjon om skredforløpet. Nødvendig input til GloBouss er informasjon om skredets størrelse, form og hastighet. Dette er vanskelig å estimere og vil være en større kilde til usikkerhet enn forhold i modellen. Et eksempel på hvor stor usikkerhet det er knyttet til informasjonen om skredforløpet er skredet i Vajont, beskrevet i avsnitt 2.1. Hastigheten på skredet ble antatt å være 15 s tregere enn den faktiske hastigheten og bølgeoppstylingen ble dermed voldsomt underestimert. GloBouss/MOST viser seg altså som et robust og effektivt verktøy med tilstrekkelig nøyaktighet for simulering av skredgenererte flodbølger.

KONKLUSJONER OG VIDERE ARBEID

7.1 KONKLUSJONER

En numerisk modell som verktøy for simulering av skredgenererte bølger og overtopping er svært nyttig i arbeidet med å minimere konsekvensene av hendelser med skred i magasin. En velfungerende numerisk modell vil kunne gi et estimat på hvor store bølger og overtoppinger som kan ventes på en effektiv måte uten tidkrevende og omfattede modellforsøk i laboratorier. Gjennom dette prosjektet viser NGIs numeriske modell GloBouss/MOST seg å følge bølgebevegelsene og overtoppingen i laboratorieforsøkene på en tilfredstillende god måte og er derfor et godt verktøy ved simulering av største overtopping som følge av skred i magasin.

Hovedkonklusjonene fra dette prosjektet er som følger:

- Det er generelt godt samsvar mellom GloBouss/MOST og laboratorieforsøk, også når damgeometri og skredstørrelse endres.
- GloBouss og MOST gir i hovedsak overflatehevinger og overtoppinger som er større enn i forsøkene i laboratoriet, hvor overtoppingene er mellom 15,7 % og 47,3 % større i MOST enn i laboratoriet.
- Bølgene blir raskere dempet i den fysiske modellen enn i GloBouss, men dette påvirker beregningen av største overtopping i MOST lite.
- GloBouss/MOST viser tilstrekkelig nøyaktighet i forhold til den store usikkerheten som ligger i å forutsi størrelse, form og hastighet på potensielt skred.

7.2 ANBEFALT VIDERE ARBEID

Kvaliteten og nøyaktigheten til GloBouss/MOST er nå relativt godt dokumentert, men dersom videre arbeid med den numeriske modellen skal gjennomføres anbefales det å gjennomføre sammenligninger mellom fysiske forsøk og simuleringer for andre damgeometrier enn i dette prosjektet. Dette kan for eksempel være for krummet dam eller nye simuleringer med dam med helning 1:1,5 med den eksakte plasseringen til dammen. Når det gjelder videre arbeid med skredutsatte fyllingsdammer er det interessant å studere nærmere hvordan overtopping påvirker selve fyllingsdammen. Her bør fokuset være på hvordan plastringen påvirkes og hvor godt dammen tåler en overtopping. Hvilke sikringstiltak som er mest effektive bør det også arbeides videre

med selv om dette til en viss grad er studert tidligere. I tillegg er det aktuelt å arbeide spesifikt med hver enkelt fyllingsdam i Norge som potensielt vil være utsatt for skred etter NGUs kartlegging. Det vil da være aktuelt å beregne største mulige overtopping og se på måter for å minimere skadeomfanget og eventuelt utarbeide retningslinjer for skredutsatte fyllingsdammer.

REFERANSER

- Aberle, Jochen (2015). «Physical Hydraulic Modelling». Forelesningsnotat, Vassdragsteknikk VK. NTNU.
- Applied Fluids Engineering (2009). *Geowave 1.1 Tutorial*.
- Bargel, Terje H. (2006). «Skredkartlegging i Norge». I: Trondheim: Norges geologiske undersøkelse, cop. 2006.
- Bolzoni, Matteo (2015). «Physical model study on impacts of landslide generated wave action on embankment dams». Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk. NTNU.
- Bryhni, Inge (2015). *Loenulykkene. Store Norske Leksikon*. URL: <https://snl.no/Loenulykkene> (sjekket 31.01.2016).
- Clawpack (2015). *ClawPack*. URL: <http://www.clawpack.org/> (sjekket 19.05.2016).
- Cornell University (2016). *COMCOT*. URL: http://ceeserver.cee.cornell.edu/pll-group/comcot%7B%5C_%7Dbg.htm (sjekket 02.05.2016).
- Dawson, Clint og Christopher M. Mirabito (2008). «The Shallow Water Equations». Presentasjon. University of Texas.
- Drange, Helge (2014). «Kort introduksjon til bølger i hav og atmosfære». Forelesningsnotat. Universitet i Bergen. URL: http://folk.uib.no/ngfhd/Teaching/Div/geof110%7B%5C_%7Dboelger%7B%5C_%7Dv2014.pdf.
- Glimsdal, Sylfest og Carl B. Harbitz (2006). *ICG P10 2006 - Tsunami modelling and prediction*. Tekn. rapp.
- Harbitz, Carl B., Geir K. Pedersen og Bjørn Gjevik (1993). «Numerical simulations of large water waves due to landslides». I: *Journal of Hydraulic Engineering* 119.12, s. 1325–1342.
- Heller, Valentin (2007). *Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics*.
- (2011). «Scale effects in physical hydraulic engineering models». I: *Journal of Hydraulic Research* 49, s. 293–306.
- Heller, Valentin, Mark Bruggemann, Johannes Spinneken og Benedict D. Rogers (2016). «Composite modelling of subaerial landslide – tsunamis in different water body geometries and novel insight into slide and wave kinematics». I: *Coastal Engineering* 109, s. 20–41. ISSN: 0378-3839. DOI:

- 10.1016/j.coastaleng.2015.12.004. URL:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.12.004>.
- Heller, Valentin og Willi H. Hager (2011). «Wave types of landslide generated impulse waves». I: *Ocean Engineering* 38.
- Heller, Valentin, Willi H. Hager og Hans E. Minor (2009). «Landslide generated impulse waves in reservoirs: Basics and computation». I: *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich* 211, s. 1–172. ISSN: 03740056.
- Heller, Valentin og Johannes Spinneken (2013). «Improved landslide-tsunami prediction : Effects of block model parameters and slide model». I: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 188.November 2012, s. 1489–1507. DOI:
 10.1002/jgrc.20099.
- (2015). «On the effect of the water body geometry on landslide – tsunamis : Physical insight from laboratory tests and 2D to 3D wave parameter transformation». I: *Coastal Engineering* 104, s. 113–134. ISSN: 0378-3839. DOI:
 10.1016/j.coastaleng.2015.06.006. URL:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.06.006>.
- Huang, Bolin, Yueping Yin, Guangning Liu, Shichang Wang, Xiaoting Chen og Zhitao Huo (2012). «Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, three Gorges reservoir, on November 23, 2008». I: *Journal of the International Consortium on Landslides* 9.3, s. 395–405.
- Høeg, Kaare, Karstein Lied, Kjell Karlsrud, Tim Gregory og Norges Geotekniske Institutt (2014). *Skred : skredfare og sikringstiltak : praktiske erfaringer og teoretiske prinsipper*. Oslo: NGI Universitetsforl.
- Johnson, R.S. (1997). *A modern Introduction to the Mathematical Theory of Water Waves*. Cambridge University Press.
- Kirby, James T, Ge Wei, Qin Chen, Andrew B Kennedy og Robert A Dalrymple (1998). *Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User ' s Manual*.
- Løvholt, Finn, Geir K. Pedersen og Sylfest Glimsdal (2010). «Coupling of Dispersive Tsunami Propagation and Shallow Water Coastal Response». I: *The Open Oceanography Journal* 4, s. 71–82.
- Microsonic (2015). *mic+ ultrasonic sensors*. URL:
<http://www.microsonic.de/en/distance-sensors/cylindrical/micplus/standard-sensors/standard-sensors/micplus35iutc.htm> (sjekket 18.05.2016).
- Ormestad, Helmut og Øyvind Grøn (2015). *Hydromekanikk. Store Norske Leksikon*. URL:
<https://snl.no/hydrodynamikk> (sjekket 01.03.2016).
- Pedersen, Geir K. (2008). «Modeling Runup with Depth Integrated Equation Models». I: *Advanced Numerical Models For Simulating Tsunami Waves And Runup*. Red. av

- Philip L.-F. Liu, Harry Yeh og Costas Synolakis. Singapore: World Scientific, s. 3–41.
- Pedersen, Geir K., Bjørn Gjevik og Karsten Trulsen (2005). «Forelesninger i bølgeteori». Kompendium. Universitetet i Oslo.
- Pedersen, Geir K. og Finn Løvholt (2008). «Documentation of a global Boussinesq solver». I: *Mechanics and Applied Mathematics 1*.
- Peregrine, D. H. (1972). «Equations for water waves and the approximation behind them». I: *Waves on beaches*. Red. av R. E. Meyer. Academic Press, s. 357–412.
- Romstad, B., Carl B. Harbitz og U. Domaas (2009). «A GIS method for assessment of rock slide tsunami hazard in all Norwegian lakes and reservoirs». I: *Natural Hazards and Earth System Science*.
- Svendsby, Joakim Nordberg (2014). «Skred i magasin». Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk. NTNU.
- Vikan, Anders Welde (2009). «Numerisk modellering av dam- spredning , varmeoverføring og brann i flytende naturgass (LNG)». Masteroppgave i energi og miljø. NTNU.

