

Skred i magasin

Test av Hellers beregningsmetode for estimering av skredgenererte impulsølger mot forsøk i skalert modell med norske forhold.

Joakim Nordberg Svendsby

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Jochen Aberle, IVM

Medveileder: Arne Lothe, Norconsult

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven om skred i magasin er skrevet for institutt for vann og miljøteknikk ved fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. For meg personlig, markerer oppgaven min fullføring av sivilingeniørstudiet ved bygg og miljøteknikk og enden av min tid som student i Trondheim.

Gjennom arbeidet med prosjektet "Skred i magasin" har det gått opp for meg hvor mange av våre dammer som er direkte truet av et skredsenario og hvilke konsekvenser et slikt senario kan ha. Dette har vekket en stor interesse for temaet i meg og jeg kommer til å følge fremgangen i prosjektet videre, dog kun som tilskuer.

Jeg ønsker å benytte anledningen til å rette en personlig takk til alle de som har støttet meg i dette arbeidet. Takk til Prof. Jochen Aberle som har vært hovedveileder, for gode innspill under veiledermøter og raske konstruktive tilbakemeldinger på alle henvendelser i hele prosjektperioden. Takk til Dr. Arne Lothe som har vært medveileder, for gode diskusjoner under møter og oppklarende forklaringer på observasjoner på bølgesiden av prosjektet. Takk til Dr. Kiflom Belete som kom inn i oppgavens siste fase med friske øyne og gode innspill. Jeg ønsker også å rette en takk til Norges vassdrag –og energidirektorat for finansiell støtte av prosjektet.

Arbeidet med modellen ville ikke vært mulig uten all hjelpen jeg har fått fra gutta i labben. Jeg ønsker derfor å rette en takk til Ing. Torgeir Jensen for innføring i alle modellens komponenter og raske oppklaringer underveis i prosjektet. Takk til Senioringeniør Audun Vårum som sammen med Torgeir sto for byggingen av modellens dam og som stadig stilte opp for montering av nye skred.

Avslutningsvis ønsker jeg å takke medstudent Sunniva Lorås som har skrevet master og prosjektoppgave innen samme tema, takk for godt samarbeid gjennom hele 5 klasse.

Joakim Nordberg Svendsby

Trondheim, 10.06.2014

Sammendrag

I denne masteroppgaven er det sett på muligheten for bruk av Hellers beregningsmetode for skredgenererte impulsbølger under typisk norske forhold. Dette gjøres ved å sammenligne overtoppet volum funnet i beregningsmetoden med volum funnet under skredforsøk i skalert modell av Viddalsmagasinet. Oppgaven er en del av prosjektet "Skred i magasin" som blir gjennomført på bestilling av NVE med mål om å kunne bestemme sikre fribordshøyder på dammer ved skredutsatte magasin i Norge.

Hellers beregningsmetode estimerer skredgenererte impulsbølger og følgende bølgeforplantning, bølgeopp skylning, og overtopping av –og kraftoverføring på dam. Styrken til metoden ligger i at den gjennomføres med kun 15 lett målbare parametere som beskriver skred og magasin. Bølgeforplantningen kan beregnes både i 2D og 3D. Det finnes også en fremgangsmåte for beregning rundt svinger i magasinet ved en 3D/2D kombinasjon. Metoden går over to steg, hvor steg 1 bruker generelle formler for estimering under ideelle forhold (rettvinklet magasin/basseng). Steg 2 tar for seg andre påvirkende faktorer individuelt for hvert tilfelle. Dette gjøres ved å øke en av parameterne etter metoder anbefalt. Metoden har strenge krav til parametergrenser for hvert beregningsledd. Da den er basert på forsøk med mindre parameter variasjon.

Den skalerte modellen er 21 m lang og omfatter 2 større svinger. Målingene ble hovedsakelig gjort i det rette 6m lange området mellom skredrampen og dammen. Skredets hastighet ble målt ved rampen, overtoppingen ble funnet i målebøtter nedstrøms dammen og bølgehøyden over damkronen ble målt med laser. 10 stk bølgesensorer ble brukt for å finne bølgeforplantningen i magasinet. Vannivået ble holdt likt under alle forsøkene.

Totalt ble det kjørt forsøk på 12 forskjellige skredsenarioer fordelt på 7 forskjellige skredstørrelser, hvorav 5 var blokkskred og 2 var løsmasseskred. Flere fremgangsmåter ble testet for beregningsmetoden. Her ble det funnet at ren 3D forplantning med en økning av oppskyllingshøyden i steg 2 fungerte best. Selv med bruk av den beste fremgangsmåten var det store avvik mellom målt og beregnet overtopping. Beregningsmetoden overestimerte overtoppingen kraftig for 5 av senarioene og underestimerte for 5 andre senarioer. Kun 2 av 12 skredsenarioer hadde tilfredsstillende avvik. Begge senarioene var løsmasseskred. Flere parametere ble etterforsket for å finne ut hvorfor beregningsmetoden hadde store avvik mellom målt og estimert overtopping. Det ble funnet at parametergrensene for beregning av overtopping var brutt i alle skredsenarioene, noe som forklarer avvikene. Det ble også funnet at for 4 skredsenarioer var parametergrensene overholdt for beregning av bølgeopp skylning. Estimert bølgeopp skylning ble derfor sammenlignet med en antatt minste oppskyllingshøyde satt lik fribordshøyden + bølgehøyden over damkronen. For senarioene hvor parameterkravene var overholdt estimerte metoden bølgeopp skylningen godt.

Oppgaven konkluderer med at Hellers beregningsmetode ikke kan benyttes for bestemmelse av sikre fribordshøyder på dammer ved skredutsatte magasin med norske forhold.

Parametergrensene satt i metoden er for små til å ta høyde for variasjonene som finnes i norske fjellmagasin. Metoden presterer derimot godt innen de gitte rammer. For videre arbeid med "Skred i magasin" anbefales det å utvikle en ny metode basert på forsøk med større variasjon i parametere. Det anbefales videre å konsentrere seg om estimering av bølgeopp skylning da dette er viktigst med tanke på sikre fribord.

Abstract

This master thesis evaluates the possibility of using Heller's calculation method for "landslide generated impulse waves" in typical Norwegian environment. This was tested by comparing overtopped volume found by using the calculation method and volume found in the scaled model of Viddalsmagasinet. The thesis is part of the continuing project "Landslides in reservoirs and their impact on rockfill dams" started on request from NVE who wishes to determine safe freeboard heights in landslide exposed reservoirs in Norway.

Heller's method estimates wave generation, propagation, run-up, dam overtopping and wave force on dam. The method's biggest strength lies in its usage of only 15 easily measured parameters describing the slide and reservoir. Wave propagation is in both 2D and 3D and by combining the two, wave propagation through bends is found. The method is divided into two steps. Step 1 uses generally applicable equations yielding results fitted idealised reservoir geometry (rectangular basin shaped reservoir). In step 2 the effects of variations from the idealised geometry are considered by changing one value from step 1 based on recommended methods. Results after step 2 may be significantly different from step 1. The method has strict parameter limitations for each computational layer, as it is based on laboratory tests where most parameter values barely was changed.

The scaled model is ca 21m long with two large bends. Most of the measurements was done in the straight and 6m long area between the slide riggings and the dam. The impact velocity was measured at the slide rig, the overtopping was measured in measure buckets downstream of the dam and a laser measured the wave height over the dam top. Ten wave gauges measured the wave propagation. The water depth was kept constant during the tests.

The tests were conducted on twelve different slide scenarios with seven different slide volumes Five in the form of block slides and two as granular slides. Multiple approaches was tested for the calculation method yielding 3D propagation with an increase of run-up during step 2 as the best one. Even when using this approach there was a great difference between calculated and measured overtopping. Five slide scenarios was greatly overestimates and five was underestimated. Only two scenarios had an acceptable aberrancy, both being granular slides. This result lead to an investigation of why the aberrancy between measured and calculated volumes was so varied. It was found that the limitations was exceeded for all scenarios for calculation of dam overtopping. This explained the aberrancy. Four scenarios had however abided the limitations for calculation of the wave run-up. This was therefore compared to a minimal run-up value found in the model by adding the dam freeboard to the height of the largest wave overtopping the dam. For the scenarios that did not exceed the limitations the method performed satisfactory.

The conclusion of this thesis is therefore that Heller's method is not certain enough to determine safe freeboard heights on dams in landslide exposed reservoirs with typical Norwegian geometry. The parameter limitations are too great not to be exceeded by the variations in the Norwegian mountain reservoir geometry. For further workings in the project, it is advised to establish a new calculation method based on laboratory tests with a larger amount of parameter variations. It is also advised to focus on the wave run-up as it is the most important factor of determining safe freeboard heights to avoid dam overtopping.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract.....	V
Innholdsfortegnelse	VII
Figurliste	IX
Tabelliste	X
Kapittel 1. Skred i magasin	1
Kapittel 2. Prosjektets grunnlag	3
2.1 Tidligere studier	5
2.2 Beregningsmetoden utviklet av Heller et al. (2009).....	6
2.2.1 Steg 1	8
2.2.2 Steg 2:.....	14
Kapittel 3. Skredmodell med norske forhold.....	17
3.1 Magasinet	17
3.2 Skredrampen.....	18
3.3 Bølgesensorer og bølgemåling.....	19
3.4 Overtopping av dam	20
3.5 Skredtypene	21
Kapittel 4. Modellert og beregnet overtopping	25
4.1 Resultat fra skredforsøk i modell.....	25
4.2 Resultater fra Hellers beregningsmetode.....	26
4.3 3D vs 3D/2D vs målt overtopping	27
Kapittel 5. Beste fremgangsmåte og test av 3D/2D	29
5.1 Test av 3D/2D	29
5.2 3D steg 2(bølgehøyde) vs steg 2(oppskylling)	30
5.3 Modellert overtopping vs overtopping ved 3D med steg 2(oppskylling)	30
Kapittel 6. Betrakter årsak til store avvik	33
6.1 Ser på skredparametere som kan forandres i modellen.	33
6.1.1 Ser på skredets volum	33
6.1.2 Ser på skredets treffningshastighet	34
6.1.3 Ser på forholdet mellom volum og hastighet.....	34
6.2 Andre målte avvik	36
6.2.1 Ser på bølgehastigheten.	36
6.2.2 Ser på bølgeamplituden.....	38
6.2.3 Ser på bølgeperioden.....	38

6.3	Brutte parametergrenser i beregningsmetoden	39
Kapittel 7.	Veien videre	43
7.1	Konklusjon	43
7.2	To erfarte feilkilder og hvordan de kan fjernes	44
Kapittel 8.	Referanser.....	47
Vedlegg I	Størrelser og mål i modellen	a
Vedlegg II	Eksempel beregningsmetodens regneark samt steg 2	b
Vedlegg III	Eksempel, Bølgegrafer.....	c
Vedlegg IV	Indeks for vedlegg på cd	f

Figurliste

Figur 1-1: Vajontmagasinet etter skredet. Arr fra skredet kan sees til høyre, mens trelinjen på venstre side indikerer bølgeoppskyllingen (Petley, 2008).	1
Figur 1-2: Bilder av bygden Fjóra før og etter skredet. Huset som står igjen på bildet til venstre kan skimtes i bakgrunnen på bildet til høyre (Furuset, 2010).	2
Figur 2-1: Skredets tre startposisjoner, fra side 2 i manualen (Heller, et al., 2009)	3
Figur 2-2: Stokebølge, fra side 14 i manualen (Heller, et al., 2009)	4
Figur 2-3: Cnoidalbølge, fra side 14 i manualen (Heller, et al., 2009)	4
Figur 2-4: Singelbølge, fra side 15 i manualen (Heller, et al., 2009)	4
Figur 2-5: Bore, fra side 16 i manualen (Heller, et al., 2009)	5
Figur 2-6: Nødvendige parametere for 2D og 3D, fra side 21 i manualen (Heller, et al., 2009)	8
Figur 2-7: Kombinasjon av 3D og 2D forplantning, fra side 71 i manualen (Heller, et al., 2009)	9
Figur 2-8: Skisse over parametere benyttet, fra side 30 i manualen (Heller, et al., 2009)	11
Figur 2-9: (a) viser estimert kb verdi på grunnlag av kronebredden og maksimal overtoppingsdybde. (b) viser parametere i en skisse, fra side 32 i manualen (Heller, et al., 2009).	12
Figur 2-10: Utstikkere vil forandre bølgens retning, fra side 46 i manualen (Heller, et al., 2009)	14
Figur 2-11: Grunnvannsbølger påvirket av bunnfriksjon, fra side 47 i manualen (Heller, et al., 2009)	14
Figur 2-12: Bølgeoppskylling langsmed dalside, fra side 48 i manualen (Heller, et al., 2009)	15
Figur 2-13: Zweifiels sammenheng mellom bølgeamplitude ved løsmasseskred og blokkskred, fra side 51 i manualen (Heller, et al., 2009)	16
Figur 3-1: V.S.: Magasinets dam ende med skredrampe, dam og bølgesensorer. H.S.: magasinets grunne ende med bølgesensor og innløpsrør. Bildene er tatt fra svingen vist i Figur 3-2.	17
Figur 3-2: Skisse som viser, magasinbredde, magasinlengde, avstand mellom damsone og skredsone, vanndybden i skredsone og damsone samt fotoplassering for Figur 3-1.	17
Figur 3-3: V.S.: Skredrampen med skred i hvileposisjon. (1) Sperrestang, (2) Skredelementer, (3) Hastighetsmåler, (4) Utløsermekanisme, (5) Vinsj, (6) Skredsensor. H.S.: Skredelementene løftes på plass ved hjelp av en tak kran.	18
Figur 3-4: Skisse som viser plasseringen av bølgesensorene i magasinet	19
Figur 3-5: V.S.: The Agilent U2300A Series USB med 10 kanaler og voltmeter til kalibrering. H.S.: DHI Wave Meter 102E montert i modellen.	20
Figur 3-6: Dam og kammer sett ovenfra. Lasermåleren mic+35/IU/TC er montert på stang over dam.	20
Figur 3-7: Kammer og oppsamlingssystemet på nedstrøms side av dammen	21
Figur 4-1: Viser den målte overtoppingen mot Hellers beregnede overtopping for de forskjellige skredtypene og fremgangsmåter	27
Figur 5-1: viser målt amplitude mot beregnet amplitude ved 3D/2D.	29
Figur 5-2: Modellert og beregnet (3D) overtopping for de forskjellige skredsenarioene.	30
Figur 5-3: Modellert og beste beregnede overtopping for de forskjellige skredsenarioene.	30
Figur 5-4: Overtopping sortert etter skredsenario med minst avvik mellom modellert og beregnet overtopping	31
Figur 6-1: Overtopping med skredsenarioene sortert fra størst til minst volum	33
Figur 6-2: Overtopping med skredsenarioene sortert fra minst til størst hastighet	34
Figur 6-3: Overtopping med skredsenarioene sortert fra størst til minst forholdstall volum/hastighet.	35
Figur 6-4: Forholdstall plottet mot avvik for skredsenarioene (blå stiple). Sort linje illustrerer graf om forholdet mellom volum og treffningshastighet hadde hatt en direkte sammenheng med avviket mellom målt og beregnet overtopping.	35
Figur 6-5: Viser bølgehastighet målt ved bølgetopp 1 og 2 i modell samt beregnet bølgehastighet etter Hellers beregningsmetode.	36
Figur 6-6: Viser bølgeamplituden beregnet etter Heller mot målt bølgeamplitude for bølgetopp 1 og 2 ved bølgemåler 5 og 8.	38

Figur 6-7: Viser bølgeperiode for første bølgetopp målt i modell og bølgeperiode estimert etter Heller.	39
Figur 6-8: Beregnet bølgeoppskylling for steg 1 og steg 2, samt største bølgehøyde på topp av damkrone som danner minste oppskyllingshøyde.	41

Tabelliste

Tabell 2-1: Viser gangen i beregningsmetoden over de tre fasene. Oversatt og gjengitt fra tabell på side 18 i manualen (Heller, et al., 2009).....	7
Tabell 2-2: Utklipp fra regneark opprettet for beregningsmetoden. Viser de 15 bestemende parametere som beregningsmetoden trenger (oversatt til norsk).	8
Tabell 2-3: Viser parameterkrav ved Huber og Hagers omregningsmetode. Alle parametere er utviklet fra faste parametere som g og ρw samt de bestemende parameterne i Tabell 2-2. Oversatt og basert på tabell på side 25 i manualen (Heller, et al., 2009).	9
Tabell 2-4: Viser parametergrenser for beregning av bølgeoppskylling. Oversatt og basert på tabell fra side 30 i manualen (Heller, et al., 2009).	11
Tabell 2-5: Viser parametergrenser for beregning av overtoppingsvolum. Oversatt og basert på tabell fra side 32 i manualen (Heller, et al., 2009).....	13
Tabell 2-6: Parametergrenser for beregning av overtoppingsperioden. Oversatt og basert på tabell fra side 33 i manualen (Heller, et al., 2009).	13
Tabell 4-1: Målt overtopping i skredmodellen i liter, skalert opp til antall kubikk i prototype og skalert opp som antall kubikk per meter dam i prototype for sammenligning mot Hellers beregningsmetode.	25
Tabell 4-2: Overtopping per meter dam etter Hellers beregningsmetode, viser resultat etter steg 1 og 2 for begge fremgangsmetodene.	26
Tabell 6-1: Viser målt bølgehastighet og beregnet bølgehastighet basert på amplituder målt i modell. Alle verdiene er i m/s.	37
Tabell 6-2: Viser alle parametergrenser som ble brutt under skredsimuleringene. Rødt felt betyr at grensen er brutt, grønt felt betyr at grensene er overholdt.....	40

Kapittel 1. Skred i magasin

Norge er en av verdens største vannkraftprodusenter, høye fjell og bratte daler gjør vannet til en lett tilgjengelig ressurs som i 2012 dekket 95% av Norges energiproduksjon (Berthelsen, 2013). Norge er i dag avhengig av vannkraft for å dekke sitt energibehov, et behov som ikke vil minke i fremtiden grunnet et stadig økende forbruk av elektrisitet.

Norges topografi plasserer storparten av vannmagasinene i fjellområder med bratte skråninger på en eller flere sider. Faren for skred fra disse fjellsidene er tilstede ved flere av magasinene. Når et skred går ned i et magasin kan det dannes impulsbølger også kalt tsunamibølger. Magasinene som typisk er smale og lange vil kombinert med impulsbølgens lange bølgekarakteristikk ha et stort potensial for oppskylling langsmed strandkanten. Denne oppskyllingen kan ha fatale konsekvenser for bebyggelse ved vannkanten, på magasinets dam og på bebyggelse nedstrøms dammen om en overtopping skulle oppstå. Dammens sikkerhet vil trues av impulsbølgen som trykk, overtopping og erosjon av materiale. Spesielt utsatt er fyllingsdammer da en vannstigning over dammens kjerne vil kunne starte en utvasking som kan føre til dambrudd og frigjøring av hele magasinets vannoppsamling.

Skredet ved Vajont, Italia i 1963 er et skrekkeksempel på et skredsenario i vannmagasin. I sammenheng med tømning av magasinet gikk det et skred på 270 mill m³ i den sørlige fjellsiden (til høyre i Figur 1-1). Skredet genererte en 140 m høy impulsbølge som overtoppet den 70 m høye hvelvdammen og traff småbyen Longarone samt en rekke andre bosetninger. 2000 personer mistet livet som en følge av dette skredet (Petley, 2008).



Figur 1-1: Vajontmagasinet etter skredet. Arr fra skredet kan sees til høyre, mens trelinjen på venstre side indikerer bølgeoppskyllingen (Petley, 2008).

I Norge skjedde den største ulykken i 1934 da en fjellblokk løsnet fra Langhammaren og skled ut i Tafjorden. Bygdene Tafjord og Fjøra (Figur 1-2) ble sterkt rammet og 40 mennesker mistet livet. Bølgene var 16-17 m høye når de traff bebyggelsene, men ble rapportert opp mot 64 m nærmere skredpunktet (Furuset, 2010).



Figur 1-2: Bilder av bygden Fjøra før og etter skredet. Huset som står igjen på bildet til høyre kan skimtes i bakgrunnen på bildet til venstre (Furuset, 2010).

Lignende hendelser har også skjedd i nyere tid. I januar 2014 ble et undervannskred utløst ved Namdalseid, impulsbølgen var 4 m høy da den traff småbåthavnen Statland. Bølgen forårsaket store ødeleggelser på stedet og 56 personer måtte evakueres.

Det er på bakgrunn av dette Norges Vassdrags- og energidirektorat (NVE) har innledet prosjektet "Skred i Magasin" med Norges tekniske og naturfaglige universitet (NTNU) og SINTEF. Hovedformålet med prosjektet er å se på sikkerheten til fyllingsdammer i Norge, utsatt for skredgenererte impulsbølger. Til dette arbeidet benyttes en ombygning av "Åknesmodellen" (Lothe & Storler, 2010) med Viddalsmagasinet som prototype. Modellen er plassert i Vassdragslaboratoriet på NTNU, og prosjektet ble innledet med prosjektoppgavene til Svendsby (2013) og Lorås (2013).

I denne masteroppgaven har det blitt sett på mulighet for bruk av beregningsmetoden utviklet av Heller, Hager og Minor (2009) ved Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) på Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) i Zürich, Sveits. Beregningsmetoden ble publisert med manual og tilhørende regneark, og er basert på forsøk gjennomført i rektangulært bølgebasseng og bølgekanal. Metoden som blant annet kan estimere overtoppet volum blir testet mot overtoppet volum funnet ved forsøk i modell. Modellen har blitt utstyrt med en dam og har en form tilsvarende et typisk norsk fjellmagasin. På denne måten kan nøyaktigheten til Hellers beregningsmetode testes mot norske forhold. Masteroppgaven er tett knyttet opp mot Masteroppgaven til Lorås (2014) og bygger på prosjektarbeidene (Svendsby, 2013) og (Lorås, 2013).

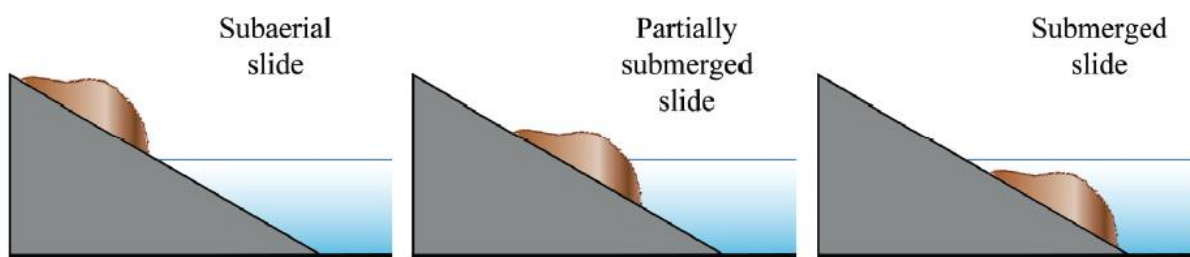
Oppgaven vil i Kapittel 2 beskrive forskjellige bølgetyper, tidligere forskningsprosjekter og beregningsmetoden til Heller et, al. I Kapittel 3 blir modellen gjennomgått samt instrumenteringen benyttet i målingen. Kapittel 4 vil presentere resultatene fra skredforsøkene og beregningsmetoden. Kapittel 5 og Kapittel 6 vil ta for seg henholdsvis sammenligning og diskusjon av resultatene før en endelig vurdering og konklusjon på bruk av metoden blir gitt i Kapittel 7.

