

## Flomskred

Litteraturstudie og modellforsøk med voller  
som sikringstiltak

**Lise Fø Sund Christiansen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, BAT

Medveileder: Arnstein Watn, SINTEF  
Harald Norem, Statens vegvesen

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





Oppgavens tittel: Flomskred – Litteraturstudie og modellforsøk med voller som sikringstiltak	Dato: 10.06.2013		
	Antall sider (inkl. bilag): 125		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Lise Føsum Christiansen			
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal			
Eksterne faglige veiledere: Harald Norem (SVV) og Arnstein Watn og Maj Gøril Glåmen Bæverfjord (SINTEF)			

Ekstrakt:

Klimaendringene tilsier endret temperatur, mer nedbør og med høyere intensitet. Kombinasjonen av økt nedbørintensitet og temperaturøkning medfører økt hyppighet av flomskred, med større styrke og på andre steder enn tidligere. Flomskred er granulære materialer og vann som opptrer som et kontinuum og bevegelsen av massene skyldes gravitasjonskraften. Skredmassen har et høyt vanninnhold og dermed stor mobilitet. Partikkelinnholdet er omtrent 40 – 70 % i forhold til det totale skredvolumet.

Studien tar for seg generelle egenskaper ved flomskred, samt voller som sikringstiltak. Det utføres modellforsøk for å undersøke skredhendelsen / -mekanismene, effekten av kanalisering ved bruk av sidevoller, oppskyllingshøyden ved bruk av fang- og ledevoll, samt utløpslengden ved bruk av ledevoll. Analysen og diskusjonen i oppgaven baserer seg på totalt 40 forsøk.

Modellforsøkene viser følgende hovedfunn:

- Det er store variasjoner i skredmassenes strømming nedover skredbanen og i formen til skredfronten som følge av at suspensjonen separerer seg og gir områder med «fryste» masser og vannrike masser.
- Hastighetsforløpene viser store variasjoner og uventede sprang, som ikke korrelerer med skredbanens vinkelendring og endring av skredretningen, som et resultat av variasjon i strømmingen og av at skred kommer i pulser.
- Ved bruk av sidevoller kanaliseres skredmassene slik at flyteegenskapene opprettholdes lenger og dette fører til lengre og smalere utbredelse. Bruk av ledevoller kan også gi kanaliseringseffekt hvis energitapet som følge av retningsendringen er mindre enn bevaringen av energi som følge av at skredet ikke får bre seg utover.
- Skredmassene skyller oppover og slår tilbake i møte med fang- og ledevoll. Oppskyllingen øker med økende treffvinkel, mens helningen på skredsiden av vollen er av liten betydning. Tilbakeslaget avhenger av treffvinkelen og helningen på skredsiden av vollen og reduseres når vinklene reduseres.

Stikkord:

1. Flomskred
2. Flomskredsikring
3. Voll
4. Modellforsøk

(sign.)





NORGES TEKNISK-  
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET  
INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT

TBA4900 Geoteknikk Masteroppgave, våren 2013

Stud. techn.

**Lise Føsund Christiansen**

## **Flomskred – Litteraturstudie og modellforsøk med voller som sikringstiltak**

*Debris flow slides – Literature study and model testing with deflection walls as safety measures*

### **Bakgrunn**

Flomskred er en hendelse i naturen som har kommet stadig mer i fokus de senere årene. Flomskred utløses gjerne i bratte skråninger i forbindelse med høy nedbør, ofte kombinert med temperaturstigninger og snøsmelting. Klimaendringer med raskere og større endringer i temperatur, nedbør og intensitet er i forskningsmessig fokus og etater som Statens vegvesen (SVV), Jernbaneverket og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har store utfordringer med å håndtere denne type naturfare og de skader den medfører. Det er tidligere bygget opp en modell i forbindelse med et pilotprosjekt med testing av flomskred mot bruer utført av Hiller og Jenssen, «Modellforsøk med flomskred mot bruer». Dette er senere fulgt opp med en masteroppgave av Espen Fiskum, «Flomskred – testing av ulike sikringstiltak i modellforsøk», som har gjennomført en litteraturstudie og modellforsøk og sett på ulike sikringsmidler og hvordan disse kan testes gjennom modellforsøk.

SINTEF Byggforsk gjennomfører en satsning, KLIMA 2050, som ser på klimatilpasning av bygninger og infrastruktur der flom og skred er ett av temaene som inngår. Statens vegvesen gjennomfører et prosjekt, NIFS - Naturskade, infrastruktur, flom og skred, i samarbeid med Jernbaneverket og Norges vassdrags- og energidirektorat hvor skred og flomsikring er et av delprosjektene.

### **Innhold**

Oppgaven gir innføring i flomskred generelt og i voller som sikringstiltak spesielt, ved hjelp av en litteraturstudie. Det utføres instrumenterte modellforsøk for å undersøke selve skredhendelsen / -mekanismene og for å se på sammenhengen mellom lengde på sidevoller og utløp av skredmasser, oppskyllingshøyde ved bruk av fang- og ledevoll, samt utløpslengden ved bruk av ledevoll.

### **Omfang og levering**

Oppgaven har et omfang på 30 studiepoeng, tilsvarende 100 % av et semester.

Arbeidet skal leveres i form av en teknisk rapport innen 10. juni 2013. To innbundne kopier leveres, samt en digital versjon av oppgaven med alle laboratoriedata som er fremkommet, både rådatafiler og behandlede data og eventuelle film / videoopptak.

Biveiledere: Harald Norem, Statens vegvesen, og Arnstein Watn og Maj Gøril Glåmen Bæverfjord, SINTEF Byggforsk.

**Arnfinn Emdal**

Amanuensis

Institutt for Bygg, Anlegg og Transport

Faggruppe for Geoteknikk



## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i faget TBA4900 – Geoteknikk ved studieprogrammet for Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Kurset er en obligatorisk del av masterstudiet innen Geoteknikk og arbeidet med oppgaven har foregått vårsemesteret 2013. Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven «Flomskred – litteraturstudie og innledende modellforsøk for masteroppgave våren 2013» utført av undertegnede høsten 2012.

Masteroppgaven er utført som et samarbeid mellom NTNU, SINTEF Byggforsk og Statens vegvesen. SINTEF Byggforsk sin interesse i oppgaven bygger på deres eget prosjekt Klima 2050. Statens vegvesens har et samarbeidsprosjekt med Jernbaneverket og Norges vassdrags- og energidirektorat, NIFS – naturskade, infrastruktur, skred og flom, som er grunnlaget for deres interesse.

Arbeidet består av en litteraturstudie og modellforsøk for å undersøke skredhendelsen / –mekanismene i flomskred og for å se på voller som sikringstiltak mot flomskred i form av side-, fang- og ledevoll. Modellforsøkene utføres på en eksisterende modell ved Vassdragslaboratoriet på NTNU.

Oppgaven er gjennomført ved hjelp av dyktige fagfolk fra NTNU, SINTEF Byggforsk og Statens vegvesen. Mange personer er involvert i forbindelse med utførelse av forsøkene og veiledning til rapporten. Særlig takkes Harald Norem, Arnstein Watn, Maj Gøril Glåmen Bæverfjord og Arnfinn Emdal for god diskusjon rundt forsøkene og veiledning til rapporten samt engasjement rundt temaet. Gunnar Winther, Einar Husby og Torgeir Jensen har vært til god hjelp i forbindelse med utføring av forsøk.

Trondheim 10. juni 2013

---

Lise Føsund Christiansen





## Sammendrag

Klimaendringene tilsier endret temperatur, mer nedbør og med høyere intensitet. Kombinasjonen av økt nedbørintensitet og temperaturøkning medfører økt hyppighet av flomskred, med større styrke og på andre steder enn tidligere. Flomskred er granulære materialer og vann som opptrer som et kontinuum og bevegelsen av massene skyldes gravitasjonskraften. Skredmassen har et høyt vanninnhold og dermed stor mobilitet. Partikkelinnholdet er omtrent 40 – 70 % i forhold til det totale skredvolumet.

Studien tar for seg generelle egenskaper ved flomskred, samt voller som sikringstiltak. Det utføres modellforsøk for å undersøke skredhendelsen / -mekanismene, effekten av kanalisering ved bruk av sidevoller, oppskyllingshøyden ved bruk av fang- og ledevoll, samt utløpslengden ved bruk av ledevoll. Analysen og diskusjonen i oppgaven baserer seg på totalt 40 forsøk.

Modellforsøkene viser følgende hovedfunn:

- Det er store variasjoner i skredmassenes strømming nedover skredbanen og i formen til skredfronten som følge av at suspensjonen separerer seg og gir områder med «fryste» masser og vannrike masser.
- Hastighetsforløpene viser store variasjoner og uventede sprang, som ikke korrelerer med skredbanens vinkelendring og endring av skredretningen, som et resultat av variasjon i strømmingen og av at skred kommer i pulser.
- Ved bruk av sidevoller kanaliseres skredmassene slik at flyteegenskapene opprettholdes lenger og dette fører til lengre og smalere utbredelse. Bruk av ledevoller kan også gi kanaliseringseffekt hvis energitapet som følge av retningsendringen er mindre enn bevaringen av energi som følge av at skredet ikke får bre seg utover.
- Skredmassene skyller oppover og slår tilbake i møte med fang- og ledevoll. Oppskyllingen øker med økende treffvinkel, mens helningen på skredsiden av vollen er av liten betydning. Tilbakeslaget avhenger av treffvinkelen og helningen på skredsiden av vollen og reduseres når vinklene reduseres.

## Abstract

Climate changes imply a change in temperature, increased rainfall and with higher intensity. The combination of increased rainfall intensity and raise in temperature causes increased frequency of debris flows, with more strength and they may occur in new places. Debris flows are a mixture of granular material and water which behaves as a continuum and the movement of the masses is a result of gravity. The avalanche mass has a high water content and hence a large mobility. The particle content is about 40 – 70 % of the total avalanche volume.

This study addresses general properties in debris flows and also deflection walls as safety measures. Model testing will be performed to examine the landslide event and mechanism, the effect of using channels and the height of the floating masses up on the walls while using a deflection wall angled to the direction of the masses, as well as the discharge length. The analysis and discussion in this study is based on a total of 40 tests.

### Main findings:

- The flow of the masses down the track and the shape of the front show large varieties as a result of the separation of the suspension which gives areas with high water content and areas with low water content.
- The paths of velocity show large variations and unexpected leaps, which do not correlate to the changes of the channel angels or the angle of the debris flow, due to variety in the flow and to the debris flows coming in pulses.
- When using walls to channel the masses the flow will maintain its ability to flow over a longer distance and this will lead to a longer and narrower distribution. The effect of using channels may also occur when using deflection walls with a low angle compared to the flow angle to lead the masses, as long as the loss of energy due to the change in direction is less than the conservation of energy as the masses are restricted from spreading out.
- The masses are flowing up the walls which are angled in the masses` direction and are then getting an outwards direction. How high up the masses will flow increases with the increasing angle between the wall and the masses, while the angle on the flow side of the wall will be of small significance. The outward direction of the masses depends on both the angle between the masses and the wall and on the angle at the flow side of the wall and will decrease when the angles are decreased.

## Innholdsfortegnelse

Forord .....	i
Sammendrag .....	iii
Abstract .....	iv
Figurliste.....	viii
Tabelliste .....	xi
Formelliste.....	xii
Forkortelser .....	xiii
Ordforklaringer.....	xiii
Symbolliste .....	xiv
1 Innledning.....	1
2 Litteratur.....	2
2.1 Generelt om flomskred .....	2
2.2 Initiering av flomskred .....	4
2.3 Inndeling av flomskred .....	5
2.3.1 Turbulent – gjørmete flomskred.....	5
2.3.2 Viskøse flomskred.....	6
2.3.3 Steinrike flomskred .....	6
2.4 Strømning .....	7
2.4.1 Krefter .....	9
2.4.2 Hastighet.....	11
2.4.3 Energi .....	13
2.5 Utløpslengde.....	17
2.6 Sikringstiltak.....	18
2.6.1 Voller.....	20
3 Modellforsøk .....	31
3.1 Bakgrunn .....	31

3.2	Modell.....	32
3.3	Skredmateriale .....	35
3.4	Forsøksoppsett .....	35
3.5	Utstyr, oppsett og bruksområde.....	38
3.6	Initiering av forsøkene og initialbetingelser.....	38
3.7	Testforsøk .....	39
4	Resultater.....	41
4.1	Strømning .....	41
4.1.1	Observasjoner fra kassen.....	41
4.1.2	«Fryste» masser .....	43
4.1.3	Strømning i rennen, $x = - 3,1 - 0$ m .....	43
4.1.4	Strømning på rutebordet, $x = 0 - 3,6$ m .....	45
4.1.5	Hastighetsforløp .....	46
4.1.6	Energilinjer.....	49
4.2	Oppskyllingshøyde og utbredelse.....	52
4.2.1	Oppskyllingshøyde, fang- og ledevoll .....	53
4.2.2	Utbredelse.....	53
4.3	Flyte­høyde .....	57
4.4	Feilkilder.....	60
5	Analyse og diskusjon .....	62
5.1	Strømning .....	62
5.1.1	Observasjon fra kassen.....	62
5.1.2	«Fryste» masser.....	63
5.1.3	Strømning i rennen, $x = - 3,1 - 0$ m .....	63
5.1.4	Strømning på rutebordet, $x = 0 - 3,6$ m .....	65
5.1.5	Hastighet og energi.....	66
5.2	Oppskyllingshøyde og utbredelse.....	72

5.2.1	Oppskyllingshøyde, fang- og ledevoll .....	72
5.2.2	Utbredelse.....	76
5.3	Flyte­høyde .....	80
5.4	Anbefalinger til videre arbeid.....	83
6	Konklusjon .....	86
7	Referanseliste .....	88
	Vedlegg .....	90

