

Flomskred

Testing av ulike sikringstiltak i modellforsøk

Espen Fiskum

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, BAT

Medveileder: Harald Norem, Statens vegvesen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Flomskred – Testing av ulike sikringstiltak i modellforsøk	Dato: 08.06.2012		
	Antall sider (inkl. bilag): 97		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Stud.techn. Espen Fiskum			
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Harald Norem, Statens vegvesen			

Ekstrakt:

Som en følge av mer ekstrem nedbør og mildere vintre som skaper flere flomskred har Statens vegvesen begynt å se på ulike tiltak for å kunne sikre utsatte strekninger mot denne type skredhendelser.

I denne masteroppgaven er det gjennomført til sammen 32 tester for å vurdere hvordan ulike sikringstiltak fungerer i forbindelse med simulerte flomskred i en bygd modell. Testene er gjennomført i kontrollerte former i egnet testlaboratorium ved NTNU. 4 ulike sikringstiltak er blitt testet gjennom modellforsøk;

- Lukket kontrolldam
- Åpen kontrolldam med to spalter
- Åpen kontrolldam med fire spalter
- Bremskjegler

I tillegg til dette er det testet ulikt antall kjegler i kombinasjon med fire spalters kontrolldam for å finne effekten av slike kombinasjoner.

Testene i denne studien viser at ulike sikringstiltak reduserer hastighet og utløpsdistanse til skredene. Testene viser best effekt av 4-spalters kontrolldam som stopper skredfronten og samler masse oppstrøms før massene begynner å strømme gjennom spaltene, nå med betydelig lavere hastighet. Effekten av kjegler synes i testene i denne studien å være størst når kjeglene plasseres med en viss intern avstand.

Søk etter resultater fra lignende studier viser at det ikke er testet spesielt mye på effekter av ulike sikringstiltak gjennom simulerte flomskred i modellforsøk. Resultatene fra denne studien viser at det videre fremover bør testes mye mer på effekter ved bruk av ulike sikringstiltak og betydningen ulike typer masse har for sikringsmidlenes effekt.

Stikkord:

1. Flomskred
2. Modellforsøk
3. Åpen kontrolldam med to og fire spalter
4. Bremskjegler

(sign.)

TBA4510 Geoteknikk Masteroppgave, våren 2012

Stud. techn.
Espen Fiskum

Flomskred – Testing av ulike sikringstiltak i modellforsøk

Debris flow slides – Testing of different countermeasures in model tests

Bakgrunn

Flomskred er en hendelse i naturen som har kommet i stadig mer fokus de seneste årene. Klimaskifte, med raskere og større endringer i temperatur, nedbør og intensiteter er i forskningsmessig fokus og etater som Statens vegvesen (SVV), Jernbaneverket og NVE har store utfordringer med å håndtere denne type naturfare og de skader det medfører. Det skal sees på ulike sikringsmidler og hvordan disse kan testes gjennom modellforsøk på en allerede eksisterende modell bygget opp i forbindelse med pilotprosjekt med testing av flomskred mot bruer. (Hiller og Jenssen (2009). ”Modellforsøk med flomskred mot bruer.” Trondheim: Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU). Det vil være naturlig at denne modellen blir utvidet gjennom masteroppgaven for å kunne se på effekten av sikringsmidlene.

Innhold

Oppgaven skal gi en innføring i hva flomskred og hvilke krefter som virker. Gjennom studien av flomskredenes egenskaper skal modellen bygges ut slik at de parametre som er viktige for flomskred blir målbare, i denne delen skal det tas hensyn til modellover og studenten må sette seg inn i dette. Det skal presenteres ulike aktuelle sikringstiltak som er benyttet for å redusere krefter i flomskred ute i felten, hvordan disse er designet og deres funksjon. Modellforsøkene skal se på effekten av ulike massers betydning for egenskapene til flomskredet, men viktigst er det å kunne designe og teste sikringstiltak i modellen og i ettertid evaluere effekten av de ulike sikringstiltakene som er valgt testet.

Omfang og levering

Oppgaven har et omfang på 30 studiepoeng – dvs. tilsvarende et semester.

Arbeidet skal leveres i form av en teknisk rapport med innledning og problemformulering, bakgrunnsstudie av relevante mekanismer, og presentasjon av resultater fra studiet. Klare konklusjoner og forslag til videre arbeid vil bli kreditert.

Rapporten skal leveres i form av en uinnbundet original og to innbundne kopier. Digitalt skal det leveres en versjon av oppgaven samt alle laboratoriedata som er fremkommet, både rådatafiler og behandlede data og eventuelle film/videoopptak.

Leveringsdato

11. juni 2012.

Organisering

Oppgaven er initiert og støttet av Statens Vegvesen. Ekstern veileder er Harald Norem, SVV.

Arnfinn Emdal

Amanuensis

Institutt for Bygg, Anlegg og Transport
Faggruppe for Geoteknikk

Forord

I forbindelse med avslutningen av Mastergradsutdanningen innen Bygg- og miljøteknikk ved Norges Teknisk-naturvitenskaplige Universitet, NTNU, gjennom 20 effektive uker våren 2012, er det utarbeidet en rapport som har evaluert effekten av ulike sikringstiltak i forbindelse med flomskred.

Arbeidet har i hovedsak vært testing og utforming av modell for evaluering av ulike sikringsmidler som kan være aktuelle i forbindelse med flomskred. Arbeidet har vært en videreføring av tidligere studie og tester som jeg gjennomførte i prosjektoppgaven høsten 2011.

Jeg vil rette en stor takk til Harald Norem ved Statens Vegvesen for god veiledning og engasjement rundt temaet og oppgaven uten hans engasjement ville det ikke blitt gjennomført en slik oppgave basert på tester av sikringstiltak i modellskala.

Gunnar Winther og Einar Hustad har kjørt kranen med stødig hånd og tilbrakt mange timer sammen med meg i vassdragslabben så vil også takke de for deres hjelp. De ansatte ved Vassdragslabben fortjener også en takk for innspill og tips i forbindelse med bygging av modellen.

Vil også takke Førsteamanuensis Arnfinn Emdal ved faggruppe for geoteknikk ved NTNU som har vært veileder fra NTNU. Han har stilt opp ved behov og dratt i de riktige trådene for å få ting gjort.

Espen Fiskum, Trondheim 08.06.12

Sammendrag

Som en følge av mer ekstrem nedbør og mildere vintre som skaper flere flomskred har Statens vegvesen begynt å se på ulike tiltak for å kunne sikre utsatte strekninger mot denne type skredhendelser.

I denne masteroppgaven er det gjennomført til sammen 32 tester for å vurdere hvordan ulike sikringstiltak fungerer i forbindelse med simulerte flomskred i en bygd modell. Testene er gjennomført i kontrollerte former i egnert testlaboratorium ved NTNU. 4 ulike sikringstiltak er blitt testet gjennom modellforsøk;

- Lukket kontrolldam
- Åpen kontrolldam med to spalter
- Åpen kontrolldam med fire spalter
- Bremseskjeler

I tillegg til dette er det testet ulikt antall skjeler i kombinasjon med fire spalters kontrolldam for å finne effekten av slike kombinasjoner.

Testene i denne studien viser at ulike sikringstiltak reduserer hastighet og utløpsdistanse til skredene. Testene viser best effekt av 4-spalters kontrolldam som stopper skredfronten og samler masse oppstrøms før massene begynner å strømme gjennom spaltene, nå med betydelig lavere hastighet. Effekten av skjeler synes i testene i denne studien å være størst når skjelene plasseres med en viss intern avstand.

Søk etter resultater fra lignende studier viser at det ikke er testet spesielt mye på effekter av ulike sikringstiltak gjennom simulerte flomskred i modellforsøk. Resultatene fra denne studien viser at det videre fremover bør testes mye mer på effekter ved bruk av ulike sikringstiltak og betydningen ulike typer masse har for sikringsmidlenes effekt.

Abstract

Due to more extreme rain and warmer winters debris flow occur more often. The Norwegian Public Roads Administration has started to look at measures to prevent debris flow in vulnerable areas.

In this master's thesis it has been done 32 tests to evaluate different counter measurements that could prevent damages from debris flows in model tests. Four different counter measurements have been tested in model experiments;

- Closed check dam, open
- Check dams with two slits
- Check dams with four slits
- Breaking mounds

It has also been tested combinations of breaking mounds and four slits check dam to see the effect of these types of combinations.

The experiments indicated that the counter measurements reduced the speed and flow length of the debris flows. Best effects are measured from the four slits check dam which stopped the flow front and gather the masses upstream before the masses began to flow through the slits with considerably lower speed. The effect of breaking mounds seems to be best when the mounds are placed with openings.

Searching after other studies that are testing counter measurements, indicate that there don't have been done much testing of counter measurements earlier. Throughout the thesis it is found that more testing of different counter measurements and the consequence of different masses properties are needed in the future.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract.....	iv
Innholdsfortegnelse.....	v
Figurliste.....	vii
Formelliste	x
Tabelliste.....	x
Forkortelser.....	xi
Vedlegg	xi
1 Innledning	1
2 Beskrivelse av flomskred	3
2.1 Turbulente flomskred	4
2.2 Steinrike flomskred	4
2.3 Viskøse flomskred	4
2.4 Flomskredenes utløsningsårsaker.....	5
2.4.1 Erosjon som følge av rennende vann.....	5
2.4.2 Flomskred initiert av brudd i massene, grunnbrudd	6
2.5 Krefter i flomskred og viktige parametre	6
3 Beskrivelse av sikringsmidler	11
3.1 Bremseskjeler	11
3.2 Kontrolldammer	13
3.2.1 Lukkede kontrolldammer	13
3.2.2 Åpne kontrolldammer	14
3.3 Nett og gitterkonstruksjoner	15
3.4 Voller.....	17
4 Modellover.....	19
5 Forsøksoppsett og gjennomføring	23
5.1 Modellen.....	23
5.2 Innledende tester av ulike masser og flytlengder.....	26
5.2.1 Resultater innledende tester.....	28
5.2.2 Nye innledende tester.....	28

5.2.3	Resultater nye innledende tester	29
5.2.4	Referanse tester med bruk av sand fra Hiller og Jensen	31
5.3	Testing av sikringstiltak.....	32
5.3.1	Generelt om hvordan testene utføres	32
5.3.2	Lukkede kontrolldammer	33
5.3.3	Åpen 2 og 4 spalters kontrolldam	34
5.3.4	Bremsekjegler	36
5.3.5	Kombinasjon med 2 kjegler og 4 spalter kontrolldam	38
5.3.6	Kombinasjon med 4 kjegler og 4 spalter kontrolldam	39
6	Resultater.....	41
6.1	Referanse testene	41
6.2	Sikringstiltak.....	42
6.2.1	Flythøyde før sikringstiltak	43
6.2.2	Hastigheter i skredene	47
6.2.3	Flytlengde og utbredelse	56
6.2.4	Observasjon fra kassen.....	58
6.3	Feilkilder.....	59
7	Diskusjon/analyse.....	63
7.1	Lukket kontrolldam	63
7.2	2-spalters kontrolldam	65
7.3	4-spalters kontrolldam	66
7.4	Kjegler	68
7.5	2 kjegler og 4-spalters kontrolldam	70
7.6	4 kjegler og 4-spalters kontrolldam	71
7.7	Oppsummering og sammenligning	72
7.8	Videre anbefalinger	74
8	Konklusjon.....	77
9	Kilder.....	79

Figurliste

Figur 2.1: Klassifisering av skredtyper ut fra forholdet mellom vann, stein/jord og snø/is, figur fra Norem og Sandersen (2011).	3
Figur 2.2: Utvikling av flomskred, figur fra Norem og Sandersen (2011)	4
Figur 2.3: Kriterier for å få utviklet forskjellige typer massetransport i drensløp, figur Norem og Sandersen (2012).	5
Figur 2.4: Krefter som virker på skredmasser, figur: Norem og Sandersen (2012).	7
Figur 2.5: Eksempel på grafisk framstilling av energilinjen, figur: Espen Fiskum (2012).	8
Figur 3.1: Kast masser i forbindelse med testing av kjegler og tørrsnøskred, foto: Brateng (2005).	12
Figur 3.2: Avledningsskjerm vannkraft, prinsippskisse av Rageh (1999).	12
Figur 3.3: Lukkede kontrolldammer i funksjonell kjede (figur - IRASMOS, 2008).	13
Figur 3.4: Skredvolum som lukket kontrolldam kan holde tilbake ut ifra kanal bredde B og skråningvinkel θ , figur: Lien (2003).	14
Figur 3.5: Ulike typer åpne kontrolldammer, figurer fra Jakob og Hungr (2005).	15
Figur 3.6: Skjematisk plan over utløpsområdet og nett plasseringen, Iverson et al. (1999)	16
Figur 4.1: Figur av energilinjen og hvordan flytlengden kan regnes ut fra denne, Norem og Sandersen (2012).	20
Figur 5.1: Oversikt modell før utbygging, foto: Hiller og Jenssen (2009)	24
Figur 5.2: Skisse av modell, målestokk 1:100, figur: Espen Fiskum (2012)	25
Figur 5.3: Bilde av modellen etter utbyggingen, foto: Espen Fiskum (2012)	25
Figur 5.4: Kornfordeling for forsøk med utglidningslengder, Fiskum (2012).	27
Figur 5.5: Bilde som viser problemer med sanden i kassen, foto: Fiskum (2012)	30
Figur 5.6: Utbredelse av skredene for forsøk 1, 2 og 5 ved bruk av Sjøbergsand og vannmengde etter Tabell 5.4, Fiskum (2012).	31
Figur 5.7: Skredmaterialet på millimeterpapir, figur Hiller og Jenssen (2009).	32
Figur 5.8: Dam konstruksjon med mål som benyttes i sikringsforsøkene, figur: Fiskum (2012).	33
Figur 5.9: Åpen kontrolldam med 2 spalter med mål, sett nedenfra, figur: Fiskum (2012).	34
Figur 5.10: Åpen kontrolldam med 4 spalter med mål, sett ovenfra, figur: Fiskum (2012).	34
Figur 5.11: Spaltdam før flomskred og erosjon, foto: Mizuyama (2008)	35
Figur 5.12: Spaltdam etter flomskred, viser erosjonsproblemet. Foto: Mizuyama (2008)	35
Figur 5.13: Kjegleutforming og mål, figur: Fiskum (2012).	36
Figur 5.14: Oppsett av kjeglene i modellen, foto: Fiskum (2012).	37
Figur 5.15: Oppsett av kombinasjonen 2 kjegler og 4 spalter kontrolldam. Foto: Fiskum (2012).	38
Figur 5.16: Oppsett av kombinasjonen 4 kjegler og 4 spalter kontrolldam. Foto: Fiskum (2012).	39
Figur 6.1: Oversikt utsklidning test 12, bilde pr 10 frame (0,4 sek) tatt bak kassen, Fiskum (2012).	42

Figur 6.2: Oversikt over måleutstyr rundt sikringstiltaket, avstandsmåler og kamera oppsett. Foto: Fiskum (2012)	43
Figur 6.3: Bilde fra kamera som viser displayet på avstandsmåleren. Foto: Fiskum (2012)	43
Figur 6.4: Flythøyden for referansetestene, figur: Fiskum (2012)	44
Figur 6.5: Flythøyden lukket kontrolldam, figur: Fiskum (2012).....	44
Figur 6.6: Flythøyden for 2-spalter kontrolldam, figur: Fiskum (2012).....	45
Figur 6.7: Flythøyden for 4-spalter kontrolldam, figur: Espen Fiskum (2012).....	45
Figur 6.8: Flythøyden for kjebler i rett rekke uten lysåpning mellom kjeblene, figur: Fiskum (2012).....	45
Figur 6.9: Flythøyden for 2 kjebler med lysåpning på 50 mm og 4 spalter dam, figur: Fiskum (2012).....	46
Figur 6.10: Flythøyden for 4 kjebler med lysåpning 50 mm og 4 spalter dam, figur: Fiskum (2012).....	46
Figur 6.11: Oversiktsbilde som viser plassering av høyhastighetskamera. Foto: Fiskum (2012)	47
Figur 6.12: Bilde som viser filmområde for høyhastighetskamera under testing av sikringsmidler. Foto: Fiskum (2012)	48
Figur 6.13: Figur som viser Tracker og sporingen av to ulike partikler (blå og rød farge), flere klosser vises også. Bilde: Fiskum (2012).	49
Figur 6.14: Hastighetsforløp referansetestene, test 6-12, Fiskum (2012).	51
Figur 6.15: Hastighetsforløp opp- og nedstrøms 2-spalters kontrolldam for test 16-18, Fiskum (2012).....	51
Figur 6.16: Hastighetsforløp opp- og nedstrøms 4-spalters kontrolldam, test 19-21, Fiskum (2012).....	51
Figur 6.17: hastighetsforløp opp- og nedstrøms kjeblerekke, test 22-24, Fiskum (2012).	52
Figur 6.18: hastighetsforløp opp- og nedstrøms kombinasjon 2 kjebler og 4 spalters kontrolldam, test 25 og 27-29, Fiskum (2012).....	52
Figur 6.19 Hastighetsforløp oppstrøms kombinasjon 4 kjebler og 4 spalters kontrolldam, test 30-32, Fiskum (2012).	52
Figur 6.20: Energilinjen for referansetestene, test 6-12, Fiskum (2012).	53
Figur 6.21: Energilinjen for test 13-15, lukket kontrolldam plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).	54
Figur 6.22: Energilinjen for test 16-18, 2-spalters kontrolldam plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).....	54
Figur 6.23: Energilinjen for test 19-21, 4-spalters kontrolldam plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).....	54
Figur 6.24: Energilinjen for test 22-24, kjeblerekke uten lysåpning plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).....	55
Figur 6.25: Energilinjen for test 25, 27-29, 2 kjebler med 50 mm lysåpning plassert ved $x=400$ og 4-spalters kontrolldam ved $x=1200$, Fiskum (2012).	55

Figur 6.26: Energilinjen for test 30-32, 4 kjebler med 50 mm lysåpning plassert ved x=400 og 4-spalters kontrolldam ved x=1200, Fiskum (2012).....	55
Figur 6.27: Utbredelse av skredene, t.v. referansetestene, t.h. tester med 2 spalters dam. Figur: Fiskum (2012)	56
Figur 6.28: Utbredelse av skredene, t.v. 4 spalters dam, t.h. kjebler på linje. Figur: Fiskum (2012).....	57
Figur 6.29: Utbredelse av skredene, t.v. 2 kjebler og 4 spalters dam, t.h. 4 kjebler og 4 spalter dam. Figur: Fiskum (2012)	57
Figur 6.30: Utbredelse av skred og avgrensing markert med rødt, foto: Fiskum (2012).	61
Figur 7.1: Test 14 som viser masser som strømmer over dammen etter cirka 3 sekunder. Bilde: Fiskum (2012).	63
Figur 7.2: Utbredelse test 14, lukket kontrolldam. Figur: Fiskum (2012).....	64
Figur 7.3: Masser som blir skylt opp på oppstrøms side av 2-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).....	65
Figur 7.4: Masser som blir stoppet på oppstrøms side av 4-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).....	66
Figur 7.5: 4-spalters kontrolldam, massene flyter etter en stund gjennom spaltene på dammen. Foto: Fiskum (2012)	67
Figur 7.6: Masser oppstrøms for kontrolldammen etter at skredet har passert og stoppet, foto: Fiskum (2012).	68
Figur 7.7: Effekten av kjebler der masse flyter over. Foto: Fiskum (2012).....	69
Figur 7.8: Masser liggende oppstrøms for kjebler i test 24 etter at skred har passert, foto: Fiskum (2012).....	70
Figur 7.9: Masser som i test 29 blir "kastet" opp i luften av kjebler og deretter stoppet av 4-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).	70
Figur 7.10: Masser som passerer 4 kjebler og fanges av 4-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).....	71
Figur 7.11: Masser etter at skredet har stoppet for test 31, foto: Fiskum (2012).....	72
Figur 7.12: Energihøyden for ulike enkeltstående sikringstiltak sammenlignet med referansetesten, Fiskum (2012).	73

Formelliste

Formel 2.1: Newtons første lov, der volumet dekker et enhetsareal. F er friksjon og P er tyngdekomponenten.	7
Formel 2.2: Utvidelse av Newtons første lov, som tar hensyn til hastighets -uavhengig og -avhengig ledd.	7
Formel 2.3: Bernoullis likning.....	8
Formel 2.4: Effektberegning	9
Formel 3.1: Dimensjonering av skredtrykk dersom bakkant dam ikke er fylt med masser, Norem og Sandersen (2011).	13
Formel 4.1: Froudetall, benyttes i Froudes modell lover.	19
Formel 4.2: Målestokk forholdet mellom modell og natur	19
Formel 4.3: Hastighets sammenheng mellom modell og natur	20
Formel 4.4: Flythøyde sammenheng.....	20
Formel 4.5: Volum sammenheng:	20

Tabelliste

Tabell 3.1: Oversikt over ulike nettyper benyttet i forsøkene.....	16
Tabell 5.1: Oversikt over variasjoner av masser, Fiskum (2012).	27
Tabell 5.2: Ønskede og forventede resultater for innledende tester, Fiskum (2012).	28
Tabell 5.3: Nytt testoppsett innledende tester, Fiskum (2012).....	29
Tabell 5.4: Hastigheter målt for test 1-5, problemer med sand som ligger igjen i kassen. Fiskum (2012).	29
Tabell 6.1: Referanseverdier innledende tester, inneholder også varians og standardavvik på hastighetene og utglidningene, Fiskum (2012).....	41
Tabell 6.2: Hastigheter i skredene, skred 6-18.	49
Tabell 6.3: Hastigheter i skredene, skred 19-32, for test 27-32 lot dette ikke seg måle mellom sikringstiltakene.	50
Tabell 6.4: Oversikt over utglidningslengder og beskrivelse av utbredelsen med tanke på masser.....	58
Tabell 6.5: Oversikt over tider massene brukte ut ra kassen og kommentarer til hvordan de oppførte seg på vei ut.....	59
Tabell 6.6: Vekt innhold i kasse for test 15-32.....	60

Forkortelser

USGS = United States Geological Survey (<http://www.usgs.gov/>)

t/m³ = tonn per kubikkmeter

mm = Millimeter

% = Prosent

dm³ = Kubikkdesimeter (1 liter)

Fr = Froudetall

v = fart [m/s]

g = gravitasjonskonstant [m/s²]

h = høyden på skredstrømmen [m]

Lm = målestokk forholdet

mPa. s. = millipascal*sekund – mål for viskositet

m/s = meter per sekund

Vedlegg

1. DVD med videoer og bilder fra forsøkene, hastigheter fra Tracker og beregninger fra Excel.
2. Siktekurve av masser benyttet i testene med sikringstiltak.

1 Innledning

De siste års klimaendringer med større frekvens av intens nedbør har ført til en økning i antall flomskred her til lands. Dette kan delvis skyldes økt bruk og utnyttelse av utmarksområder i bratt terreng, som eksempelvis skogsbilveier og store hugstfelt, noe som kan endre naturlige drensløp, Norem og Sandersen (2012). Tidligere har ikke flomskred fått spesielt mye oppmerksomhet i forhold til sikring, da det kan være vanskelig å forutsi hvor og når eventuelle flomskred vil kunne oppstå. Dette har vært en av grunnene til at det sjeldent er laget sikringstiltak med hensyn på flomskred og det finnes i dag få forsøk på denne type sikringstiltak i Norge. Ser man utenfor landets grenser er det gjennomført noe forskning med laboratorieforsøk på flomskred, men det meste av sikringstiltak bygges med erfaringer fra tidligere sikringstiltak og deres effekt ut fra ingeniørens vurderinger, Huebl og Fiebiger (2005).

Denne oppgaven vil se på ulike sikringstiltak og muligheter for å teste disse gjennom laboratorieforsøk i og med at fullskala forsøk vil koste alt for mye og være urealistiske og få gjennomført. Det er i modellforsøkene benyttet erfaringer fra tidligere gjennomførte modellforsøk ved Norges Teknisk-naturvitenskaplige Universitet, NTNU. Modellen er en videreutvikling av modellen til Hiller og Jenssen (2009) og gjennom min egen prosjektoppgave "Flomskred – litteraturstudie og innledende forsøk for masteroppgaven våren 2012" av Espen Fiskum (2011).

I denne masteroppgaven er det lagt stor vekt på utvikling av selve modellen og organiseringen av de praktiske testene. Dette for å kunne gjennomføre testene på en slik måte at resultatene skulle kunne gjøres sammenlignbare for ulike typer sikringsmidler. Det ble dermed en del arbeider i starten med å designe utbyggingen av modellen, skaffe materialer og snekre selve modellen. Testprogrammet som er gjennomført er begrenset både med tanke på bruk av ulike masser, vannivå og variasjoner på sikringsmidlene. Testing er betydelig tid- og resurskrevende, blant annet kreves det egen person for kjøring av kran til bytte av kassene. Et skredforsøk tar omtrent 30 minutter og dette er en av hovedgrunnene til at forsøksprogrammet ikke har vært mer omfattende i denne studien. Det er i denne studien gjennomført til sammen 32 tester fordelt slik:

- Innledende tester (test 1-5)
- Hoveddel (test 6-32)
 - Referansetester (test 7-12)
 - Forsøk på sikringstiltak (test 13-32)

I de innledende testene undersøktes ulike masser og deres betydning for flytlengder og hastigheter. Som en konklusjon av de innledende testene gjennomføres hoveddelen med referansetester og forsøk på sikringstiltak. Det er hoveddelen som i denne oppgaven er vektlagt mest ettersom litteratursøkene avdekket at det finnes lite dokumentasjon på

gjennomførte tester og effekten av ulike sikringstiltak. Statens vegvesen var også mest interessert i denne delen av oppgaven, de ønsket derfor at jeg ikke vektla de innledende testene for mye tid.

Opgaven er valgt bygd opp slik at leseren først skal få litt teoretisk innsikt i hva flomskred er og hvordan de oppstår. Det er her sett på ulike typer flomskred og hva som karakteriserer de ulike typene. I tillegg er det beskrevet litt hvordan krefter i flomskred opptrer nedover i skredløpet. Det er beskrevet hvordan ulike sikringstiltak fungerer og hvordan disse bør utformes for å oppnå størst mulig effekt. I denne delen er det benyttet erfaringer fra flomskred, men også litteratur fra snøskred og vannkraft er benyttet der litteraturen fra flomskred er begrenset. Etter beskrivelsen av ulike sikringsmidler følger kapittel 4 som avklarer hvilke modell-lover som er benyttet i studien for vurdering av utbyggingen av modellen og dimensjonering av skredegenskaper. Disse lovene tar utgangspunkt i Froudetallet.

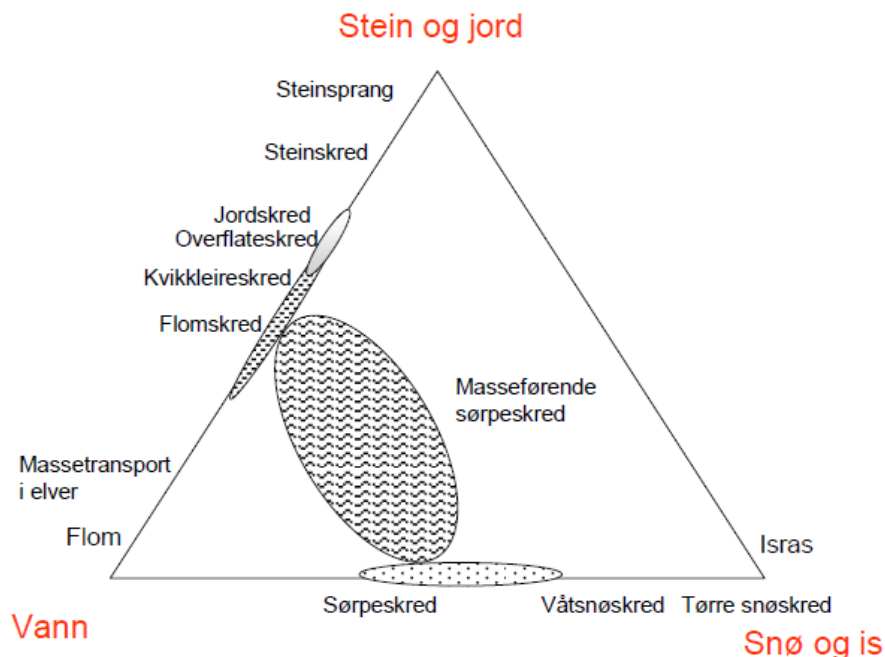
Kapittel 0 beskriver hvordan testingen gjennomføres og hvordan utbyggingen av modellen ble gjennomført. Det er her også beskrevet en del av de utfordringer som oppstod ved testing av ulike masser i de innledende testene. Det er i detalj beskrevet hvordan sikringsmidlene ble utformet og installert i modellen.

Kapittel 0 inneholder resultater fra referansetestene og effekter av de ulike sikringsmidlene som ble testet ut. I dette kapitlet er resultatene presentert etter målemetode, dette for enklere å kunne sammenligne effekten av de ulike sikringsmidlene. Det er beskrevet hvordan ulike målinger ble utført innledningsvis før presentasjon av måleresultatene. Til slutt i dette kapitlet er det gjort en vurdering av mulige feilkilder.

I diskusjonsdelen, kapittel 7, vurderes ulike sikringsmidler og mulig effekt de kan ha for utvikling av flomskred, i starten er det sett på hvert enkelt tiltak, deretter er tiltakene sammenlignet og vurdert opp mot hverandre. Det er avslutningsvis i kapitlet pekt på mulige fallgruver/utfordringer man kan møte på ved gjennomføring av slike tester. Dette for at man ved oppfølgende studier med lignende tester enklere skal kunne styre unna de problemer som oppstod under testingen i denne studien og om mulig få frem mer presise måleresultater.