VEDLEGG

Vedlegg A: Skisse av modellen

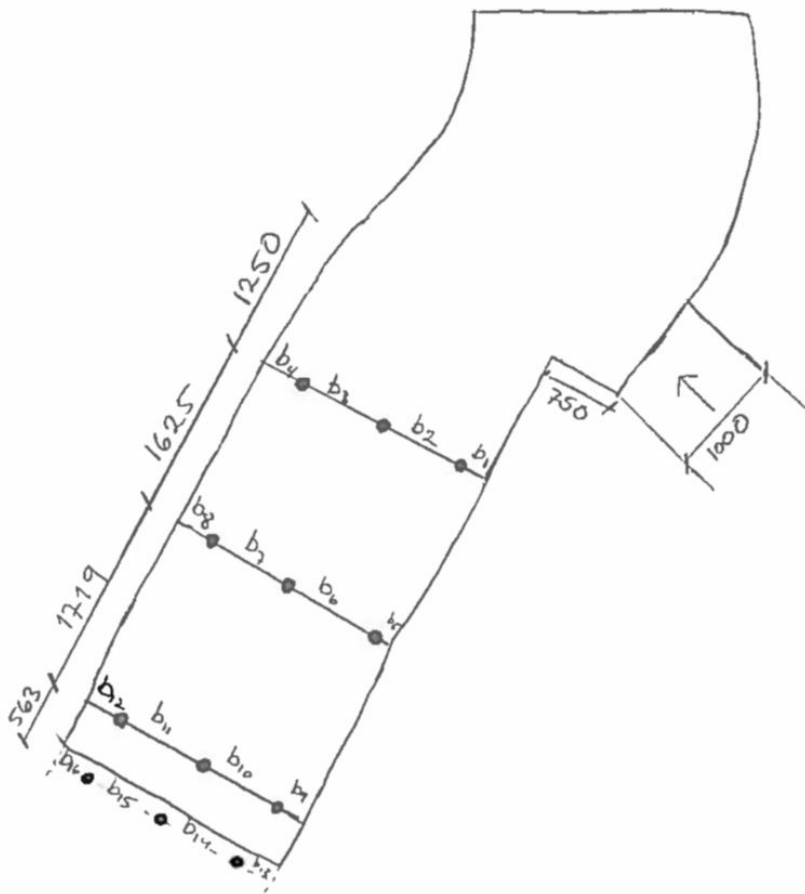
Vedlegg B: Bilder fra forsøk

Vedlegg C: Resultater fra GloBouss/MOST og fysiske forsøk

Vedlegg D: Repeterbarhet for oppsett A og C

VEDLEGG A: SKISSE AV MODELLEN

Under vises en skisse av modellen i planet med mål. Alle mål er oppgitt i mm og er fra oppsettet med dam med helning 1:2 og 1:1,5.



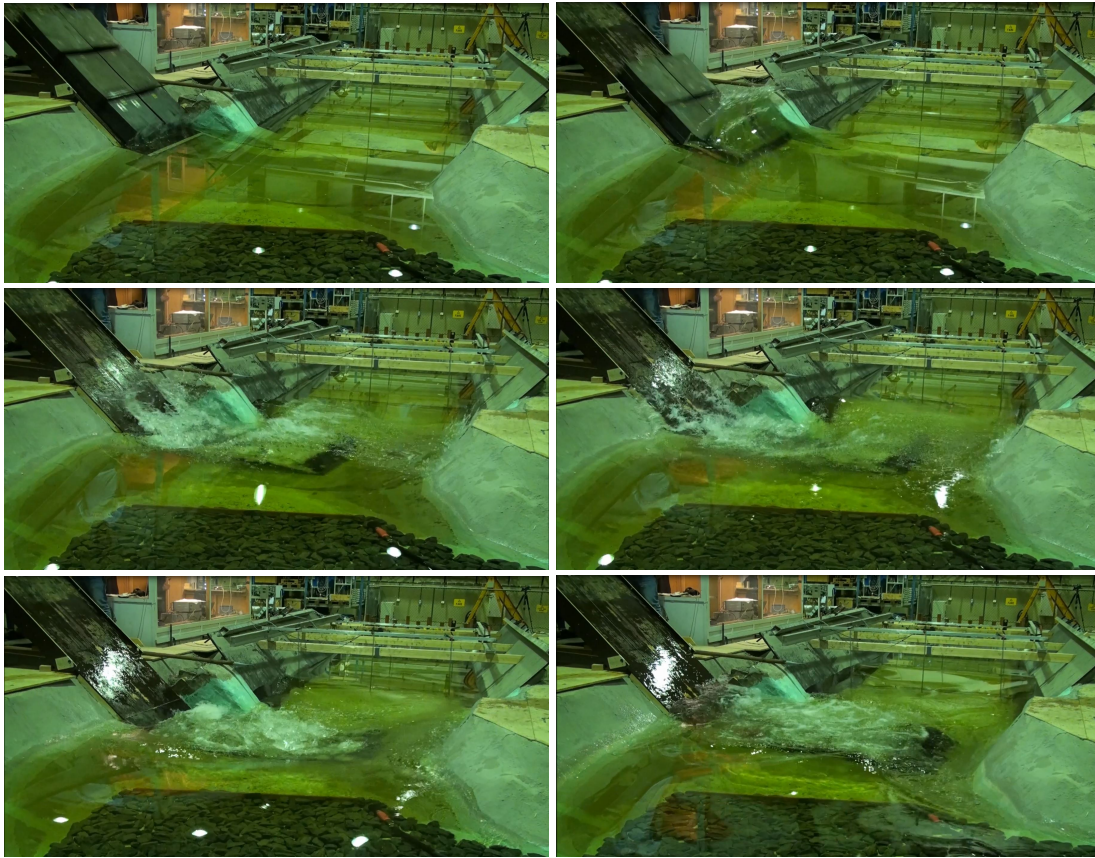
Tabell A1: Mål i skisse

Navn i figur	Lengde (mm)
b1	188
b2	750
b3	875
b4	313
b5	125
b6	875
b7	750
b8	375
b9	250
b10	750
b11	813
b12	375
b13	313
b14	781
b15	688
b16	375

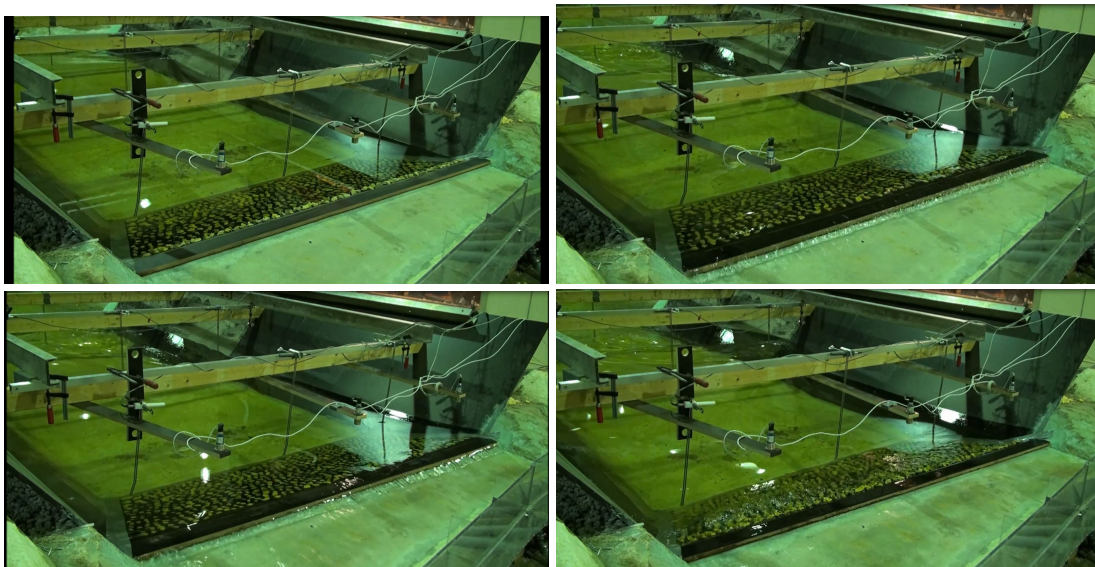
Figur A1: Skisse av modell

VEDLEGG B: BILDER FRA FORSØK

Bildene er klippet ut fra film fra forsøk med oppsett A4 og viser de første sekundene av forsøket.