Kapittel 2. Prosjektets grunnlag

Dette kapittelet er bygget direkte på kapittel 2 og 3 i prosjektoppgaven (Svendsby, 2013). I dette kapittelet er derimot flere emner beskrevet og utfyllende informasjon er gitt. Noe av ordlyden vil for enkelte avsnitt være lik Svendsby (2013).

Tsunami bølger dannes vanligvis av undersjøiske jordskjelv. Her er det den vertikale forskyvingen som genererer impulsbølgene. Skredgenererte tsunamier dannes etter samme prinsipp. Når skredmassene forflyttes vil den ta opp plassen til vann som vil skyves oppover og danne impulsbølger. Skredene kan ha tre forskjellige startformer vist i Figur 2-1.

- 1) Overflateskred (Subaerial slide)
- 2) Delvisdykket skred (Partially submerged slide)
- 3) Dykket skred (Submerged slide)



Figur 2-1: Skredets tre startposisjoner, fra side 2 i manualen (Heller, et al., 2009)

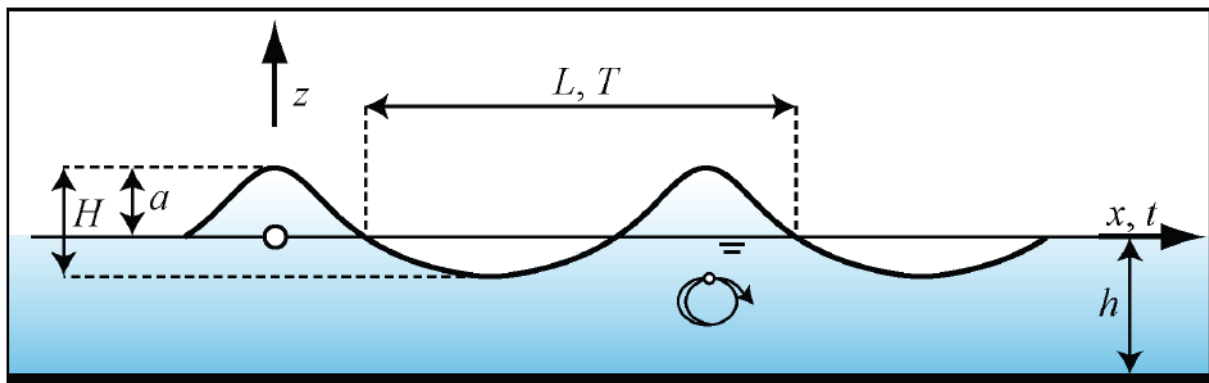
Skredgenererte tsunamier blir betraktet som lokale hendelser og vil ha en mindre horisontal utbredelse enn seismisk genererte tsunamier. Men når de oppstår i «smale» områder som fjorder og magasininnsjøer er de spesielt farlige og har et like stort potensiale for ødeleggelse (Levin & Nosov, 2009).

I dette kapittelet vil grunnlaget for skredforsøkene bli presentert. Først vil de forskjellige bølgeformene gjennomgå etterfulgt av en kort presentasjon av tidligere studier innen temaet i del 2.1. Avslutningsvis i del 2.2 beskrives beregningsmetoden til Heller et al. (2009) som senere testes opp mot skredforsøk i modell. For utfyllende skredteori og bakgrunn for skredparametere benyttet i denne masteroppgaven vises det til Prosjektoppgaven til Lorås (2013) og Masteroppgaven til Lorås (2014).

Skredgenererte impulsbølger faller under kategorien gravitasjonsbølger og vil oftest oppføre seg som svært ulineære. Bølgene vil imidlertid alltid tilhøre en av følgende fire bølgetyper: Stokebølge, Cnoidalbølge, Singelbølge eller Bore (Heller, et al., 2009). Bølgetypene blir kort presentert i illustrasjonene under, hvor notasjonene er som følger:

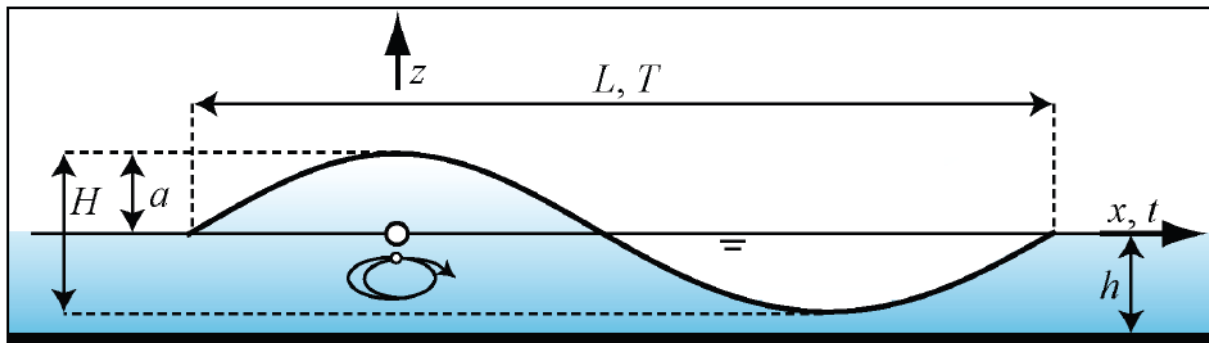
H	Bølgehøyde
a	Bølgeamplitude
L	Bølgelengde
T	Bølgeperiode
h	Vanndybden ved normalvannstand (ingen bølger)

Stokebølger (Figur 2-2) er en dyp- til middelvannsbølge med noe brattere bølgetopper samt flatere og lengre bølgedaler sammenlignet med sinusbølger. Bølgetypen har en svingende karakteristikk, men en liten massetransport vil oppstå.



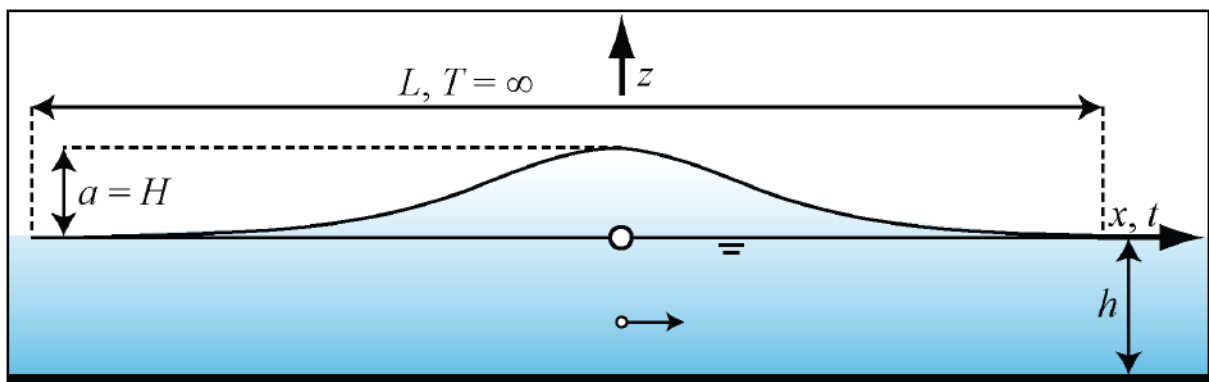
Figur 2-2: Stokebølge, fra side 14 i manualen (Heller, et al., 2009)

Cnoidalbølger (Figur 2-3) er en middel- til grunnvannsbølge med en del likheter med Stokesbølger. Cnoidalbølger har også en svingende karakteristikk dog med noe mer massetransport. Når en Stokesbølge når grunnere forhold kan den ofte bedre beskrives som en Cnoidalbølge.



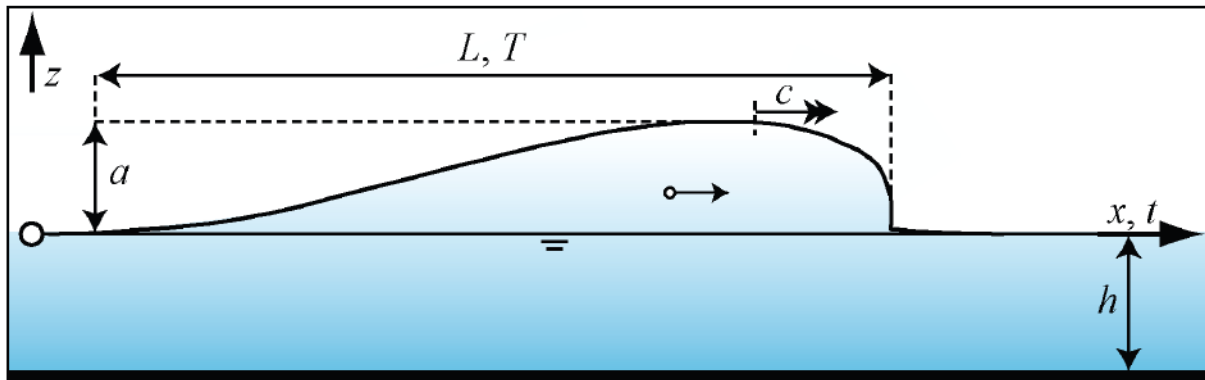
Figur 2-3: Cnoidalbølge, fra side 14 i manualen (Heller, et al., 2009)

En singelbølge (Figur 2-4) er en klassisk tsunamibølge som følger av jordskjelv. Dette er alltid en grunnvannsbølge da den kun har en enkelt bølgetopp og en evig bølgeperiode. Bølgen har ingen svingninger og den vil derfor drive stor massetransport.



Figur 2-4: Singelbølge, fra side 15 i manualen (Heller, et al., 2009)

Bore (Figur 2-5) er en grunnvannsbølge som kan oppstå ved rask tidevannsstigning eller før en bølge bryter mot strandlinjen. Den har en vertikal front og en horisontal bevegelse som gjør at den kan ha stor massetransport.



Figur 2-5: Bore, fra side 16 i manualen (Heller, et al., 2009)

2.1 Tidligere studier

Det har blitt gjennomført en rekke studier for å bedre forstå bølgeoppskyllingens natur. Studiene har hatt flere former som numeriske forsøk, laboratorieforsøk og som feltstudier på utsatte områder rundt om i verden. Disse studiene har gitt forskjellige metoder for beregning av bølgeoppskylling. Storparten av metodene funnet under søk i sammenheng med denne oppgaven var spesielt tilpasset en enkelt bølgetype og en bestemt type geologi i strandlinjen. Ofte var metodene også tilpasset kystforhold med slake helninger på strandlinjen. Eksempler på dette er Hunt (1956) og Battjes (1974). Flere metoder oppsummeres godt i Steven A Hughes forsknings rapport «Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave flux parameter» (Hughes, 2004).

Et eksempel på numeriske forsøk er Rabinovich, et al. (2003) som videreutviklet den numeriske modellen til Jiang og LeBlond (1994). Den nye modellen ble brukt til å estimere bølgegenereringen fra to undervannskred som man var bekymret for at skulle gå i Georgia streket utenfor Vancouver i Canada. Her ble det modellert for både høyvann og lavvann.

I sammenheng med denne oppgaven er det mer interessant å se på tidligere laboratorieforsøk. Forskning spesifikt på bølgeoppskylling som et resultat av skredgenererte bølger har også blitt utført i større omfang. Her på NTNU ble det på oppdrag fra Norges Geologiske Institutt (NGI) bygget en modell og gjennomført skredforsøk for å avdekke potensialet for ødeleggelse av bebyggelsen langsmed Geiranger/Tafjorden om "Åknesskredet" skulle gå. Skredet ble modellert i 3D med solide blokker og en bestemt skredhelning (Harbitz & Eidsvig, 2005).

Müller og Vischer (1996) testet metoden (Formel 2-1) utviklet av Müller (1995) som dekker bølgeoppskylling ved små Stoke-lignende bølger samt både enslige og cnoidal-lignende bølger. Metoden ble testet med gjennomføring av 637 forsøk i bølgekanal (2D) og 90 forsøk i bølgebasseng (3D) med en helning på oppskyllingspunktet som varierte mellom 18,4° og 90°. Metoden ga et avvik på ±10% i de fleste tilfellene i 2D og ble regnet som en suksess (Müller & Vischer, 1996).

Bølgeoppskyllingsformelen (Müller, 1995)

$$\frac{R}{d} = 1,25 \left(\frac{\pi}{2\beta}\right)^{0,2} \left(\frac{H}{d}\right)^{1,25} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0,15} \quad \text{Formel 2-1}$$

R	Bølgeoppskyllingshøyde
d	Vanndybden foran oppskyllingspunktet
β	Helningsvinkel på oppskyllingspunktet (radianer)
H	Bølgehøyde foran oppskyllingspunktet
L	Bølgelengde foran oppskyllingspunktet

Müller og Vischer studerte også 3D effektene på oppskyllingspunktet, men kom ikke frem til en generell metode hvor disse kunne tas høyde for. Metoden krever derfor at man estimerer disse effektene fra sted til sted.

Kamphuis og Bowering (1979) fant en metode for estimering av en stabil bølgehøyde. Denne ble funnet ved hjelp av en rekke 2D-forsøk med solide blokker i en bølgekanal hvor helningen på skredet kunne justeres med en sveiv (Kamphuis & Bowering, 1972). Det stilles likevel spørsmål ved nøyaktigheten til metoden i dag på grunn av unøyaktigheten i måleutstyret som ble benyttet (Heller, et al., 2009).

Panizzo, De Girolamo og Petaccia (2005) gjennomførte en rekke skredforsøk med solide blokker i bølgebasseng (3D) med flat bunn. Skredhelningene brukt i forsøkene var alle under 36° så resultatene kan best benyttes for å estimere impulsbølgegenerering i lavlandet og kystområder (Panizzo, et al., 2005).

Heller (2007) gjennomførte en mengde forsøk med løsmasseskred i bølgekanal (2D) hvor flere parametere ble forandret. Dette resulterte i en god estimering av bølgegenerering og bølgeforplantningen i planet (2D). Det ble også funnet en klar skilning mellom forholdene hvor de forskjellige bølgetypene oppstår (Heller, 2007).

Huber og Hager (1997) gjennomførte en ny analyse av 3D-forsøkene til Huber fra perioden 1980-1982. I disse forsøkene hadde Huber sett på bølgegenereringen og bølgeforplantningen etter skred i både bølgekanal og bølgebasseng med intensjon om å finne en måte å benytte 2D data til estimering av bølgeforplantning i 3D. Forsøkene ble gjennomført med solide blokker og som løsmasseskred (Huber & Hager, 1997). Huber og Hager gjennomførte i tillegg nye 3D-forsøk som løsmasseskred og kom frem til en metode å gjøre om bølgehøyden i 2D til 3D. Den største ulempen med metoden er at parameterne ikke ble tilstrekkelig variert (Heller, et al., 2009). Dette resulterte i at metoden har strenge grenser for parameterne som må overholdes, parameterne er beskrevet i Tabell 2-3.

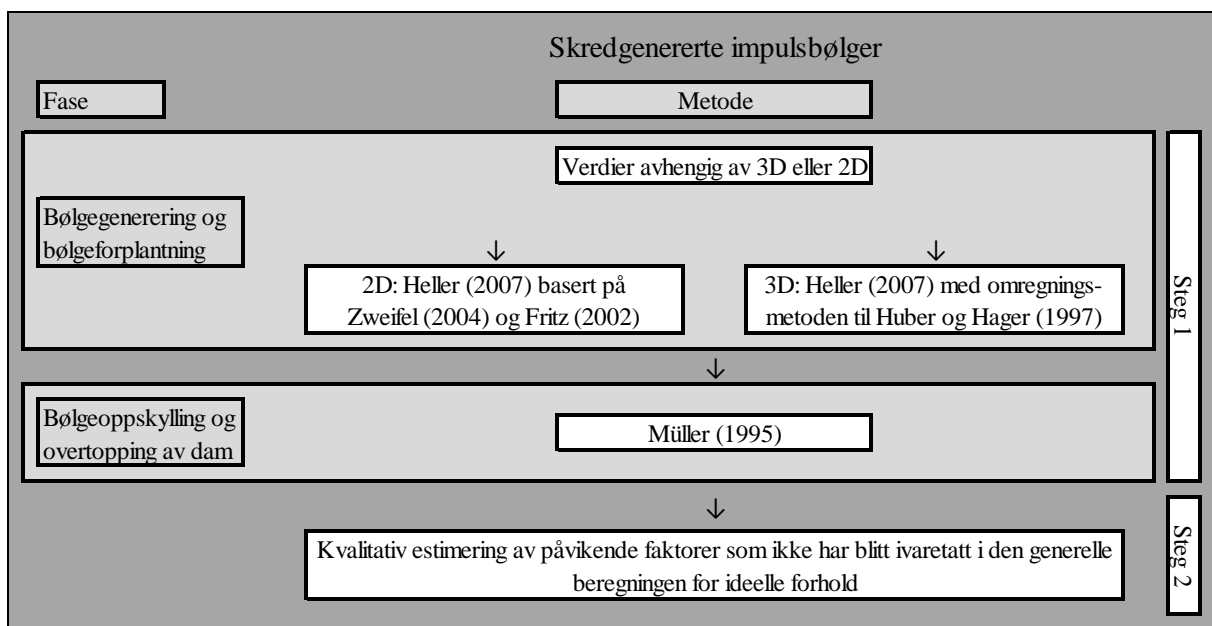
Forsøkene som er kort beskrevet i dette delkapittelet danner grunnlaget for beregningsmetoden til Heller et al. (2009). Beregningsmetoden er beskrevet i neste delkapittel.

2.2 Beregningsmetoden utviklet av Heller et al. (2009)

I en trettiårs periode har det vært gjennomført en rekke forsøk på skredgenererte impulsbølger ved VAW på ETH i Zürich. I 2009 ble det publisert en beregningsmetode med tilhørende regneark som skal kunne estimere bølgeoppskylling, overtopping og kraftoverføringer fra skredgenererte tsunami bølger. Denne oppgaven vil omhandle test av metodens estimering

frem til overtoppet volum. I dette delkapittelet presenteres derfor metodens hovedtrekk for å bestemme overtoppingen hentet fra manualen "Landslide generated impulse waves in reservoirs, Basics and computation" (Heller, et al., 2009), heretter omtalt som manualen.

Metoden baserer seg på resultater fra forsøkene til (Heller, 2007) og omregningsmetoden til Huber og Hager (1997) presentert i delkapittel 2.1. Det ble i tillegg gjennomført 100 løsmasseskredforsøk i et bølgebasseng (10m x 6m) og ca. 1000 løsmasseskredforsøk i bølgekanal (30,4m x 0,5m) for å bekrefte metoden. Dette gjør at beregningsmetoden har samme krav til parameterstørrelser som omregningsmetoden. For å finne bølgeoppstylingen blir Müllers formel (Formel 2-1) benyttet med en liten omformulering til en helningsvinkel på damstedet i grader istedenfor radianer. Bruken av Müllers formel gjør det (som beskrevet i delkapittel 2.1) ikke mulig å estimere 3D effekter på oppstyllingspunktet med beregningsmetoden alene, noe som gjør det nødvendig med tilleggsberegninger. Omregningsmetoden fra 3D til 2D gir også parametergrenser for bruk av Müllers formel. Tabell 2-1 viser gangen i beregningsmetoden, kraftoverføring på dam blir som nevnt ikke vurdert her.



Tabell 2-1: Viser gangen i beregningsmetoden over de tre fasene. Oversatt og gjengitt fra tabell på side 18 i manualen (Heller, et al., 2009).

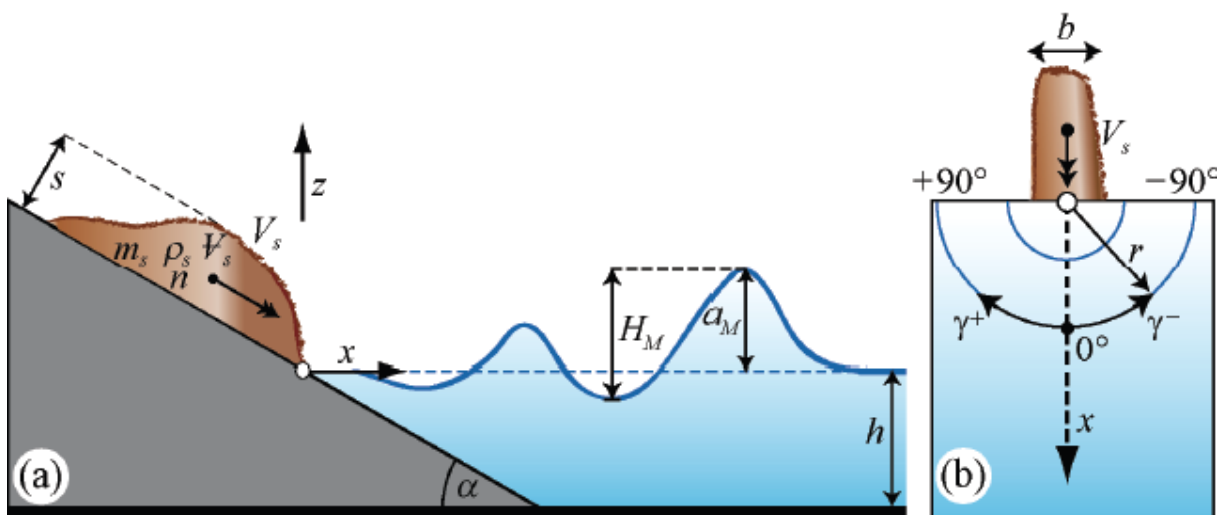
Beregningsmetoden tar for seg impulsølgers tre faser; Bølgegenerering, Bølgeforplantning og Bølgeoppstylling. Metoden har to steg hvor steg 1 tar for seg en rekke formler som gir en teoretisk bølgeoppstylling på et gitt punkt under ideelle forhold. Med ideelle forhold menes et løsmasseskred i et magasin med rette flater og jevnt bunnivå hvor alle parameterne er innenfor grensene til Huber og Hager (1997). Steg 2 blir gjennomført utenfor det etablerte regnearket. Her estimerer man effekten av avvik fra de ideelle forhold i prototypen og finner nye verdier for bølgeoppstylling. Disse kan være svært forskjellig fra verdiene funnet under steg 1. Beregningsmetodens største fordel ligger i at den baserer seg på få lett målbare parametere vist i Tabell 2-2. Parameterne er også vist under i Figur 2-6, Figur 2-7 og Figur 2-8.