2 Beskrivelse av flomskred

Naturlige skred er som regel en blanding av ulike sammensetninger av vann, steinmaterialer og/eller ismaterialer som snø, samt vegetative materialer som humus og trær. Figur 2.1 viser hvordan ulike skredtyper kan klassifiseres ut fra forholdet mellom vann, stein og jord og snø og is. Flomskred er ut fra denne figuren en blanding mellom vann og stein/jord.



Figur 2.1: Klassifisering av skredtyper ut fra forholdet mellom vann, stein/jord og snø/is, figur fra Norem og Sandersen (2011).

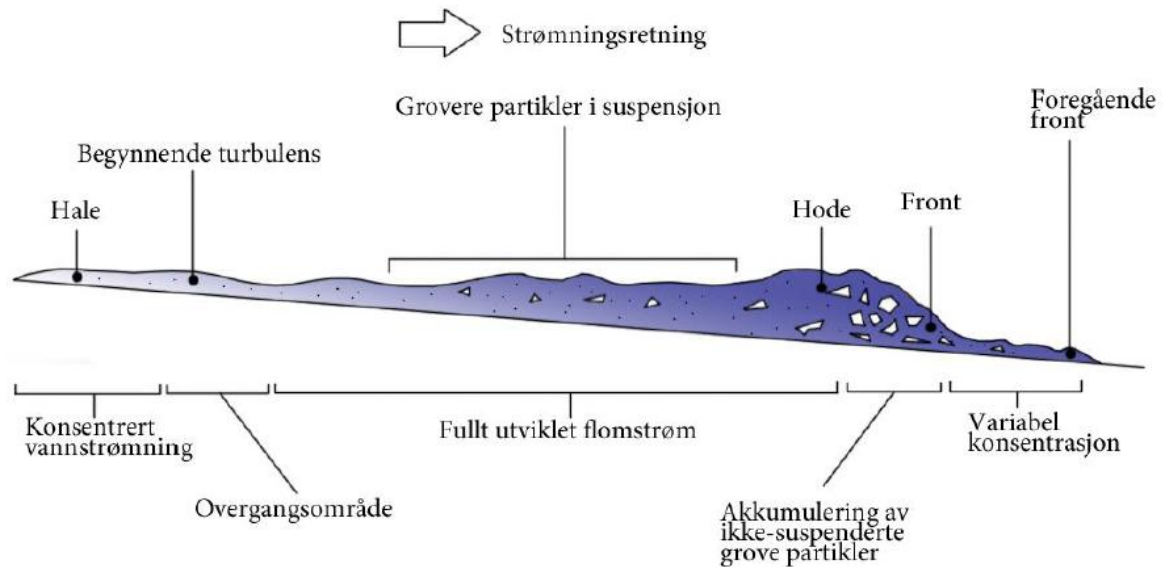
Definisjon fra Norem og Sandersen (2011):

“Flomskred og sørpeskred er en blanding av granulære materialer og vann som beveger seg på grunn av gravitasjon, og hvor blandingen opptrer som et kontinuum. De granulære materialene kan enten være jordmasser eller snø, eller en blanding av disse. Den høye mobiliteten til flomskredene skyldes at det er en begrenset fri distanse mellom partiklene og at porene er fylt med vann.”

Skred kan klassifiseres på mange måter, når det er snakk om flomskred er vanninnholdet av stor betydning for at skredet skal kunne oppnå flyteegenskaper. De granulære materialene utgjør ofte et volumetrisk innhold på 50-70 prosent. Norem & Sandersen (2011), deler opp de vannrelaterte skredene på følgende måte:

- Overflateskred
- Flomskred
- Sørpeskred
- Blandingsskred

I denne oppgaven har jeg valgt å kun se på flomskred da omfanget av oppgaven ellers ville blitt for stort. Takahashi (2007) velger å dele flomskred i tre kategorier, turbulente-, viskøse- og steinrike flomskred, disse blir nærmere beskrevet nedenfor. I tillegg vil mekanismer i flomskred bli beskrevet i kapittel 2.5.



Figur 2.2: Utvikling av flomskred, figur fra Norem og Sandersen (2011)

2.1 Turbulente flomskred

Turbulente flomskred er meget våte skred som oppfører seg på grensen til turbulent vannstrøm. Partiklene blir revet med som følge av turbulensen i vannmassene og skredene opptrer derfor der det finnes store andeler av finstoff i grunnen. Eksempelvis nær breer og områder med vulkansk aske. I følge Takahashi (2007) har skredene av denne typen sjeldent en massetetthet større enn 30 prosent, og det meste av partiklene (75%) har diameter mindre enn 1 mm.

2.2 Steinrike flomskred

Skredmassene for flomskred bærer ofte preg av de utløste massenes karakter. Steinrike flomskred er skred med 10-20 vektprosent finstoff. Større steinmaterialer vil kunne utgjøre 50-70 prosent av vekten og utløsningsmekanismen ligner på grunne overflateskred, men de utløste massene vil erodere større mengder og skredvolumet vil øke. Skredet oppfører seg som viskøse flomskred med de største partiklene foran og på sidene i en bølgefront. Se også Figur 2.2.

2.3 Viskøse flomskred

Viskøse flomskred har større volumetrisk tetthet enn turbulente flomskred, dette medfører mindre fri avstand mellom partiklene og derved mindre bevegelser. I følge Takahashi (2007) har skredene normalt en massetetthet på 1.8-2.3 t/m³. For at skredene skal kunne få denne tettheten er det avgjørende for skredet at det eroderer masser. Dette skjer oftest ved kraftig

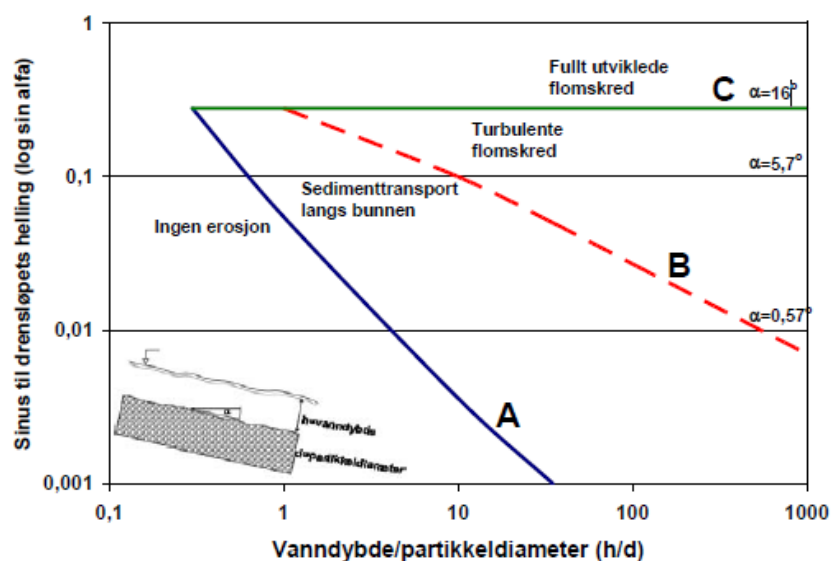
erosjon i elveleiet eller ved initialscred som demmer opp vann, som videre eroderer masser ved et eventuelt dambrudd. Som Figur 2.2 viser, består skredet av en skredfront med større partikler etterfulgt av grove partikler i suspensjon med finstoff og vann. Siste del av skredet vil være på grensen til turbulent på grunn av stor andel finstoff.

2.4 Flomskredenes utløsningsårsaker

I følge Norem og Sandersen (2011) er det i prinsippet to utløsningsmekanismer for flomskred. I hovedsak er dokumenterte flomskred i Norge utløst som følge av vannerosjon, der kreftene fra vannstrømmen overstiger erosjonsmotstanden til underlaget og partikler blir satt i bevegelse. Den andre typen av utløsningsmekanisme er når jord eller snømasser glir ut og denne massen tar opp i seg eller får frigjort vann, noe som vil gi massene tilstrekkelig mobilitet. I følge Takahashi (2007) er det tre årsaker til flomskred: erosjon i naturlige dreisløp (1), naturlige skred med oppbygging av dammer (2) og brudd i naturlige dammer (3). Sammenligner man dette med Norem og Sandersen (2011) er det store likheter, forskjellen ligger i at Norem og Sandersen (2011) definerer brudd i naturlige dammer (3) som vannstrøm som overstiger erosjonsmotstanden til underlaget (1). Jeg velger derfor å forholde meg til Norem og Sandersen (2011) sin inndeling da denne ikke beskriver hvordan vannet oppnår stor nok kraft til erosjon men ser på effekten av erosjonen.

2.4.1 Erosjon som følge av rennende vann

For at vannerosjonen skal være sterk nok til å løsne underliggende masser er det en sammenheng mellom vannhastighet, partikkelstørrelse og helningen på terrenget. Som Figur 2.3 viser vil det ved en helning på over 16° kunne utvikles flomskred uavhengig av partikkelstørrelsen, men man kan også få flomskred utløst i slakere områder under spesielle forhold helt ned i helninger på 10° i følge Hungr, McDougall og Bovis (2005).



Figur 2.3: Kriterier for å få utviklet forskjellige typer massetransport i dreisløp, figur Norem og Sandersen (2012).

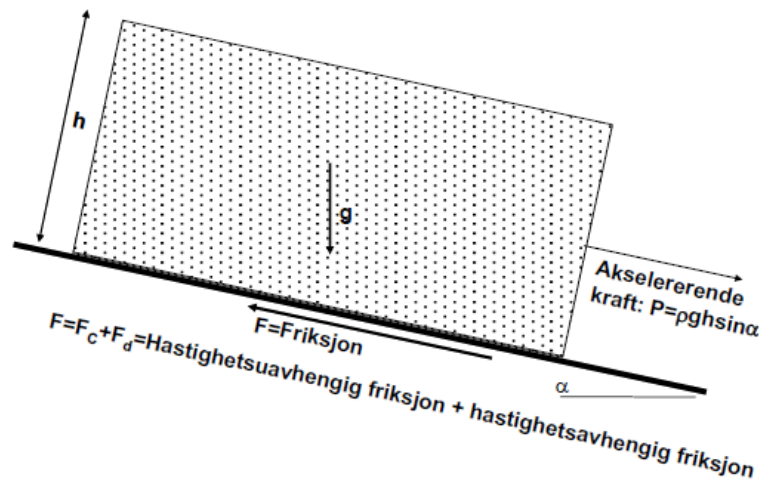
Erosjonsmotstanden i naturlige drensløp består som regel av et relativt sterkt bunnsjikt, men ved flomtopper og tilfeller der vannet finner nye drensløp vil vannet kunne overstige drensløpets skjærfasthet. Dette gjelder også ved brudd på naturlige dammer der vannet vil kunne komme som en kraftig bølge nedover i drensløpet og erodere massene der som følger av de ekstra kreftene i vannstrømmen ved slike tilfeller. I følge Takahashi (2007) vil 27 prosent av naturlige dammer kollapse i løpet av en dag, 56 prosent etter en måned. Dette er statistikk på verdensbasis, men sier noe om hvor utbredt problemet med at vann kan fylles opp i bakkant av dammen og ved dambrudd kan skape store ødeleggelser.

2.4.2 Flomskred initiert av brudd i massene, grunnbrudd

I følge Takahashi (2007) er det to typer overflateskred som oppstår i forbindelse med kraftig nedbør, grunne og dype skred. De grunne skredene er opptil en meter tykke og inneholder mye vann på grunn av mettet sone i den øverste delen av massene og som følger av stor avrenning på overflaten. De dype skredene krever i motsetning til de grunne skredene nedbør over lang tid og økende grunnvannsstand som gjør massene ustabile. I følge Norem og Sandersen (2011) er det en forutsetning for å opprettholde høy grunnvannsstand at det tilføres mer vann inn enn det renner ut. De nevner tre parametere som viktige for tilførsel av vann: Infiltrasjon gjennom øvre lag, infiltrasjon fra bunnen og strømming av grunnvann inn i sedimentene ovenfra eller fra sidene. Wang og Sassa (2003) fant ved hjelp av modellforsøk at det ved grunnbrudd bør være muligheter for at poretrykk bygger seg opp før eventuelt skred kan oppstå. De fant i sine forsøk at poretrykket økte drastisk etter at bruddet oppstod og de mener dette skyldes oppbygging av overporetrykk.

2.5 Krefter i flomskred og viktige parametre

Flomskred er som beskrevet i starten av kapitlet en gravitasjonsdrevet bevegelse av fast masse og vann med en tydelig bølgefront. Flomskred kan utfra terreng variere sine egenskaper nedover i skredbanen som en følge av de akselererende og retarderende kreftene skredet blir utsatt for, se Figur 2.4, Norem og Sandersen (2012) og Iverson (2005). På grunn av disse kompliserte egenskapene er det vanskelig og kunne forstå mekanikken og forutse flomskreds oppførsel.



Figur 2.4: Krefter som virker på skredmasser, figur: Norem og Sandersen (2012).

Ut i fra Figur 2.4 kan man sette opp Newtons første lov som sier: Produktet av masse og akselerasjon er proporsjonal med differansen av de akselererende og retarderende krefter, Norem og Sandersen (2012).

Formel 2.1: Newtons første lov, der volumet dekker et enhetsareal. F er friksjon og P er tyngdekomponenten.

$$ma = \rho h \frac{dv}{dt} = P - F = \rho gh \sin \alpha - (F_c + F_d)$$

Så lenge tyngdekomponenten P er større en friksjonen F vil skredets masser akselerere. Som man kan se består friksjonen av to ledd F_c og F_d , der F_c er friksjon uavhengig av hastigheten og F_d øker ved økt hastighet. Dette er grunnen til at skredene oppnår en terminalhastighet i bratt terreng og uten grunnfriksjonen ville skredene kun stoppet etter at terrenget har blitt flatt eller ved mothellende terreng. Ifølge Norem og Sandersen (2012) kan Formel 2.1 utvides slik at skjærspenningene langs bakken (friksjonen) beskrives med to ledd der det første er uavhengig av hastigheten og det andre er avhengig av hastigheten. Disse er representert med tradisjonell Mohr-Coulomb skjærspenning og hastighetsledd som for væsker.

Formel 2.2: Utvidelse av Newtons første lov, som tar hensyn til hastighets -uavhengig og -avhengig ledd.

$$ma = \rho h \frac{dv}{dt} = P - (F_c + F_d) = \rho gh \sin \alpha - (C + p_e \tan \phi + k \frac{v}{h})$$

P_e er her effektivspenningen, $\tan \phi$ jordmassens friksjonsvinkel, k viskositeten og v/h hastighetsgradienten.

Poretrykket kan variere stort og er ofte en av de faktorene som gjør at flomskred får flyteegenskaper. Ved store poretrykk vil flomskred bevege seg som væsker med stor viskositet. Ser man på det siste leddet i Formel 2.2 som beskriver de viskøse egenskapene til

skredet, ved stor viskositet og høy hastighet i forhold til flythøyden blir dette leddet stort. Dette er en av grunnene til at hastighetene til skredene og flythøyden har betydning for flyteegenskapene til flomskred. Poretrykket er også en viktig parameter som varierer ut fra masser i skredene. Ifølge Wang og Sassa (2003) har innholdet av leirpartikler stor betydning for bevaring av poretrykk. De fant ved forsøk at ved leirinnhold på 30 prosent økte poretrykket slik at massene beholdt seg flytende over mye lengre tid enn kun ved å benytte finsand med $d=0,13$.

En metode som grafisk kan presentere skredhastigheter og energi i skredene på en relativt enkel måte kan gjennomføres ved å benytte Bernoullis likning som sier at summen av potensiell energi, trykkenergi, hastighetsenergi og energitap er likt fra et sted til et annet. Benytter man dette kan man framstille energihøyder H .

Formel 2.3: Bernoullis likning

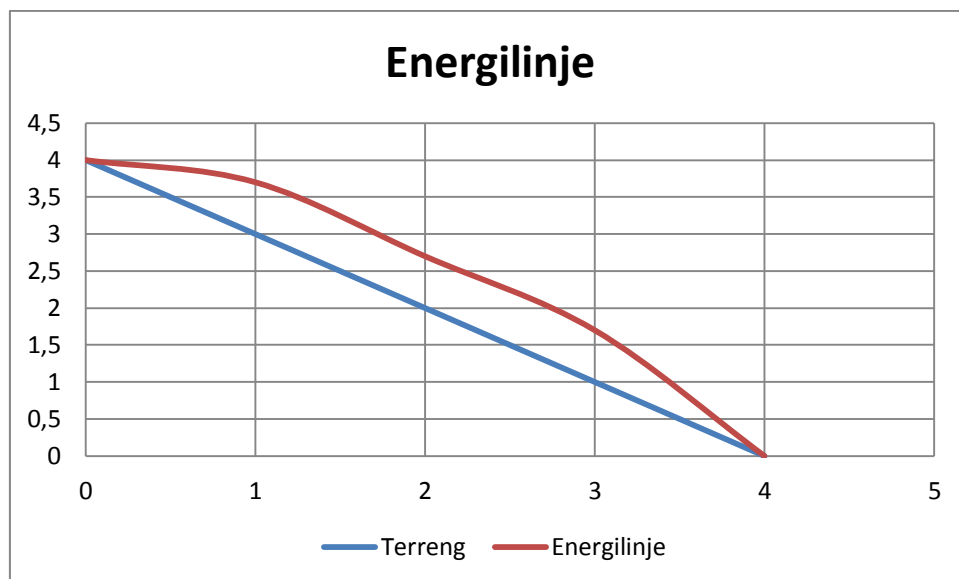
$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Her er z stedshøyden

p/γ = Trykkhøyden som tilsvarer skredets tykkelse h

$v^2/2g$ = hastighetshøyden

Grafisk vil det ved framstilling av energilinjen være en akselererende fase der energilinja er slakere enn terrenget, tilsvarende når skredet stopper opp er energilinja brattere enn terrenget. Når energilinja og terrenget går parallelt er hastigheten konstant, Norem og Sandersen (2012). I Figur 2.5 ser man den akselererende fasen mellom 0 og 1, konstant hastighet er det på skredet mellom 1 og 3 før skredet bremses og får en brattere linje enn terrenget fra 3-4.



Figur 2.5: Eksempel på grafisk framstilling av energilinjen, figur: Espen Fiskum (2012).

Man kan da videre ifølge Brateng (2005) regne ut effekten av ulike sikringstiltak gjennom å finne differansen i energihøyden H for ulike skred eller sikringstiltak. Dette kan gjøres fordi energilinja ligger tilnærmet konstant ved ulike terrengtiltak. I denne oppgaven vil dette gjelde sikringstiltak ettersom modellen ellers er identisk fra forsøk til forsøk. Effekten kan regnes ut fra følgende formel:

Formel 2.4: Effektberegning

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{\Delta X}{X_t}$$

ΔH = Endring i energihøyde

H_t = Total energihøyde, uten tiltak (referansetestene)

ΔX = Endring i utløpslengde uten tiltak og utløpslengde med tiltak

X_t = Maksimal utløpslengde uten tiltak, altså referansetestene.

For å kunne analysere flomskred i matematiske modeller er det en rekke faktorer som må være vurdert om resultatene skal bli best mulige. I følge Iverson og Denlinger (2001) og Carrol et al (2007) er disse de viktigste parameterne å vurdere og som inngår i de fleste beregningsmodeller:

- Friksjonsvinkel φ_{int} φ_{bed} (grader)
- **Fast volum andel v_s**
- **Væske volum andel v_f**
- Fast densitet ρ_s (kg/m^3)
- Væske densitet ρ_f (kg/m^3)
- Væskens viskositet μ (Pa-s)
- **Karakteristisk korn diameter δ (m)**
- Blandingens densitet ρ (kg/m^3)
- Indre permeabilitet K (m^2)
- Hydraulisk diffusivitet D (m^2/s)
- Strømmens skjærforhold γ ($1/\text{s}$)
- **Strømmens tykkelse H (m)**
- **Strømmens lengde L (m)**
- **Gravitasjonen g (m/s^2)**

I enklere modeller for beregning av flytlengde benyttes i hovedsak de parametre som ovenfor er uthevet, Norem og Sandersen (2012). I mine forøk er det også disse uthevede parametre som benyttes til å kunne analysere skredet. Ettersom måling av poretrykket ville krevd mer avansert utstyr enn hva jeg hadde tilgjengelig ved testingen er det ikke sett på korndiameterens effekt og poretrykkets betydning. En slik beregning er mulig og gjøre, men med de rammer som er gitt for denne masteroppgaven har det ikke vært tid til å sette seg inn i slike programmer og dette er heller ikke ansett som nødvendig for å kunne evaluere sikringstiltak i modellforsøk.

3 Beskrivelse av sikringsmidler

Det finnes en rekke ulike sikringsmidler som benyttes for å redusere skadeomfanget av flomskred. Generelt for de fleste er at de forsøker å redusere den totale energien i skredet eller å lede flomskredet bort fra bebyggelse og infrastruktur. Ved etablering av sikringstiltak vil det være viktig å se på skredets egenskaper og sikringens virkemåte for å få til et sikringstiltak som fungerer best mulig til ønsket formål. Dette kapittelet tar for seg forskjellige enkeltstående sikringstiltak i skredløpet og utløpsområdet. I faglitteraturen er det ikke nevnt spesielt mye om tester med kombinasjoner av sikringstiltak fordi om dette benyttes mye som funksjonelle kjeder i virkeligheten. Sikringstiltak i kjeder benyttes fordi enkelt tiltak sjeldent klarer å motstå kreftene av flomskred alene, Huebl og Fiebiger (2005). Jeg har ikke skrevet noe om sikringstiltak som har som formål å forhindre erosjon i og langs skredløpet ettersom dette ikke vil bli testet ut i denne oppgaven.

3.1 Bremseskjegler

I forbindelse med flomskred er det ikke skrevet spesielt mye om bruken og dimensjoneringen av bremseskjegler. Jeg har derfor valgt å se på bremseskjeglene i forhold til snøskred og hvordan de dimensjoneres der. Det vil være naturlig i den forbindelse se hvordan bremseskjegler benyttes som sikringsmidler ved sørpeskred da disse ligner mer flomskred enn tørrsnø skred. Jeg har også støttet meg litt på litteratur fra hydrodynamikk hvor små dammer brukes for å redusere hastigheten til vannet.

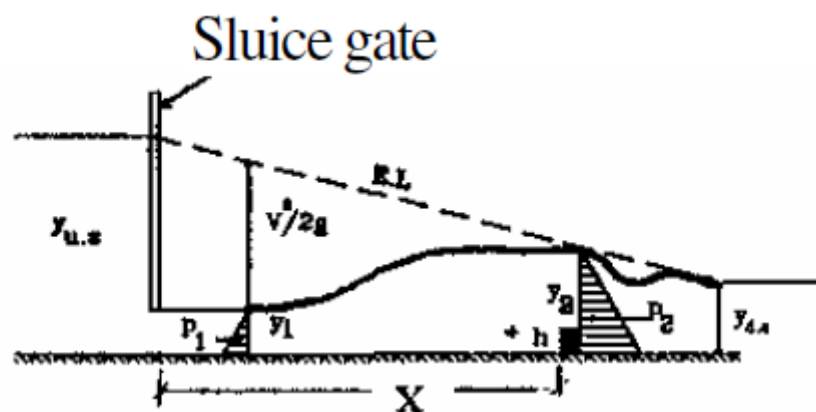
Jóhannesson et al. (2009) nevner disse parameterne som viktige i forbindelse med bygging av bremseskjegler: Bremseskjeglene bør være 2-3 ganger høyden av skredets tykkeste parti. A_{oppside} bør være på 60° eller mer for effektivt å kunne redusere hastigheten på skredet, dette er funnet ved hjelp av forsøk gjennomført med glassperler i modell, noe som tilsvarer tørrsnø. Disse resultatene var også noe Hákonardóttir et al. (2001) og Brateng (2005) fant fram til ved laboratorieforsøk med ulike størrelser på modellene. I tillegg beskriver Hákonardóttir et al. at høyde/bredde forholdet bør være tilnærmet lik 1. I følge Brateng (2005) bør lysåpningen mellom kjeglene være så små som mulige, Brateng fikk maksimal effekt av kjeglene med en tetthet på 0,7-0,8.

Hákonardóttir et al. (2001) fant at effekten av bremseskjeglene ga omtrent 30 prosent reduksjon i utglidningen nedstrøms bremseskjeglene. Ved bruk av to rader med bremseskjegler oppnådde man ikke like god sikring som forventet, men reduksjonen i utglidningen ble opptil 50 prosent. I følge Brateng (2005) var effekten av bremseskjegler plassert langt oppe i skredet større enn hva Hákonardóttir beviste, Brateng fikk en effekt på cirka 40 prosent. Brateng mente også stor vinkel i front og sidene skapte størst mulig turbulent strøm og reduserte energien i skredet ettersom massene da ble kastet opp i størst grad, se Figur 3.1



Figur 3.1: Kast masser i forbindelse med testing av kjepler og tørrsnøskred, foto: Brateng (2005).

Rageh (1999) gjennomførte tester ved hjelp av avledningsskjermer med vann, se Figur 3.2. Han benyttet vannstrøm og regulerte avstanden x til avledningsskjermer. Han fant ved disse testene at vannet fikk redusert kreftene med opptil 25 prosent. Størst effekt hadde han ved avledningsskjermer nærmest utløpet der man har jetstrøm og størst kraft, altså ved minst mulig avstand x . Denne effekten vil ikke være lik ved flomskred som følger av jetstrømmen, men viser at men vil ha en reduserende effekt ved bruk av bremsekjepler i forbindelse med flomskred.



Figur 3.2: Avledningsskjem vannkraft, prinsippkisse av Rageh (1999).

3.2 Kontrolldammer

Kontrolldammer finnes i mange ulike fasonger og typer, det er normalt og dele de inn i åpne og lukkede kontrolldammer. Jeg har valgt å beskrive de to ulike hovedtypene først, for deretter å se på hvilken type som jeg finner mest hensiktsmessig å teste ut i min modell.

3.2.1 Lukkede kontrolldammer

Lukkede kontrolldammer bygges på tvers av skredbanen som en konvensjonell dam. IRASMOS (2008) beskriver lukkede kontrolldammer ved at de fylles opp i bakkant for å redusere gradienten til kanalen/skredbanen. Ettersom kontrolldammen er med på å redusere gradienten til skredløpet, reduseres også strømningshastigheten noe som igjen bidrar til redusert erosjonskapasitet og den granulære konsentrasjonen i flommen. I følge Norem og Sandersen (2011) kan lukkede kontrolldammer ofte bygges uten å fylles opp i bakkant, de vil da kunne fungere som dammer i starten til de er fylte. Man må i slike tilfeller dimensjonere for et eventuelt skredtrykk før dammen er ferdig oppfylt. Dette skredtrykket vil avhenge av tettheten til massene og kredvolumet etter Formel 3.1.

Formel 3.1: Dimensjonering av skredtrykk dersom bakkant dam ikke er fylt med masser, Norem og Sandersen (2011).

$$\rho_{flomskred} = 3 * \rho_s * v^2$$

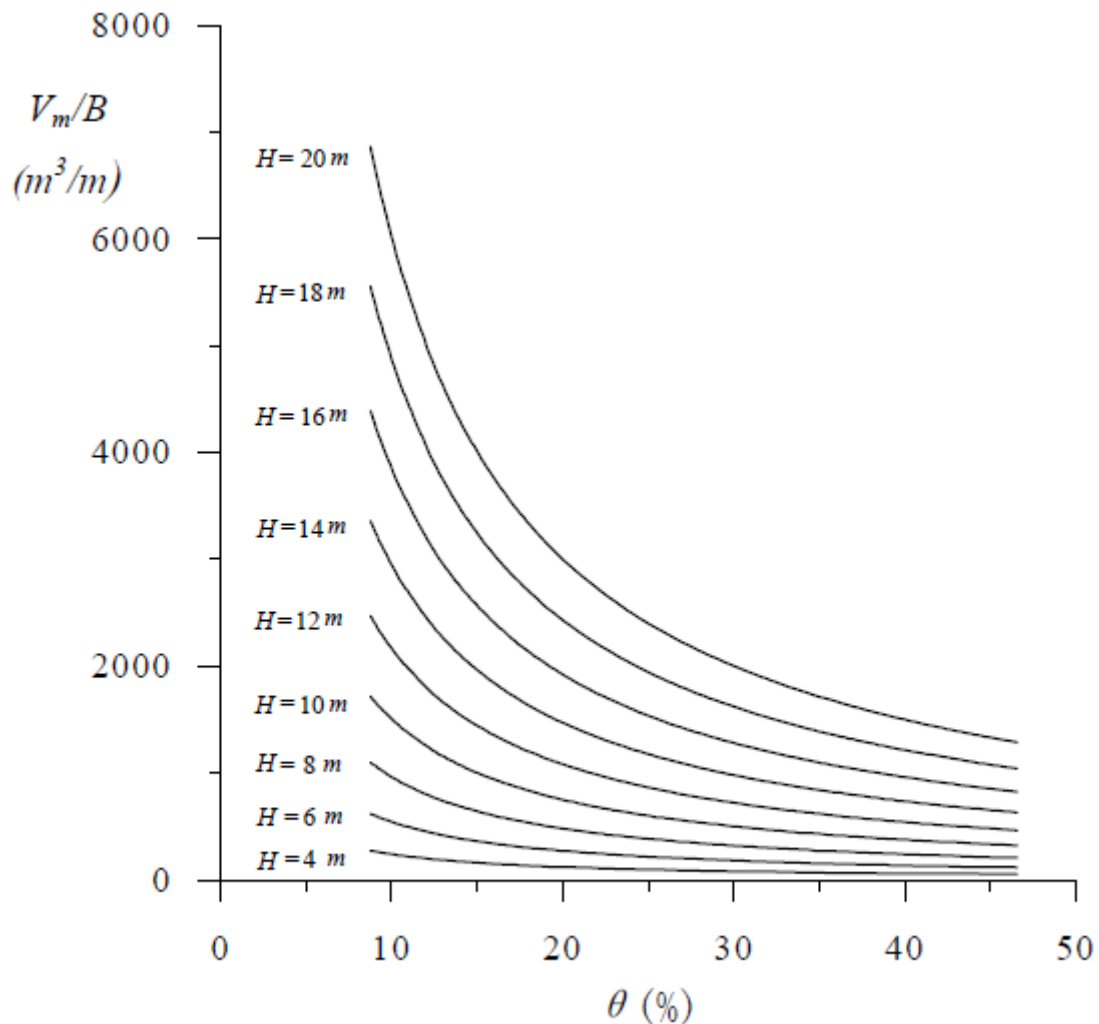
Der ρ_s er tettheten til skredmassene og v^2 er hastigheten til skredet.