Figur B1: Bildeserie fra oppstrøms side ved generering av bølgene

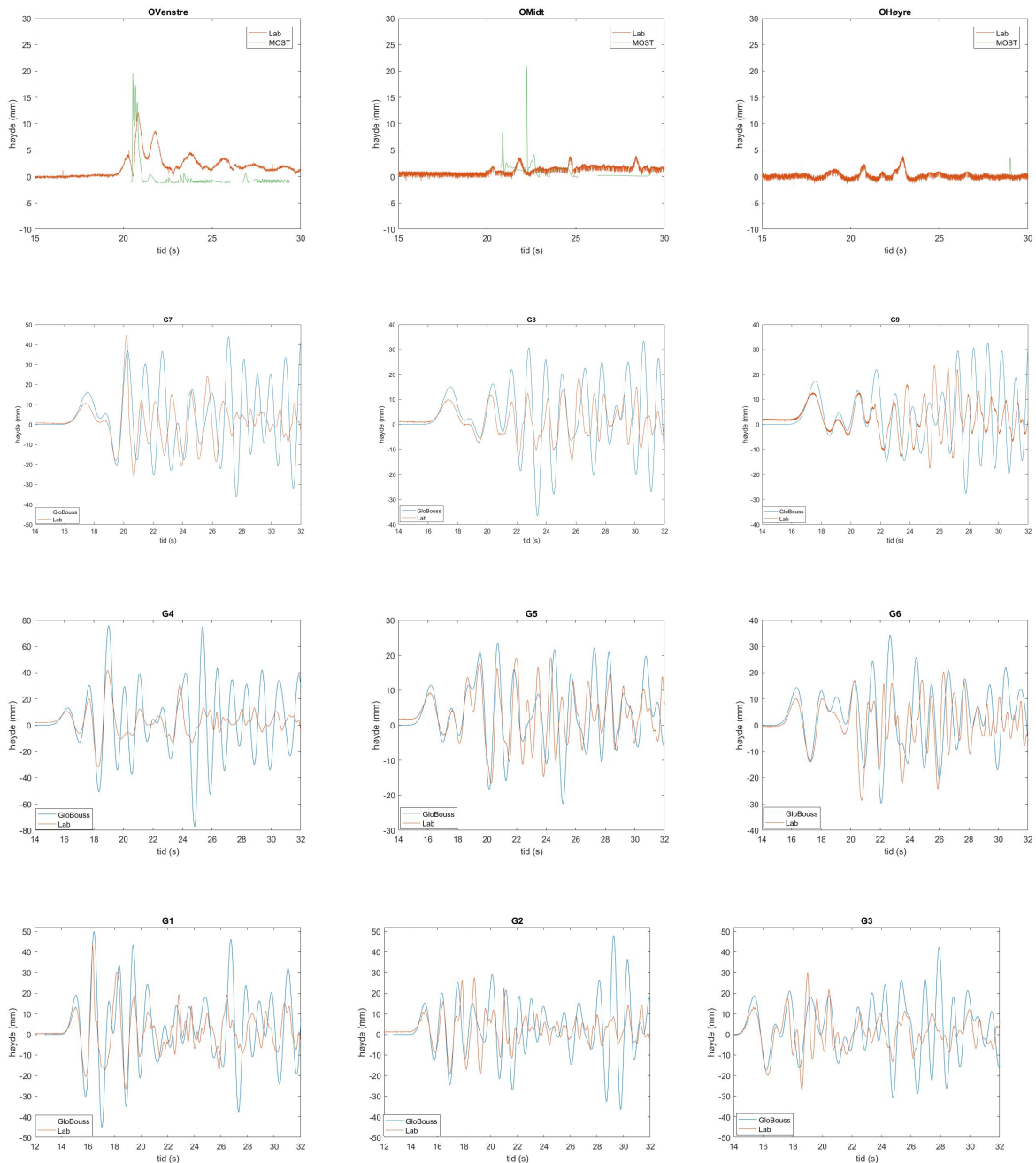


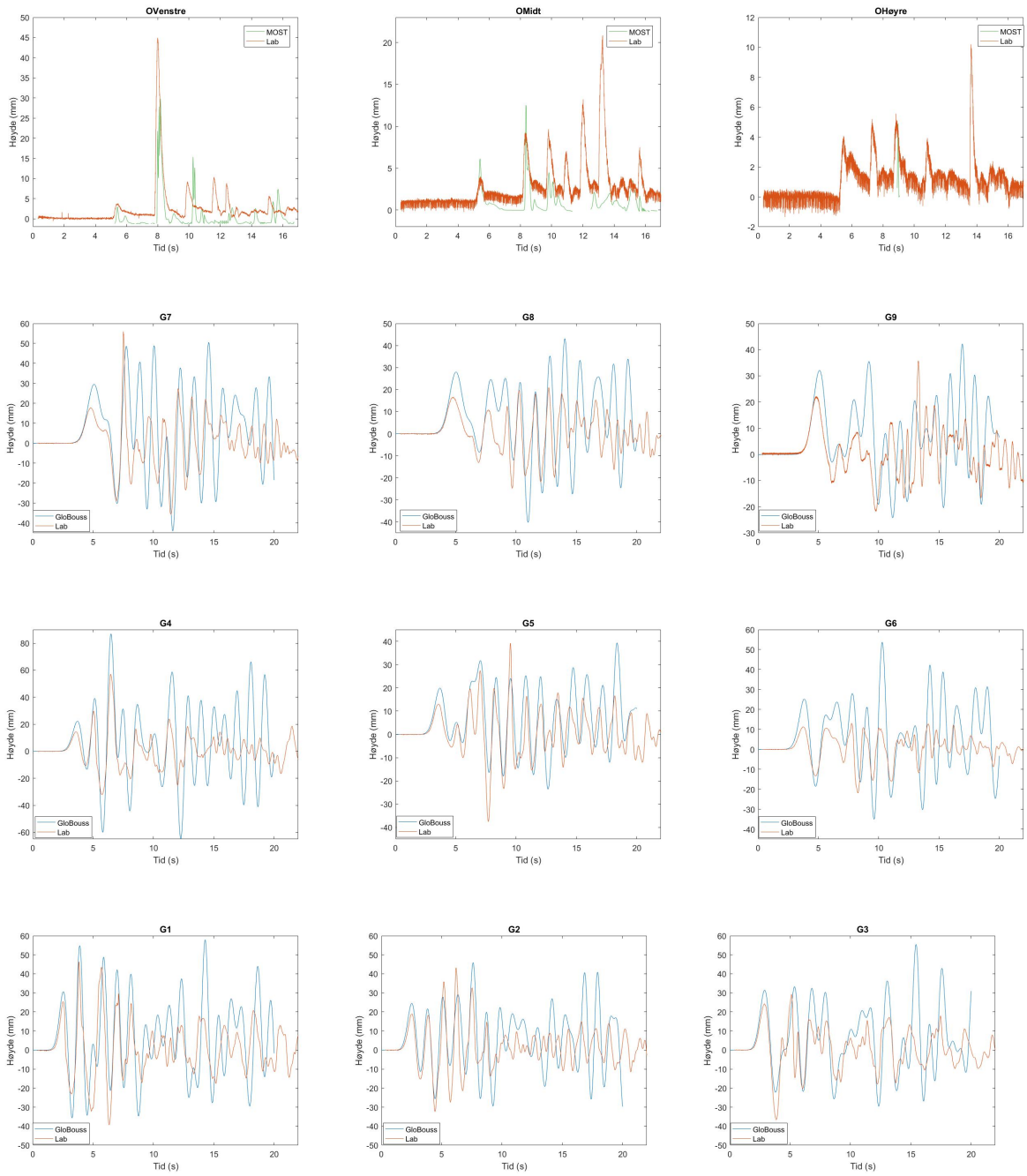
Figur B2: Bildeserie fra nedstrøms side ved overtopping av dam

