

Skred i magasin

Fastsettelse av relevante skredegenskaper
for generering av bølger med hensyn til
overtopping av fyllingsdam

Sunniva Lorås

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Jochen Aberle, IVM

Medveileder: Arne Lothe, Norconsult

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGAVE

Student: *Sunniva Lorås*

Title: **Landslides in reservoirs and their impact on rockfill dams**

1 BACKGROUND

Norway's electric energy demand is almost exclusively met by hydropower and it will remain the most important energy source for the foreseeable future due to Norway's unique topography, climate and availability of natural reservoirs. However, several reservoirs in Norway may be exposed to rock-slides which can lead to the generation of impulse waves. Such waves may result in dam overtopping and subsequently in a large flood wave, endangering the lives of the people and infrastructure in the downstream valley. Moreover, the dam safety might be at risk due to the overtopping and the erosion of the dam material in the case of rock filled dams.

It is against this background that the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) initiated in collaboration with the Department of Hydraulic and Environmental Engineering (IVM) a research project to investigate the impact of impulse waves on embankment dams in Norwegian hydropower reservoirs. The study is based on experiments in an already existing scale model of Storfjord that has been built in the hydraulic laboratory of IVM. The model tests related to the landslide action in fjords have been finished recently and the Geiranger channel section of the model has been isolated in order to study the landslide action in reservoirs. The main purpose of the experiments is to study the wave-runup at the damsite and its effect on dam safety considering specific boundary conditions in Norwegian reservoirs.

2 TASKS

The objective of the thesis is to describe the most important parameters which are required to determine landslide hazards for Norwegian reservoirs as well as the importance of landslide characteristics. The thesis is based on the results of the project-work of the candidate in which the *Viddalmagasinet* has been identified as a suitable prototype for the experimental investigations. The MSc-thesis is closely connected to the MSc-thesis of Joakim Nordberg Svendsby.

In order to fulfil the objectives, the MSc-thesis should cover the following issues:

1. Literature review related to landslide hazards at hydropower reservoirs, landslide scale model tests and relevant scaling laws. Description of the most important slide characteristics affecting wave generation and wave characteristics. The project work of Joakim Nordberg Svendsby may be referenced with regard to the literature review related to wave propagation and runup
2. Summary of characteristics of Norwegian reservoirs with rock fill dams based on the project work. Detailed description of Viddalsmagasinet and the relevant hydraulic and geotechnical boundary conditions.
3. Description of the model setup and instrumentation
4. Determination of relevant slide characteristics for the model tests and design of adequate slide models.
5. Execution of model tests with the designed slides and interpretation of the observed differences in the hydrodynamic response (wave patterns) with regard to slide characteristics. This task will be carried out in close collaboration with Joakim Nordberg Svendsby
6. Discussion of results

Discussions with the supervisor will be used to refine details of the experimental setup and the experimental procedure.

3 SUPERVISION AND DATA

Professor Jochen Aberle from NTNU will be main-supervisor of the project work. Co-supervisor will be Dr. Arne Lothe from Norconsult. Discussions and input from colleagues and other researchers at NTNU, NVE, SINTEF, etc. are recommended. Significant inputs from others shall, however, be referenced in an adequate manner.

The research and engineering work carried out by the candidate in connection with this thesis shall remain within an educational context.

Other contact persons available: Geir Tesaker, NTNU; Torgeir Jensen, SINTEF

4 REPORT FORMAT AND REFERANCE STATEMENT

The MSc-thesis shall be typed by a word processor and figures, tables, photos etc. shall be of good report quality. The report shall include a summary of not more than 450 words that is suitable for electronic reporting, a table of content, lists of figures and tables, a list of literature and other relevant references and a signed statement where the candidate states that the presented work is his own and that significant outside input is identified and referred. The report shall have a professional structure, assuming professional senior engineers (not in teaching or research) as the main target group. The thesis should be submitted in pdf-form in DAIM and in the form of three hardcopies that should be sent to the supervisor/department via the printing shop. The thesis should not be delivered later than Tuesday, June 10, 2014.

Trondheim, 13. januar 2014



Jochen Aberle
Professor

Forord

Denne masteroppgaven med navn «Skred i magasin» er utarbeidet av Sunniva Lorås, våren 2014, som et videre arbeid fra prosjektoppgaven med samme tema (Lorås, 2013). Oppgaven er avsluttende arbeid på sivilingeniørstudiet Bygg- og Miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Bakgrunn for oppgaven er å kunne kartlegge hvilken påvirkning et skred i magasin kan føre til, med tanke på stabiliteten til en fyllingsdam. Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE), har etterspurt arbeidet som blir gjennomført av NTNU, da denne oppgaven vil utgjøre en del av startfasen til prosjektet.

Jeg ønsker å benytte anledningen til å takke min hovedveileder Prof. Jochen Aberle, som har vært til stede fra prosjektets start. Takk for gode innspill, og konstruktiv tilbakemelding underveis i hele prosjektet.

I tillegg ønsker jeg å takke medveileder Dr. Arne Lothe, for viktige oppklaringer innenfor tema om bølgegenerering. Takk til Dr. Kiflom Belete som kom inn i prosjektets siste fase med gode og relevante innspill. Takk til Ola Gunleiksrud, som er VTA for E-CO Energi AS ved Viddalsmagasinet i Aurland, for alle verdier på dammen, og relevante opplysninger om magasinet for øvrig.

Gjennomføringen av forsøkene i vassdragslaboratoriet hadde ikke vært mulig uten en innføring i modellens komponenter, noe jeg fikk av Ing. Torgeir Jensen fra SINTEF. Også takk til Seniortekniker Audun Vårum som sammen med Torgeir har stått for bygging av modellens dam og som på kort varsel hjalp til med montering og løfting av skred. Takk til NVE for finansiell støtte til bygging i modellen.

Til slutt vil jeg takke medstudent Joakim Nordberg Svendsby for mange vel gjennomførte forsøk sammen i laboratoriet, og for et godt samarbeid gjennom hele 5.klasse ved NTNU.

Arbeidet med dette prosjektet har åpnet muligheter for ny kunnskap, mer bredde innenfor faget og selvstendighet. Jeg håper at resultatet av arbeidet vil være av interesse og bidra til økt kunnskap vedrørende skred i magasin.

God lesning!



Sunniva Lorås
Trondheim, 10.06.2014

Sammendrag

Norges energiforbruk dekkes i dag i all hovedsak ved produksjon av vannkraft. Med den topografien som finnes i Norge, er det ikke til å unngå at enkelte magasin har blitt liggende ugunstig til i forhold til fare for skred. Et skred som ender opp i et magasin vil føre til dannelse av impulsbølger som vil kunne påvirke forhold rundt magasinet og da spesielt rettet mot en fyllingsdam. En fyllingsdam er ikke konstruert til å stå imot en høyere vannstand enn høyeste flomvannstand (HFV). «Skred i magasin» er et prosjekt som gjennomføres av Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) etter forespørsel fra Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE). Målet for prosjektet vil på sikt være å fastslå et fribord med en sikkerhetsmargin på en fyllingsdam, der skredfaren rundt magasinet er tatt i betraktning. Dette vil da øke sikkerheten til fyllingsdammen som konstruksjon.

Hovedformålet med masteroppgaven var å kunne avklare de relevante skredegenskapene som påvirker generering av bølger og tilhørende overtopping av dam. I tillegg til å tolke observerte forskjeller i hydrodynamisk respons.

Det er benyttet en modell av Geirangerfjorden, lokalisert i vassdragslaboratoriet ved NTNU, som opprinnelig ble bygd i forbindelse med Åknes-prosjektet. I dette prosjektet ble Viddalsmagasinet brukt som prototype med en skala på 1:158. Det er til sammen kjørt 12 modellforsøk. De fem første forsøkene ble kjørt med kompakte klosser i ulike posisjoner i forhold til hverandre. De to siste skredene ble kjørt med samme form som to av de første skredene, men med porøsitet på ~40 %. I tillegg ble tre av skredene sluppet fra ulike høyder over vannoverflaten, som ga ulik hastighet i møte med vannoverflaten.

Resultatene tyder på at skredvolumet har stor innvirkning på overtoppingen. En dobling av skredvolum i lengderetning vil føre til en dobling av overtoppingen, med en konvergerende tendens når lengden av skredet blir for stort. Ved en dobling av volumet i bredderetningen vil overtoppingen mer enn dobles, nettopp fordi denne endringen også fører til en endring av form. Et skred med bred front, vil føre til 20 % større overtopping i forhold til et skred med samme volum men med halv frontbredde.

Et skred med en høyere porøsitet vil føre til at et mindre vannvolum går over dammen. Det tyder på at vannet vil kunne trenge inn i skredmassene, slik at den totale påvirkningen på vannet blir dempet.

Det ble observert tre tydelige bølger som gikk over dammen. Den første bølgen gikk over jevnt fordelt, mens de to neste gikk over på sidene og i midten. Dette kan indikere at refleksjon av bølgene påvirker overtoppingen.

Abstract

Norway's energy consumption is currently mainly covered by production of hydropower. Because of the topography, some reservoirs have been left unfavorable to the risk of avalanches. An avalanche that ends up in a reservoir will lead to waves that will affect conditions around the reservoir and particularly affect embankment dams. An embankment dam is not constructed to withstand a higher water level than the design criteria given in guidelines from the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE). This project is conducted by Norwegian University of Science and Technology (NTNU) on request from NVE. The aim of the project will be to determine a safety margin for an embankment dam, where the avalanche danger around the reservoir is taken into account. This will increase the security of the embankment dam.

The main purpose of this master thesis was to clarify the relevant avalanche characteristics that affect the generation of waves and the overtopping of the dam. Next to interpret the observed difference in hydrodynamic response.

It is used a model of the Geiranger Fjord, located in the Hydraulic laboratory at NTNU, which was originally built for the Åknes project. The prototype in this project was the "Viddalsmagasinet", with a scale of 1:158.

There are a total of 12 conducted experiments in the model. The first five consisted of compact blocks in various positions. The last two slides had the porosity of ~ 40 %. In addition, three of the landslides were dropped from various heights above the water surface.

The results indicate that the landslide volume has a major impact on the overtopping. A doubling of landslide volume in the longitudinal direction led to a doubling of the overtopping, with a converging tendency when increasing length of the landslide. By doubling the volume in the width direction, the overtopping more than doubled, precisely because this change also causes a change of the shape of the landslide hitting the water. A slide with a broad front will cause at least 20 % greater overtopping compared to a slide of the same volume but with half as broad front.

A slide having a higher porosity will cause a smaller volume of overtopping. This is probably because the water could penetrate the avalanche, so that the total impact on the water is smaller.

There are observed three waves going across the dam. The first wave in the model passes evenly, while the next two are on the sides and in the middle. This indicates that it might be reflections in the reservoir that are affecting the overtopping.

Innholdsliste

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Innholdsliste	vii
Figurliste.....	ix
Tabelliste	x
1 Innledning.....	1
2 Litteraturomtale	3
2.1 Skred.....	3
2.2 Skred i magasin	5
2.3 Bølgeutbredelse	11
3 Modellforsøk	15
3.1 Presentasjon av modell og prototype.....	15
3.2 Gjennomføring av forsøk.....	22
4 Resultater og analyse.....	27
4.1 Impulsprodukt parameter og volum overtopping	27
4.2 Bølgeutbredelse	32
5 Diskusjon.....	35
5.1 Skredparametere	35
5.2 Bølgegenerering og refleksjon i magasinet	37
5.3 Feilkilder.....	39
5.4 Videre arbeid	41
6 Konklusjon	43
Referanseliste	45
Vedlegg	47

Figurliste

Figur 2.1 - Steinskred (NGI, 2014)	3
Figur 2.2 - Skisse av en sikulær skjærflate.....	5
Figur 2.3 - En kan tydelig se den utløste fjellsiden i Vajont Dam (Midttømme, 2013).....	6
Figur 2.4 - Bilde av Bødal (Carstensen, 2010).....	7
Figur 2.5 - Kommuner i Norge med skredutsatte magasin (NGI, et al., 2004).....	8
Figur 2.6 - Figuren illustrerer krav for undersøkelsen til NVE.....	9
Figur 2.7 - Stokebølgen (Heller et al., 2009)	13
Figur 2.8 - Cnoidalbølgen (Heller et al., 2009).....	13
Figur 2.9 - Singelbølgen (Heller et al., 2009)	13
Figur 2.10 - Bore (Heller et al., 2009).....	14
Figur 3.1 - Viddalsmagasinet sett fra nord. (Oust, 2009).....	15
Figur 3.2 - Viddalsmagasinet sett fra sør i modellen	16
Figur 3.3 - Dammen i modellen sett ovenfra	17
Figur 3.4 - Oversikt over de fem kamrene som rommer overtoppingen.....	18
Figur 3.5 - Viddalsdammen sett ovenfra (Oust, 2009), (Gunleiksrud, 2014)	18
Figur 3.6 - Bølgesensorene med sin spesifikke nummerering	19
Figur 3.7 - Oversikt over skredets komponenter.....	20
Figur 3.8 - Det potensielle skredet ved Viddalsmagasinet er merket av med røde streker.....	21
Figur 3.9 - Tydelige sprekker i løsmassedekket, Viddalsmagasinet (Domaas, et al., 2002)....	22
Figur 3.10 - Presentasjon av skred 1	23
Figur 3.11 - Presentasjon av skred 2	23
Figur 3.12 - Presentasjon av skred 3	24
Figur 3.13 - Presentasjon av skred 4	24
Figur 3.14 - Presentasjon av skred 5	24
Figur 3.15 - Presentasjon av skred 6	25
Figur 3.16 - Presentasjon av skred 7	25
Figur 4.1 - Punktene representerer hvert sitt skred	29
Figur 4.2 - Sammenheng mellom impulsparameter og hastighet.....	30
Figur 4.3 - Sammenheng mellom impulsparameter og volum.....	31
Figur 4.4 - Tydelig bølgefront som representerer den første genererte bølgen.....	32
Figur 4.5 - Bølge nummer 2 for skred 1, som fører til den største overtoppingen.....	33
Figur 4.6 - Skisse av spektralanalysen for bølgesensor 1, skred 5.....	34
Figur 5.1 - Mulig bølgedannelse for et fjellskred.....	38

Tabelliste

Tabell 2.1- Skredparametere (Heller et al., 2009).....	10
Tabell 2.2 - Relevante bølgeparametere.....	12
Tabell 4.1 - Resultatene fra hvert skredforsøk	28
Tabell 4.2 - Indikerer hvor lang tid det går før dammen overtoppes i modellen	34
Tabell 5.1 - Sammenligningsforhold mellom skred med volumøkning i lengderetning	35
Tabell 5.2 - Sammenligningsforhold mellom skred med volumøkning i bredderetning	36
Tabell 5.3 - Sammenligningsforhold mellom skred med ulik front	37
Tabell 5.4 - Indikerer hvor lang tid det tar før dammen overtoppes i prototypen.....	38

1 Innledning

Norges energiforbruk dekkes i dag i all hovedsak ved produksjon av vannkraft. På grunn av landets særegne topografi, et våtere klima og tilgang på naturlige vannressurser, vil vannkraft også i fremtiden utgjøre en viktig energikilde. Etablering av større magasiner i forbindelse med vannkraftutbygging er imidlertid sterkt avtagende.

Med den topografien som finnes i Norge, er det ikke til å unngå at enkelte magasin har blitt liggende ugunstig til i forhold til fare for skred. Et skred i magasin vil føre til generering av impulsbølger eller tsunami. Dette kan forårsake oppskylling i strandsonen, skader og erosjon på dam i tillegg til skadeflom nedstrøms. Bølger i magasinet og oppskylling i strandsonen kan gi stor materiell skade i tillegg til tap av menneskeliv. Dersom en dam kollapser på grunn av en slik påvirkning, kan konsekvensene nedstrøms dammen bli katastrofale.

Fare for skred i magasin kan være relevant verden over. Det finnes eksempler fra historien, blant annet fra Vajont Dam i Italia 1963, der en skredmasse på 270 millioner kubikkmeter (mill. m³) resulterte i en tsunami som overtoppet betongdammen med hele 250 meter. Landsbyer ble oversvømt både oppstrøms og nedstrøms og førte til at over 2500 mennesker mistet livet (Petley, 2008). Skred med påfølgende tsunami utgjør en av de største farene for en naturkatastrofe i Norge, der mer enn 170 mennesker har mistet livet de siste 100 årene (Blikra, et al., 2006). Det vises for eksempel til to separate ulykker i Loen i 1905 og 1936. Hendelsene blir sett på som en av de største naturkatastrofene i Norge opp gjennom tidene, og kostet til sammen 134 menneskeliv (NGI, 2014).

Etter forespørsel fra Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE), jobber Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) med å finne hvilken innvirkning impulsbølger fra skred vil få i et magasin, og hvordan de spesifikt vil påvirke en fyllingsdam. Oppgaven er delt i to deler. Denne oppgaven konsentrerer seg om å bestemme relevante skredparametere som har innvirkning på bølgegenereringen og dermed kanskje på overtoppingen. I tillegg til vil det være relevant å observere forskjeller i hydrodynamisk respons med hensyn til skredegenskapene. Del to sammenligner verdiene som gis av modellforsøkene i vassdragslaboratoriet ved NTNU, med beregningsmetoden til Heller. Oppgavene er knyttet nært opp mot prosjektoppgavene som er utarbeidet av Joakim Nordberg Svendsby og Sunniva Lorås, (2013).

Oppgaven vil innledes med en litteraturomtale som vil handle om skred generelt, og vanlige skredtyper i Norge. Den vil snevres inn mot skred i magasin, som er hovedfokuset i denne oppgaven. Viktige skredparametere vil avklares, i tillegg til relevant bølge teori. Prosjektets modell og prototype presenteres og sammenlignes i kapittel 3. Kapitlet vil avsluttes med å

presentere de ulike forsøkene som er kjørt i modellen. Det vil kjøres forsøk med ulike skred, med målinger av overtoppingen. Resultatene fra forsøkene presenteres i kapittel 4. Oppgaven avsluttes med en tolkning av observerte forskjeller i hydrodynamisk respons med hensyn til skredegenskaper. I tillegg vil det diskuteres mulige feilkilder i modellen, og drøfte modellens relasjon til virkeligheten. Det vil også foreslås videre arbeid med utgangspunkt i dette prosjektets resultater.

2 Litteraturomtale

Kapittel 2 tar for seg relevante tema for denne oppgavens hovedfokus, som er skred i magasin. Kapitlet starter med å ta for seg ulike skredtyper og årsaker til utglidning. Deretter vil oppgaven snevres inn mot skred i magasin og historiske hendelser som bekrefter viktigheten av å kartlegge skredutsatte områder. Det vil presenteres relevante skredparametere som inngår i energioverføringen fra skred til vannbevegelse. Kapitlet avsluttes med et kort innblikk i tidligere bølgeforsøk og relevant bølge teori.

Kapitlet er bygd direkte på kapittel 2 og 3 i (Lorås, 2013). I dette kapitlet er derimot flere emner beskrevet og utfyllende info gitt. Noe av ordlyden vil for enkelte avsnitt være lik prosjektoppgaven det er referert til.

2.1 Skred

Et skred kan forklares som «en større eller mindre gravitasjonsbetinget masseforflytning av stein, jord, leire eller snø» (Store Norske Leksikon, 2012). I et internasjonalt geoteknisk perspektiv, deles skredtypene inn etter hvilket material skredmassene består av og hvilken type utglidning som skjer. Det finnes tre hovedtyper av skredmasse som stein, avsetninger og jord. Måten massene beveger seg på beskrives ved hjelp av fritt fall, velting, glidning, spredning eller flytende masse. På engelsk får de ulike skredtypene navn ved å kombinere skredmasse med type utglidning, noe som i alt gir 15 skredtyper. Et eksempel vil være dersom et skred består av stein som spres utover som i et sprang, heter det «rockfall» på engelsk og «steinsprang» på norsk. I Norge er det også vanlig med is- og snøskred, som da kommer i tillegg. De ulike skredene kan alle føre til skader på bebyggelse og mennesker. Under er det skrevet hvilke skredtyper som dominerer i Norge.

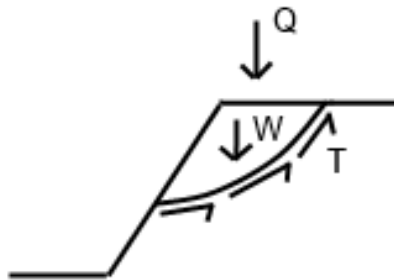


Figur 2.1 – Steinskrud (NGI, 2014).