Figur 3.3: Lukkede kontrolldammer i funksjonell kjede (figur - IRASMOS, 2008).

Som regel bygges lukkede kontrolldammer med en høyde på 3-5 meter, men det finnes tilfeller på dammer opp til 15 meters høyde. Det er viktig å erosjonssikre foten av kontrolldammer, man bør også passe spesielt på eventuelle strømninger under foten av fundamentet og erosjon langs sidene av kanalen nedstrøms dammen. Volumet en kontrolldam kan romme kan bergenes ut ifra terreng og damhøyde, men Figur 3.4 av Lien

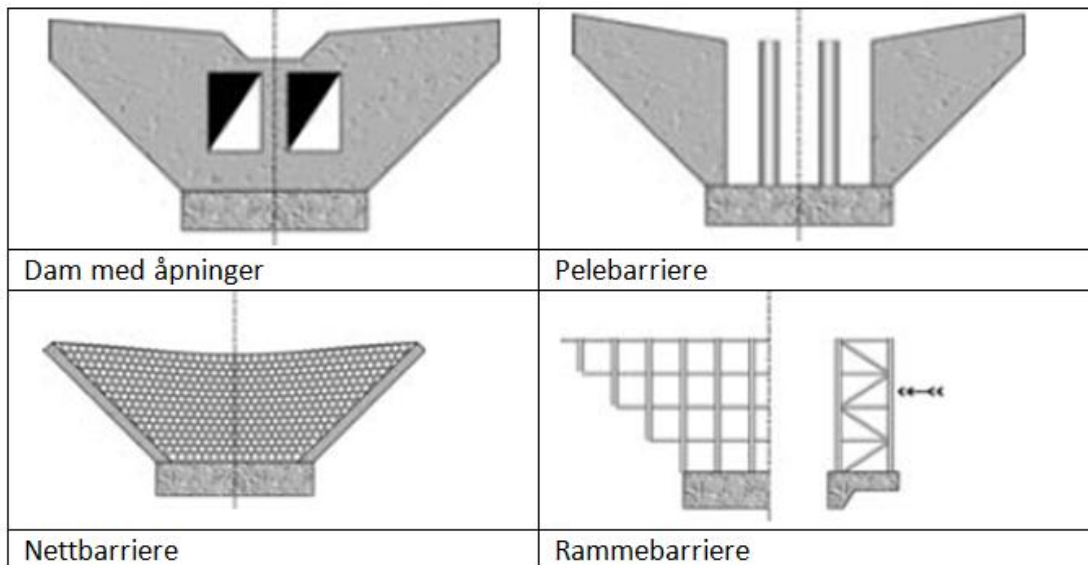
kan raskt gi et estimat av forventet volum dammen kan holde tilbake. V_m er maks lagringsvolum oppstrøms kontrolldammen, B er kanalbredde og H er damhøyden.



Figur 3.4: Skredvolum som lukket kontrolldam kan holde tilbake ut ifra kanal bredde B og skråningvinkel θ , figur: Lien (2003).

3.2.2 Åpne kontrolldammer

Åpne kontrolldammer er relativt like som lukkede kontrolldammer, men i Norge omtales også åpne barrierer som åpne kontrolldammer Sellevold (2010). Åpne kontrolldammer er ikke bygget for å stoppe hele skredet. I følge Norem og Sandersen (2011) er målet med åpne kontrolldammer å redusere mengde masser i skredet, hastigheten til skredmassene og å redusere flomtopper og maksimal massetransport. Dammene konstrueres for å holde igjen de grove massene, mens vannet og de finkornede massene skal kunne slippe gjennom dammen. På denne måten kan dammene bygges mindre og fortsatt fungere meget godt sammenlignet med lukkede kontrolldammer, Okubo, Ikeya, Ishikawa og Yamada (1997).



Figur 3.5: Ulike typer åpne kontrolldammer, figurer fra Jakob og Hungr (2005).

Som man kan se av Figur 3.5 er det store variasjoner i åpne kontrolldammers design. Ettersom det finnes et så vidt spekter av åpne kontrolldammer beskriver jeg her generell utforming og hvilke hensyn man bør tenke på i forbindelse med utbygging av åpne kontrolldammer.

Dammene må konstrueres utfra stedlige masser Enkelte tiltak som ringnett vil i liten eller ingen grad påvirke strømningsforholdene i elve- eller bekkeløpet, dette vil derfor ofte være hensiktsmessig å benyttes her. Ulempen er at ringnett har liten kapasitet i forhold til større og mer krevende installasjoner slik som dammer med åpninger, (oppe til venstre i Figur 3.5). En mellomting vil være ulike typer av peler og rammer. Hva man skal velge vil i stor grad avhenge av antatt volum og hastighet til massene ved sikringstiltaket. I følge Norem og Sandersen (2011) bør en ved dimensjonering fastlegge følgende verdier:

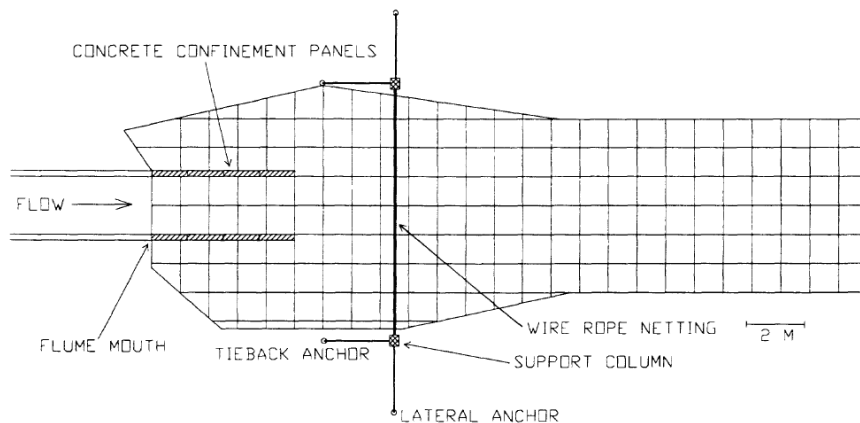
- Høyden på vollene
- Bredden på åpningen
- Utforming av gitterkonstruksjonen
- Utforming av arealet oppstrøms for kontrolldammen
- Behov for eventuelt ristesystem for å holde igjen trær og vegetasjon.

Etter en skredhendelse vil ikke sikringstiltaket lengre ha tilfredsstillende sikkerhet da masser vil legge seg opp både oppstrøms og nedstrøms for dammen og redusere effekten. Det er derfor viktig og tilrettelegge for maskinell tilgang slik at skredmasser kan fjernes jevnlig.

3.3 Nett og gitterkonstruksjoner

Ringnett er, som tidligere beskrevet, en form for åpen kontrolldam. Denne typen sikringsmiddel er her beskrevet i mer detalj. Det er tidligere utført tester av ringnett, United States Geological Survey (USGS) gjennomførte i 1996 (Iverson et. al 1999) tester ved USGS flomrenne. De testet ulike sammensetninger av nett og deres effekt som sikringsmiddel.

Oppsettet av forsøket kan sees av Figur 3.6, høyden på nettet var 2,4 meter og bredden 9,1 meter. De ulike nettypene kan sees av Tabell 3.1. Nettene var festet ved hjelp av kabler.



Figur 3.6: Skjematisk plan over utløpsområdet og nett plasseringen, Iverson et al. (1999)

Test nr:	Hovednett	Nettingtype	Silt duk
1	Kvadratisk netting 30x30 cm	kvadratisk 5,1 cm	
2 og 3	Kvadratisk netting 20x20 cm	Kvadratisk 5,0 cm	
4 og 5	Kvadratisk netting 15x15 cm	kvadratisk 5,0 cm	hønsenetting
6	Ringnett d=30 cm	kvadratisk 5,0 cm	silt duk

Tabell 3.1: Oversikt over ulike nettyper benyttet i forsøkene.

Dataene fra forsøkene kunne vise at nettene forskjøv seg mellom 0,2-2 meter. De nettene som ble benyttet i forsøk 4, 5 og 6 viste seg å fungere best i forhold til å holde igjen massene. Dette gjør at Iverson et al (1999) mener nettene vil fungere bra som sikringsmiddel av mindre flomskred. Nettene har vist seg vanskelige og renses etter en skredhendelse, men ettersom nettene er relativt enkle og installere blir de ofte fjernet og området renses før nye nett settes inn.

Det benyttes også ulike typer for gitterkonstruksjoner. I Japan har det de siste årene blitt lagt større vekt på dette ettersom de har hatt problemer med spaltdammer ved noen tilfeller (Mizuyama 2008). Ved bruk av gitterkonstruksjoner bør enkle rammekonstruksjoner ikke benyttes fordi disse har vist seg krevende å renses etter en skredhendelse, dette til tross for at de er meget effektive for å stoppe skredene (Norem og Sandersen, 2012). Det vil være bedre å benytte enkle gitterkonstruksjoner med lysåpning opptil 1,5 ganger større enn D_{max} , disse vil være enklere og renses.

3.4 Voller

Voller kan benyttes på to ulike måter; enten som ledevoller eller som sikringsvoller/stoppvoller. Det sistnevnte er tilnærmet det samme som lukkede kontrolldammer, men her vil ikke vannet og massene bli samlet opp på samme måte, her er bare målet og redusere hastigheten til massene og lede skredet til ønsket plass. Ledevoller bør etter erfaringer fra forsøk utført av Brateng (2005) og Hákonardóttir et al. (2001) utføres med så liten vinkel som mulig ($<15-25^\circ$) mellom skredet og vollen, dette for å hindre skredmassene i å flyte over vollen. Vollen bør ha så bratt vinkel inn mot skredet som mulig og høyden bør være cirka 5 meter. I følge Norem og Sandersen (2012) er det utført få tester med voller i forbindelse med flomskred, så man vet i liten grad hvordan man skal dimensjonere vollen for de avsetninger av skredmasser som kommer mot vollen. Hiller og Jenssen (2009) testet effekten av ledevoller inn under bruløp, deres konklusjon er at vinkelen på vollen bør være så liten som mulig for å redusere oppskyllingshøyden.

4 Modellover

I følge Norem (2010) skal man ved gjennomføring av modellforsøk oppnå konstant forhold mellom:

- Geometri
- Hastighet
- Spenning

De viktigste parameterne for flomskred er hastighet, utglidingslengde, flythøyde og volum i nevnte rekkefølge, se også kapittel 2.5.

Froudetallet er avgjørende i skred der gravitasjonskrefter er den viktigste kraften og kreftene skal være det samme uavhengig av modellskala, Steen (2011) og Peakall, Ashwortg og Best (1996). Ved hjelp av Froudetallet kan man finne en rekke fysiske parametere så lenge geometriske, kinematiske og dynamiske likheter er oppnådd mellom natur og modell. Geometrisk likhet vil si at alle lineære dimensjoner er redusert med samme faktor. Kinematisk likhet har man når forholdet mellom hastigheten og akselerasjon holdes konstant. Dynamisk likhet vil si at alle krefter i bestemte punkt i modellen og naturen har samme forhold til hverandre, Brateng (2005). Utledning av formlene nedenfor bygger på Aage (2003) Norem (2010) og Brateng (2005). Jeg har i tillegg nedenfor hver formel vist normale verdier for flomskred og hva man ut fra dette bør oppnå i modellen når forsøk gjennomføres.

Formel 4.1: Froudetall, benyttes i Froudes modell lover.

$$Fr = \frac{v^2}{g * h}$$

Fr = Froudetall

v = Fart [m/s]

g = Gravitasjonskonstant [m/s^2]

h = Høyden på skredstrømmen [m]

Formel 4.2: Målestokk forholdet mellom modell og natur

$$Lm = \frac{Skala\ natur}{Skala\ modell} = \frac{1}{20}$$

Lm = målestokk forholdet

Froudetallet bør holdes så likt som mulig uavhengig av modellstørrelse og derved kan man utlede en rekke andre parametere ut fra dette kravet. Det er kravet til geometrisk, kinematisk og dynamisk likheter som gjør dette. Hvis man antar at gravitasjonen g er lik for

modell og virkelighet, må alle andre akselerasjoner skaleres likt. Derved kan man utlede de kommende formler.

Formel 4.3: Hastighets sammenheng mellom modell og natur

$$\frac{v_{modell}}{v_{natur}} = \sqrt{Lm} \rightarrow v_{modell} = v_{natur} * \sqrt{\frac{1}{20}}$$

$$V_{natur} = 5-10 \text{ m/s} \rightarrow V_{maks \ modell} = 10 * \sqrt{\frac{1}{20}} = 2,24$$

Formel 4.4: Flythøyde sammenheng

$$h_{modell} = h_{natur} * Lm$$

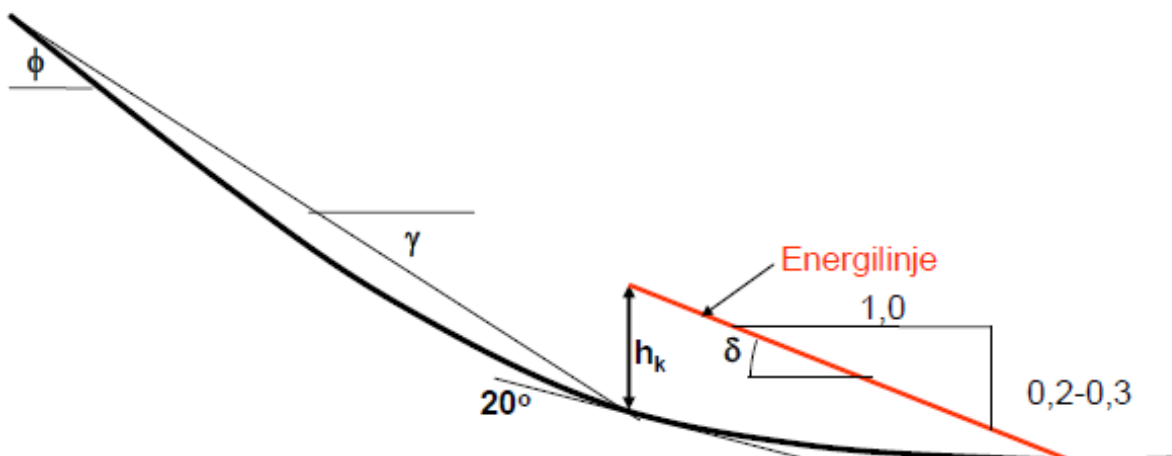
$$h_{natur} = 1 \text{ meter (opptil 3 meter ved store skred)} \rightarrow h_{modell} = 1000 * (1/20) = 50 \text{ mm}$$

Formel 4.5: Volum sammenheng:

$$V = h/Lm^3$$

Volumet varierer stort, her benyttes verdi for totalt volum som benyttes i modellen.

$$V_{modell} = h_{modell} / (Lm_{modell}^3) \rightarrow 0,05 * 20^3 = 400 \text{ m}^3$$



Figur 4.1: Figur av energilinjen og hvordan flytlengden kan regnes ut fra denne, Norem og Sandersen (2012).

Energilinja i Figur 4.1 er en enkel metode for å kunne beregne utløpsdistansen til skred. Energilinja bør i følge Norem og Sandersen (2012) ha en stigning på 1:3 – 1:5 fra 20° punktet, blir energilinja i nærheten av dette i modellen som blir benyttet i denne oppgaven er massene gunstige å teste videre i forbindelse med sikringstiltakene.

5 Forsøksoppsett og gjennomføring

I forbindelse med de forsøkene jeg gjennomførte i prosjektoppgaven (Fiskum, 2011), er det en del faktorer som det vil være behov for å se nærmere på i starten av modellforsøkene. Jeg velger derfor å dele forsøksplanen i to deler;

- Innledende tester (test 1-5)
- Hoveddel (test 6-32)
 - Referansetester (test 6-12)
 - Forsøk på sikringstiltak (test 13-32)

I de innledende testene undersøktes ulike masser og deres betydning for flytlengder og hastigheter. Underveis i de innledende forsøkene hadde jeg en del utfordringer som er valgt beskrevet relativt nøye i starten av dette kapitlet, dette slik at man ved eventuelle senere forsøk skal kunne slippe å gå i noen av de samme feilene/utfordringene som jeg gjorde. Som en konklusjon av de innledende testene gjennomføres hoveddelen med referansetester og forsøk på sikringstiltak, resultatene av disse testene presenteres i kapittel 0. Av testene vil sikringstiltakene og deres betydning vektlegges mest ettersom litteratursøkene avdekket at det finnes lite dokumentasjon på gjennomførte tester og effekten av ulike sikringstiltak. Statens vegvesen var også mest interessert i denne delen av oppgaven, de ønsket derfor at jeg ikke vektla de innledende testene for mye tid.

5.1 Modellen

Modellen som benyttes i forsøkene er basert på modellen av Hiller og Jenssen (2009). Figur 5.1 viser opprinnelig modell og består av en øvre renne med 25° helning og nedstrøms et forsøksområde med hellings 11,3°. Modellen er bygget i målestokk på omtrent 1:20 og er en prinsippmodell som skal gi generell kunnskap om utformingen av bruer og ledevoller, Hiller og Jenssen (2009).

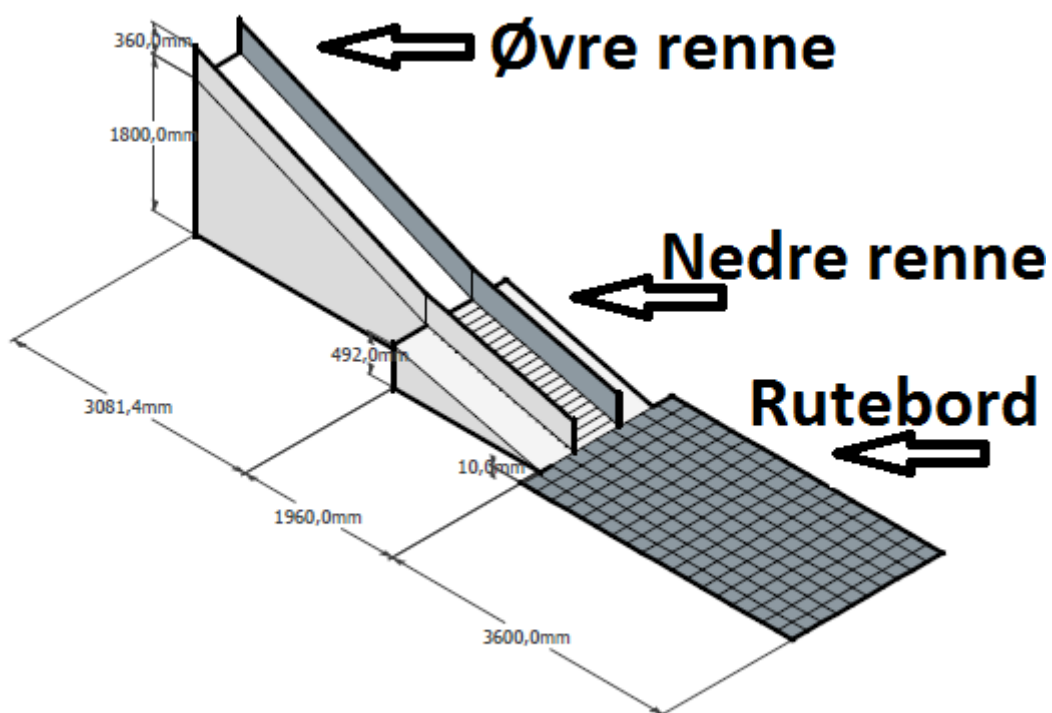


Figur 5.1: Oversikt modell før utbygging, foto: Hiller og Jenssen (2009)

Testingen blir gjennomført ved at massen slippes fra kasse A, nedstrøms modellen står kasse B, den samler opp alt vann og masse fra skredet som sklir ut over modellen. Etter at skredet har stoppes samles all masse i kasse B og kassene er nå klare til å bytte posisjon slik at kasse B står øverst og kasse A nedstrøms modellen for å samle opp massene fra det nye skredet.

For testing av ulike sikringsmidler viste de forsøkene som ble gjennomført i prosjektoppgaven, (Fiskum 2011), at modellen ikke er tilstrekkelig for å kunne se effekten av ulike sikringsmidler. Det ble dermed tidlig klart at modellen måtte bygges ut. Utbyggingen har tatt hensyn til modellovene i kapitel 0 og fortsatt benyttet en målestokk på cirka 1:20. I forhold til utglidningslengde er det valgt å ta hensyn til energilinje prinsippet til Norem og Sandersen (2012) som sier at utglidningen bør ha et stigningstall på 1:3-1:5. Dette gir en utglidningsdistanse på opptil 3 meter. Modellen blir derfor valgt utbygget med et tilnærmet flatt parti med lengde på 3,6 meter og bredde på 2 meter.

For at vannet skal renne ned til kassen i bunnen av modellen er det flate partiet bygget med et fall på 10 cm fra øvre til nedre del og det bygges kanter på sidene slik at vannet ikke kan renne ut der. Det flate partiet lages med 20x20 cm ruter for enkelt å kunne finne skredets utbredelse. Nedenfor følger skisse og bilde av modellen.



Figur 5.2: Skisse av modell, målestokk 1:100, figur: Espen Fiskum (2012)



Figur 5.3: Bilde av modellen etter utbyggingen, foto: Espen Fiskum (2012)

5.2 Innledende tester av ulike masser og flytlengder

De innledende testene gjennomføres for å kunne se hvordan ulike masser påvirker flyteegenskapene til flomskred. Det er gjennomført en del forsøk på dette tidligere. Blant annet gjennomførte Myles og Parkin (2008) forsøk der de undersøkte avsatte skredmasser fra Mt. Thomas flomskred avsetninger i Nord Canterbury på New Zealand. De fant ut at større andel av finstoff ($< 150 \mu\text{m}$) vil gi en lengre avsetning, altså at flomskredet flyter lettere. Lignende resultat ble også funnet av Wang og Sassa (2003) da de gjennomførte forsøk med ulik kornfordeling i en renne som ble dusjet med vann inntil brudd oppsto. De så på poretrykkets betydning og fant at det oppstod lavere poretrykk i de grovere massene som en følge av større mulighet for drenering. Ved større innhold av fine partikler fra 10 til 30 prosent økte makshastigheten i massene.

I følge Norem og Sandersen (2011) er de fleste dokumenterte flomskred i Norge av typen der vannstrømmer overstiger erosjonsmotstanden til underlaget slik at partikler blir satt i bevegelse. Dette medfører at de fleste flomskred i Norge har stort vanninnhold. På grunn av dette har jeg derfor i de innledende testene valgt å benytte et fast vanninnhold på cirka 40 volum prosent, altså 20 kg ved total masse på 100 kg. Dette innebærer fullstendig mettede masser og gir en Cv på 0,6 ved 20 kg vann og 80 kg masse.

I første omgang vil det være interessant å se på utløpsdistanser i forhold til ulike masser og vanninnhold. Her kan det gjøres uendelig mange variasjoner i forhold til testene, men det mest interessante vil nok være å se på hvordan ulik kornfordeling på massene påvirker flyteegenskapene. Det planlegges derfor å se nærmere på massene jeg benyttet i prosjektoppgaven (Fiskum, 2011) samt også å benytte finsand som planlagt i nevnte prosjektoppgave, men som da ikke ble gjennomført. I tillegg vil det være spennende å se nærmere på hvordan større masser grov grus/pukk vil oppføre seg sammen med finstoffet i skredet. I første innledende test sendes kun finsand, da det vil være sannsynlig at denne har størst flytlengde på grunn av økt oppbygging av poretrykk i følge Wang og Sassa (2003).

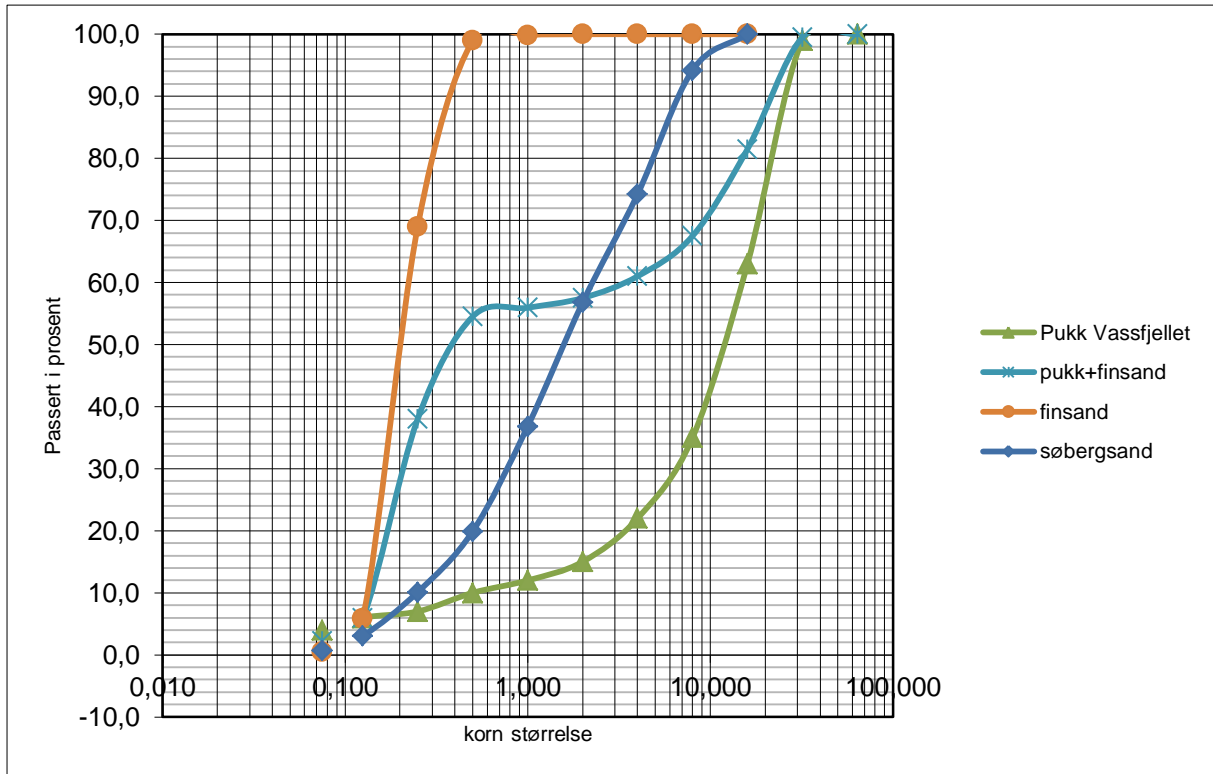
Om det viser seg at finstoffet får en flytlengde lengre enn modellens lengde bør vannivået reduseres, da dette vil påvirke flytlengden mye. I følge modellovene kapittel 0 bør ikke makshastigheten overstige 2,24 m/s:

$$V_{\text{maks modell}} = 10/\sqrt{20} = 2,24 \text{ m/s}$$

Det kunne også vært spennende å se på andre medium enn vann, for å undersøke hva tettheten har å si for massene, men for at den innledende delen ikke skal bli for omfattende, velger jeg og ikke se nærmere på dette. Det vil være viktigere å benytte tiden til å se på ulike sikringstiltak og deres utforming for best mulig å kunne stoppe eller lede skredene trygt forbi faresoner som infrastruktur og bosetninger. Carroll, Edwards og Jackson (2007) fant ved modellforsøk der de økte viskositeten til 170 mPa. s at de ikke kunne oppnå partikkelsorteringen, noe som de mente karakteriserer flomskred i felten. Som følge av dette mener Carroll, Edwards og Jackson at flomskredtester bør unngå bruk av høye viskositeter.

Derfor velger jeg å ikke se mer på dette i denne oppgaven, da dette i seg selv kunne vært tema stort nok til egen masteroppgave.

De ulike kornstørrelser som planlegges benyttes i de innledende testene er som Figur 5.4 viser av varierende størrelse.



Figur 5.4: Kornfordeling for forsøk med utglidningslengder, Fiskum (2012).

Som man kan se av Tabell 5.1 gjennomføres hvert oppsett 3 ganger, dette for å kunne utelukke eventuelle mislykkede forsøk og verifisere resultatene bedre. Ved kun et forsøk er det umulig å si om dette gir rett resultat eller ikke, med 2 kan man være sikrere, men dersom resultatene spriker er det vanskelig å si noe om hvilket som skal antas å være korrekt. Med 3 forsøk vil man kunne få bedre statistikk til å vurdere resultatene. Flere forsøk kunne vært gjennomført, men for å kunne få testet så mange sikringstiltak som mulig er det valgt å ikke teste flere ganger enn 3 pr tiltak.

Forsøk nr.	Pukk [kg]	Søbergsand [kg]	Finsand [kg]	Vann [kg]	Totalt [kg]
1-3			80	20	100
4-6		80		20	100
7-9	40		40	20	100
10-12	80	?	80	40	200

Tabell 5.1: Oversikt over variasjoner av masser, Fiskum (2012).

For å vite litt hvilke resultater som er ønskelige å oppnå i de innledende tester er Tabell 5.2 utarbeidet. Tabellen sier i følge Norem og Sandersen (2012) noe om hvilke verdier som er

beskrevet å være normale verdier for flomskred. Verdiene er deretter beregnet ut fra modellovene i kapitel 0. På bakgrunn av erfaringene i prosjektoppgaven til Fiskum (2011) er også verdier som kan forventes i modellen notert i siste kolonne, dette for enklere å kunne vurdere resultatene og eventuelt gjøre justeringer.