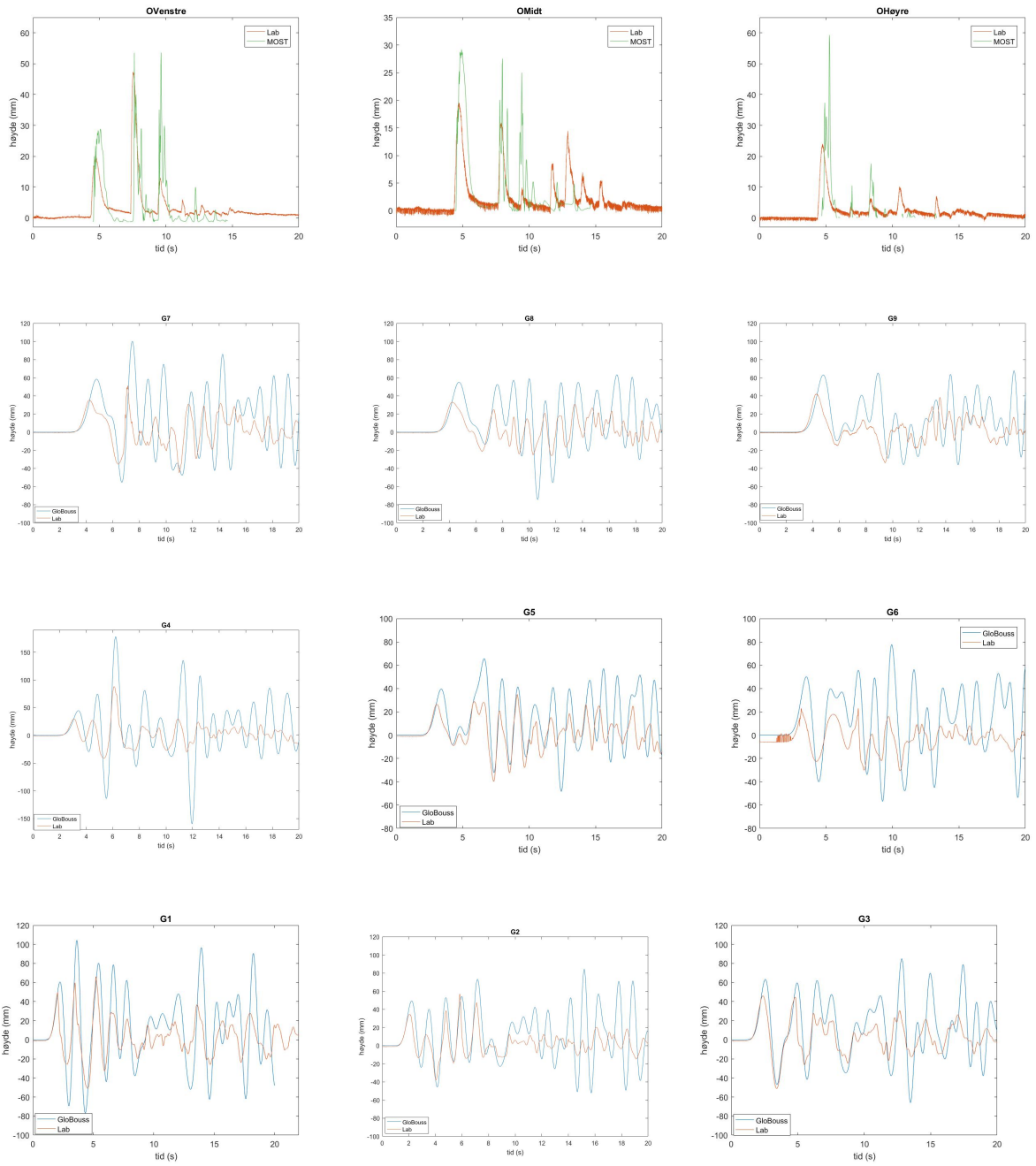
VEDLEGG C: RESULTATER FRA GLOBOUSS/MOST OG FYSISKE FORSØK

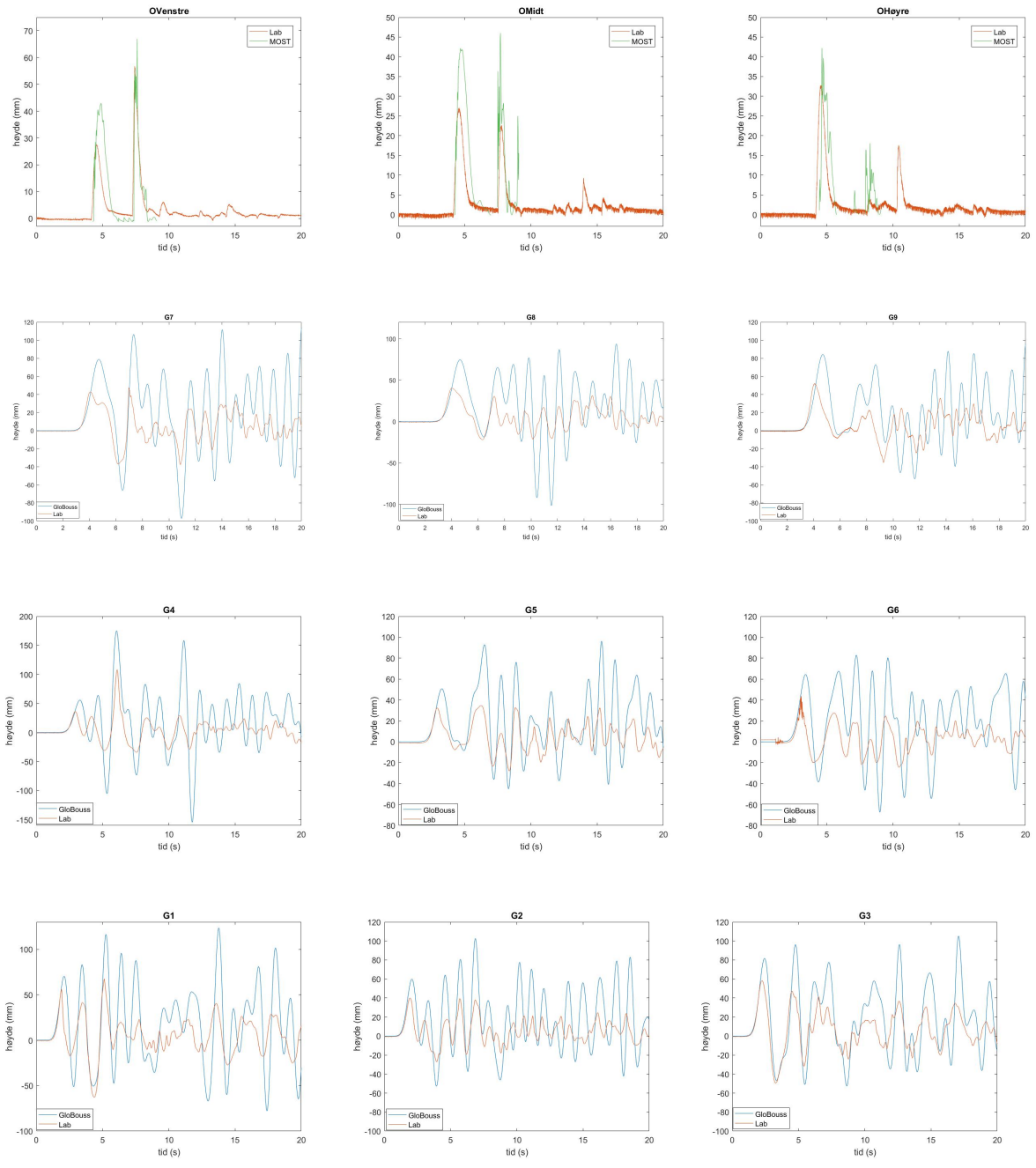
I figurene nedenfor er alle resultatene fra GloBouss/MOST og fysiske forsøk plottet. Hver side inneholder grafer fra hvert sitt forsøk.