På fastlandet er det fjellskred, jord- og leirskred som er mest vanlig. Et skred betegnes som fjellskred når massene er over 100.000 kubikkmeter fjell (NGI, 2014). Jordskredene oppstår som regel i bratte skråninger der glideflaten består av leire eller fjell. Ved mye nedbør, vil det øverste jordlaget mettes og bli for tung i forhold til de underliggende jordlagene, og dermed gli ut. Kvikkleireskred er spesielt vanlig i Trøndelag og Østlandet. Leire er finkornet avsetningsmateriale fra istiden, som etter landhevingen har kommet over havnivå. Når leira skylles ut for salt, blir materialet flytende, og store områder kan kollapse ved slake helninger. I Norge er det også vanlig at mindre blokker eller steinsprang utløses ved brattere fjellskrenter enn 40-45°. Ettersom flere steinblokker løsner fra fjellskrenten, hopper og ruller de nedover skråningen slik at det bygges opp bratte urer (NGU, 2011). I havet eller i innsjøer kan det forekomme undersjøiske skred. Bevegelsesenergien til skredet vil generere bølger som vil kunne føre til skade på omkringliggende infrastruktur og bebyggelse. I tillegg er det fare for is- og snøskred. Dette kan forekomme ved store forekomster av snø i kombinasjon med en helning. Siden snø kommer som nedbør ved ulike temperaturer med ujevne mellomrom og mengde, vil det kunne dannes lagvis. I et lag der bindingene mellom snøen er svake, vil det kunne skje en utglidning dersom det kommer en tilleggsbelastning med for eksempel ny snø over. Temperatur og værhistorikk vil derfor også ha stor betydning for is- og snøskred (Lied & Kristensen, 2003).

Små og mellomstore skred skjer av naturlige årsaker med korte eller lengre mellomrom i samme skredbane. Store skred med katastrofale utfall, skjer derimot vanligvis der det ikke er observert skred tidligere (NGI, 2014). Et skredutsatt område karakteriseres ofte av en bratt helning, der brattheten avgjør skredfaren. En viktig parameter er hva underlaget består av. For eksempel om det er trær i skråningen, noe som er en forholdsvis god skredsikring. Eller hva det potensielle skredmaterialet består av, som leire, fjell, stein og hvilken lagdeling underlaget har. Det er spesielt tre momenter som kan utløse et skred i skredutsatte områder. Det første er naturlige årsaker som erosjon, kryp og fryse/tine-prosesser som over tid svekker motholdet mot utglidning. På grunn av Norges kalde klimaforhold er det sistnevnte svært vanlig. Det andre er ekstremvær, som kan være nedbør i form av regn og snø, jordskjelv eller kraftige vinder/orkaner. Ved kraftig nedbør, vil skredmassene mettes med vann, og poretrykket i jordmassene øke. Da vil jorda bli tyngre, og skjærkraften i glideflaten vil ikke lengre kunne motstå vekten av massene. Klimaendringer vil føre til mer ekstremvær i tillegg til et varmere klima. Spesielt i Nord-Norge vil dette være kritisk, ettersom en smelting av permafrost vil kunne føre til en mer ustabil fjellmasse (Carstens, 2010). Et siste moment er menneskeskapte påvirkninger som utgraving eller påfylling av masser.

En enkel skisse vil kunne gi uttrykk for de viktigste parametrene. Figur 2.2 viser en sirkulær skjærflate som kan rase ut. T tilsvare skjærkraften som vil være kraften som holder skredmassene på plass. Kraftens styrke vil være avhengig av for eksempel helning og hvilken masse skråningen består av. Jordas vekt, W, vil øke dersom det kommer nedbør som vil øke poretrykket. Q representerer kraften av ytre påvirkninger som for eksempel kan være menneskeskapte. Så lenge skjærkraften er større enn vekten av skredmassen og ytre påvirkninger, vil skråningen være stabil.



Figur 2.2 - Skisse av en sirkulær skjærflate med de viktigste kreftene som virker på skredmassen.

2.2 Skred i magasin

Med et landskap med store høydeforskjeller og bratte skråninger som i Norge, vil sannsynligheten for skred være tilstede og høyst reell. Denne oppgaven vil ha spesielt fokus på fjellskred som blir utløst og ender opp i et magasin. Fjellskred kan oppstå i store fjellsider som har svakhetssoner i den geologiske strukturen. Det skjer som regel 1-2 ganger per 100 år, og når det først skjer kan det være katastrofale konsekvenser (NGI, 2014). Når et fjellskred ender opp i et magasin, vil det oppstå impulsølger som kan påvirke området rundt magasinet, dammen og videre nedstrøms. For en fyllingsdam vil dette være et alvorlig scenario, ettersom den ikke er konstruert til å tåle at vannet går over høyeste flomvannstand (HFV).

Et eksempel på skred i magasin fra virkeligheten er fra Italia i 1963, da det gikk et jord- og steinras i Vajont. Raset på 270 millioner kubikkmeter (mill. m³) endte i magasinet og resulterte i en tsunami som overtoppet dammen med hele 250 meter. Dammen som var laget av betong besto, men flommen førte til at flere landsbyer ble berørt, både oppstrøms og nedstrøms. Til sammen omkom over 2500 mennesker (Petley, 2008). Dersom dammen i tillegg kollapser i et slikt tilfelle, vil det føre til enorme mengder vann som vil medføre en stor skadeflom i vassdraget nedstrøms damstedet med mulige store konsekvenser for infrastruktur og bebyggelse.



Figur 2.3 – En kan tydelig se den utløste fjellsiden i Vajont Dam i Italia i 1963 (Midttømme, 2013).

Det finnes flere eksempler fra virkeligheten. Skred med påfølgende tsunami utgjør en av de største farene for en naturkatastrofe i Norge, der mer enn 170 mennesker har mistet livet de siste 100 årene (Blikra, et al., 2006). For å forstå hvilke konsekvenser et skred i vann kan føre til, kan en se på historiske hendelser.

Helt tilbake til 1756 finnes opplysninger fra det største historiske fjellskredet i Langfjorden i Romsdal. Tjelleskredet var et steinskred på 15 mill. m³ og førte til tre store flodbølger som skylte innover land i Eresfjorden. 32 mennesker omkom som en konsekvens av flodbølgene (Carstensen, 2007). I Tafjord i 1934 gikk det også et skred på 1,5 mill. m³ stein som løsnet fra fjellsiden omtrent 800 moh., og førte til at 40 mennesker mistet livet. I 1978 gikk det et stort kvikkleireskred på fem-seks millioner kubikkmeter i Rissa kommune i Sør-Trøndelag. I skredet omkom en person, i tillegg til at over 20 hus og gårdsbruk ble ødelagt. Kvikkleireskredet endte opp i innsjøen Botnen og førte til en tre meter høy flodbølge som slo inn mot tettstedet Leira som ble oversvømt (NGI, 2011).

To store skred med påfølgende flodbølge har gått i Loen, i 1905 og i 1936. Til sammen mistet 134 mennesker livet. Dette er de to mest kjente skredhendelsene i Norge, og blir sett på som en av de største naturkatastrofene i Norge opp gjennom tidene.

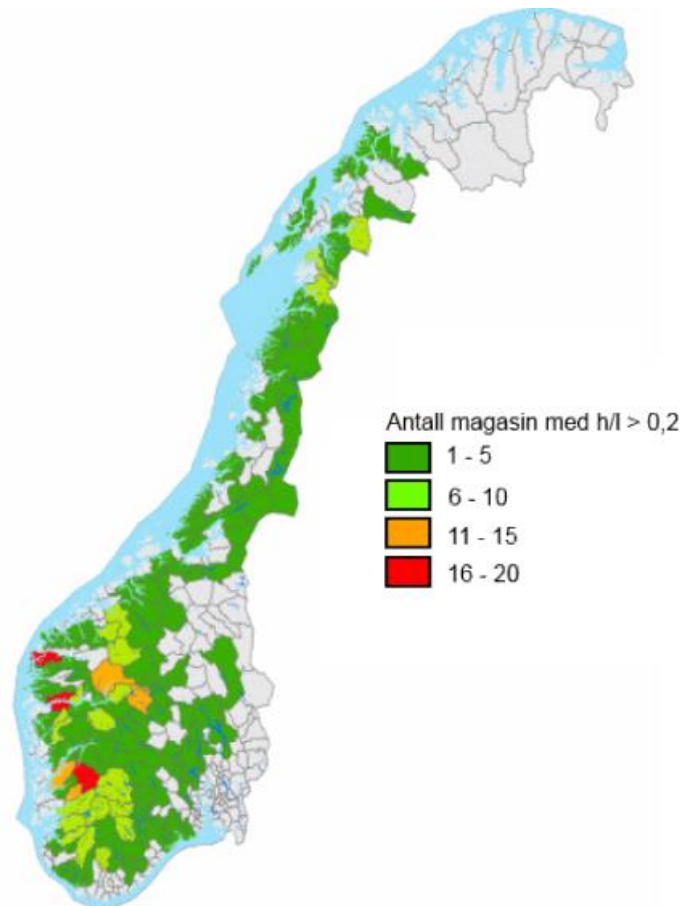


Figur 2.4 – Bilde av Bødal, som ble oversvømt av den første Loen-ulykken, 15.januar 1905 (Carstensen, 2010).

Et siste eksempel er fra nyere tid, da det gikk et undersjøisk skred den 29.januar 2014 på Otterøya i Namsenfjorden. Skredet genererte en flodbølge som slo inn mot tettstedet Statland i Namdalseid kommune. Ingen mennesker omkom, men flere kaier, moloer og bygninger ble oversvømt. Disse hendelsene understreker at bølgegenerering på grunn av ulike typer skred i vann er høyst reell, og kan føre til store ødeleggelser og tap av menneskeliv.

Det finnes dermed flere eksempler som kaster lys på viktigheten av å kartlegge de områdene som har et potensiale for skred i vann. For å undersøke potensialet for skred, er det viktig å ta med flere aspekter i vurderingen. En må for eksempel studere geologien rundt, nedbørsdata og grunnvannsforhold, i tillegg til mulige forkastninger eller fjellstrukturer som kan påvirke hvor skredet vil gå. Dette må da inkluderes i analysen. Etter påvisning av et mulig skredområde er det mulig å gjennomføre en risikoanalyse som vil kunne si noe om sannsynligheten for at det skal oppstå et skred og gi en beskrivelse av mulige konsekvenser av en slik hendelse. Det vil deretter være aktuelt å vurdere nytten av mulige tiltak som kan iverksettes for å dempe eller redusere virkningene. Dette kan inkludere konkrete fysiske tiltak i tillegg til etablering av systematiske rutinemessige kontroller av de skredutsatte områdene inkludert rutiner for varsling dersom sannsynligheten for skred er overhengende.

NVE, NGI, NGU og NTNU har samarbeidet om en rapport «Tsunami modellering and prediction» (NGI, et al., 2004). Her har de foretatt en undersøkelse av hvilke magasin i Norge som står i fare for skred, og hvor disse er lokalisert. Figur 2.5 illustrerer en oversikt over antall utsatte magasin per kommune i Norge, der en ser at det er flest tilfeller på Vestlandet, merket med rød farge på kartet.

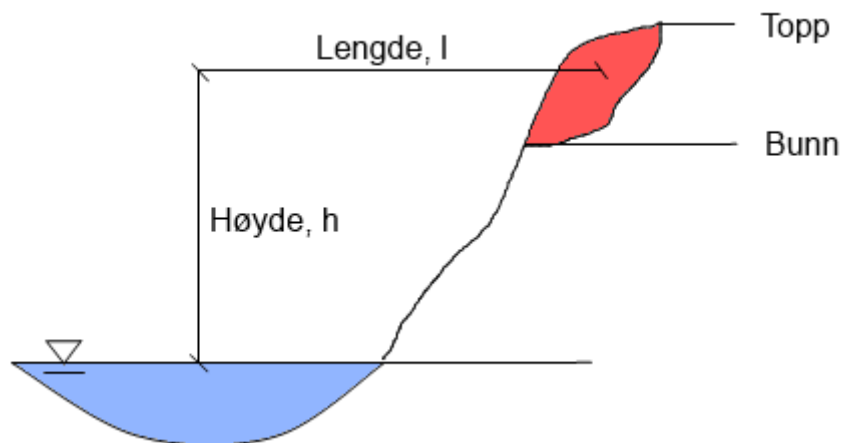


Figur 2.5 - Kartet illustrerer hvilke kommuner i Norge som har flest antall magasin som er utsatt for skred. Rød farge betyr at det finnes mellom 10 og 20 magasin, og disse befinner seg på Vestlandet (NGI, et al., 2004).

For å gjennomføre undersøkelsen, som er nevnt ovenfor, var det på forhånd satt noen krav:

1. En forutsetning for at det i hele tatt skal gå et skred, er at helningsvinkelen mellom topp og bunn i skredmassene er $\alpha = 50^\circ$.
2. Lengste avstand raset kan gå fra utløsningssone til magasinet er satt til 2 km. Høyden (h) er den vertikale avstanden, og lengden (l) den horisontale avstanden, fra magasinoverflaten til skredets tyngdepunkt, se figur 2.6
3. Minste høyde/lengde forhold må være $h/l = 0,2$, noe som tilsvarer en helningsvinkel på 11° .

Resultatet av arbeidet viste at 50 % av alle magasin i Norge kan være utsatt for skred på grunn av dets topografiske omgivelser.



Figur 2.6 - Figuren illustrerer hva som regnes som høyde, lengde og topp og bunn av skredmasse for undersøkelsen til NVE.

Det finnes dermed flere eksempler på magasin i Norge som er utsatt for skred. I tillegg til at topografien rundt tilsier skredfare, finnes det eksempler på dårlige fundamentmasser under dammen eller forhold nedstrøm som ikke er i stand til å stå imot en eventuell overtopping av dammen. Et eksempel på dette er dammen ved Braskereidsfoss i Våler kommune i Hedmark. Denne er plassert på elveavsetninger av fin sand og silt, og vil være ekstra følsom for ytre påvirkninger som for eksempel bølgekrefter. Et annet eksempel er fra Mysevassdammen i Kvinnherad kommune i Hordaland, der det er en bratt skrent på 800 høydemeter ned mot Austrepollen, altså nedstrøms dammen. Bare en relativt liten overtopping av dammen vil gi store konsekvenser for menneskene og bebyggelsen nedstrøms. For flere eksempler på magasin i Norge refereres det til Lorås (2013).

I magasiner kan også vannstandsendringer være utløsende for skred. Når vannstanden reguleres ned, forsvinner mottrykket fra vannet som tidligere virket på strandsonen. Dette kan føre til skred langs kantene i magasinet (Emdal, 2014). Det finnes også magasiner i Norge med bratte skråninger av isbre som går ned i magasinet. Da kan det være fare for isskred (Lorås, 2013). En tidlig kartlegging og bevisstgjøring av skredfaren bidrar til at en kan være best mulig forberedt dersom det skulle gå et skred. Dette er spesielt viktig i magasiner med fare for dambrudd. I et magasin vil vannstands nivået ved utløsning av skredet være avgjørende for skadeomfanget. Det ligger derfor en stor utfordring i å kunne detektere utløsningen av et potensielt fjellskred så tidlig at en kan holde magasin vannstanden på et nivå som medfører at konsekvensene blir reduserte (Gunleiksrud, 2014).

2.2.1 Energioverføring fra skred- til vannbevegelse

Energioverføringen fra skred- til vannbevegelse uttrykkes ved hjelp av en impuls kraft. Hva som forårsaker denne impuls kraften P når skredet treffer vannet, beskrives med bevegelsesmengden skredet har, som er masse multiplisert med hastighet.

$$P = m * v \quad (2.1)$$

m [kg] Masse
 v [m/s] Hastighet

Dersom skredets masse eller hastighet øker, vil også bevegelsesmengden til skredet i møte med vannoverflaten bli større.

Under forsøkene til Heller og Hager (2007), nærmere forklart i kapittel 2.3.1, ble det beregnet en impulsprodukt parameter, som inkluderer de viktigste bestemmende skredparametrene som er unike for hvert skred. Siden parameteren er dimensjonsløs, er det derfor mulig å benytte parameteren til å sammenligne skredene med hverandre, så lenge verdiene ligger innenfor rammebetingelsene som er gitt. Formelen for utregning av parameteren:

$$P = F S^{1/2} M^{1/4} (\cos \frac{6}{7} \alpha)^{1/2} \quad (2.2)$$

F er verdien for skredets Froude tall, S er den relative skredtykkelsen og M tilsvarer skredets relative masse. Parameteren α er skredets helningsvinkel. Tabell 2.1 presenterer alle skredparametrene som inngår i impulsverdien. For verdienes rammebetingelser og videre bruk i beregningsmodellen til Heller, refereres det til Svendsby (2014). Foruten gravitasjonens akselerasjon og vannets tetthet er parameterne kun tatt ut fra skredet viktigste parametre.

Tabell 2.1- Skredparametre som benyttes ved beregning av impulsprodukt parameter (Heller et al., 2009).

b [m]	Skredets bredde
F [-]	Froude-tall; $F = V_s/(gh)^{1/2}$
g [m/s ²]	Gravitasjonens akselerasjon; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
h_i [m]	Vandybde ved treffningspunkt
M [-]	Relativ skred masse; $M = \rho_s * V_s / (\rho_w * b h^2)$
P [-]	Impulsprodukt parameter
s [m]	Skredets tykkelse
S [-]	Relativ skred tykkelse; $S = s/h$
V_s [m/s]	Skredets hastighet
Ψ_s [m/s]	Skredets volum
α [°]	Skredets helningsvinkel
ρ_s [kg/m ³]	Skredets tetthet
ρ_w [kg/m ³]	Vannets tetthet

2.3 Bølgeutbredelse

Dette kapittelet vil beskrive relevant bølgeteori, avklare bølgeparametere og beskrive hvilke typer bølger det er snakk om i en skredsituasjon.

2.3.1 Tidligere forsøk

En studie av bølgene som dannes når et skred ender opp i vann er gjennomført tidligere i forbindelse med skredfare i Åkenes i Geirangerfjorden på Sunnmøre i Møre og Romsdal. Turistbygdene Geiranger, Hellesylt og Tafjord vil bli oversvømt dersom det kartlagte fjellskredet raser ut i Geirangerfjorden. Skredet blir nøye overvåket, og bevegelse i sprekke blir registrert slik at det vil bli et forvarsel før skredet inntreffer. Norges geologiske institutt (NGI) har gjennomført numeriske beregninger som anslår oppskyllingshøyde ved ulike steder langs fjorden, der det er benyttet to ulike skredscenarioer med skredvolum på 8 og 35 mill m³ stein (Jogerud, 2005). Det er også utført fysiske modellforsøk som hadde som formål å fungere som kalibrering til en numerisk modell under utvikling (Asphjell, 2008). Den skalerte modellen fant sted i vassdragslaboratoriet ved NTNU og forsøkene ble gjennomført i et samarbeid mellom NGI, Universitetet i Oslo, NTNU og SINTEF.

Det er gjennomført flere fysiske modellforsøk, blant annet av Heller med løsmasseskred i bølgekanal (2D), hvor flere parametere ble forandret. Dette resulterte i en god estimering av bølgegenerering og bølgeforplantningen i planet (2D). Huber og Hagner gjennomførte en ny analyse av 3D-forsøkene til Huber. Huber hadde sett på bølgegenereringen og -forplantningen etter skred i bølgekanal og basseng. Målet var å finne en måte å benytte 2D data til estimering av forplantning i 3D. Huber og Hagner gjennomførte nye 3D forsøk med løsmasseskred og kom frem til en metode for å gjøre om bølgehøyden i 2D og 3D. Metoden er noe begrenset, ettersom parameterne ikke ble nok varierte. Dette gjør at det er strenge grenser for bruken av parameterne (Heller et al., 2009).

Det er gjennomført flere forsøk på skredgenererte impulsbølger på Laboratorium for hydraulikk, hydrologi og glasiologi (VAW) ved ETH i Zürich de siste tretti årene. I 2009 ble det publisert en beregningsmetode som skal kunne estimere bølgeopp skylning, overtopping og kraftoverføringer fra skredgenererte tsunamibølger. Metoden baseres på forsøk gjennomført av Heller og omregningsmodellen til Huber og Hagner (1997). Det er også gjennomført forsøk som kan bekrefte metoden. Metoden består av tre steg:

Steg 1 tar for seg en rekke formler som gir en teoretisk bølgeopp skylning på et gitt punkt under ideelle forhold. Ideelle forhold betyr et løsmasseskred i et magasin med rette flater og jevnt bunnivå hvor alle parameterne er innenfor grensene gitt av Huber og Hagner.