	Natur	formel	bør oppnå i modell	forventes oppnådd i modell	
Hastighet v [m/s]	5-10 (-15)	Formel 4.3	1,12-2,24 (-3,35)	2-3	litt høyt
Flyte høyde [m]	1-2 (-3)	Formel 4.4	0,05-0,1 (-0,15)	0,03-0,07	litt lavt
Volum [m ³]	5000-30000	Formel 4.5	5000-30000	240-560	lavt

Tabell 5.2: Ønskede og forventede resultater for innledende tester, Fiskum (2012).

5.2.1 Resultater innledende tester

Ved tester med finsand oppsto det uventede problemer; bare vannet og beskjedne mengder masse fulgte med ut fra kassen. Finsanden stod med en helning på over 90 grader inne i kassen, dette til tross for omrøring helt til luken ble åpnet. Det var overraskende at sanden satte seg så fort og at vannet kunne renne ut fra massene så hurtig. Det virket som om sanden fikk større kohesive krefter ved tilførsel av vann. Sanden som ble benyttet er strandsand og man har også sett dette ved strender at sanden står med en vinkel på tilnærmet 90 grader. Ettersom massene ikke ville gli ut av kassen ble det forsøkt med økt mengde vann (5 kg), uten at dette ga noen nevneverdig bedre effekt. Det ble så økt med enda 5 kg uten noen større effekt, noe mer masse fulgte med nedover i skredet, men fortsatt ble det meste av massen liggende igjen oppe i kassen.

5.2.2 Nye innledende tester

Som en følge av de mislykkede forsøkene med finsand, presenteres her nytt testoppsett der testingen baserer seg på grunnlaget fra prosjektoppgaven til Fiskum høsten 2011. Vannmengden som ble brukt i forbindelse med prosjektoppgaven var noe høyt, og ble redusert noe i disse nye testene, ellers er massene de samme, altså Sjøbergsand. For å sjekke effekten av finsand blandes den sammen med Sjøbergsand for å se om utløpsdistansen lar seg påvirket av finere kornfordeling, forsøksserie 2 Tabell 5.3.

Jeg antar at med 1/5 finsand vil man ikke få de samme problemene som ved kun å benytte finsand, håpet er at massene med tilsatt finsand skal skli lengre enn ved bare å benytte Sjøbergsand. Endring i massene gjøres ved å spa ut sand og vann med total vekt på 20 kg fra forsøksserie 1. Etter å ha tilsatt finsand og sett på effekten av dette tilsettes også pukk for å se på effekten av grovere sammensetning i massene. Planen er å tilsette 16 kg pukk i blandingen og 4 liter ekstra med vann (forsøksserie 3). Om pukken gir lite utslag vil det være aktuelt å tilsette enda 16 kg pukk og 4 kg vann ekstra og se på effekten (forsøksserie 4). Et problem i forbindelse med disse oppskaleringene av masser vil være å finne forskjellen på økt mengde masser og effekten av ulike kornfordelinger. Derfor vil jeg også i forsøksserie 5 øke massene for å se på effekten av dette. Da økes massene med det doble i forhold til

forsøksserie 3 og forhåpentligvis vil dette gi en pekepinn på hvordan økingen av massene påvirker utløpsdistansen.

Test-serie nr.	Test nr.	Pukk [kg]	Søbergsand [kg]	Finsand [kg]	Vann [kg]	Totalt [kg]
1	1-3		80		20	100
2	4-6		64	20 ^[1]	16	100
3	7-9	16	64	20 ^[1]	20	120
4	10-12 ??	32 ?	64 ?	20 ^[1] ?	24 ?	140
5	13-15 ??	32	128	40	40	240

Tabell 5.3: Nytt testoppsett innledende tester, Fiskum (2012).

[1] Massene av finsand er allerede fuktige, antar cirka 2 liter vann pr 10 liter masse.

5.2.3 Resultater nye innledende tester

Søbergsand testen skulle benyttes for å verifisere resultater og kunne se på effekten av finsandinnhold, men det oppsto problemer selv om massen var den samme som ble benyttet i forsøkene i forbindelse med prosjektoppgaven, Fiskum (2011). Det største problemet var at mye av massene ble stående igjen oppe i kassa (ca 1/3), dette er noe som ikke kan aksepteres ved testing av sikringstiltak der mengde masse vil være avgjørende for hvordan sikringstiltaket fungerer.

Test nr	Hastighet gjennomsnitt [m/s] ^[1]		kommentar
	front skred	partikler i skred	
1	3,01	2,84	Søberg 80 kg, vann 20 kg
2 ^[2]	3,13	2,62	Søberg 80 kg, vann 22,5 kg
3	2,87	2,41 ^[3]	Søberg 80 kg, vann 25 kg
4	3,11	3,19	Søberg 80 kg, vann 25 kg og økt vinkel
5	2,74	2,54	Søberg 80 kg, vann 25 kg og økt vinkel mer

Tabell 5.4: Hastigheter målt for test 1-5, problemer med sand som ligger igjen i kassen. Fiskum (2012).

[1] Hastighetene i skredet er målt ved hjelp av dataprogrammet Tracker, jeg har mellom 5-7 målinger av hastighet pr test og refererer til gjennomsnittet av disse målingene i tabellen, i tillegg er hastigheten i fronten av skredet målt.

[2] Hastighetene i skredet varierte mye, mellom 1,92-3,22 m/s, så litt usikker på eksakt hastighet.

[3] Her hadde skredet stor hastighet på den ene siden, den andre siden av skredet fløt relativt sakte og gir mye utslag på gjennomsnittet. Ser man bort fra den ene siden av skredet vil hastigheten bli høyere, for de 4 målingene som da blir gjeldende vil hastigheten bli 2,78 m/s.

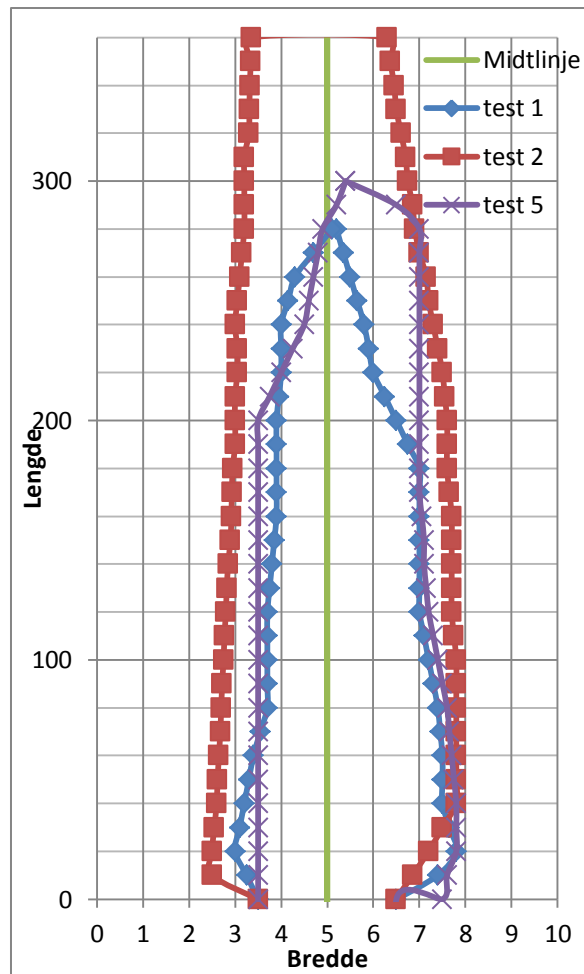
Jeg fikk ikke målt flythøyden på skreden da kameravinkel ble blendet av lyset, må endres til senere tester.

Som beskrevet i kommentarfeltet i Tabell 5.4 valgte jeg å teste ut ulike vannmengder og øking av vinkelen på kassen for og kunne få all masse ut av kassen. Ettersom mengden vann var noe mindre enn hva som ble benyttet av Fiskum høsten 2011, ble det forsøkt med økt vannmengde uten at dette ga noen vesentlig forskjell i mengde masse som ble liggende igjen i kassen. Etter å ha økt mengde vann med 5 kg ble det forsøkt med å øke vinkelen på kassen med cirka 4 grader. Ingen av disse endringene fikk fram resultater som forventet. Etter skredet ble det stående igjen mye masse i kassen, denne massen hadde et tydelig slam lag bestående av silt, se også Figur 5.5 som viser test nummer 4 med økt vinkel på kassen og 25 kg vann i massene.



Figur 5.5: Bilde som viser problemer med sanden i kassen, foto: Fiskum (2012)

Flytlengdene for skredene ble ikke kontrollert på annet en de to første testene og test 5. Ettersom jeg hadde problemer med sand liggende igjen i kassen ble ikke flytlengden prioritert i testene. Målingene med 20 cm rutenett fungerte relativt greit å måle etter, se også Figur 5.6.



Figur 5.6: Utbredelse av skredene for forsøk 1, 2 og 5 ved bruk av Søbergsand og vannmengde etter Tabell 5.4, Fiskum (2012).

5.2.4 Referanse tester med bruk av sand fra Hiller og Jenssen

Ettersom de uventede problemene med Søbergsanden oppsto under testingen ble det forsøkt med samme masse som Hiller og Jenssen (2009) benyttet i sine forsøk. Disse massene er nærmere beskrevet i kapittel 5.3.1 og resultatene fra disse testene er beskrevet detaljert i kapittel 6.1 "Presentasjonen av resultatene for hoveddelen har jeg valgt å dele i to; Resultater for referansetestene kommer først i kapittel 6.1, deretter følger resultatene fra testingen av de ulike sikringsmidlene i kapittel 6.2. Resultatene fra testingen av ulike sikringsmidler er strukturert etter **målemetode og ikke** etter de ulike **sikringstiltak** som testes ut. Denne inndelingen er gjort for enklere å kunne sammenligne effekter av sikringstiltak som testes ut. Før presentasjonen av resultatene har jeg valgt å beskrive hvordan målingene ble gjennomført.

Alle videoer og Excel beregninger fra testingen finnes i vedlagt DVD merket "Vedlegg 1".

Referanse testene". Det fantes dessverre begrenset med masser fra forsøkene til Hiller og Jenssen (2009), cirka 120 kg og på grunn av dette kunne ikke ulike sammensetninger av masse testes som beskrevet i Tabell 5.3. Det ble derfor kun gjennomført tester med sanden

alene uten noen tilsetning av finere eller grovere masser. Dette ble gjort som en følge av at de innledende testene tok forholdsvis lang tid og tilgangen på mer masse var begrenset.

5.3 Testing av sikringstiltak

Sikringstiltak jeg skal teste er lukket kontrolldam, to ulike typer åpne kontrolldammer og bremsekjegler. Nedenfor følger en beskrivelse av testene og utforming av de ulike sikringstiltakene. I kapittel 0 har jeg tidligere beskrevet sikringstiltakenes hensikt og virkning. Effekten av sikringstiltak måles gjennom redusert hastighet etter sikringstiltaket og redusert utløpsdistanse. Effekt vil også kunne måles gjennom andel masse som blir fanget opp av sikringstiltaket. Grafisk kan dette framstilles ved hjelp av energilinjen som beskrevet i kapittel 2.5.

5.3.1 Generelt om hvordan testene utføres

Masser som benyttes vil i alle testene være samme masser som Hiller og Jenssen (2009) benyttet. Massene består av en sand og grusblanding med $D_{90} = 5,3$ mm og $D_{50} = 1,9$ mm, kornene er kantet, se Figur 5.7 og siktekurven som ligger vedlagt i vedlegg 2. Det vil i utgangspunktet benyttes 80 kg med sand og 20 kg vann i skredene, total masse blir da 100 kg og volumet blir cirka 50 liter. Det utføres 3 tester pr sikringstiltak med full rensing mellom hver gang. Det vil ikke bli testet hvordan sikringstiltakene fungerer med dobbel masse, dette skyldes dessverre begrenset tilgang på masser som skal benyttes.



Figur 5.7: Skredmaterialet på millimeterpapir, figur Hiller og Jenssen (2009).

De parametere som vil bli målt er:

- Flythøyde før sikringstiltak
- Hastighet før og etter sikringstiltaket
- Utløpsdistanse og utløpsform sammenlignet med referansetestene uten bruk av sikringstiltak.

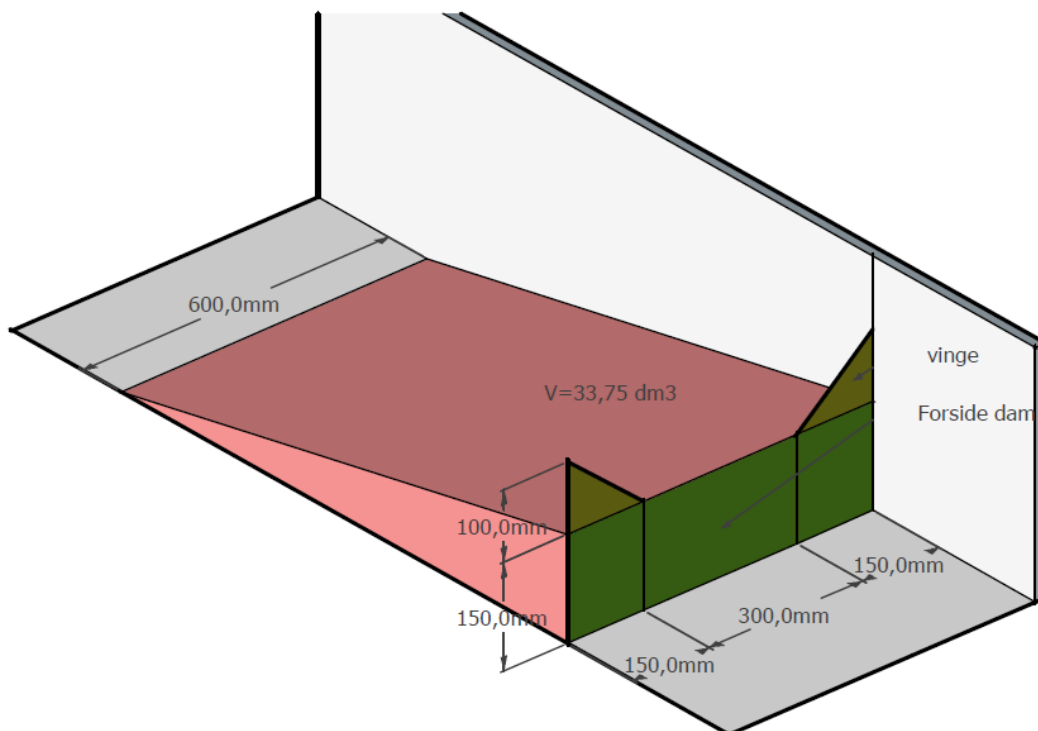
Beskrivelse av disse parameterne er nærmere beskrevet i resultat kapitelet.

5.3.2 Lukkede kontrolldammer

Den lukkede kontrolldammen var i utgangspunktet tenkt testet med og uten masser oppstrøms dammen. Det ville ha være spennende å se hvilken effekt dammen har etter at den er fylt opp i bakkant slik at helning blir slakere og hvordan dette påvirker de videre massene nedover i modellen, men som beskrevet over fantes det ikke tilstrekkelig med masse til dette. Det vil være hensiktsmessig å lage dammen slik at den ikke samler opp hele skredvolumet for å se på effekten dammen har som sikringstiltak om den blir overfylt av et enkelt skred.

Volumet av skredene som benyttes i forbindelse med testing av sikringstiltak er beskrevet i kapitel 5.3. For modellen vil det være fornuftig og teste skred der 50-70% av skredmassene fanges opp av dammen. Det vil si at dammen bør dimensjoneres etter mål vist på Figur 5.8, dette vil samle opp cirka 33 dm^3 av massene på totalt 50 dm^3 altså cirka 67%. Dammen utformes med vinger som går ut til sidekantene/ledevollene. Overløpet må lages så lavt at man sikrer at skredet ikke flyter over på sidene oppstrøms for dammen.

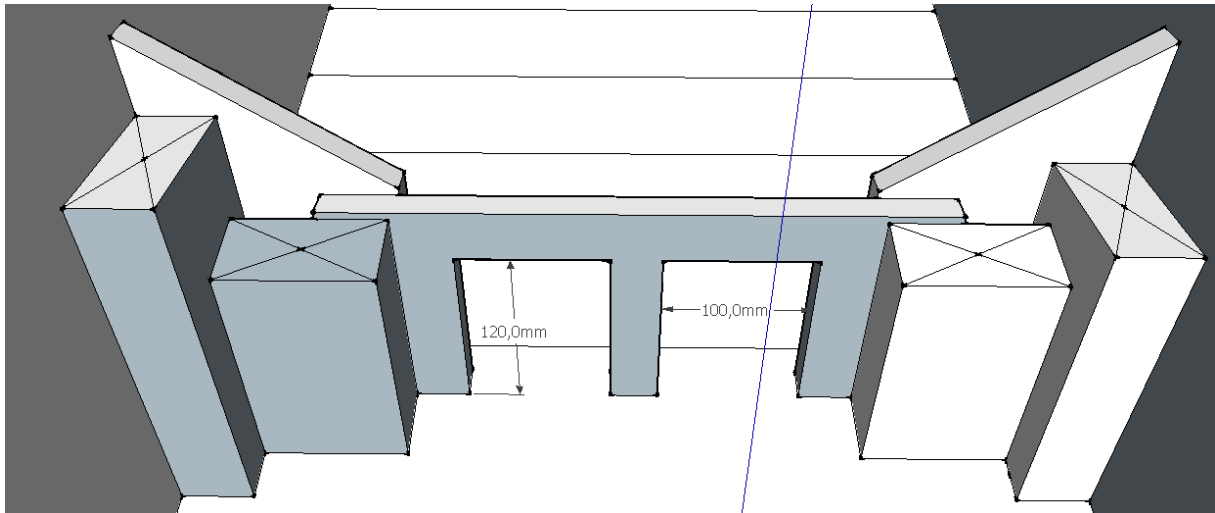
For lukkede kontrolldammer bør høyden som nevnt i kapitel 3.2.1 være 3-5 meter, dette tilsvarer i modellen på 1:20 15-25 cm noe som også gjelder for åpne kontrolldammer. Det vil derfor være hensiktsmessig og benytte samme vinger på den lukkede og de åpne kontrolldammene. Som Figur 5.8 viser, vil dammen bygges med følgende mål; vinger 25 cm høye, dammen 15 cm høy.



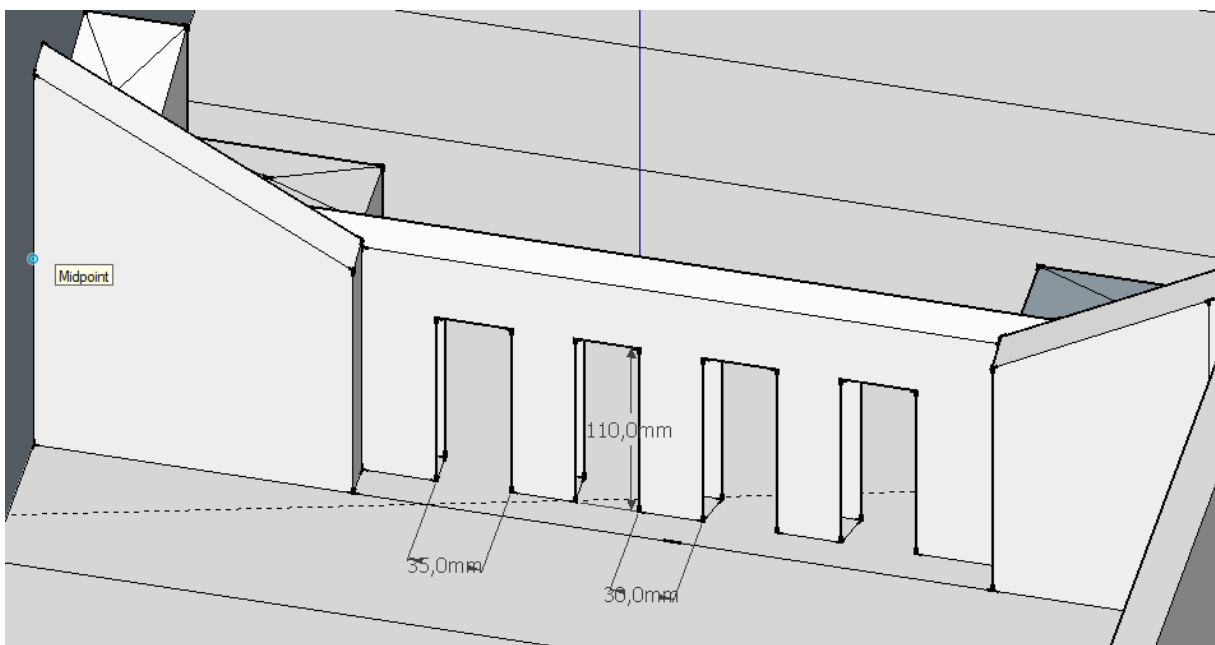
Figur 5.8: Dam konstruksjon med mål som benyttes i sikringsforsøkene, figur: Fiskum (2012).

5.3.3 Åpen 2 og 4 spalters kontrolldam

Den åpne dammen vil bygges likt som den lukkede dammen, men med åpninger i midten som Figur 5.9 og Figur 5.10 viser. Dammene bygges slik for enklere kunne sammenligne resultater og hvilken effekt de ulike åpningene i dammene har i forhold til sikring. I følge Takahashi (2007) bør lysåpningen være 1,5-2 ganger større enn maks korndiameter, dette skyldes kollisjonen mellom korn internt i massen. I forsøkene er $D_{90} = 5,3$ mm det vil si at lysåpningen ikke bør være mindre enn 10 mm, ideelt er vel lysåpning større enn 20 mm. Dette er noe som er blitt tatt hensyn til ved utforming av de åpne kontrolldammene.



Figur 5.9: Åpen kontrolldam med 2 spalter med mål, sett nedenfra, figur: Fiskum (2012).



Figur 5.10: Åpen kontrolldam med 4 spalter med mål, sett ovenfra, figur: Fiskum (2012).

Det ble en stund vurdert spaltdammer, men Mizuyama (2008) sier at dette ikke lenger benyttes i Japan som følge av en del uheldige episoder på tidlig 2000-tallet. Grunnen til at disse ikke konstrueres lenger skyldes at den smale spalten kunne skape vannmagasin, flomskredet ble dermed ikke stoppet, men eroderte massene nedstrøms når de strømmet ut gjennom spalten. Nå bygges slike dammer om med gitterstrukturer i spalten for å forhindre dette, se Figur 5.11 og Figur 5.12.



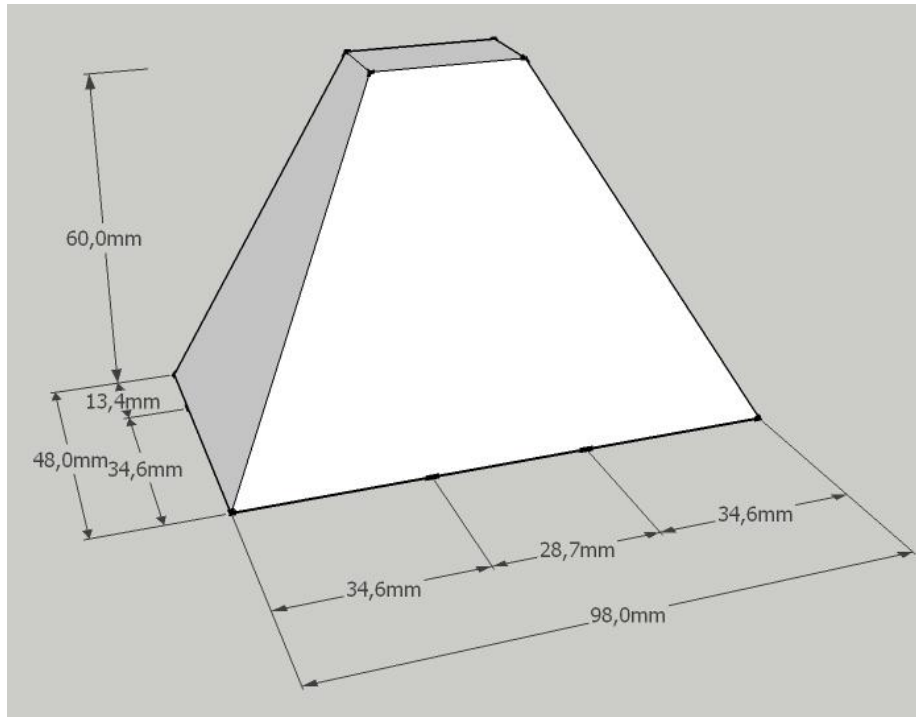
Figur 5.11: Spaltdam før flomskred og erosjon, foto: Mizuyama (2008)



Figur 5.12: Spaltdam etter flomskred, viser erosjonsproblemet. Foto: Mizuyama (2008)

5.3.4 Bremskjegler

Bremskjegler kan utformes som vist i Figur 5.13, det skal testes ut bremskjegler med ulike lysåpninger mellom kjeglene. Som tidligere nevnt i kapittel 3.1 er bremskjegler lite brukt i forbindelse med flomskred og jeg har derfor støttet meg på snøskredlitteratur i utformingen av bremskjeglene.



Figur 5.13: Kjegleutforming og mål, figur: Fiskum (2012).



Figur 5.14: Oppsett av kjeglene i modellen, foto: Fiskum (2012).

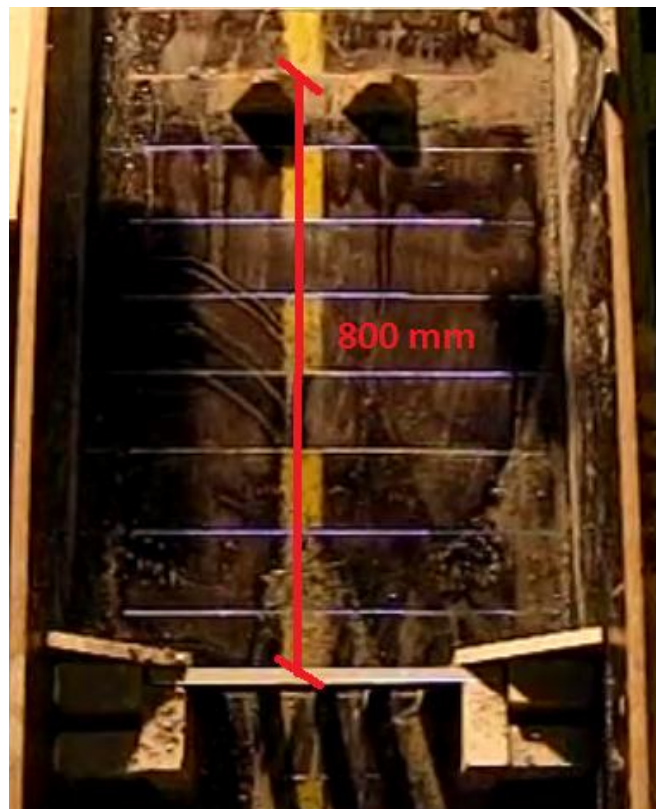
I mine forsøk vil bremsekjeglene ha en høyde på 60 mm, flythøyden som ble funnet i de innledende forsøkene var mellom 20 og 30 mm. Jeg har valgt å benytte høyde som er to ganger flythøyden. Ser man på Jóhannesson et al. (2009) er dette innenfor en høyde som tilsvarer 2-3 ganger høyden av skredets tykkeste parti. Brateng (2005) påpekte også i sin masteroppgave at det er gunstig med kjeglehøyde 2-3 ganger maks flythøydevar. Jeg valgte 100 mm brede kjegler, noe som er litt større enn hva Jóhannesson et al. (2009) anbefalte, de foreslo som nevnt i 3.1 at $H/B \sim 1$. Vinkelen på kjeglene satte jeg til 60° . Jeg støtter meg her på Brateng (2005) som mente økt vinkel på kjeglene ville gi økt reduksjon i hastigheten.

Plassering av bremsekjeglene vil følge anbefalingene fra Norwegian Public Roads Administration (1994), som sier at bremsekjeglene ikke bør plasseres i helninger større enn 15° , dette tilsier at bremsekjeglene settes opp ved $x=500$, se også Figur 5.14. Gjennom tester Brateng gjennomførte i 2005 fant hun at optimal tetthet mellom kjeglene var på 0,7-0,8 ved tørrsnøskred. Dette vil i modellforsøkene tilsvare 4 kjegler og en lysåpning på 50 mm mellom kjeglene. I forbindelse med testingen vil jeg benytte ulike kombinasjoner for å se på effekten av dette. I testene med kun bremsekjegler vil jeg ikke benytte noen lysåpning. Jeg ønsker også å se på effekten av kjeglene i kombinasjon med 4-spalters kontrolldam, her vil jeg øke lysåpningen slik Bratengs anbefaler for å se på effekten av økt lysåpning, se avsnitt 5.3.5 og 5.3.6.

Det kan bli vanskelig å måle resultatene av bremsekjegler ved bruk av video for hastighetsmåling, dette fordi partikler vil bli kastet opp i luften samtidig som noe av massen vil renne mellom bremsekjeglene. I denne sammenheng vil det derfor være hensiktsmessig ved bruk av bremsekjegler og se på utløpsdistansen, å sammenligne denne med utløpsdistansen uten bremsekjegler til stede. En eventuell reduksjon i utløpsdistanse vil bety reduksjon i energilinja. Forskjellen på energilinja vil fortelle hvor stor effekt bremsekjeglene har som sikringstiltak ved flomskred.

5.3.5 Kombinasjon med 2 kjegler og 4 spalter kontrolldam

Ved testing av 2 kjegler og 4 spalter kontrolldam vil det benyttes en avstand på 800 mm, dette er valgt ut fra resultatene som Rageh (1999) og Brateng (2005) har beskrevet er gunstige. Dette er tilnærmet maksimal avstand som kan tillates hvor hele skredforløpet fremdeles kan filmes. For at man skal få mest mulig av skredbanen i kamera som er plassert over skredet settes kjeglene ved $x=400$ de plasseres med en avstand på 50 mm og speiles om senterlinjen, det vil si at de står 25 mm fra senterlinjen. Dammen plasseres ved $x=1200$ og bygges på samme måte som beskrevet i kapittel 5.3.3. Oppsettet kan sees av Figur 5.15. Lysåpningen på kjeglene varieres i forhold til forsøkene med kun kjegler der lysåpningen mellom kjeglene ikke fantes. Å øke lysåpningen er gjort for å kunne se om de funn Brateng (2005) fant med en tetthet på 0,7-0,8 er gunstige også for flomskred.