## Figurliste

Figur 1: Klassifisering av skredtyper ut fra forholdet mellom stein / jord, vann og snø / is (Norem & Sandersen 2012 Figur 2.1). .....	3
Figur 2: Utløsningsårsaker for flomskred (basert på (Norem & Sandersen 2012 Figur 3.1)). ..	4
Figur 3: Flomskredløp i Ålvunddalen, nord for Sundalsøra (foto: Emdal, NTNU).....	5
Figur 4: T.v. laminær strømning og t.h. turbulent strømning i et rør (Crowe et al. 2010 Figur 4.7).....	9
Figur 5: Strømningssituasjoner i vassdrag (Sæterbø et al. 1998 Figur 3.1). .....	10
Figur 6: Akselererende og retarderende krefter som virker på skredmassene (Norem & Sandersen 2012 Figur 3.19). .....	11
Figur 7: a) Illustrasjon av energihøyder og b) Illustrasjon av energilinje i forhold til terreng (basert på (Norem & Sandersen 2012)).....	14
Figur 8: Energibetraktning (basert på (Brateng 2005 Figur 3.4)). .....	14
Figur 9: Kontinuitetsprinsipp (Brateng 2005 Figur 3.2). .....	15
Figur 10: Energilinjer (personlig kommunikasjon H. Norem 11. februar 2013). .....	16
Figur 11: Forslag til prosedyre for beregning av utløpslengde (Norem & Sandersen 2012 Figur 3.28).....	17
Figur 12: Geonett (Steinsenteret). .....	21
Figur 13: Armert bratt skråning i Hallingtorv (foto: SINTEF). .....	21
Figur 14: Foto av erosjonssikring i Hallinggrovi (Høydal & Kronholm 2013 Figur 28). .....	22
Figur 15: Eksempel på bruk av sidevoller og ledevoll. T.v. sidevoller for å hindre at flomskred brer seg ut til siden i skredløpet og t.h. bruk av ledevoll for å sikre vei (Norem & Sandersen 2012 Figur 6.10-11).....	23
Figur 16: Bratte skråninger med armert jord (foto: SINTEF). .....	25
Figur 17: Skisse av vollens effekt på skred. Figur a) viser hvordan skredet legger seg oppover vollen og skredhalen strømmer over. Figur b) viser mulig trykkbølge ved steil voll. ....	26
Figur 18: Illustrasjon av effektiv vollhøyde (Norem & Sandersen 2012 Figur 6.14). .....	27
Figur 19: Forslag til utforming av voll og utgravningsområdet (Norem & Sandersen 2012 Figur 6.15). .....	29
Figur 20: Foto av fangvoll med bratt tørrmur langs Rv 7 Indre Rotagjelet, Hordaland (Norem 2011 Figur 8.25). .....	30
Figur 21: Illustrasjon av lagringsareal for snøskred ved bruk av fangvoll (Norem 2011 Figur 8.24).....	30

Figur 22: Skisse av effekten av kanalisering på utløpslengde. ....	32
Figur 23: Forsøksmodell (foto: Christiansen). ....	33
Figur 24: Skisse av modell, sett ovenfra og fra siden. ....	34
Figur 25: Skisse av rutebord, før og etter utbygging.....	34
Figur 26: Kasse (foto: Christiansen). ....	34
Figur 27: Skredmateriale på millimeterpapir (foto: Christiansen). ....	35
Figur 28: Massenens plassering i kassen før omrøring og initiering av skred (foto: Christiansen) .....	40
Figur 29: Vegg av masse og skredfront med grovkornet suspensjon, skred S1(-) (foto: Christiansen).....	42
Figur 30: Tiden massen bruker på å forlate kassen [s] og masse igjen i kassen etter skred [kg] for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll.....	42
Figur 31: "Fryst" materiale markert med rødt, t.v. skred S2K(1,2) og t.h. skred S1TV(90)H(90) (foto: Christiansen). ....	43
Figur 32: Form på skredfront i nedre renne, S3K(2,4) (foto: Christiansen). ....	44
Figur 33: Strømning og separasjon i S1TV(20)H(72) i rennen (foto: Christiansen). ....	44
Figur 34: Dannelse av ny skredfront, ca. 10 hundredeler mellom hvert bilde, fra skred S4K(2,4) (foto: Christiansen). ....	45
Figur 35: Bevegelse i møte med fangvoll for S2TV(90)H(90). T.v. oppskyllingshøyde, i midten bevegelse sideveis og tilbakeslag og t.h. bevegelse i massene grunnet tilbakeslag (foto: Christiansen).....	45
Figur 36: Strømning langs voll, tilbakeslag gir ny front som brer seg utover, S1TV(20)H(72) (foto: Christiansen).....	46
Figur 37: Illustrasjon av skredets løpsretning i forhold til x-akse.....	46
Figur 38: Hastighetsforløp, forsøk med kanallengde 0 m, 1,2 m og 2,4 m.....	46
Figur 39: Hastighetsforløp, forsøk uten kanal og voll. ....	47
Figur 40: Hastighetsforløp, forsøk med fangvoll med helning 90 °, 72 ° og 34 °. ....	47
Figur 41: Hastighetsforløp, forsøk med ledevoll med treffvinkel 40 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °. ....	48
Figur 42: Hastighetsforløp, forsøk med ledevoll med treffvinkel 20 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °. ....	48
Figur 43: Energilinje, forsøk med kanallengde 0 m, 1,2 m og 2,4 m.....	49
Figur 44: Energilinje, forsøk uten kanal og voll. ....	50
Figur 45: Energilinje, forsøk med fangvoll med helning 90 °, 72 ° og 34 °. ....	50

Figur 46: Energilinje, forsøk med ledevoll med treffvinkel $40^\circ$ og helning $90^\circ$ , $72^\circ$ og $34^\circ$ . .....	51
Figur 47: Energilinje, forsøk med ledevoll med treffvinkel $20^\circ$ og helning $90^\circ$ , $72^\circ$ og $34^\circ$ . .....	52
Figur 48: Illustrasjon av oppskyllingshøyde. ....	53
Figur 49: Maksimal oppskyllingshøyde og høyde på gjenliggende masser. ....	53
Figur 50: Definisjon av utløpslengde, t.v. S2K(0) og t.h. S1TV(40)H(72) (foto: Christiansen). .....	54
Figur 51: Utløpslengde for forsøk varierende kanallengde. ....	54
Figur 52: Utløpslengde for forsøk uten voll og med ledevoll. ....	55
Figur 53: Utbredelse, forsøk med kanallengde 0 m, 1,2 m og 2,4 m. ....	55
Figur 54: Utbredelse, forsøk uten kanal og voll. ....	56
Figur 55: Utbredelse, forsøk med ledevoll med treffvinkel $40^\circ$ og helning $90^\circ$ , $72^\circ$ og $34^\circ$ . .....	56
Figur 56: Utbredelse, forsøk med ledevoll med treffvinkel $20^\circ$ og helning $90^\circ$ , $72^\circ$ og $34^\circ$ . .....	57
Figur 57: Flyte høyde, noen utvalgte forsøk med kanallengde 1,2 m og 2,4 m. ....	57
Figur 58: Flyte høyde, forsøk uten kanal og voll. ....	58
Figur 59: Flyte høyde, forsøk med fangvoll med helning $90^\circ$ , $72^\circ$ og $34^\circ$ . ....	58
Figur 60: Flyte høyde, forsøk med ledevoll med treffvinkel $40^\circ$ og helning $90^\circ$ , $72^\circ$ og $34^\circ$ . .....	59
Figur 61: Flyte høyde, forsøk med ledevoll med treffvinkel $20^\circ$ og helning $90^\circ$ , $72^\circ$ og $34^\circ$ . .....	59
Figur 62: Skredfront, t.v. skred S3K(2,4) og t.h. skred S1TV(20)H(72) (foto: Christiansen). ....	64
Figur 63: Illustrasjon av hastighetsprofil i forsøk med varierende kanallengde. ....	64
Figur 64: Illustrasjon av tverrsnitt på rennen i modellen og naturen. ....	64
Figur 65: Skredmasser rundt $x = -60$ cm for skredene S1/2/3K(1,2) (foto: Christiansen). ....	67
Figur 66: Oversikt over effektiv vollhøyde og oppskyllingshøyde. ....	72
Figur 67: Oppskyllingshøyde ut fra treffvinkel. ....	73
Figur 68: Oppskyllingshøyde ut fra helning på skredsiden av vollen. ....	73
Figur 69: Oppskyllingshøyde vs. oppstuvningshøyde for forsøk med fangvoll. ....	75
Figur 70: Lengde på kanal versus utløpslengde. ....	78
Figur 71: Strømning i møte med voll, to tidspunkt. Øverst S1TV(40)H(90) og nederst S2TV(40)H(90) (foto: Christiansen). ....	79



Figur 72: Illustrasjon av treffvinkel versus utløpslengde.....	80
Figur 73: Flyte høyde for forsøk med varierende kanallengde, utsnitt av Figur 57.....	82
Figur 74: Skred ved registrering av flyte høyde (foto: Christiansen). ....	82
Figur 75: Strømning som skaper maksimal flyte høyde i skred S3K(1,2) (foto: Christiansen).82	

## Tabelliste

Tabell 1: Forsøksoppsett. ....	36
Tabell 2: Utstyrsoversikt. ....	38
Tabell 3: Gjennomsnittlig fronthastighet i nedre renne for forsøk med varierende kanallengde. .....	67
Tabell 4: Gjennomsnittlig fronthastighet i nedre renne for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll. ....	67
Tabell 5: Gjennomsnittlig fronthastighet på rutebordet for forsøk med varierende kanallengde. .....	68
Tabell 6: Gjennomsnittlig fronthastighet på rutebordet for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll. ....	68
Tabell 7: Gjennomsnittlig fronthastighet langs ledevoll. ....	68
Tabell 8: Gjennomsnittlig oppskyllingshøyde for forsøk med fang- og ledevoll. ....	73
Tabell 9: Gjennomsnittlig oppskyllingshøyde for forsøk med ledevoll og treffvinkel 40 ° og 20 °, både i modellstørrelse og skalert opp. ....	74
Tabell 10: Gjennomsnittlig utløpslengde med tilhørende standardavvik for forsøk med varierende kanallengde, uten voll og med ledevoll, treffvinkel 40 ° og 20 °.....	77
Tabell 11: Fronthastighet og utløpslengde for forsøk med kanallengde 0 m og uten voll.....	78
Tabell 12: Oppsummering flyte høyde.....	81

## Formelliste

Ligning 1: Underkritisk, kritisk og overkritisk strømning. ....	8
Ligning 2: Froudes tall. ....	8
Ligning 3: Reynolds tall. ....	9
Ligning 4: Hydraulisk radius for rektangulært tverrsnitt. ....	9
Ligning 5: Akselererende og retarderende krefter som virker på skredmassene. ....	11
Ligning 6: Mannings formel. ....	12
Ligning 7: Terminalhastighet. ....	12
Ligning 8: Bernoullis formel. ....	13
Ligning 9: Energihøyder. ....	13
Ligning 10: Kinetisk og potensiell energi. ....	15
Ligning 11: Bernoullis formel, kontinuitetsprinsipp. ....	15
Ligning 12: Friksjonskraft. ....	16
Ligning 13: Nødvendig steinstørrelse for erosjonssikring. ....	22
Ligning 14: Trykk mot konstruksjon. ....	23
Ligning 15: Oppstuvningshøyde (energi høyde). ....	27
Ligning 16: Oppstuvningshøyde (tvungen strømvirvel). ....	28

## Forkortelser

- Klima 2050 - Klima 2050 er et internt prosjekt hos SINTEF Byggforsk som går ut på klimaendringenes betydning for bygg og infrastruktur hvor en ser på konsekvens og mulige tiltak.
- NIFS - NIFS - Naturskade, infrastruktur, flom og skred er et samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen, Jernbaneverket og Norges vassdrags- og energidirektorat som består av syv delprosjekt der skred og flomsikring er ett av dem.
- NTNU - Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

## Ordforklaringer

- Effektivspenningsmateriale - Et materiale der effektivspenningene dominerer.
- Effektiv vollhøyde - Høydeforskjellen mellom foten av vollen og vollkronen, målt i skredets opprinnelige retning.
- «Fryste» masser - At massene «fryser» vil si at suspensjonen har lite vann og oppfører seg som et effektivspenningsmateriale.
- Oppskyllingshøyde - Høyden som suspensjonen når opp til i møte med vollen, målt fra foten av vollen og vertikalt opp.
- Oppstuvningshøyde - Ekstra høyde opp mot vollen som følge av retningsendring av skredmassene.
- Sidevoll - To voller som settes parallelt for å danne en kanal for skredmassene.
- Terminalhastighet - Konstant, maksimal hastighet ved konstant helning.
- Tilbakeslag / slår tilbake - Når skredmassene møter en voll vil de strømme oppetter den og så velte over / ut (normalt på vollen). Det at massene velter over / ut henvises til som tilbakeslag.

## Symbolliste

$\alpha$	-	Vinkel mellom vollens og skredets retning, treffvinkel [°]
$\beta$	-	Helning på skredsidene av vollen [°]
$\gamma$	-	Tyngdetetthet [ $\text{N} / \text{m}^3$ ]
$\kappa$	-	Kinematisk viskositet [ $\text{m}^2 / \text{s}$ ]
$\mu$	-	Friksjonskoeffisient [-]
$\rho$	-	Densitet [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ]
$\tau$	-	Dynamisk viskositet [ $\text{Ns} / \text{m}^2 = \text{Pas}$ ]
$\varphi$	-	Skråningshelning [°]
A	-	Tverrsnittareal [ $\text{m}^2$ ]
a	-	Akselerasjon [ $\text{m} / \text{s}^2$ ]
B	-	Kanalbredde [m]
$D_{60}$	-	Steinstørrelsen som 60 % av prøven er mindre enn, regnet etter vekt [m]
$E_k$	-	Kinetisk energi [Nm]
$E_p$	-	Potensiell energi [Nm]
F	-	Friksjonskraft per areal [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]
$F_c$	-	Coulumb friksjon [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]
$F_d$	-	Viskøs friksjon [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]
Fr	-	Froudes tall [-]
g	-	Tyngdeakselerasjon [ $\text{m} / \text{s}^2$ ]
H	-	Energi høyde [m]
$H_e$	-	Energitap [m]
$H_{\text{effektiv}}$	-	Effektiv høyde [m]
$H_f$	-	Kinetisk energitap [m]
$H_k$	-	Hastighetsenergi [m]
$H_p$	-	Trykkenergi [m]
$H_z$	-	Energi fra stedshøyde [m]
$\Delta H$	-	Oppskyllingshøyde [m]

$\Delta H_o$	-	Oppstuvningshøyde [m]
$h$	-	Flyte­høyde [m]
$\Delta h$	-	Høydeforskjell [m]
$I$	-	Energilin­jens helning [-]
$k$	-	Korreksjons­faktor [-]
$M$	-	Mannings tall [ $m^{1/3} / s$ ]
$m$	-	Masse [kg]
$N$	-	Normalkraft per areal [ $N / m^2$ ]
$P_{maks}$	-	Maksimal trykkraft per areal [ $N / m^2$ ]
$P_v$	-	Våt omkrets [m]
$p$	-	Trykk [ $N / m^2$ ]
$Q$	-	Vannføring [ $m^3 / s$ ]
$Re$	-	Reynolds tall [-]
$R_h$	-	Hydraulisk radius [m]
$r$	-	Gjennomsnittlig kurvatur radius [m]
$S$	-	Støtkraft [N]
$v$	-	Hastighet [m / s]
$v_{term}$	-	Terminal­hastighet [m / s]
$W$	-	Vekt [ $N / m^2$ ]
$y$	-	Vanndybde [m]
$z$	-	Stedshøyde [m]



# 1 Innledning

Flomskred innebærer allerede i dag en betydelig risiko og klimaendringene som forventes å komme i Norge vil øke risikoen ytterligere. Klimaendringene tilsier endret temperatur, mer nedbør og med høyere intensitet. Kombinasjonen av økt nedbørintensitet og temperaturøkning medfører økt hyppighet av flomskred, med større styrke og skredene vil kunne inntreffe i områder som tidligere ikke har vært utsatt (Stortingsmelding 2011 - 2012). Flomskred er et område der det mangler dokumentert forsøksbasert informasjon når det kommer til skredhendelsen og sikringstiltak. Valg og dimensjonering av sikringstiltak gjøres i dag ut fra tidligere sikringstiltak og en ingeniørs vurdering av deres effekt (Norem & Sandersen 2012).