Steg 2 estimerer effekten av avvik fra de ideelle forhold i prototypen og finner nye verdier for bølgeopp skylning.

Steg 3 tar for seg krefter på dammen.

Impulsprodukt parameteren, som ble presentert i kapittel 2.2.1, er hentet fra beregningsmetoden til Heller, der den for eksempel blir benyttet til å estimere bølgehøyde. For mer utfyllende informasjon om tidligere forsøk og beregningsmetoden til Heller, refereres det til Svendsby (2014).

2.3.2 Bølgegenerering og -oppkylling

Det finnes to ulike bølger på havoverflaten. Kapillærbølger som oppstår på grunn av overflatespenningen, og gravitasjonsbølger som holdes i gang på grunn av tyngdekraften. I denne oppgaven er det gravitasjonsbølgene som er de dominerende. Disse bølgene igangsettes av en ubalanse som skapes av vind, flo og fjære, jordskjelv eller skred. Skredet kan utløses på land, men ende opp i vannet. Eller hele skredet kan foregå under vann, et såkalt undersjøisk skred (Moe, 2005). Problemstillingen i denne oppgaven tar for seg et fjellskred som ender i vann. En kan anta at skredet vil ha noe av de samme egenskapene som et undersjøisk skred etter at det er neddykket. Det kan dermed antas at impulsbølgene som genereres vil kunne ha egenskaper fra begge de nevnte skredtypene.

Både kapillærbølger og gravitasjonsbølger påvirkes av viskositeten til væsken, og med det menes at korte bølger blir raskere dempet på grunn av friksjonens virkning (Bjørn Gjevik et.al., 2005). Når skredet ender opp i et vann med naturlige utformede sidekanter, vil det i tillegg til selve bølgedannelsen oppstå refleksjoner. Refleksjonsloven for bølger sier at refleksjonsvinkelen er lik innfallsvinkelen. Det betyr at en bølgefront vil endre retning og kastes tilbake dit den kom fra i møte med et annet medie (Moe, 2005). En bølgefront, beskrives som en linje som går gjennom punkter på bølgen, for eksempel bølgetopper, som er i samme fase. Bølgens bevegelse vil være vinkelrett på bølgefrontene. Refleksjon i vannet vil føre til at vannoverflaten blir mer urolig og det kan være vanskelig å se en tydelig forskjell på de ulike bølgene som i utgangspunktet ble generert. Det vil bli sett nærmere på dette i forbindelse med modellforsøkene som skal gjennomføres.

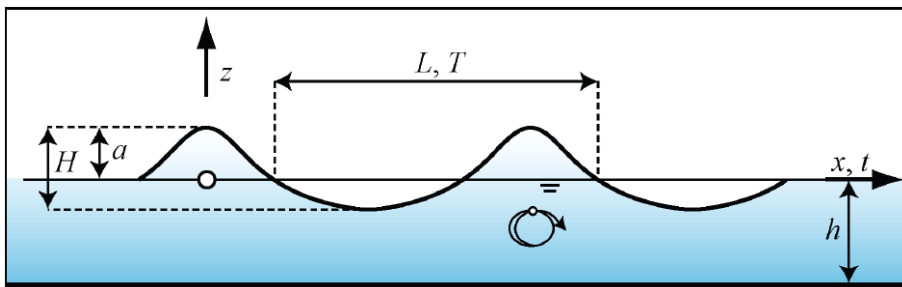
I en energibetraktning er det vanlig å dele opp i potensiell og kinetisk energi. Den potensielle energien kommer av overflatehevingen fra stille vannsnivå, mens den kinetiske energien kommer av vannpartiklenes hastighet (Moe, 2005). Kreftene vil være viktig å forutse, ettersom dette vil påvirke hvordan en dam må bygges for å kunne stå imot rasgenererte bølger. Ved dimensjonering av en fyllingsdam, vil opplysningene være ekstra viktige, ettersom dammen ikke vil tåle at vannet stiger mye høyere enn HFV over tid. I tillegg vil det være lettere å bestemme plastringen til en fyllingsdam dersom kreftene som virker på dammen er kartlagt på forhånd. Denne oppgaven vil imidlertid ikke inkludere beregninger av krefter på dam.

Impulsbølger defineres som gravitasjonsbølger, og vil tilhøre en av de fire bølgetypene som nå blir presentert. Relevante bølgeparametere som benyttes i forklaringen presenteres i tabell 2.2.

Tabell 2.2 - Relevante bølgeparametere som benyttes til å forklare de ulike gravitasjonsbølgene.

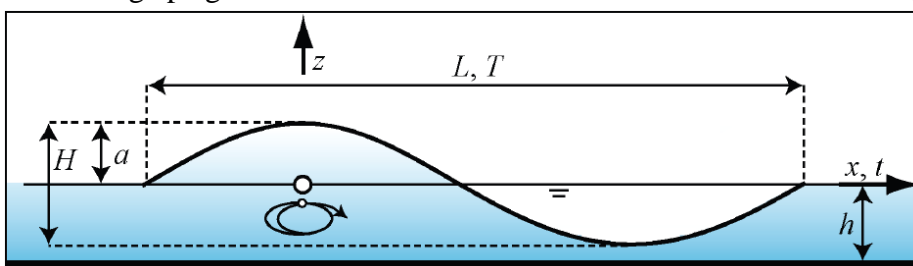
c [m/s]	Bølgehastighet
g [m/s ²]	Gravitasjonens akselerasjon, $g=9,81 \text{ m/s}^2$
h [m]	Stille vannndybde
L [m]	Bølgelengde
H [m]	Bølgehøyde
T [s]	Bølgeperiode
a [m]	Amplituden

- 1) Stokebølgen er en dypvannsbølge med noe brattere bølgetopper samt flattere og lengre bølgedaler sammenlignet med Sinusbølger. Bølgetypen har en svingende karakteristikk, med en liten massetransport. Stokebølgen kan brukes for vindgenererte bølger i dypt vann.



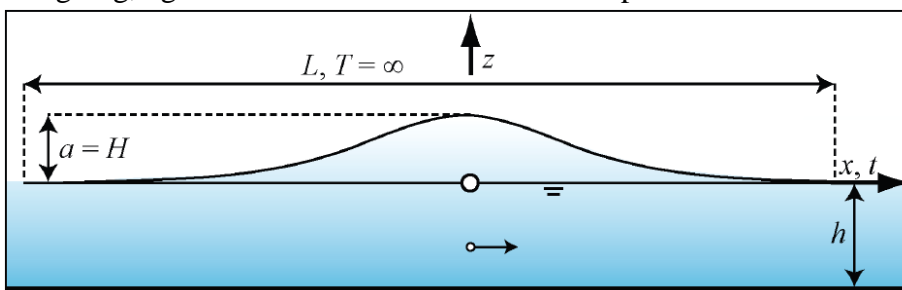
Figur 2.7 – Stokebølgen har noe brattere bølgetopper samt flattere og lengre bølgedaler sammenlignet med Sinusbølgen (Heller et al., 2009).

- 2) Cnoidalbølgen er en grunnvannsbølge som deler en del likheter med Stokesbølgen. Bølgetypen har også en svingende karakteristikk, men med mer massetransport. En Stokesbølge på grunnere forhold kan ofte beskrives som en Cnoidalbølge.



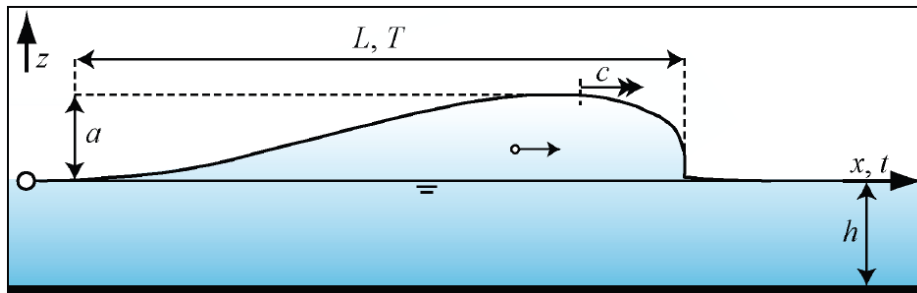
Figur 2.8 – Cnoidalbølgen er en grunnvannsbølge med svingende karakteristikk (Heller et al., 2009).

- 3) Singelbølgen er en klassisk tsunamibølge som oppstår på grunn av jordskjelv. Bølgen oppstår alltid som en grunnvannsbølge, da den har kun en bølgetopp og en evig lang bølgeperiode. Amplituden (a) er dermed lik bølgehøyden (H). Bølgen har ingen svingning, og vil dermed føre til stor massetransport.



Figur 2.9 – Singelbølgen er en klassisk tsunamibølge, da den har kun en bølgetopp og en evig lang bølgeperiode (Heller et al., 2009).

- 4) Bore er en grunnvannsbølge som kan oppstå ved rask tidevannsstigning eller før en bølge bryter mot strandlinjen. Den har en vertikalfront og en horisontal bevegelse som gjør at den kan ha stor masseforflytting.



Figur 2.10 – Bore er en grunnvannsbølge med en vertikalfront og en horisontal bevegelse (Heller et al., 2009).

Overflatebølger generert ved en lokal forstyrrelse i væsken

Dersom en stor stein treffer vannoverflaten, vil det dannes lange bølger i front med gradvis kortere bølger innover mot sentrum av bølgebevegelsen. Den mekaniske energien som steinen tilfører vannet vil fordele seg på ulike bølgekomponenter som igjen vil bres ut med en hastighet som er avhengig av bølgelengden. Etter en stund vil de lange bølgene løpe fra de korte, og bevegelsen vil bli regelmessig med varierende bølgelengde. Dersom steinen lander på grunt vann, vil alle bølgelengder som er noe lengre enn vanddybden ha omtrent lik hastighet. Dermed kan bølgene gå langt uten merkbar endring. Hvis en tilstrekkelig liten stein treffer vannoverflaten, vil de lange bølgene som genereres ha en svært liten amplitude, som fører til at de minste bølgene ikke vil være synlige. Etter en stund vil det utvikles korte bølger i front, mens de lange kommer bak (Moe, 2005).

Bevegelsen i vannet på grunn av et skred vil starte fra stille vann med en heving eller senkning av overflaten idet skredet treffer vannet. Bevegelsen kan ved hjelp av grenseflatebetingelsene og initialbetingelsene beskrives av en Fourier-transformasjon med hensyn på x .

$$f(k) = \int_{-}^{+} f(x)e^{-ikx} dx \quad (2.3)$$

Denne oppgaven vil ikke inkludere videre forklaring av Fourier-transformasjonen, det henvises til Moe (2005).

3 Modellforsøk

Dette kapittelet vil presentere modellen som benyttes i denne oppgaven i samsvar med prototypen. Det inkluderer instrumenteringen, gjennomføring av forsøkene og en presentasjon av de ulike skredtypene som skal kjøres i modellen.

3.1 Presentasjon av modell og prototype

I vassdragslaboratoriet ved NTNU har det tidligere blitt etablert en stor modell som tilsvarte Sunnlyvsfjorden og Geirangerfjorden i Stranda kommune, Møre og Romsdal (Lothe & Storler, 2010). Modellen er tidligere benyttet til å gjøre studier av konsekvenser av et eventuelt ras ved Åkneset i Stranda kommune. I dag er deler av modellen fjernet, unntatt en fjordarm som skal representere et magasin. Det er på forhånd gjennomført en kartlegging av magasin i Norge, for å finne en mulig prototype til modellen (Lorås, 2013). Viddalsmagasinet i Aurland kommune, Sogn og Fjordane, er funnet å ha flest likheter med modellen. Her er allerede et potensielt skred kartlagt, og dette har en gunstig plassering i forhold til hvordan modellen i laboratoriet er bygd. Det ble sammenlignet bredde-dybde forhold, noe som ga et avvik på mellom 0,6 og 2,5 % i to vertikalsnitt i magasinet. Ut fra denne sammenhengen ble det bestemt en modellskala på 1 : 158.



Figur 3.1 - Viddalsmagasinet sett fra nord. Pilen indikerer hvor det er kartlagt usikre fjellområder (Oust, 2009).

Under prosjektering av Viddalsdammen for snart 50 år siden, ble det gjennomført modellforsøk av ulike skredscenarier. Hovedfokuset var å se hvordan en utrasing av steinur ville påvirke bølgehøyden. Dette kunne igjen brukes videre til å beregne dammens plastring ved hjelp av Hudsons formel. Etersom et skred ville føre til en høyere bølgehøyde enn normalt, ble plastringen på dammen dimensjonert deretter. Resultatene fra modellforsøkene viste at de høyeste rashastighetene ga bølgehøyder som avtok ved dammen, da det kan ha blitt dannet flere bølger med kort periode. Bølgehøyden fra lavere rashastighet, gav større og færre bølger med lang periode nærmere dammen (SINTEF, 1968).

3.1.1 Magasin og dam

I denne oppgaven blir det sett på den nordlige delen av Viddalsmagasinet, som ligger mellom det kartlagte skredet og dammen. I modellen blir det sett på den samme delen, bortsett fra at skredet er montert på motsatt side i forhold til prototypen.

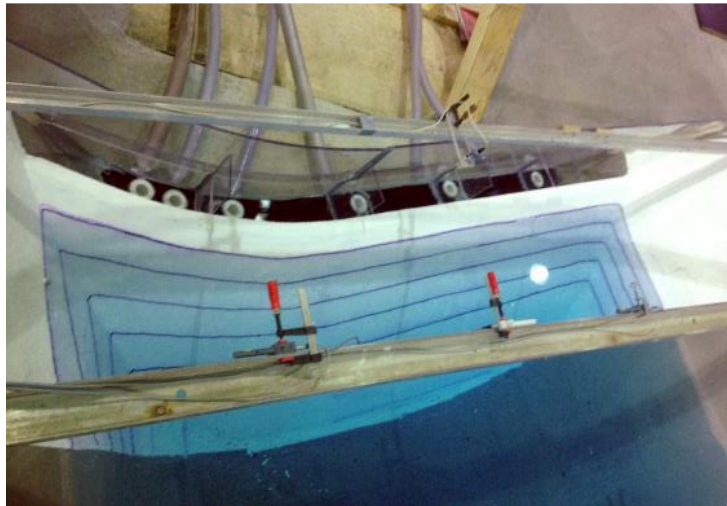
Figur 3.2 viser magasinet i modellen. Skredrampen er nummerert som nummer 1, datamaskin og instrumentering er nummer 2, bølgesensorene er fordelt med tre på hver stang på tre stenger, nemlig nummer 3, 4 og 5. Nummer 6 markerer dammen i magasinet, den vises som hvit farge. Modellen strekker seg ut bak bildet i en sving omtrent 10 meter til. For nøyaktige mål av modellen, se vedlegg D.



Figur 3.2 - Viddalsmagasinet sett fra sør i modellen. 1-Skredrampen, 2-Bod med instrumentering, 3, 4, 5 - Tre stenger med tre bølgesensorer på hver, 6-Den hvite streken indikerer dammen.

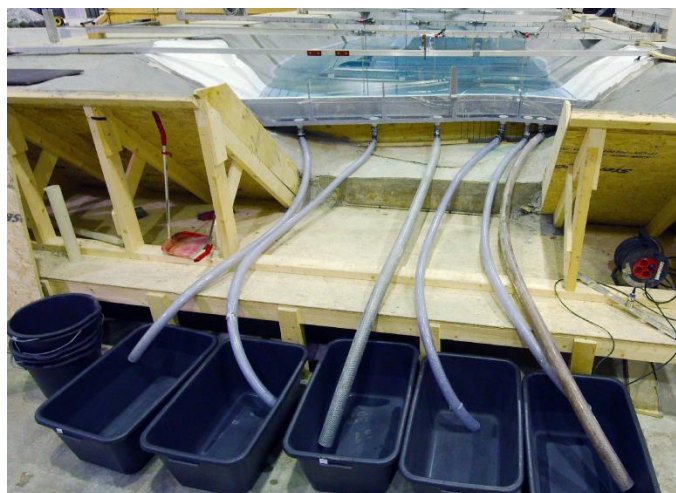
Modellen er utstyrt med et digitalt HD-kamera, Sony «handycam» med operasjonskode HDR-SR11E/SR12E. Dette er montert slik at det filmer dammen og overtoppingen. For å se bølgeoppkyllingen tydelig kan det benyttes blå kontrastvæske. Det gjøres ved å blande ut cirka 30 milliliter i en 10-liters bøtte med vann fra magasinet. Dersom dette helles ut rett ved dammen, vil vannoverflaten synes vesentlig bedre. Ved gjennomføring av forsøk bør en unngå å gå på og ved modellen ettersom det vil føre til unøyaktigheter i målingene. Før en

fyller opp magasinet med vann første gang er det også et tips å tilsette kanel, for å gjøre magasinet enda tettere mot lekkasjer. Vannivået i magasinet synker med tiden, noe som gjør at en må fylle etter dersom det går flere dager mellom hvert forsøk. Da kan en følge med på den øverste streken på dammen, som tilsvarer HRV der vannoverflaten bør ligge. I modellen vil dammens fribord være cirka 3 centimeter, som vil tilsvare 5 meter i prototypen.



Figur 3.3 - Dammen i modellen sett ovenfra, der den høyeste streken betegner HRV. Kamrene som samler overtoppingen med tilhørende slanger er montert på baksiden av dammen.

Dammen i modellen er en nøyaktig kopi av Viddalsdammen. Denne ble skalert ned etter at det ble funnet en passende prototype. Etter å ha beregnet nødvendige mål og form av verdier tilsendt av Ola Gunleiksrud, utførte SINTEF byggingen av dammen. Det ble montert fem kamre på toppen av dammen som vil samle overtoppingen og føre vannet videre gjennom en slange og ned i en bøtte for hvert kammer, presentert i figur 3.4. Til de minste skredene benyttes en 30-liters bøtte, mens for de største er det nødvendig med 50 liter. Dette vil gjøre det mulig å finne fordelingen av vannet som går over dammen. For måling av vannvolumet etter forsøket, benyttes en lasermåler «mic+35/IU/TC» som måler avstanden fra toppen av bøtten og ned til vannoverflaten. Sensoren er utstyrt med et LED display, slik at det er enkelt å lese av verdiene. For å kalibrere lasermåleren kan en lese av verdier for hver av de første fem literne, og deretter for hver femte liter helt opp til 40 liter (eventuelt 20 liter ved en 30-liters bøtte). Verdiene plottes i excel, slik at en vil kunne lese direkte hvor mye volum som er i bøttene. Det benyttes også samme type lasermåler omtrent midt på dammen, som måler høyden av overtoppingen over dammen i det punktet vannet ser ut til å gå høyest.

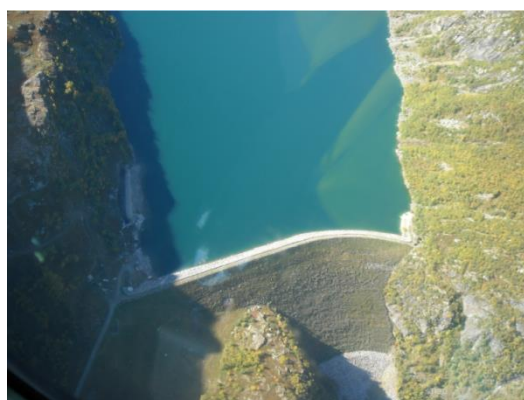


Figur 3.4 - Oversikt over de fem kamrene som rommer overtoppingen, med tilhørende sluk, slanger og bøtter. Kammer 5 har montert to slanger for å ha stor nok kapasitet.

Viddalsdammen består i virkeligheten av en steinfyllingsdam med morenekjerne. Steinmassene er sprengt ut i nærområdet, der bergarten er gneis. Bratte omgivelser gjør at geometrien til dammen er noe utfordrende, som en kan se av figur 3.5 der dammen er sett ovenfra. Ved at profilet over damkrona ikke øker særlig i bredden, vil dette bidra til at en eventuell overtopping vil bli høyere enn dersom overløpsprofilet over damkrona hadde utvidet seg mer i bredden. Profilet er derfor svært ugunstig med tanke på dammens motstandsevne mot skred.

Damaksen har en krumning på den ene siden, noe som også er gjenskapt i modellen. Vannstanden har aldri vært mer enn et par cm over HRV på kote 930,0, og ligger normalt mer enn 1 meter under. Etter 1993 har magasinet vært over kote 929,0 tre ganger, til sammen 17 dager. Magasinet kan senkes fra HRV til LRV på 30 dager ved full produksjon og avstengt overføring. Damkrona ligger i dag på kote 935,0, men skal, i forbindelse med planlagt oppgradering av dammen, heves minst 1 meter og utvides i bredden (Gunleiksrud, 2014). Relevante data fra Viddalsdammen presenteres i figur 3.5. Høyden er regnet fra fundament i senter dam til damkrone.