A1

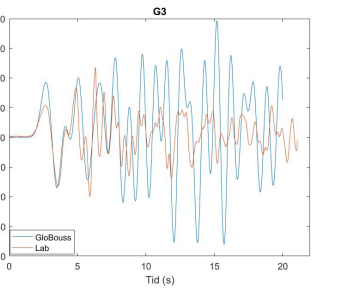
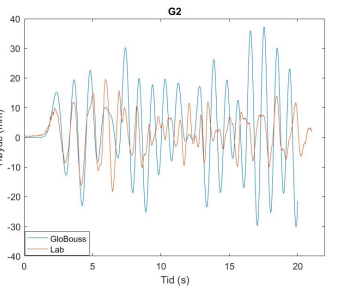
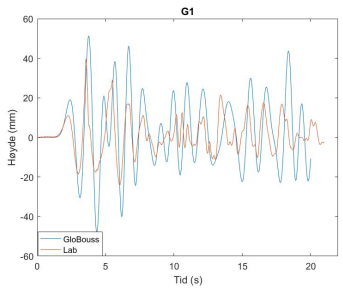
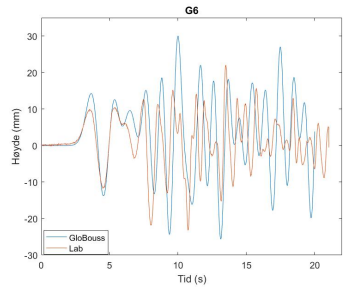
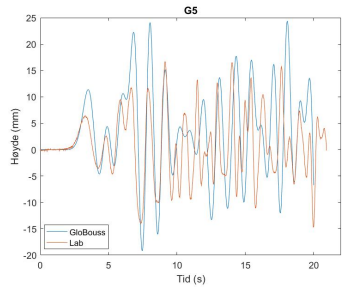
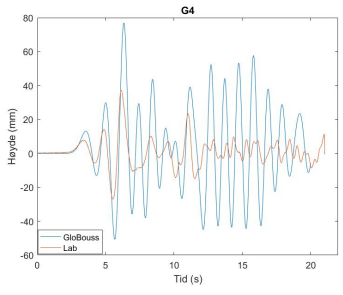
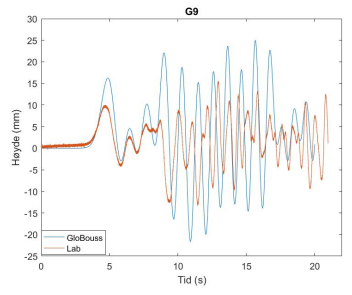
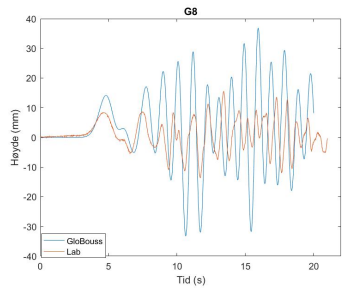
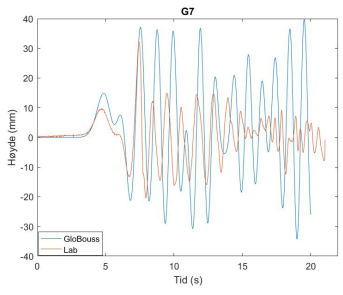
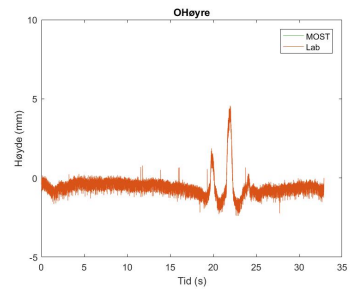
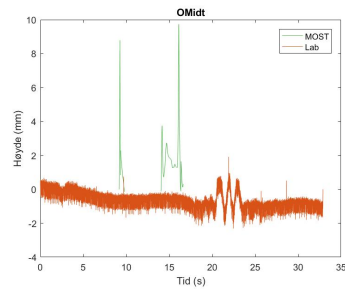
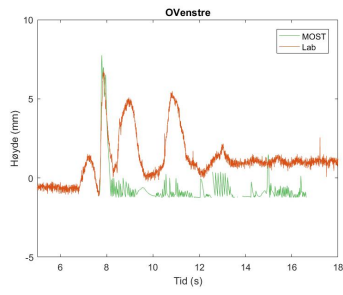


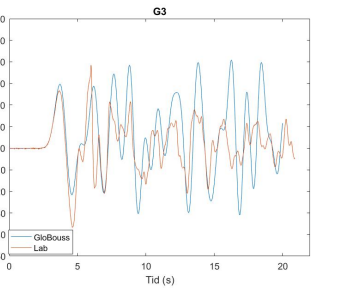
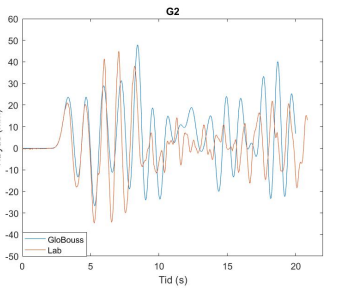
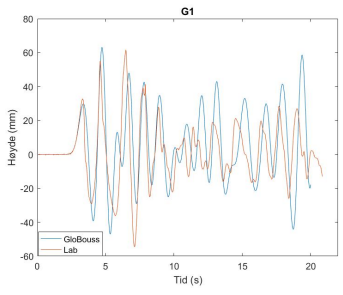
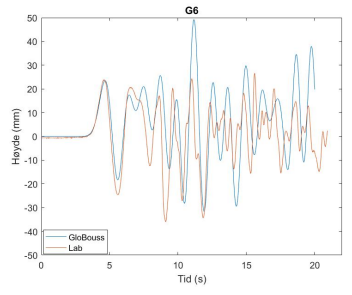
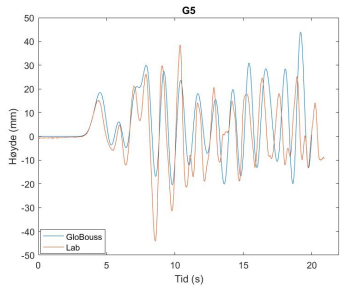
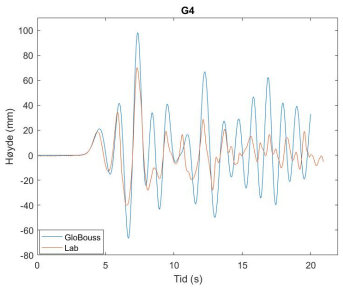
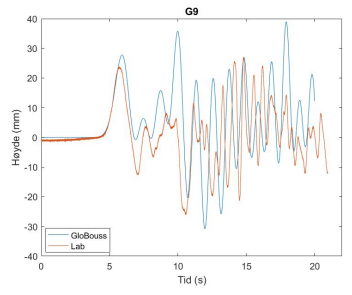
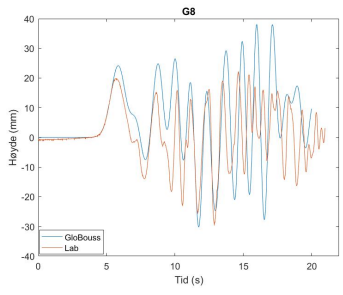
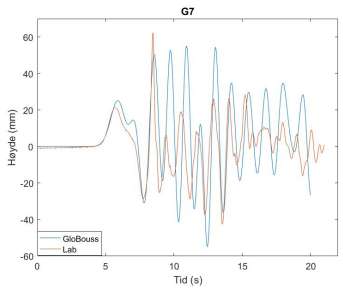
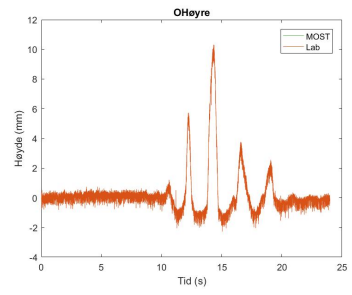
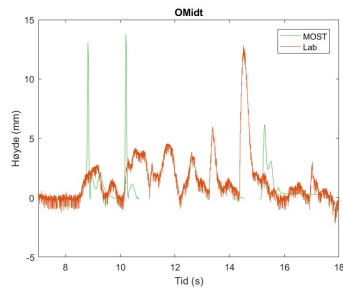
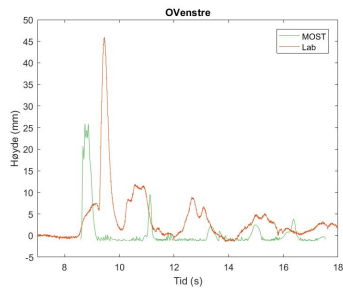