Masteroppgaven består av en litteraturstudie og en omfattende serie modellforsøk. Hoveddelen av oppgaven er knyttet til modellforsøk og tolkning av resultater fra disse. Det utføres forsøk uten voll for å se på utløpslengde og med fang- og ledevoll der treffvinkel og helningen på skredside av vollen varieres for å undersøke oppskyllingshøyden på fang- og ledevoll, samt utløpslengden ved bruk av ledevoll. Med bakgrunn i disse forsøkene er selve skredhendelsen / -mekanismene forsøkt dokumentert. Litteraturstudiet støtter opp om forsøkene som utføres og inneholder generell teori om flomskred, samt mer spesifikk teori om strømning og utforming av sikringstiltakene side-, fang- og ledevoll. Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven, Christiansen (2012), der det ble utført en litteraturstudie av flomskred generelt og effekten av kanalisering og forsøk for å se på kanaliseringseffekten spesielt. Resultat- og analysedelen inkluderer også en utbedring og videre analysering av modellforsøkene vedrørende effekten av kanalisering.

I litteraturstudiet presenteres først definisjonen av flomskred og generell teori. Deretter går en mer i dybden om strømning i form av krefter som virker, hastighet og energi, før teori om sikringstiltak med vekt på voller, rettet opp i mot forsøkene som skal utføres, presenteres. Forsøksdelen starter med generell informasjon om forsøkene. Deretter fremstilles resultater og analyse og diskusjon i rekkefølgen strømning, oppskyllingshøyde og utbredelse og flyte høyde. Analyse og diskusjon inneholder også en sammenligning mellom verdier fra litteraturstudiet og fra forsøkene. Til slutt presenteres de viktigste funnene i konklusjonen.

## 2 Litteratur

Kapittelet begynner med en definisjon av flomskred og generell teori, etterfulgt av en inndeling av flomskred i underkategorier og teori om strømning i form av krefter, hastighet og energi. Deretter forklares kort en prosedyre for beregning av forventet utløpslengde før teori om sikringstiltak med vekt på voller presenteres.

Flomskred er et område der det mangler dokumentert forsøksbasert informasjon når det kommer til skredhendelse og sikringstiltak. Snøskred er et mer belyst emne enn flomskred, og i en del tilfeller kan teori fra snøskred anvendes direkte på flomskred, eller med mindre modifiseringer (Norem & Sandersen 2012).

### 2.1 Generelt om flomskred

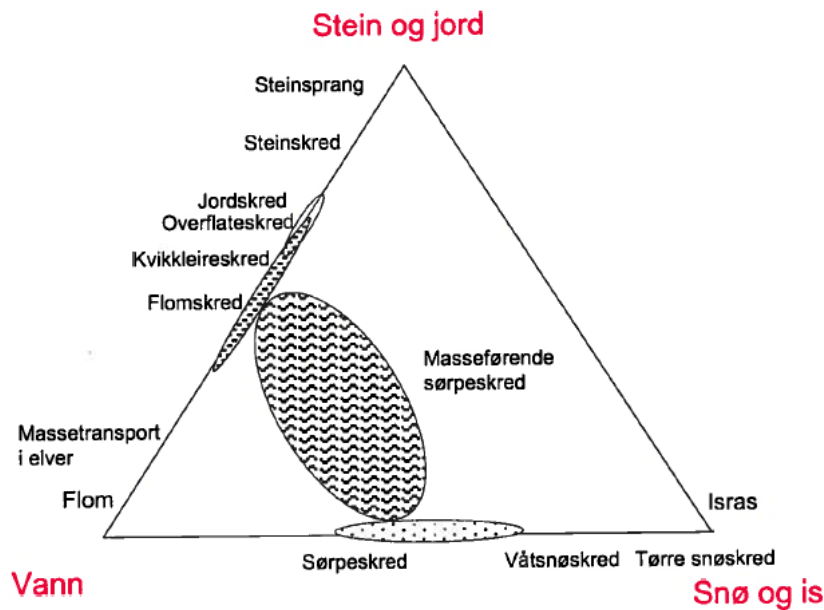
Naturlige skred er hurtig massetransport av materialtypene jord, stein, snø og vann, samt trær og humus. De utløste massene preger skredmassen og suspensjonen vil ofte ha et høyt vanninnhold. Erfaring viser at andelen vann påvirker både utløsningsmekanismen, bevegelsestypen og utløpsdistansen til skred (Norem & Sandersen 2012).

I følge Norem og Sandersen (2012) kan skredtyper klassifiseres ut fra forholdet mellom stein / jord, vann og snø / is. Figur 1 viser at flomskred består av vann og stein / jord, med et partikkelinnhold på ca. 40 – 70 prosent i forhold til det totale skredvolumet. Flomskred kjennetegnes ved at det blir utløst i perioder med intens nedbør eller snøsmelting og skiller seg fra jordskred ved at erosjon, masseutglidning og massetransport foregår langs eksisterende bekke- og elveløp (Stortingsmelding 2011 - 2012). Vanligvis initieres flomskred ved at flomvann konsentreres og at det oppstår strømning av sedimenter og vann i bratt terreng som følge av økte medrivningskrefter (Høydal & Kronholm 2013).

Norem og Sandersen (2012) definerer flomskred tilsvarende Takahashi (2007) og definisjonen er som følger:

*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. (Norem & Sandersen 2012 s.7)*





Figur 1: Klassifisering av skredtyper ut fra forholdet mellom stein / jord, vann og snø / is (Norem & Sandersen 2012 Figur 2.1).

I følge Iverson (1997) opptrer flomskred når dårlig sortert materiale som er mettet med vann strømmer ned en skråning som følge av gravitasjonskrefter. Massene får en irreversibel deformasjon og opprettholder en fri overflate. Strømningen er ikke-stasjonær og ikke-uniform, se Kapittel 2.4 «Strømning».

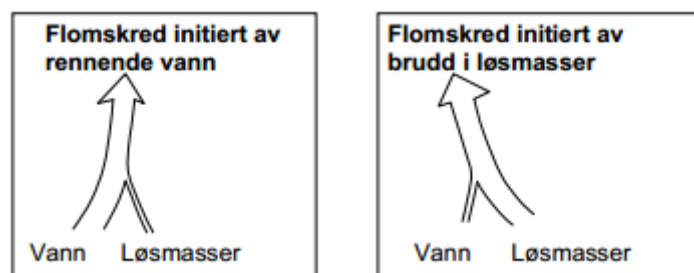
Siden flomskred består av både vann og partikler vil bevegelsestypen bestemmes av et samspill mellom hydrodynamiske lover og granulær dynamikk (Norem & Sandersen 2012). Vanlig densitet for flomskred er mellom  $1800 - 2300 \text{ kg / m}^3$  (personlig kommunikasjon H. Norem, 7. mai 2013), i forhold til vann som har densitet på  $1000 \text{ kg / m}^3$ . Flomskred består av flere faser som kompliserer dynamikken ytterligere og den påvirkes både av viskøse krefter og plastiske / elastiske faste masser (Høydal & Kronholm 2013). Det store vanninnholdet gir suspensjonen stor mobilitet, det vil si lav fasthet, som resulterer i høyere hastighet og lengre utløp enn for skred med lavere vanninnhold. Poretrykket kan variere både langs skredbanen og mellom skredets front og hale, og i finstoffrike masser vil store poretrykk få mulighet til å bygge seg opp. Flomskred har vanligvis en hastighet på mellom 5 og 10 m / s. Det er kun ved skred av størrelse større en  $50 - 100\ 000 \text{ m}^3$  at hastigheter opp til 15 m / s er registrert (Norem & Sandersen 2012).

Bevegelsestype, skredhastighet og utløpsdistanse til flomskred avhenger av flere faktorer. Erosjon langs skredbanen kan føre til økt volum. Et stort skredvolum vil gi økt skredhastighet og utløpsdistanse. Hastigheten avhenger også av partikkelstørrelsen, ved økende

partikkelstørrelse øker friksjonen og dermed reduseres hastigheten og utløpsdistansen. Skred med høyt finstoffinnhold vil derfor ha lengre utløp enn skred med grovkornet masse. Forholdet mellom vann og masse påvirker også, da et stort vanninnhold reduserer friksjonen og øker dermed utløpslengden. Friksjonen påvirkes også av materialet i skredbanen, hovedsakelig i form av steinstørrelsen, men også av type vegetasjonsdekke, terskler i lengdeprofil og kanaliseringsgrad virker inn (Norem & Sandersen 2012).

## 2.2 Initiering av flomskred

I følge Norem og Sandersen (2012) initieres flomskred enten av rennende vann eller ved brudd i løsmasser, se Figur 2. Førstnevnte er vanligste initieringsårsak til flomskred i Norge og skyldes at vannstrømmen overstiger erosjonsmotstanden til underlaget og dermed setter partiklene i bevegelse. Stadig erosjon vil øke innholdet av masser ved at det eroderes løs mer masser som tas opp i strømmingen og slik utvikles flomskred. Ved brudd i løsmasser går jordmaterialer eller snømasser til brudd og et skred dannes. Skredmassene kan ved tilførsel eller frigjøring av vann få tilstrekkelig mobilitet til at flomskred utvikles. Se Christiansen (2012) for mer informasjon.



Figur 2: Utløsningsårsaker for flomskred (basert på (Norem & Sandersen 2012 Figur 3.1)).

Figur 3 viser et flomskredløp og som en ser er det formet som en vifte. Skredet initieres ved en av de nevnte årsakene ovenfor og utvikles nedover skredbanen til et fullt utviklet flomskred.



Figur 3: Flomskredløp i Ålvunddalen, nord for Sundalsøra (foto: Emdal, NTNU).

## 2.3 Inndeling av flomskred

I følge Takahashi (2007 kap. 1) kan flomskred deles inn i tre underkategorier: turbulent-gjørmete, viskøse og steinrike flomskred.

### 2.3.1 Turbulent – gjørmete flomskred

I turbulente flomskred river turbulensen i vannmassene med seg partikler underveis (Takahashi 2007), og denne typen flomskred kan derfor ses på som en overgang mellom sedimenttransport i elver og flomskred (Norem & Sandersen 2012). I Takahashi (2007) beskrives det som en turbulent strømning fra front til ende. Turbulensen i vannmassene river med seg partiklene og dermed vil andelen finstoff være størst, men skredmassene kan også inneholde blokker. Turbulente flomskred opptrer dermed i områder der det er mye finstoff, som for eksempel i nærheten av vulkaner eller isbreer. De fine partiklene vil opptre som et suspendert materiale og blandingen av partikler og vann vil til sammen oppføre seg som en væske med forhøyet viskositet sammenlignet med vann. Partiklene føres med de strømmende vannmassene og de største partiklene vil være nærmest bunnen (Norem & Sandersen 2012).

For å kunne oppnå stor turbiditet i vannmassene og dermed stor transportkapasitet, er det viktig med begrenset mengde masse i forhold til vann (Norem & Sandersen 2012). I følge Takahashi (2007) utgjør partiklene omtrent 50 – 70 volum - % av skredet, hvor median partikkelstørrelse er 0,3 – 1 mm og fraksjonen mindre enn 0,1 mm utgjør 10 – 30 % av partikkelinnholdet. Den store vannmengden gjør det mulig å benytte klassiske hydrodynamiske formler ved beregning av strømning (Norem & Sandersen 2012).

### **2.3.2 Viskøse flomskred**

Viskøse flomskred har en økt densitet og viskositet i forhold til turbulente flomskred, og denne økningen vil si at det er mindre fri avstand mellom partiklene og dermed mindre bevegelse (Takahashi 2007). Massene vil bevege seg som et kontinuum og partiklene vil kolliderer med hverandre. Dette fører til at de fine partiklene er konsentrert mot bakken og de største mot toppen av skredmassene (Norem & Sandersen 2012). I motsetning til steinrike flomskred er det ingen akkumulering av blokker i front (Takahashi 2007). Skredtypen forekommer ofte i perioder med stor elveerosjon hvor erosjonshuden eroderes slik at finstoffholdig masse eksponeres og suspenderes inn i strømmen og disse skredmassene vil derfor bære preg av elvebunnen (Sellevold 2010).

### **2.3.3 Steinrike flomskred**

Steinrike flomskred har en stor andel store steiner. Steinmateriale med diameter større enn 100 mm utgjør 50 – 70 % av vekten, mens finstoffinnholdet med diameter mindre enn 1 mm utgjør 10 – 20 % av vekten. Utløsningsmekanismen for slike skred ligner den for grunne overflateskred, men deretter eroderer de utløste massene større mengder materiale i skredløpet slik at skredvolumet øker. På samme måte som ved viskøse flomskred vil skredstrømmen oppføre seg som et kontinuum (Sellevold 2010). De fine partiklene vil være konsentrert mot bakken og de største i toppen av skredmassene (Norem & Sandersen 2012).