Lengde [m]	380
Høyde [m]	76
Volum [m ³]	1 657 600
Helning	1 : 1,6
HRV [moh]	930
LRV [moh]	868
Krone [moh]	935

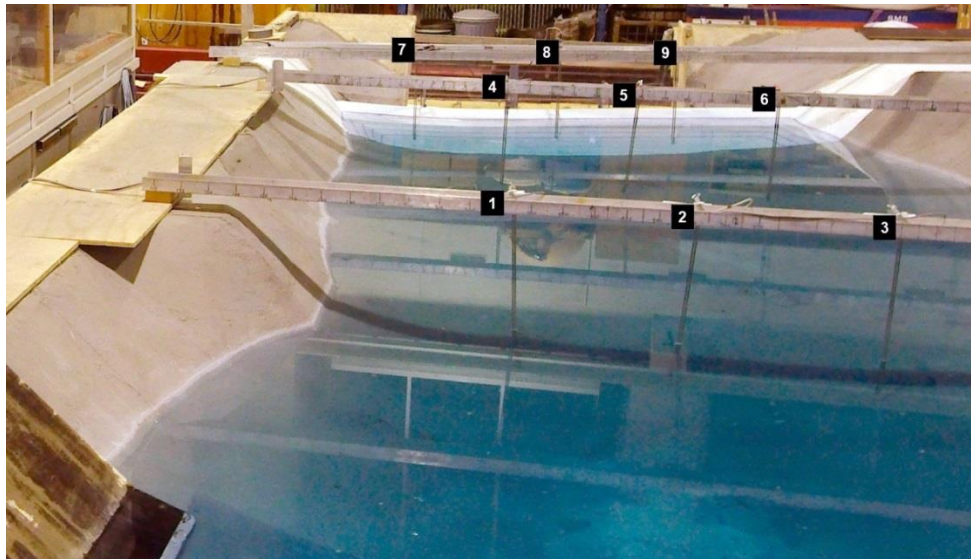


Figur 3.5 – Viddalsdammen sett ovenfra (Oust, 2009). En kan se på bildet at damkonstruksjonen er svært smal, i tillegg til at dammens krumning synes godt. Tallene er faktiske verdier som er benyttet ved skalering av dammen i modellen (Gunleiksrud, 2014).

3.1.2 Bølgesensor

Modellen har 10 bølgesensorer av typen «DHI Wave Meter 102E», som leser av verdiene når vannstanden går opp og ned i magasinet. I figur 3.6 er sensorene nummerert i et oversiktskart over magasinet. Nummer 1 til og med 9 er plassert mellom skredet og dammen, mens den siste bølgesensoren er plassert rundt svingen på motsatt side. Dette er for å kunne sammenligne målte bølgeverdier rundt en sving i forhold til beregnede verdier som er gjennomført i beregningsmetoden til Heller (Svendsby, 2014).

Målingene baseres på målinger av ledningsevnen mellom to parallelle elektroder som er delvis nedsenket i vann. Instrumentet er utstyrt med et ekstra sett av elektroder for kompensering av forandringer i temperatur og saltholdighet. Dataene samles inn og lagres på en USB-enhet «The Agilent U2300A Series USB», med en frekvens på opptil 3 MSa/s for en enkelt kanal. Det benyttes også et Voltmeter som kan lese verdiene av bølgesensorene, slik at den kan kalibreres. For å lese dataene fra bølgesensorene benyttes dataprogrammet «The Agilent Measurement Manager (AMM)».



Figur 3.6 - Bølgesensorene med sin spesifikke nummerering som holdes konstant gjennom hele prosjektet. Nummer 10 er plassert i motsatt ende av magasinet, og vises derfor ikke på figuren.

For å gjennomføre forsøket må bølgesensorene kalibreres. En må måle verdier fra bølgesensorene i nivå null, deretter løfte sensorene 5cm (=2,5V) opp og senke dem ned 5 cm under nullnivå for å måle de ulike verdiene. Dette må først gjennomføres en gang for hver av de tre nivåene, der en justerer verdiene til 0 V i startnivå, -2,5 V i øvre nivå, da vannoverflaten vil stå lavere på sensoren, og +2,5 V i nedre nivå. Ved første innstilling i posisjon null brukes de to nederste knappene «zero», mens ved øvre og nedre posisjon benyttes den øverste knappen «gainer». Deretter må det samme gjøres tre ganger, uten å justere verdiene, men kun lagre. Da vil en kunne plote en graf som viser kalibreringen. For å stille inn målerverdiene, brukes et voltmeter. Når dette er fullført er bølgeinstrumenteringen klar til forsøk.

3.1.3 Skred

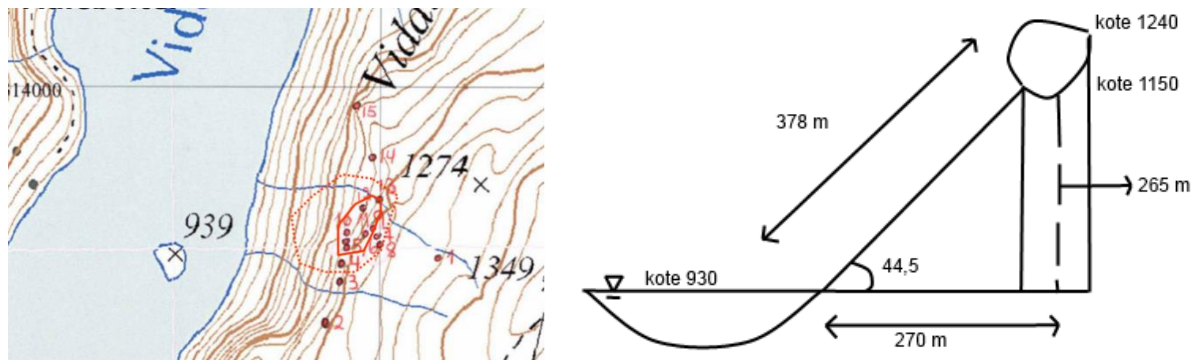
Skredmaterialene i modellen består av enten fast eller porøst materiale. Skredet består av forholdsvis store klosser med en snittvekt på omtrent 40 kg. Klossene kan festes sammen ved hjelp av kjetting og skrukarabiner i ulike størrelser og form. Det faste materialet kan tilsvare et stein- eller blokkskred i virkeligheten, mens det porøse kan tilsvare et sandskred, da porøsiteten er ~40 %. Skredrampen, der skredet blir utløst og glir ned i vannet, er omtrent en meter bred og tre meter lang med en helning som er konstant 42°. I denne oppgaven kan skredene slippes fra tre ulike posisjoner, der posisjon 1 er den høyeste, 2 er nærmest vannoverflaten og posisjon 3 midt i mellom. Posisjon 1 vil gi den høyeste hastigheten når skredet treffer vannet. Skredene nummereres etter startposisjon, som betyr at for eksempel skred 3.2 er skred nummer 3 med startposisjon 2.

Når skredet er ferdig montert og klar til å slippes, må skredet løftes opp på rampen ved hjelp av en kran som er plassert i laboratoriet, se figur 3.7. Det benyttes en rund stang som festes langt ned på rampen, slik at skredet kan støttes på denne, før det videre kobles til en elektrisk vinsj som vil dra skredet opp til posisjon 1. Dersom skredet skal slippes fra posisjon 2 eller 3 reguleres dette med å feste en lang kjetting til skredet. Skredet må deretter festes til utløsningskroken og kobles fra vinsjen. Det er viktig å sjekke at ingen hindringer ligger i veien for å løse ut skredet, for eksempel at den runde stanga er tatt bort. På den ene siden av rampen er det festet en sensor med tilhørende lys, som skal fortelle når skredet er utløst. For at sensoren skal fungere må skredet skyves inntil siden. Før skredet løses ut, må hastighetsmåleren kobles til med en karabinkrok slik at tråden er stram. For å kalibrere hastighetsmåleren må spenningen måles ved utgangsposisjon og 1 meter ned på rampa. Da kan hastigheten beregnes ved å gjøre om volt og strekning til meter per sekund. For illustrasjon av instrumentene, refereres det til figur 3.7. Etter skredet er utløst og forsøket er ferdig, må skredet dras opp av vannet med en lang stang med krok i enden. Vinsjen festes på skredet så langt ned det lar seg gjøre, og dermed kan det dras opp til startposisjonen elektrisk.



Figur 3.7 – Oversikt over skredets komponenter: 1-Lyssensor, 2-Hastighetsmåler, 3-Utløsningskrok, 4-Elektrisk vinsj. Figuren illustrerer at skredet heises opp på skredrampen ved hjelp av en kran.

Volumet til skredet som er kartlagt ved Viddalsmagasinet er estimert til å ligge mellom 1 og 2 mill. m³. De topografiske forholdene indikerer at størstedelen av skredet vil kunne gå i Viddalsmagasinet ved en eventuell utglidning. Det betyr at skredet mest sannsynlig vil bli helt dykket. Selve skredblokka er karakterisert av flere store innsynkningsgroper, i tillegg til flere sprekker på tvers i forhold til dalsiden (Oust, 2009). Det er ikke per i dag registrert store bevegelser i skredområdet. Måleopplegget ble derimot endret i 2013 (Gunleiksrud, 2014). Figur 3.8 indikerer hvor skredet er lokalisert med rød farge.



Figur 3.8 - Det potensielle skredet ved Viddalsmagasinet er merket av med røde streker. I tillegg presenteres omtrentlige mål av skredet i prototypen i et vertikalsnitt.

I modellen er den korteste avstanden mellom skredet og dammen målt til å være 1,01 km i oppskalert verdi. Avstanden i virkeligheten er målt til å være 1,73 km ved hjelp av kartdata fra websiden UT.no, og finnes i vedlegg E. Avstanden i modellen blir dermed ~ 42 % mindre enn avstanden i virkeligheten. Det er viktig å ta høyde for at målingene i både prototypen og modellen er noe unøyaktige, derfor blir dette et overslag over hvor stor forskjellen er. Med denne utregningen i bakhodet, vet man til senere analyser at avstanden mellom skredet og dammen er litt lengre i prototypen enn i modellen.

I modellen vil avstanden langs glideflaten mellom vannoverflaten og tyngdepunktet av skredet variere noe ettersom det blir testet med ulike typer skred. I gjennomsnitt vil skredet plasseres mellom 2,0 og 2,5 m fra vannoverflaten. Dersom en tar et gjennomsnitt og velger en avstand på 2,25 m, vil den vertikale høyden bli 1,50 m, og den horisontale lengden på 1,67 m, beregnet ut fra en skråningsvinkel på 42° i modellen. Forholdet mellom høyde og lengde vil bli $h/l = 1,50/1,67 = 0,89$. Ved å finne omtrentlige verdier for de samme avstandene i virkeligheten, vil forholdet bli $h/l = 265/270 = 0,98$. Forholdet i modellen er ~10 % mindre enn i virkeligheten. Nøyaktig hvordan skredet vil utarte seg er vanskelig å forutse, disse utregningene er dermed basert på omtrentlige verdier.



Figur 3.9 - Tydelige sprekker i løsmassedekket i utglidningsblokka som går ut mot Viddalsmagasinet (Domaas, et al., 2002).

3.2 Gjennomføring av forsøk

Når alt utstyret er kalibrert og gjort klart er selve gjennomføringen av forsøket forholdsvis enkel. Selve forsøket kan forklares med tre steg: Steg 1 er å slå på kameraet, steg 2 er å skru på måleravlesningen på datamaskinen og steg 3 er å løse ut skredet. Deretter gjelder det å forstyrre instrumenteringen minst mulig med å være i ro og vente til målingene er ferdig. De lengste målingene vil ta opptil 15 min, for å ha nok data til å kunne gjennomføre spektralanalyse senere. Et tips kan være å slå på kameraet, la det gå 10 sekunder før en starter målingene og enda 10 sekunder før skredet løses ut. Dette vil for eksempel gjøre det lettere å vite akkurat når på filmen skredet løses ut og en kan forvente bevegelse i vannet. Når et forsøk er gjennomført og målingene er ferdige, må skredet dras opp igjen. Når det er gjort, må magasinet stå i ro en god stund, slik at vannet for roet seg helt før neste forsøk.

Ved skalering av det potensielle skredet ved Viddalsmagasinet, vil skredet bli for stort til å kjøres i modellen. Det er derfor valgt å kjøre vilkårlige skred. Resultatene vil kunne brukes til generell kunnskap som kan benyttes i videre prosjekter eller i sammenheng med andre steder som er skredutsatte. Som nevnt tidligere er hovedfokuset til denne masteren å se på bølgegenereringen, og hvilken innvirkning selve skredet har på overtopping av dammen. Det vil være relevant å kjøre ulike skred for å se hvilke bølger som genereres avhengig av volum, hastighet, porøsitet og form. De ulike hastighetene skilles fra hverandre ved at skredet er plassert i tre ulike posisjoner, som forklart tidligere i kapittel 3.1.3. Skredets posisjon er presentert med nummer 1, 2 eller 3 bak komma.

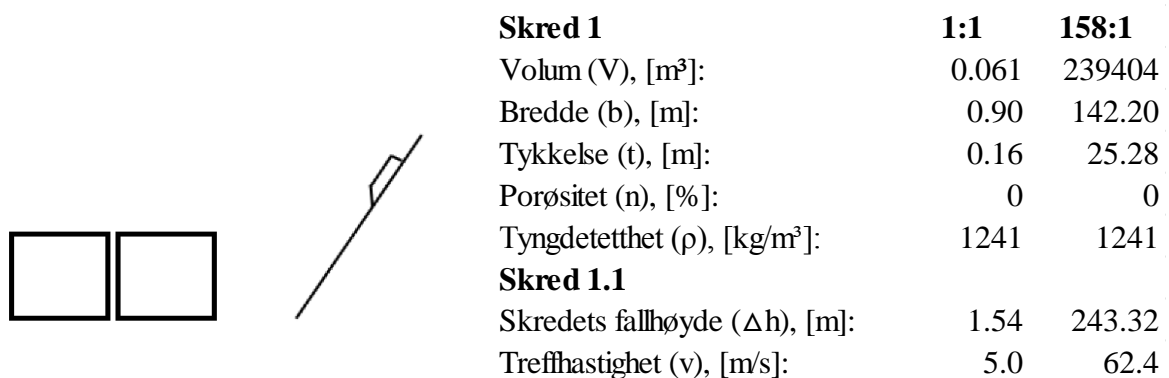
De fem første forsøkene blir kjørt med kompakte klosser i ulike posisjoner i forhold til hverandre. De to siste skredene blir kjørt med samme form som skred 1 og 2, men med en porøsitet på ~40 %. Under er det laget en oversikt over forsøkene med relevante parametere, slik at det blir lettere å skille de ulike skredene. Bildet for hvert skred viser hvordan klossene er festet i forhold til hverandre sett ovenfra, der den nedre delen av skredet utgjør fronten. Til høyre vises skredet sett fra siden, noe som viser tydelig at dersom skredene har samme

startposisjon, vil tyngdepunktet til skredet ha ulike avstander til vannoverflaten da skredet er større og lengre.

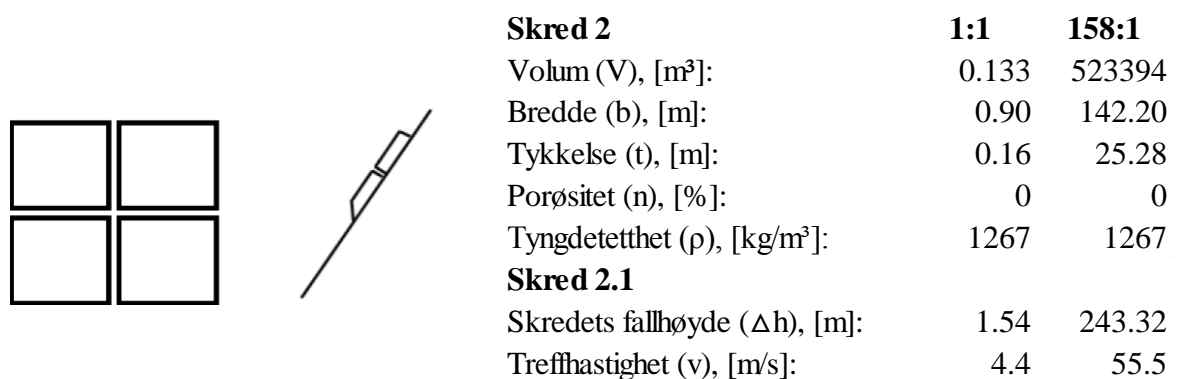
Usikkerhet i målinger

Det er viktig å kommentere usikkerheten i målingene som er tatt i modellen. Beregning av skredvolum er gjennomført ved hjelp av manuell måling av bredde, lengde og høyde. Det samme gjelder for nøyaktige mål av modellen, som ligger i vedlegg D. Målingene antas å ha en usikkerhet på $\pm 0,5$ mm. For måling av skredets hastighet er det valgt å presentere verdien med ett tall bak komma, det vil si en maksimal usikkerhet på $\pm 0,05$ m/s. Dette regnes som en realistisk usikkerhet.

På de kommende sidene presenteres skredene som kjøres i modellen.



Figur 3.10 - Presentasjon av skred 1.



Figur 3.11 - Presentasjon av skred 2.



Skred 3

	1:1	158:1
Volum (V), [m ³]:	0.030	119702
Bredde (b), [m]:	0.45	71.10
Tykkelse (t), [m]:	0.16	25.28
Porøsitet (n), [%]:	0	0
Tyngdetetthet (ρ), [kg/m ³]:	1239	1239

Skred 3.1

Skredets fallhøyde (Δh), [m]:	1.77	279.66
Treffhastighet (v), [m/s]:	5.0	62.5

Skred 3.3

Skredets fallhøyde (Δh), [m]:	0.75	118.50
Treffhastighet (v), [m/s]:	3.2	39.7

Figur 3.12 - Presentasjon av skred 3.



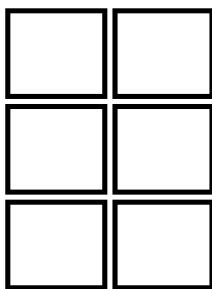
Skred 4

	1:1	158:1
Volum (V), [m ³]:	0.066	261697
Bredde (b), [m]:	0.45	71.10
Tykkelse (t), [m]:	0.16	25.28
Porøsitet (n), [%]:	0	0
Tyngdetetthet (ρ), [kg/m ³]:	1266	1266

Skred 4.1

Skredets fallhøyde (Δh), [m]:	1.77	279.66
Treffhastighet (v), [m/s]:	4.4	54.9

Figur 3.13 - Presentasjon av skred 4.