Skredgenererte impulsbølger i magasin Regneark - generelle formler for ideelle forhold			
Prosjektnavn	-	Operator	-
Beregningspunkt	-	Dato	-
Bestemmende parametere			
Bølgegenerering			
Skredets treffningshastighet V_s [m/s]	-	Skredets tyngdetetthet ρ_s [kg/m ³]	-
Skredets volum Ψ_s [m ³]	-	Skredets porøsitet n [%]	-
Skredets tykkelse s [m]	-	Skredets treffningsvinkel α [°]	-
Skred -eller magasinbredde b [m]	-	Vanddybde ved treffningspunktet h_i [m]	-
Bølgeforplantning (3D eller 2D)			
Bølgebasseng (3D)		Bølgekanal (2D)	
Radial avstand r [m]	-	Avstand i strømrretning x [m]	-
Bølgeforplantningsvinkel γ [°]	-		
Bølgeopp skyling og overtopping av dam			
Vanddybde ved oppskyllingspunktet h_d [m]	-	Fribord f [m]	-
Bølgeopp skylingsvinkel β [°]	-	Damkronens bredde b_K [m]	-

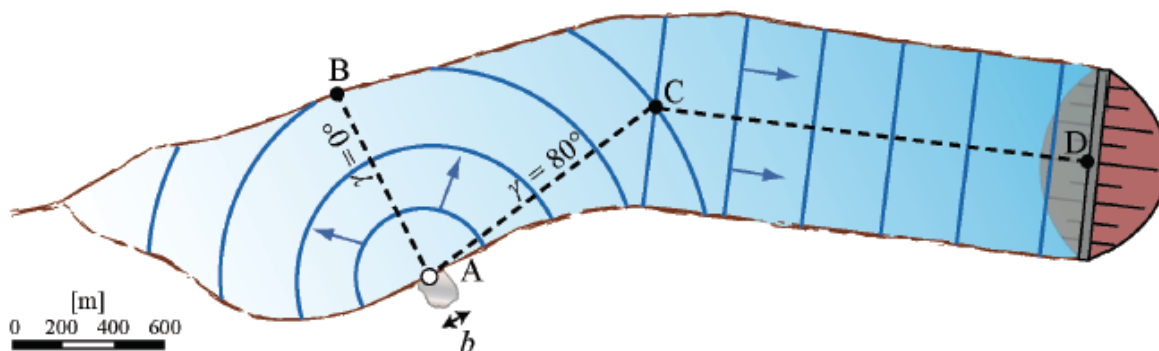
Tabell 2-2: Utklipp fra regneark opprettet for beregningsmetoden. Viser de 15 bestemmende parametere som beregningsmetoden trenger (oversatt til norsk).

2.2.1 Steg 1

Metoden kan tilpasses bølgeforplantning i 3D og i 2D som vist i Figur 2-6. Her viser (a) bølgegenerering og forplantning i 2D og (b) forplantningen 3D. Bølgeforplantningen kan også beregnes som en kombinasjon av disse om raset skulle være skjult bak en svingning i magasinet (Figur 2-7). Bølgeopp skylingen (Figur 2-8) derimot er kun beregnet i 2D og må estimeres videre i steg 2.



Figur 2-6: Nødvendige parametere for 2D og 3D, fra side 21 i manualen (Heller, et al., 2009)



Figur 2-7: Kombinasjon av 3D og 2D forplantning, fra side 71 i manualen (Heller, et al., 2009)

Beregning gjennomført kun ved bølgeforplantning i 3D og som kombinasjon av forplantning i 2D og 3D blir heretter omtalt som 3D og 3D/2D.

2.2.1.1 Parameter

Under dette punktet presenteres formlene brukt til å beregne de ikke forhånds målte parameterne i Figur 2-6, Figur 2-7 og Figur 2-8 ved 3D-forplantning. For forplantning i 2D vises det til manualen.

Det stilles krav til at parameterene holdes innenfor gitte parametergrenser da metoden er basert på arbeidet til Huber og Hager (1997). Effekten av å bryte parametergrensene er uvisst da forsøkene hadde liten variasjon i parameterene. Parametergrensene for beregning av bølgegenerering og bølgeforplantning er gitt under i Tabell 2-3. Grensene for beregning av bølgeoppbygging er gitt i Tabell 2-4. For beregning av overtoppingsvolum ved overtopping av dam og overtoppingsperioden er parametergrensene gitt i hennholdsvis Tabell 2-5 og Tabell 2-6.

Uttrykk	Parametergrenser	Forklaring
Skredets Froude tall	$0,86 \leq F \leq 6,83$	$F = V_s / (gh_i)^{1/2}$
Relativ skredtykkelse	$0,09 \leq S \leq 1,64$	$S = s/h_i$
Relativ skredmasse	$0,11 \leq M \leq 10,02$	$M = \rho_s V_s / (\rho_w b h_i^2)$
Relativ skredtetthet	$0,59 \leq D \leq 1,72$	$D = \rho_s / \rho_w$
Relativ løsmassetetthet	$0,96 \leq \rho_g / \rho_w \leq 2,75$	ρ_g / ρ_w
Relativt skredvolum	$0,05 \leq V \leq 5,94$	$V = V_s / (b h_i^2)$
Skredets porøsitet	$30,7\% \leq n \leq 43,3\%$	n
Skredets treffningsvinkel	$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	α
Relativ skredbredde	$0,74 \leq B \leq 3,33$	$B = b/h_i$
Relativ radialavstand	$5 \leq r/h_i \leq 30$	r/h_i
Bølgens forplantningsvinkel	$-90^\circ \leq \gamma \leq +90^\circ$	γ
Relativ avtand i strømretning	$2,7 \leq X \leq 59,2$	$X = x/h_i$

Tabell 2-3: Viser parameterkrav ved Huber og Hagers omregningsmetode. Alle parametere er utviklet fra faste parametere som g og ρ_w samt de bestemmende parameterne i Tabell 2-2. Oversatt og basert på tabell på side 25 i manualen (Heller, et al., 2009).

Treffningshastigheten beskriver hastigheten skredet har når det bryter vannflaten og kan finnes ved bruk av Körner (1976).

$$V_s = \sqrt{2g\Delta z_{sc}(1 - \tan \delta \cot \alpha)} \quad \text{Formel 2-2}$$

V_s	Treffningshastigheten
g	Tyngdeakselerasjon
α	Skredets trefningsvinkel (grader)
δ	Friksjonsvinkel
Δz_{sc}	Fallhøyde fra skredets gravitasjonssenter

2.2.1.2 Beregning av bølgeforplantningen:

Impulsprodukt parameter er en parameter utviklet av Heller i 2007. Parameteren brukes til å beskrive bølgeforplantningen i både 2D og 3D. Parameteren baserer seg kun på de bestemmende parameterne gitt i Tabell 2-2. Formlene for relativ skredtykkelse og relativ skredmasse kan sees i Tabell 2-3 (Heller, et al., 2009).

$$P = FS^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{4}}\left\{\cos\left[\left(\frac{6}{7}\right)\alpha\right]\right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Formel 2-3}$$

P	Impulsprodukt parameter
F	Skredets Froude tall
S	Relativ skredtykkelse
M	Relativ skredmasse

Bølgehøyden beskriver avstanden mellom bølgedal og bølgetopp vist i Figur 2-6 (a). For skredgenererte bølger ble følgende formel funnet (Heller, et al., 2009).

$$H(r, \gamma) = \left(\frac{3}{2}\right)P^{\frac{4}{5}}\left(\cos\left(\frac{2\gamma}{3}\right)\right)^2\left(\frac{r}{h_i}\right)^{\frac{-2}{3}}h_i \quad \text{for } \frac{r}{h} > X_M \quad \text{Formel 2-4}$$

$H(r, \gamma)$	Bølgehøyde (kun notert som H i senere formler)
γ	Bølgeforplantningsvinkel (grader)
r	Radial avstand fra treffningspunktet
h_i	Vanndybden ved treffningspunktet
X_M	Relativ strømningsavstand for maks bølgeamplitude ved trefningspunkt

Bølgehastigheten beskriver hastigheten bølgen beveger seg med over vannflaten. Verdien finnes ved formel for enslig bølge (Kamphuis & Bowering, 1972).

$$c = [g(h + a)]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Formel 2-5}$$

c	Bølgehastigheten
a	Bølgeamplituden

Amplituden til impulsbølgen finnes etter Formel 2-6 og beskriver bølgens største utslag i forhold til likevektstilstanden (normalvannstand) som vist i Figur 2-6 (a) (Heller, et al., 2009).

$$a = \left(\frac{4}{5}\right)H \quad \text{Formel 2-6}$$

Bølgeperioden beskriver tiden det tar fra en bølgetopp passerer et punkt til neste bølgetopp passerer samme punkt (Heller, et al., 2009).

$$T(r, \gamma) = 15 \left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{for } \frac{r}{h} > X_M \quad \text{Formel 2-7}$$

$T(r, \gamma)$ Bølgeperioden
 h Vanndybden ved gitt posisjon

Bølgelengden beskriver avstanden mellom to bølgetopper (Heller, et al., 2009).

$$L(r, \gamma) = T(r, \gamma)c(r, \gamma) \quad \text{Formel 2-8}$$

2.2.1.3 Bølgeoppskylling:

Bølgeoppskyllingen er høyden på oppskyllingen langsmed oppstrøms side av dammen eller oppover en strandkant som vist i Figur 2-8. Bølgeoppskyllingen finnes ved bruk av en omgjort Müllers formel (Formel 2-1) som nevnt tidligere (Heller, et al., 2009).

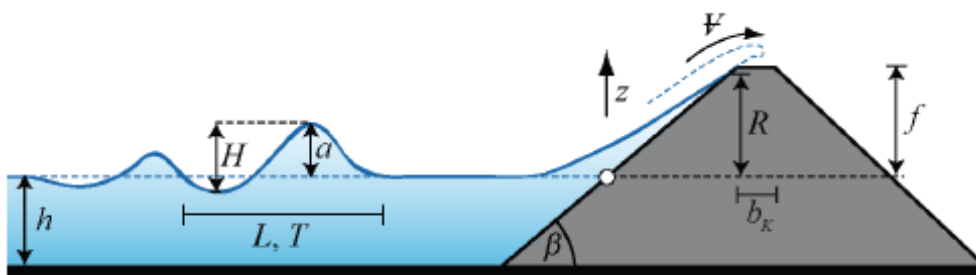
$$R = 1,25 \left(\frac{H}{h_d}\right)^{\frac{5}{4}} \left(\frac{H}{L}\right)^{\frac{-3}{20}} \left(\frac{90^\circ}{\beta}\right)^{\frac{1}{5}} h_d \quad \text{Formel 2-9}$$

R Bølgeoppskyllingshøyde
 h_d Vanndybden foran oppskyllingspunktet
 β Helningsvinkel på oppskyllingspunktet (grader)
 H Bølgehøyde (foran oppskyllingspunktet)
 L Bølgelengde (foran oppskyllingspunktet)

Parameterkravene for beregning av bølgeoppskylling er gitt i Tabell 2-4. Figur 2-8 viser parameterne benyttet for å finne bølgeoppskyllingen. H , L og T er verdier funnet under 2.2.1.2.

Utrykk	Parametergrenser	Utrykk	Parametergrenser
Relativ bølgehøyde	$0,011 \leq H/h_d \leq 0,521$	Relativ vinkel	$1,0 \leq 90^\circ/\beta \leq 4,9$
Bølgehelling	$0,001 \leq H/L \leq 0,013$		

Tabell 2-4: Viser parametergrenser for beregning av bølgeoppskylling. Oversatt og basert på tabell fra side 30 i manualen (Heller, et al., 2009).



Figur 2-8: Skisse over parametre benyttet, fra side 30 i manualen (Heller, et al., 2009)

2.2.1.4 Overtopping:

Dersom bølgeoppstillingen (R) er større enn dammens fribord (f) vil det oppstå overtopping av dammen. Overtoppingsvolumet per meter dam regnes ut etter Müller (1995). Dette utføres i to steg hvor man først finner overtoppingsvolumet for en situasjon hvor dammen ikke har fribord ($f=0$) vist i Formel 2-10 (Heller, et al., 2009).

$$V_0 = 1,45k \left(\frac{H}{h_d} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{T}{\sqrt{\frac{h_d}{g}}} \right)^{\frac{4}{9}} h_d^2 \quad \text{Formel 2-10}$$

V_0 Overtoppingsvolum per meter dam ($f=0$)
 k Overløpskoeffisient for damkrone

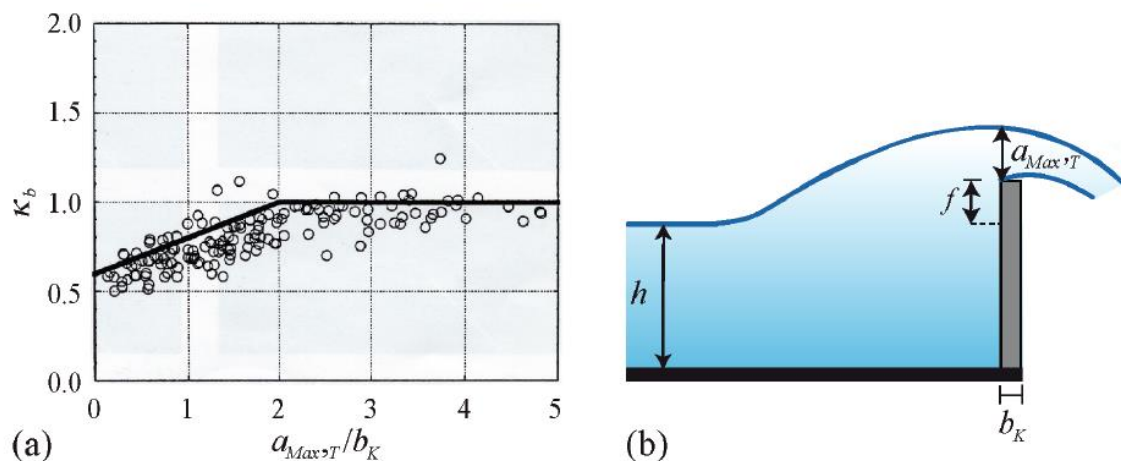
Overløpskoeffisienten for damkrone er gitt av Formel 2-11 (Heller, et al., 2009):

$$k = k_q k_b k_w^{\frac{3}{2}} \quad \text{Formel 2-11}$$

k_q beskriver overløpet i stabil tilstand der $k_q = 0,41$ ved $\beta = 90^\circ$, $k_q = 0,47$ ved $\beta = 45^\circ$ og $k_q = 0,51$ ved $\beta = 18,4^\circ$. Mellom disse punktene kan verdien interpoleres.

k_b beskriver kronebreddens innvirkning og bestemmes etter Figur 2-9. Her er b_k kronebredden og $a_{Max,T}$ den maksimale overtoppingsdybden. Denne settes lik bølgehøyden foran dammen (Müller, 1995).

k_w beskriver avvik i bølgeenergi fra den stabile tilstanden. Her er $k_w = 1,3$ for $18,4^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$



Figur 2-9: (a) viser estimert k_b verdi på grunnlag av kronebredden og maksimal overtoppingsdybde. (b) viser parameterne i en skisse, fra side 32 i manualen (Heller, et al., 2009).

Når dammens fribord er større enn 0, vil overtoppingsvolumet nødvendigvis reduseres i forhold til høyden på fribordet og oppskyllingshøyden langsmed oppstrøms side på dammen. Müller (1995) kom frem til et forhold som gav følgende formel:

$$\Psi = \left(1 - \frac{f}{R}\right)^{\frac{11}{5}} \Psi_0 \quad \text{Formel 2-12}$$

Ψ Overtoppingsvolum per meter dam.
 f Dammens fribord

Det stilles også krav til parametergrenser i beregning av overtoppingsvolumet. Grensene er gitt under i Tabell 2-5.

Utrykk	Parametergrenser	Utrykk	Parametergrenser
Relativ bølgehøyde	$0,019 \leq H/h_d \leq 0,448$	Relativ bølgehastighet	$0,83 \leq \frac{c^2}{gh_d} \leq 1,40$
Ikke-linearitet	$0,59 \leq a/H \leq 0,95$	Relativ bølgelengde	$6,0 \leq L/h_d \leq 24,0$
Bølgehelling	$0,001 \leq H/L \leq 0,023$	Relativ vinkel	$1,0 \leq 90^\circ/\beta \leq 4,9$
Relativ bølgeperiode	$9,0 \leq T \left(\frac{g}{h_d}\right)^{\frac{1}{2}} \leq 21,0$		

Tabell 2-5: Viser parametergrenser for beregning av overtoppingsvolum. Oversatt og basert på tabell fra side 32 i manualen (Heller, et al., 2009).

Müller (1995) fant også en formel for overtoppingsperioden ved $f=0$ vist i (Formel 2-13), noe som gjør det mulig å finne avrenningen over dammen ved $f=0$. Det er ikke utviklet noen formel for avrenning over dammer med $f>0$. Impulsbølgens kraftoverføring på dammen er videre beskrevet i manualen, men vil ikke bli sett på i denne oppgaven. Parametergrensene for beregning av overtoppingsperioden er gitt i Tabell 2-6.

$$t_0 = 4 \left(T \sqrt{\frac{g}{h_d}} \right)^{\frac{4}{9}} \left(\frac{h_d}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Formel 2-13}$$

t_0 Overtoppingsperioden

Utrykk	Parametergrenser
Relativ bølgeperiode	$14 \leq T \left(\frac{g}{h_d}\right)^{1/2} \leq 22$
Relativ overtoppingsperiode	$10,5 \leq t_0 \left(\frac{g}{h_d}\right)^{\frac{1}{2}} \leq 13,5$

Tabell 2-6: Parametergrenser for beregning av overtoppingsperioden. Oversatt og basert på tabell fra side 33 i manualen (Heller, et al., 2009).

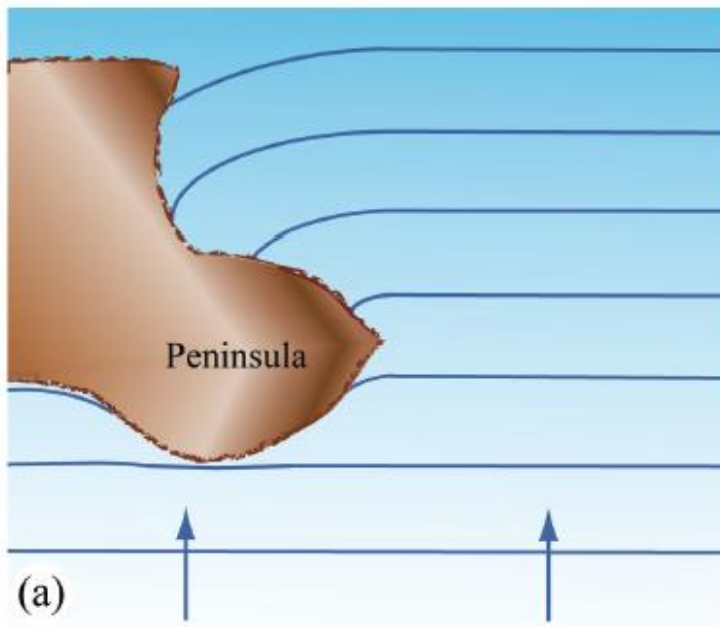
2.2.2 Steg 2:

I dette steget tar man høyde for alle avvik prototypen måtte ha fra de ideelle forhold. Herunder avvik i magasinets form og avvik i skredets form. Et utvalg av relevante avvik presenteres her.

2.2.2.1 Magasinets form:

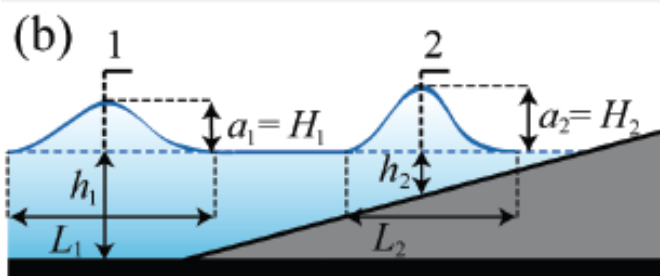
Prototypens magasin vil aldri være rettvinklet eller fritt for utstikkere og lokale forskjeller i dybde og bredde. I dette avsnittet gjennomgås det fem avvik som kan ha innvirkning på de endelige resultatene og hvordan det skal rettes for disse avvikene.

Utstikkere i magasinet vil bryte opp bølgene slik at de forandrer retning og mister noe av sin energi som vist i Figur 2-10.



Figur 2-10: Utstikkere vil forandre bølgens retning, fra side 46 i manualen (Heller, et al., 2009)

Forandring i magasinets bunnivå vil kunne føre til grunnvannsbølger ($\frac{L}{h} > 20$). En grunnvannsbølge vil bli påvirket av bunnfriksjon noe som gjør at bølgens amplitude blir større mens bølgelengden blir mindre (Figur 2-11). Mellomstadiebølger ($2 \leq \frac{L}{h} \leq 20$) vil også kunne påvirkes av bunnfriksjon.



Figur 2-11: Grunnvannsbølger påvirket av bunnfriksjon, fra side 47 i manualen (Heller, et al., 2009)

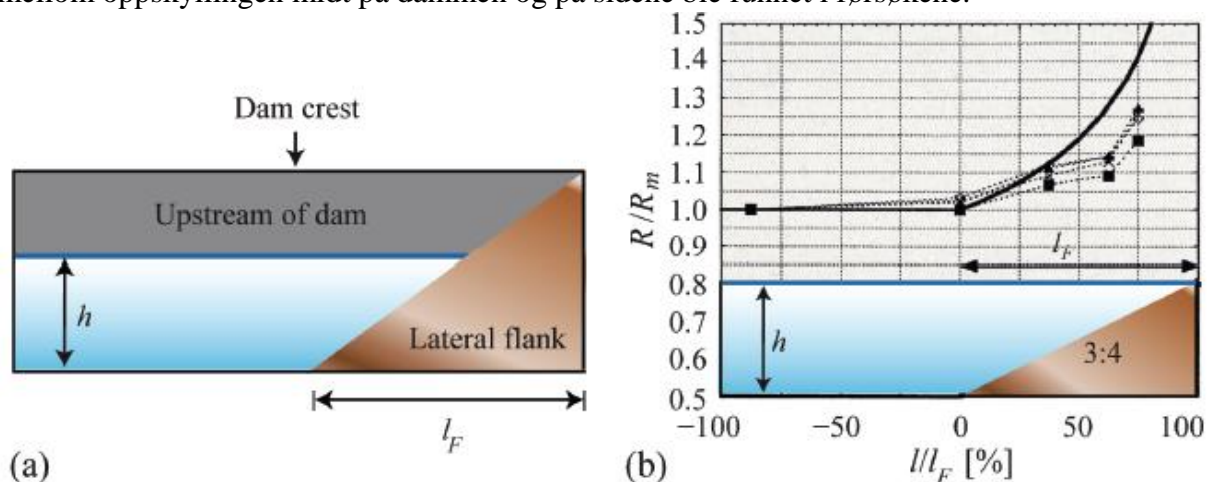
Forandring i magasinets bredde vil føre til en større amplitude på grunn av kompresjon av bølgens energi. For grunnvannsbølger kan effekten av dette og forandring i magasinets bunnivå beskrives av Dean og Dalrymple (1991). Formel 2-14 gjelder også for forandring kun i bredde eller bunnivå.

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Formel 2-14}$$

H_1	Bølgehøyde i snitt 1
H_2	Bølgehøyde i snitt 2
h_1	Vanddybden i snitt 1
h_2	Vanddybden i snitt 2
b_1	Magasinbredde i snitt 1
b_2	Magasinbredde i snitt 2

Refleksjon av bølger mot strandlinjen når ingen overtopping (tap av volum) eller bølgebryting oppstår vil kun føre til ubetydelige energitap. Tester utført i bølgekanal og presentert i Heller (2007) viser at returnerende bølgers kollisjon med innkommende bølger heller ikke gir noen betydelige energitap. Reflekterte bølger må derfor sjekkes mot resultatene i steg 1.