Den fremre delen av et steinrikt flomskred har i følge Takahashi (2007) en varighet på noen sekunder og det er der de store steinene akkumuleres. Her er konsentrasjonen av vann lav og poretrykket kan være lavere enn det hydrostatiske. Det vil også være store steiner på siden av bølgefronten. Bak bølgefronten vil det være mindre partikler og de opptrer lavere i profilet og poretrykket kan være høyere enn hydrostatisk trykk. Halen til skredet er en gjørmete strømning med gradvis avtagende partikkelinnhold.

## 2.4 Strømning

Reologi er læren om materialers flyte- og deformasjonsegenskaper. Flytelovene definerer en sammenheng mellom flytespenningen som væsken påvirkes av og en væskes flyte-hastighet. Væsker kan deles inn i newtonsk og ikke-newtonsk væske. De newtonske væskene defineres ved enkel flytelov som sier at flyte-hastigheten (skjær-hastigheten) er proporsjonal med flytespenningen (skjærspenningen). Væsker som følger mer kompliserte flytelover kalles ikke-newtonske væsker og et eksempel er en Bingham væske (Gyldendal). En Bingham væske trenger en viss skjærkraft før den flyter, i motsetning til en newtonsk væske som vann. I følge H. Norem (personlig kommunikasjon, 10. januar 2013) er flomskred tilnærmet lik en Bingham væske. For høy forskyvningsspennning flyter væsken omtrent som om den var newtonsk (Gyldendal).

Flomskred er strømning i åpen kanal og har dermed fritt vannspeil som er utsatt for atmosfæren, og det atmosfæriske trykket er tilnærmet konstant. Vannspeilet i en kanal vil innstille seg slik at det følger naturlovene med kontinuitetsprinsippet og lovene om kraft- og energibalanse (Sæterbø et al. 1998 kap. 3). Kontinuitetsprinsippet sier at vannmengde inn i et kontrollområde tilsvarer mengden som lagres eller strømmer ut av området. Kraftbalansen kan forklares ut fra summen av bevegelsesmengde, trykk og gravitasjons-, akselerasjons- og friksjonskrefter. Energibalansen kommer fra Bernoullis formel som uttrykker energibalansen til en væskepartikkel som «høyder». Disse begrepene forklares videre i Kapittel 2.4.3 «Energi».

Strømning kan være stasjonær eller ikke-stasjonær. Ved stasjonær strømning er vannstanden på et sted konstant i tillegg til at strømningsbildet er uforandret over tid. Stasjonær strømning kan så deles inn i uniform og ikke-uniform strømning. For ikke stasjonær-strømning vil vannstanden stige eller synke, avhengig av om vannmengde inn i området er større enn mengden ut, og strømbildet fluktuerer, det vil si at det vil være bølger og virvler (Sæterbø et al. 1998 kap. 3).

Uniform strømning opptrer når strømningstverrsnittet i strømrretningen er uforandret (Sæterbø et al. 1998 kap. 3) og hastigheten langs en strømlinje er konstant (Crowe et al. 2010 kap. 15). Normalstrømning er en uniform strømning som i teorien krever en uendelig lang kanal før den inntrer. Det er en likevektssituasjon som strømning i åpne kanaler med konstant tverrsnitt vil tilnærme seg asymptotisk. Ved ikke-uniform strømning endrer strømningstverrsnittet seg i strømrretningen og dette fører til endring i hastighet (Sæterbø et al. 1998 kap. 3).

Strømning kan karakteriseres av de tre ulike forholdene, underkritisk, kritisk eller overkritisk strømning. Kritisk strømning angir overgangen mellom under- og overkritisk strømning. Ved underkritisk strømning dominerer gravitasjonskreftene, mens ved overkritisk strømning dominerer treghetskreftene. Kritisk strømning er angitt ved formelen:

$$\frac{Q^2 B}{g A^3} = 1 \quad [-] \quad (\text{Sæterbø et al. 1998 Formel 3.5}) \quad [1]$$

der

$$\begin{aligned} Q &= \text{Vannføring [m}^3/\text{s]} \\ B &= \text{Bredde av kanal [m]} \\ A &= \text{Tverrsnittareal [m}^2\text{]} \\ g &= \text{Tyngdeakselerasjon [m / s}^2\text{]} \end{aligned}$$

Overgangen kan også angis ved å se på Froudes tall, Fr, som er definert slik:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad [-] \quad (\text{Sæterbø et al. 1998 Formel 3.7}) \quad [2]$$

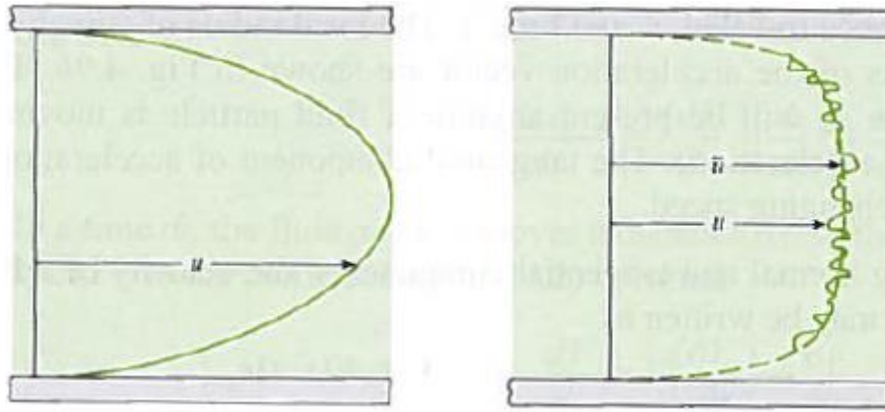
der

$$\begin{aligned} Fr &= \text{Froudes tall [-]} \\ v &= \text{Hastighet [m / s]} \\ y &= \text{Vanddybde [m]} \end{aligned}$$

Fr = 1 for kritisk strømning, mens ved overkritisk strømning er Froudes tallet > 1 og < 1 for underkritisk strømning (Sæterbø et al. 1998 kap. 3). Ligning 2 viser at ved overkritisk strømning vil hastigheten være høyere og dybden i strømmen lavere enn ved kritisk strømning, mens for underkritisk strømning er hastigheten lavere og dybden i strømmen høyere.

En strømning kan være turbulent eller laminær, se Figur 4, og dette avgjøres ved å se på Reynoldstallet. Ved turbulent strømning beveger vannpartiklene seg i uregelmessige baner omkring strømrretningen, mens ved laminær strømning strømmes partiklene i parallelle sjikt. Nesten all strømning er i praksis hydraulisk turbulent. I svært tynne sjikt med liten hastighet, som i grenselaget nær en flat bunn, kan laminær strømning opptre (Sæterbø et al. 1998 kap. 3).





Figur 4: T.v. laminær strømning og t.h. turbulent strømning i et rør (Crowe et al. 2010 Figur 4.7).

Ved åpen strømning vil Reynoldstallet avhenge av hydraulisk radius for et rektangulært tverrsnitt (Crowe et al. 2010 kap. 15). Reynoldstallet,  $Re$ , er gitt ved:

$$Re = \frac{v R_h}{\kappa} \quad [-] \quad (\text{Crowe et al. 2010 Formel 15.4}) \quad [3]$$

der

$$\begin{aligned} R_e &= \text{Reynoldstall [-]} \\ R_h &= \text{Hydraulisk radius [m]} \\ \kappa &= \text{Kinematisk viskositet [m}^2/\text{s]} \end{aligned}$$

Hydraulisk radius,  $R_h$ , for et rektangulært tverrsnitt er gitt ved:

$$R_h = \frac{A}{P_v} + \frac{B y}{B+2y} \quad [\text{m}] \quad (\text{Crowe et al. 2010 Formel 15.5}) \quad [4]$$

der

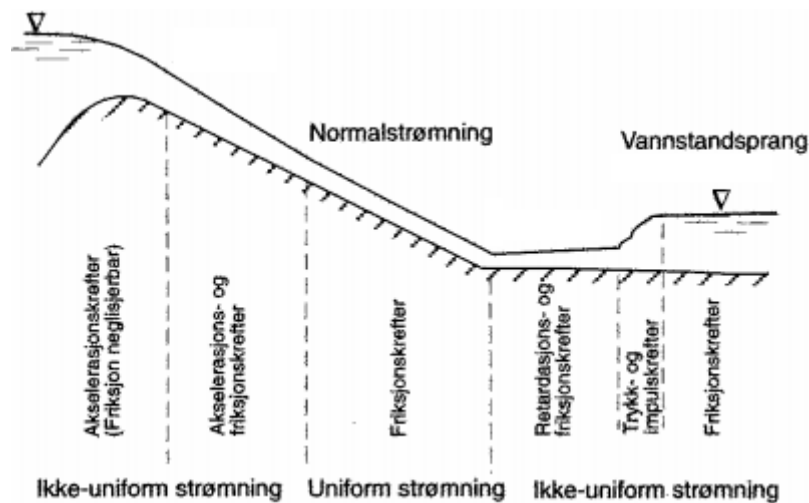
$$P_v = \text{Våt omkrets [m]}$$

Ligning 3 og 4 viser at suspensjonens strømningshastighet og strømningshøyde er avgjørende for om det er turbulent eller laminær strømning. Reynoldstall på mindre enn 500 angir laminær strømning av vann, mens en for verdier større enn 750 kan forvente turbulent strømning. Vannstrømning i åpne tverrsnitt vil som oftest være turbulent, så fremt ikke hastigheten og / eller dybden er veldig liten (Crowe et al. 2010 kap. 15). Ligning 3 som omhandler Reynoldstallet viser at det ved større hastigheter og flyteøyder blir turbulent strømning og laminær ved lavere.

### 2.4.1 Krefter

Figur 5 illustrerer strømning med varierende vannspeil og vanddyb. I begynnelsen av skredbevegelsen vil massene være preget av akselerasjonskrefter. Når kanalen får en helning vil friksjonskrefter også være av betydning med hensyn på hastighet. Hastigheten øker så inntil friksjonen får en størrelse som fører til at tapt energi tilsvarer innvunnet potensiell

energi. Hvis strekningen er tilstrekkelig lang og med jevn helning vil bunn og vannspeil bli parallelle og denne strømmingen kalles parallelstrømning, også kjent som normalstrømning. Når helningen på kanalen blir mindre dannes det en ny overgangssone der vannmassene blir retardert. Et vannstandssprang, det vil si diskontinuitet i vannspeilet, oppstår hvis helningsforskjellen er stor nok. I denne sonen er det trykk- og impuls krefter som preger strømmingen (Sæterbø et al. 1998 kap. 3).

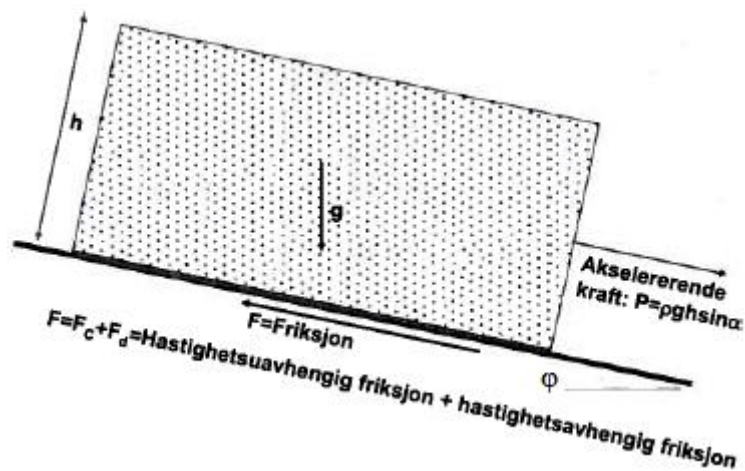


Figur 5: Strømmingssituasjoner i vassdrag (Sæterbø et al. 1998 Figur 3.1).

For å kunne beskrive hvordan skred kan oppnå en maksimal hastighet og stanse i nedoverhellende terreng må en ta utgangspunkt i at friksjonen består av både hastighetsavhengige og -uavhengige ledd, også kjent som viskøs friksjon og Coulomb friksjon. Viskøs friksjon utgjør for de aller fleste tilfeller en vesentlig del av den totale friksjonen. Denne friksjonen begrenser hastigheten til skredmassene og er viktig for å vise at skred har en terminalhastighet, noe som i de aller fleste tilfeller oppnås i bratt terreng. Coulomb friksjonen gjør det mulig for skredmassene å stanse i nedoverhellende terreng (Norem & Sandersen 2012).

Hvis man betrakter et lite volum av skredmassene vil de være påvirket av både akselererende og retarderende krefter nedover skredbanen, se Figur 6. De akselererende kreftene kommer av massenes tyngde, og ulike former for friksjon utgjør de retarderende. Newtons første lov sier at produktet av masse og akselerasjon er proporsjonalt med differansen av de akselererende og retarderende kreftene, se Ligning 5. Dersom de akselererende og retarderende kreftene er like store vil skredet ha en tilnærmet konstant hastighet som utgjør maksimal hastighet ved den gitte helningen, også kjent som terminalhastighet (Norem & Sandersen 2012).