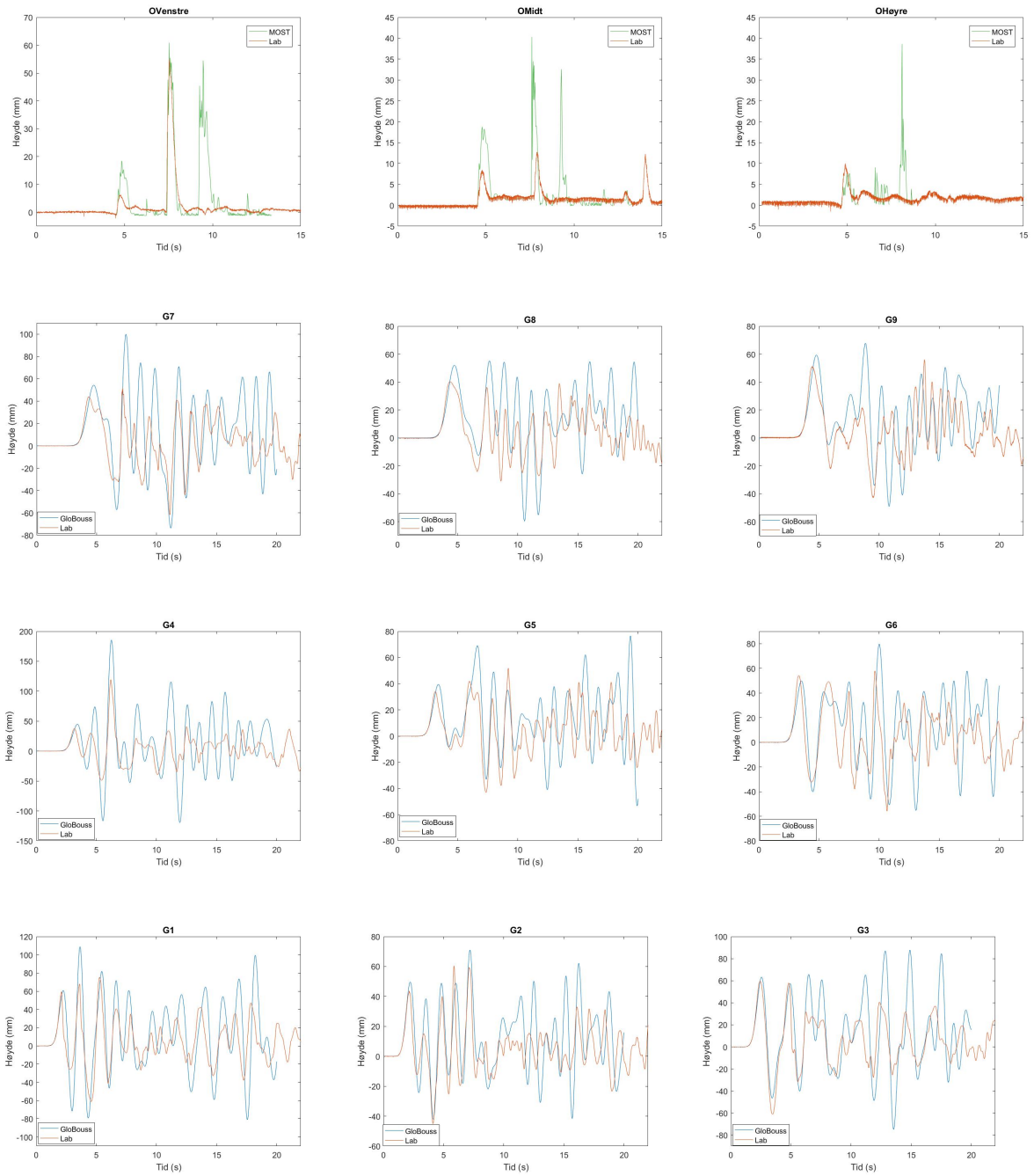




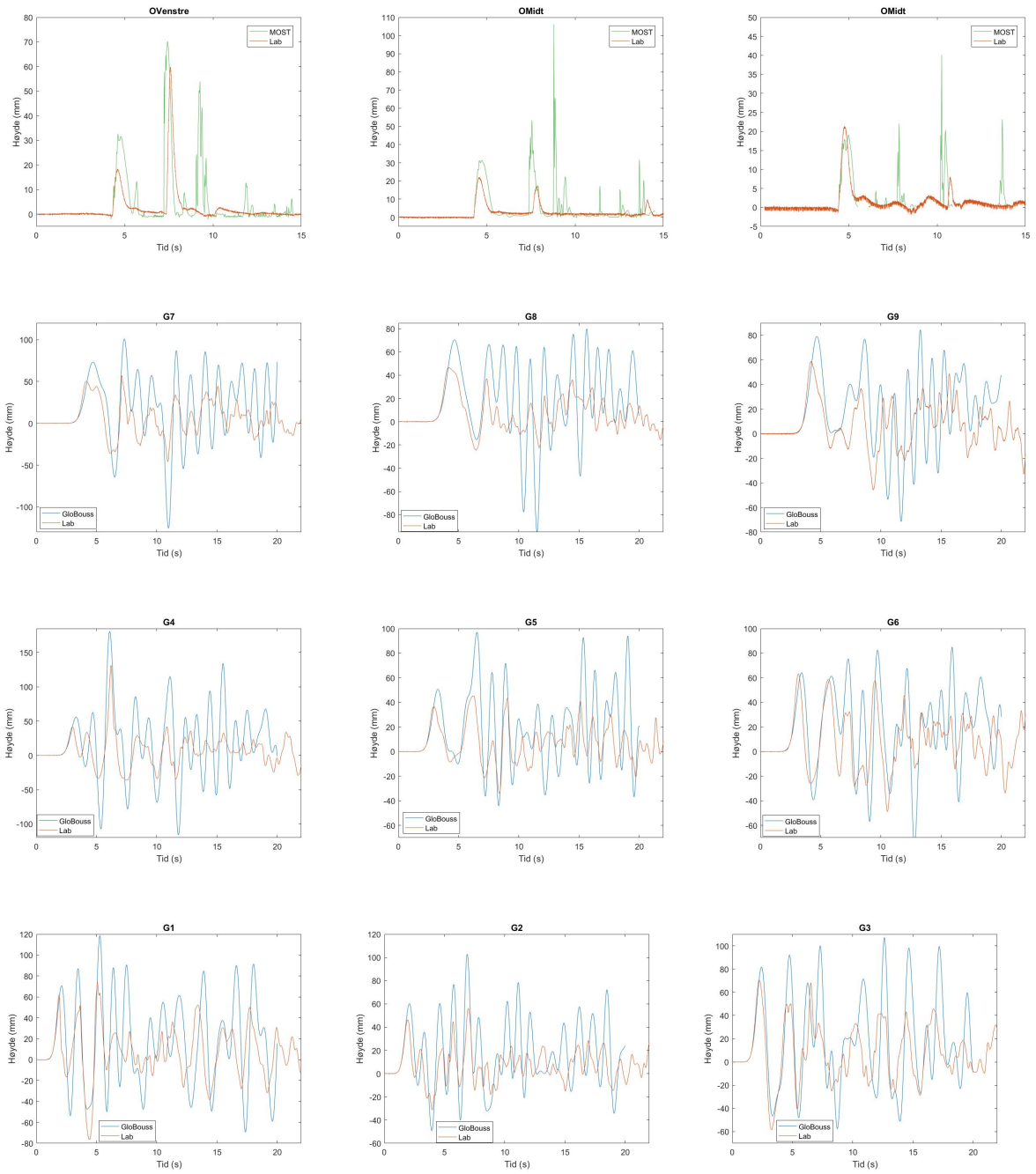
B1



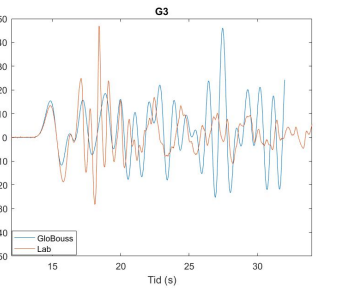
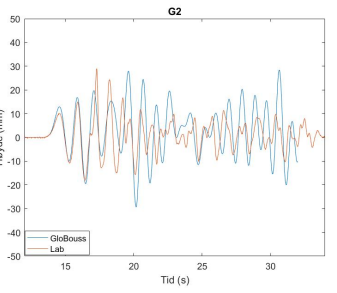
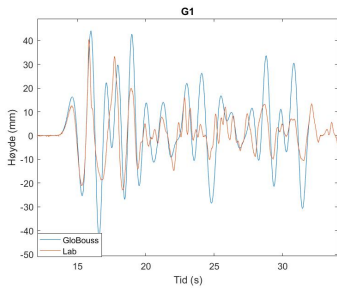
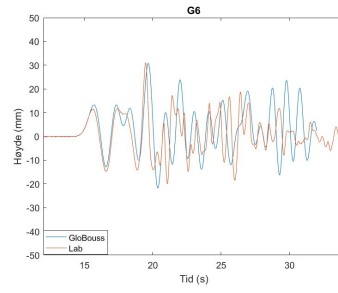
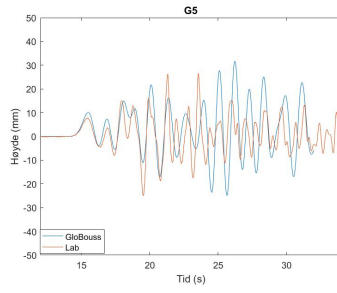
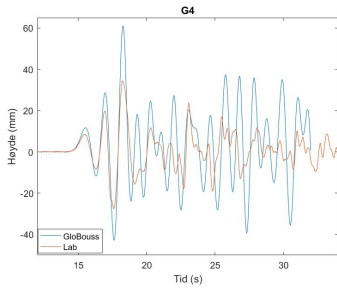
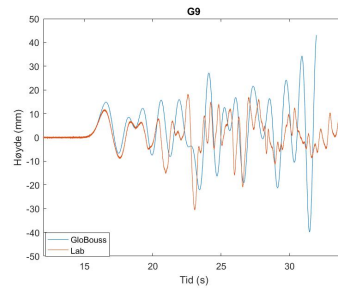
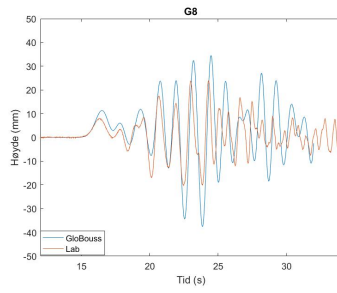
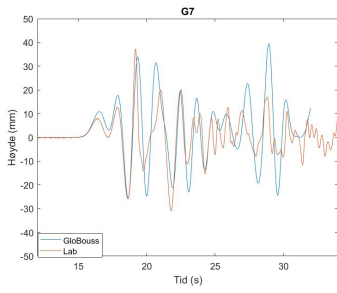
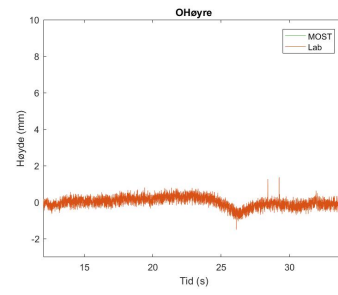
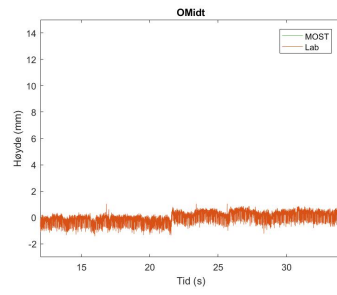