Siden sidene på en dam blir bygget opp mot dalsidene (som har lavere bunnivå enn midt på dammen) vil bølgeopp skyllingen her være større enn midt på dammen (Figur 2-12). Müller (1995) så på fenomenet og konkluderte med at formelen til Dean og Dalrymple (1991) (Formel 2-14) ga for stort oppskyllingshøyde og kunne ikke brukes. En forskjell på 20-30% mellom oppskyllingen midt på dammen og på sidene ble funnet i forsøkene.



Figur 2-12: Bølgeopp skylling langsmed dalside, fra side 48 i manualen (Heller, et al., 2009)

2.2.2.2 Skredets form:

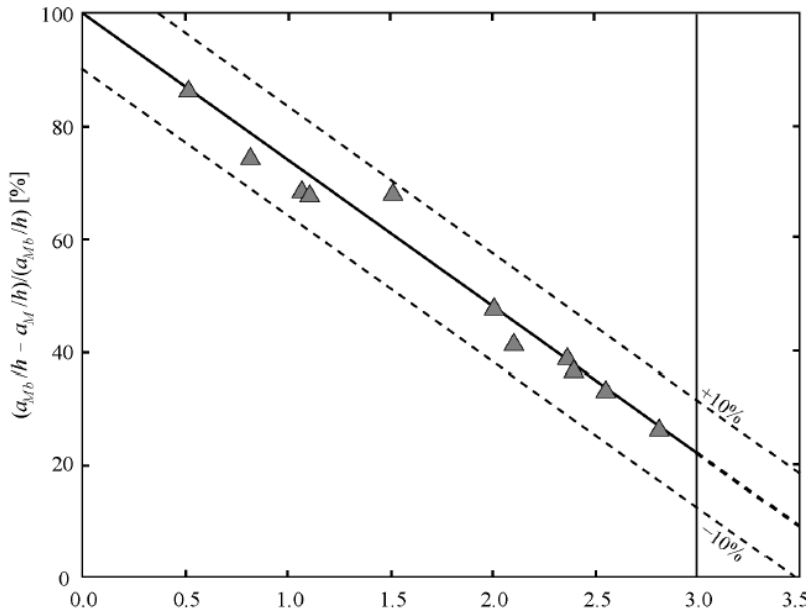
Det er viktig å kjenne til skredtypen i prototypen da beregningsmetoden er basert på løsmasseskred. Et blokkskred vil ha en permeabilitet nærmere null noe som gjør at vannet ikke kan trenge seg inn i porene til skredet. Dette vil føre til forflytting av mer vann og skape større impulsbølger. Zweifel (2004) fant en sammenheng mellom impulsbølgers amplitude i løsmasseskred og blokkskred vist i Figur 2-13 og Formel 2-15.

$$\frac{\frac{a_{Mb}}{h_d} - \frac{a_M}{h_d}}{\frac{a_{Mb}}{h_d}} = 1 - 0,26F \quad \text{for } 0,5 \leq F \leq 3,0$$

Formel 2-15

a_M Maks bølgeamplitude ved løsmasseskred
 a_{Mb} Maks bølgeamplitude ved blokkskred

For $F > 3,0$ er forskjellen neglisjerbar på grunn av at skredets høye hastighet hindrer vannet i å trenge inn i porene.



Figur 2-13: Zweifels sammenheng mellom bølgeamplitude ved løsmasseskred og blokkskred, fra side 51 i manualen (Heller, et al., 2009)

Kapittel 2 har i korte trekk gjennomgått grunnlaget for og beregningsmetoden utviklet ved ETH i Zürich. Kapittel 3 vil beskrive modellen bygget i Vassdragslaboratoriet ved NTNU i Trondheim som har blitt brukt til å teste beregningsmetodens brukbarhet mot Norske forhold.

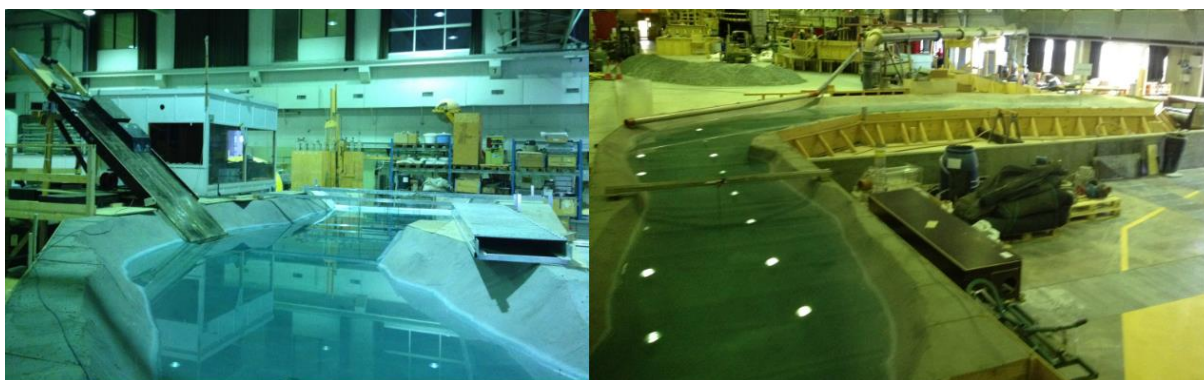
Kapittel 3. Skredmodell med norske forhold

Modellen benyttet simulerer skredentring i et magasin under typisk norske forhold og er plassert i Vassdragslaboratoriet på NTNU. Modellen er en ombygging av "Åknes modellen" (Lothe & Storler, 2010) hvor "Geiranger-armen" ble murt opp for å simulere et magasin (Svendsby, 2013) (Lorås, 2013). Magasinets bredde-dybde forhold samsvarer godt med forholdene i Viddalsmagasinet som ble valgt som prototype med skalering 1:158 (Lorås, 2013). Våren 2014 ble det designet og bygget en dam basert på målene til Viddalsdammen.

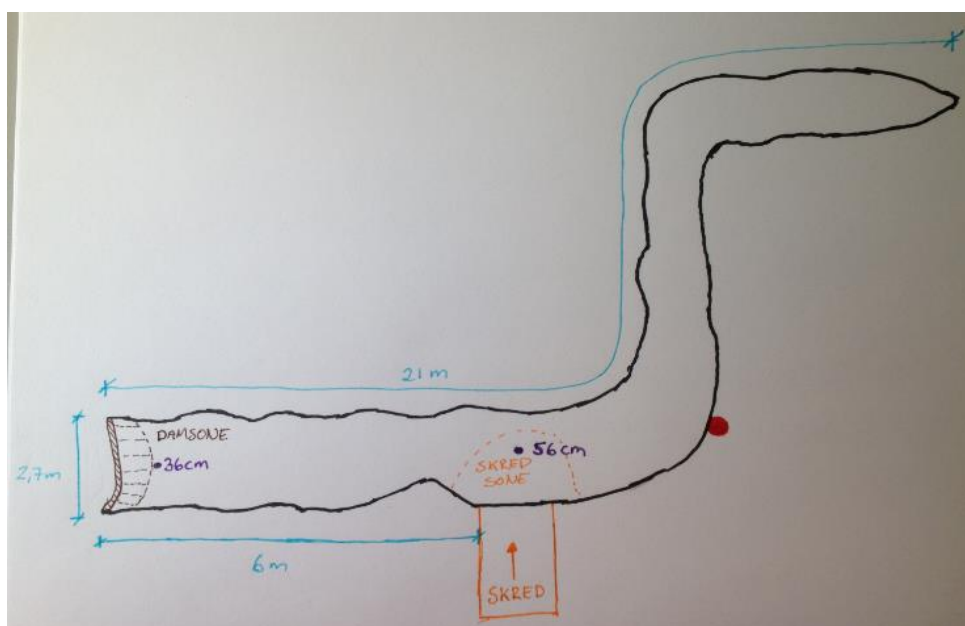
I dette kapittelet vil modellen og instrumenteringen benyttet til målingene presenteres.

3.1 Magasinet

Magasinet (Figur 3-1 og Figur 3-2) strekker seg over en lengde på ca. 21 m inklusiv to større svinger. Tverrsnittet er bueformet med ulike bredder og dybder langsmed magasinets lengde. Dette gir en god simulering av et naturlig norsk fjellmagasins grensebestemmelser.



Figur 3-1: V.S.: Magasinets dam ende med skredrampe, dam og bølgesensorer. H.S.: magasinets grunne ende med bølgesensor og innløpsrør. Bildene er tatt fra svingen vist i Figur 3-2.



Figur 3-2: Skisse som viser, magasinbredde, magasinlengde, avstand mellom damsone og skredsone, vann dybden i skredsone og damsone samt fotoplassering for Figur 3-1.

Bildene i Figur 3-1 er tatt i punktet markert med rød sirkel i Figur 3-2. Magasinets ende til venstre i Figur 3-1 består av dammen som blir gjennomgått nærmere i delkapittel 3.4. Magasinets ende til høyre i Figur 3-1 avsluttes med en grunning opp mot kanten. I dette området er det også installert et innløp for fylling av magasinet. Magasinet er dekket av et lag betong, men lekker noe og må etterfylles etter ca. 3 dager. For ekstra tetting blir vannet tilsatt kanel som trenger inn i de minste sprekke. Det vil ha vært noe forskjell i vannstand for de forskjellige skredene noe som vil være en feilkilde. Figur 3-2 viser noen av målene i modellen. Modellen er ca. 2,7m bred i vannspeilet og ca. 6m lang mellom skredsonen og damsonen. Vannivået ble forsøkt holdt konstant under forsøkene som tilsvarte en magasin dybde på 53cm i skredsonen og 36cm foran dammen. Flere størrelser er presentert i Vedlegg I.

3.2 Skredrampen

Selve skredet slippes fra en skredrampe montert langsmed siden av magasinet (Figur 3-3). Rampen er bygget av tre og har en fast helningsvinkel på 40°. Selve skredet monteres på bakken ved at elementene kobles sammen med kjetting før den løftes opp på rampen ved hjelp av en tak-kran. Mellom forsøk plasseres skredet i hvileposisjon mot en sperrestang nederst på rampen. En vinsj benyttes så for å dra skredet opp i startposisjon fra hvileposisjon eller fra magasinbunnen etter slipp. Her kobles skredet til utløsermekanismen via en kjetting. Lengden på kjettingen kan justeres etter ønsket sliphøyde for å oppnå forskjellig treffningshastighet for skredet når det entrer vannflaten. Selve utløsermekanismen er en krok som åpnes ved å trekke i en snor. Løsningen med forskjellig lengde på kjettingen ble innført sent i arbeidet og ble derfor kun benyttet på de to siste skredene.

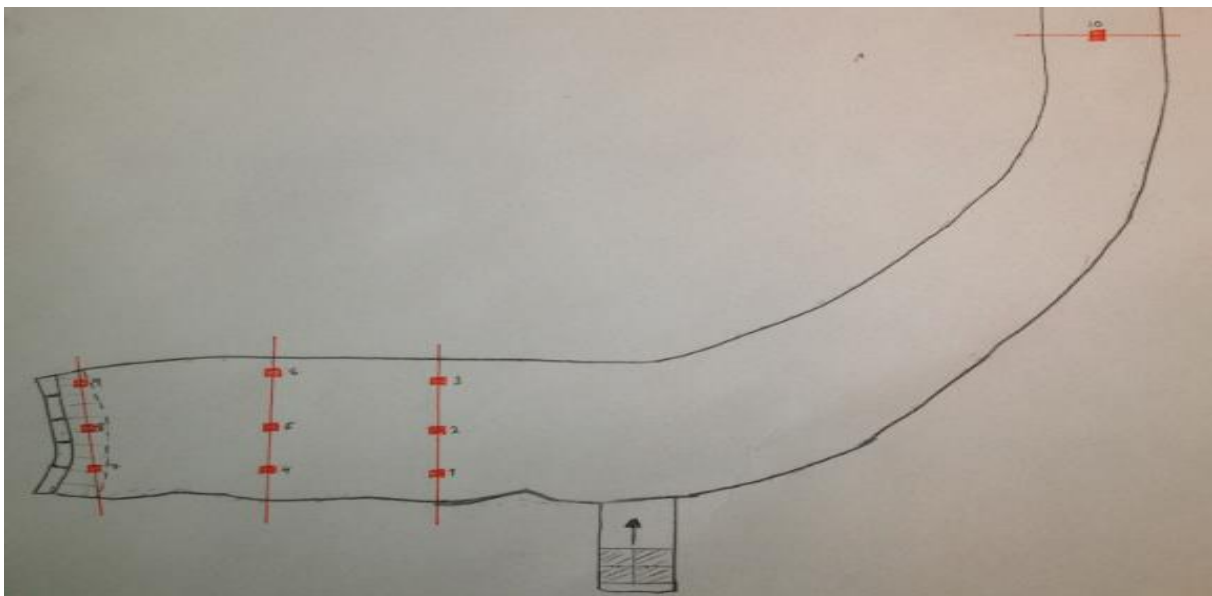


Figur 3-3: V.S.: Skredrampen med skred i hvileposisjon. (1) Sperrestang, (2) Skredelementer, (3) Hastighetsmåler, (4) Utløsermekanisme, (5) Vinsj, (6) Skredsensoren. H.S.: Skredelementene løftes på plass ved hjelp av en tak kran.

Hastighetsmåleren består av en annen snor som festes bakerst på skredet. Spenningen i snoren blir målt i volt og har blitt kalibrert for omregning til meter, det blir tatt 200 målinger i sekundet (200Hz) under forsøkene slik at hastigheten kan bestemmes. Langsmed siden av rampen er det montert en skredsensoren, ved å plassere skredet inntil denne vil en rød lampe ved dammen slukkes. Når skredet slippes mister sensoren kontakt med skredet og lampen tennes. På denne måten ser man tydelig når skredet slippes i videoopptaket av dam området.

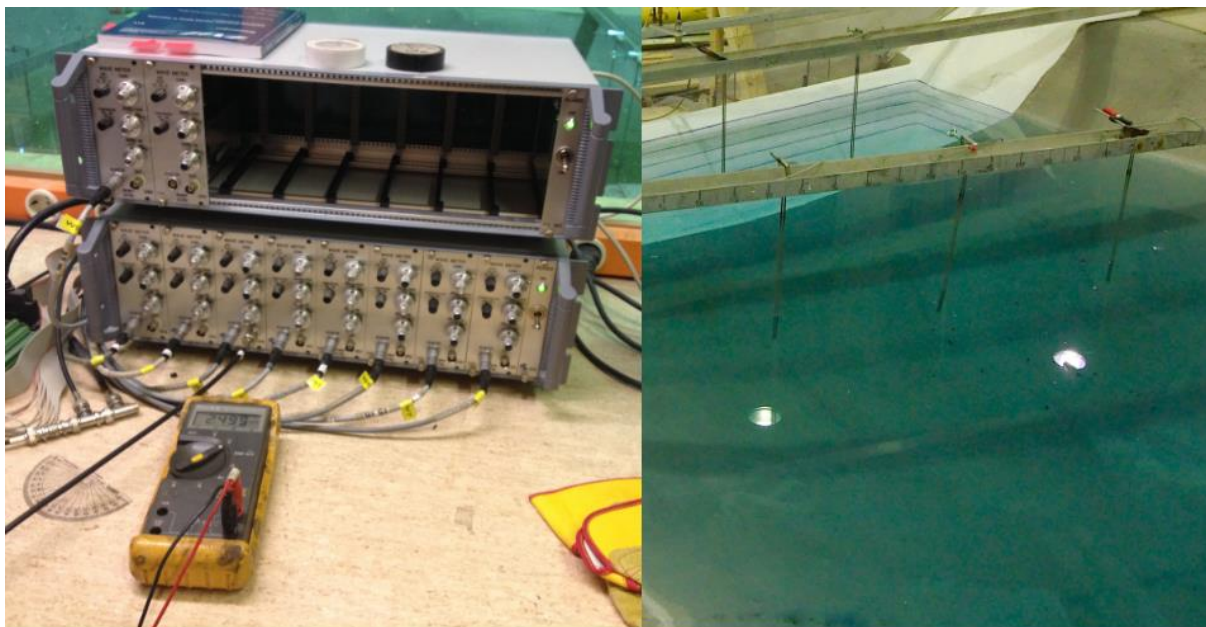
3.3 Bølgesensorer og bølgemåling

Det er 10 bølgesensorer montert på stenger som krysser modellen på fire punkter. Plasseringene er som vist i Figur 3-4, de kan også sees i Figur 3-1. Bølgesensor 1-9 ble benyttet til å kartlegge bølgeforplantningen fra skredet mot dammen (venstre i Figur 3-1). Bølgesensor 10 ble skjult bak modellens første sving for å teste nøyaktigheten til kombinasjonen 3D/2D i et område hvor fri bølgeforplantning i rommet ikke er mulig (høyre i Figur 3-1).



Figur 3-4: Skisse som viser plasseringen av bølgesensorene i magasinet

Bølgesensorene er av typen «DHI Wave Meter 102E» (Figur 3-5) hvor målingene baseres på 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. Bølgesensorene er koblet opp mot en USB-enhet av typen «The Agilent U2300A Series USB» som leser verdiene målt av bølgesensorene når vannstanden øker og minker med bølgene. Enheten (Figur 3-5) har en høy ytelse av datainnsamling med en frekvens på opptil 3 MSa/s for en enkelt kanal, hvor hver bølgesensor har sin egen kanal. Disse to systemene må kalibreres mot hverandre. Dette gjøres ved å koble et voltmeter til USB-enheten og stille inn en bestemt spenning for en bestemt vannstand. Vannstanden forandres enkelt under kalibrering ved å heve eller senke bølgesensorene. I denne masteroppgaven ble 5cm vannstigning satt til 2,5V.



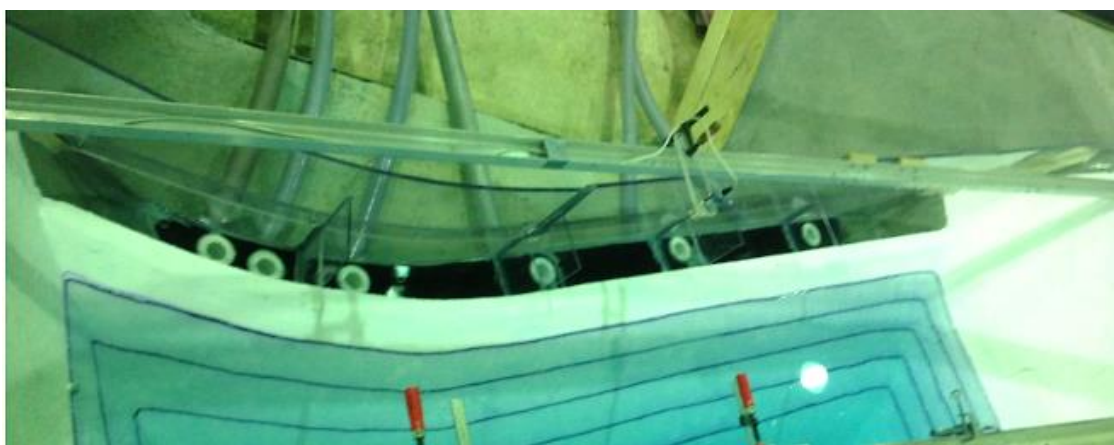
Figur 3-5: V.S.: The Agilent U2300A Series USB med 10 kanaler og voltmeter til kalibrering. H.S.: DHI Wave Meter 102E montert i modellen.

Dataprogrammet «The Agilent Measurement Manager (AMM)» ble benyttet til å starte og behandle målingene. Det ble også her tatt 200 målinger per sekund, hvor forsøkene besto av mellom 20000 og 180000 målinger. Antall målinger kunne varieres og ble bestemt ut ifra hva som var ønsket å se på i de forskjellige masteroppgavene.

Bølgesensorene er meget sensitive så det er viktig å unngå unødvendig gange langs magasinkanten under måling. Da det oppstår svingning i stengene som bølgesensorene er montert på.

3.4 Overtopping av dam

Dammen ble designet som en del av masteroppgaven etter mål fra Viddalsdammen. Dammen har en oppstrøms helning på 32° og er 2,7 meter lang. Damkronen og fribordet er satt til 3 cm i modellen. På nedstrøms side der det montert fem kammer for oppsamling av overtoppet vann (Figur 3-6). Det ble valgt å skille kamrene fra hverandre for å kunne se hvor overtoppingen er størst, noen av skilleveggene ble derimot fjernet senere i forsøksperioden da de fylte seg opp ved de største skredslippene.



Figur 3-6: Dam og kammer sett ovenfra. Lasermåleren mic+35/IU/TC er montert på stang over dam.

Det ble også montert en lasermåler («mic+35/IU/TC») over dammen for å måle høyden på overtoppingen på det punktet hvor den er høyest og gi en indikasjon på overtoppingsperioden. Plasseringen ble bestemt ved å prøve seg frem. Målingene ble avlest i AMM og ble gitt i volt. Laseren måtte derfor kalibreres for omregning til cm.

Fra kamrene blir vannet ledet ned i målebøtter igjennom slanger vist i Figur 3-7. Målebøttene som ble brukt var på 20L og 60L, og volumet ble kalibrert mot vanddybden slik at avlesningen raskt kunne gjøres ved hjelp av en annen lasermåler av typen «mic+35/IU/TC», men her ble avstanden lest av direkte i mm og notert etter at overtoppingen hadde avtatt.



Figur 3-7: Kammer og oppsamlingsystemet på nedstrøms side av dammen

Videopptak av dam området under forsøk ble tatt med et «Sony Handycam, HDR-SR11E/SR12E». Kameraet ble montert på taket av målehytta hvor den fikk inn hele området, men ble flyttet ved enkelte slipp for å filme magasinet ovenfra og skredet som entrer vannet.

3.5 Skredtypene

Skredene presentert i dette delkapittelet har fått navn som forteller om skredform og startposisjon. Det første sifferet beskriver hvilken form skredet har. Totalt er det syv forskjellige former på skredene. Alle skredene er overflateskred med utforming bestemt i Lorås (2014). Skred 1-5 er blokkskred bestående av kompakte elementer fylt med stein. Skred 6 og 7 er løsmasseskred bestående av en stålramme trukket med netting og fylt med en blanding av golfballer og aluminiums-terninger for å få en porøsitet tilsvarende sand (ca. 40%). Det siste sifferet beskriver skredets startposisjon, her ble tre forskjellige posisjoner valgt. I posisjon 1 har skredet blitt dratt så lang opp på rampen som mulig, posisjon 2 og 3 er henholdsvis 1m og 1,5m fra vannflaten målt langsmed rampen. Sammensatt gir dette de 12 forskjellige skredsenarioer vist under.