Figur 6: Akselererende og retarderende krefter som virker på skredmassene (Norem & Sandersen 2012 Figur 3.19).

$$ma = \rho h \frac{dv}{dt} = W - F = \rho gh \sin(\varphi) - (F_c + F_d) \quad [\text{N} / \text{m}^2]$$

(Norem & Sandersen 2012) [5]

der

m	=	Masse [kg]
a	=	Akselerasjon [ $\text{m} / \text{s}^2$ ]
$\rho$	=	Densitet [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ]
h	=	Flyte høyde [m]
W	=	Vekt [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]
F	=	Total friksjonskraft per areal i retning mot skredbevegelsen [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]
$\varphi$	=	Skråningshelning [ $^\circ$ ]
$F_c$	=	Friksjon uavhengig av hastighet, Coulomb friksjon (tørrfriksjon) [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]
$F_d$	=	Friksjon avhengig av hastighet, viskøs friksjon [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]

## 2.4.2 Hastighet

Som nevnt i kapittel 2.1 «Generelt om flomskred» har flomskred vanligvis en hastighet i området 5 – 10 m / s. For å sammenligne hastigheten til naturlige skred med modellforsøk kan Froudes tall brukes.

$$\begin{aligned} Fr_{\text{modell}} &= Fr_{\text{natur}} \\ \frac{v_m}{\sqrt{gh_m}} &= \frac{v_n}{\sqrt{gh_n}} \\ \frac{v_m^2}{gh_m} &= \frac{v_n^2}{gh_n} \\ \frac{h_n}{h_m} &= \frac{v_n^2}{v_m^2} \end{aligned}$$

Høydal og Kronholm (2013) anbefaler blant annet Mannings formel, som i utgangspunktet er gyldig for væsker uten partikler, ved beregning av hastighet. Formelen er gitt av Ligning 6. Mannings tall er avhengig av underlaget til strømmingen og vil for naturlig bekk og elv være mellom 5 – 40 m<sup>1/3</sup> / s (SVV 2011 Figur 405.8). Ved bruk av denne formelen på flomskred bør en kompensere for at flomskred er en tykkflytende væske og ikke er en newtonsk væske ved å bruke en lav verdi for Mannings tall. Ved å ta utgangspunkt i at tverrsnittet er bredt slik at hydraulisk radius er tilnærmet lik flyte høyden og i vanlige verdier ved skredhendelser, hentet fra kapittel 2, som er 1 – 2 m flyte høyde, helning på energilinjen i størrelse 0,2 – 0,3<sup>1</sup>, og 5 – 10 m / s hastighet, får en at Mannings tall bør være rundt 11 – 12 m<sup>1/3</sup> / s, se Vedlegg A for utregning.

$$v = M \times R_h^{2/3} \times \sqrt{I} \quad [\text{m} / \text{s}] \quad (\text{Høydal \& Kronholm 2013}) \quad [6]$$

der

$$\begin{aligned} M &= \text{Mannings tall } [\text{m}^{1/3} / \text{s}] \\ I &= \text{Fall, energilinjens helning, } \sin\varphi [-] \end{aligned}$$

Den maksimale konstante hastigheten et skred kan oppnå kalles terminalhastighet, og et uttrykk for denne er gitt i Ligning 7 (Norem & Sandersen 2012).

$$v_{term} = \frac{\rho g h^2}{\tau} \times (\sin\varphi - \mu \cos\varphi) \quad [\text{m} / \text{s}] \quad (\text{Norem \& Sandersen 2012}) \quad [7]$$

der

$$\begin{aligned} v_{term} &= \text{Terminalhastighet } [\text{m} / \text{s}] \\ \tau &= \text{Dynamisk viskositet } [\text{Ns} / \text{m}^2] \\ \mu &= \text{Friksjonskoeffisient } [-] \end{aligned}$$

Ligning 7 viser at skredets terminalhastighet er sterkt avhengig av skredets flyte høyde. Ut fra tilbakeberegning av kartlagte skreds hastighet, flyte høyde og utløpsdistanse anslås den effektive friksjonskoeffisienten til å være i området 0,007 – 0,15. Dynamisk viskositet mellom 1 og 5 kPas og flyte høyde mellom 1 og 2 m er vanlig å velge ved etterberegning. Valget av disse tre parameterne har betydning for hastigheten og utløpslengden. Valg av friksjonskoeffisienten vil ha størst betydning for utløpslengden, og viskositeten og flyte høyden for terminalhastigheten (Norem & Sandersen 2012). En kontroll av disse verdiene opp i mot vanlig skredhastighet på 5 og 10 m / s viser at for de gitte flyte høydene og friksjonskoeffisientene er dynamisk viskositet mellom 1 og 5 kPas noe høyt. Lav flyte høyde

---

<sup>1</sup> Helningen på energilinjen i utløpsområdet brukes på grunn av manglende data om energilinjens helning lenger opp i skredbanen.

og høy friksjonskoeffisient og høy hastighet gir en del lavere verdier for den dynamiske viskositeten enn nevnt her. Hvis friksjonskoeffisienten antas å være rett bør dynamisk viskositet være i området 0,2 til 3,6 kPas ut fra verdiene gitt ovenfor. Bakgrunn for det nye området for dynamisk viskositet er vist i Vedlegg B.

### 2.4.3 Energi

For å få en forståelse for hva som skjer under et flomskred bør en foreta en energibetraktning. Flomskredets bevegelse, hastighet, utløpsdistanse osv. er avhengig av energien som er til stede. Viktige momenter i energibetraktning er blant annet friksjon mellom skred og grunn / vegg, indre friksjon og stedshøyde. Energibalansen kan uttrykkes ved hjelp av Bernoullis formel, Ligning 8, der energien blir presentert som energihøyder.

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (\text{Sæterbø et al. 1998}) \quad [8]$$

der

$$\begin{aligned} H &= \text{Energihøyde [m]} \\ z &= \text{Stedshøyde [m]} \\ p / \gamma &= \text{Trykkehøyde [m]} \\ p &= \text{Trykk [N / m}^2\text{]} \\ \gamma &= \text{Tyngdetetthet [N / m}^3\text{]} \\ v^2 / 2g &= \text{Hastighetshøyde (kinetisk energi) [m]} \end{aligned}$$

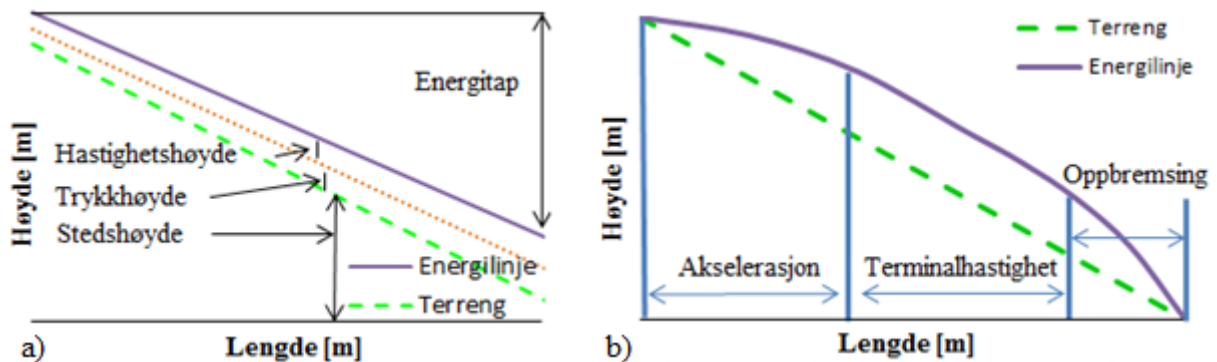
Bernoullis ligning uttrykker at summen av potensiell energi, trykk- og hastighetsenergi og energitap er konstant (Norem & Sandersen 2012). Analysing av energitap er av stor relevans for å kunne vurdere effekten til sikringstiltak. Ved å skrive om energitypene fra Bernoullis ligning til energihøyder kan energilinjer benyttes for å fremstille hvor skredet akselererer, har konstant hastighet og bremses opp, se Ligning 9.

$$H_e = H_z + H_p + H_k \quad [\text{m}] \quad (\text{Norem \& Sandersen 2012}) \quad [9]$$

der

$$\begin{aligned} \text{Energitap, } H_e &= \text{Energilinje [m]} \\ \text{Stedshøyde, } H_z &= z, \text{ potensiell energi tilsvarer høyden [m]} \\ \text{Trykkenergi, } H_p &= \rho g h / \rho g = h, \text{ trykkehøyden tilsvarer skredets flytehøyde [m]} \\ \text{Hastighetsenergi, } H_k &= v^2 / 2g, \text{ hastighetshøyden varierer med kvadratet av hastigheten [m]} \end{aligned}$$

Figur 7 a) viser en grafisk fremstilling av energihøydene i et flomskred som uttrykt i Ligning 9, mens Figur 7 b) viser et eksempel på en energilinje i forhold til terrenget i en skråning. Når energilinjen har en slakere helning enn terrenget er skredet i akselerasjonsfasen. Når helningen er lik har skredet konstant hastighet, som utgjør skredets maksimale hastighet, også kalt terminalhastighet. Når helningen er brattere bremses skredet opp. Energilinjer angir energitap per lengdeenhet.



Figur 7: a) Illustrasjon av energihøyder og b) Illustrasjon av energilinje i forhold til terrenget (basert på (Norem & Sandersen 2012)).

Ved å se på hastighetshøyden i forhold til terrengnivå kan en se hvordan energitapet utvikler seg, se Figur 8. I begynnelsen av kanalen er det ingen bevegelse i massene og hastighetshøyden er identisk med rennen. Deretter beveger massene seg nedover i rennen og hastigheten øker inntil terminalhastighet er nådd og hastigheten blir konstant, som nevnt i Kapittel 2.4.2 «Hastighet». Dette kan ses som der hastighetshøyden og rennen er parallell. Når rennen flater ut tappes skredmassene for energi og ved maksimal utløpslengde vil de falle til ro. Her er all kinetisk energi tatt ut.



Figur 8: Energibetraktning (basert på (Brateng 2005 Figur 3.4)).

Den totale energimengden er summen av kinetisk og potensiell energi, og andelen avhenger av størrelsen på farten i massene. Dette fører til at hastighetshøyden kan brukes for å evaluere andelen bevegelsesenergi som er i massene. Helningen til linjen uttrykker hvor fort massene bremses ned og stopper opp. Den totale hastighetshøyden er gitt av summen av alle energitapene langs skredløpet (Brateng 2005).

Når skredet er i bevegelse vil den totale bevegelsesmengden kunne beskrives ved hjelp av kinetisk og potensiell energi, hvor summen av disse er konstant, se Ligning 10.

$$E_k = E_p \leftrightarrow \frac{1}{2} m v^2 = m g \Delta h \quad [\text{Nm}] \quad [10]$$

der

$$\begin{aligned} E_k &= \text{Kinetisk energi [Nm]} \\ E_p &= \text{Potensiell energi [Nm]} \\ \Delta h &= \text{Høydeforskjell [m]} \end{aligned}$$

Det skjer en energiutveksling når skredet beveger seg nedover skredbanen. I den første fasen er det hovedsakelig potensiell energi, deretter blir den overført til hastighetsenergi og varme som representerer et energitap. Når skredet har stoppet opp vil all den potensielle energien ha gått over til varme og hastighetsenergien er lik null (Norem & Sandersen 2012).

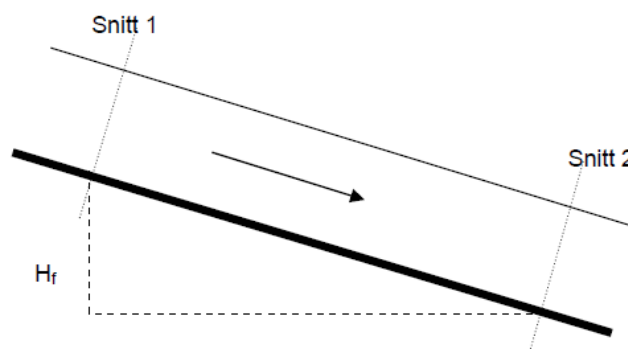
Ved hjelp av kontinuitetsprinsippet fra snitt 1 til snitt 2 og Bernoullis ligning kan Ligning 11 settes opp.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + H_f \quad [\text{m}] \quad (\text{Brateng 2005 Formel 3.4}) \quad [11]$$

der

$$H_f = \text{Tap av kinetisk energi [m]}$$

Den kinetiske energien går over til potensiell energi og uttrykkes som tap av kinetisk energi,  $H_f$ . Tapet oppstår på grunn av turbulens og friksjon og fører til at energihøyden synker i strømrretningen, som illustrert i Figur 9.



Figur 9: Kontinuitetsprinsipp (Brateng 2005 Figur 3.2).

Moe et al. (2003) henviser til tre fysiske mekanismer som fører til dissipering av energi, Coulomb friksjon, viskøs friksjon og tap som følge av støt. Coulomb friksjon gir energitap som er proporsjonalt med den horisontale avstanden skredet har beveget seg og normalkraften

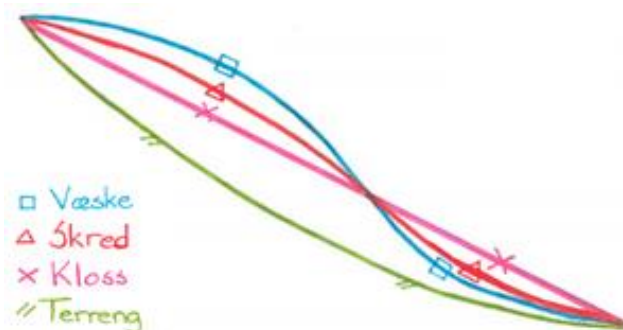
på grunnoverflaten. Hastighet er kun viktig ved kurvatur ettersom sentrifugalkreftene øker eller reduserer normalkraften, avhengig av om kurvaturen er konkav eller konveks. Den viskøse friksjonen er hastighetsavhengig. Den totale friksjonskraften øker lineært med hastigheten og dette indikerer at alle skred har en terminalhastighet hvor Coulomb og viskøs friksjon balanserer gravitasjonskreftene. Energitalpet avhenger av hastigheten langs skredbanen og dermed vil skred med lav hastighet ha et mindre energitalp per meter enn skred med høy hastighet. Når skred brått får en ny retning som for eksempel når det treffer en fang- eller ledevoll, vil kompresjonen av den strømmende massen føre til dissipering av energi.

Ved å se på energilinjer kan en få informasjon om hvordan skredmassene oppfører seg i forhold til om bevegelsen ligner den til en væske som er avhengig av viskøs friksjon eller til en kloss som avhenger av tørrfriksjon, se Figur 10. Ligning 12 uttrykker friksjonskraften som summen av tørrfriksjon og viskøs friksjon (personlig kommunikasjon H. Norem, 11. februar 2013).

$$F = \mu \times N + \tau \times \frac{dv}{dz} \approx \mu \times N + \tau \times v \quad [\text{N} / \text{m}^2] \quad [12]$$

der

$$N = \text{Normalkraft per areal} [\text{N} / \text{m}^2]$$



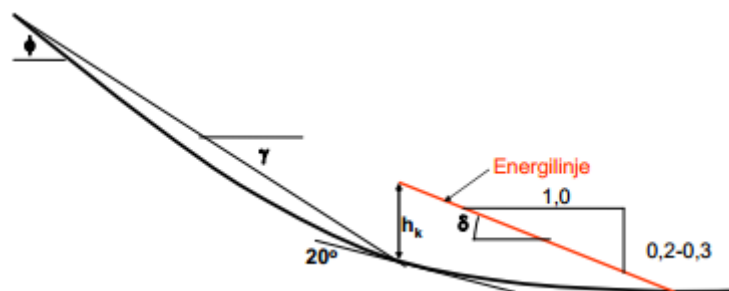
Figur 10: Energilinjer (personlig kommunikasjon H. Norem 11. februar 2013).