Figur 5.15: Oppsett av kombinasjonen 2 kjegler og 4 spalter kontrolldam. Foto: Fiskum (2012)

5.3.6 Kombinasjon med 4 kjebler og 4 spalter kontrolldam

Testing av 4 kjebler og 4 spalter kontrolldam gjennomføres relativt likt som testen med 2 kjebler og 4 spalter kontrolldam. Den eneste forskjellen er at det settes opp 2 nye kjebler, disse også med en avstand på 50 mm. Kjeblene står fortsatt ved $x=400$ og 4 spalter kontrolldam er plassert ved $x=1200$. Oppsettet kan sees av Figur 5.16. Som i avsnitt 5.3.5 velger jeg også her å øke lysåpningen i forhold til hva som ble benyttet i forsøkene med kun kjebler, det er to grunner til dette valget: Først og fremst er det for å kunne sammenligne ulike lysåpninger mellom kjeblene for å se på effekten av dette, men også for å kunne se på effekten av 2 kjebler i forhold til 4 og hvilken effekt en økning av kjebler gir på skredmassene.



Figur 5.16: Oppsett av kombinasjonen 4 kjebler og 4 spalter kontrolldam. Foto: Fiskum (2012)

6 Resultater

Presentasjonen av resultatene for hoveddelen har jeg valgt å dele i to; Resultater for referansetestene kommer først i kapittel 6.1, deretter følger resultatene fra testingen av de ulike sikringsmidlene i kapittel 6.2. Resultatene fra testingen av ulike sikringsmidler er strukturert etter **målemetode og ikke** etter de ulike **sikringstiltak** som testes ut. Denne inndelingen er gjort for enklere å kunne sammenligne effekter av sikringstiltak som testes ut. Før presentasjonen av resultatene har jeg valgt å beskrive hvordan målingene ble gjennomført.

Alle videoer og Excel beregninger fra testingen finnes i vedlagt DVD merket "Vedlegg 1".

6.1 Referanse testene

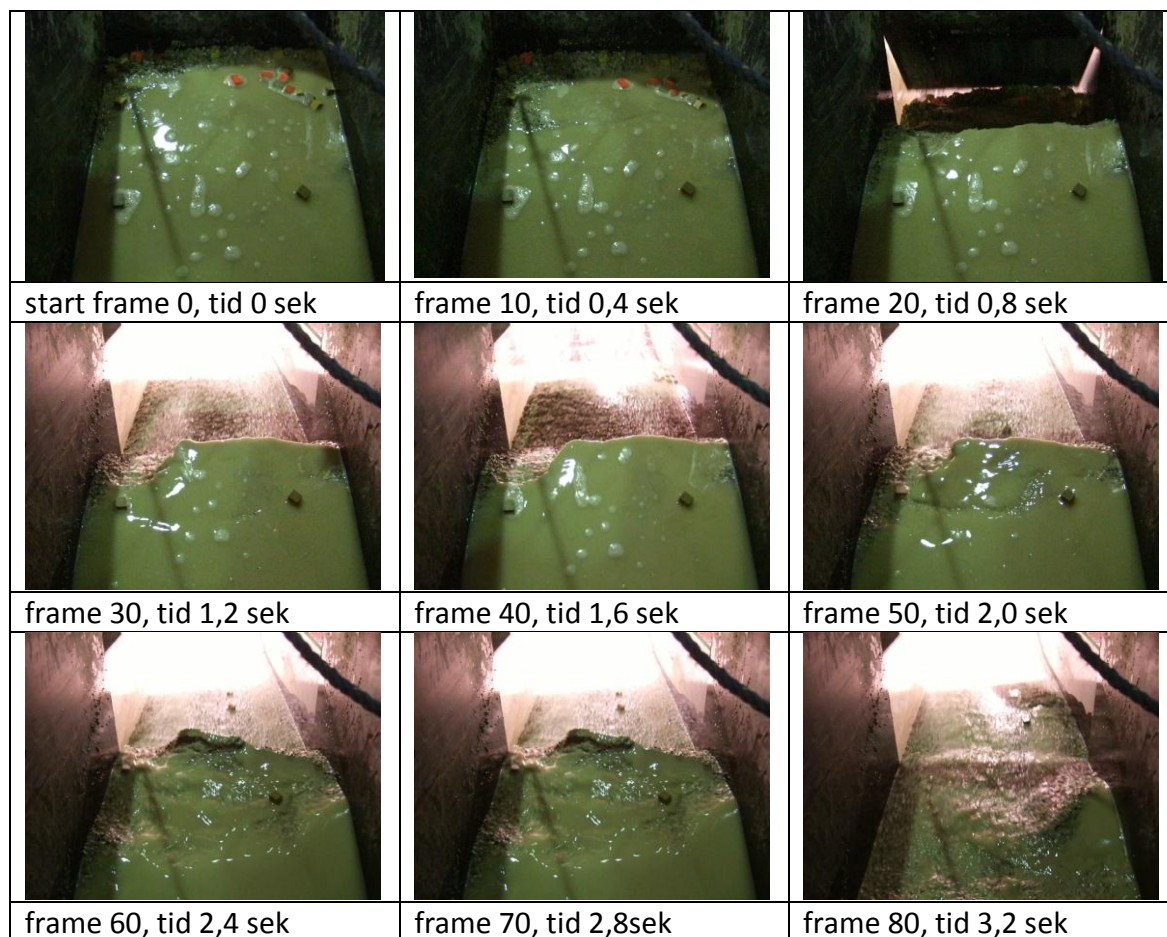
Som beskrevet i kapittel 5.2 ble de innledende testene utarbeidet mye underveis i testingen, her følger en presentasjon av testene med sanden som Hiller og Jenssen (2009) benyttet, det vil si test 6-12. Grafer og lignende er satt inn sammen med resultatene til sikringsmidlene for enklere sammenligning. Ettersom de innledende resultatene ble evaluert før testene med sikringstiltak ble gjennomført er en oppsummering av de resultater som kom fram av de innledende testene her presentert. Referanseverdiene i Tabell 6.1 er basert på innledende tester med samme masser som Hiller og Jenssen (2009) benyttet i forbindelse med testing av ledevoller.

Test nr.	Hastighet fronten	Hastighet masser	Maks utglidning	Avvik?
6	3,18	2,05	2	
7	1,93	2,03	ca 1 meter	lite vann (ca 17 liter?)
8	2,67	2,5	1,8	
9 ^[1]	2,82	2,66	2,4	
10 ^[1]	2,74	1,99	1,3	
11 ^[1]	2,21	1,8	1,1	
12 ^[1]	2,08	2,17	1,3	
Snitt	2,52	2,17	1,56	
varians/standardavvik	0,18/0,42	0,08/0,28	0,23/0,48	

[1] Glemte å sette kassen nedenfor skredet i forsøk 12 kunne derfor ikke kontrollere hvor mye vann som forsvant i løpet av forsøkene.

Tabell 6.1: Referanseverdier innledende tester, inneholder også varians og standardavvik på hastighetene og utglidningene, Fiskum (2012)

Ser man på utbredelsen av skredene i Figur 6.27 varierer disse en del, den største forklaringen til dette er at skredene ikke løsnet på samme måte. Skred 6, 8 og 9 løsnet som en masse, mens det i skred 7, 10, 11 og 12 løsnet gradvis, se også Figur 6.1 og video test_12_bak, vedlegg 1 (DVD) som viser utbredelsen i skred 12.



Figur 6.1: Oversikt utsklidning test 12, bilde pr 10 frame (0,4 sek) tatt bak kassen, Fiskum (2012).

Sammenligner man hastighetene med Formel 4.3 for en hastighet på 2 m/s gir dette i fullskalaflomskred en hastighet på 8,9 m/s, dette synes fornuftig sammenlignet med hva Norem og Sandersen (2012) sier om normal hastighet i flomskred som ligger mellom 5-10 m/s.

Flythøyden på skredene er kanskje noe lav i forhold til hva Norem og Sandersen (2012) definerer som normal flythøyde, men som de sier, på små skred er flythøyden ofte under 1 meter. Benytter man Formel 4.4 får man en flythøye i fullskala på:

$$h_{model} = \frac{h_{natur}}{Lm} \rightarrow h_{natur} = 0,04 * 20 = 0,8 \text{ meter}$$

6.2 Sikringstiltak

Som nevnt i innledningen til kapitelet er resultatene framstilt ut fra **målemetode** og ikke sikringstiltak, dette er gjort for enklere å kunne sammenligne de ulike sikringstiltakene og deres effekt i forhold til hverandre. Det er i forbindelse med resultatene også beskrevet hvordan måleutstyret har vært plassert og hvordan målingene har blitt gjennomført.

6.2.1 Flythøyde før sikringstiltak

Flythøyden ble målt med ultralyd avstandsmåler plassert ved $x=300$, cirka 290 mm over senterlinjen. Avstandsmåleren registrerer avstanden ned til underlaget, når skredet passerer vil avstanden reduseres og flythøyden kunne måles. Registreringen av avstanden skjer ved hjelp av video som filmer displayet til avstandsmåleren med en nøyaktighet på 25 bilder i sekundet, se Figur 6.2 og Figur 6.3 som viser oppsettet av avstandsmåleren og kamera for filming av avstandsmåleren.



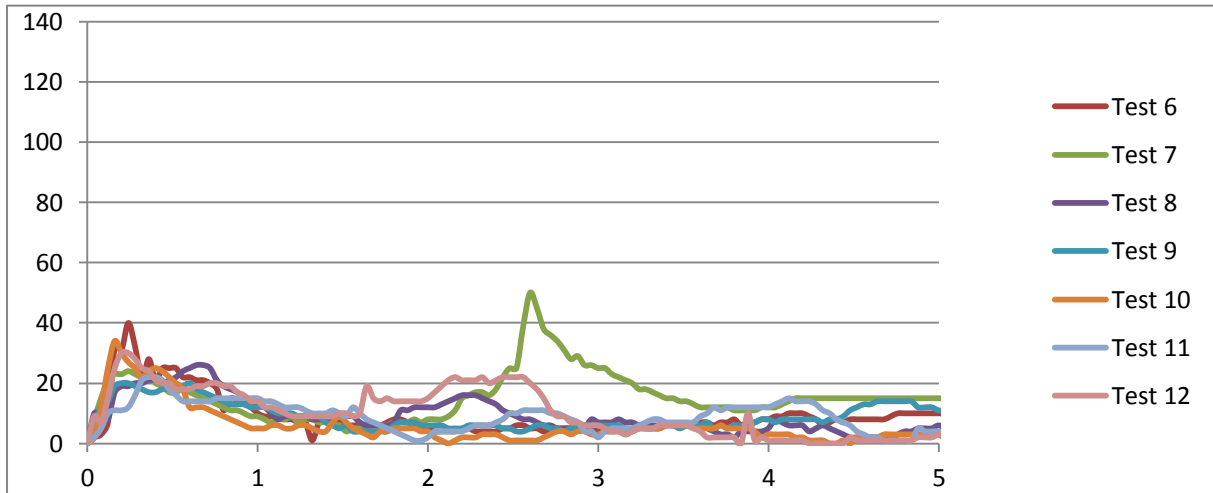
Figur 6.2: Oversikt over måleutstyr rundt sikringstiltaket, avstandsmåler og kamera oppsett. Foto: Fiskum (2012)



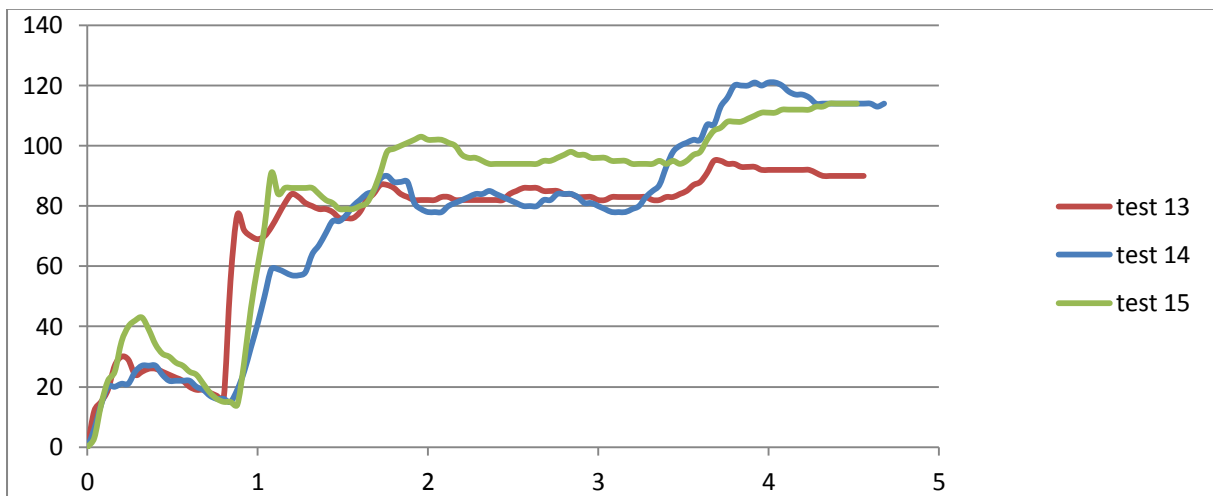
Figur 6.3: Bilde fra kamera som viser displayet på avstandsmåleren. Foto: Fiskum (2012)

Flythøyden som beskrevet i kapittel 2.5 og 0, vil være en av de parameterne som er avgjørende for flyteegenskapene til skredet. Gjennom testingen i innledende tester og med ulike sikringstiltak er derfor flythøyden vurdert for å se på effekten av sikringstiltakene. Som man kan se av Figur 6.4 til Figur 6.10 består skredene av en bølgefront med hode som gir høyere flyte høyde enn resten av skredet, dette stemmer godt med teorien fra kapittel 2 og

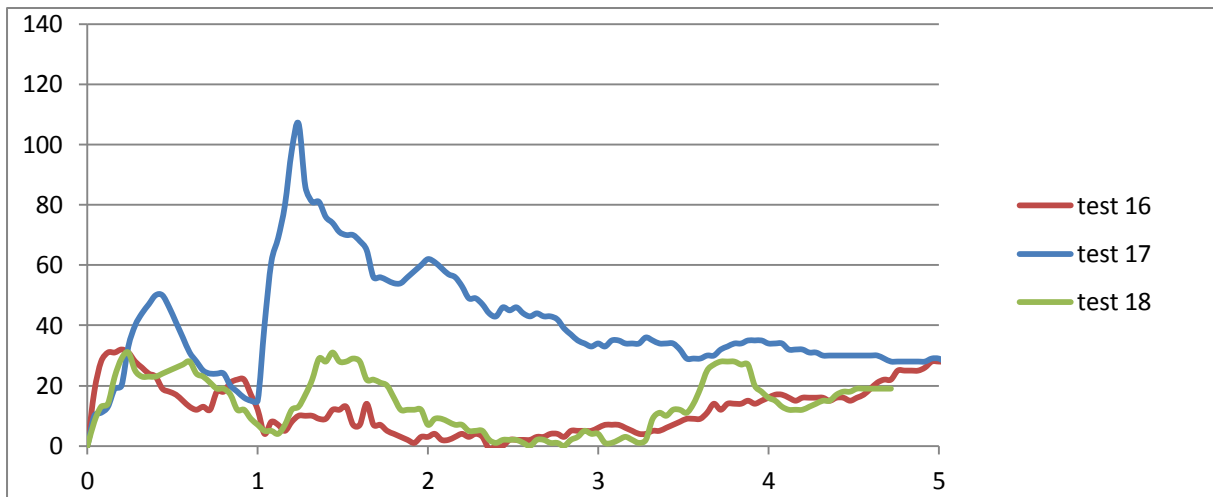
Figur 2.2. Denne hodehøyden i starten av skredet virker å variere mellom 20-40 mm med liten utstrekning, ved hastigheter på 2 m/s og varighet på under 0,5 sekunder er hodets utbredelse på under 1 meter. Gjennomsnittshøyden for samtlige tester viser at hodet har en flytehøyde på 32 mm, mens selve halen på skredet er mye lavere med en flytehøyde på omkring 5 mm. På de påfølgende figurer er x-aksen tid i sekunder og y-aksen flythøyden i mm.



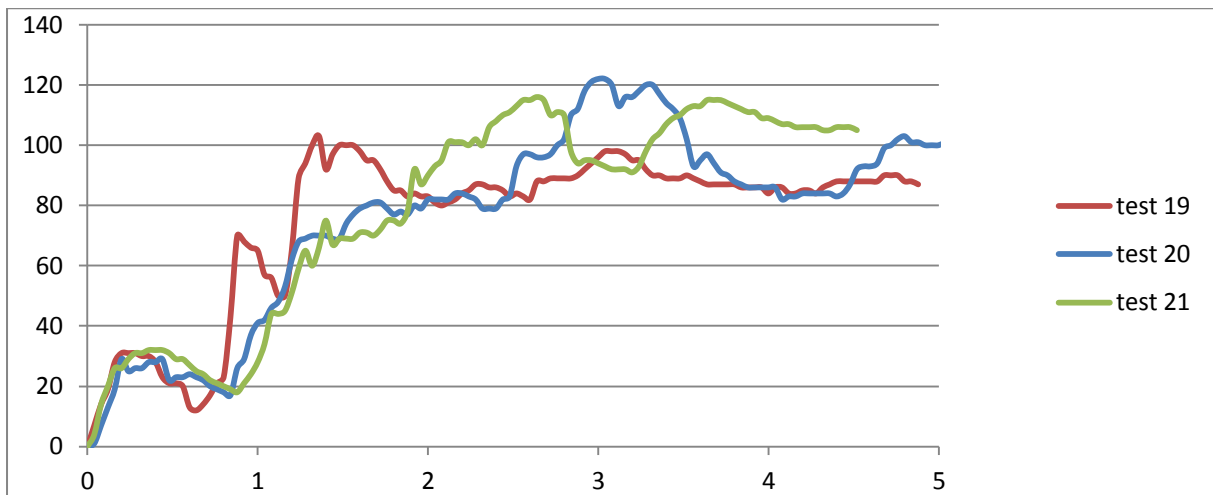
Figur 6.4: Flythøyden for referansetestene, figur: Fiskum (2012)



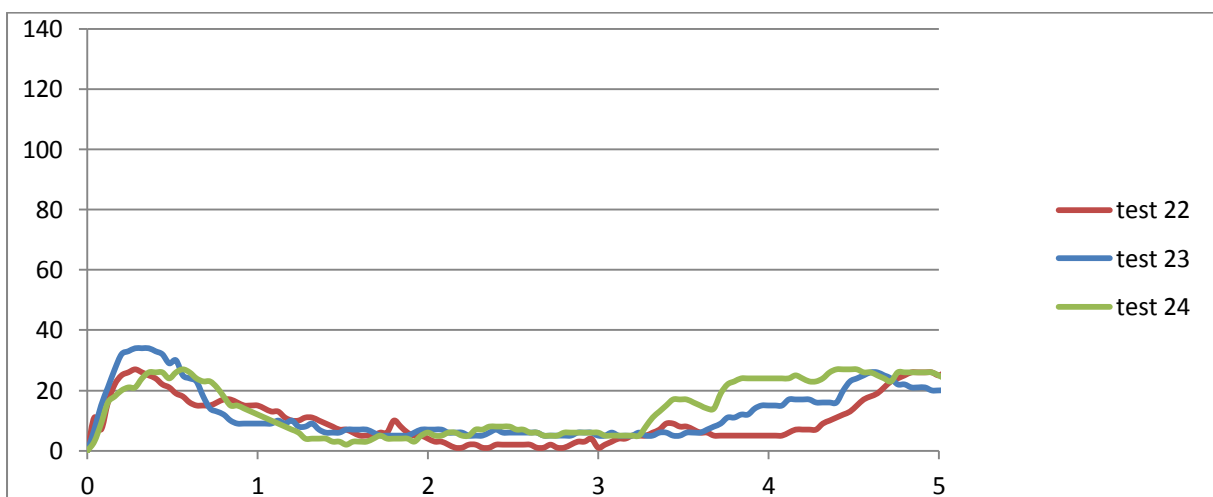
Figur 6.5: Flythøyden lukket kontrolldam, figur: Fiskum (2012)



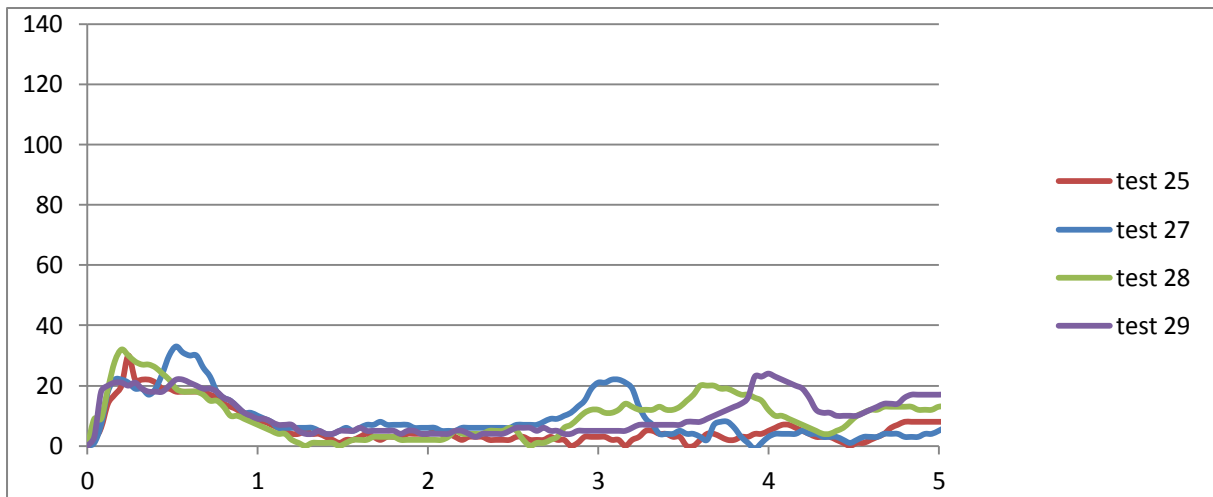
Figur 6.6: Flythøyden for 2-spalter kontrolldam, figur: Fiskum (2012)



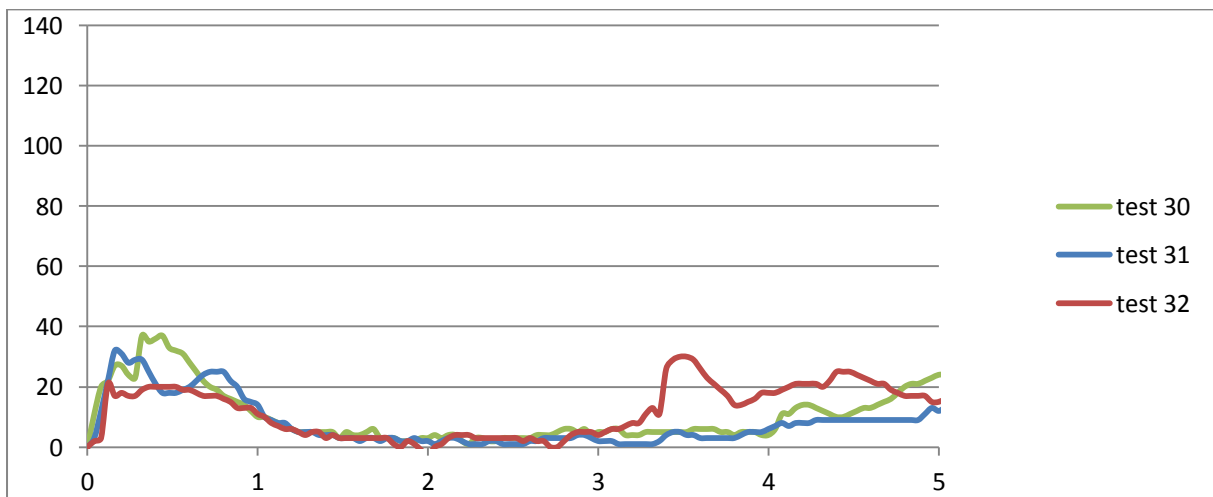
Figur 6.7: Flythøyden for 4-spalter kontrolldam, figur: Espen Fiskum (2012)



Figur 6.8: Flythøyden for kjepler i rett rekke uten lysåpning mellom kjeplene, figur: Fiskum (2012).



Figur 6.9: Flythøyden for 2 kjebler med lysåpning på 50 mm og 4 spalter dam, figur: Fiskum (2012).



Figur 6.10: Flythøyden for 4 kjebler med lysåpning 50 mm og 4 spalter dam, figur: Fiskum (2012).

6.2.2 Hastigheter i skredene

Hastigheten måles ved hjelp av høyhastighetskamera med en bildefrekvens på 300 bilder pr sekund. Kamera er montert rett ovenfor skredet slik Figur 6.11 viser og gir god oversikt over forsøkene som Figur 6.12 viser.

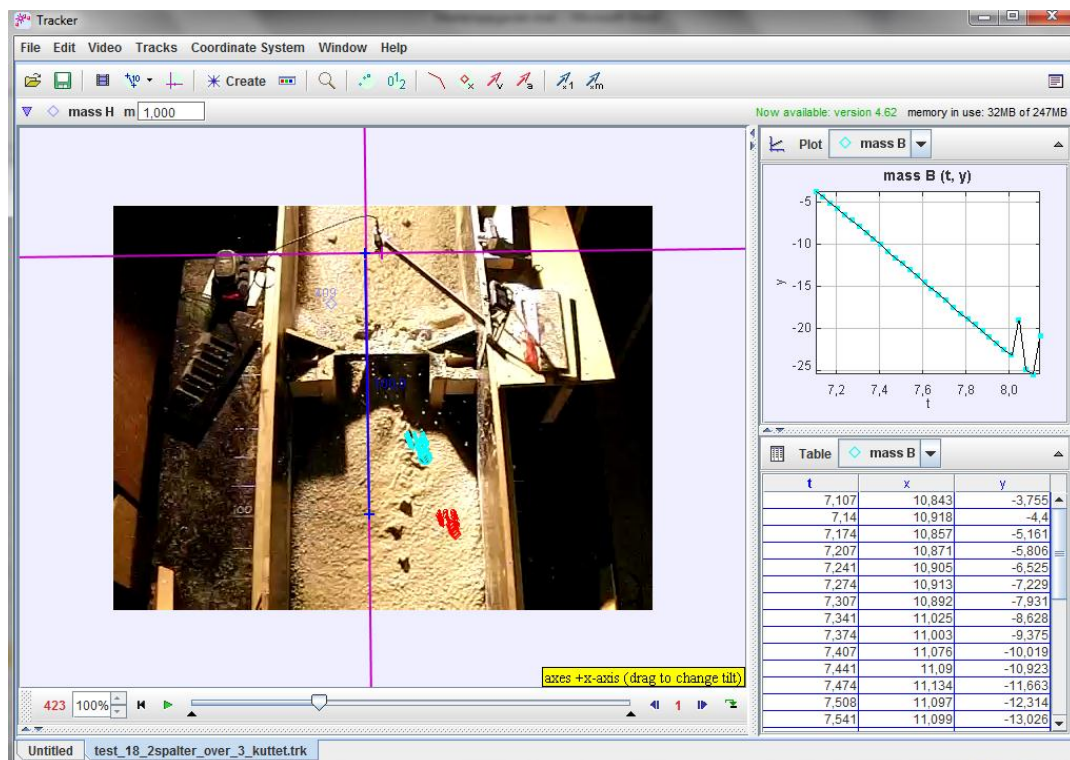


Figur 6.11: Oversiktsbilde som viser plassering av høyhastighetskamera. Foto: Fiskum (2012)



Figur 6.12: Bilde som viser filmområde for høyhastighetskamera under testing av sikringsmidler. Foto: Fiskum (2012)

For analyse av hastigheter benyttes to metoder, den ene er å måle antall bilder som skredet bruker på 10 cm strekning (strekene på tvers i Figur 6.12). Denne hastigheten har jeg valgt å kalle hastighet til fronten av skredet da det ikke er mulig å benytte denne etter at skredet har dekket bunnen med masser. Den andre metoden benytter et dataprogram kalt Tracker utviklet av Douglas Brown (2012), denne målemetoden kalles videre her hastighet i masser. Tracker trenger partikler som kan spores over en hvis distanse, først må det legges inn en skala som sier noe om avstanden for området der partikler skal spores, Tracker trenger tydelige partikler for automatisk og kunne følge disse nedover i skredet, jeg valgte derfor som en test i starten av forsøkene og tilsette noen enkle kvadratiske treklosser med sider på mellom 15 og 20 mm. Det viste seg at disse fungerte meget godt og jeg har derfor valgt å fortsette med disse. For at disse målingene skal bli mest mulig korrekte har jeg tatt 4-8 ulike klosser i skredet og sporet deres hastighet. Dette kan sees av Figur 6.13 som viser skjermbildet av Tracker, den blå linjen er satt inn som målestav før skredet passerer og det rosa korset er koordinatsystemet som vinkles rett etter modellen.



Figur 6.13: Figur som viser Tracker og sporingen av to ulike partikler (blå og rød farge), flere klosser vises også. Bilde: Fiskum (2012).