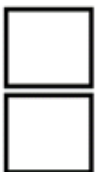
Skredtype 1	1:1	158:1
Volum	0,061 m ³	239 404 m ³
Bredde	0,90 m	142 m
Tykkelse	0,16 m	25 m
Porøsitet	0 %	0 %
Tyngdetetthet	1 241 kg/m ³	1 241 kg/m ³
Helningsvinkel	40 °	40 °
Skred 1.1	1:1	158:1
Vertikal fallhøyde	1,54 m	244 m
Treffningshastighet	5,0 m/s	62,4 m/s



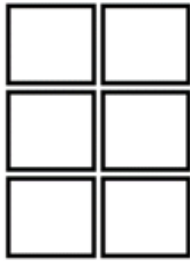
Skredtype 2	1:1	158:1
Volum	0,133 m ³	523 394 m ³
Bredde	0,90 m	142 m
Tykkelse	0,16 m	25 m
Porøsitet	0 %	0 %
Tyngdetetthet	1 267 kg/m ³	1 267 kg/m ³
Helningsvinkel	40 °	40 °
Skred 2.1	1:1	158:1
Vertikal fallhøyde	1,54 m	244 m
Treffningshastighet	4,4 m/s	55,5 m/s



Skredtype 3	1:1	158:1
Volum	0,030 m ³	119 702 m ³
Bredde	0,45 m	71 m
Tykkelse	0,16 m	25 m
Porøsitet	0 %	0 %
Tyngdetetthet	1 239 kg/m ³	1 239 kg/m ³
Helningsvinkel	40 °	40 °
Skred 3.1	1:1	158:1
Vertikal fallhøyde	1,77 m	279 m
Treffningshastighet	5,0 m/s	62,5 m/s
Skred 3.2	1:1	158:1
Vertikal fallhøyde	0,75 m	118 m
Treffningshastighet	3,2 m/s	39,7 m/s



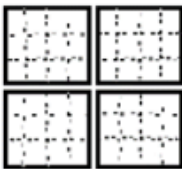
Skredtype 4	1:1	158:1
Volum	0,066 m ³	261 697 m ³
Bredde	0,45 m	71 m
Tykkelse	0,16 m	25 m
Porøsitet	0 %	0 %
Tyngdetetthet	1 266 kg/m ³	1 266 kg/m ³
Helningsvinkel	40 °	40 °
Skred 4.1	1:1	158:1
Vertikal fallhøyde	1,77 m	279 m
Treffningshastighet	4,4 m/s	54,9 m/s



<i>Skredtype 5</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Volum</i>	0,209 m ³	825 134 m ³
<i>Bredde</i>	0,90 m	142 m
<i>Tykkelse</i>	0,16 m	26 m
<i>Porøsitet</i>	0 %	0 %
<i>Tyngdetetthet</i>	1 208 kg/m ³	1 208 kg/m ³
<i>Helningsvinkel</i>	40 °	40 °
<i>Skred 5.1</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Vertikal fallhøyde</i>	1,29 m	204 m
<i>Treffningshastighet</i>	4,6 m/s	57,2 m/s



<i>Skredtype 6</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Volum</i>	0,067 m ³	264 796 m ³
<i>Bredde</i>	0,91 m	143 m
<i>Tykkelse</i>	0,17 m	27 m
<i>Porøsitet</i>	39,8 %	39,8 %
<i>Tyngdetetthet</i>	836 kg/m ³	836 kg/m ³
<i>Helningsvinkel</i>	40 °	40 °
<i>Skred 6.1</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Vertikal fallhøyde</i>	1,77 m	279 m
<i>Treffningshastighet</i>	4,6 m/s	57,8 m/s
<i>Skred 6.2</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Vertikal fallhøyde</i>	0,75 m	118 m
<i>Treffningshastighet</i>	2,9 m/s	36,2 m/s
<i>Skred 6.3</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Vertikal fallhøyde</i>	1,12 m	177 m
<i>Treffningshastighet</i>	3,6 m/s	45,0 m/s



<i>Skredtype 7</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Volum</i>	0,146 m ³	574 616 m ³
<i>Bredde</i>	0,91 m	144 m
<i>Tykkelse</i>	0,17 m	27 m
<i>Porøsitet</i>	40,1 %	40,1 %
<i>Tyngdetetthet</i>	844 kg/m ³	844 kg/m ³
<i>Helningsvinkel</i>	40 °	40 °
<i>Skred 7.1</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Vertikal fallhøyde</i>	1,62 m	257 m
<i>Treffningshastighet</i>	4,2 m/s	52,6 m/s
<i>Skred 7.2</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Vertikal fallhøyde</i>	0,75 m	118 m
<i>Treffningshastighet</i>	2,5 m/s	31,5 m/s
<i>Skred 7.3</i>	<i>1:1</i>	<i>158:1</i>
<i>Vertikal fallhøyde</i>	1,12 m	177 m
<i>Treffningshastighet</i>	3,5 m/s	43,8 m/s

Totalt ble det gjennomført 12 forskjellige skredsenarioer i sammenheng med masteroppgaven. I neste kapittel presenteres overtoppingen funnet ved slipp av skred i modellen og ved bruk av Hellers beregningsmetode.

Kapittel 4. Modellert og beregnet overtopping

Dette kapitlet inneholder resultatene fra skredforsøkene og Hellers beregningsmetode. Resultatene blir presentert i form av volum overtoppet vann per meter dam. Denne presentasjonen er satt etter beregningsmetoden hvor overtoppingen blir gitt med en slik benevnning. Da Viddalsdammen er 425m lang vil den totale overtoppingen være 425 ganger så stor som verdiene presentert i dette kapitlet. Alle skaleringer er gjort etter Froudes skalering metode.

4.1 Resultat fra skredforsøk i modell

Det ble totalt gjennomført 19 målinger fordelt på de 12 skredsenarioene. Resultatene er presentert i Tabell 4-1. Hvor første kolonne viser antall liter som overtoppet hele dammen i modellen, siste kolonne viser oppskalert resultat i kubikkmeter per damlengde. Dette er formen beregningsmetoden gir overtoppingen i.

Skred	1:1	158:1	158:1
1.1	15,4 L	60 790 m ³	142,4 m ³ /m
2.1	50,3 L	198 423 m ³	464,7 m ³ /m
3.1	6,1 L	24 201 m ³	56,7 m ³ /m
3.2	1,5 L	6 080 m ³	14,2 m ³ /m
4.1	12,8 L	50 498 m ³	118,3 m ³ /m
5.1	50,6 L	199 688 m ³	467,7 m ³ /m
6.1	9,1 L	35 910 m ³	84,1 m ³ /m
6.2	4,6 L	18 249 m ³	42,7 m ³ /m
6.3	7,1 L	27 877 m ³	65,3 m ³ /m
7.1	18,9 L	74 683 m ³	174,9 m ³ /m
7.2	7,3 L	28 666 m ³	67,1 m ³ /m
7.3	14,0 L	55 415 m ³	129,8 m ³ /m

Tabell 4-1: Målt overtopping i skredmodellen i liter, skalert opp til antall kubikk i prototype og skalert opp som antall kubikk per meter dam i prototype for sammenligning mot Hellers beregningsmetode.

Resultatene viser tydelig at overtoppet mengde øker når treffningshastigheten til skredet øker (skred 3, 6 og 7). Videre viser det seg også at overtoppingen blir større om skredet har en bredere front enn om det har en lengre hale (skred 1 og 4). Skredforsøkene gir som forventet en større overtopping for skredtypene med større totalt volum. Det som derimot er interessant med denne observasjonen er at forskjellen i overtoppet mengde mellom skred 2.1 og 5.1 er minimal. Noe som antyder at økning i overtopping avtar om skredets volum kun øker i lengden mens bredden forblir den samme. For nøyere gjennomgang av observasjonene gjort i modellen vises det til Lorås (2014).

4.2 Resultater fra Hellers beregningsmetode

I prosjektoppgaven "Skred i magasin" (Svendsby, 2013) ble det i tillegg til 3D beregnet på 3D/2D for å se på innvirkningene fra en utstikker i magasinet like ved skredets entringspunkt. Denne metoden ga en estimert oppskylling som var større enn oppskyllingen målt i modellen. 3D estimerte derimot en for liten bølgeopp skylking hvor oppskyllingen langs damsideene var ca. 10m større enn den estimerte verdien. Den kombinerte metoden ble derfor også benyttet i masteroppgaven.

De bestemmende parameterne (brukt i metodens steg 1) er oppskalerte målte størrelser fra modellen og skredsenarioene. Som skredets hastighet ble den målte treffningshastigheten brukt til fordel for Körner (Formel 2-2). Dette ble gjort for å få økt nøyaktighet i beregningen.

I steg 2 ble Dean og Dalrymples formel brukt for å finne avviket i bølgehøyde som en konsekvens av magasinets forandring i bredde og dybde. For skred 1-5 ble Zweifels sammenheng benyttet for omgjøring til blokkskred da metoden baserer seg på løsmasseskred. Det ble ikke tatt høyde for økt overtopping langsmed dammens sidekanter i denne oppgaven da dalsidene i modellen er bratte i forhold til dalsidene i Müllers modell.

Det er ikke bestemt i manualen hvilken parameter som skal økes i steg 2. Det ble derfor gjennomført beregning ved økning av bølgehøyden (som avviksberegningen er basert på) og ved økning av oppskyllingshøyden som ble økt i manualens eksempel 1 (side 57). Disse er heretter omtalt som steg 2(bølgehøyde) og steg 2(oppskylling).

Resultatene fra de forskjellige fremgangsmåtene er presentert under i Tabell 4-2.

Skred	3D						3D/2D					
	Steg 1		Steg 2 (Bølgehøyde)		Steg 2 (Oppskylling)		Steg 1		Steg 2 (Bølgehøyde)		Steg 2 (Oppskylling)	
1.1	165,1	m ³ /m	782,7	m ³ /m	294,9	m ³ /m	1 426,2	m ³ /m	2 933,5	m ³ /m	1 694,7	m ³ /m
2.1	205,8	m ³ /m	1 106,3	m ³ /m	357,3	m ³ /m	1 617,6	m ³ /m	3 933,1	m ³ /m	1 929,6	m ³ /m
3.1	165,6	m ³ /m	780,8	m ³ /m	295,1	m ³ /m	1 430,6	m ³ /m	2 930,6	m ³ /m	1 698,5	m ³ /m
3.2	36,7	m ³ /m	889,6	m ³ /m	176,0	m ³ /m	687,3	m ³ /m	3 295,0	m ³ /m	1 009,1	m ³ /m
4.1	200,0	m ³ /m	1 108,5	m ³ /m	352,7	m ³ /m	1 592,1	m ³ /m	3 942,6	m ³ /m	1 905,9	m ³ /m
5.1	292,4	m ³ /m	1 296,4	m ³ /m	439,7	m ³ /m	1 993,7	m ³ /m	4 514,1	m ³ /m	2 312,2	m ³ /m
6.1	106,2	m ³ /m	180,7	m ³ /m	148,0	m ³ /m	1 199,7	m ³ /m	968,4	m ³ /m	1 248,1	m ³ /m
6.2	19,9	m ³ /m	43,7	m ³ /m	34,7	m ³ /m	544,9	m ³ /m	438,8	m ³ /m	583,2	m ³ /m
6.3	52,3	m ³ /m	92,3	m ³ /m	74,7	m ³ /m	798,5	m ³ /m	643,8	m ³ /m	841,6	m ³ /m
7.1	157,7	m ³ /m	224,7	m ³ /m	184,5	m ³ /m	1 390,0	m ³ /m	1 122,3	m ³ /m	1 440,4	m ³ /m
7.2	25,9	m ³ /m	53,3	m ³ /m	42,6	m ³ /m	600,1	m ³ /m	483,4	m ³ /m	639,6	m ³ /m
7.3	92,1	m ³ /m	145,2	m ³ /m	118,5	m ³ /m	1 046,5	m ³ /m	844,4	m ³ /m	1 093,1	m ³ /m

Tabell 4-2: Overtopping per meter dam etter Hellers beregningsmetode, viser resultat etter steg 1 og 2 for begge fremgangsmetodene.

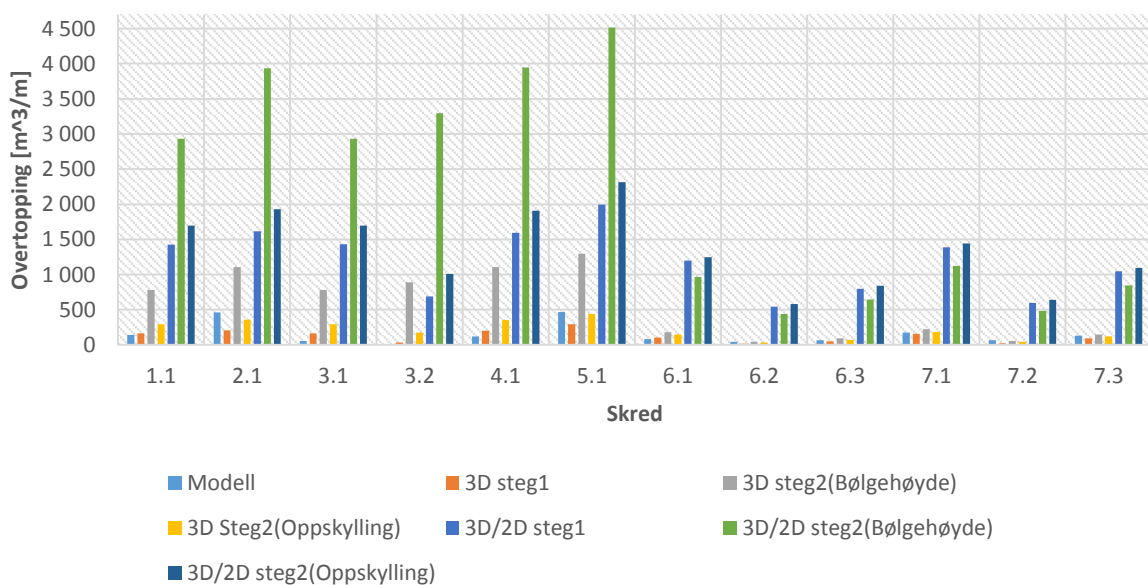
Resultatene viser tydelig at 3D/2D estimerer en mye større overtopping enn 3D. Det er også tydelig at steg 2(bølgehøyde) gir et større estimat enn steg 2(oppskylling). Videre har resultatene fra beregningsmetoden de samme trekkene som resultatene fra skredforsøkene,

med unntak av forskjellen mellom overtoppingen ved skred 2.1 og 5.1 som her ikke lenger er minimal.

Vedlegg II viser som et eksempel utklipp fra Hellers regneark med resultater fra steg 1 og overskridelser av parametergrenser for skred 1.1. For resterende regneark vises det til Vedlegg IV. Her finnes også Excel-ark med beregning av resultatene for steg 2 i Tabell 4-2 og for resultatene i Tabell 4-1. Vedlegget inneholder også alle rådatafiler og omregninger fra volt til cm.

4.3 3D vs 3D/2D vs målt overtopping

Resultatene fra Tabell 4-1 og Tabell 4-2 er presentert i diagrammet under i Figur 4-1. Her blir overtoppingen ved 3D/2D så overestimert at overtoppingen fra 3D og målt i modellen forsvinner i forhold.



Figur 4-1: Viser den målte overtoppingen mot Hellers beregnede overtopping for de forskjellige skredtypene og fremgangsmåter

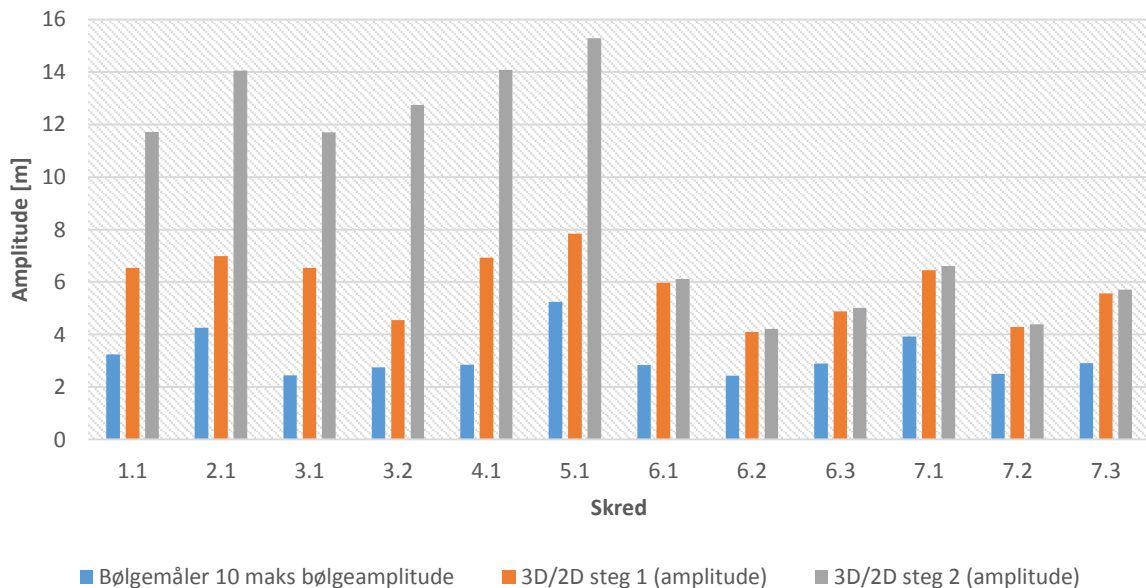
Det er dermed tydelig at 3D/2D ikke fungerer som en metode for å ta høyde for mindre utstikkere i magasinet. En grundigere test av 3D/2D og bestemmelse av den beste fremgangsmåten mellom steg 2(oppskylling) og steg 2(bølgehøyde) blir presentert og diskutert i Kapittel 5.

Kapittel 5. Beste fremgangsmåte og test av 3D/2D

I dette kapittelet blir resultatene presentert i Kapittel 4 sammenlignet. Beregningsmetodens fremgangsmåter presentert i Tabell 4-2 blir også sammenlignet og diskutert for å finne hvilken fremgangsmåte som passer best til de norske forholdene modellen simulerer. Det blir også sett nærmere på 3D/2D. Det kom tydelig frem i Figur 4-1 at 3D/2D overestimerte overtoppingen, men metoden ble hovedsakelig presentert i manualen som en estimering av bølgeforplantning rundt en sving. I det første delkapittelet blir metoden testet for dette bruksområdet.

5.1 Test av 3D/2D

Som nevnt i delkapittel 3.3 ble bølgemåler 10 plassert bak en sving for å teste nøyaktigheten og bruksområdet til 3D/2D. Forandring i vannsøylen målt her gir amplituden til bølgene når sammenlignet med vannsøylen før slipp av skred. Den største bølgeamplituden fra hvert skredsenario er vist sammen med amplitudene funnet ved 3D/2D steg2(bølgehøyde) i Figur 2-1. Siden ingen oppskylling oppstår midt i magasinet vil man ikke kunne beregne med steg 2(oppskylling).



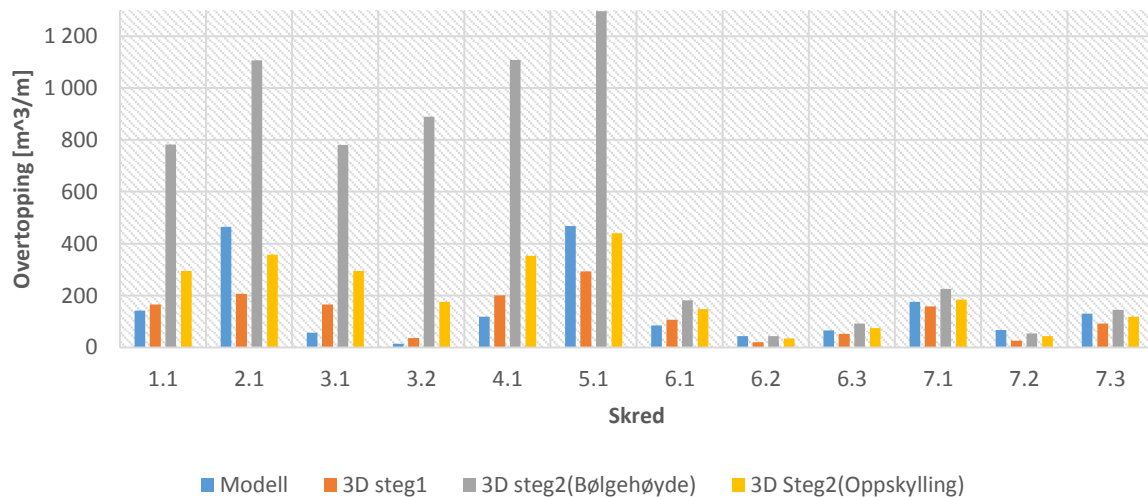
Figur 5-1: viser målt amplitude mot beregnet amplitude ved 3D/2D.

Amplituden blir overestimert for både ved steg 1 og steg 2 for 3D/2D selv når bølgen må forplante seg rundt en sving. For at metoden skal være sikker er en viss overestimering nødvendig. Resultatene i Figur 5-1 er derfor greie, men når 3D/2D overestimerer i et punkt som er sperret for fri forplantning kan den ikke benyttes i områder hvor storparten av bølgeforplantningen vil være fri for hinder. Som er tilfellet i området mellom skredet og dammen i modellen. Metoden må derfor forkastes i denne sammenheng.

Det kommer også frem at estimert bølgeamplitude (steg 2) er dobbelt så høy som de målte verdiene for løsmasseskredene (skred 6 og 7). For Blokkskredene (skred 1-5) er den estimerte amplituden derimot 3-5 ganger så stor. Dette indikerer at Zweifels sammenheng ikke fungerer optimalt som omregning fra løsmasseskred til blokkskred.

5.2 3D steg 2(bølgehøyde) vs steg 2(oppskylling)

Diagrammet fra Figur 4-1 er vist på nytt uten 3D/2D under i Figur 5-2. Det er tydelig at steg 2(bølgehøyde) overestimerer overtoppingen for blokkskredene (skred 1-5). Men også for løsmasseskredene (skred 6 og 7) kommer denne løsningen dårligst ut. Med unntak av et marginalt bedre resultat for skred 6.2 og 7.2 har steg 2(bølgehøyde) et større avvik enn steg 2(oppskylling).

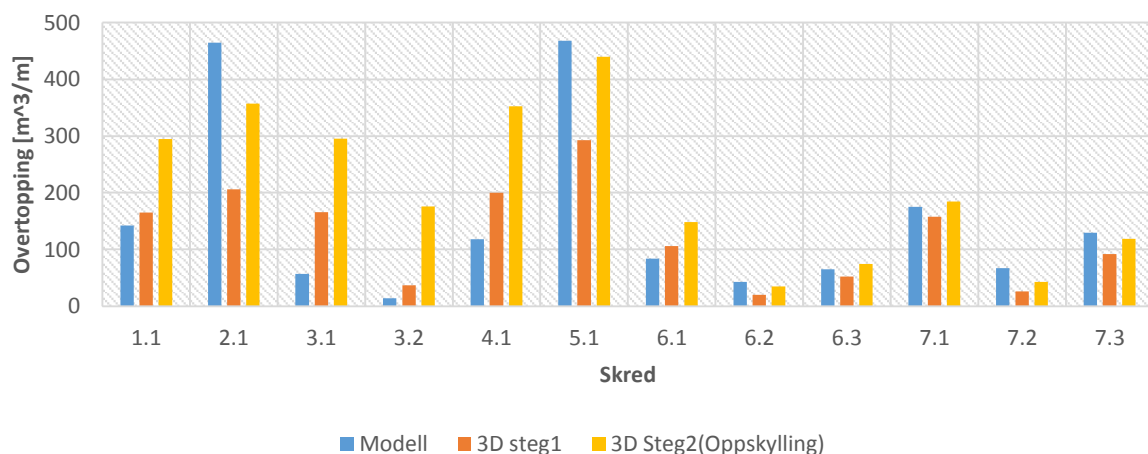


Figur 5-2: Modellert og beregnet (3D) overtopping for de forskjellige skredsenarioene.