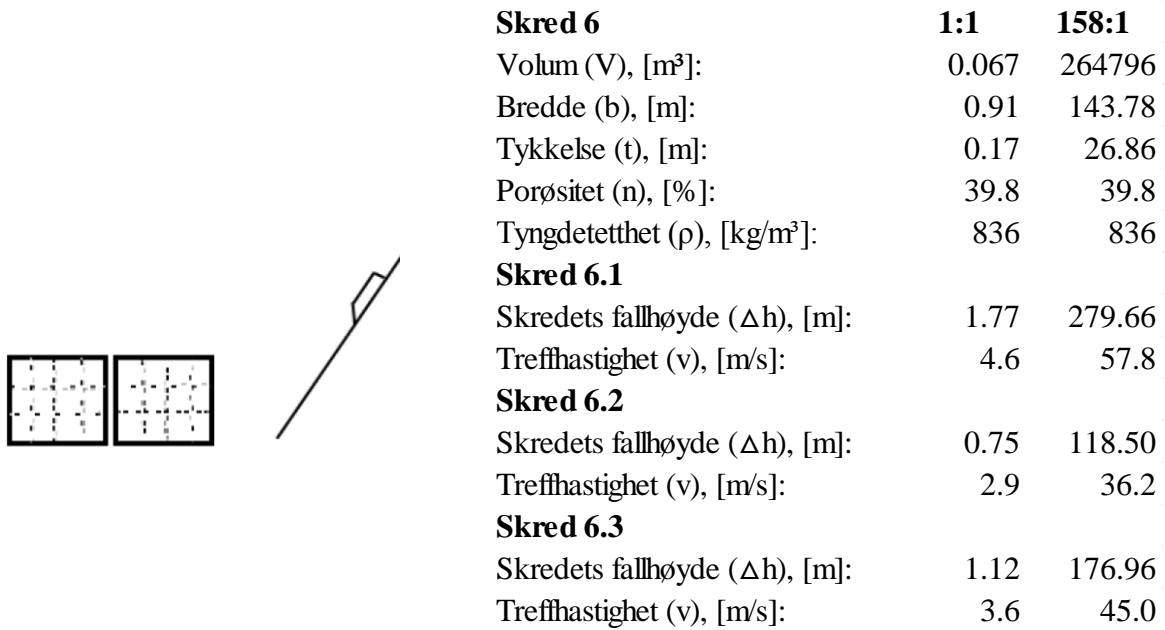
Skred 5

	1:1	158:1
Volum (V), [m ³]:	0.209	825134
Bredde (b), [m]:	0.90	142.20
Tykkelse (t), [m]:	0.16	25.28
Porøsitet (n), [%]:	0	0
Tyngdetetthet (ρ), [kg/m ³]:	1208	1208

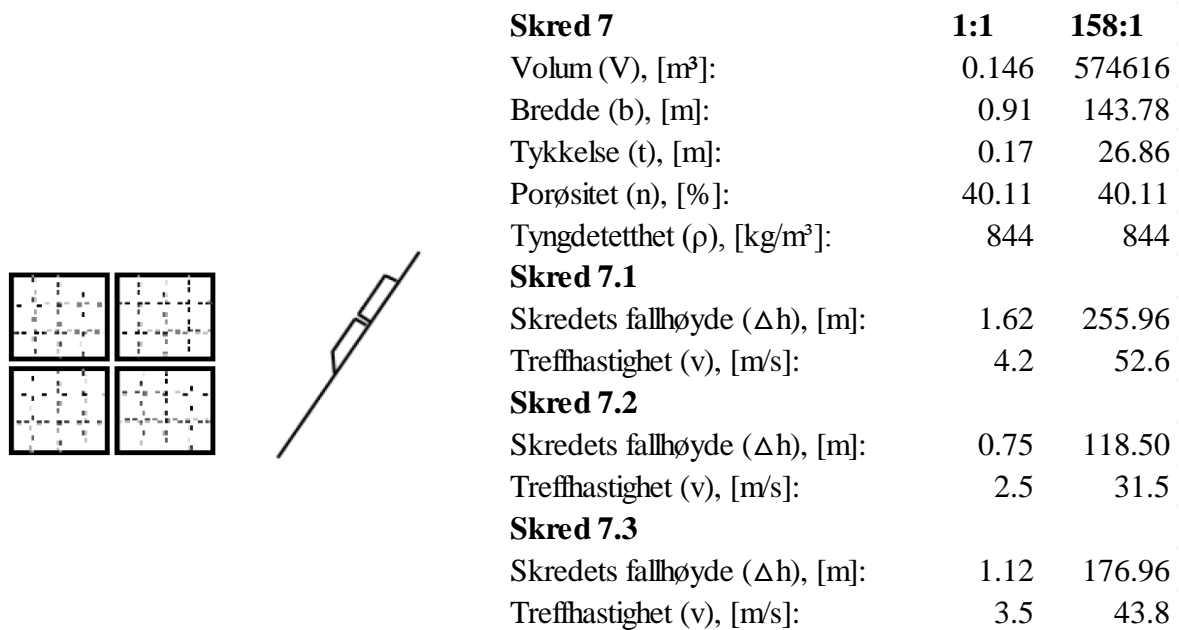
Skred 5.1

Skredets fallhøyde (Δh), [m]:	1.29	203.82
Treffhastighet (v), [m/s]:	4.2	57.2

Figur 3.14 - Presentasjon av skred 5.



Figur 3.15 - Presentasjon av skred 6.



Figur 3.16 - Presentasjon av skred 7.

4 Resultater og analyse


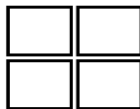


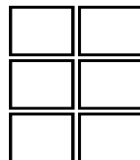


Hovedfokuset til denne oppgaven ligger i å finne en mulig sammenheng mellom skred og overtopping. I dette kapitlet presenteres resultatene fra modellforsøkene som ble presentert i kapittel 4. Modellforsøk. Verdiene vil først presenteres i en tabell, deretter blir det plottet i grafer for videre sammenligning. Til slutt vil det bli gjort rede for visuelle observasjoner og målte bølgeparametere.

Alle verdier er hentet fra masteroppgaven til Joakim Nordberg Svendsby (Svendsby, 2014). Verdiene er skalert opp til prototype (1 : 158), noe som kreves for å benytte beregningsmetoden til Heller (2009). Det er valgt å beholde verdiene i begge masteroppgavene like, slik at oppgavene samsvarer med hverandre.

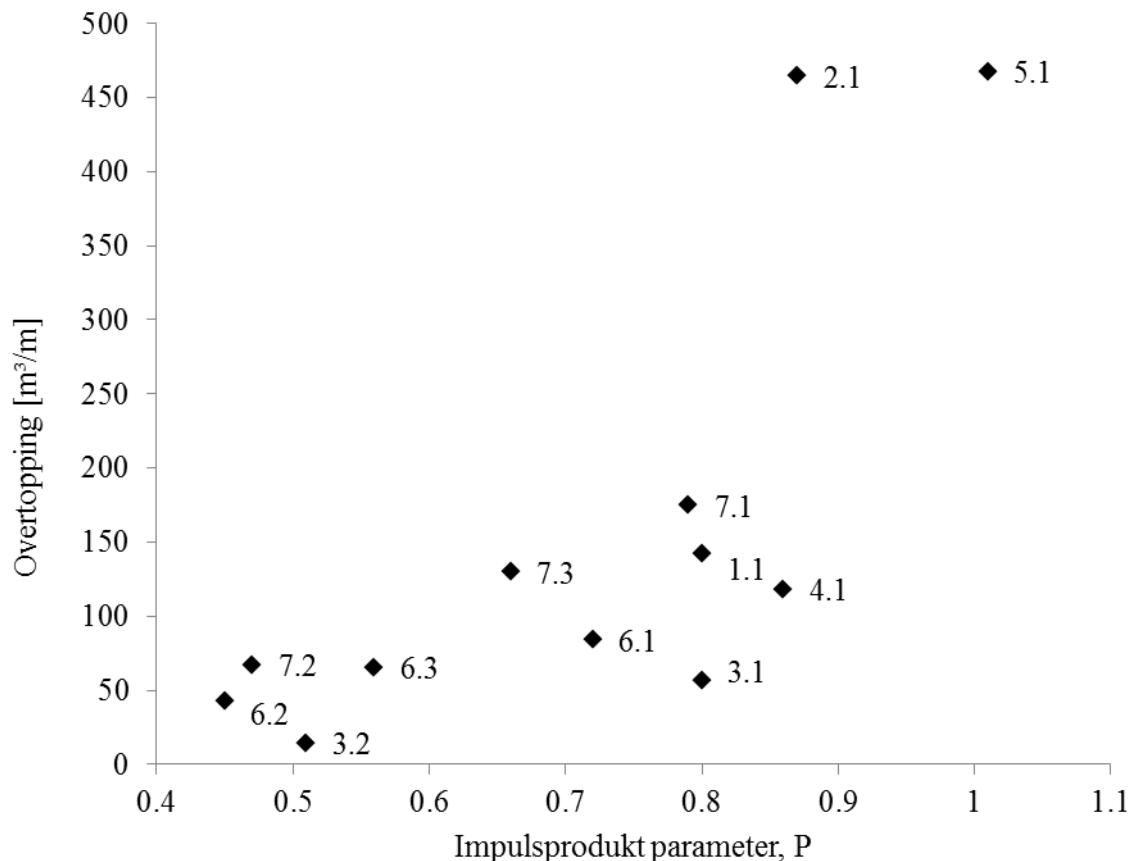
4.1 Impulsprodukt parameter og volum overtopping

Tabell 4.1 presenterer skredenes totale overtoppingsvolum per meter damlengde, og den utregnede impulsprodukt parameteren. Impulsprodukt parameteren er beregnet etter formel 2.2, som er presentert i kapittel 2.2.1. Tabellen finnes på neste side.

Tabell 4.1 - Resultatene fra hvert skredforsøk er presentert som volum overtopping per meter damlengde, og impulsprodukt parameter.

		Skred 1.1		
	Overtopping, [m ³ /m]	142.4		
	Impulsprodukt parameter [-]	0.80		
		Skred 2.1		
	Overtopping, [m ³ /m]	464.7		
	Impulsprodukt parameter [-]	0.87		
		Skred 3.1	Skred 3.2	
	Overtopping, [m ³ /m]	56.7	14.2	
	Impulsprodukt parameter [-]	0.80	0.51	
		Skred 4.1		
	Overtopping, [m ³ /m]	118.3		
	Impulsprodukt parameter [-]	0.86		
		Skred 5.1		
	Overtopping, [m ³ /m]	467.7		
	Impulsprodukt parameter [-]	1.01		
		Skred 6.1	Skred 6.2	Skred 6.3
	Overtopping, [m ³ /m]	84.1	42.7	65.3
	Impulsprodukt parameter [-]	0.72	0.45	0.56
		Skred 7.1	Skred 7.2	Skred 7.3
	Overtopping, [m ³ /m]	174.9	67.1	129.8
	Impulsprodukt parameter [-]	0.79	0.47	0.66

Tabell 4.1 viser at flere av skredene har samme impulsverdi som ett eller to av de andre skredene. Figur 4.1 presenterer den direkte sammenhengen mellom impulsprodukt parameteren på x-aksen og overtoppingen i volum per meter damlengde på y-aksen. Skredene er markert med sin spesifikke nummerering.



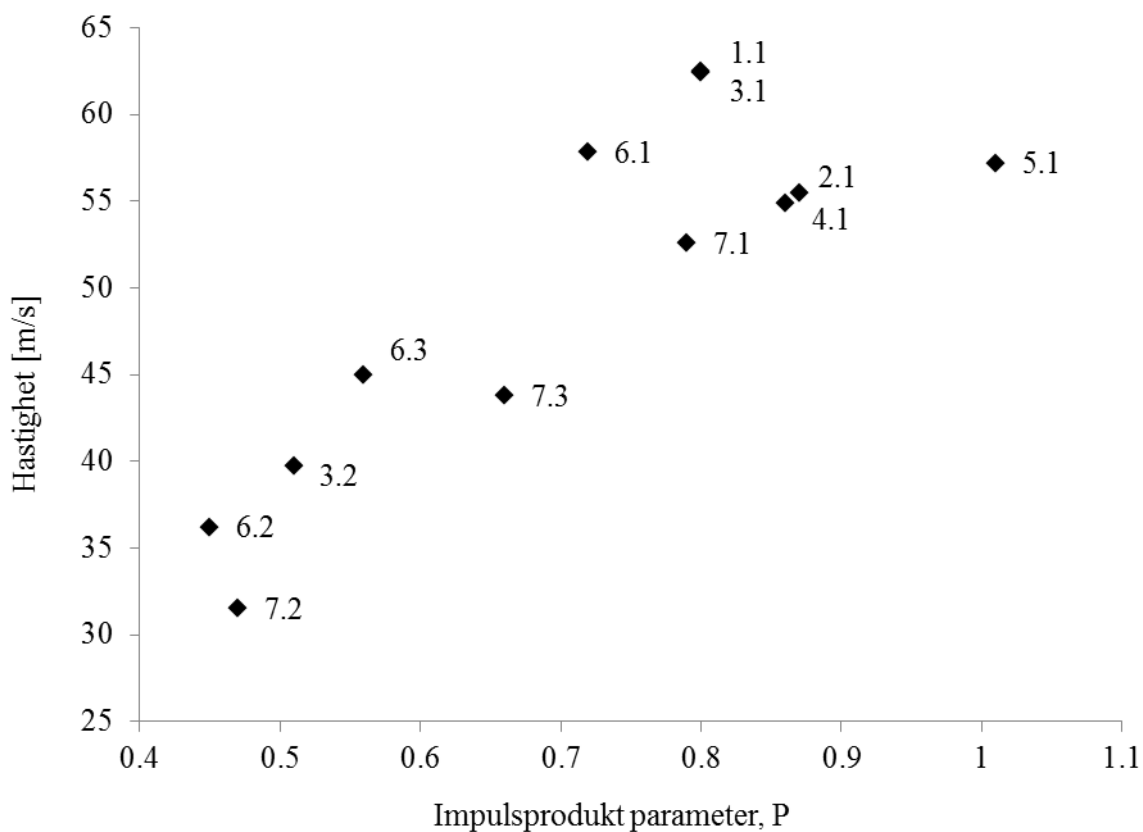
Figur 4.1 - Punktene representerer hvert sitt skred. X-aksen viser impulsparameteren, og y-aksen viser overtoppingen.

Ved studering av skredene 6 og 7, ser en tydelig at en høyere posisjon på skredrampen fører til en høyere impulsprodukt parameter og en større overtopping. Det samme observeres med skred 3.

Skred 2 og 5 har høyest impulsverdi og helt klart den største overtoppingen av samtlige skred.

Skred 4 har en høyere impulsprodukt parameter enn 1, men en mindre overtopping.

Skredets posisjon forteller at jo høyere startposisjon skredet har, jo høyere hastighet vil skredet ha i møte med vannoverflaten. Hastighet er en parameter som inngår i utregning av impulsprodukt parameteren. Skredenes hastighet og volum er tidligere presentert i kapittel 3.2. Figur 4.2 illustrerer sammenheng mellom hastighet og impulsprodukt parameteren.



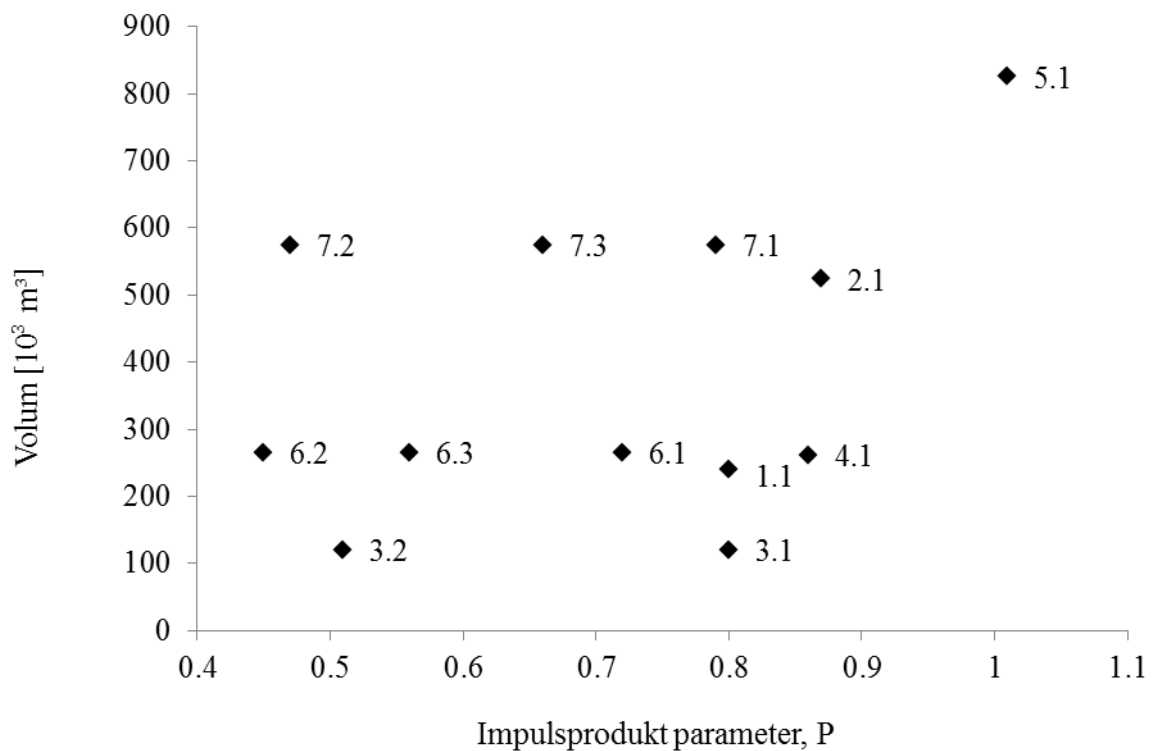
Figur 4.2 - Sammenheng mellom impulsparameter og hastighet.

Den nedre delen av plottet tilsvarer de skredene som er sluppet fra de to nederste posisjonene på skredrampen. Skred 1 og 3 oppnår den høyeste hastigheten av samtlige. Disse to skredene består av henholdsvis en og to skredblokker av fast materiale i bredderetning. Tyngdepunktet til disse to skredene vil derfor ha den høyeste startposisjonen. Skred 6.1 har samme plassering av tyngdepunkt, men siden skredet er av porøst materiale, vil vekten av skredet være lettere og dermed ha en lavere hastighet.

Skred 2 og 4 har fire og to blokker av fast materiale, plassert bak hverandre. Det fører til at tyngdepunktet vil ha en lavere startposisjon og dermed lavere hastighet i møte med vannoverflaten. Impulsparameteren for disse to skredene er derimot større.

Verdiene viser at skredene følger en stigende trend.

Det vil også være relevant å se på sammenhengen mellom volum og impulsparameteren, som presenteres i figur 4.3



Figur 4.3 - Sammenheng mellom impulsparameter og volum.

Skred 6 og 7 viser at impulsprodukt parameteren øker med en høyere startposisjon, noe som også er forventet. Denne grafen viser at ulike volum kan ha lik impulsverdi. For eksempel har skred 1, 3 og 7.1 nokså lik impuls, men helt forskjellig volum. Det samme kan observeres med skred 2 og 4. Grafen viser også at samme volum gir ulike impulsverdier. Skred 6 og 4 har likt volum, men gir ulike impulsparameter til vannet.

Skred 5 som er det klart største skredet i volum, har også den høyeste impulsverdien.

En nærmere analyse av resultatene vil bli gjennomført i kapittel 5 Diskusjon.

4.2 Bølgeutbredelse

Ved kjøring av forsøkene ble det filmet i ulike vinkler, for å få et helhetsinntrykk av hva som skjer på vannoverflaten når skredet dykkes og dammen overtoppes. Ved å bruke video, kan en fryse øyeblikkene slik at bevegelsene blir mer tydelig. I dette kapittelet blir i hovedsak tre videoer beskrevet, som kan finnes som vedlegg i oppgaven. For mer utfyllende bilder som beskriver steg for steg for bølgegenerering og overtopping, se vedlegg F og G.

Bølgevideo 070314-2-1.1 filmer utløpssonen til skredet, sett fra siden. Første bevegelse er at skredet bryter vannoverflaten, noe som fører til at vannet spruter høyt. Samtidig heves vannoverflaten umiddelbart, og danner den første bølgefronten. Ettersom skredet glir lenger ned i vannet, dannes det et hulrom bak som umiddelbart tettes igjen fra hver sin side bak skredet. Når disse bølgene møtes, observeres det bølgesprut. Dette fører også til at det blir dannet mye hvitt bølgeskum der deler av vannet lander på skredrampen og renner tilbake i magasinet igjen. Denne bevegelsen genererer bølge nummer 2.

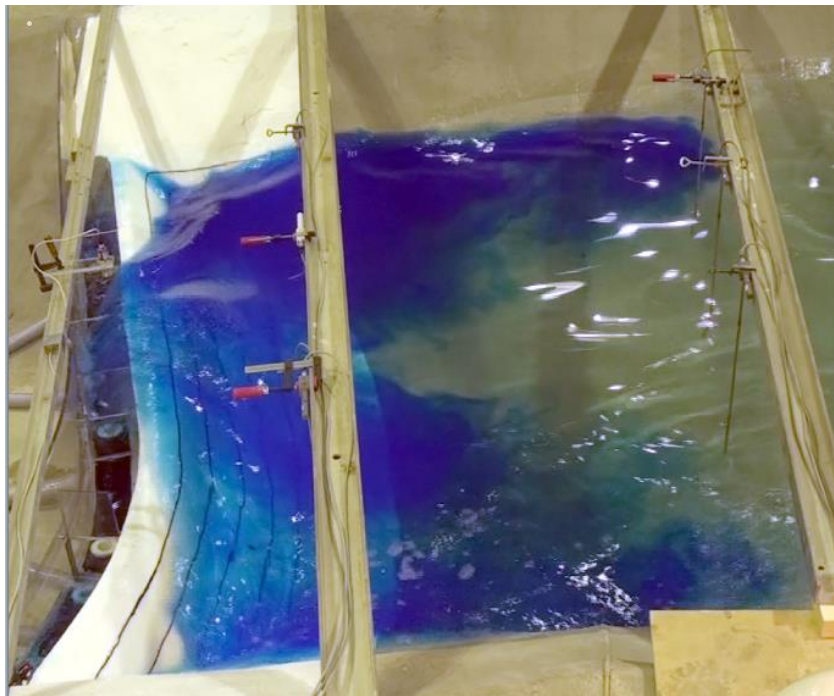
Videre kan en se at den første bølgefronten tar form og bres ut som en sirkel med skredet i sentrum. Rett bak, genereres bølgetopp nummer to. Her observeres det en tydelig hvit bølgefront med lik utbredelse som den første bølgen, men en noe mer urolig bølgefront. Den første bølgen går rett i magasinkanten på motsatt side av skredrampen, og reflekteres tilbake mot neste bølgefront. Bølgefront nummer to møter dermed refleksjonen av bølgefront en før den også treffer magasinkanten. En ser tydelig at vannet går opp langs sidekantene når bølgefronten møter kanter, og at vannet går langt ned når bølgen reflekteres tilbake i magasinet. De reflekterte bølgene fra sidekanten brer seg utover i en sirkel, slik som bølgene som ble generert fra skredet. En kan ikke observere flere tydelige bølgefronter som genereres, men derimot en urolig vannoverflate.