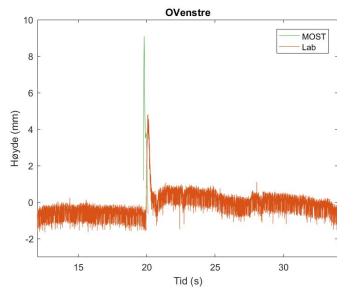


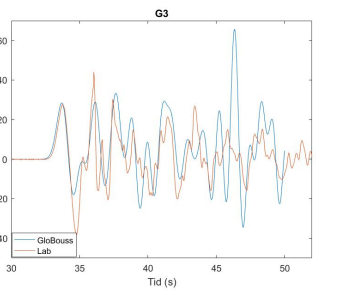
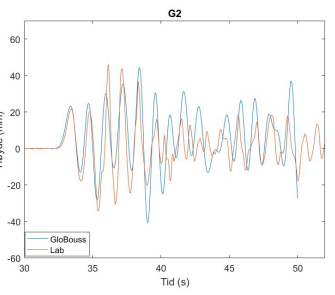
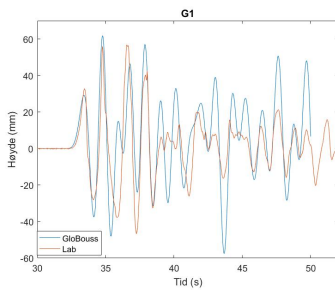
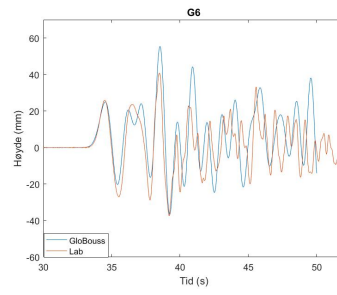
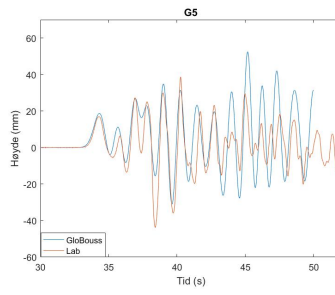
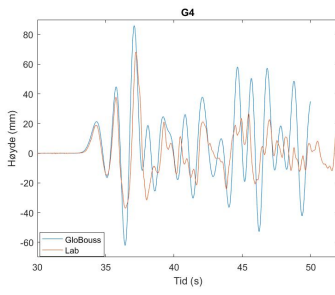
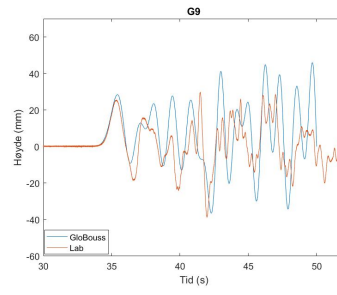
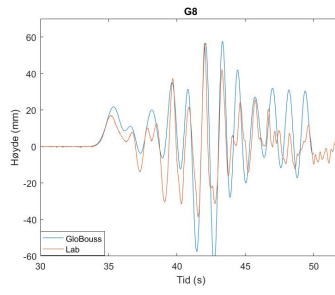
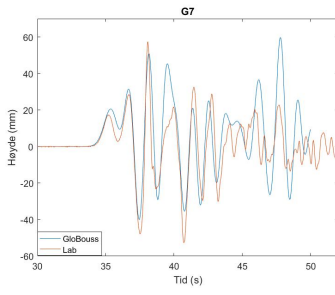
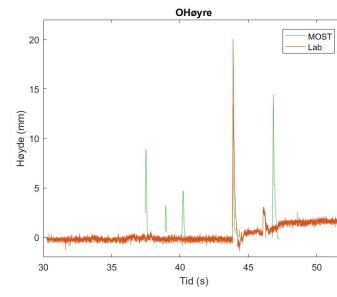
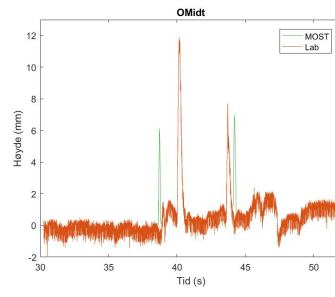
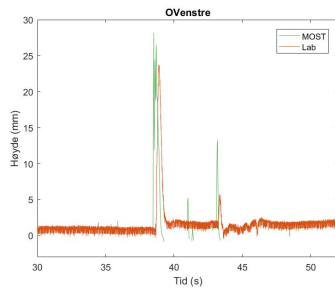