Den beste fremgangsmåten for steg 2 er derfor en økning av bølgeoppskyllingen. Dette er (som nevnt i delkapittel 4.2) den samme parameteren som ble økt i manualens eksempel 1.

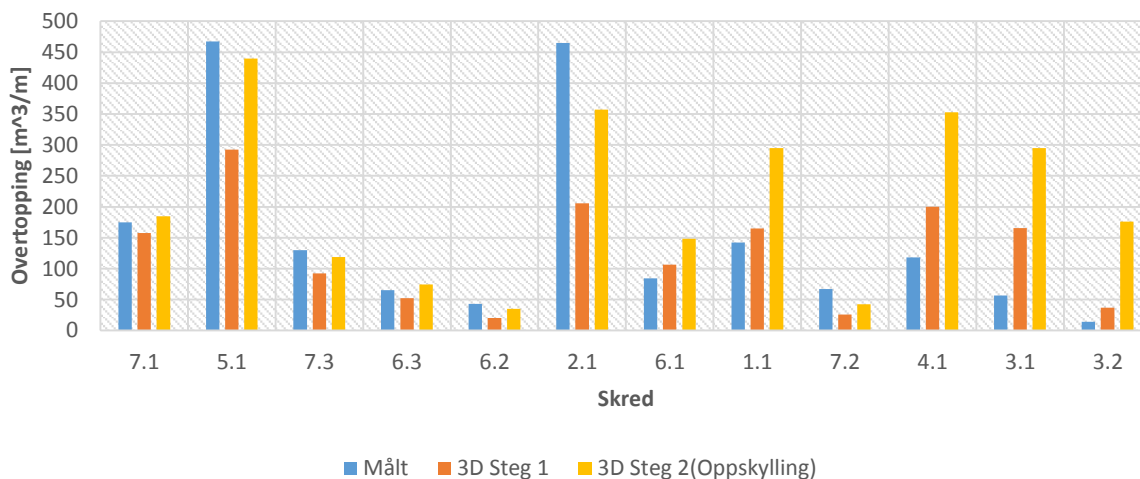
5.3 Modellert overtopping vs overtopping ved 3D med steg 2(oppskylling)

Den beste løsningen for Hellers beregningsmetode er vist under i Figur 5-3.



Figur 5-3: Modellert og beste beregnede overtopping for de forskjellige skredsenarioene.

Det er selv med denne løsningen en hel del avvik mellom den målte overtoppningsmengden og den beregnede mengden. Under i Figur 5-4 har skredsenarioene blitt sortert fra minst til størst avvik med minste avvik til venstre.



Figur 5-4: Overtopping sortert etter skredsenario med minst avvik mellom modellert og beregnet overtopping

For de første seks skredene er den beregnede overtoppingen innenfor $\pm 30\%$ av den målte overtoppingen. For skred 3.2 derimot er estimert overtopping hele 12 ganger større enn den målte mengden. Et avvik på 30% hadde vært et godt resultat om det hadde omfattet alle skredsenarioene, noe det ikke gjør. Om en beregningsmetode skal kunne brukes til å bestemme sikker fribordshøyde på en dam i et skredutsatt område, kan det heller ikke godtas at estimert overtopping er mindre enn den målte. Av de 12 skredsenarioene er hele 5 estimeringer mindre enn den faktiske overtoppingen. Når dette er tatt i betraktning er det kun skredsenarioene 7.1 og 6.3 som ga tilfredsstillende resultater ved bruk av Hellers beregningsmetode i de norske forholdene modellen simulerer. Både 7.1 og 6.3 er senarioer med løsmasseskred.

På bakgrunn av at kun 2 av 12 skredsenarioer estimert med bruk av Hellers beregningsmetode har tilfredsstillende resultater sammenlignet med overtoppingen funnet under norske forhold i modellen. Kan det ikke anbefales at metoden tas i bruk for bestemmelse av sikre fribordshøyder på dammer ved skredutsatte fjellmagasin i Norge slik den er i dag.

I neste kapittel blir det sett nærmere på avvikene mellom målte og beregnede verdier. Avvikene funnet blir så diskutert opp mot å kunne tilpasse beregningsmetoden for bruk under norske forhold.

Kapittel 6. Betrakter årsak til store avvik

I Kapittel 5 ble det vist at overtoppingen fra Hellers beregningsmetode gir resultater som for de fleste skredsenarioene samsvarer lite med de målte overtoppingene i modellen. I dette kapittelets første del blir det sett etter en sammenheng mellom skredparameterene volum og hastighet og resultatene i Figur 5-4. Dette er parametere som lett kan justeres i modellen slik at nye skred eventuelt kan kjøres for å bekrefte hypoteser. I delkapittel 6.2 presenteres og diskuteres avvik funnet for andre parametere som ble målt i modellen. Avslutningsvis blir det sett nærmere på virkningen av at det ikke lyktes å gjennomføre skredsimuleringer hvor alle parametergrensene i beregningsmetoden ble overholdt.

6.1 Ser på skredparametere som kan forandres i modellen.

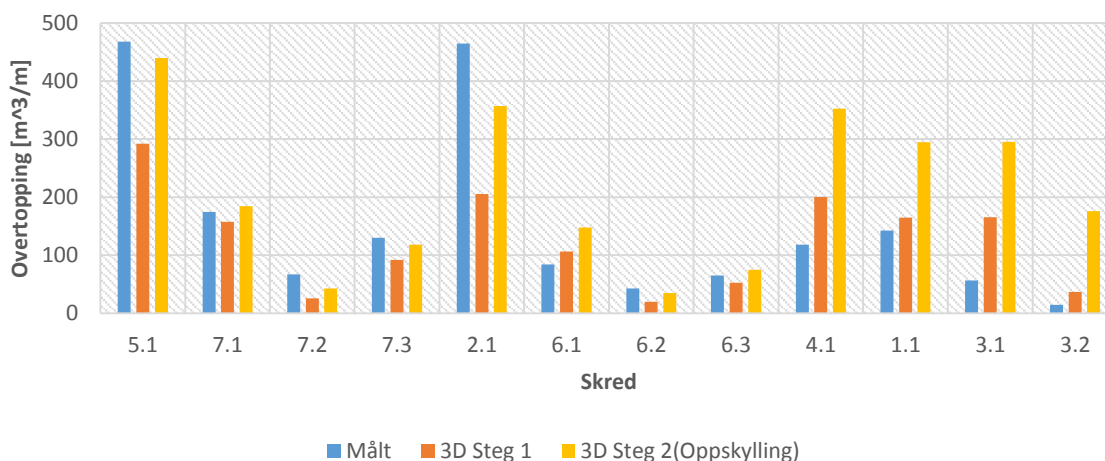
Her blir skredets volum og treffningshastighet diskutert opp mot resultatene. Først hver for seg, så sammen igjennom et forholdstall.

6.1.1 Ser på skredets volum

I Figur 6-1 har skredsenarioene blitt sortert etter størrelse. Hvor senarioene med størst volum ligger til venstre og de med minst volum ligger til høyre. Ved å sammenligne diagrammet under med diagrammet i Figur 5-4 legges det raskt merke til to ting. 5.1 og 7.1 er skredsenarioene med både størst volum og med minst avvik i resultatene. Senarioene for skred 3 har både minst volum og størst avvik mellom resultatene. For de resterende senarioene gjelder derimot ikke denne observasjonen.

Skred 2 har et volum som er litt mindre enn skred 7 og større enn skred 6. Ved å se på Figur 5-4 har skredsenario 2.1 større avvik i resultatet enn 7.1, 7.3, 6.3 og 6.2, men mindre avvik enn 6.1 og 7.2. Det blir derfor tydelig at hastigheten også har en effekt siden det kun er hastigheten som er forandret for de forskjellige senarioene innen samme skred.

Formen på skredet har også en innvirkning. Dette kommer frem av skred 1.1 og skred 4.1 som har omtrent samme volum, men ulik form. Avvik mellom resultatene for skred 1.1 er betydelig mindre enn for skred 4.1 som vist i Figur 5-4. Dette antyder at beregningsmetoden ikke tar stor nok høyde for at et skred med liten bredde i forhold til lengde resulterer i mindre overtopping.

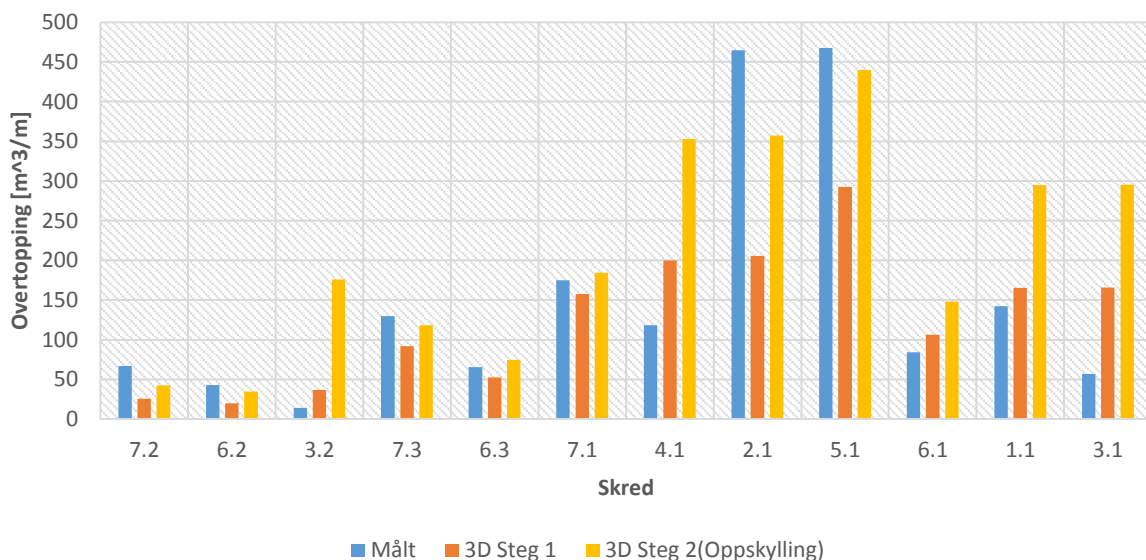


Figur 6-1: Overtopping med skredsenarioene sortert fra størst til minst volum

Noen direkte sammenheng mellom volum og tilfredsstillende resultater kan derfor ikke bestemmes her. Det observeres også at de to skredsenarioene som ga tilfredsstillende resultater (7.1 og 6.3) er avskilt i diagrammet.

6.1.2 Ser på skredets treffningshastighet

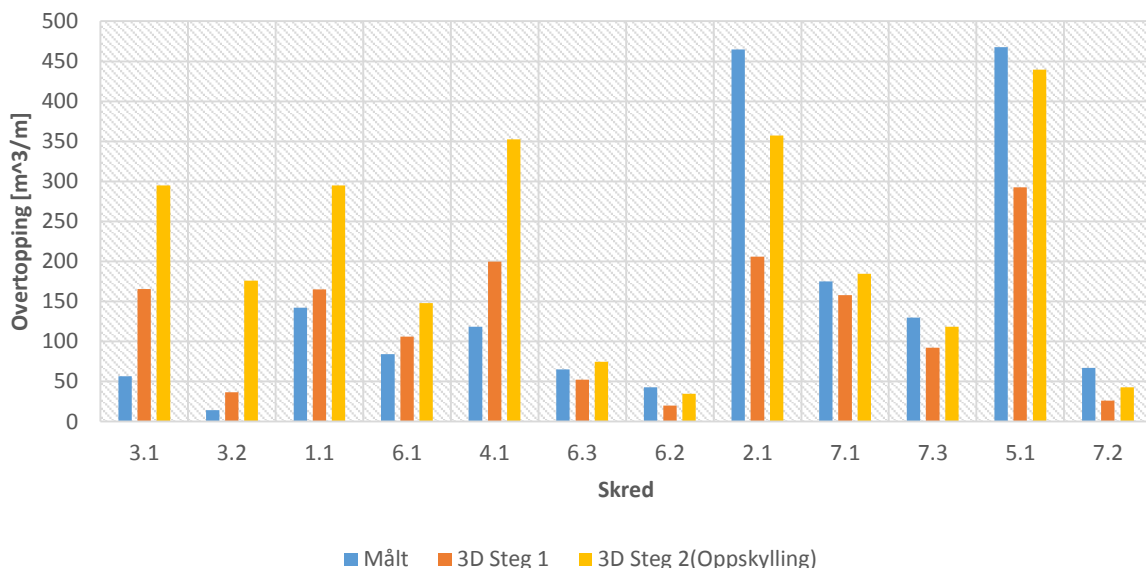
I Figur 6-2 er skredsenarioene sortert etter treffningshastighet med minste hastighet til venstre og største hastighet til høyre. Sammenlignet med Figur 5-4 er de to skredsenarioene med størst avvik i resultatet (skred 3) å finne i hver sin ende av diagrammet. Det kan være interessant at skredsenario senarioene som ble funnet tilfredsstillende, skred 7.1 og 6.3 ligger ved siden av hverandre i diagrammet. 7.1 og 6.3 hadde treffningshastighetene 52,6 m/s og 45,0 m/s. Det observeres at forskjellen her er stor sammenlignet med forskjellen mellom 7.1 og 4.1 og 6.3 og 7.3. Skred 7.3 og 4.1 hadde hastighetene 43,8 m/s og 54,9 m/s. Variasjonen mellom treffningshastighet og forskjellen mellom beregnet og målt overtopping er ellers stor. Det er lite som tyder på en klar sammenheng her.



Figur 6-2: Overtopping med skredsenarioene sortert fra minst til størst hastighet

6.1.3 Ser på forholdet mellom volum og hastighet

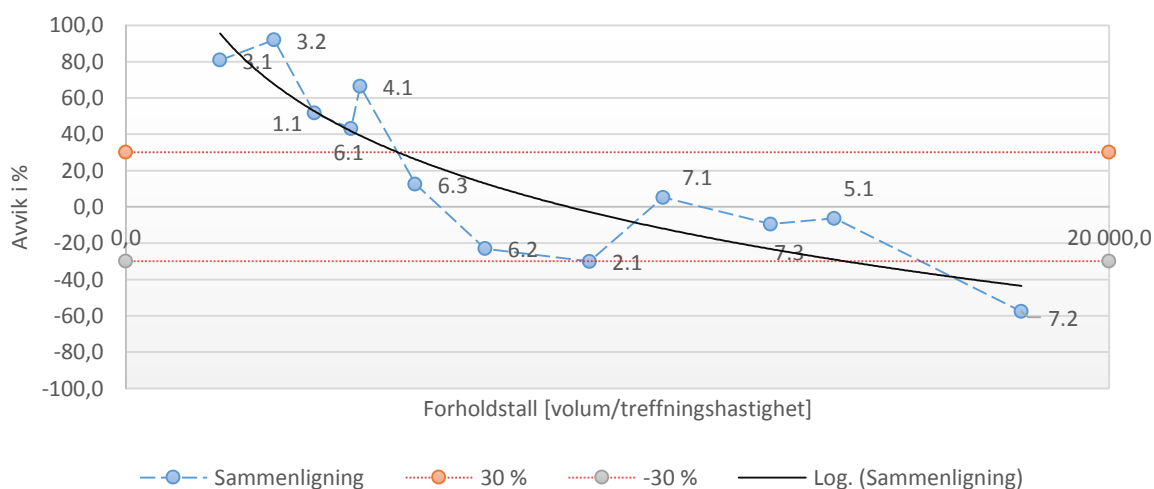
I avsnittene over ble det ikke funnet noen direkte sammenheng. Det ble derfor undersøkt om forholdet mellom volum og hastighet hadde en tydelig innvirkning på avvikene funnet mellom beregnet og målt overtopping. Forholdet mellom skredets volum og treffningshastighet blir representert ved et forholdstall satt lik volum/treffningshastighet. I Figur 6-3 har skredsenarioene blitt sortert fra størst til minst forholdstall. Med minst forholdstall til venstre og størst forholdstall til høyre



Figur 6-3: Overtopping med skredsenarioene sortert fra størst til minst forholdstall volum/hastighet

I diagrammet over finner man igjen de første seks skredsenarioene fra Figur 5-4 (7.1, 5.1, 7.3, 6.3, 6.2 og 2.1). Det at senarioene er samlet er interessant, men rekkefølgen til skredene er forskjellig. Effekten av rekkefølgen er vist under i Figur 6-4. Her er avviket mellom målt og beregnet overtopping vist langs y-aksen som prosent av beregnet overtopping. Forholdstallet benyttet er vist langsmed x-aksen. Egne grafer for $\pm 30\%$ er også tegnet inn.

I Figur 6-4 ser man tydelig at skredsenarioene danner en graf med topper og daler. Dette kommer av at det er varierende avvik i resultatene selv når de er sortert etter forholdstallet. Hadde det vært en perfekt sammenheng mellom skredets treffningshastighet og volum og avviket mellom målt og beregnet overtopping ville grafen hatt en glatt form som er illustrert under som en logaritmisk trendlinje i sort.



Figur 6-4: Forholdstall plottet mot avvik for skredsenarioene (blå stiplet). Sort linje illustrerer graf om forholdet mellom volum og treffningshastighet hadde hatt en direkte sammenheng med avviket mellom målt og beregnet overtopping.

Det lyktes med dette ikke å finne noen tydelig sammenheng mellom skredvolumet, treffningshastigheten og forskjellen mellom målt og beregnet overtopping. Det er tydelig at flere parametere spiller inn på det endelige resultatet.

6.2 Andre målte avvik

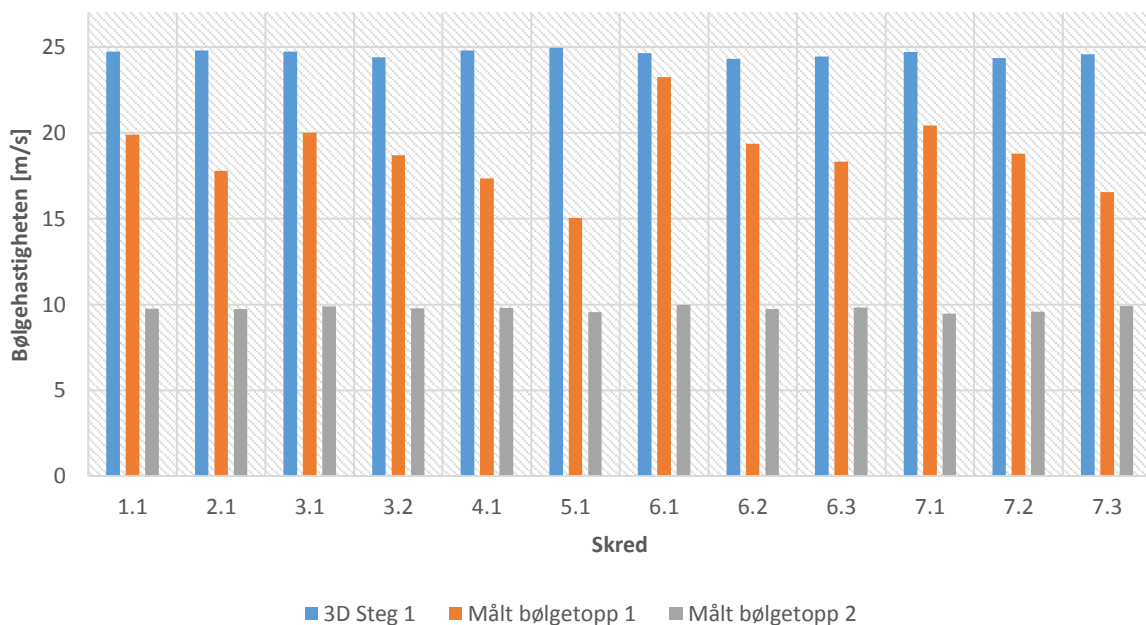
Bølgemålerne i modellen gjorde det mulig å teste målte verdier for bølgehastigheten, bølgeamplituden og bølgeperioden mot beregnede verdier etter Hellers beregningsmetode. Bølgegrafer ble plottet for hvert av skredforsøkene, målte data kunne da lett leses av disse. Enkelte Bølgegrafer for skred 1.1 kan sees i Vedlegg III som et eksempel. Resterende bølgegrafer og alle beregninger som er gjort i dette delkapittelet er vist i Vedlegg IV.

I dette delkapittelet blir målte og beregnede verdier sammenlignet.

6.2.1 Ser på bølgehastigheten.

Bølgehastigheten blir i beregningsmetoden funnet etter Formel 2-5. Den avhenger derfor av vanndybden der skredet entrer magasinet og den estimerte bølgeamplituden. I modellen ble bølgehastigheten målt mellom bølgemåler 2 og 8 (Figur 3-4). Her ble avstanden mellom bølgemålerne delt på antall sekunder det tok for bølgetoppen å forplante seg fra bølgemåler 2 til bølgemåler 8.

Under i Figur 6-5 er den beregnede bølgehastigheten etter steg 1 vist sammen med bølgehastigheten målt for bølgetopp 1 og bølgetopp 2. Her er bølgetopp 1 den første bølgetoppen i bølgegrafen mens bølgetopp 2 er den første bølgetoppen med større amplitude enn bølgetopp 1. Dette kan være bølgetopp 2-5. Det er ikke vist noen bølgehastighet etter steg 2 da steg 2 ble gjennomført ved en økning av bølgeopp skylingen. En parameter som allerede bygger på bølgehastigheten.



Figur 6-5: Viser bølgehastighet målt ved bølgetopp 1 og 2 i modell samt beregnet bølgehastighet etter Hellers beregningsmetode.

Det er tydelig at den estimerte bølgehastigheten er større enn den målte verdien for både bølgetopp 1 og 2. Foruten om skredsenario 6.1 er det store forskjeller mellom målte og

estimerte bølgehastigheter. At hastigheten til bølgene avtar mellom bølgetopp 1 og 2 blir også tydelig i diagrammet. Det er ikke nevnt i manualen hvordan beregningsmetoden tar høyde for dette og det er derfor usikkerhet knyttet opp til den estimerte verdien.