Figur 4.4 - Tydelig bølgefront som representerer den første genererte bølgen. Bølgespruten kommer av vannet som møtes bak skredet for å fylle tomrommet som dannes når skredet dykkes.

Det finnes videoer av overtoppingen ved dammen sett ovenfra for nesten alle skredene. Ved nøye studering av vannet som går over dammen kan en observere hvilken bølge som gir mest overtopping, og hvor mange tydelige bølgefronter som går over dammen. Rett etter skredet har rast ut i vannet, går det en jevn impulsbølge mot dammen. Ved studering av skred 1 som

består av to skredblokker, fører denne første bølgen til ingen overtopping, men en liten heving av vannoverflaten like ved dammen. Deretter trekker vannet seg tilbake før vannet skylls over dammen i begge sidekantene. Dette er den første overtoppingen til de minste skredene. Overtoppingen fullføres med en mellomstor bølge som går over på midten. Videre kommer bølge nummer to som følger samme mønster, med at vannet først trekkes tilbake, før det skjer en overtopping på sidene som blir etterfulgt av en nokså stor bølge på midten. Dette er bølge nummer to og antas å gi den største overtoppingen, illustrert i figur 4.5. Etter denne bølgen skjer det en mer uryddig overtopping som gjør det vanskelig å observere noen trend. Ved studering av de større skredene 2 og 5, vil den helt første bølgen, som bare førte til en overflateheving for skred 1, være den første overtoppingen. Denne første bølgen går jevnt fordelt over damlengden i motsetning til de neste bølgene som følger samme struktur som for skred 1. For skred 2 og 5 er det dessuten mer vann i bevegelse og mer overtopping. Det er valgt å definere den første overflatehevingen til skred 1 som bølge nummer en. Da viser observasjonene at det går tre tydelige bølger mot/over dammen for samtlige forsøk.



Figur 4.5 - Bølge nummer 2 for skred 1, som fører til den største overtoppingen. Vannet på sidekantene er trukket tilbake.

Bølgevideo 300314-1-5.1 filmer overtoppingen fra bak dammen, slik at vannets overflate sees horisontalt. En ser at den første bølgen slår rett i sidekanten av magasinet på motsatt side av skredrampen. Den reflekteres tilbake, og kolliderer med bølge nummer to. En ser en tydelig bevegelse av at vannet går fra side til side i magasinet før noe av vannet til slutt går over dammen. Videoen viser også tydelig at den første bølgen er helt jevn og går samtidig over dammen. Videre kommer vann på sidene av dammen før det går over på midten. Slik gjentar det seg en gang til før det blir en mer uryddig overtopping.

Ved å studere bølgevideo 300314-1-5.1 fra skred 5, er det funnet ut omtrentlige sekunder som bølge nummer en og tre bruker fra skredet møter vannoverflaten til dammen blir overtoppet. Dette vil være et grovt overslag, som vil indikere kritisk tidsrom og bølgens hastighet.

Tabell 4.2 - Indikerer hvor lang tid det går før dammen overtoppes i modellen.

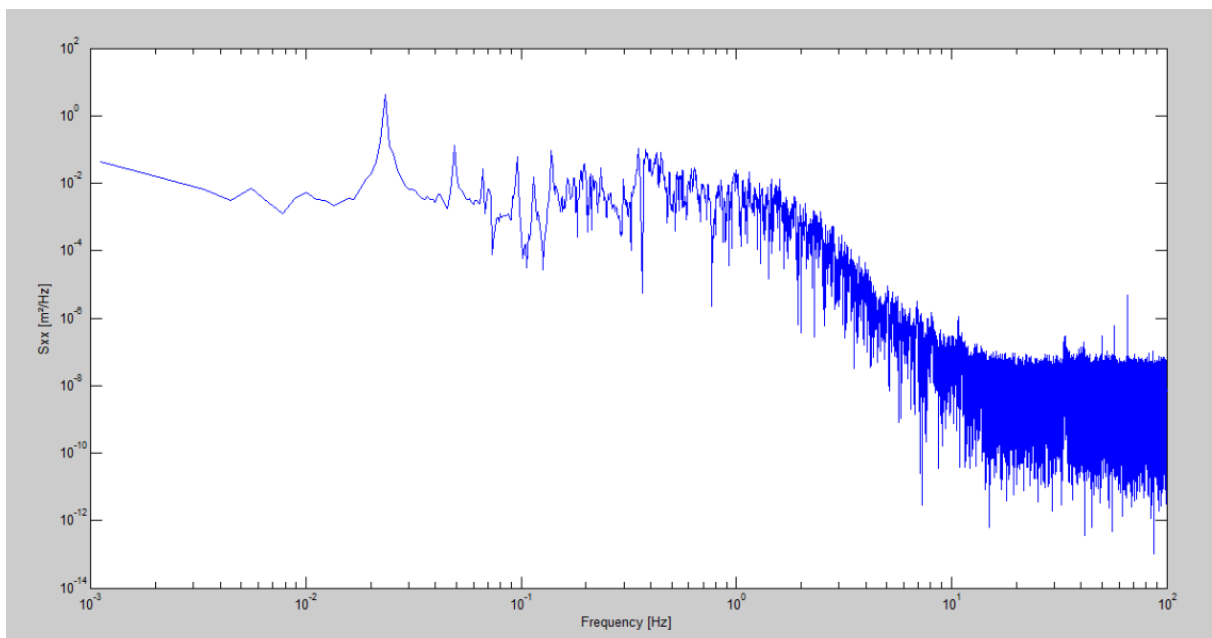
Bølge	Tid [sek]	Avstand [m]	Hastighet [m/s]
1	3.91	6.40	1.64
3	8.84	6.40	0.72

Tallene vil evalueres i kapittel 5.2.4.

4.2.1 Spektralanalyse

Det er benyttet matlab og algoritmen Fast Fourier transformasjon (FFT), for å gjennomføre en spektralanalyse av verdiene fra bølgesensorene for skred 5, 6.1 og 7.1. Det største skredet på seks klosser er skred 5.1, mens 6.1 og 7.1 er av porøst materiale på to og fire blokker.

Spektralanalysen er plottet med frekvens [Hz] på x-aksen, og energimengde [m^2/Hz] på y-aksen. Resultatet av analysen viser en tydelig frekvenstopp på 0,02333 Hz, som vil tilsvare en bølgeperiode på $T = 1 / 0,02333 = 42,8$ sekunder. Denne toppen går igjen for alle bølgesensorene som er undersøkt. For bølgesensorene nærmest dammen, ser en tendens til at frekvenstoppene med en høyere frekvens, øker. En interessant observasjon er at frekvenstopp nummer to er en dobling av frekvenstopp nummer en. Videre finnes topp tre ved dobling av nummer to. Plottet viser også et energiplatå opp til en frekvens på cirka 1,22, som tilsvarer en bølgeperiode på 0,82 sekunder.



Figur 4.6 - Skisse av spektralanalysen for bølgesensor 1, skred 5. Resultatene vises i logaritmisk skala, med frekvens på x-aksen og energimengde på y-aksen. Den høyeste frekvenstoppene vises tydelig.

5 Diskusjon

Det vil bli foretatt en vurdering av de mest relevante resultatene, der skredets hastighet, volum, form og porøsitet vil være sentrale tema. Observasjoner av bølgenes utbredelse vil bli sett på i sammenheng med skredene. Til slutt vil det drøftes mulige feilkilder i modellforsøkene, og modellens relasjon til virkeligheten. Det vil også forslås videre arbeid på grunnlag av dette prosjektets resultater.

5.1 Skredparametere

5.1.1 Hastighet

Ved studering av figur 4.2, ser en at en høyere hastighet gir en større impulsparameter. En ser derimot eksempler som viser at noen av skredene med høyere impulsparameter, ikke har høyere hastighet. Dette gjelder fra skred 1 til 2, 3 til 4 og fra 6 til 7, da de nevnte skredene øker i volum i stedet. En mer nøyaktig studering av grafene presentert i kapittel 4.1, gir en interessant observasjon. Skred 2 og 4 har nesten helt lik impulsprodukt parameter og hastighet, men skred 2 gir høyere overtopping og har samtidig større skredvolum. Samme trend følges med skred 1 og 3.1, som har lik impulsprodukt parameter og hastighet, men skred 1 har større skredvolum og gir dermed høyere overtopping. Disse resultatene kan tyde på at volum har betydning for hvor mye vann som går over dammen. Det vil derfor være interessant å se nærmere på skredenes volumendring.

5.1.2 Volum

Dersom en velger å se nærmere på skredene som øker i volum vil 1, 2 og 5 være et bra utgangspunkt. Skred 1 består av to blokker, skred 2 av fire og skred 5 av seks. Som en kan se av tabell 4.1, er blokkene plassert to og to bak hverandre, noe som betyr at volumøkningen mellom skredene øker i *lengderetningen*. Det er foretatt en beregning av forholdet mellom hver volumøkning, som er presentert i tabell 5.1. I sammenligning nummer 1 er verdiene for hastighet, volum og overtopping for skred 2 delt på tilsvarende verdier for skred 1, som gir forholdstallene. Det samme gjøres mellom 2 og 5. Skred 3 og 4 er også med, ettersom volumet mellom disse to skredene også øker i lengderetning fra en til to klosser.

Tabell 5.1 - Sammenligningsforhold mellom skred med volumøkning i lengderetning.

Nummer	Skred som er sammenlignet	Hastighetsforhold	Volumforhold	Overtoppingsforhold
1	2.1 / 1.1	0,89	2,18	3,26
2	5.1 / 2.1	1,03	1,57	1,01
3	4.1 / 3.1	0,88	2,18	2,09

Sammenligning nummer 1 og 3 viser at en dobling av volum, vil gi minst en dobling av volum vann som går over dammen. Mellom skred 1 og 2 øker overtoppingen med en faktor på 3,26. Det kan være to grunner til at denne verdien er så høy. Den ene kan være at verdiene til skred 2 er en feilkilde, som vil drøftes videre i kapittel 5.3. Den andre kan være at skred 2, på grunn av dets form, vil gi det største utslaget i overtopping. Ettersom skred 2 er utformet med en kvadratisk grunnflate, vil massen av dette skredet være jevnt fordelt rundt tyngdepunktet, noe som kan føre til at møtet med vannoverflaten blir kort og intenst. I tillegg kan det antas at de bakerste blokkene ikke bremses noe særlig av de to fremste.

Som tabell 5.1 viser, er overtoppingen lik for skred 2 og 5, det vil si forholdstall lik 1, selv om skred 5 har en større utstrekning i lengderetning med to ekstra blokker. Det kan tyde på at når volumet øker ytterligere i lengderetning, vil de første klossene som treffer vannoverflaten bremse skredets hastighet. Det vil si at når de bakerste klossene treffer vannoverflaten vil hastigheten være så lav at de ikke vil gi en stor innvirkning på overtoppingen. Dette indikerer at en økning i overtoppingen vil konvergere ettersom skredets volum øker i lengderetningen.

Resultatene som skred 2 gir, tyder på at et skred som er konsentrert i form med lik bredde og lengde, i tillegg til å ha et nokså stort volum, vil gi den klart største overtoppingen. Skredet vil i virkeligheten være $523\,394\text{ m}^3$ av fast materiale med en tetthet som er omtrent halvparten av det vanlig stein tilsvarende. Overtoppingen vil tilsvare et totalt volum på $464,7\text{ m}^3 * 380\text{ m} = 176\,586\text{ m}^3$ vann som går over dammen når vanddybden ligger på høyeste regulerte vannstand (HRV). Ved Viddalsmagasinet er det potensielle skredet en hel del større enn det som er kjørt i modellen. Verdiene gir likevel et grovt overslag over vannvolumet i forhold til skredvolumet.

En videre analyse av volumøkningen, vil være å se på skredene som øker i volum i *bredderetningen*. Tabell 5.2 viser forholdstallene mellom skred 1 og 3, som øker fra en til to klosser, og mellom 4 og 2, som øker fra to til fire.

Tabell 5.2 - Sammenligningsforhold mellom skred med volumøkning i bredderetning.

Nummer	Skred som er sammenlignet	Hastighetsforhold	Volumforhold	Overtoppingsforhold
4	1.1 / 3.1	1,00	2,00	2,51
5	2.1 / 4.1	1,01	2,00	3,93

I sammenligning 4 og 5 vil det også skje en endring i skredets front, som følge av en volumøkning i bredderetning. Forholdstallene viser at en dobling i volum, gir godt over en dobling i overtopping, med en faktor på 2,51. Skred 2 kan også her føre til at forholdstallene er uvanlig høye, men tendensen er uansett tydelig. Tallene tyder på at en endring i skredets front også har betydning for hvor mye vann som går over dammen. Det vil derfor være vesentlig å se på forskjellen mellom overtopping ved endring av fronten.

Skred 1 og 4 består begge av to skredklosser. Skred 1 består av to frontklosser i bredden, med en bredde på 0,9 meter, mens skred 2 har en frontkloss og en vanlig kloss som er plassert bak

hverandre i lengderetning, med en bredde på 0,45 meter. Forholdstallene presenteres i tabell 5.3.

Tabell 5.3 - Sammenligningsforhold mellom skred med ulik front.

Nummer	Skred som er sammenlignet	Hastighetsforhold	Volumforhold	Overtoppingsforhold
6	1.1 / 4.1	1,14	0,91	1,20

Tallene viser at skred 1 har noe mindre skredvolum enn skred 4. Grunnen til dette er at frontklossene har en skrå front som fører til at volumet er litt mindre. Verdiene for overtopping viser derimot at skred 1 har 20 % større overtopping enn skred 4. Da skred 1 treffer vannoverflaten med en dobbelt så stor flate som skred 4, kan resultatene tyde på at skredets bredde har en viss innvirkning på overtoppingen.

5.1.3 Porøse skred

Felles for de porøse skredene er at impulsprodukt parameteren er lavere enn for skredene med fast materiale, og de utgjør dermed nedre del av x-aksen i grafene presentert i kapittel 4.1. Skred 1 og 6 har helt lik form og størrelse med to frontklosser ved siden av hverandre, der skred 1 består av fast materiale og skred 6 har en porøsitet på ~40 %. Samme forholdet gjelder mellom skred 2 og 7, der skredene består av fire klosser hver. Resultatene viser at skred 1 gir en overtopping som er ~1,7 ganger større enn det skred 6 gir. Samme trend vises mellom skred 2 og 7, der skred 2 gir en overtopping som er ~2,6 ganger større enn skred 7. Tallene viser at skred av fast materiale gir en større overtopping enn et porøst materiale, og at forskjellen er større ved større volum. Grunnen til dette kan være at vannet vil trenge inn i et porøst materiale slik at mindre vann blir presset bort. Dette vil dermed dempe bølgegenereringen.

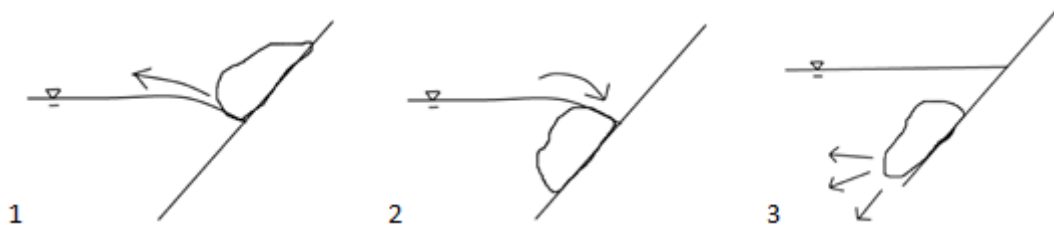
Det var kun de porøse skredene, i tillegg til skred 3, som ble kjørt i ulike posisjoner på skredrampen. Det går tydelig frem av grafene i kapittel 4.2. at en høyere posisjon gir en høyere impulsprodukt parameter. En høyere posisjon på skredrampen vil føre til at skredet har en høyere fallhøyde og dermed en større hastighet når det treffer vannoverflaten. Dette vil også føre til en større overtopping.

5.2 Bølgegenerering og refleksjon i magasinet

5.2.1 Bølgegenerering

I modellen observeres det tre tydelige bølger som går over dammen. Det er i forbindelse med resultatene fra Åkenes-prosjektet beskrevet tre mulige bølgegenereringsmekanismer som også kan være relevant for denne modellen (Lothe, 2014). De tre stegene vil presenteres i figur 5.1. Første steg i figuren illustrerer støtet mellom skredfronten og vannet. Skredet vil fortrenge vannet, og den første impulsbølgen som registreres i magasinet dannes. Videre viser steg 2 at vannet vil fylle tomrommet som dannes bak skredet når det dykkes. Dette kan observeres tydelig, ved at vannet som kommer inn fra sidekantene møtes og danner bølgesprut i midten.

Når skredet er helt dykket, i steg 3, vil det fortsatt gli helt til bunnen av magasinet. Da vil vannet presses framover, og den siste bevegelsen vil derfor kunne samsvare med et undersjøisk skred.



Figur 5.1 - Mulig bølgedannelse for et fjellskred.

Bølgegenereringen i trinn 1 skjer på grunn av den vannmotstanden skredet får i møtet med vannet. Denne motstanden antas å variere med hvilken kraft eller hastighet skredet kommer med. Hastigheten vil være avhengig av ruhet mellom skred og underlag, helning på skråningen og form og størrelse på skredet. Trinn 2 vil oppstå dersom det er så dypt at skredet dykkes helt. Det samme gjelder for trinn 3.

5.2.2 Avstand skred-dam

En kan anta at bølge nummer en som er den første overtoppingen, og bølge nummer tre, som er den største synlige bølgen, vil ha størst innvirkning på dammen som konstruksjon. Det vil derfor være relevant å skalere opp verdiene for å gjøre et grovt anslag over hvor lang tid det vil ta før dammen i verste fall kollapser etter skredet er utløst. Dersom en skalere opp hastigheten som er beregnet i modellen vil en kunne anslå omtrentlig tid bølgen vil bruke i Viddalsmagasinet. Froudes modellov er presentert i forbindelse med prosjektoppgaven av Lorås (2013), og benyttes i oppskalering av verdiene fra modellen. Siden forholdstallet allerede er gitt i prosjektoppgaven, vil det ikke forklare nærmere hvordan beregningen gjennomføres. Froudes modellov gir følgende hastighetsforhold; 1 : 12,6.

Tabell 5.4 – Indikerer hvor lang tid det tar før dammen overtoppes i prototypen.

Hastighet [m/s]	Avstand [m]	Tid [sek]	Tid [min]
20.57	1730	84.09	1.40
9.10	1730	190.14	3.17

Det går nesten ett og et halvt minutt før første bølge treffer dammen. Videre går det i overkant av tre minutt fra skredet treffer vannoverflaten til den største og sannsynligvis mest kritiske bølgen treffer dammen. Den største bølgen vil dermed tilsvare en hastighet på cirka 33 km/t. Det vil gå enda lengre tid før dammen i verste fall kollapser, og før vannet treffer eventuell bebyggelse og infrastruktur nedstrøms. Resultatene kan tyde på at et tilstrekkelig varslingsystem vil kunne gjøre det mulig å evakuere eventuell menneskelig aktivitet nedstrøms dammen.

5.2.3 Overflateheving og refleksjon

Som nevnt observeres det tre tydelige bølger som går over dammen. Den første bølgen fordeles jevnt over dammen, noe som tyder på at den ikke er påvirket av refleksjon i magasinet. Den neste bølgen går over dammen på sidene før det går en konsentrert bølge over midten av dammen. Tilsvarende for bølge nummer tre. De to siste bølgene tyder på at overtoppingen påvirkes av refleksjon i magasinet, da den tredje bølgen er den største. En hypotese kan være at bølgeperioden til den første eller andre bølgen treffer dammen samtidig som den siste bølgen, slik at summen av bølgetoppene slås sammen ved hjelp av superposisjonsprinsippet. For å bekrefte dette må det gjennomføres en mer nøyaktig analyse av bølgeutbredelsen i magasinet.