Test nr	Hastighet front	Hastighet masser over tiltak	hastighet masser under tiltak	Standarda vvik før/etter	Varians før/etter	beskrivelse
Test 6	3,18	2,05	-	0,11	0,012	ref. test
Test 7	1,93	2,03	-	0,12	0,015	ref. test
Test 8	2,67	2,50	-	0,10	0,010	ref. test
Test 9	2,82	2,66	-	0,15	0,022	ref. test
Test 10	2,74	1,99	-	0,08	0,006	ref. test
Test 11	2,21	1,8	-	0,12	0,014	ref. test
Test 12	2,08	2,17	-	0,09	0,008	ref. test
Test 13	2,50		-			Tett kontrolldam
Test 14	1,85		-			Tett kontrolldam
Test 15	1,56		-			Tett kontrolldam
Test 16	2,12	1,91	1,51	0,16/0,11	0,026/0,013	2-spalter
Test 17	1,53	1,93	1,25	0,12/0,07	0,016/0,005	2-spalter
Test 18	1,68	2,14	1,57	0,10/0,11	0,010/0,011	2-spalter

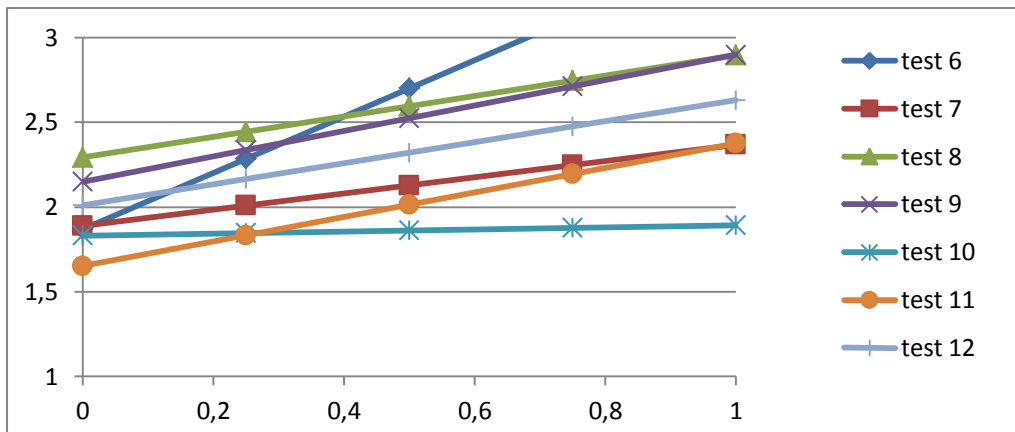
Tabell 6.2 Hastigheter i skredene, skred 6-18.

Test nr	Hastighet front	Hastighet masser over tiltak	hastighet masser under tiltak	Standardavvik før/etter	Varians før/etter	Beskrivelse
Test 19	1,85	2,24	1,57	0,09/0,10	0,007/0,010	4-spalter
Test 20	1,73	1,94	0,91	0,14/0,09	0,019/0,009	4-spalter
Test 21	1,90	1,92	1,13	0,11/0,06	0,013/0,003	4-spalter
Test 22	1,90	1,98	1,34	0,21/0,08	0,045/0,006	Kjegler
Test 23	1,98	2,14	1,38[1]	0,08/0,07	0,007/0,004	Kjegler
Test 24	2,18	2,18	1,23	0,08/0,09	0,007/0,007	Kjegler
Test 25	2,38	1,95	1,68	0,12/0,13	0,016/0,016	2 kjegler og 4 spalter
Test 26	2,43	2,05	1,99	0,09	0,008	2 kjegler og vinger
Test 27	2,6	2,20	-	0,07	0,005	2 kjegler og 4 spalter
Test 28	2,23	1,96	-	0,11	0,012	2 kjegler og 4 spalter
Test 29	2,39	2,05	-	0,08	0,006	2 kjegler og 4 spalter
Test 30	2,95	2,01	-	0,12	0,014	4 kjegler og 4 spalter
Test 31	2,35	1,89	-	0,07	0,005	4 kjegler og 4 spalter
Test 32	2,71	2,16	-	0,05	0,002	4 kjegler og 4 spalter

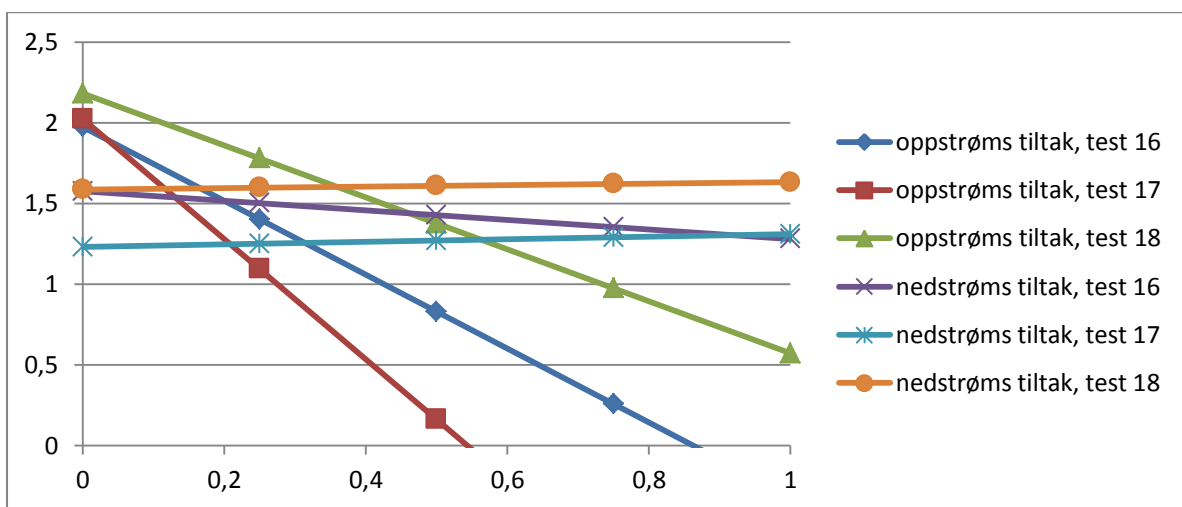
[1] I starten høyere hastighet under tiltaket, snitt da 1,66 roligere etter hvert da snitt på 1,10.

Tabell 6.3: Hastigheter i skredene, skred 19-32, for test 27-32 lot dette ikke seg måle mellom sikringstiltakene.

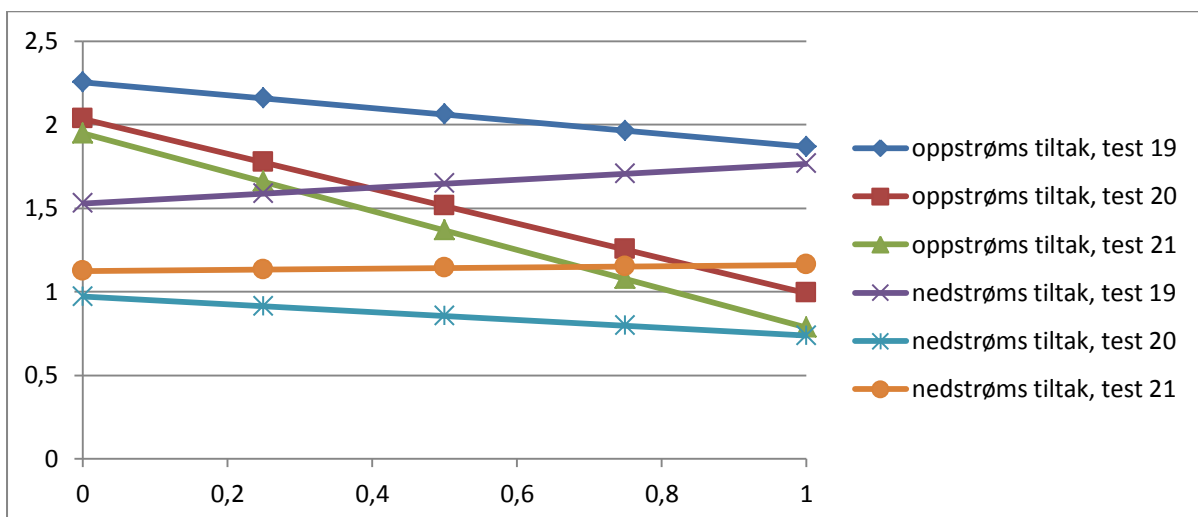
For enklere å se hastighetsforløpet er stigningstallet til grafene funnet, dette er gjort ved hjelp av gjennomsnittet til målingene som er gjennomført i Tracker. Ved store avvik på resultatene til en av enkeltmålingene i forhold til gjennomsnittet er disse utelatt for å få et mer riktig bilde av forløpet. Y-aksen i de påfølgende diagrammene er hastigheten i m/s og x-aksen er tid i sekunder. Måling av hastighetene er gjort på omkring 100 bilder for de innledende testene der partiklene kunne spores over en større avstand. Med en kamerahastighet på 300 bilder i sekunden tilsvarer dette cirka 0,6 sekunder. For tester med sikringsmidler er hastigheten målt på mye kortere område og ofte er målingen på omkring 30-50 bilder altså 0,1-0,2 sekunder.



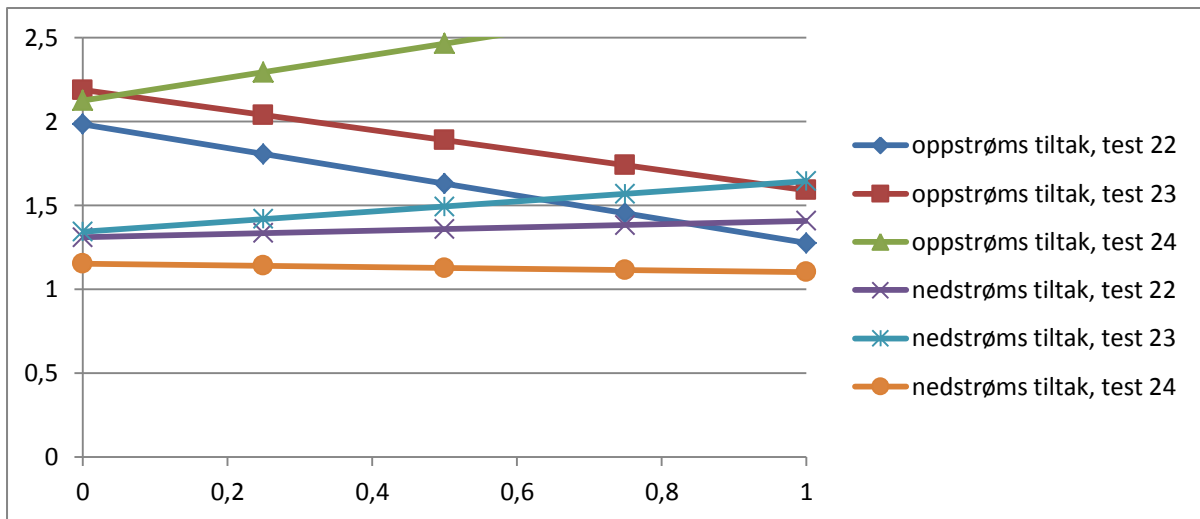
Figur 6.14: Hastighetsforløp referansetestene, test 6-12, Fiskum (2012).



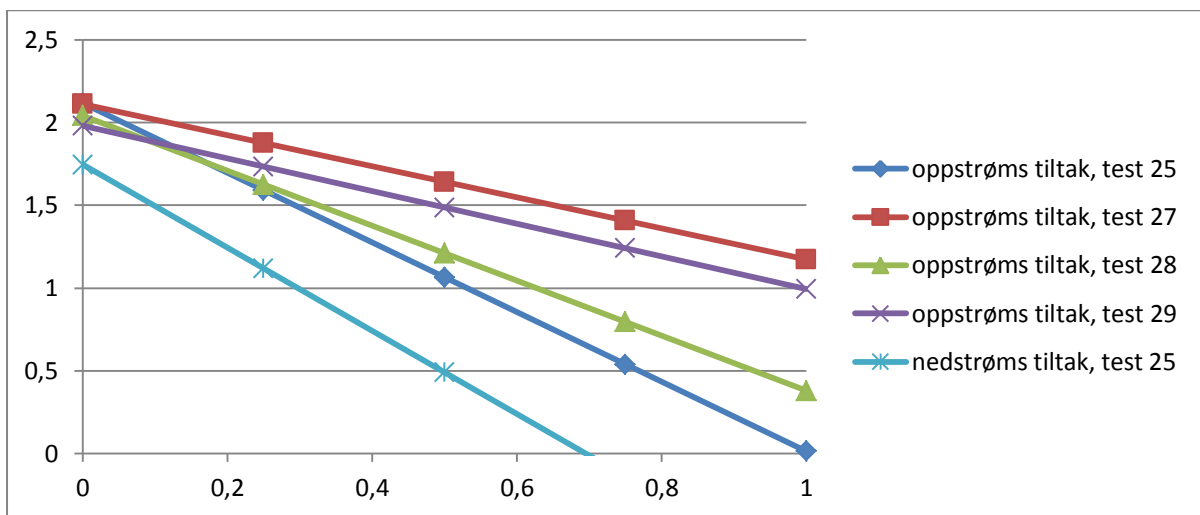
Figur 6.15: Hastighetsforløp opp- og nedstrøms 2-spalters kontrolldam for test 16-18, Fiskum (2012).



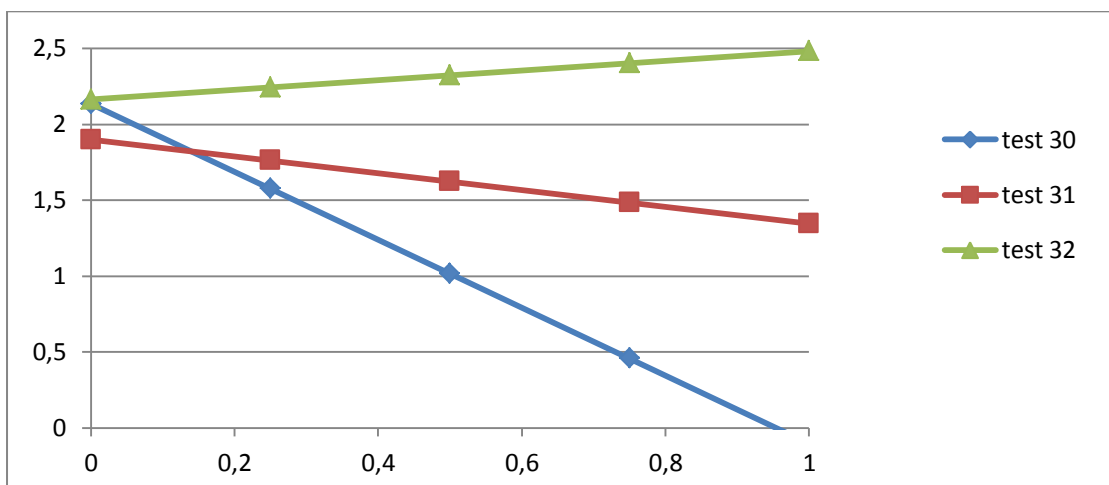
Figur 6.16: Hastighetsforløp opp- og nedstrøms 4-spalters kontrolldam, test 19-21, Fiskum (2012).



Figur 6.17: hastighetsforløp opp- og nedstrøms kjejlerekke, test 22-24, Fiskum (2012).



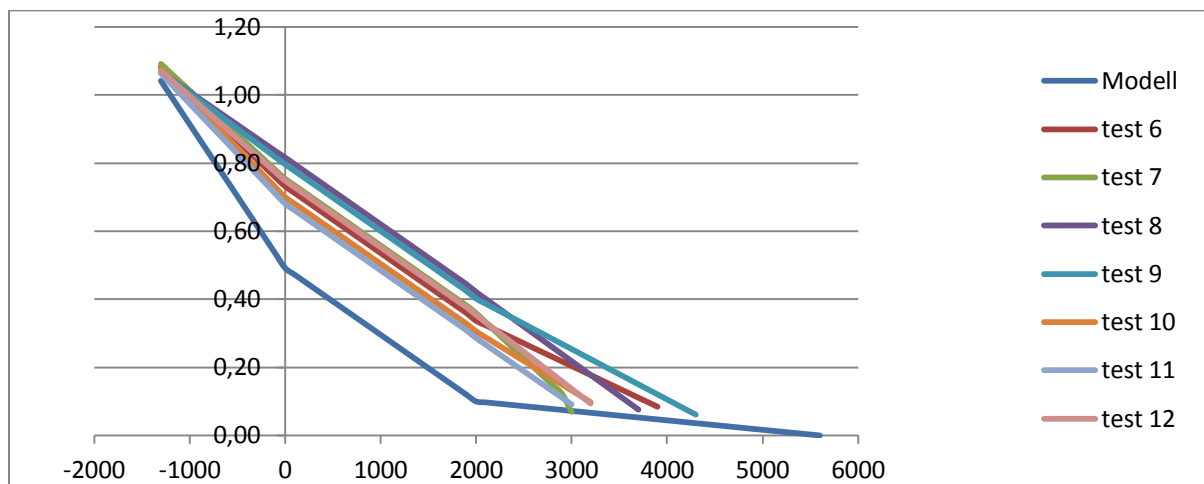
Figur 6.18: hastighetsforløp opp- og nedstrøms kombinasjon 2 kjebler og 4 spalters kontrolldam, test 25 og 27-29, Fiskum (2012).



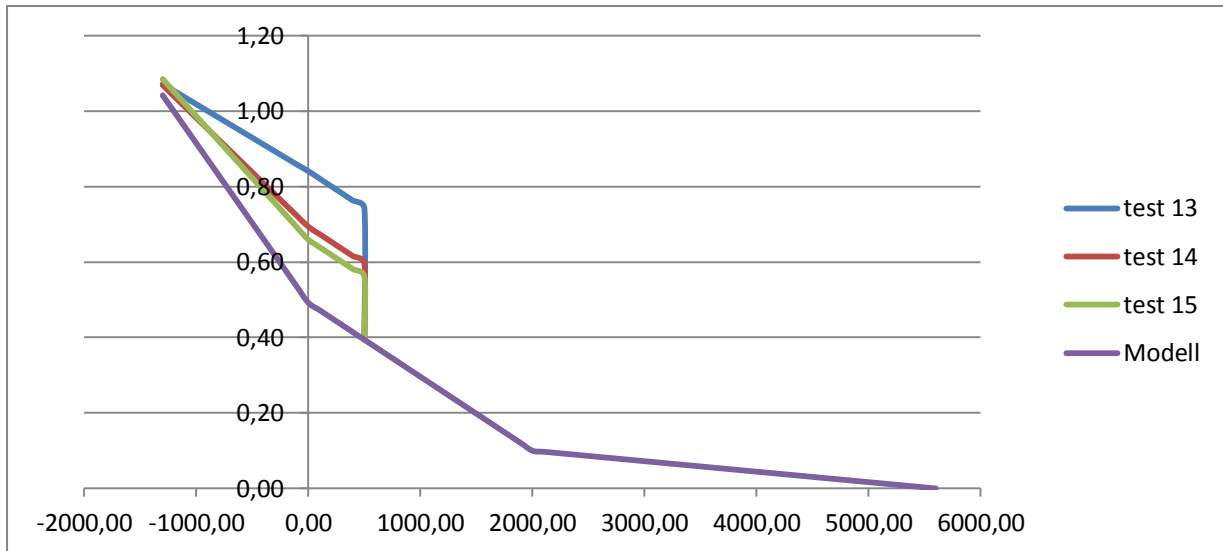
Figur 6.19 Hastighetsforløp oppstrøms kombinasjon 4 kjebler og 4 spalters kontrolldam, test 30-32, Fiskum (2012).

Data fra forsøkene finnes i vedlegg 1.

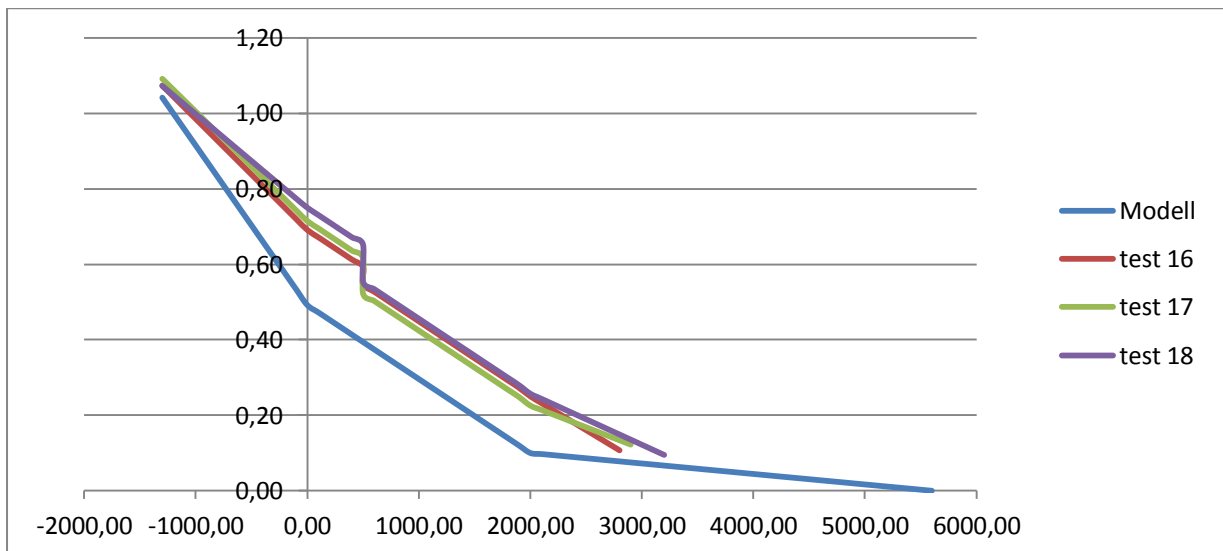
For enklere kunne se på effekten av sikringsmidlene presenteres her også energilinjene til forsøkene, det er i framstillingen benyttet data fra Tracker. I forsøk 13-15 er fronthastigheten benyttet ettersom partikler i Tracker ikke kunne følges. Det er i disse framstillingene antatt jevnt akselerasjon i starten fram til $x=0$, dette er ikke sjekket og man kan anta at akselerasjonen er noe større i starten ved $x=-1300$ før terminalhastigheten oppnås. Flythøyden er valgt ut fra maks flyte høyde målt ved $x=300$, se også kapittel 6.2.1. Fra $x=0$ er det antatt jevn hastighet og ingen akselerasjon fram til sikringstiltaket dette til tross for at grafene i Figur 6.14 til Figur 6.19 viser annet hastighetsforløp. Grunnen til at dette er gjort skyldes sprikende resultater og ved målinger på 0,2-0,4 sek er ikke variasjonene spesielt store. Det samme er gjort for hastighetene nedstrøms sikringstiltaket fram til $x=2000$ og modellen endrer helning til rutebordet. For kombinasjonstiltakene var det som tidligere nevnt vanskelig og spore partikler nedstrøms for kjeglene det er derfor noe mangelfull informasjon ved framstilling av energilinjene for Figur 6.25 og Figur 6.26. X-aksen er som nevnt avstanden i modellen horisontalt, y-aksen beskriver høyden til modellen og energilinjene.



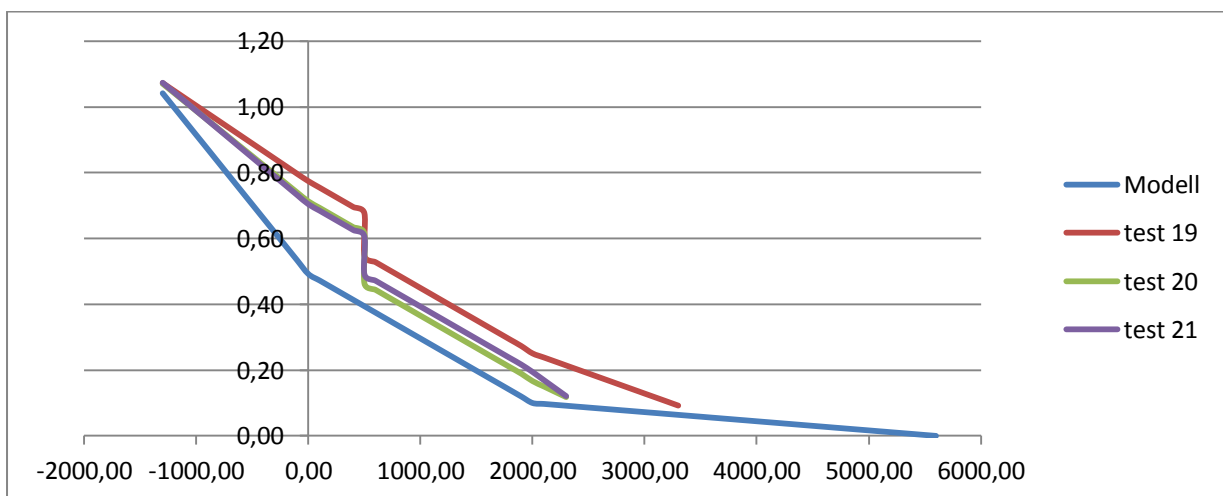
Figur 6.20: Energilinjene for referansetestene, test 6-12, Fiskum (2012).



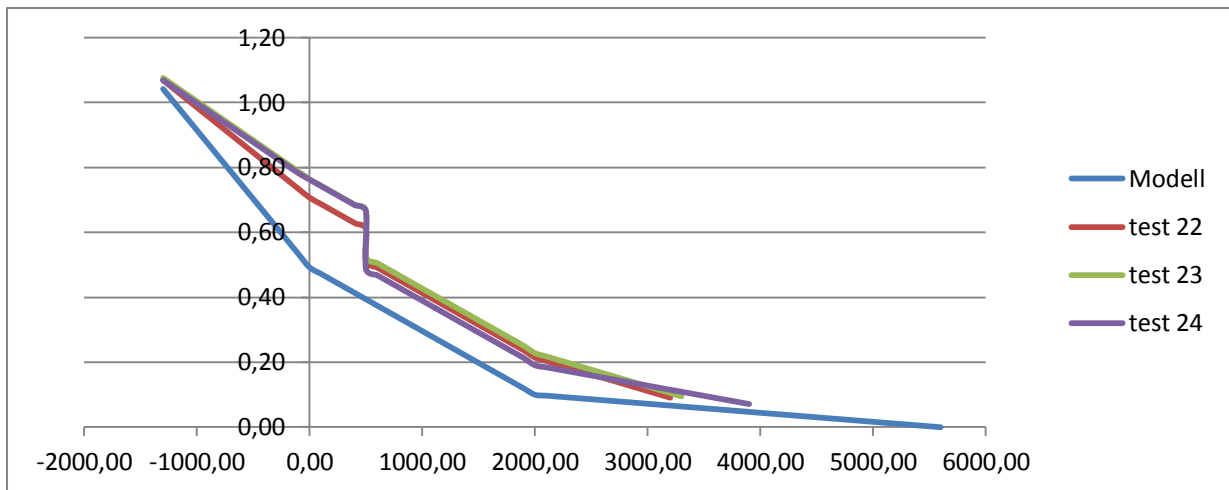
Figur 6.21: Energilinen for test 13-15, lukket kontrolldam plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).



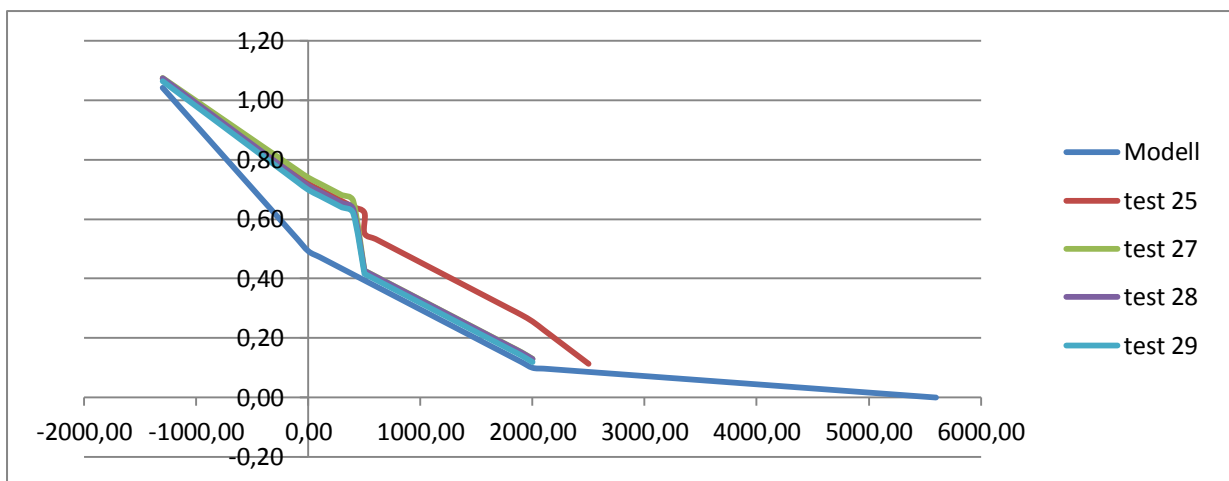
Figur 6.22: Energilinen for test 16-18, 2-spalters kontrolldam plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).



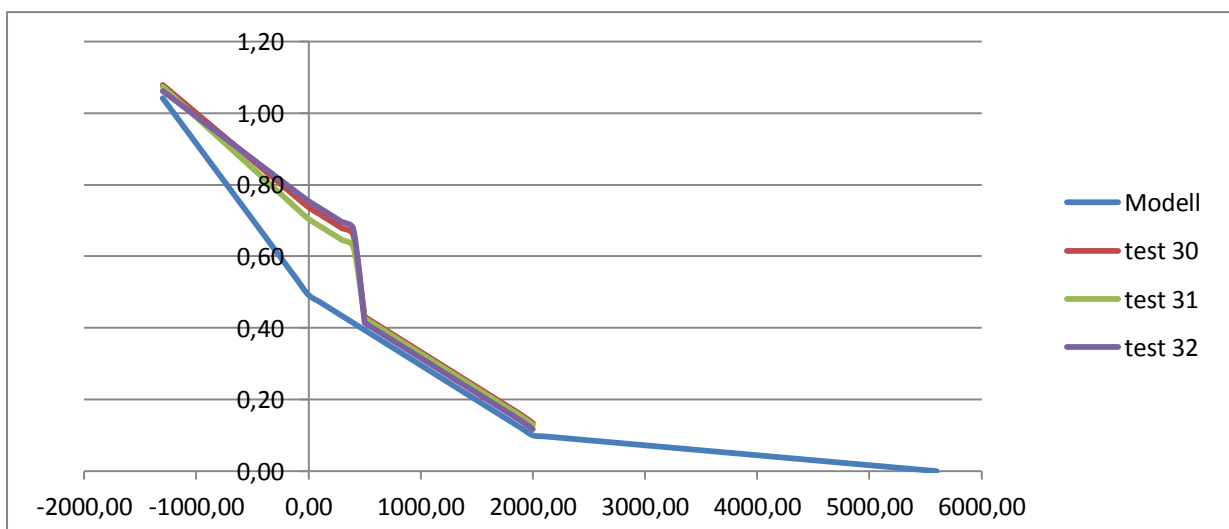
Figur 6.23: Energilinen for test 19-21, 4-spalters kontrolldam plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).