B4



C1

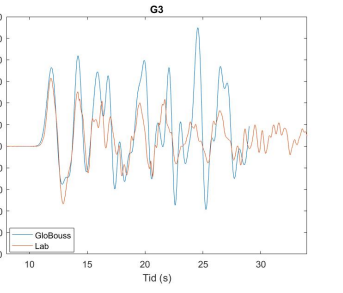
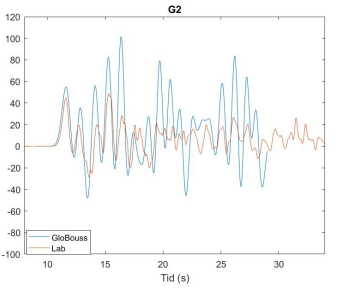
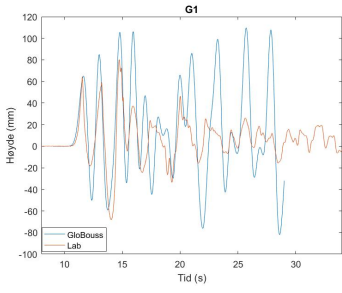
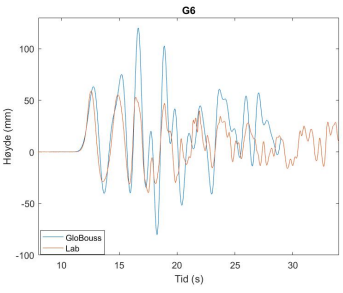
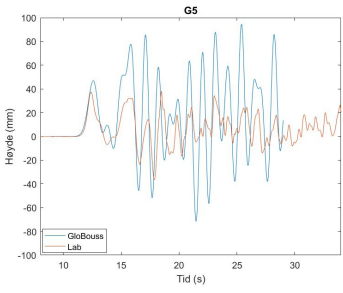
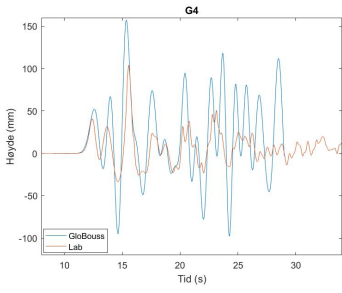
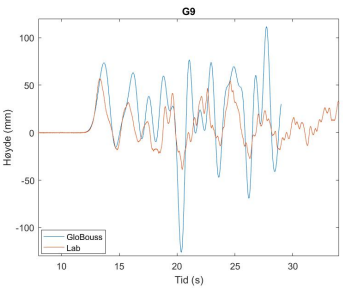
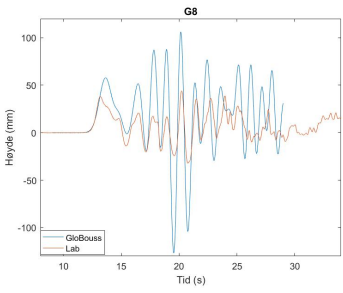
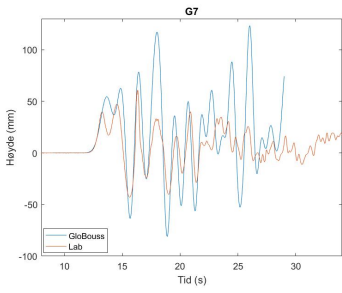
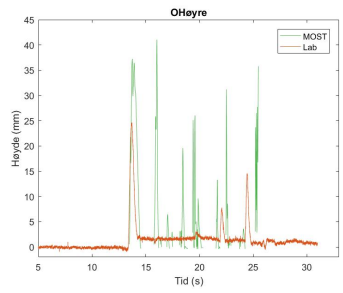
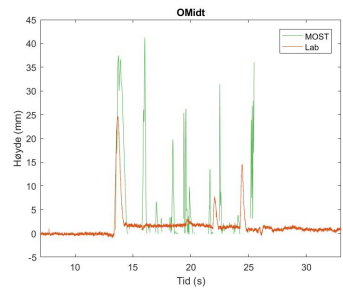
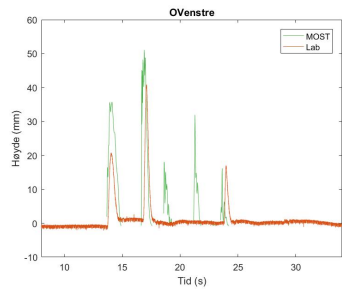




C3

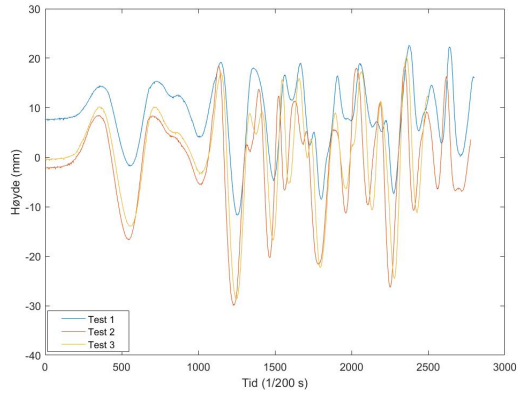


C4

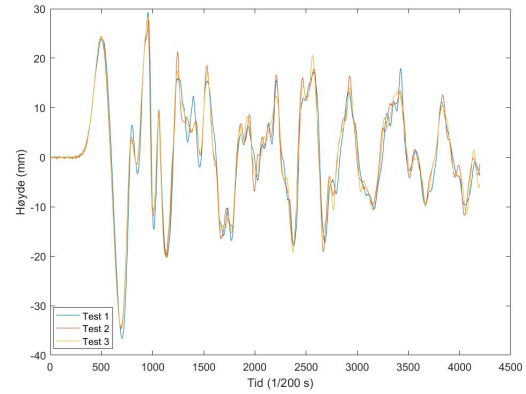


VEDLEGG D: REPETERBARHET FOR OPPSETT A OG C

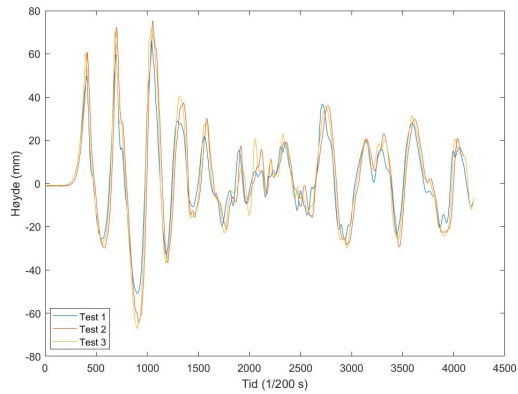
Nedenfor er resultater fra de tre gjentakelsene av forsøk med oppsett A og C plottet for én tilfeldig valgt sensor per forsøk.



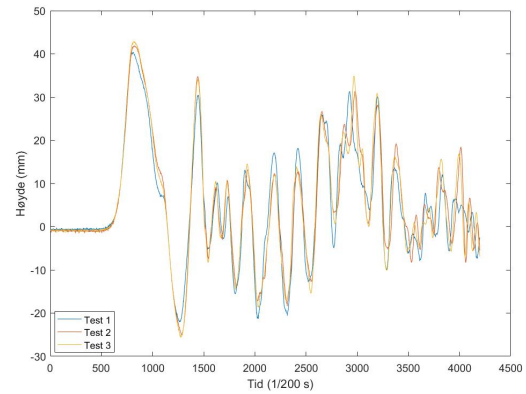
Oppsett A1, sensor G6



Oppsett A2, sensor G3

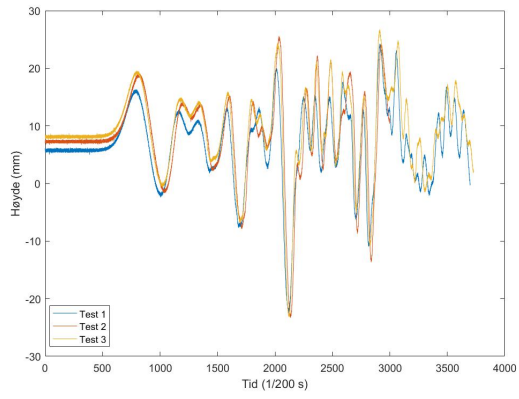


Oppsett A3, sensor G1

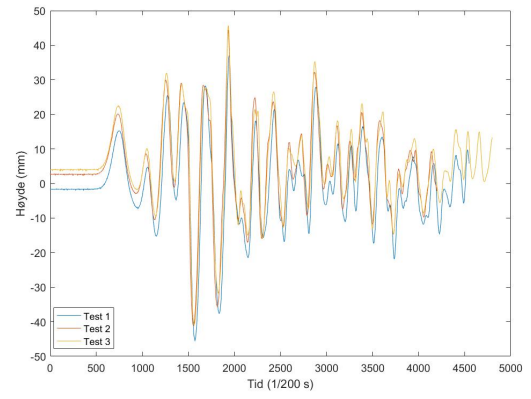


Oppsett A4, sensor G8

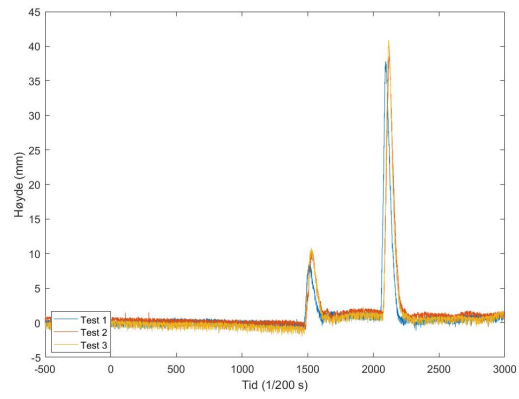
Repeterbarhet for forsøk med oppsett A



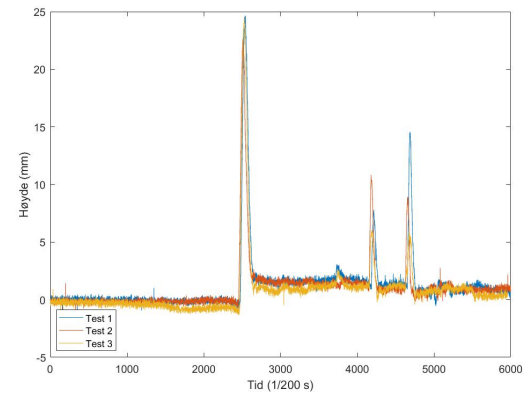
Oppsett C1, sensor G9



Oppsett C2, sensor G5



Oppsett C3, sensor OVenstre



Oppsett C4, sensor OHøyre

Repeterbarhet for forsøk med oppsett C