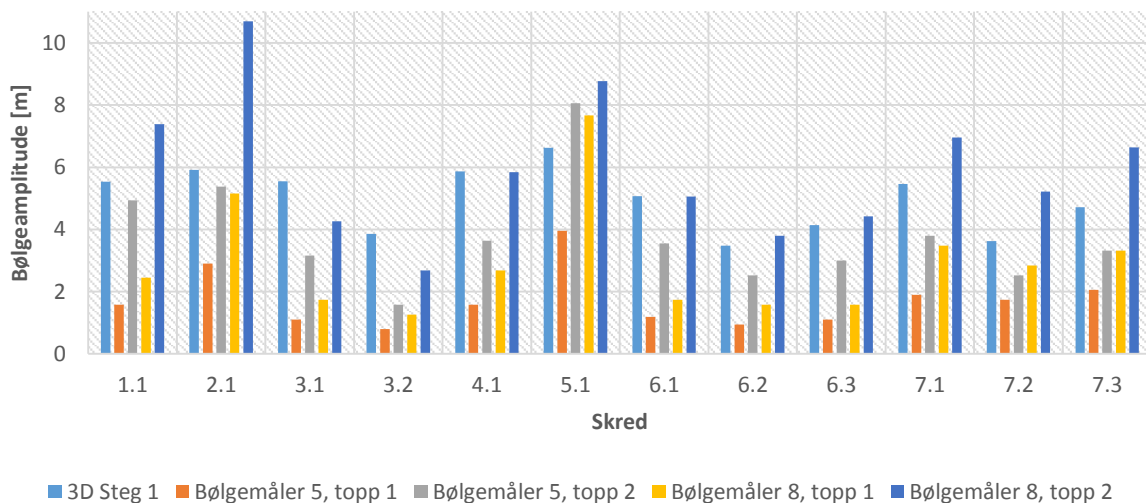
Da den estimerte verdien er basert på en allerede estimert bølgeamplituden ble det gjennomført nye beregninger med målt amplitude for å fjerne usikkerheten fra estimert bølgeamplitude. Beregningene ble gjennomført med bølgeamplituder fra bølgetopp ved bølgemåler 5 (midt mellom skredsone og damsone) og bølgemåler 8 (rett foran dam). Resultatene er vist under i Tabell 6-1 sammen med de målte verdiene for bølgetopp 1 i Figur 6-5. Det kommer tydelig frem at Formel 2-5 overestimerer bølgehastigheten sett opp mot de målte verdiene.

Skred	Målt bølgehastighet	Topp 1	
		Bølgemåler 5	Bølgemåler 8
1.1	19,9	28,9	29,1
2.1	17,8	29,1	29,5
3.1	20,0	28,8	29,0
3.2	18,7	28,8	28,9
4.1	17,4	28,9	29,1
5.1	15,0	29,3	29,9
6.1	23,3	28,9	29,0
6.2	19,4	28,8	28,9
6.3	18,3	28,8	28,9
7.1	20,4	29,0	29,2
7.2	18,8	29,0	29,1
7.3	16,5	29,0	29,2

Tabell 6-1: Viser målt bølgehastighet og beregnet bølgehastighet basert på amplituder målt i modell. Alle verdiene er i m/s.

6.2.2 Ser på bølgeamplituden

Figur 6-6 viser den målte bølgeamplituden ved bølgemåler 5 og 8 (Figur 3-4). Som i avsnittet over er amplituden vist for bølgetopp 1 og 2.

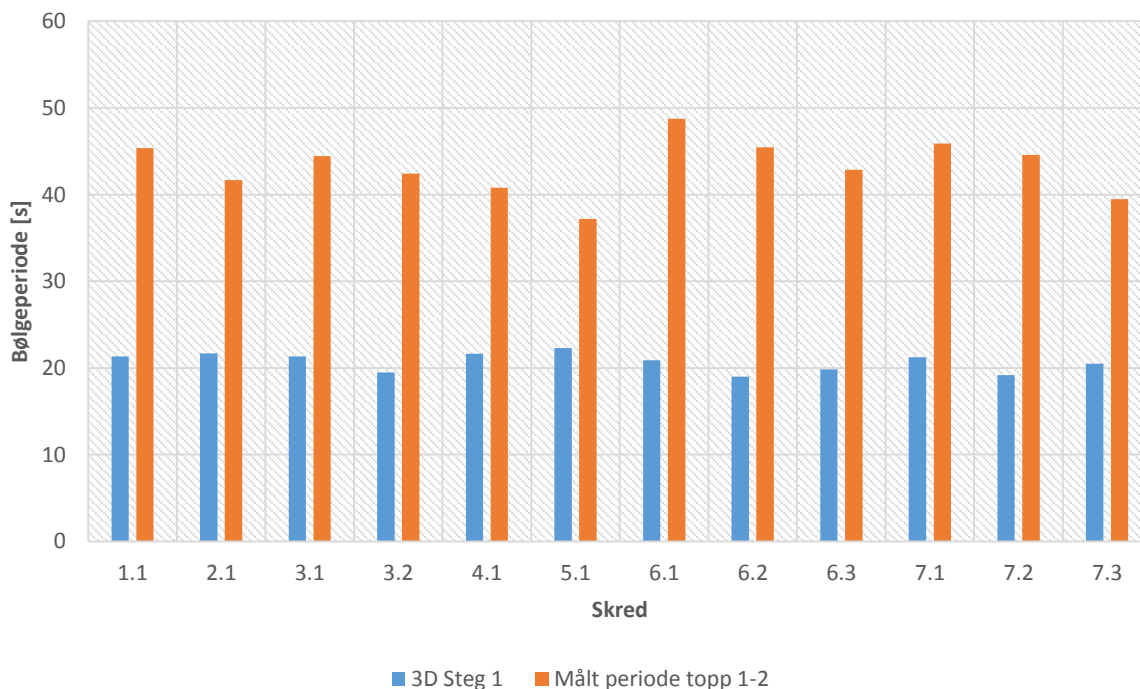


Figur 6-6: Viser bølgeamplituden beregnet etter Heller mot målt bølgeamplitude for bølgetopp 1 og 2 ved bølgemåler 5 og 8.

Beregningsmetoden beskriver bølgeamplituden etter Formel 2-6 som er direkte knyttet mot den estimerte bølgehøyden (Formel 2-4). Da beregningsmetoden kun estimerer en amplitude rett foran oppskyllingspunktet er det naturlig at beregnet amplitude ligger nærmere verdiene fra bølgemåler 8 enn bølgemåler 5. For de fleste skredsenarioene stemmer dette, hvor estimert amplitude ligger mellom bølgetopp 1 og 2 for bølgemåler 8. Unntaket er skredsenario 5.1. Det observeres at skredsenario 2.1 har et stort utslag for bølgetopp 2. Dette kan skyldes svingning i stangen bølgesensoren er festet i, eller at vannstanden i magasinet var fylt for høyt denne dagen. Det blir ikke gjennomgått i manualen hvordan beregningsmetoden tar høyde for den varierende amplituden for de forskjellige bølgetoppene.

6.2.3 Ser på bølgeperioden

Bølgeperioden ble målt mellom bølgetopp 1 og 2 ved bølgemåler 8. I Figur 6-7 er resultatet vist sammen med den estimerte bølgeperioden fra beregningsmetoden. Den estimerte bølgeperioden er beregnet etter Formel 2-7 og avhenger av estimert bølgehøyde og vanndybden. Det kommer tydelig frem i Figur 6-7 at bølgeperioden målt for den første bølgen er mye lenger enn bølgeperioden estimert i beregningsmetoden. Det ble også gjennomført en spektralanalyse på bølgedataene fra forsøkene. Der ble det funnet 2-3 bølgeperioder som gikk igjen ved alle forsøkene, hvor den ene er tilsvarende bølgeperioden funnet i Figur 6-7. Avviket mellom målt og estimert verdi kan komme av to grunner: 1) Formel 2-7 beskriver en samlet effekt av flere gjentakende bølgeperioder som det ikke kan sies om er tilfredsstillende med denne sammenligning. 2) Formel 2-7 klarer ikke å beskrive bølgeperioden på en tilfredsstillende måte under de norske forhold i modellen.



Figur 6-7: Viser bølgeperiode for første bølgetopp målt i modell og bølgeperiode estimert etter Heller.

For nøyere gjennomgang av spektralanalysen og bølgeperiodene funnet der vises det til Lorås (2014).

6.3 Brutte parametergrenser i beregningsmetoden

For å teste Hellers beregningsmetode ble det som tidligere nevnt gjennomført forsøk på 12 forskjellige skredsenarioer. Ingen av disse skredsenarioene overholdt alle parametergrensene satt i beregningsmetoden. Dette gir i seg selv en pekepinn på at beregningsmetoden ikke kan benyttes mot de norske forholdene i modellen. I dette delkapittelet diskuteres effekten av de brutte parametergrensene.

Som nevnt i delkapittel 2.2 har de forskjellige leddene i beregningsmetoden egne parametergrenser om legger seg lagvis over ledder foran. Det vil si at om parametergrensene er brutt tidligere ledd vil det være usikkerhet i beregningene i senere ledd, selv om parametergrensene er overholdt i disse. Leddene testet i beregningsmetoden er bølgegenerering og bølgeforplantning, bølgeoppskylning, overtoppingsvolum og avslutningsvis overtoppingsperioden ved $f=0$ (0 m fribord).

Under i Tabell 6-2 vises parametergrensen brutt i ett eller flere skredsenarioer. I kolonnene er parametergrensene gitt samt hvilket beregningsledd de tilhører. Radene gir som i de tidligere tabellene de forskjellige skredsenarioene. Røde felt forteller at parametergrensen er brutt, mens grønne felt forteller at grensene er overholdt.

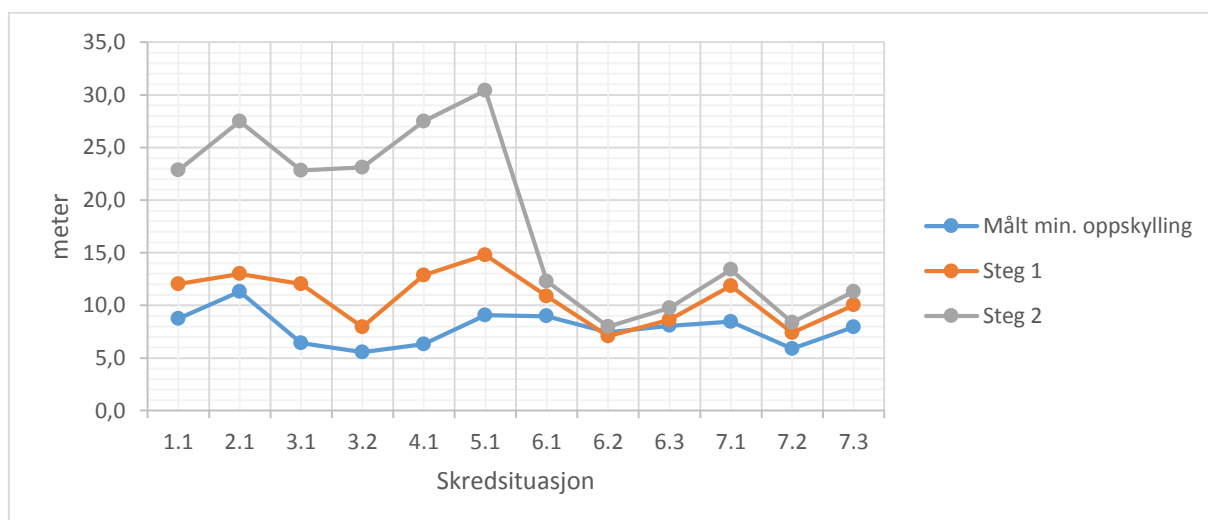
	Grenser for beregning av bølgegenerering		Grenser for beregning av bølgeoppkylling (Run-up)				Grenser for beregning av overtopping		Grenser for beregning av overtoppingsperiode				Antall brutte parametergrenser totalt
	Skredets porøsitet [30,7-43,3%]		Relativ bølgehøyde [0,011-0,521]		Bølgehelning [0,001-0,013]		Relativ bølgeperiode [9,0-21,0]		Relativ bølgeperiode [14-22]		Relativ overtoppingsperiode [10,5-13,5]		
Skred	Verdi		Verdi		Verdi		Verdi		Verdi		Verdi		
1.1	0		0,122		0,013		8,86		9		10,5		4
2.1	0		0,13		0,014		9,01		9		10,6		3
3.1	0		0,122		0,013		8,86		9		10,5		4
3.2	0		0,085		0,01		8,09		8		10,1		4
4.1	0		0,129		0,014		8,99		9		10,6		4
5.1	0		0,146		0,015		9,27		9		10,8		3
6.1	40		0,111		0,012		8,66		9		10,4		3
6.2	40		0,076		0,009		7,89		8		10		3
6.3	40		0,091		0,011		8,24		8		10,2		3
7.1	40		0,12		0,013		8,83		9		10,5		3
7.2	40		0,08		0,01		7,97		8		10,1		3
7.3	40		0,104		0,012		8,51		9		10,4		3

Tabell 6-2: Viser alle parametergrenser som ble brutt under skredsimuleringene. Rødt felt betyr at grensen er brutt, grønt felt betyr at grensene er overholdt.

Tabellen viser at alle skredsenarioene har brutt 3 eller 4 parametergrenser. Alle skredsenarioene brøt med grensene satt for den relative bølgeperioden for beregning av overtoppingsperioden ved $f=0$. Dette kan forklare det store avviket mellom beregnet periode og perioden målt ved bølgemåler 8 (rett foran dammen) gitt i Vedlegg IV. I følge tabellen er det heller ingen av skredsenarioene som overholdt alle parametergrensene for beregning av overtopping. I Kapittel 5 ble det vist at den beregnede verdien stemte lite overens med den målte mengden for storparten av skredsenarioene. Denne forskjellen kan forklares med brutte parametergrenser for dette beregningsleddet.

Det som utpeker seg i Tabell 6-2 er at skredsenarioene 6.1, 6.2, 6.3, 7.2 og 7.3 (løsmasseskred) alle overholder parametergrensene frem til beregning av oppskyllingshøyden. I følge beregningsmetoden skal derfor disse skredsenarioene gi nøyaktig oppskyllingshøyde. Videre vil skredsenario 3.2 (blokkskred) oppfylle parameterkravene gitt at Zweifels sammenheng (Formel 2-15) faktisk fungerer for omregning til løsmasseskred i beregningsmetodens steg 2. Skredsenario 1.1, 3.1 og 7.1 (blokkskred, blokkskred, løsmasseskred) har alle sammen bølgehelning lik ytterpunktet til parametergrensen. Det er derfor også interessant å se nærmere på disse. For å teste dette ble den maksimale bølgehøyden over damkronen sammenlignet med beregnet oppskyllingshøyde under i Figur 6-8. Bølgehøyden over damkronen vil sammen med dammens fribord fungere som grense minste mulige oppskyllingshøyde.

I figuren er skredsenarioene gitt langs x-aksen og bølgeoppkyllingen langs y-aksen. Grafen for målt minste oppskylling viser den minste mulige oppskyllingshøyden. Det vil si at om dammen hadde hatt et høyere fribord og beholdt samme helning ville bølgeoppkyllingen trolig vært høyere enn det den blå grafen viser. Grafen gir likevel en minsteverdi å sammenligne mot. Den oransje og gråe grafen viser bølgeoppkyllingen etter beregningsmetodens steg 1 og 2. Her ser man tydelig innvirkningen fra Zweifels sammenheng brukt på omregning fra løsmasseskred til blokkskred (skred 1-5). Økningen fra steg 1 til steg 2 for løsmasseskredene (skred 6 og 7) kommer fra Dean og Dalrymples formel (Formel 2-14) som tar høyde for forandringen i bredde og høyde forhold i magasinet.



Figur 6-8: Beregnet bølgeoppskylling for steg 1 og steg 2, samt største bølgehøyde på topp av damkronen som danner minste oppskyllingshøyde.

Her kommer det tydelig frem at skredsenarioene hvor parametergrensene er overholdt gir en oppskyllingshøyde som samsvarer mye bedre med den målte minimumshøyden for bølgeoppskylling. Dette kan tydeligst sees ved at forskjellen mellom målt og beregnet høyde blir større ved 7.1 hvor bølgehellingen ligger akkurat utenfor parametergrensen, sammenlignet med skredsenarioene (6.1, 6.2, 6.3, 7.2 og 7.3) rundt som har overholdt alle parametergrensene.

Grafen for steg 1 viser et godt samsvar med oppskyllingsgrafene for skredsenario 3.2. Denne gode estimeringen blir derimot borte i steg 2 hvor Zweifiels sammenheng har blitt brukt. Det er tydelig for alle blokkskredene at omregningen gir store overestimeringer. Det er derfor ikke sikkert at sammenhengene bør brukes opp mot de norske forholdene.

Det at grafene for steg 1 og steg 2 øker ved 7.1 indikerer effekten av at bølgehellingen ligger på grensen og ikke innenfor. Det er trolig at denne effekten finnes igjen ved skredsenario 1.1 og 3.1. Det er vanskelig å si noe ut fra grafen for steg 1, men steg 2 grafen viser denne tendensen.

Ved å teste opp mot bølgeoppskylling i Figur 6-8 har effekten av brutte parametere blitt mer tydelig. Skredsenarioene med overholdte parametergrenser samsvarer mye bedre med den minimale bølgeoppskyllingen. Dette gir mer tyngde til den tidligere antagelsen om at de brutte grensene førte til spredte avvik mellom målt og beregnet overtopping. Det kan likevel hende at beregningsmetoden hadde underestimert bølgeoppskyllingen om fribordet hadde vært høyere og den maksimale bølgeoppskyllingen hadde blitt målt. Avvikene funnet under 6.2 indikerer også at beregningsmetoden har større nøyaktighet i enden av leddene (f.eks. bølgeoppskylling) enn i mindre underledd (f.eks. bølgehastighet og amplitude).

I neste kapittel vil den endelige konklusjonen om bruk av Hellers beregningsmetode under norske forhold bli presentert. Kapitlet vil også inneholde erfaringer gjort under arbeidet med modell og metode samt forslag til videre forskning.

Kapittel 7. Veien videre

I dette kapittelet presenteres oppgavens endelige konklusjon etterfulgt av forslag til videre forskning og erfaringer gjort under skredsimuleringen til fordel for senere arbeider.

7.1 Konklusjon

Resultatene i Kapittel 4 viste store avvik mellom målt overtopping og overtoppingen beregnet etter Heller, selv ved bruk av den beste fremgangsmåten funnet i Kapittel 5. Disse avvikene kan forklares med de brutte parametergrensene vist i delkapittel 6.3.

Kun 2 av de 12 skredsenarioene som ble testet fikk tilfredsstillende resultater på den estimerte overtoppingen og ingen av skredsenarioene overholdt alle parametergrensene satt for beregning av overtoppet volum. Det ble derimot funnet godt samsvar mellom estimert og målt bølgeoppskylling for skredsenarioene som hadde overholdt parametergrensene frem til dette beregningsleddet.

Dette gjør at oppgaven må konkludere med at Hellers beregningsmetode ikke kan benyttes for fastsettelse av sikker fribordhøyde på dammer ved skredutsatte norske fjellmagasin. Parametergrensene satt i beregningsmetoden er rett og slett for små til å kunne ta for seg variasjonene som finnes i de norske forholdene. Beregningsmetoden ga derimot gode estimeringer så lenge parametergrensene ble overholdt og fungerer dermed godt innen de gitte rammer.

Prosjektet "Skred i magasin" befinner seg nå ved et veiskille med tanke på en endelig beregningsmetode. I denne masteroppgaven ble beregningsmetoden testet for estimering av overtopping siden dette er et sent ledd i Hellers beregningsmetode som også kunne testes i modell. Nøyaktighet i beregnet overtopping ville bevist nøyaktighet i tidligere ledd. I prosjektet "Skred i magasin" er det derimot viktigere å kunne estimere bølgeoppskyllingen langs dammen enn selve overtoppingsvolumet, da en bølgeoppskylling over fyllingsdammens kjerne ikke godtas i dagens regelverk. Videre forskning burde derfor konsentrere seg om å kunne estimere bølgeoppskyllingen med en viss nøyaktighet. Dette innebærer en økning av dammens fribord. Et utgangspunkt for økningen vil være Svendsby (2013) hvor en 20 cm bølgeoppskylling ble funnet.

To alternative veivalg presenterer seg her. Det vil for begge alternativene være viktig å se nærmere på bruken av Zweifields sammenheng (Formel 2-15) som ble diskutert i delkapittel 6.3. Det ble i spektralanalysen observert at skredene genererte 2-3 gjennomgående bølgeperioder. Videre ble det også under forsøkene etter bygging av dam funnet større bølgeoppskylling som følge av senere bølger enn av den første impulsbølgen (se amplitudene i Vedlegg III). Dette tyder på at bølger reflektert ved magasinkanten vil ha stor påvirkning på den endelige overtoppingen. Bølgeperioder og reflekterte bølger er nøyere diskutert i Lorås (2014). Effektene av disse observasjonene må også ivaretas i begge alternativene presentert under.

Alternativ 1:

Beregningsmetodens steg 1 beholdes og det blir sett videre på en inkorporering av en god tilpassing til de norske forholdene i metodens steg 2 basert på funn presentert her samt i masteroppgavene Lorås (2014) og Vollmer (2014). Fordelen med dette alternativet er allerede

fungerende regneteknikker for ideelle forhold i metodens steg 1. Ulempen er at begrensingene til den «nye-beregningsmetoden» fortsatt vil være bestemt av de samme parametergrensene som skapte problemer i denne masteroppgaven.

Alternativ 2:

Videre bruk av Hellers beregningsmetode legges vekk. Det sees heller på mulighetene for opprettelse av en beregningsmetode for estimering av skredgenererte impulsbølger direkte mot norske forhold. Fordelen med dette alternativet er at parameterne her kan varieres i større grad slik at parametergrensene for metoden vil kunne omfatte variasjonene funnet under norske forhold. Her er det muligheter for å bruke tidligere forsøk fra f. eks (Heller, et al., 2009) og (Huber & Hager, 1997), men parameterne må varieres ytterligere enn det det ble gjort under disse forsøkene. De åpenbare ulempene for alternativ 2 er at nødvendig datainnsamling er stor og tidkrevende uten noen garanti for at en bedre beregningsmetode vil finnes.

På grunnlag av muligheten for større spenn i parametergrenser anses alternativ 2 som det beste alternativet. En oppramsing av parametere som kan ha innvirkning og derfor bør varieres er oppramset under

Parametere som kan være viktige for bølgegenereringen er: Skredets volum, Skredets bredde, Skredets tykkelse, Skredets lengde, Skredets treffningshastighet, Skredets treffningsvinkel, Skredets porøsitet, bredden til magasinet i skredsonen, dybden til magasinet i skredsonen og sidehelningen til magasinet i skredsonen. Parametere som kan være viktige for bølgeforplantningen er: Forandringer i magasinets bredde, forandringer i magasinets dybde avstanden forplantningen strekker over, vinkelen fra skredsonen forplantningen går i og forandringer i magasinets sidehelning. Parametere som kan være viktige for bølgeoppskyllingen er: helningen på oppskyllingspunktet, magasinets sidehelning ved oppskyllingspunktet og forandring i magasinets bredde ved oppskyllingspunktet.

7.2 To erfarte feilkilder og hvordan de kan fjernes

Under presenteres to feilkilder i modellen og løsninger på problemene basert på erfaringer gjort under drift av modell og analysering av data.

Overtoppingsperioden:

Det var installert en lasermåler på en stang over damkronen for å måle overtoppingshøyden og overtoppingsperioden. Problemet som oppsto for overtoppingsperioden var dannelsen av en vannhinne på damkronen. Dette slo ut som overtopping under analysering av dataene. Små svingninger i stangen slo også ut som overtopping. Dette ga store usikkerheter i periodene funnet (Vedlegg IV). Videre er det et problem at kun et punkt ble målt, da det er perioden over hele dammen som er interessant. Under slipp av skred 5.1 ble det plassert et kamera nedstrøms dammen. Her ble det tatt video av kamrene slik at overtoppingen ble tydelig (Bølgevideo 300314-1-5.1 i Vedlegg IV) . Ved å telle antall bilder ble overtoppingsperioden bestemt (kamera: 60 bilder/s). For skred 5.1 varte overtoppingen i 10,2 s hvor det var 49,2 s mellom den første og den siste overtoppingsbølgen. Metoden er tidkrevende, men nøyaktig og anbefales for senere forsøk.