En kloss vil avhenge av tørrfriksjonen og dens energilinje kan sees som en rett linje med vinkel  $\mu$ . For en væske er den viskøse friksjonen avgjørende og energilinjen vil få et kurvet forløp. For en væske vil friksjonen være liten når hastigheten er liten og dermed vil det være en slak energilinje, mens det vil være stor friksjon når hastigheten er stor og dermed en bratt energilinje. Ved maksimal hastighet vil energilinjen til en væske ha maksimal helning. Væske akselererer raskt slik at strømmingen fort oppnår en høy hastighet og dermed vil energilinjen være bratt tidlig i skredløpet, og kurven vil ligge på oversiden av kurven for en kloss. Oppbremsingen til en kloss vil derimot være raskere enn for væske på grunn av friksjon og dermed vil energilinjen ligge under den for en kloss på slutten av skredløpet. Her vil også

væsken ha lav hastighet og helningen på energilinjens vil være slakere. Skredmassene vil trolig ha en energilinjens som ligger mellom den for en væske og en kloss.

## 2.5 Utløpslengde

Norem og Sandersen (2012) har, basert på Bakkehøi et al. (1983) sin modell for snøskred, utviklet to prosedyrer for å beregne utløpslengden til flomskred. Den første tar utgangspunkt i vinkelen ved utløsningspunktet for beregning av utløpslengden og dermed vil små vinkelendringer gir store utslag. For å redusere unøyaktigheten bør det velges en vinkel lenger nede i skredbanen som utgangspunkt for beregningen av utløpslengden. Den andre prosedyren reduserer denne unøyaktigheten ved å ta utgangspunkt i energilinjens og  $20^\circ$  punktet, se Figur 11. Hastighetshøyden,  $h_k$ , er gitt ved  $v^2 / 2g$ . Ved å ta utgangspunkt i hastighetshøyden i  $20^\circ$  punktet og en helning på energilinjens på  $0,2 - 0,3$  kan utløpslengden anslås. Denne metoden brukes for eksempel for å vurdere om konstruksjoner er i utløpssonen ved eventuelle flomskred.



Figur 11: Forslag til prosedyre for beregning av utløpslengde (Norem & Sandersen 2012 Figur 3.28).

Forslaget tar utgangspunkt i at de fleste flomskred har en begrenset hastighet i  $20^\circ$  punktet som varierer mellom 5 og 10 m / s, opptil 15 m / s for spesielt store skred. Et flomskred med hastighet 10 m / s vil vanligvis ha en energihøyde på 5,1 m og flyte høyde på 1 – 2 m. Flyte høyde på 2 m vil gi en samlet trykk- og hastighetshøyde,  $h_k = 7,1$  m, se Kapittel 2.4.3 «Energi». Ved tilbakeberegning av registrerte skred har en kommet frem til at energilinjens helning i nedre del av skredbanen varierer mellom  $0,2 - 0,3$  ( $11,3^\circ - 16,7^\circ$ ). Hellingen vil være lavere for mindre skred eller skred med grove masser, rundt  $11,3^\circ$ , enn for store skred eller skred med stort finstoffinnhold, rundt  $16,7^\circ$  (Norem & Sandersen 2012).

For vei og jernbane bør utløpsdistansen bestemmes ved å benytte et gjennomsnitt av utløpsdistansen beregnet ved bruk av vinkelen i utløsningspunktet og i  $20^\circ$  punktet (Norem & Sandersen 2012).

## 2.6 Sikringstiltak

En beskrivelse av hensikten med sikringstiltak og forskjellen på passive og aktive tiltak står i Christiansen (2012). Hvilke typer sikringstiltak som kan benyttes mot flomskred er godt dokumentert, men det er behov for mer forsøksbasert data med hensyn på tiltakenes effekt og konstruksjon. Dokumentasjon av tiltak er utført blant annet via forsøk av Hiller og Jenssen (2009), teoretisk av Sellevold (2010) og teoretisk og via forsøk av Fiskum (2012). Hiller og Jenssen (2009) utførte forsøk på flomskred for å undersøke hvordan ledevoller påvirker skred, for eksempel med tanke på hvor høyt bølgen skyller opp på ledevollene og betydningen lysåpningen har for skredets passering av bro. Modellen de brukte er senere blitt nyttet av Fiskum. Sellevold (2010) beskriver de ulike sikringstiltakene som kan brukes mot flomskred og tar for seg noen ulike scenarier i tillegg til en case fra Eikesdalen. Fiskum (2012) har utført modellforsøk for å undersøke effekten av følgende sikringstiltak mot flomskred:

- Lukket kontrolldam
- Åpen kontrolldam med to spalter
- Åpen kontrolldam med 4 spalter
- Bremseskjeller
- En kombinasjon av de to sistnevnte tiltakene

Som nevnt tidligere kan teori fra snøskred i en del tilfeller anvendes direkte eller med mindre modifiseringer på flomskred. Brateng (2005) utførte forsøk på snøskred for å se på effekten til rette ledevoller ved ulik treffvinkel, helning på skredsiden av vollen og vollhøyde, i tillegg til buede ledevoller.

I følge VanDine (1996) er hovedoppgaven til sikringstiltakene ved flomskredkontroll å demme opp eller hemme det grovkornede materialet i skredet. Det er mange aktive sikringstiltak og de kan benyttes både alene og i serie. Valg av type sikringstiltak avhenger blant annet av tilgjengelighet til skredbanen, omgivelsene, forventet skredmateriale og skredstørrelse og av konsekvens ved skred og fremkommelighet ved behov for rensing av eventuelle sikringstiltak. Valget vil også avhenge av forventet flomskredtype, det vil si viskøst, turbulent eller steinrikt. De fleste konstruksjoner bygges i utløpsområdet til skredene da dette området er mest tilgjengelig for anleggsmaskiner, i tillegg til at de ligger nært opptil infrastrukturen som ønskes sikret (Norem & Sandersen 2012). De aktive sikringstiltakene kan deles inn i åpne eller lukkede, der de åpne er designet for å begrense strømmingen av kanalisert flomskred, mens de lukkede skal oppholde skredet (VanDine 1996).



I følge Høydal og Kronholm (2013) er det tre farer ved flomskred som bør vurderes ved valg av sikringstiltak og fire størrelser som må vurderes for å oppnå best mulig design og dimensjonering av sikringstiltak. Farene ved flomskred er:

- Erosjon i tilløpsområder
- Dynamisk effekt på hindringer i skredløpet
- Avsetning av skredmasser

Størrelsene som må vurderes er:

- Flomskred / flomvannføring i nedbørsfeltet
- Volum av flomskred
- Hastighet av flomskred
- Trykk mot konstruksjoner

Beregning av utløpslengden til flomskred er viktig for å fastslå hvilke områder som vil påvirkes av en eventuell skredhendelse. En viktig faktor som påvirker utløpslengden er effekten av kanalisering. Denne effekten kan oppstå når skred ledes gjennom områder ved bruk av sidevoller <sup>2</sup> eller hvis det får en retningsendring og følger en ledevoll. I følge Hungr et al (1984) og Corominas (1996) (hentet fra (Rickenmann 2005)) er avsetning og utløpslengde til flomskred avhengig av flere faktorer, der avtakende skråningsgradient og manglende innsnevring i utløpsområdet bør vektlegges. Generelt tilsier tidligere erfaring at utløpsdistansen øker med volumet på skredmassene. Utløpsdistansen vil også øke med økt finstoffinnhold og økt vanninnhold (Norem & Sandersen 2012).

Norem og Sandersen (2012) definerer utløpslengde knyttet opp mot vei / jernbane ved å se på ytre begrensnig av de avsatte skredmassene som kan føre til skade på konstruksjoner. Det antas dermed at suspensjonsstrømmen av vann og finstoff tas opp av drensyttemene og dermed ikke fører til skade på vei / jernbane.

Med tanke på sikringstiltaket side- og ledevoll vil kulminasjonsverdien av flomskredet, maksimal hastighet og volumstrøm være viktig, og ikke volumet av masser. Høydal og Kronholm (2013) foreslår en praktisk tilnærming som baserer seg kun på hydrologiske forhold der kulminasjonsflommen beregnes for dimensjonerende flom (100 – 200 års flom). Rasjonale formel (se Vegvesenet håndbok 018) kan tas i bruk for mindre nedbørsfelt og

---

<sup>2</sup> Sidevoller – når det settes opp to voller parallelt for å danne en kanal for skredmassene.

analyser av nærliggende hydrometriske stasjoner for større nedbørsfelt. Volum av skredmassene vil derimot være av betydning ved valg av fangvoller, -gjerder og – dammer, i motsetning til ved tiltak som ledevoller. Volum av flomskred er en vanskelig faktor å bestemme og det avhenger av nedbørsfeltets areal og dets midlere helning.

Hastighet er en viktig parameter ved beregning av strømningshøyde og videre av nødvendig høyde på sikringstiltak, samt for å dimensjonere erosjonssikring i form av bunn og sidestein som skal kunne motstå kreftene fra vannet og massetransport.

### **2.6.1 Voller**

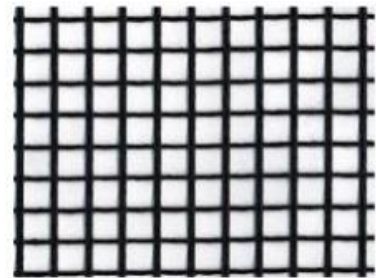
Denne oppgaven tar for seg sikringstiltaket voll i form av side-, fang- og ledevoller. Ledevoller og sidevoller konstrueres etter like prinsipper og vil derfor bli beskrevet i samme kapittel. En del teori rundt konstruksjon gjelder også for fangvoller, men denne typen vil bli beskrevet i et eget kapittel. Voller er ofte store konstruksjoner som har kapasitet til å ta i mot skred. En voll er et aktivt sikringstiltak som har til hensikt å kanalisere skred, stanse eller bremse skred eller lede det i en bestemt retning slik at det ikke fører til skade på infrastruktur og mennesker. Lokalisering, utforming og dimensjonering av vollene er viktig for at de skal kunne gi tilstrekkelig sikkerhet. Ved kanalisering av skred snevres skredet inn ved hjelp av en voll på hver side, sidevoller, slik at det ikke kan bre seg utover i områder der det kan gjøre skade. Ledevoller leder skred, via avbøyning av skredbanen, mot områder hvor skred har lav konsekvens, mens en fangvoll bygges vinkelrett på skredretningen med den hensikt å bremse eller stanse skredet. En fangvoll vil ha til hensikt å stanse skredet ved dens plassering, mens voller for å kanalisere skred eller lede skred har til hensikt å lede det videre.

Dette sikringstiltaket er som regel siste ledd i en serie av tiltak for å kontrollere flomskred og redusere dets konsekvens (Huebl & Fiebiger 2005). Tiltaket kan benyttes både i transport- og erosjonsområdet og i avsetningsområdet. I det sistnevnte området er kravene til støt- eller erosjonssikring mindre (Høydal & Kronholm 2013). Det er viktig med god tilgjengelighet til ledevollene slik at vedlikehold og opprydning kan utføres jevnlig. Etter et skred vil det ofte ligge skredavsetninger som bør fjernes for å unngå redusert effektiv høyde. I tillegg får vollene ofte erosjonsskader under en skredhendelse. Erosjonssikring av skredsiden av vollen, spesielt i området ved foten, er viktig for å kunne ta i mot skjærspenningene fra flomskredet. Norem og Sandersen (2012) sier at erosjonssikringen i de mest utsatte områdene som hovedregel dimensjoneres for skjærspenninger på ca. 10 kPa. Denne verdien er beregnet ut fra

en flyteøyde på 3 m, skråningshelning på 10 ° og skredmasse med tetthet på 2000 kg / m<sup>3</sup> (Norem & Sandersen 2012).

Det er viktig at sikringstiltaket utføres slik at skredmassene enten stopper før eller etter området de kan gjøre skade på. Hvis skredmaterialet avsettes langs ledevollen / sidevollene vil det gi en redusert effektiv høyde som svekker tiltakets effekt. Det må derfor tas høyde for at hele skredet enten skal stoppes av vollen eller ledes videre til et egnet avsetningsområde. (Norem & Sandersen 2012).

En voll kan konstrueres av mange materialer, deriblant betong, armert betong, mur av blokker, gabionmurer og mange fler (Huebl & Fiebiger 2005). Materiale fra området som ønskes sikret er ofte mye brukt da dette er kostnadsbesparende og medvirker til kort byggetid. Det vil da være det granulære materialet som brukes. Bruk av armert jord gir mulighet til å bruke lokale materialer til å bygge voller med bratt fronthelning. Armert jord vil si at jordlag i tykkelse 30 – 40 cm legges oppå armering, gjerne i form av armeringsnett eller armeringsduk, se Figur 12, som så legges over og dermed holder jordmassene på plass. Figur 13 illustrerer prinsippet ved oppbygging av armert skråning. Jordarmeringen tilfører jorden strekkapasitet og gjør at det kan bygges brattere enn jordens naturlige rasvinkel. Dette er et materiale som er fleksibelt i og med at det kan tilpasses terrenget og utformes i forhold til målsetning og i tillegg er byggemetoden enkel og rask (personlig kommunikasjon A. Watn, 25. februar 2013).



Figur 12: Geonett (Steinsenteret).



Figur 13: Armert bratt skråning i Hallingtorv (foto: SINTEF).

Erosjon er et stort problem når det gjelder sikring av flomskredløp og en eventuell voll av armert jord må derfor plastres for å begrense erosjonen. Dimensjonering av nødvendig steinstørrelse for erosjonssikring kan gjøres via følgende formel:

$$D_{60} \geq \frac{v^2}{2g} \text{ [m]} \quad (\text{Statens vegvesen, Håndbok 016, 1992, hentet fra (Høydal \& Kronholm 2013)}) \quad [13]$$

der

$D_{60}$  = Steinstørrelsen som 60 % av prøven er mindre enn, regnet etter vekt.

Som nevnt i Kapittel 2.1 «Generelt om flomskred» er det vanlig med hastigheter på 5 – 10 m / s for flomskred og dette fører til at diameteren på erosjonssikringssteinene blir større enn 1 m. Steinene legges som en steinflate der de låses av hverandre og så legges det mindre steiner med lengdeaksen ned for å minske angrepsflate og løft, se Figur 14.