Bølgegrafene samsvarer med det som er observert på videoen, at overtoppingen skjer på sidene og deretter på midten av dammen. Dette kan studeres ved å se på for eksempel verdiene fra bølgesensorene fra skred 5, se vedlegg. Bølgesensor 7 og 9 som befinner seg nærmest dammen på hver sin side og viser en forhøyning før det samme skjer i sensor 8, som da er plassert i midten. Plottene viser også at vannoverflaten beveger seg opp og ned gjentatte ganger jo nærmere vannet kommer dammen. Dette tyder på mer refleksjon, og en mer urolig vannoverflate.

Vannets fordeling over dammen kan også ha en sammenheng med dammens krumning. Der dammen krummer, skjer det en svært liten overtopping, i motsetning til i sidekantene og i midten. Det kan se ut som at vannet skyves bort fra den delen der dammen krummer mest og bort til sidene eller midten. Forholdet mellom dammens krumningsradius og bølgelengden kan være av betydning her.

5.2.4 Spektralanalyse

Som forklart under resultater, viser spektralanalysen at frekvensene har en harmonisk sammenheng med at en dobling av frekvenstopp 1 gir frekvenstopp 2, og videre en dobling av frekvenstopp 2 gir frekvenstopp 3. Analysen viser også at laveste frekvens med den lengste bølgeperioden gir høyest energi rett etter skredgenereringen, men at dette endres nærmere dammen, da det er flere frekvenser med høy energi.

En mer nøyaktig og utfyllende analysering av bølgenes utbredelse, inkludert spektralanalyse, er under utarbeidelse av Daniela Vollmer.

5.3 Feilkilder

Det er god grunn til å undersøke nærmere verdiene fra skred 2, ettersom overtoppingen er svært stor i forhold til de andre skredene. Verdien for overtopping som er brukt i oppgaven, er et gjennomsnitt av i alt tre forsøk med samme skredtype, startposisjon og volum. En nærmere undersøkelse av resultatene viser at overtoppingen fra de tre forsøkene har standardavvik på $33,86 \text{ m}^3/\text{m}$, som utgjør 7,2 % av gjennomsnittsverdien. Ettersom avviket ikke er oppsiktsvekkende, er det grunn til å tro at verdiene for hvert forsøk stemmer. Forsøkene er kjørt etter hverandre, noe som betyr at det kan være samme feilkilde for alle tre forsøkene. Dette kan for eksempel være at magasinnivået var noe høyere enn vanlig. Det ble ikke målt dybdemålinger for hvert forsøk, som kan bekrefte eller avkrefte feilkilden. Et lite avvik i

vanndybde vil kunne gi store utslag i volum overtopping. Skred 2 var et av de første skredene som ble gjennomført, en kan derfor ikke utelukke en mulig nybegynnerfeil.

En feilkilde som ble oppdaget underveis i forsøkene var at enkelte skred ga store forskjeller i hastighet. Det kan være flere grunner til dette. En grunn kan være at skredet og skredrampen er tørr første gang det kjøres forsøk. Etter skredet heises opp igjen for å gjennomføre neste forsøk, vil det være vann fra skredet som renner nedover skredrampen. Det kan føre til at friksjonen blir mye lavere når skredet skal gli ved neste forsøk. En måte å unngå dette på, kan være å slippe skredet en gang før første forsøk, slik at skredet alltid vil være litt vann som skredrampen.

Ved måling av overtopping, vil det i noen tilfeller være resterende vann i kamrene. Ettersom sluket er et par millimeter høyere enn bunnen i kammeret, vil dette kunne utgjøre en liten mengde vann i modellen som ikke blir med i bøttene og dermed i beregningen, dog en større mengde i oppskalert verdi. Det kan være lurt å måle hvor mye vann dette utgjør, og dermed addere ekstra volum de gangene forsøket starter med tørre kamre. Dette ble ikke tatt hensyn til i dette prosjektet.

Som forklart i presentasjon av modellen i kapittel 3, er det festet en lasermåler omtrent midt på dammen. Denne hadde som funksjon å måle overtoppingshøyden i det punktet det så ut som overtoppingen var høyest. Dette ga derimot varierende verdier, og det ble bestemt at dette ble for unøyaktig til å kunne bruke i videre analyser.

5.3.1 Relatert til virkeligheten

Modellen har en skala på 1:158, som sier at modellen er nokså stor. Jo nærmere realistiske verdier en får i modellen, jo bedre er resultatene. I dette kapittelet vil det drøftes hva som bør være med i en vurdering av hvor realistisk modellen er.

Skredet som blir kjørt i modellen består av en eller flere blokker, som forklart tidligere i oppgaven. Blokkene som er plassert fremst har litt mindre volum enn de bak, og har i tillegg en vinklet front som gjør at møtet med vannoverflaten blir mildere. I et virkelig skred vil det mest sannsynlig falle ut noen steiner eller mindre blokker før det største raset går. Det vil igjen føre til at vannet allerede er i bevegelse når det største raset ankommer, slik at påvirkningen til skredet ikke blir mot en helt stille vannoverflate. En kan anta at dette kan relateres noe til den skrå fronten som skredet i modellen har, da en skrå front vil redusere påvirkningen av vannoverflaten før det resterende skredet blir neddykket.

Når et skred i virkeligheten opptrer som en masse, vil dette som nevnt kunne føre til verste scenario med katastrofale konsekvenser. Det er derfor denne situasjonen som er ønskelig å kartlegge mulige utfall av. Løsmasseskredet har samme form og volum som skredblokkene av fast materiale. I og med at skredmassene er begrenset innenfor en stram stålnetting, vil de ikke ha fri bevegelse. Skredene som kjøres i modellen er antatt å ha en god tilnærming til virkeligheten, da skredmassen som oppstår med flere små blokker, vil ha en mye lavere totalbelastning i møte med vannet.

Rett ved skredets utløpssone i modellen er det et lite nes, som fører til at bølgene som genereres blir påvirket i hvilken retning de bres utover vannet i. Det er mulig at en lignende situasjon skjer i virkeligheten. Det kan derimot være viktig at man er klar over de påvirkningene dette medfører. En gjennomføring av forsøk, der grensebetingelsene er like, vil gjøre gjennomføringen av hvert forsøk ryddig og det vil være enklere å sammenligne resultatene om hverandre. Et eksempel er at skredene i modellen løses ut på den samme skredrampen slik at møtet med vannet er nokså likt for hvert forsøk.

5.4 Videre arbeid

Som nevnt er det foreslått tre mulige bølgegenereringsmekanismer. Det vil være interessant å se nærmere på disse tre stegene, ved å isolere hvert enkelt steg. For eksempel kan det kjøres skred der bare fronten av skredet blir dykket, for å finne bølgegenerering 1 i figur 5.1. Videre kan skredet løses ut med fronten dykket i vannet, slik at kun bølgegenerering 2 blir aktivert. I tillegg kan det være relevant å se på effekten av et undersjøisk skred, der hele skredet løses ut når det er dykket. Resultatene av disse forsøkene vil være svært relevant for videre arbeid i modellen.

I forbindelse med isolering av de tre stegene, som nevnt over, kan det være interessant å se nærmere på hastigheten når skredet dykkes. For eksempel kan det være interessant å se om hastigheten bremses mye når skredet er langt, slik at de bakerste klossene har lavere hastighet enn de fremste.

Det vil også være relevant å se nærmere på overtoppingen. Det kan være lurt å finne en måte å måle intensiteten av overtoppingen, i tillegg til overtoppingshøyde. For eksempel vil en montering av flere lasermålere måle snitthøyden over dammen. Da vil en registrering i lasermålerne indikere at det skjer en overtopping, slik at også den totale varigheten kan finnes. En slik måling vil også gjøre det mulig å finne intensiteten av hver enkelt bølge som går over dammen.

Det er nødvendig å nevne at spektralanalysen som er gjennomført i denne oppgaven bør gjøres grundigere. Det tyder på at noe kan ha gått feil i analysen, ettersom at plottet ble nokså rotete. Det kan være en løsning å foreta en nøyere filtrering av data, for eksempel ved å dele inn spekteret i tidssoner.

6 Konklusjon

Det kommer fram av resultatene at de skredene med størst skredvolum også gir den største overtoppingen. Dette er som forventet, ettersom et større skred vil fortrenge mer vann når skredet dykkes.

Resultatene indikerer at en dobling av skredvolumet vil gi minst en dobling av overtoppingen, men at økningen av overtopping avtar når skredvolumet blir veldig stort i lengderetning.

Ved en økning av volum i bredderetning, vil overtoppingen øke så mye at det er grunn til å anta at skredets form er av betydning. For to skred med samme volum, vil skredet med bredest front, som betyr at en større del av skredet treffer vannoverflaten samtidig, føre til den største overtoppingen.

Det er også testet forskjellen mellom porøst og fast skredmateriale. En kan konkludere med at et skred med en høyere porøsitet vil føre til at et mindre vannvolum går over dammen. Dette forklares med at vannet vil kunne trenge inn i skredet slik at mindre vann må fortrenkes når skredet dykkes. Et porøst materiale vil derfor dempe genereringen av bølger.

Ved studering av bølgeutbredelsen, var det tre tydelige bølger som gikk mot eller overtoppet dammen for samtlige skred. Den tredje bølgen førte mest sannsynlig til den største overtoppingen.

Verdier fra bølgesensorene viser at vannet blir mer urolig nærmere dammen. Dette tyder på refleksjoner i magasinet.

Referanseliste

Asphjell, A., 2008. *Teknisk Ukeblad; Åknesraset kan bli tre ganger større enn antatt.*

[Internett]

Available at: <http://www.tu.no/klima/2008/05/13/aknesraset-kan-bli-tre-ganger-storre-enn-antatt>

[Funnet Mai 2014].

Bjørn Gjevik et.al., 2005. *Universitetet i Oslo, Matematisk Institutt.* [Internett]

Available at:

<http://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MEK4320/v06/undervisningsmateriale/kompendium.pdf>

[Funnet Mars 2014].

Blikra, L. H., Longva, O. & Braathen, A., 2006. *Rock-slope failures in Norwegian fjord areas: examples, spatial distribution and temporal pattern.*, Trondheim: Landslides from Massive Rock Slope Failure. Nato Science Series IV, Earth and Environmental Sciences, 49, pp.475-496..

Carstensen, I., 2010. *Geoportalen; Loen - ulykkene.* [Internett]

Available at: <http://www.geoportalen.no/nyheter/loenuykkene/>

[Funnet April 2014].

Carstensen, I., 2007. *Geoportalen; Norges største fjellskred.* [Internett]

Available at: <http://www.geoportalen.no/nyheter/tjellafonn/>

[Funnet Mars 2014].

Carstens, H., 2010. *Geoportalen; Rasen(d)e fjellvegger.* [Internett]

Available at: <http://www.geoportalen.no/skredulykker/rasendefjellvegger/>

[Funnet Mai 2014].

Domaas, U. et al., 2002. *Studie av fjellskred og dalsidestabilitet i fylltommråder*, Oslo: NGI.

Emdal, A., 2014. *Samtale om skred i magasin* [Intervju] (Februar 2014).

Gunleiksrud, O., 2014. *Samtale om Viddalsmagasinet* [Intervju] (Februar 2014).

Heller et al., 2009. *Landslide generated impulse waves in reservoirs.* Zurich: Prof. Dr. Robert Boes.

Jogerud, K., 2005. *Åknes/Taffjord-prosjektet*, Oslo: NGU.

Lied, K. & Kristensen, K., 2003. *Håndbok om Snøskred.* Nesbru: Vett og Viten.

Lorås, S., 2013. *Skred i magasin*, Trondheim: NTNU; Institutt for vann og miljøteknikk.

Lothe, A. E., 2014. *Møte om rapportens fremgang mm.* [Intervju] (Februar 2014).

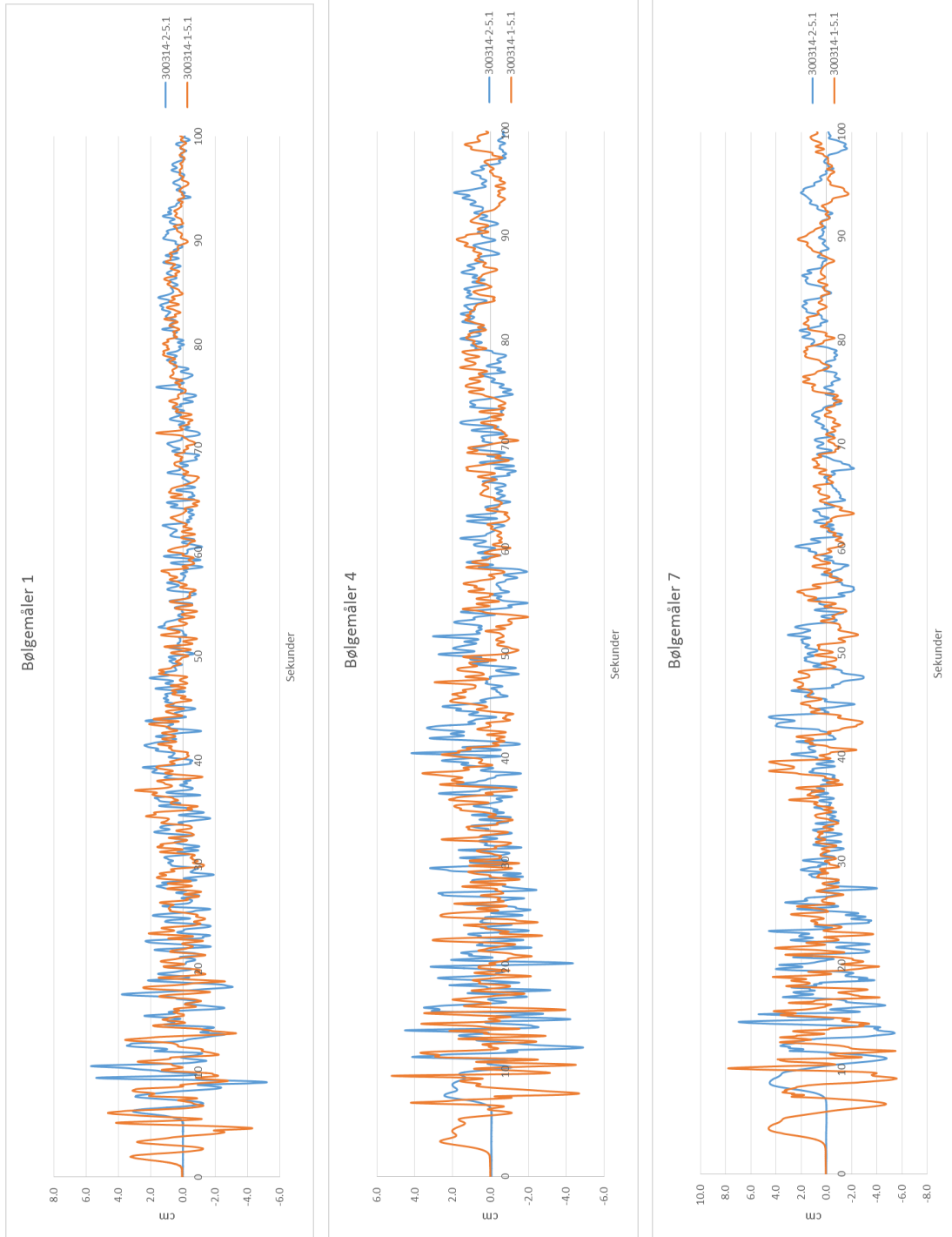
- Lothe, A. E. & Storler, A. Ø., 2010. *Skred ved Åkneset - oppsummering av resultater fra modellforsøk*, Trondheim: SINTEF Byggforsk, Kyst- og havneteknikk.
- Midttømme, G. H., 2013. *Dam Safety; Forelesning i emnet TVM4520, høst 2013*. Trondheim: NVE.
- Moe, G., 2005. *Introduksjon til bølger og bølgekrefter*, Trondheim: NTNU; Institutt for konstruksjonsteknikk.
- NGI, 2011. *Kvikkleireskredet i Rissa*. [Internett]
Available at: <http://ngi.no/no/Fagomrader/Jord-og-fjellskred/Film---Kvikkleireskredet-i-Rissa---1978/>
[Funnet Januar 2014].
- NGI, 2014. *Historiske skred*. [Internett]
Available at: <http://www.ngi.no/no/Utvalgte-tema/Skred-og-skredfare/Historiske-skred/>
- NGI, 2014. *NGI; Tre typer steinskred*. [Internett]
Available at: <http://www.ngi.no/no/Utvalgte-tema/Skred-og-skredfare/Skredkategorier/Tre-typer-steinskred/>
[Funnet Mars 2014].
- NGI, NVE, NGU & NTNU, 2004. *Tsunami modelling and prediction*, Oslo: Carl B. Harbitz.
- NGU, 2011. *Fjellskred*. [Internett]
Available at: <http://www.ngu.no/no/hm/Geofarer/Skred/Fjellskred/>
[Funnet Februar 2014].
- Norem, H., 2002. *Evaluation of the flow characteristics of the potential Åkneset rock slide, Norway*, Trondheim: SINTEF Building and Infrastructure.
- Oust, L., 2009. *Viddalsdammen; Fyllingdam og beredskap*. Oslo: E-CO Vannkraft AS.
- Petley, D., 2008. *The Landslide Blog; The Vaiont (Vajont) landslide of 1963*. [Internett]
Available at: <http://www.landslideblog.org/2008/12/vaiont-vajont-landslide-of-1963.html>
[Funnet Mars 2014].
- SINTEF, 1968. *Aurlandsutbyggingen - Bølger ved ras i magasin, delrapport nr 2*, Trondheim: Vassdrags- og havnelaboratoriet ved Norges Tekniske Høgskole.
- Store Norske Leksikon, 2012. *Skred*. [Internett]
Available at: <http://snl.no/skred>
[Funnet Oktober 2014].
- Svendsby, J. N., 2014. *Skred i magasin; Test av beregningsmetoden til Heller et, al. for estimering av skredgenerert overtopping av dam mot modellert skredforsøk i vassdragslaboratoriet på NTNU.*, Trondheim: NTNU.

Vedlegg

- Vedlegg A: Eksempel på bølgegrafene fra sensor 1, 4 og 7 for skred 5.
- Vedlegg B: Spektralanalysen fra skred 5, bølgesensor 1.
- Vedlegg C: Vedlegg C refereres til en CD, som ligger som vedlegg i masteroppgaven til Joakim Nordberg Svendsby (2014).
- Vedlegg D: Nøyaktige mål av modellen.
- Vedlegg E: Presentasjon av måling i prototype.
- Vedlegg F: Bølgegenerering steg for steg sett fra siden og ovenfra.
- Vedlegg G: Overtopping steg for steg sett ovenfra.