Vanndybden i magasinet:

Det er usikkerhet rund vannivået i magasinet for de forskjellige skredforsøkene, da vannivået ble målt mot en tusj-strek. Vannivået påvirker overtoppingen og beregningsmetoden benyttet

faste verdier på denne gitt i Vedlegg I. Ved å installere en lasermåler mot vannspeilet kan man raskt forandre på vanddybden i magasinet eller i beregningsmetoden. Feilkilden vil med dette fjernes.

Kapittel 8. Referanser

Battjes, J., 1974. *Surf Similarity*, s.l.: 14th Intl. Conf. Costal Eng..

Berthelsen, O., 2013. *www.regjeringen.no*. [Internett]

Available at: http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/tema/energi_og_vannsressurser/produksjon-av-elektrisitet.html?regj_oss=1&id=440487

[Funnet 19 Mai 2014].

Dean, R. & Dalrymple, R., 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Singapore: World Scientific.

Furuset, A., 2010. *Geoportalen*. [Internett]

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

[Funnet 19 mai 2014].

Harbitz, C. B. & Eidsvig, U., 2005. *Innledende numeriske analyser av flodbølger som følge av mulige skred fra Åkneset*, Trondheim: NGI.

Heller, V., 2007. *Landslide generated impulse waves: protection of near field characteristics*, Zurich: ETH.

Heller, V., Hager, W. H. & Minor, H.-E., 2009. *Landslide generated impulse waves in reservoirs, Basics and computation*, Zurich: VAW ETH.

Heller, V., Hager, W. H. & Minor, H.-E., 2009. *Landslide generated impulse waves in reservoirs, Basics and computation*, Zurich: VAW ETH.

Huber, A. & Hager, W. H., 1997. *Forecasting impulse waves in reservoir*, Paris: 19th ICOLD.

Hughes, S. A., 2004. *Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter*, s.l.: Science Direct.

Hunt, I., 1956. *Design of Seawalls and Breakwaters*, s.l.: ASCE.

Jiang, L. & LeBlond, P., 1994. Three-dimensional modeling of tsunami generation due to a submarine mudslide. *Journal of physical oceanography vol. 24 issue 3*, mars, pp. 559-572.

Kamphuis, J. & Bowering, R., 1972. *Impulse waves generated by landslides*, New York: ASCE.

Körner, H., 1976. *Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fliessschneelawinen*, s.l.: Rock Mechanics 8.

Levin, B. & Nosov, M., 2009. Physics of Tsunamis. I: *Physics of Tsunamis*. Moskva: s.n., p. Kapittel 4.

Lorås, S., 2013. *Skred i Magasin, Prosjektoppgave*, Trondheim: NTNU.

Lorås, S., 2014. *Skred i Magasin, (bølgegenerering) masteroppgave*, Trondheim: NTNU.

Lothe, A. & Storler, A., 2010. *Skred ved Åkneset - oppsummering av resultater fra modellforsøk*, Trondheim: SINTEF Byggforsk.

Müller, D., 1995. *Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren*, Zurich: VAW ETH.

Müller, D. & Vischer, D., 1996. *Bemessungsansätze für das Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren*, s.l.: Wasserwirtschaft .

Panizzo, A., De Girolamo, P. & Petaccia, A., 2005. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides. *Journal of geophysical research* Vol. 110.

Petley, D., 2008. *The Landslide Blog*. [Internett]

Available at: <http://www.landslideblog.org/2008/12/vaiont-vajont-landslide-of-1963.html>

[Funnet 19 mai 2014].

Rabinovich, A. et al., 2003. *Numerical modeling of tsunamis generated by hypothetical landslides in the straight of georgia, british columbia*, Bassel: Birkhäuser Verlag.

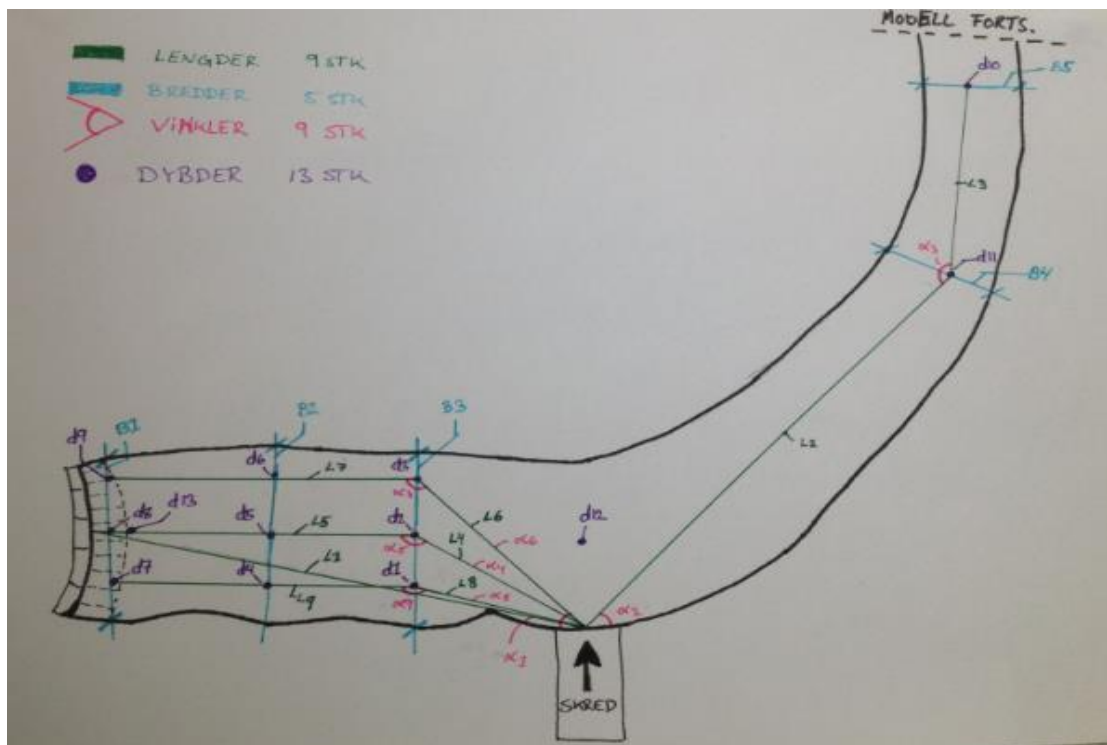
Svendsby, J., 2013. *Skred i magasin: Test av Heller, Hagner og Minors beregningsmetode for estimering av skredgenerert bølgeoppkylling mot skredforsøk i modell, prosjektoppgave*, Trondheim: NTNU.

Vollmer, D., 2014. *Skred i magasin, (bølgeforplantning) masteroppgave*, Trondheim: NTNU.

Zweifel, A., 2004. *Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe*, Zurich: ETH .

Vedlegg I Størrelser og mål i modellen

Under vises forskjellige mål på størrelser i modellen.



Vedlegg figur 1: Viser plassering av størrelser i Vedlegg tabell 1. Blå=bredder, Grønn=lengder, Rosa=vinkler og Lilla=dybder

	1:1	158:1		1:1	158:1
d1	0,425 m	67,2 m	$\alpha 1$	9 °	9 °
d2	0,48 m	75,8 m	$\alpha 2$	50 °	50 °
d3	0,45 m	71,1 m	$\alpha 3$	140 °	140 °
d4	0,3 m	47,4 m	$\alpha 4$	37 °	37 °
d5	0,355 m	56,1 m	$\alpha 5$	142 °	142 °
d6	0,35 m	55,3 m	$\alpha 6$	45 °	45 °
d7	0,26 m	41,1 m	$\alpha 7$	125 °	125 °
d8	0,28 m	44,2 m	$\alpha 8$	29 °	29 °
d9	0,31 m	49,0 m	$\alpha 9$	143 °	143 °
d10	0,325 m	51,4 m	L1	6,4 m	1011,2 m
d11	0,325 m	51,4 m	L2	9,4 m	1485,2 m
d12	0,53 m	83,7 m	L3	2,52 m	398,2 m
d13	0,36 m	56,9 m	L4	2,64 m	417,1 m
b1	2,605 m	411,6 m	L5	3,52 m	556,2 m
b2	2,92 m	461,4 m	L6	3,03 m	478,7 m
b3	2,74 m	432,9 m	L7	3,61 m	570,4 m
b4	1,75 m	276,5 m	L8	2,37 m	374,5 m
b5	1,53 m	241,7 m	L9	3,42 m	540,4 m

Vedlegg tabell 1: Viser faktiske mål fra modellen og oppskalerte mål for prototype. d=dybde, b=bredde, L=lengde, α =vinkel. Plasseringene er vist i Vedlegg figur 1.

Vedlegg II Eksempel beregningsmetodens regneark samt steg 2

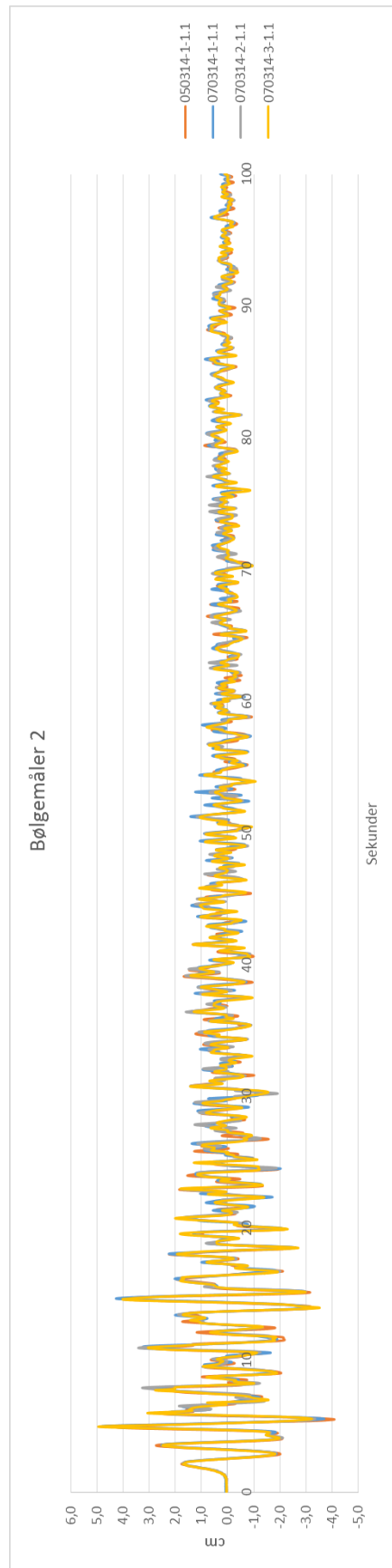
Viser resultater fra Excel arket gitt ut sammen med beregningsmetodens manual. Arket tar kun for seg metodens steg 1, under vises avvik funnet i steg 2 og ny overtopping for de to alternativene. Skred 1.1

Landslide generated impulse waves in reservoirs - Basics and computation			
Spread sheets			
Project name	Skred i Magasin	Operator	Joakim Svendsby
Computational point	Skred 1.1	Date	28.04.2014
Governing parameters			
Wave generation (Subsection 3.2.2)			
Slide impact velocity V_s [m/s]	62	Bulk slide density ρ_s [kg/m ³]	1 241
Bulk slide volume V_s [m ³]	239 404	Bulk slide porosity n [%]	0
Slide thickness s [m]	25	Slide impact angle α [°]	40
Slide or reservoir width b [m]	142	Still water depth h [m]	84
Wave propagation (3D or 2D) (Subsection 3.2.2)			
Wave basin (3D)		Wave channel (2D)	
Radial distance r [m]	1 011	Streamwise distance x [m]	-
Wave propagation angle γ [°]	-81		
Wave run-up and overtopping (Subsection 3.3.2)			
Still water depth h [m]	57	Freeboard f [m]	5
Run-up angle β [°]	32	Crest width b_K [m]	5
Main results			
Wave height H (H_M) [m]			6,9
Wave amplitude a (a_M) [m]			5,5
Wave period T (T_M) [s]			21,3
Wave length L (L_M) [m]			528,0
Run-up height R [m]			12,0
Overtopping volume V_0 per unit length dam crest for $f = 0$ [m ³ /m]			490,5
Duration of overtopping t_0 for $f = 0$ [s]			25,4
Average discharge q_{0M} per unit length dam crest for $f = 0$ [m ² /s]			19,3
Maximum discharge q_{0M} per unit length dam crest for $f = 0$ [m ² /s]			38,6
Overtopping volume per unit length dam crest V [m ³ /m]			165,1
Hor. force comp. p.u.l. dam crest resulting only from hydrostatic pressure $K_{RW,sh}$ [N/m]			15 880 477
Ver. force comp. p.u.l. dam crest resulting only from hydrostatic pressure $K_{RW,v}$ [N/m]			25 414 076
Wave type (Stokes-like wave 3.4.3 or remaining wave types 3.4.4)			Stokes
Remaining: total horizontal force component per unit length dam crest resulting from an impulse wave and hydrostatic pressure $K_{tot,sh}$ [N/m]			No value
Remaining: reduced total horizontal force component per unit length dam crest resulting from an impulse wave and hydrostatic pressure $K_{tot,sh,sub}$ [N/m]			No value
Remaining: elevation $z_{K_{tot,sh,sub}}$ of the resultant of $K_{tot,sh,sub}$ [m]			No value
S/r: additional hor. force comp. p.u.l. dam crest resulting from impulse wave ΔK_h [N/m]			3 829 383
Stokes: elevation $z_{\Delta K_{sh}}$ of the resultant of ΔK_h [m]			31,7
S/r: ad. vertical force component p.u.l. dam crest resulting from impulse wave ΔK_v [N/m]			6 128 294
Limitations			
Number of not satisfied limitations out of 23 (2D) or 24 (3D), respectively			4
Avvik 1		Venstre: Gjør om fra løsmasseskred til blokkskred	
F	2,2 dim.løs		
a(Mb)	9,8 m		
Økning	76,8 %		
Avvik 2		Venstre: Tar høyde for bredde og dybdeforandring	
H(2)	7,8 m		
Økning	13,0 %		
Total økning	89,7 %		
Økning direkte fra overtopping			
Overtopping	313,2 m ³ /m		
Økning igjennom Run-Up			
Overtopping	294,9 m ³ /m		
Økning igjennom Bølgehøyde			
Overtopping	782,7 m ³ /m		

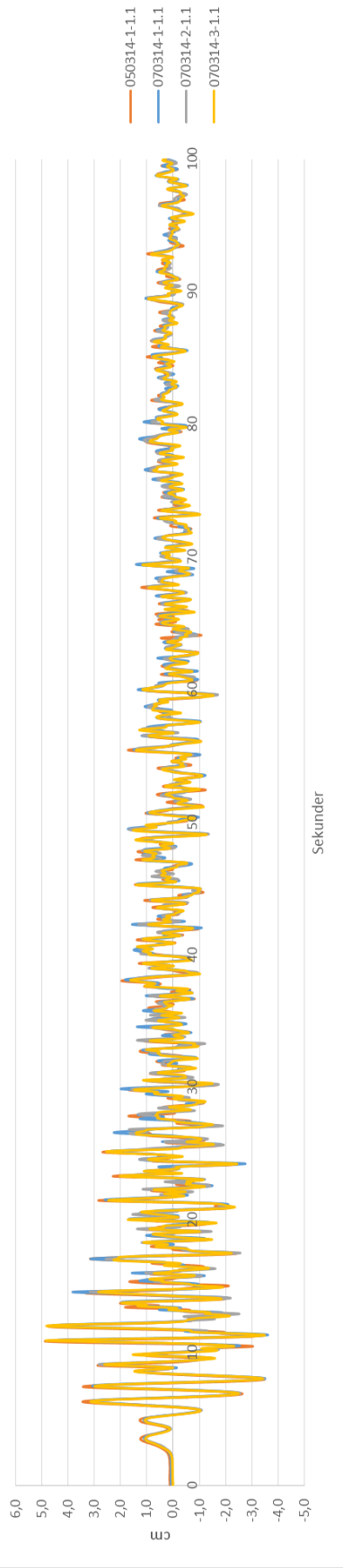
Computation			
Parameter limitations control			
Limitations for the impulse wave generation			
Table 3-2 Limitations for the calculation of the impulse waves generation.			
Term	Range	Term	Meaning
Slide Froude number	$0.86 \leq F \leq 6.83$		$F = V_s / (gh)^{1/2}$
Relative slide thickness	$0.09 \leq S \leq 1.64$		$S = s/h$
Relative slide mass	$0.11 \leq M \leq 10.02$		$M = \rho_s V_s / (\rho_w b h^2)$
Relative slide density	$0.59 \leq D \leq 1.72$		$D = \rho_s / \rho_w$
Relative granulate density	$0.96 \leq \rho_g / \rho_w \leq 2.75$		
Relative slide volume	$0.05 \leq V \leq 5.94$		$V = V_s / (b h^2)$
Bulk slide porosity	$30.7\% \leq n \leq 43.3\%$		n
Slide impact angle	$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$		α
Relative slide width	$0.74 \leq B \leq 3.33$		$B = b/h$
Relative radial distance	$5 \leq r/h \leq 30$		r/h
Wave propagation angle	$-90^\circ \leq \gamma \leq +90^\circ$		γ
Relative streamwise distance	$2.7 \leq X \leq 59.2$		$X = x/h$
Impulse product parameter	$0.17 \leq P \leq 8.13$		$P = F S^{1/2} M^{1/4} [\cos((6/7)\alpha)]^{1/2}$
Slide Froude number		2,18	0 Satisfied
Relative slide thickness		0,30	0 Satisfied
Relative slide mass		0,30	0 Satisfied
Relative slide density		1,24	0 Satisfied
Relative grain density		1,24	0 Satisfied
Relative slide volume		0,24	0 Satisfied
Bulk slide porosity		0	1 Not satisfied
Slide impact angle		40	0 Satisfied
Relative slide width		1,70	0 Satisfied
Relative radial distance		12,1	0 Satisfied
Wave propagation angle		-81	0 Satisfied
Relative distance		No value	0 No value
Impulse product parameter		0,80	0 Satisfied
Limitations for the wave run-up			
Table 3-3 Limitations for the calculation of the wave run-up.			
Term	Range	Term	Range
Relative wave height	$0.011 \leq H/h \leq 0.521$	Relative angle	$1.0 \leq 90^\circ/\beta \leq 4.9$
Wave steepness	$0.001 \leq H/L \leq 0.013$		
Relative wave height		0,122	0 Satisfied
Wave steepness		0,013	1 Not satisfied
Relative angle		2,8	0 Satisfied
Limitations for the overtopping			
Table 3-4 Limitations for the calculation of overtopping.			
Term	Range	Term	Range
Relative wave height	$0.019 \leq H/h \leq 0.488$	Relative wave celerity	$0.83 \leq c^2/(gh) \leq 1.40$
Non-linearity	$0.59 \leq a/H \leq 0.95$	Relative wave length	$6.0 \leq L/h \leq 24.0$
Wave steepness	$0.001 \leq H/L \leq 0.023$	Relative angle	$1.0 \leq 90^\circ/\beta \leq 4.9$
Relative period	$9.0 \leq T(g/h)^{1/2} \leq 21.0$		
Relative wave height		0,122	0 Satisfied
Non-linearity		0,80	0 Satisfied
Wave steepness		0,013	0 Satisfied
Relative period		8,86	1 Not satisfied
Relative wave celerity		1,10	0 Satisfied
Relative wave length		9,3	0 Satisfied
Relative angle		2,8	0 Satisfied
Limitations for the duration of overtopping t_0			
Table 3-5 Limitations for the calculation of the duration of overtopping t_0.			
Term	Range	Term	Range
Relative period	$14 \leq T(g/h)^{1/2} \leq 22$	Relative duration of overtopping	$10.5 \leq t_0(g/h)^{1/2} \leq 13.5$
Relative wave period		9	1 Not satisfied
Relative duration of overtopping		10,5	0 Satisfied
Number of not satisfied limitations out of 23 (2D) or 24 (3D), respectively			
			4

Vedlegg III Eksempel, Bølgegrafer

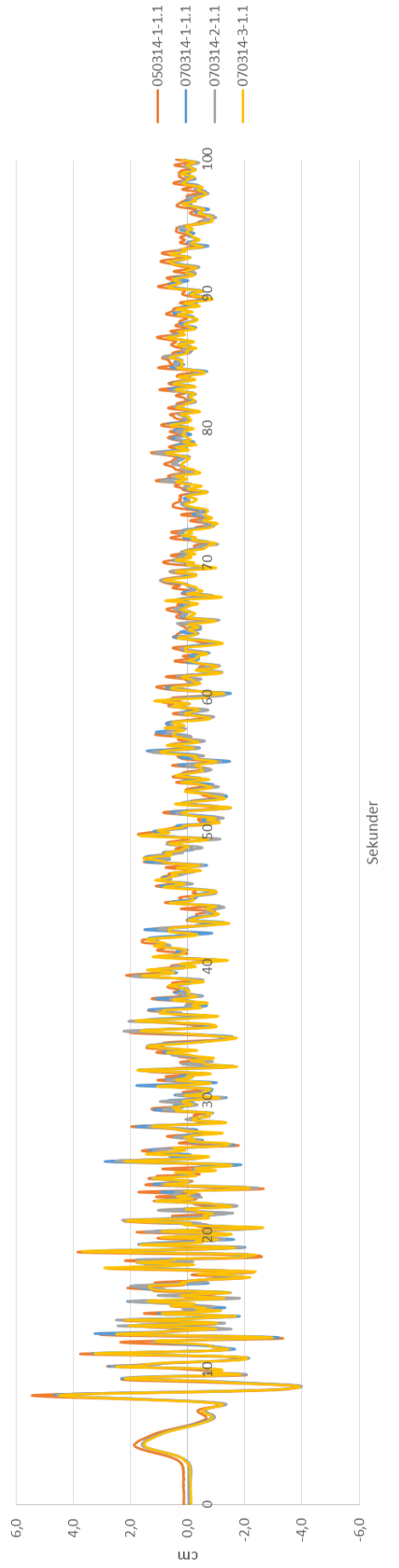
Viser bølgegrafer for skred 1.1 ved bølgemåler 2, 5 og 8, plassert langs magasinet senter.



Bølgemåler 5
















Bølgemåler 8



Vedlegg IV Indeks for vedlegg på cd

Viser innhold i vedlagt cd. Alle data funnet i modellen, behandling av dataene og beregninger gjennomført er gitt her.

 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 skredsenario
 Manal Hellers beregningsmetode	Kopi av manualteksten
 Hellers beregningsmetode	Originalt regneark utgitt med manualen
 NY! Skred 1.1	Regneark med alle gjennomførte beregninger for hvert skredsenario. Herunder:
 NY! Skred 2.1	- kalibrering av bølgesensorer
 NY! Skred 3.1	- kalibrering av målebøtter
 NY! Skred 3.2	- kalibrering av hastighetsmåler
 NY! Skred 4.1	- kalibrering av lser 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 (3D)
 NY! Skred 7.3	-beregning av steg 1 og steg 2 (3D/2D)
 NY! Sammenligning	- oppsummering-ark for bruk i sammenligningsregneark
	Sammenligning av data funnet i regnearkene over.