Figur 6.24: Energilinen for test 22-24, kjejlerekke uten lysåpning plassert ved $x=500$, Fiskum (2012).



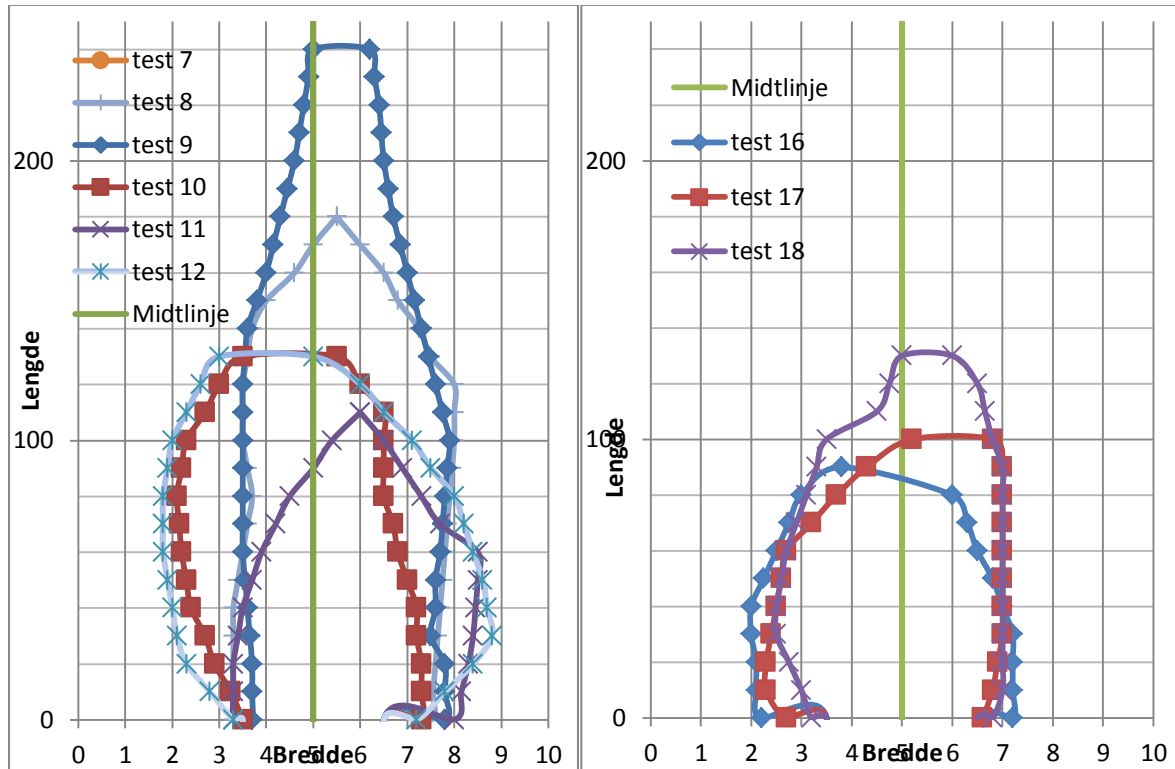
Figur 6.25: Energilinen for test 25, 27-29, 2 kjebler med 50 mm lysåpning plassert ved $x=400$ og 4-spalters kontrolldam ved $x=1200$, Fiskum (2012).



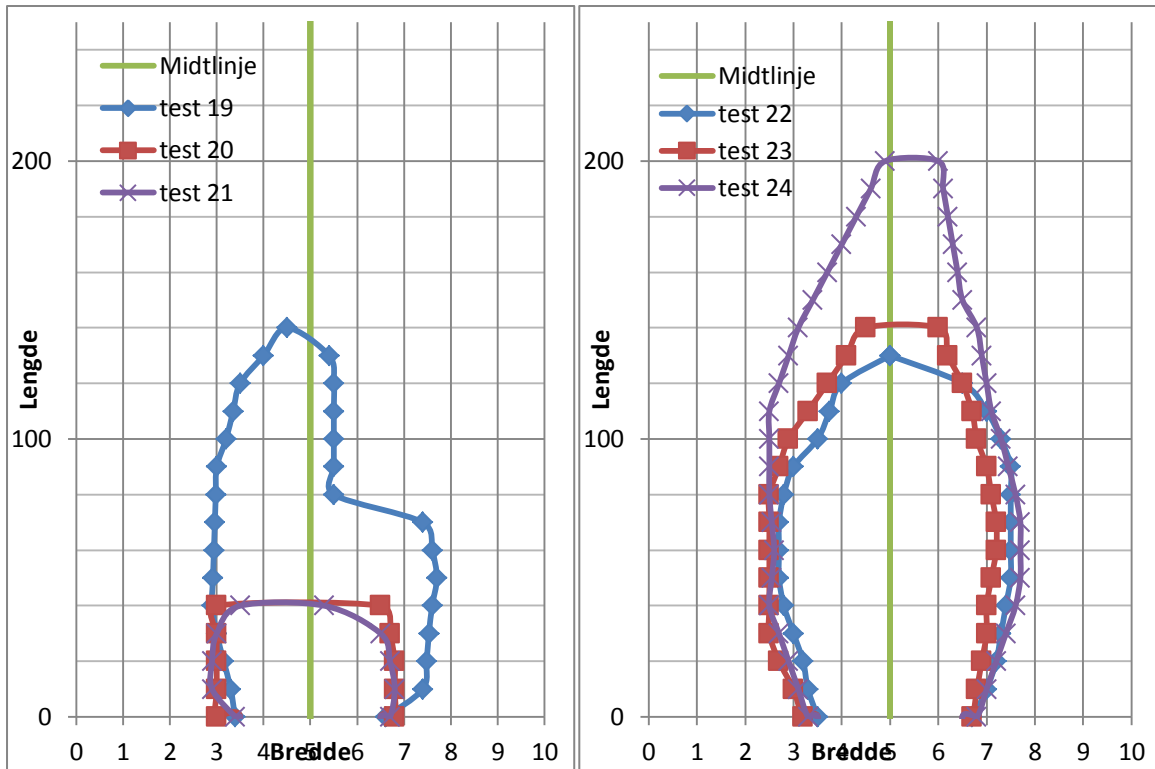
Figur 6.26: Energilinen for test 30-32, 4 kjebler med 50 mm lysåpning plassert ved $x=400$ og 4-spalters kontrolldam ved $x=1200$, Fiskum (2012).

6.2.3 Flytlengde og utbredelse

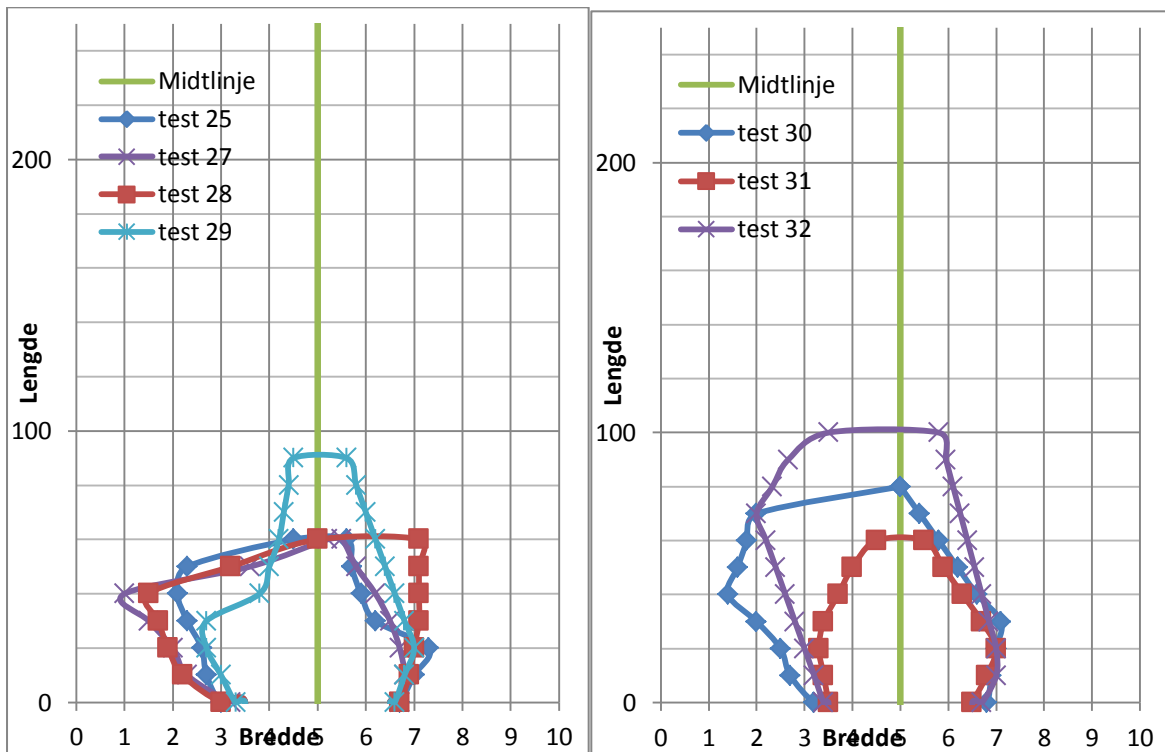
Effekten av sikringstiltakene vurderes ved å se på flytlengden og utbredelsen til skredene, dette er gjort ved hjelp av rutenett som beskrevet i kapittel 0. Etter at skredet har stoppet er det blitt tatt bilder som viser utbredelsen og gjengitt i diagram for enklere å kunne sammenlignes. Ettersom utbredelsen ikke sier noe om mengde masser er Tabell 6.4 laget for at man skal kunne vurdere massene enklere uten å sjekke hvert enkelt bilde.



Figur 6.27: Utbredelse av skredene, t.v. referansetestene, t.h. tester med 2 spalters dam. Figur: Fiskum (2012)



Figur 6.28: Utbredelse av skredene, t.v. 4 spalters dam, t.h. kjebler på linje. Figur: Fiskum (2012)



Figur 6.29: Utbredelse av skredene, t.v. 2 kjebler og 4 spalters dam, t.h. 4 kjebler og 4 spalter dam. Figur: Fiskum (2012)

Test nr	Maks utglidning	Beskrivelse av massene
6	200	Mye masse jevnt fordelt utover
7	100	-
8	180	Mye masse jevnt fordelt utover
9	240	Mye masse jevnt fordelt utover
10	130	Mye masse jevnt fordelt utover
11	110	Meget tykt dekke med masser spesielt øverst tykkelse på opptil 7 cm
12	130	Masser jevnt fordelt, ikke like tykt som test 11, men mye bredere
13	0	Ingen masse å snakke om, mest vann, noen korn her å der bare
14	0	Ingen masse å snakke om, mest vann, noen korn her å der bare
15	0	Ingen masse å snakke om, mest vann, noen korn her å der bare
16	90	Jevnt fordelt en god del masse
17	100	jevnt fordelt, en god del masse
18	130	jevnt fordelt, en god del masse
19	140	Meget ujevnt med masser, tynt dekke etter ca 70 cm
20	40	Lite masser spredt godt utover
21	40	Litt spredt i ytterkantene, men ellers jevnt dekke, ikke så mye masse
22	130	jevnt fordelt med masse, ganske mye masse totalt
23	140	Tykt lag med masse jevnt fordelt
24	200	Masser jevnt fordelt, mye masse som kom helt ned
25	60	lite masser som gled ned på bordet, jevnt fordelt
26	100	masser jevnt fordelt, tynt dekke
27	60	masser jevnt fordelt, men mye inn mot renna fra ca 60 cm og oppover
28	60	Tynt i ytterkantene med en del masse fra 40 cm og oppover
29	90	Tynt dekke i ytterkantene, en del masse liggende fra ca 40 cm og inntil rennen
30	80	Tynt dekke i ytterkantene, en del masse liggende fra ca 30 cm og inntil rennen
31	60	Tynt dekke i ytterkantene, en del masse liggende fra ca 40 cm og inntil rennen
32	100	Lite masser som skled helt ned og stor spredning

Tabell 6.4: Oversikt over utglidningslengder og beskrivelse av utbredelsen med tanke på masser.

6.2.4 Observasjon fra kassen

Ved gjennomføring av forsøkene viste det seg at det var stor variasjon i tiden hovedmengden av masse brukte på å gli ut fra kassen, det er derfor blitt filmet hvordan massene forlater kassen ved hjelp av et kamera som står i bakkant av kassen. I Tabell 6.5 er tiden massene bruker ut fra kassen og en kommentar til hvordan massene forlot kassen. Ved eventuelle masser som gled ut som en fastere masse i slutten av skredet er denne notert med tid for når den forlater kassen i forhold til når luken ble åpnet. Stort sett er det en jevn strøm av masser i starten, som kommentarene i Tabell 6.5 viser kommer det ofte en ublandet masse glidende etter cirka 3 sekunder, men dette varierer noe fra skred til skred.

Test nr.	Tid i kassen	Beskrivelse	Kommentar
13	4	dam1	jevn strøm av masser hele tida
14	4,3	dam2	etter ca 2,5 sek kommer en større mengde masse glidende
15	4,6	dam3	Etter ca 3,5 sek kommer en større mengde glidende
16	5,6	2spalter1	Etter ca 2,5 sek kommer masse glidende
17	4,3	2spalter2	
18	4,6	2spalter3	etter 3,2 kom masse glidende
19	4,9	4spalter1	etter 2,3 sek kom masse glidende
20	4,0	4spalter2	etter ca 2,7 sek kom masse glidende
21	4,3	4spalter3	etter ca 2,4 sek kom masse glidende
22	5,7	kjegle1	Etter ca 3,5 sek kommer en større mengde skliende
23	5,7	kjegle2	en del masse liggende i kassen
24	5,7	kjegle3	jevnt fordelt ut
25	13,4	2 kjegler og dam 1	jevnt ut fram til 5 sek da meget sakte og så kommer en masse gliende etter ca 8 sek
26	6,2	2 kjegler og vinger	jevnt fram til 2,5 sek da kommer en masse gliende ut
27	5,8	2 kjegler og dam 2	masse sklir jevnt fram til 2,9 sek da kommer masse glidende ut
28	6,1	2 kjegler og dam 3	jevnt strøm til 2,8 sek da kommer masse gliende ut
29	5,6	2 kjegler og dam 4	jevn strøm fram til 3,4 sek da kommer masse gliende ut
30	6,4	4 kjegler og dam 1	jevn strøm fram til 3,0 sek da kommer masse glidende ut
31	7,2	4 kjegler og dam 2	jevn strøm fram til 4,5 sek da kommer masse glidende ut
32	6,4	4 kjegler og dam 3	jevn strøm fram til 2,5 sek da kommer masse glidende ut

Tabell 6.5: Oversikt over tider massene brukte ut ra kassen og kommentarer til hvordan de oppførte seg på vei ut.

6.3 Feilkilder

Det viste seg underveis i testingen at vekten på kassen ikke var konstant, dette ble dessverre ikke oppdaget før etter en god del testing. Grunnen til at man oppdaget dette problemet var at man ved innveiling fikk en totalvekt på over 100 kg gjentatte ganger og kun på den ene kassen. Fra test 25 som ble gjennomført med kombinasjonen av sikringsmidler er derfor kassen veiet både full og tom for å få riktig mengde vann i skredet. En hypotese for at dette oppstod er at kassen ble stående en periode uten testing, den ene kassen ble denne perioden stående full og med væske, den andre tom. Det er sannsynlig at den ene kassen da fikk tørket, mens den andre kassen fikk mulighet til å suge opp vann. Vekten for alle testene fra test nr. 25 skal være korrekte, testene fra nr. 13-25 er det større usikkerhet rundt, vil

anta at vannivået var noe for høyt ved kasse A og noe for lavt ved kasse B. Velger som en følge av disse problemene og sette opp en tabell som viser totalvekt for kassen før skredet ble sluppet. Det er under innveiling ikke tatt hensyn til at det oppstår tap av fast masse, dette vil oppstå, men er forsøkt holdt på et minimum.

	kasse	Vekt før skred [kg]	Målt vekt etter skred [kg]
test 15	A		97,4
test 16	B		100
test 17	A		99
test 18	B		100,5
test 19	A		99,4
test 20	B		100,5
test 21	A		100
test 22	B		100,2
test 23	A		99,2
test 24	B		100,7
test 25 ^[1]	A	100	99,6
test 26	B	100	99,3
test 27	A	100	99,4
test 28	B	100	100,3
test 29	A	100	99,8
test 30	B	100	99,6
test 31	A	100	99,7
test 32	B	100	99,9

^[1] veide kassen både før og etter herfra, viste at kasse A veide 38,8 og kasse B 137,6

Tabell 6.6: Vekt innhold i kasse for test 15-32.

Som nevnt i kapittel 6.2.3 er flytlengden meget subjektiv, hvor skal man definere grensen for utglidning av masser. Som Figur 6.30 viser, har jeg prøvd å definere dette ved der massene ligger tydelig (rød linje) og ikke der det kun finnes enkelt korn (gul linje). Dette er ifølge Norem og Sandersen (2012) vanlig i internasjonal målestokk som definisjonen på utløpslengde.



Figur 6.30: Utbredelse av skred og avgrensning markert med rødt, foto: Fiskum (2012).

Som man kan se av Figur 6.14 er hastigheten relativt jevn for alle de innledende testene, test 6 har noe bratt stigningstall og dette kan skyldes at de partikler som var målbare i denne videoen gled nedover i en kanal som følge av tørre masser i front av skredet. Noe av det samme kunne man se i skred 10 der massene i front tydelig er med på å bremse skredets hastighet. Slike utfordringer finnes nesten i alle skredene, men det er i disse testene de kommer tydeligst fram. En annen grunn til ulike hastigheter i skredene eksempelvis test 24 skyldes skrednes utglidning fra kassen, i skred 24 gikk massene som en jevn strøm noe som er med på å skape større hastighet i skredet enn ved at noe av massen først strømmer jevnt for så å komme som en mengde masse igjen etter 3 sekunder.

Det har gjennom testingen mest sannsynlig oppstått forurensing av massene som følge av snekringsarbeider i området. Det viste seg også at lakken som ble benyttet til å dekke rutenettet ikke var spesielt slitesterk og denne har underveis i testingen skalet av. Denne avskalingen har så blitt ført sammen med massene.

Hastighetene målt i skredet er ikke 100 prosent nøyaktige, klossene flyter med skredet, men på grunn av deres størrelse varierer det noe i hvilken grad de flyter med skredet. Dette er det prøvd og tatt hensyn til ved videoanalysen i Tracker, men fortsatt vil det være noe unøyaktighet forbundet med disse målingene.

Flythøyden ble som nevnt målt ved hjelp av ultralydsensor med display som så ble filmet. Flythøyden ble i enkelte forsøk målt til større enn den reelle avstanden ned til modellen, noe av denne "feilmålingen" kan skyldes vibrasjoner på ultralydmåleren da denne er festet til modellen som beveger seg noe idet skredet blir løsnet.

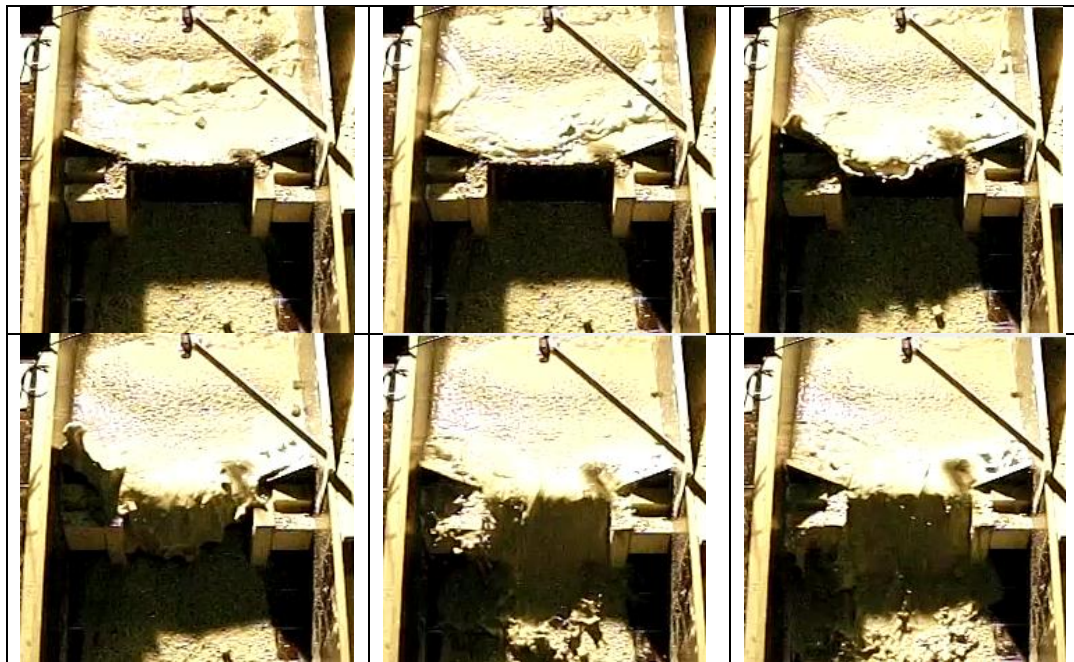
Det vil også være en hvis usikkerhet i målingene som følger av skalaeffekter som oppstår ved en slik nedskalering av flomskred. Men disse vil være like fra skred til skred i forsøkene. Disse skalaeffektene kan gjøre at sikringstiltakene i virkeligheten ikke vil fungere på samme måte som i modellforsøkene.

7 Diskusjon/analyse

Ulike sikringstiltak varierer en del i omfang og dermed også i effekt. Gjennom de tall som framkommer av resultatpresentasjonene kan det være vanskelig å se hvilken effekt de ulike sikringstiltakene faktisk har. I dette kapittelet sees det nærmere på hvert enkelt sikringstiltak i forhold til de parametre som er målt og i hvilken grad de reduserer energien i skredet. For enklere å kunne se på forskjellige egenskaper ved skredene er det også lagt inn en god del bilder fra videoene som beskriver hendelsene tydeligere.

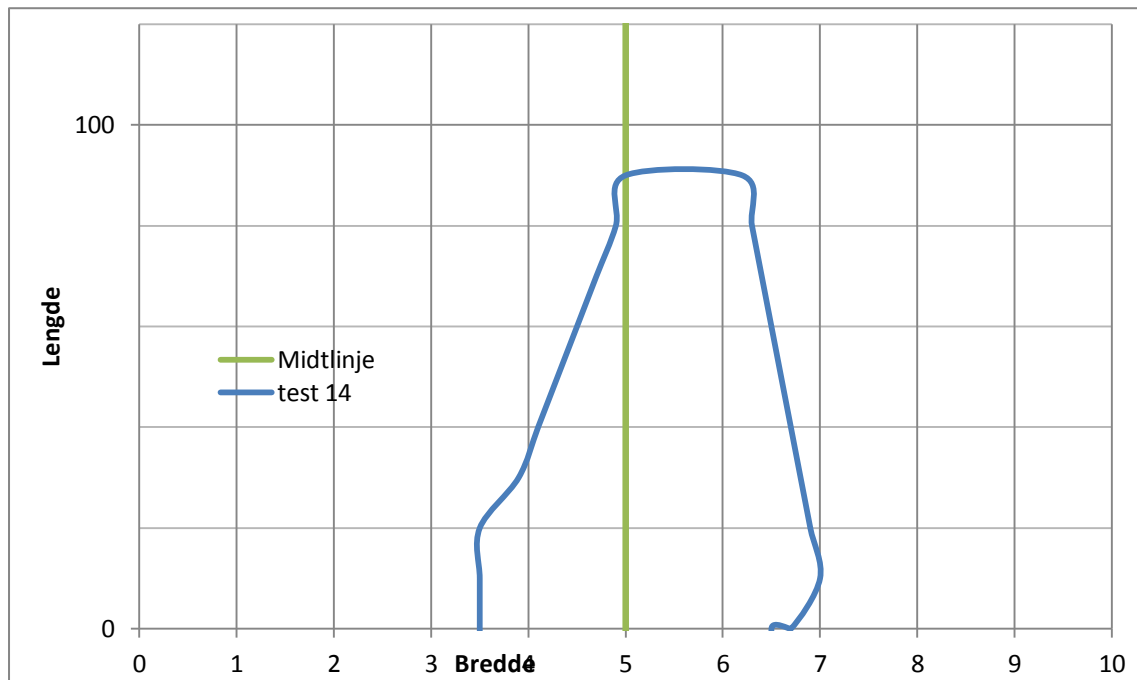
7.1 Lukket kontrolldam

Testene med lukket kontrolldam ble gjennomført som beskrevet i kapitel 5.3.2 "Lukkede kontrolldammer". Testene med lukket kontrolldam viste samme tendens som referansetestene med tanke på flythøyde. De fikk tidlig en topp for så å reduseres igjen. Så fort skredet traff dammen begynte masser å bygge seg opp på oppstrøms side, dette er vist i Figur 6.5. Volumet oppstrøms kontrolldammen ble raskt fylt opp av masse. Som man kan se av Figur 6.5 går flythøyden opp etter cirka 0,7 og 3,0 sekunder. Den økte høyden etter 0,7 sekunder skyldes at massene samles opp oppstrøms for dammen. Etter cirka 3 sekunder får man en bølgetopp som skyldes massene som sklir ut av kassen i slutten av forsøket. For test 14 kan man på video opptakene se denne massen. Figur 7.1 viser bølgen med masse som skyller over dammen etter cirka 3 sekunder. Massen som løsner er ikke like godt blandet med vann som massen som strømmer tidligere, presset på massene som er fanget av sikringstiltaket blir stort og noe skyves forover og over dammen.



Figur 7.1: Test 14 som viser masser som strømmer over dammen etter cirka 3 sekunder. Bilde: Fiskum (2012).

For testene på lukket kontrolldam var massene som strømmte over dammen relativt beskjedene og derfor vanskelig og vurdere utglidningslengden til. For test 13 og 15 var det tilnærmet ingen masser som strømmet ned på rutebordet. For test 14 fikk man noe masse som skled utover på rutebordet slik Figur 7.2 viser. Det var litt overraskende at dammen klarte å fange tilnærmet all masse og kun la vannet passere over dammen. Volumet til de faste massene var på cirka 30 dm^3 og tilsvarte omtrent volumet av dammen. Med vannet var det totale volumet på skredet cirka 50 dm^3 , forventet resultat var derfor at en god del av massene ville flyte over toppen på dammen.



Figur 7.2: Utbredelse test 14, lukket kontrolldam. Figur: Fiskum (2012).

Hastighetene for skredene ble vanskeligere å måle enn forutsatt for skredene med lukket kontrolldam. Dette kan skyldes at skredet relativt fort fylte opp med masser oppstrøms for kontrolldammen og dermed reduserte hastigheten til de partiklene som kunne spores i dette området. Det er derfor kun målt hastighet til skredfronten de første 400 mm. Dette tilsvarer 4 målinger og er derfor et for lite grunnlag til å kunne si noe om hastigheter generelt, selv om disse er nevnt i Tabell 6.3.

Ser man på energilinjen i Figur 6.21, ser man at dammen stopper skredene betydelig. Det var noe masse og en del vann som fløt over, men i den totale sammenheng var dette relativt beskjedne mengder. De tester som er gjennomført viser at lukkede kontrolldammer er effektive til å stoppe flomskred så lenge dammen dimensjoneres til å kunne fange masser på cirka 75 prosent av det totale forventede volumet av skredet.

7.2 2-spalters kontrolldam

Ut fra testene med 2-spalters kontrolldam ser vi at slike sikringstiltak kan fungere. Det var tydelig at massene nedstrøms sikringstiltaket fikk redusert sin hastighet i forhold til den hastigheten massene hadde i utgangspunktet. Se også Figur 6.15 og energilinjene Figur 6.22 som viser dette. Det kan virke litt motsigende at kurvene fra oppstrøms side har kraftig reduksjon på stigningstallet, men dette kan skyldes at sporingspartiklene oppstrøms kontrolldammen fikk redusert hastigheten inn mot dammen. Sammenligner man hastigheten med hva referansetestene (test 6-12, Figur 6.14) viste, er det tydelig at hastigheten til massene bremses ned av 2-spalters kontrolldam. Hastighetene går ned fra cirka 2 m/s til cirka 1,5 m/s, noe som tilsvarer en reduksjon på 25 prosent.

Ved å sammenligne flytlengden mellom referansetestene og testene med 2-spalters kontrolldam ser man at massene stopper tidligere ved bruk av slik kontrolldam enn uten bruk av sikringstiltak. Dette synes også naturlig ettersom dammen i starten av skredet får stoppet massene nesten helt opp, slik at de mister mye av sin energi. Dette vises i Figur 7.3 hvordan massen blir liggende på oppstrøms side før de flyter gjennom kontrolldammen. Etter endt skred ligger det en god del masse oppstrøms for kontrolldammen.



Figur 7.3: Masser som blir skylt opp på oppstrøms side av 2-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).