Vedlegg A

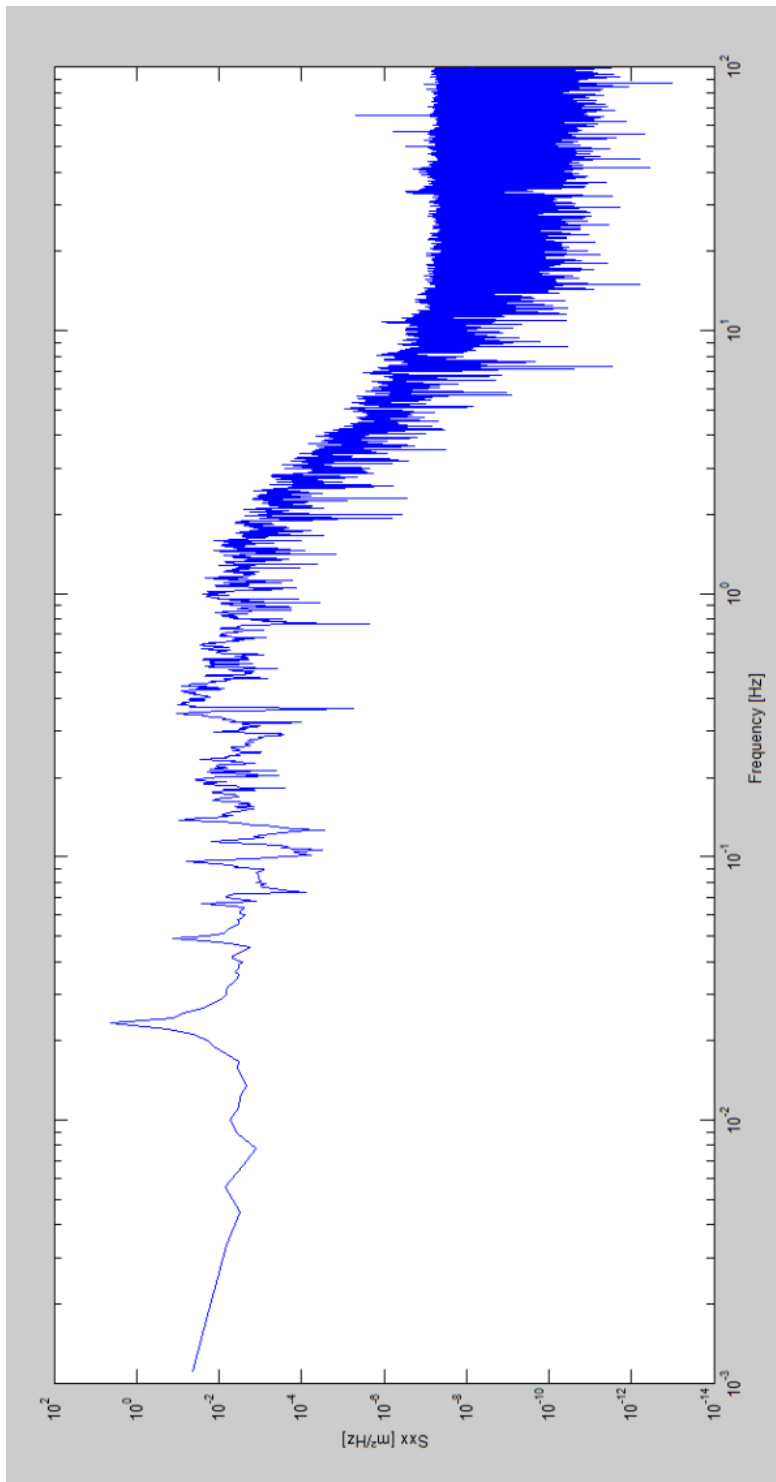
Eksempel på bølgegrafene fra sensor 1, 4 og 7 for skred 5. Samtlige grafer for forsøkene ligger i vedlegg C.



Figur A1 - Bølgegrafer fra sensor 1, 4, 7 for skred 5.

Vedlegg B
























Spektralanalysen fra skred 5, bølgesensor 1. Resultatene for samtlige av bølgesensorene til skred 5, 6.1 og 7.1, finnes i Vedlegg C.



Figur B1 - Spektralanalyse for bølgesensor 1, skred 5.

Vedlegg C

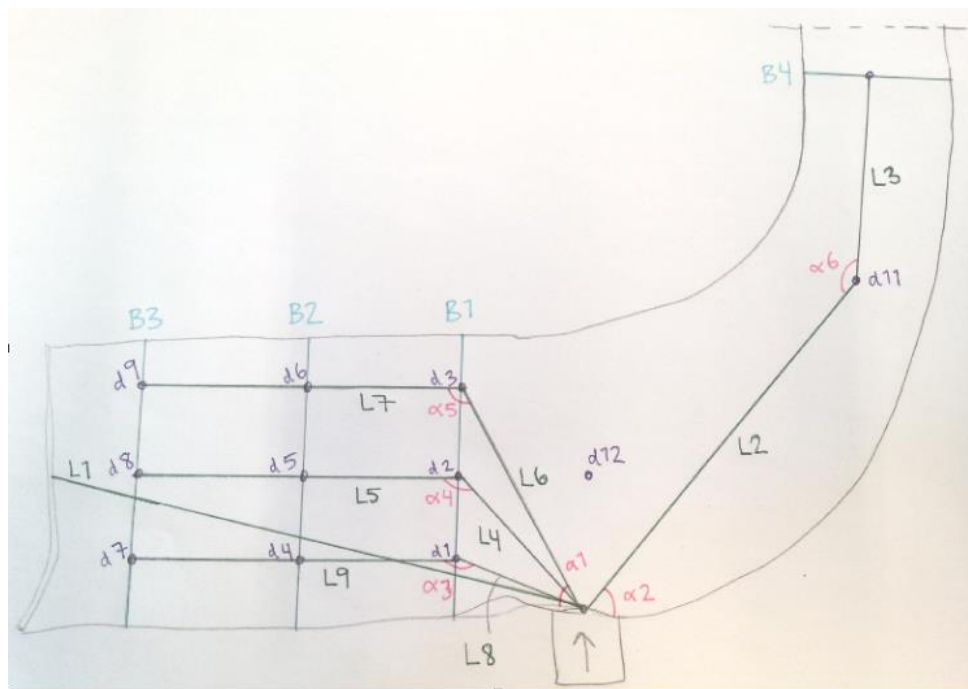
Vedlegg C refereres til en CD, som ligger som vedlegg i masteroppgaven til Joakim Nordberg Svendsby (2014). Alle data fra samtlige forsøk ligger på denne.

 050314-(1.1)	
 070314-(1.1)	
 090414 (6.1,6.2,6.3,7.1,7.2,7.3)	
 100314-(2.1)	
 180314-(3.1-3.2-4.1)	
 300314 (5.1)	
 Spektralanalyse, MatlabPlott	Plottresultater fra spektralanalysen.
 Regneark Hellers beregningsmetode	Mappe med beregnet steg 1 for alle skredscenario.
 Manual Hellers beregningsmetode	Kopi av manualteksten.
 Hellers beregningsmetode	Originalt regneark utgitt med manualen.
 NY! Skred 1.1	
 NY! Skred 2.1	
 NY! Skred 3.1	
 NY! Skred 3.2	Regneark med alle gjennomførte beregninger for hvert skredscenario. Herunder:
 NY! Skred 4.1	- Kalibrering av bølgesensorer, målebøtter, hastighetsmåler, laser på damkrone
 NY! Skred 5.1	- Behandling og omregning av rådata
 NY! Skred 6.1	- Bølgegrafer
 NY! Skred 6.2	- Froude skalering
 NY! Skred 6.3	- Behandling av målt overtopping
 NY! Skred 7.1	- Kopi av steg 1 (3D)
 NY! Skred 7.2	- Beregning av steg 2 for forskjellige fremgangsmåter
 NY! Skred 7.3	- Beregning av steg 1 og steg 2 (3D/2D)
 NY! Sammenligning	- Oppsummeringsark for bruk i sammenligning
	Sammenligning av data funnet i regnearkene over.

Figur C1 - Forklaring av innhold på CD.

Vedlegg D

Nøyaktige mål av modellen:



Figur D1 - Markering av målene i modellen.

Tabell D1 - Nøyaktige mål av modell.

	Bredde [m]
	Lengde [m]
	Dybde [m]
	Vinkel [°]

	1:1	1:158		1:1	1:158		1:1
B1	2.74	432.90	d1	0.43	67.94	α1	9
B2	2.92	461.40	d2	0.48	75.84	α2	50
B3	2.61	411.60	d3	0.45	71.10	α3	143
B4	1.53	241.70	d4	0.30	47.40	α4	142
L1	6.40	1011.20	d5	0.36	56.88	α5	125
L2	9.40	1485.20	d6	0.35	55.30	α6	140
L3	2.52	398.20	d7	0.26	41.08		
L4	2.64	417.10	d8	0.28	44.24		
L5	3.52	556.20	d9	0.31	48.98		
L6	3.03	478.70	d10	0.33	52.14		
L7	3.61	3.61	d11	0.33	51.35		
L8	2.37	374.50	d12	0.53	83.74		
L9	3.42	540.40					

Vedlegg E

Presentasjon av måling ved bruk av kartdata på websiden UT.no.

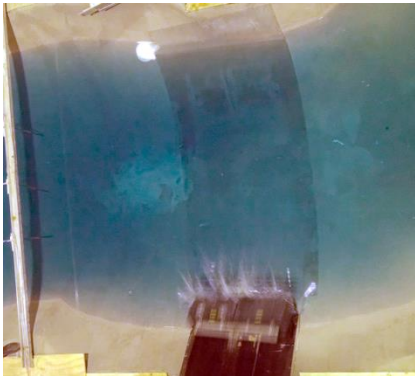


Figur E1 - Målt avstand fra potensielt skred til Vidalsdammen ved hjelp av kartdata fra UT.no.

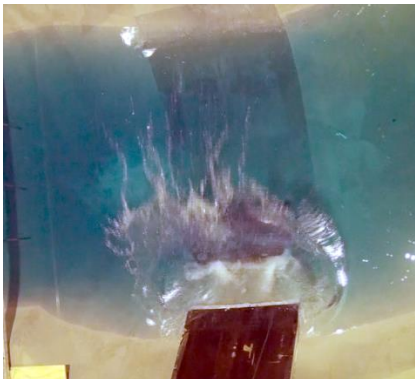
Vedlegg F

Bølgegenerering steg for steg sett fra siden og ovenfra. Bildene er klippet ut fra bølgevideoer fra skred 1.1.

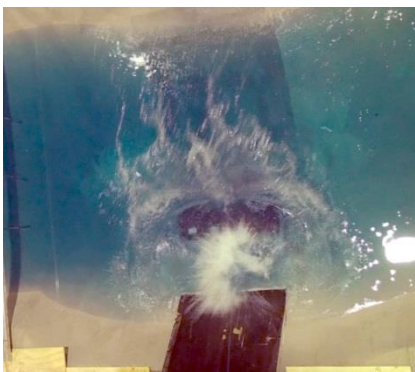
1. Skredet har akkurat brutt vannoverflaten



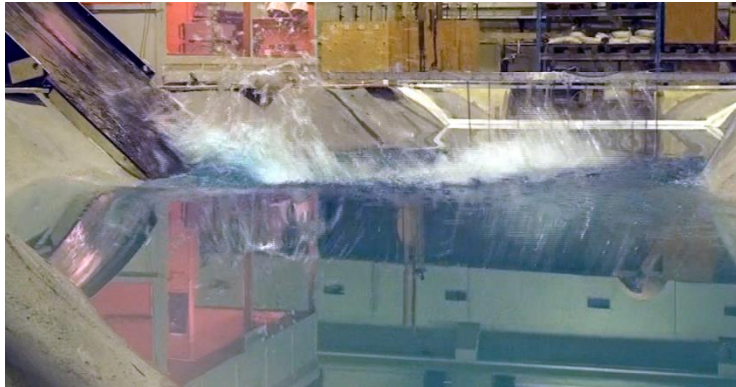
2. En ser tydelig en overflateheving på høyre bilde, i tillegg til bølgesprut.



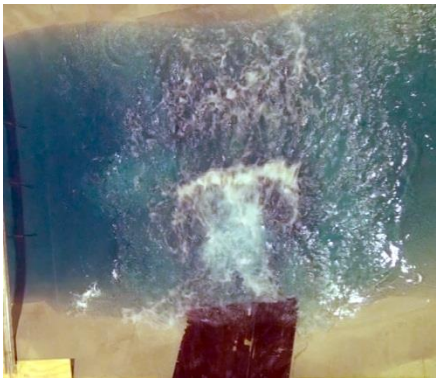
3. Vannet tetter igjen tomrommet som skapes bak skredet. Det renner vann fra begge endekantene av skredet, slik at vannet møtes i midten. Viser godt som hvitt bølgesprut på begge bildene.



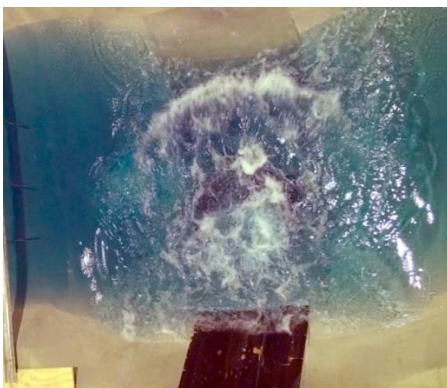
4. En ser tydelig at den første bølgefronten har tatt form.



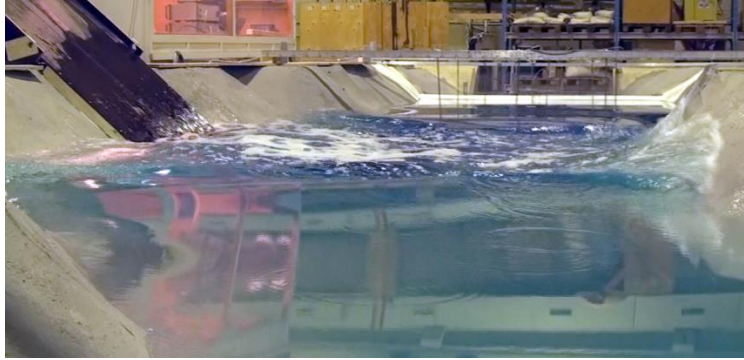
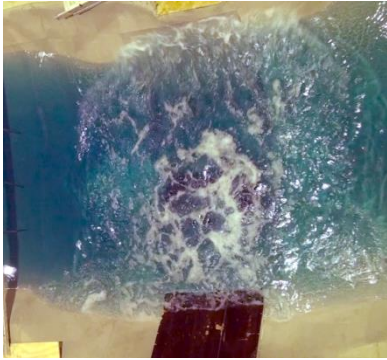
5. Bølge nummer to tar form.



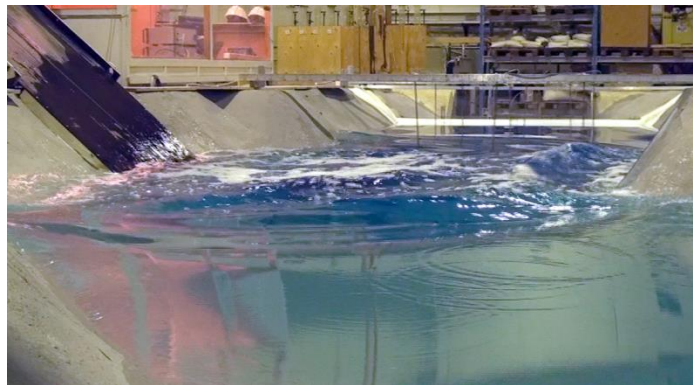
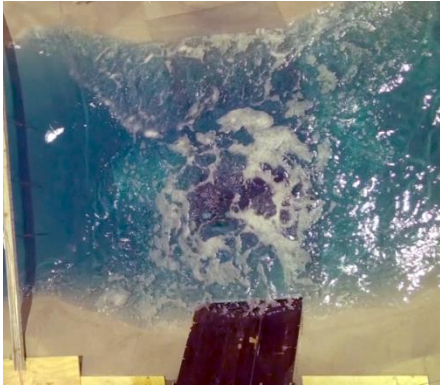
6. Vannet trekkes tilbake ved sidekanten, før bølge nummer to treffer. En ser tydelig den hvite bølgefronten.



7. Bølgeopp skyling fra bølge to på magasinets sidekant.

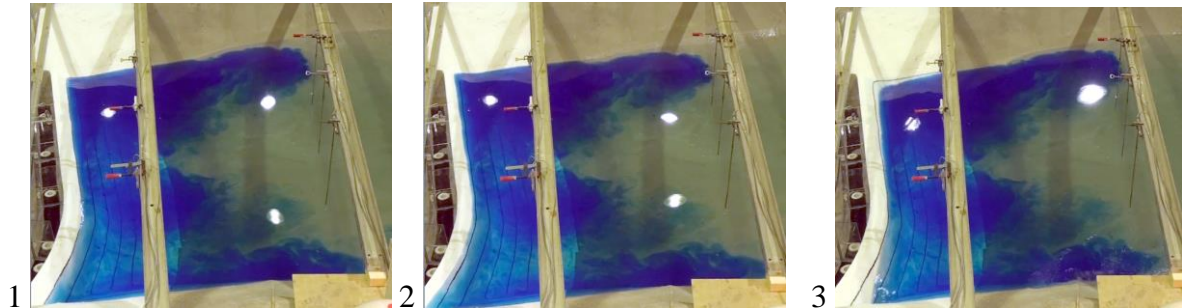


8. Den reflekterte bølgen setter kurs mot dammen. Bølgefronten fra bølge nummer en vises i horisonten i retning dammen.

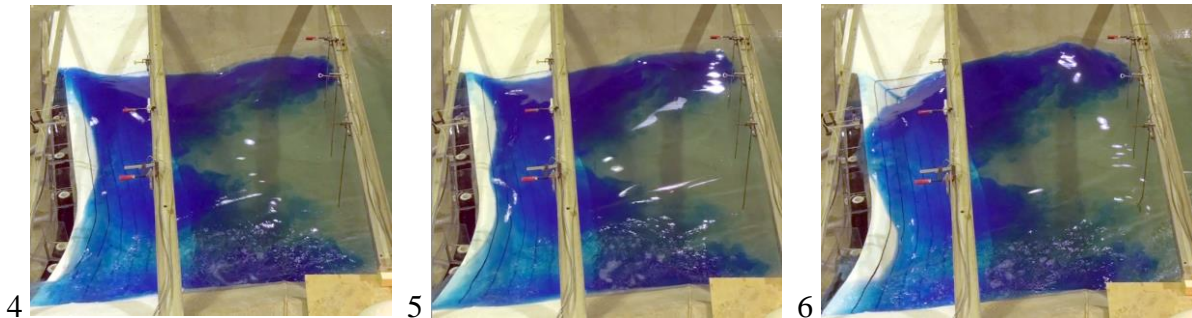


Vedlegg G

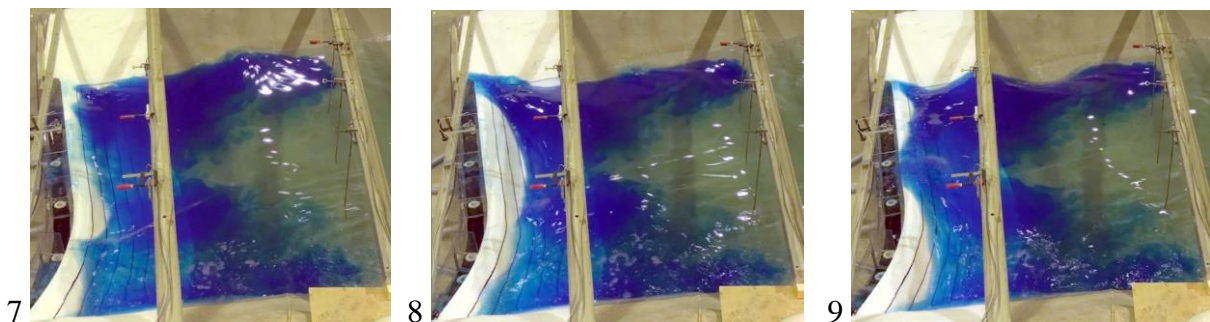
Overtopping steg for steg sett ovenfra. Bildene er klippet ut fra bølgevideo fra skred 1.1.



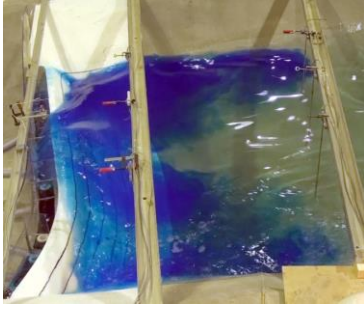
- 1 - Første impulsbølge fra skredet, vannet stiger så vidt over den øverste damstreken.
- 2 - Vannet heves.
- 3 - Vannet trekkes tilbake. Typiske fellestrekk med en tsunami.



- 4 - Bølge nummer to går over på begge sidene.
- 5 - Påfølgende bølge i midten tar form.
- 6 - Bølge nummer to går over i midten.



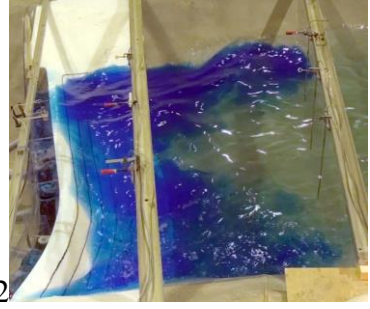
- 7 - Vannet trekkes tilbake før bølge nummer tre kommer. Vannet begynner å bli mer urolig.
- 8 - Bølge nummer tre går over på sidene.
- 9 - Bølge nummer tre går over på midten.



10



11



12

- 10 – Bølge nummer tre som går over midten. Denne bølgen antas å gi den største overtoppingen.
- 11 – Vannet trekkes tilbake igjen.
- 12 – Det skjer en noe rotete overtopping, som gjør det vanskelig å se noen trend. Overtoppingen avtar betraktelig, og det er mye bevegelse i vannoverflaten.