**Figur 14: Foto av erosjonssikring i Hallinggrovi (Høydal & Kronholm 2013 Figur 28).**

Ved dimensjonering av vollen bør en undersøke både skredfrontens trykk mot konstruksjonen og støt som følge av store steiner i skredfronten. Etter initialsammenstøtet stopper fronten opp og former en passiv masse som til en viss grad vil beskytte vollen mot påfølgende støt. Lasten fra initialstøtet til skredfronten bør beregnes ved hjelp av momentberegning der hele fronten av bølgen regnes som et prisme med uniform hastighet lik gjennomsnittshastigheten, se Ligning [14] (Hungr et al. 1984).

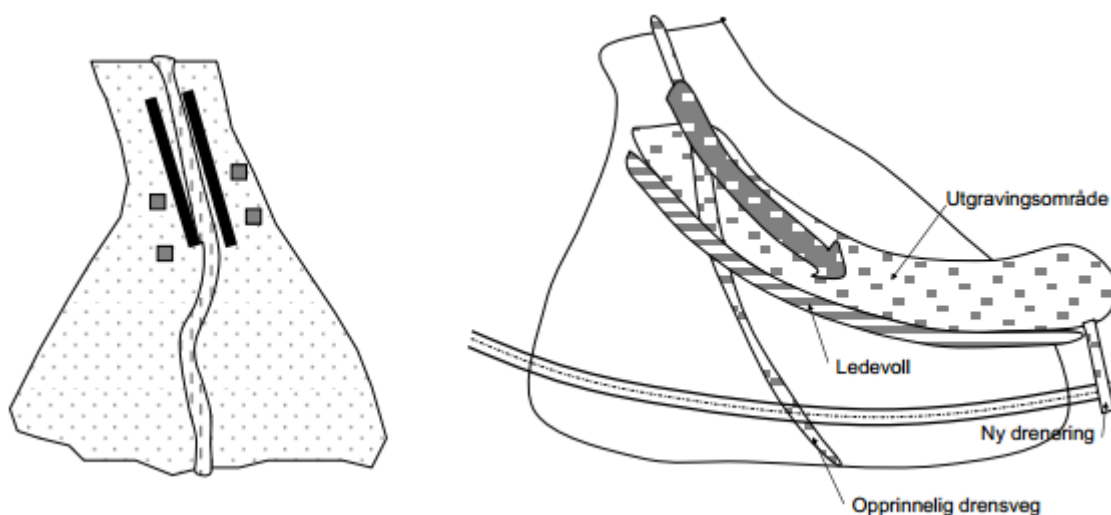
$$S = \rho A v^2 \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (\text{Hungre et al. 1984}) \quad [14]$$

der

$$S = \text{Total støtkraft [N]}$$

### 2.6.1.1 Sidevoll og ledevoll

Voller kan konstrueres rette eller buede. Rette voller brukes ofte for å styre massene til et område der de ikke gjør skade ved å kanalisere skredet, mens buede brukes for å styre skredet parallelt med for eksempel veier, se Figur 15. Ledevoller er mye brukt for å hindre ødeleggelse av vei og jernbane ved å føre skredet inn i en undergang, over et overbygg eller lede det parallelt med vei / jernbane.



**Figur 15: Eksempel på bruk av sidevoller og ledevoll. T.v. sidevoller for å hindre at flomskred brer seg ut til siden i skredløpet og t.h. bruk av ledevoll for å sikre vei (Norem & Sandersen 2012 Figur 6.10-11).**

I forbindelse med bruk av voller som sikringstiltak er det som tidligere nevnt viktig at helningen i terrenget er tilstrekkelig stor for å unngå at eventuelle skredmasser stanser opp i kanalen eller langs ledevollen. Hvis fronten stanser opp kan skredmassene bak lett flyte over sidevollene eller ledevollen og føre til skade. Voller bør derfor kun benyttes der en har grunn til å tro at skredmassene vil holde seg i bevegelse uten vesentlig oppbremsing.

I forsøkene til Brateng (2005) der snøskred ble undersøkt viste det seg at en ledevoll er mer effektiv jo lenger ned i utløpet den plasseres og at effekten øker med økende helning på skredsidene av vollen. I tillegg er styringen av massene størst ved liten avbøyningsvinkel.



Ved utforming av lede- og sidevoller er det en del viktige faktorer som bør tas hensyn til og noen av de forholdene som vektlegges mest og som vil bli utdypet er (Norem & Sandersen 2012):

- Vinkelen mellom skredets og vollens retning, treffvinkel
- Helning på skredsidens av vollen
- Høyden på vollen
- Utforming av skredløpet
- Drenering av vollområdet

### Vinkelen mellom skredets og vollens retning, treffvinkel

For å unngå at skred skal gå over vollkronen er det viktig at vinkelen mellom skredet og vollen i horisontalplanet ikke overstiger en kritisk verdi. I følge Norem og Sandersen (2012) bør ikke vinkelen overstige  $10 - 20^\circ$ , men vinkler opp mot  $30^\circ$  har gitt tilfredsstillende resultater. Treffvinkelen er spesielt viktig for flomskred på grunn av dets store vanninnhold som gir skredmassene stor mobilitet og lav fasthet.

Når skred skal ledes parallelt med vei og jernbane vil det vanligvis være nødvendig med en endring i skredets bane som er langt større enn  $10 - 20^\circ$ . I slike tilfeller er det viktig at vollen og dermed skredbanen gradvis får en vinkelendring. I tillegg må en sørge for tilstrekkelig høyde på vollen på utsatte steder, det vil si der vinkelendringen er stor, for å unngå at skredmassene går over vollkronen. Når skred skal ledes over overbygg eller inn i underganger vil det være lettere å holde seg innenfor kritisk treffvinkel ettersom overbygg og underganger ofte konstrueres basert på muligheten for skredhendelser. Det vil likeledes her være enkelte tilfeller der større vinkelendringer er nødvendig.

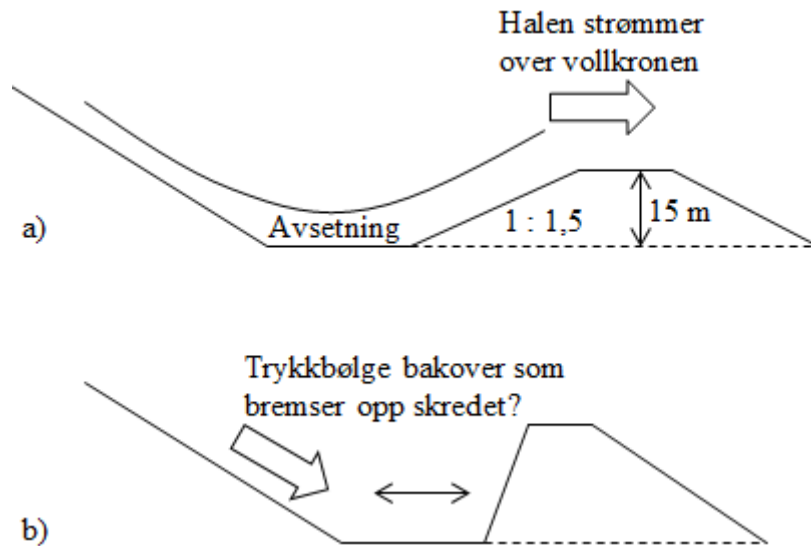
### Helling på skredsidens av vollen

Helningen i vertikalplanet på skredsidens har gjennom praktisk erfaring og erfaring fra modellforsøk vist seg å være av stor betydning for vollens effekt ved skred. Økende helning på vollsidens mot skredet bidrar til en større effektiv høyde og skredsidens av vollen bør derfor gjøres så bratt som økonomisk forsvarlig (Norem & Sandersen 2012). Steil vegg kan oppnås ved å benytte armert jord, som i prinsippet kan bygges med vertikal helning. Eksempel på bratte skråninger med armert jord er vist i Figur 16.



**Figur 16: Bratte skråninger med armert jord (foto: SINTEF).**

Betydningen av helningen på skredsidan av vollen kan diskuteres ut fra at materiale avsettes langs vollen under en skredhendelse og dermed endrer vollens opprinnelige helning. H. Norem (personlig kommunikasjon, 22. november 2012) deltok i et prosjekt der en 15 m høy ledevoll ble bygget med helning 1 : 1,5 (34 °) for å lede snøskred. Under en skredhendelse ble det avsatt snø relativt parallelt til vollen og de bakre massene i skredet strømmet over vollkronen, se Figur 17 a). Ettersom det er dyrt å få konstruert de steile veggene vil det være av interesse å kjenne effekten de gir, om skredmassene vil avsettes oppetter en steil vegg og dermed redusere den opprinnelige helningsvinkelen på vollens skredside slik at de bakre massene kan strømme over vollkronen. Brateng (2005) sine forsøk på snøskred viste som tidligere nevnt at en brattere vinkel på skredsidan av vollen ledet skredet bedre. Et viktig spørsmål angående helningen til ledevollen er om en bratt helning kan føre til at det sendes en trykkbølge bakover som vil være med på å bremse ned skredet, se Figur 17 b). Dette er et tema det ikke er mye litteratur på og som det derfor vil være viktig å undersøke for å optimalisere effekten av ledevoller.

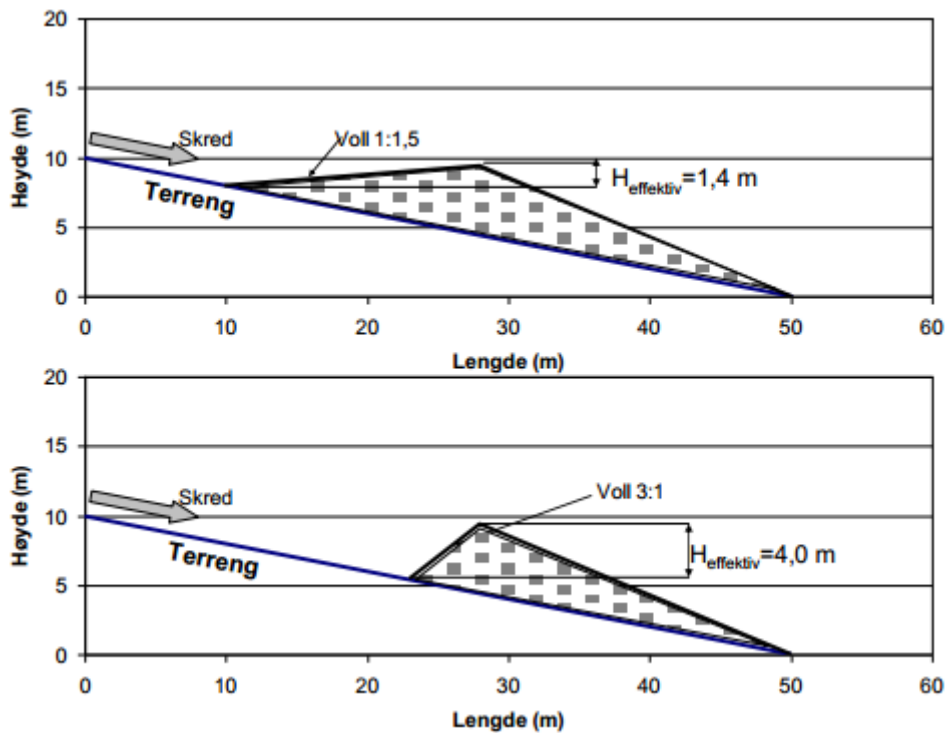


Figur 17: Skisse av vollens effekt på skred. Figur a) viser hvordan skredet legger seg oppover vollen og skredhalen strømmer over. Figur b) viser mulig trykkbølge ved steil voll.

### Høyden på vollene

For å hindre at skredmassene strømmer over vollen må den ha tilstrekkelig høyde. Viktige faktorer som påvirker den effektive vollhøyden er skredets hastighet, flyte høyde og -egenskaper, bredde, størrelse, effekten av nedbremsing og vinkelen mellom skredet og vollen. Effektiv vollhøyde er definert som høydeforskjellen mellom vollkronen og foten til vollen målt i skredets opprinnelige retning (Norem & Sandersen 2012). Figur 18 illustrerer effektiv vollhøyde på voll med helling mot skredet med forhold 1 : 1,5 og 3 : 1 og helling på skredbanen på  $11,3^\circ$ . Dette gir en effektiv høyde på 1,4 m og 4 m.





Figur 18: Illustrasjon av effektiv vollhøyde (Norem & Sandersen 2012 Figur 6.14).

For valg av vollhøyde utover oppstuvningshøyden er flyte høyde og effekt av nedbremsing viktig. I følge Norem og Sandersen (2012) er flyte høyde vanligvis fra 1 - 2 m og opptil 3 m. For mindre skred kan den være under 1 m og for eksepsjonelt store skred kan flyte høyden være større enn 3 m. Ved avsetning langs vollen vil effektiv vollhøyde bli redusert, og dette må det tas hensyn til ved dimensjonering av vollhøyden. Norem og Sandersen (2012) sier at det er liten erfaring på dette området, men at i terreng der skredfronten får en liten oppbremsing er 1 – 2 m en sannsynlig verdi, mens i terreng der retningsendring fører til oppbremsing vil verdien være vesentlig høyere.

En retningsendring på skredmassene vil føre til at skredet går lenger opp på vollen enn det ville gjort om skredet gikk rett fram, en får dermed en oppstuvningshøyde mot vollen. Oppstuvningshøyden er i følge Norem og Sandersen (2012) avhengig av energihøyden og kan skrives slik:

$$\Delta H_o = \frac{(v \times \sin \alpha)^2}{2 \times g} = H \times \sin^2 \alpha \text{ [m]}, \quad H = \frac{v^2}{2 \times g} \text{ og } g = 9,81 \text{ m / s}^2$$

(Norem & Sandersen 2012) [15]

der

$\Delta H_o$  - Oppstuvningshøyden [m]

Hvis kanalen er avrundet kan i følge Mears (1981) (lest i (Hungr et al. 1984)) oppstuvningshøyden til flomskred beregnes analogt med snøskred ved hjelp av formel for tvungen strømvirvel:

$$\Delta H_o = k \frac{bv^2}{rg} \text{ [m]} \quad (\text{Mears 1981 hentet fra (Hungr et al. 1984 Formel 13)}) \quad [16]$$

der

k = Korreksjonsfaktor, 5 når design oppstuvningshøyde skal beregnes

r = Gjennomsnittlig kurvatur radius [m]

Oppstuvningshøyden er, som en kan se av Ligning 15 og 16, sterkt avhengig av skredhastigheten. Høyden vil øke med økt skredhastighet og treffvinkel. Som nevnt i Kapittel 2.1 «Generelt om flomskred» har flomskred vanligvis skredhastighet mellom 5 og 10 m / s og dette gir energihøyder fra 1, 27 til 5,1 m. En treffvinkel på 20 ° og 40 ° vil gi en oppstuvningshøyde på henholdsvis 0,1 - 0,6 m og 0,5 – 2,1 m.