7.3 4-spalters kontrolldam

Effekten av 4-spalters kontrolldam kan sammenlignes med lukket kontrolldam ettersom dammen samler massene oppstrøms sikringstiltaket, se Figur 7.4. Sikringstiltaket er med på å stoppe meget mye av energien i raset, noe som kan sees av energilinjen vist i Figur 6.23. Figuren viser at det meste av energien i skredet forsvinner som en følge av nedbremsing av hastigheten ved passering av kontrolldammen. Når vi sammenligner effekten av 2- og 4-spalters kontrolldammer ser man at 2-spaltersdammer ikke klarer å redusere hastigheten til massene i samme grad som 4-spalters kontrolldam.



Figur 7.4: Masser som blir stoppet på oppstrøms side av 4-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).

Ser man på hastighetene til skredet før og etter sikringstiltaket vist i Figur 6.16, ser vi at hastigheten går betydelig ned på nedstrøms side av dammen. Etter en tid går hastigheten på massene nedstrøms dammen litt opp som følge av at massene igjen begynner å flyte gjennom sikringstiltaket. Figur 7.5 viser masser som blir skyldt igjennom spaltene på 4-spalters kontrolldam.



Figur 7.5: 4-spalters kontrolldam, massene flyter etter en stund gjennom spaltene på dammen. Foto: Fiskum (2012)

I Figur 7.5 ser vi at i en 4-spalters kontrolldam stopper den første delen av skredet helt opp og samler massen oppstrøms for dammen i cirka 2 sekunder. Takahashi (2007) mener denne oppbremsingen skyldes tilstopping. Han nevner 2 typer tilstopping; den første når partikler treffer spaltene på kontrolldammen og dermed begynner å rotere, neste partikkel blir deretter stoppetopp av første partikkel og det oppstår en dominoeffekt som stopper skredet. Den andre måten er ved at to eller flere partikler kommer samtidig til spalteåpningen og dermed blir kilt fast.

Etter tilstoppingen må massene starte og strømme på nytt, men med betydelig mindre energi enn hva de hadde i det de traff dammen. Massene strømmer da nedstrøms sikringstiltaket nesten likt som ut fra kassen, men mengden er mer jevnt fordelt og strømmer jevnt i 2,5 sekunder eller mer. Energien som 4-spalters kontrolldam reduserer vises også tydelig på utglidningslengden til skredene. Sammenligner man flytlengden for 4 spalters kontrolldam, (Figur 6.28) med referansetestene (Figur 6.27) er det en tydelig reduksjon på flytlengden. Det blir etter at skredet har stoppet opp liggende en god del masse oppstrøms for kontrolldammen slik Figur 7.6 viser.



Figur 7.6: Masser oppstrøms for kontrolldammen etter at skredet har passert og stoppet, foto: Fiskum (2012).

Som nevnt i kapittel 5.3.3 er det en viss fare forbundet med oppsamling av masse oppstrøms for en sikringsdam. Mizuyama (2008) mener dette kan skyldes spaltene på dammen og kan medføre en større erosjon av masser nedstrøms for spaltene. Dette må man ta hensyn til ved en slik damløsning for å unngå eventuelle nye skader som følger av oppsamling av vann og eller flomskred i ekstreme situasjoner. Hvis det i flomsituasjoner bygger seg opp betydelige mengder med vann oppstrøms for dammen vil dammen være med på å øke energien til vannet gjennom å gi vannet en turbulentstrøm som kan erodere massene nedstrøms. Det vil da ifølge Norem og Sandersen (2012) være nødvendig og erosjonssikre terrenget nedstrøms for dammen.

7.4 Kjegler

Kjeglene ble i forsøkene satt opp uten lysåpning. Effekten av dette ble at kjeglene nærmest fungerte som en lav kontrolldam, eller som en terskel som skredet etter kort tid bare fløt over, se Figur 7.7. Visuelt kan det se ut som skredet ikke bremses opp, men ved sporing av partikler ble det funnet at hastigheten ble redusert relativt mye nedstrøms for kjeglene i forhold til den hastigheten som ble målt oppstrøms, se Figur 6.17.



Figur 7.7: Effekten av kjebler der masse flyter over. Foto: Fiskum (2012)

Energilinen viser at energien i skredet går betraktelig ned etter at skredet har passert kjeblene, se Figur 6.24. Ser man derimot på flytlengden for skredene med kjebler som sikringsmidler ga disse ikke noen stor reduksjon på flytlengden, se Figur 6.28. Det at massene sklir ut på denne måten skyldes mest sannsynlig at massene ikke blir stoppet i like stor grad som ved kontrolldammer, derfor vil det ikke være mulig for de første massene å stoppe opp på det flate partiet før de resterende massene kommer. Kjeblene lar massen strømme jevnt over hele tiden. For åpne kontrolldammer blir de første massene fort stoppet av dammen og masser samles oppstrøms før dammen igjen slipper gjennom masser, men da har noe masse allerede stoppet opp på rutebordet. Har massene førts stoppet virker det som om senere masser har problemer med å få disse i bevegelse igjen, de vil da skli over eller stoppe opp.

Etter at skredet har passert ble det liggende igjen noe masse oppstrøms før kjeblene, men denne massen var liten sammenlignet med de mengdene man fikk ved de ulike kontrolldammene. Det kan se ut som Brateng (2005) sine funn med en tetthetsverdi på inntil 0,7-0,8 for kjebler i forbindelse med snøskred også kan være gjeldene for flomskred.



Figur 7.8: Masser liggende oppstrøms for kjebler i test 24 etter at skred har passert, foto: Fiskum (2012).

7.5 2 kjebler og 4-spalters kontrolldam

Forsøkene ble gjennomført med oppsett beskrevet i kapitel 5.3.5. Det ble dessverre vanskelig å måle hastigheten til skredet nedstrøms kjeglene som en følge av at kjeglene "kastet" partikler opp i luften, se Figur 7.9. Som en følge av dette er disse data bare registrert for test 25, se også Tabell 6.3. Dette gjør at vurderingen av kombinasjonstiltak i større grad er basert på videoene enn hva tilfellet er for de andre sikringsmidlene der det har vært enklere å hente ut data for hastighetsmåling.



Figur 7.9: Masser som i test 29 blir "kastet" opp i luften av kjebler og deretter stoppet av 4-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).

Flytlengden i Figur 6.29 viser en betydelig reduksjon i flytlengden for testene med kombinasjonen av sikringstiltak, om man sammenligner med referansetestene. Det var ikke spesielt store forskjeller på flytlengdene for tester med kun 4-spalters kontrolldam sammenlignet med kombinasjonen av kjebler og dam (skred 25-32). Dette kan mest sannsynlig skyldes som beskrevet i kapittel 7.4 at massene ikke blir stoppet opp like hurtig og kun beskjedne mengder renner ned på rutebordet som ved kun 4-spalters dam. Det kan ut fra videoene se ut som om massene stopper i dammen før de begynner å renne videre, i forsøkene med kun 4-spalters kontrolldam skyltes noen av massene over dammen og fløt ned på rutebrettet noe man ikke fikk ved bruk av kjebler oppstrøms. En svakhet ved kombinasjonstiltakene er at dammen er plassert lengre ned i renna ved $x=1200$ isteden for ved $x=500$. De masser som skylles ut av spalteåpningene i dammen har ved en slik plassering større energi når de treffer massene som ligger på rutebordet og kan dermed enklere sette disse i bevegelse.

7.6 4 kjebler og 4-spalters kontrolldam

Kjeglene med en lysåpning på 50 mm viste seg å kaste skredet opp i mye større grad enn hva kjebler uten lysåpning gjorde, se Figur 7.7 og Figur 7.10. Ut fra disse bildene kan det virke som om kjebler bør plasseres med en viss avstand for å bremse ned skredet best mulig. Dette er også noe Brateng (2005) fant under sine forsøk på kjebler i forbindelse med snøskredsikring. Dessverre har det ikke ved forsøkene i denne oppgaven vært mulig å analysere hastigheter etter at skredet har passert kjeglene. Etersom massene kastet opp i luften slik forsøkene viser, tyder dette på at massene mister mye av sin opprinnelige energi idet de passerer kjeglene.



Figur 7.10: Masser som passerer 4 kjebler og fanges av 4-spalters kontrolldam, foto: Fiskum (2012).

Som beskrevet i Tabell 6.4 var det i skred 30-32 tynne dekker med masse som skled ut på rutebordet, Figur 6.29 viser hvordan massene skled ut. Dette tyder på at mye av energien ble stoppet av sikringstiltakene. Ser man på videoene av disse testene (skred 30-32), kan det se ut som om det blir liggende mer masse oppstrøms for sikringstiltakene når man benytter 4 kjepler og 4-spalters kontrolldam i kombinasjon enn ved bruk av andre sikringsmidler testet ut i skred 16-29. Etter endt skred 30-32 ligger mye masse over kjeplene, og over dammen kan det se ut som om det ligger mer masse enn hva tilfellet var ved kun å benytte 4-spalters kontrolldam, se Figur 7.6 og Figur 7.11.



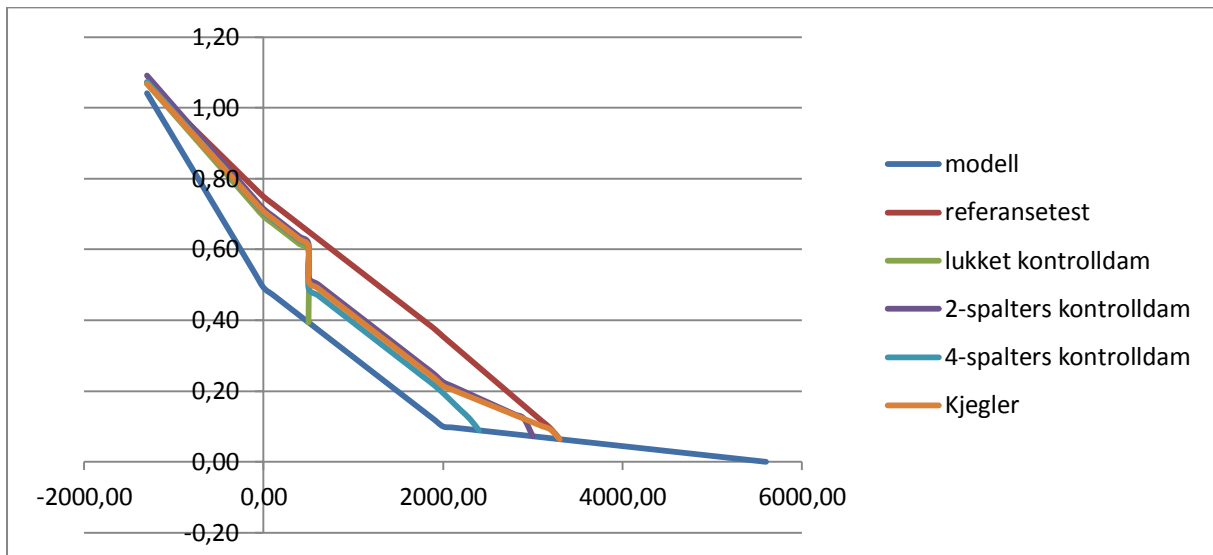
Figur 7.11: Masser etter at skredet har stoppet for test 31, foto: Fiskum (2012).

7.7 Oppsummering og sammenligning

I denne delen sammenligner jeg de ulike sikringstiltakene og ser på deres effekt i forhold til hverandre.

Referansetestene (test 6-12) fikk fram at skredene hadde en tydelig bølgefront når man så på flythøyden i skredene, denne bølgefronten hadde en flythøyde mellom 20-40 mm, se Figur 6.4. Hastigheten til referansetestene hadde et gjennomsnitt på 2,1 m/s og målingene viste økende hastighet nedover i skredbanen. Denne økende hastigheten ser ut til å være grunnen til at referansetestene har noe høyere hastighet enn hva som ble målt for testene med sikringstiltak. Hastigheten til testene med sikringstiltak varierte noe, oppstrøms sikringstiltaket varierte de rundt 2 m/s +/- 0,2 m/s, nedstrøms sikringstiltaket varierte hastigheten noe mer i forhold til hvilke tiltak som ble testet, men de fleste skred ble bremsset opp med 0,4 m/s eller mer.

Alle sikringsmidler testet i denne studien så ut til å fungere ved at de nedstrøms reduserte hastigheten. Ser man på energihøyden for de ulike tiltakene, Figur 7.12 viser denne at 4-spalters kontrolldam er det mest effektive sikringstiltaket med hensyn til tap av energihøyde og redusert flytlengde. Den lukkede kontrolldammen stoppet skredene helt fordi om volumet av skredene var større enn volumet dammen var konstruert for å romme.



Figur 7.12: Energihøyden for ulike enkeltstående sikringstiltak sammenlignet med referansetesten, Fiskum (2012).

Det kan gjennom forsøkene i denne studien virke som om en viss avstand mellom kjegler som sikringstiltak er mer hensiktsmessig enn å sette dem opp uten lysåpning. Kjeglene med lysåpning er ikke testet som enkeltstående sikringsmidler i denne studien, det vil derfor gi en viss usikkerhet å trekke slike konklusjoner ut fra testgrunlaget som er prøvd ut i denne studien. Det kan se ut som om kjegler med små lysåpninger fungerer som terskler, men ettersom de massene som er benyttet i disse forsøkene er relativt ensformige med korn av liten størrelse, er det usikkert hvordan dette vil kunne fungere med grovere masse. Det viste seg at flytlengden ved kjegler uten lysåpning var lik flytlengden for referansetestene, dette til tross for at hastighetene nedstrøms kjeglene ble redusert. Energilinen i Figur 7.12 viser også dette, det kan se ut som om skredets har oppnådd terminalhastighet nedstrøms kjegleraden.

Flytlengden er redusert betraktelig ved utprøving av 4-spalters kontrolldam. Sammenlignes flytlengden med referansetestene får man ved bruk av 4-spalters kontrolldam en reduksjon på over 60 prosent. Ved kombinasjon av sikringstiltak med kjegler og 4-spalters kontrolldam øker effekten til cirka 70 prosent reduksjon i flytlengde. Som man kan se av Figur 7.12 er energilinen for 4-spalters kontrolldam redusert til null betydelig tidligere enn ved testing av de andre sikringstiltakene.

2-spalters kontrolldam gir også en viss reduksjon i hastighet, men denne reduksjonen er betydelig mindre enn ved 4-spalters kontrolldam. Dette vises også på flytlengden for 2-

spaltersdammen som har liten reduksjon sammenlignet med hva man oppnår med 4-spalters kontrolldam.

Ved utformingen av kontrolldammene virker det som om de løsninger som er benyttet på vingene i denne studien virker hensiktsmessig. Det er ingen oppskylling over vingene, noe som er viktig for å unngå at sidene av dreisløpet eroderes i følge Norem og Sandersen (2012). Vinger som skråner inn mot overløpet på dammen virker derfor å være en fornuftig løsning som bør benyttes når dammer velges som sikringstiltak.

7.8 Videre anbefalinger

Denne delen av drøftings-kapitlet er tenkt som en støtte ved senere arbeid med testing av flomskred. Det vil her framstilles ulike utfordringer som ble oppdaget i forbindelse med testingen og også ting som har fungert bra og som derfor bør videreføres. I tillegg kommer det noen forslag til videre arbeider/tester som bør gjennomføres for å få bedre kunnskaper før eventuelle sikringstiltak bygges.

Som tidligere nevnt var planen i denne oppgaven og se på hvordan ulike masser har betydning for flomskred og vurdering av hvordan ulike sikringsmidler fungerer. Ettersom det oppsto en del uforutsette utfordringer i forbindelse med de innledende testene fikk jeg hverken tid nok eller nok tilgjengelig mengde masse til å gjennomføre tester av ulike typer masse. Det ville vært spesielt interessant å se hvordan åpne kontrolldammer fungerer ved andre kornfordelinger enn hva som ble benyttet i denne studien. En av de største utfordringene med dette er å finne masser som vil skli ut fra kassen. Det kan være aktuelt å benytte en mørtelblander eller lignende for å få massene godt blandet og helle de direkte ut fra denne anordningen. Type masse som det ville vært interessant å teste ut er finere masse som skaper høyere poretrykk og dermed bedre flytegenskaper slik Wang og Sassa (2003) har påpekt i sine studier. Det ville i tillegg vært interessant å se på masser av grovere karakter for å se hvordan de åpne kontrolldammene og kjeglene påvirker flomskred av slik karakter.

Det ville i neste omgang vært interessant å se på den effekten masse liggende oppstrøms sikringstiltakene kan få på effekten av dammer som energidreper. Dette vil kunne si noe om hvor ofte og til hvilken risiko man bør velge å gjennomføre vedlikehold. Om det viser seg at en dam fungerer godt som energidreper er det ikke nødvendig med rensing før etter at området er stabilt og man er relativt sikre på at nye skred ikke vil oppstå.

Det kan være aktuelt å utruste lukket kontrolldam med en trykkplate for måling av trykket på skredet når det treffer sikringstiltaket. Denne målingen kan være nyttig for å kunne dimensjonere kreftene i forbindelse med skred bedre, og for å se at de krefter som oppstår i modeller stemmer over ens med de krefter som man finner ved bruk av Formel 3.1.

For å begrense oppgaven ble det valgt ikke å teste ulike oppsett av kjegler. Den eneste variasjonen som ble benyttet var kjegler uten lysåpning og kjegler med 50 mm lysåpning. Testing av kjegler med eller uten lysåpning hadde ganske så ulik innvirkning, da kjegler uten

lysåpning fungerte mer som en terskel enn hva kjeglene med lysåpning på 50 mm gjorde. Som en følge av problemer med å måle hastigheten nedstrøms før kjeglene med lysåpning bør disse testes alene uten kontrolldam nedstrøms for å se hvilken bremseeffekt kjeglene med lysåpning har på skredene. Det ville vært inntresant å se på oppsettet av bremsekjeglere der man varierer avstanden mellom kjeglene. For å finne optimalt avstand ville jeg variert lysåpningen mellom kjeglene fra 25 til 100 mm (25-50-75-100 mm). Det hadde også vært interessant å kunne benytte to rader med kjeglere for å se på effekten av dette i forhold til kun en rad.

Filming ved hjelp av høyhastighetskamera med 300 bilder per sekund er noe som absolutt bør videreføres. Dette gir gode bilder og muligheter for å måle hastigheten relativt nøyaktig i skredene. Man bør være oppmerksom på at slik filming trenger ekstra med lys og at eventuelle skyggepartier ikke vil vises ved analyse av filmene. Det bør med andre ord benyttes flere sterke lysskilder slik at skyggepartier unngås.

For enklere å kunne beskrive skredenes utbredelse på rutenettet ved måling av flytlengde, ville jeg om det skulle vært gjennomført flere tester benyttet et 3D-kamera i bunnen for å måle skredtykkelse og utbredelse. Analysen av effekten til sikringsmidlene ville bli enklere, forutsatt at et slikt kamera har tilstrekkelig nøyaktighet. Det burde også bli benyttet en avstandsmåler nedstrøms sikringstiltaket for å kunne se hvordan flythøyden blir forandret som følger av sikringstiltak.

Gjennom de innledende testene ble det avdekket en del svakheter med modellen. En av de største utfordringene var å få massene til å skli ut fra kassen. Dette medførte at det ikke ble testet med ulike masser i denne oppgaven, da en slik utbygging av modellen ville tatt for lang tid og ikke nødvendigvis ville blitt vellykket. Det ville også blitt et meget omfattende testprogram ved kjøring av 3 tester på de ulike sikringstiltakene med 2-3 ulike masser. Isteden for å få testet flere sikringstiltak måtte man da ha konsentrert seg om 1-2 ulike sikringstiltak og testet disse grundigere med ulike masser enn hva som ble gjort i denne oppgaven. I eventuelle senere tester vil jeg anbefale å vurdere løsninger for å unngå problemer som beskrevet her, slik at ulike masser enkelt kan testes med utprøving av forskjellige sikringstiltak.

8 Konklusjon

Gjennom de forsøk som er gjennomført i denne studien er det tydelig at sikringstiltak har en effekt i forhold til å redusere hastigheter i flomskred. Spesielt viste 4-spalters kontrolldam effektivt å redusere hastigheter til skred ved at masser ble samlet og stoppet oppstrøms for dammen før de igjen begynte og strømme gjennom spaltene med betydelig lavere hastighet. Dette vil kunne være effektiv så lenge massene nedstrøms vil tåle de ekstra belastninger som den ekstra energien massene oppstrøms gir idet de strømmer ut gjennom spaltene på dammen.

Lukket kontrolldam kan ut fra de forsøk som er gjennomført i denne studien dimensjoneres med et volum på 70 prosent av skredmassene for å stoppe hele skredet. Det må påpekes at de testene som er gjennomført er med masser uten stort innhold av finstoff og det kan hende at dersom finstoffinnholdet øker så vil poretrykket slik Wang og Sassa (2003) påpekte bevares og vannet ikke flyte ut av massene og over dammen slik de gjorde i forsøkene i denne studien.

Ved utforming av kontrolldammene kan det se ut som om de løsninger som er benyttet på vingene i denne studien virker hensiktsmessig. Det var ingen oppskylling over vingene, noe som er viktig for å unngå at sidene av drensløpet eroderes i følge Norem og Sandersen (2012). Vinger som skråner inn mot overløpet på dammen virker derfor å være en fornuftig løsning som bør benyttes når dammer velges som sikringstiltak.

Testene med kjegler tyder på at de funn som Brateng (2005) kom fram til ved testing av kjegler som sikringsmidler ved snøskred er gjeldende også for flomskred. Det ser ut som om det er gunstig med en viss intern avstand mellom kjeglene (tetthet på omkring 0,8) for å redusere energien i skredet, men det vil være behov for mer testing for å verifisere dette.

Som Huebl og Fiebiger (2005) uttaler finnes det svært lite forskning på løsninger innen sikringstiltak. Ingeniører baserer somregel sine anbefalinger ved bygging av sikringstiltak på faglige erfaringer og har lite forskning å støtte seg til. Huebl og Fiebiger mener derfor det er viktig med samarbeid verden over for å fremskaffe oversikt over sikringstiltak som fungerer og formidle relevante forskningsresultater fra testing av bruk av sikringsmidler. De resultater som er kommet frem gjennom testene i denne studien kan være av interesse for flere. Man bør arbeide videre med lignende utprøvinger og da spesielt se på sammenhenger mellom ulike masser og effekten ulike sikringstiltak da gir. Nettopp denne variasjonen av masser mener jeg bør være sentral i en slik testing av sikringsmidler. Sikringsmidler har ulike egenskaper noe som kan gjøre at forskjellige sikringsmetoder egner seg for ulike masser.

9 Kilder

- Aage, C. (2003). Modellove ved fysiske modelforsøg. *DANSIS temadag om eksperimentel fluid dynamik (EFD) på FORCE Technology* (s. 15). Lyngby, Danmark: Danmark Tekniske Universitet.
- Brateng, L. (2005). *Laboratorieforsøk for utforming av terrengtiltak mot snøskred*. Trondheim: Norges Teknisk Naturvitenskaplige Universitet, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- Brown, D. (2012). *Tracker - Video analysis and modeling tool*. Hentet 02 12, 2012 fra <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>
- Carroll, M., Edwards, V., & Jackson, P. (2007). *Investigating the influence of debris flow parameters when scaling physical models*. University of Canterbury, New Zealand: ENNR 429: NATURAL RESOURCES ENGINEERING PROJECT.
- Fiskum, E. (2011). *Flomskred - litteraturstudie og innledende forsøk for masteroppgave våren 2012*. Trondheim: NTNU-BAT-faggruppe for Geoteknikk.
- Hákonardóttir, K., Jóhannesson, T., Tiefenbacher, F., & Kern, M. (2001). *A laboratory study of the retarding effect of breaking mounds in 3, 6 and 9 m long chutes*. Reykjavik: Vedurstofa Íslands.
- Hiller, P., & Jenssen, I. (2009). *Modellforsøk med flomskred mot bruer*. Trondheim: Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.
- Huebl, J., & Fiebiger, G. (2005). Debris-flow mitigation measures. I M. Jakob, & O. Hungr, *Debris-flow hazards and Related Phenomena* (ss. 445-487). Chichester, UK: Springer.
- Hungr, O., McDougall, S., & Bovis, M. (2005). Entrainment of material by debris flow. I M. Jakob, & O. Hungr, *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (ss. 135-158). Chichester, UK: Springer.
- IRASMOS. (2008). *D2.1 – Countermeasures from Project no. 018412*. IRASMOS.
- Iverson, R. M. (2005). Debris-flow mechanics. I M. Jakob, & O. Hungr, *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (ss. 105-134). Chichester, UK: Springer.
- Iverson, R. M., & Denlinger, R. P. (2001, januar 10). Flow of variably fluidized granular masses. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, vol. 106 no. B1, ss. 537–552.
- Iverson, R. M., DeNatale, J. S., Major, J. J., LaHusen, R. G., Fiegel, G. L., & Duffy, J. D. (1999). *Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flows*. Vancouver, Washington: U.S. GEOLOGICAL SURVEY.

- Jakob, m., & Hungr, O. (2005). *Debris-flow hazards and Related Phenomena*. Chichester, UK: Springer.
- Jóhannesson, T., Gauer, P., Issler, D., & Lied, K. (2009). *The design of avalanche protection dams - Recent practical and theoretical developments*. Bruxelles, Belgia: European Commission, publikasjon 23339, ISBN 978-92-79-08885-8.
- Lien, H.-P. (2003). Design Model of Slit Dam for Debris Flow Control. *International Journal of sediment Research, Vol. 18, No. 1*, ss. 74-87.
- Mizuyama, T. (2008). Structural Countermeasures for Debris Flow Disasters. *International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 1, No. 2*, ss. 38-43.
- Myles, F., & Parkin, E. (2008). *Debris Flows in the New Zealand Context*. ENNR 429 : NATURAL RESOURCES ENGINEERING PROJECT.
- Norem, H. (2010). *Evaluation of the flow characteristics of the potential Åknes rock slide, Norway. Contribution to the design of laboratory experiments of wave propagation*. SINTEF-rapport: SBF IN A10203.
- Norem, H., & Sandersen, F. (5. mai 2011). *Flom og sørpeskred- Utkast til Håndbok om sikring av veger som er utsatt for vannrelaterte skred*. Statens vegvesen.
- Norem, H., & Sandersen, F. (Februar 2012). *Flom- og Sørpeskred - høringsutgave av veileder*. Statens vegvesens rapporter nr. 73.
- Norwegian Public Roads Administration. (1994). *Handbook No. 174: Snow engineering for roads - about snow avalanches and drifting snow*. Oslo: Norwegian Public Roads Administration, Handbook Division.
- Okubo, S., Ikeya, H., Ishikawa, Y., & Yamada, T. (1997, volume 64/1997). Development of new methods for countermeasures against debris flows. *Earth Sciences*, ss. 166-185.
- Peakall, J., Ashworth, P., & Best, J. (1996). Physical modelling in fluvial geomorphology: principles, applications and unresolved issues. I B. Rhoads, & C. Thorn, *The Scientific Nature of Geomorphology: Proceedings of the 27th Binghamton Symposium in Geomorphology held 27-29september1996* (ss. 221-253). Binghamton, USA : John Wiley & Sons Ltd.
- Rageh, O. S. (1999). Effect of baffle blocks on the performance of radial hydraulic jump. *Fourth International Water Technology Conference IWTC 99*, (ss. 225-269). Alexandria, Egypt.
- Sellevoid, J. (2010). *Prosjektoppgave 2010-"sikringsmidler mot vannrelaterte skred"*. Trondheim.

Steen, S. (14. september 2011). *General Modelling and Scaling Laws*. Hentet 02 10, 2012 fra ivt.ntnu.no: http://www.ivt.ntnu.no/imt/courses/tmr7/lecture/Scaling_Laws.pdf

Takahashi, T. (2007). *Debris flow - Mechanics, Prediction and Countermeasures*. London: Taylor & Francis Group, LLC.

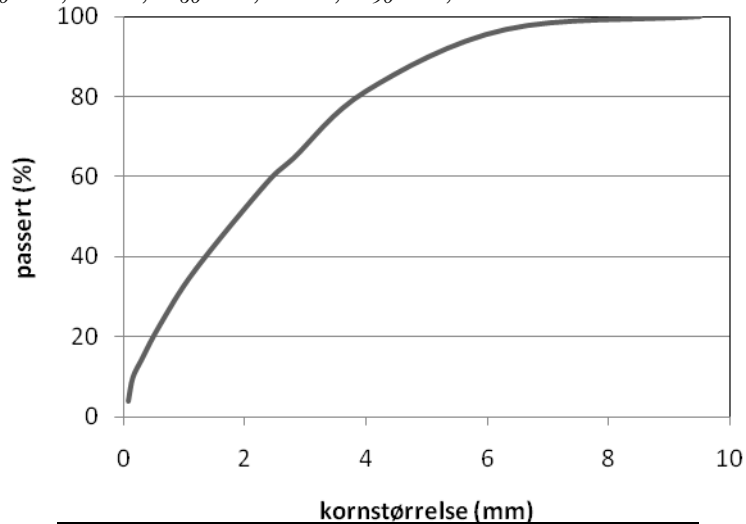
Wang, G., & Sassa, K. (2003). Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology* 69,, ss. 109-125.

Sikteprøve

Dato: 24.06.2009
Navn: Priska Hiller

Startmasse: 1690,5 g
Prøven ble ristet automatisk i 12 min.

De lineært interpolerte karakteristiske kornstørrelsene er:
 $D_{10} = 0,2$ mm, $D_{50} = 1,9$ mm, $D_{60} = 2,5$ mm, $D_{90} = 5,3$ mm



siktåpning (mm)	innveide masser (g)	sum masser (g)	% passert (%)
9,5	0	0	100,0
6,3	54,6	54,6	96,8
4	259,8	314,4	81,4
2,8	284	598,4	64,6
2,36	103,2	701,6	58,5
1,18	368,6	1070,2	36,7
0,6	231,4	1301,6	23,0
0,3	145,1	1446,7	14,4
0,15	78,7	1525,4	9,8
0,075	100,5	1625,9	3,8
<0,075	64,5	1690,4	0,0