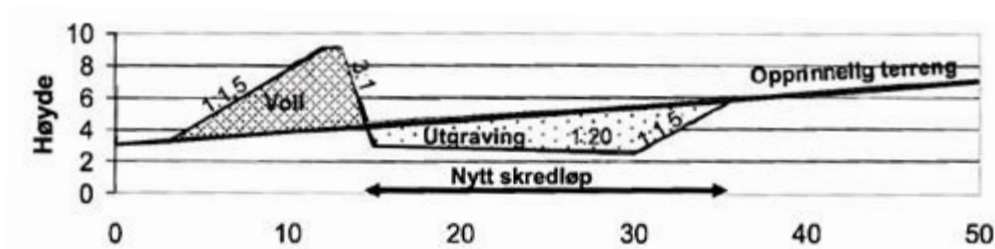
Når ledevoller brukes til å styre flomskred bør treffvinkelen være mindre enn 15 – 20 °, helst ikke overstige 20 – 25 °, og en effektiv høyde på 4 – 5 m vil være tilstrekkelig i de fleste tilfeller. Dersom skredet har et høyt finstoffinnhold vil det få enda bedre flyteegenskaper og kritisk treffvinkel bør reduseres (Norem & Sandersen 2012).

Modellforsøk utført av Brateng (2005) viste at selv om vollhøyden var tilstrekkelig til å hindre at fronten av skredet strømmet over vollen kunne masser lenger bak strømme over. Dette kom av at skredets retningsendring førte til en reduksjon av frontens hastighet i tillegg til at skredet ble konsentrert i bredden, og dette resulterte i økt skredtykkelse. De fremre massene som ble bremsert opp reduserte den effektive vollhøyden og de bakre massene fløt over de fremre og over vollkronen.

### Utforming av skredløpet

Når ledevollen skal konstrueres av løsmasser er det gunstig å grave ut massene fra området på skredsiden av vollen. Denne senkningen av terrenget framfor vollen vil øke effektiv vollhøyde og i tillegg skape bedre plass for skredmassene (Norem & Sandersen 2012). For snøskred må kravene til vollens høyde stå i forhold til opprinnelig terrenghøyde. Dette fordi en utgraving i front av vollen vil føre til økt skredhastighet og dermed en hastighetshøyde som tilsvarer utgravingsdybden (Norem 2011). Med bakgrunn i at hastigheten til flomskred øker ved økende terrenghelning, opp til en viss grad, bør en ta utgangspunkt i opprinnelig terrenghøyde når en ser på kravet til vollens høyde også for flomskred.

Både utformingen av vollen og utgravningsområdet i longitudinal og lateral retning er viktig. Figur 19 viser en gunstig utforming av utgravningsområdet i lateral retning. For å redusere trykket mot vollen og flomvannets erosjon langs foten av vollen bør utgravingen av det nye skredløpet ha en svak helling ut fra vollen. Selve vollen bør ha en bratt helling på skredsiden for å unngå at skredmassene renner over og en svak helling på yttersiden for å fordele kreftene over et stort område (Norem & Sandersen 2012).



**Figur 19: Forslag til utforming av voll og utgravningsområdet (Norem & Sandersen 2012 Figur 6.15).**

I longitudinal retning er det viktig å gi skredet tilstrekkelig bredde og jevnt fall for å minimere oppbremsingen av skredmassene i skredløpet. For å holde den effektive høyden konstant bør også vollkronen ha et jevnt fall. Som nevnt tidligere brukes det ofte buede ledevoller for å lede skred parallelt med veier. For å unngå at skredmassene flyter over veien bør utløpsområdet ved enden av den buede ledevollen legges på et lavere nivå enn selve veien. Det er i områder med treffvinkel større enn  $30 - 40^\circ$  og ved enden av vollen at skred har en tendens til å flyte over vollene (Norem & Sandersen 2012).

### Drenering av vollområdet

Ledevoller er store konstruksjoner og vil som oftest påvirke de naturlige drensveiene i skredområdet. I likhet med damkonstruksjoner skal voller utføres slik at de står drenert. Som nevnt benyttes det ofte stedlige masser under konstruksjon av voller, og i skredområder er det ofte finkornede masser og det vil i slike tilfeller være behov for å legge inn drensveier (drenerende lag) (Høydal & Kronholm 2013). En ny erosjonssikker drensvei parallelt med vollen i en viss avstand fra foten som så føres frem til eksisterende drensveier er vanlig å etablere. Alternativt kan den gamle drensveien beholdes ved at det bygges en kulvert gjennom vollen, men i dette tilfelle må også en drensvei parallell med vollen lages i tilfelle kulverten blir tettet av skredmasser (Norem & Sandersen 2012).

### 2.6.1.2 Fangvoll

Fangvoller er effektive til å stoppe og bremse skred dersom de har tilstrekkelig lengde og høyde. Som nevnt konstrueres fangvoller med en treffvinkel på  $90^\circ$ , det vil si vinkelrett på skredretningen. Figur 20 viser et foto av en fangvoll.



Figur 20: Foto av fangvoll med bratt tørrmur langs Rv 7 Indre Rotagjelet, Hordaland (Norem 2011 Figur 8.25).

Ved konstruksjon av fangvoll gjelder de samme faktorene som når skred skal kanaliseres eller ledes ved bruk av voller som nevnt i Kapittel 2.5.1.1 «Sidevoll og ledevoll». Skredets volum er av stor betydning ved bruk av fangvoll dersom en ønsker at den skal oppbevare skredvolumet, ettersom tilstrekkelig lagringsareal på vollens skredside da er en forutsetning. For snøskred kan lagringsarealet beregnes ved å trekke en linje mellom vollkronen og med en helning på  $5^\circ$  mot skredområdet, se Figur 21 (Norem 2011). I følge H. Norem (personlig kommunikasjon, 6. mai 2013) bør energilinjens ved beregning av lagringsareal for flomskred ha en helning på  $0 - 5^\circ$ .



Figur 21: Illustrasjon av lagringsareal for snøskred ved bruk av fangvoll (Norem 2011 Figur 8.24).

### **3 Modellforsøk**

Kapittelet beskriver bakgrunnen for forsøkene, forsøksmodellen og skredmaterialet. Så presenteres forsøksoppsettet, etterfulgt av utstyr som nyttes, informasjon om initialbetingelsene og kunnskap tilegnet via testforsøk.

#### **3.1 Bakgrunn**

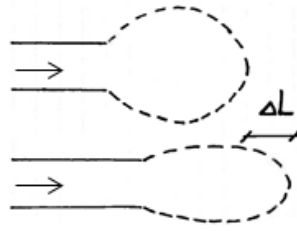
Modellforsøk kan brukes til å skaffe forsøksbasert data, i dette tilfellet for valg og dimensjonering av sikringstiltaket voller. Modellforsøk er også et viktig verktøy for å utvikle og forbedre numeriske modeller.

Det er utført flere forsøksserier som modellerer flomskred, hvorav noen er nevnt i Kapittel 2.6 «Sikringstiltak», men fremdeles gjenstår det å undersøke og dokumentere mange undertema. Det mangler forsøksbasert data på blant annet kanaliseringens effekt på utløpslengden og på utforming av fang- og ledevoller. Effekten av kanalisering ble undersøkt i Christiansen (2012) og analyseres videre i denne masteroppgaven. I denne studien vurderes oppskyllingshøyden ved bruk av fang- og ledevoller når helningen på skredsidene varierer, samt utløpslengden med og uten bruk av ledevoll. Ledevollen undersøkes med to ulike treffvinkler.

Målsetningen med modellforsøkene er å tilegne seg generell kunnskap om selve skredhendelsen / -mekanismene, om effekten av kanalisering og av varierende treffvinkel og helning på skredsidene av voller med hensyn på oppskyllingshøyde og utløpslengde, samt strømmingen i skredbanen.

Modellforsøkene utføres på en eksisterende modell ved Vassdragslaboratoriet på NTNU, som tidligere er brukt i prosjektet knyttet til denne masteroppgaven, Christiansen (2012), av Fiskum (2012) og av Hiller og Jenssen (2009).

Kanalisering av skred ved bruk av sidevoller øker mest sannsynlig skredets flyteegenskaper i forhold til når det ikke er kanalisert og fører til en lengre utløpslengde (Norem & Sandersen 2012). Figur 22 viser prinsippet om økt utløpslengde ved kanalisering av flomskred. Målet med forsøkene er å etablere et forhold mellom kanal- og utløpslengde.



**Figur 22: Skisse av effekten av kanalisering på utløpslengde.**

Ved bruk av voller for å lede eller stanse skred er det viktig at de har en tilstrekkelig høyde slik at skredet ikke strømmer over vollkronen. Nødvendig høyde på vollen vil avhenge av treffvinkelen og vinkelen på skredsiden av vollen, så vel som skredets volum, flyte høyde og hastighet. Målet med forsøkene er å etablere et forhold mellom treffvinkelen, vinkelen på skredsiden av vollen og oppskyllingshøyden, samt å se om ledevollen fører til en viss kanaliseringseffekt og å registrere utløpslengden.

### **3.2 Modell**

Modellen er en prinsippmodell, altså en modell for å undersøke en typisk situasjon og ikke en kopi av et virkelig skredløp. Det er hensiktsmessig å bruke en prinsippmodell siden en ønsker generelle resultater som skal kunne overføres til lignende skredbaner.

Modellen er bygget i målestokk 1 : 20 og i følge Hiller og Jenssen (2009) er det ikke hensiktsmessig å ha en mindre modell hvis en skal unngå stor påvirkning av skalaeffekter på resultatet. I mindre modeller vil de viskøse kreftene bli for store og det vil være vanskelig å finne et egnet skredmateriale. En vesentlig større modell vil gi gode resultater, men være kostbar å bygge og upraktisk å bruke. Skalaeffekter er ikke et tema i denne studien. Det utføres noen endringer i modellen for å tilpasse den til forsøksserien. Figur 23 viser et bilde av modellen før utbygging.

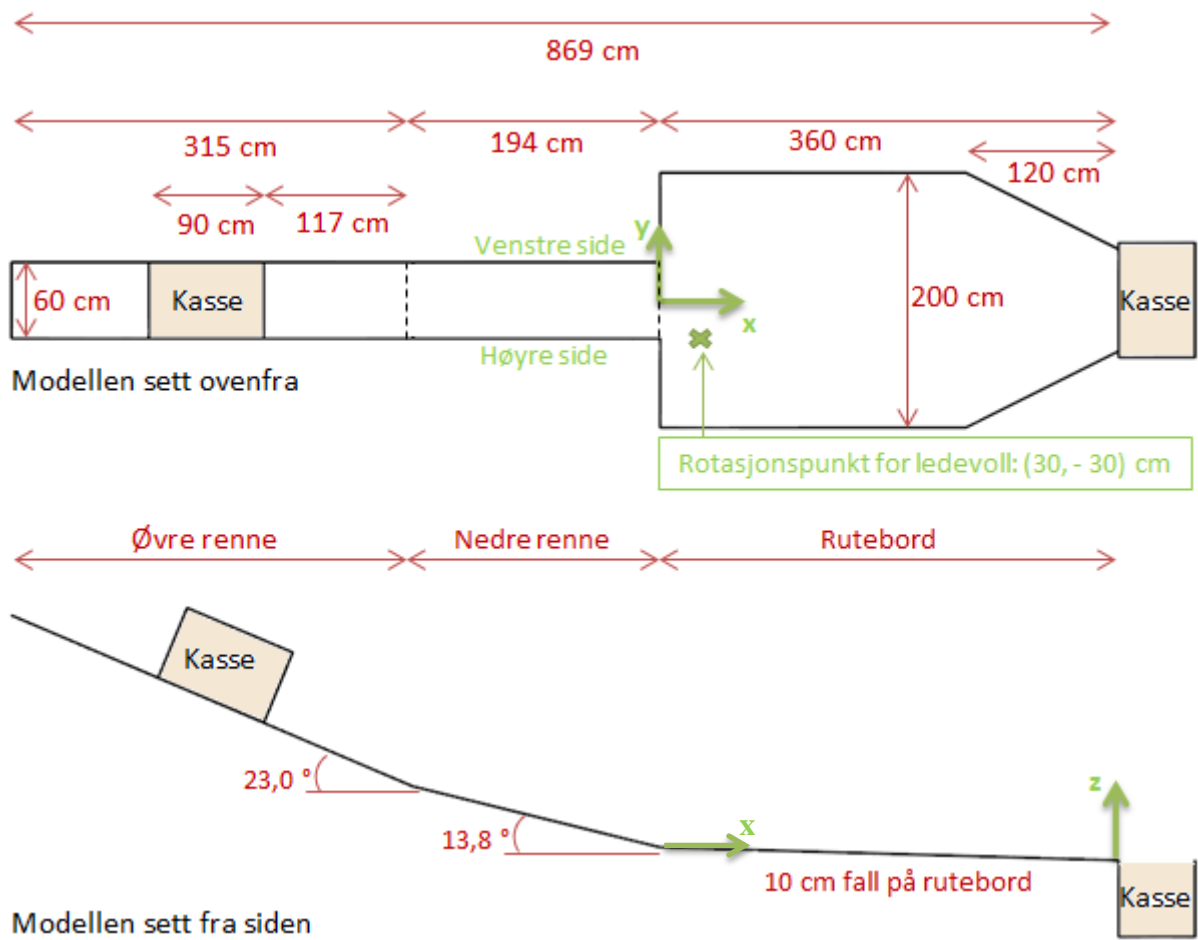


Figur 23: Forsøksmodell (foto: Christiansen).

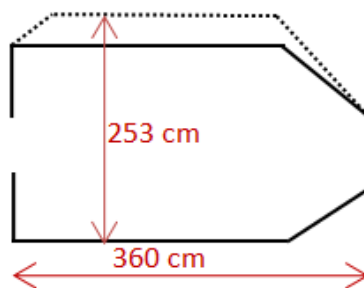
Figur 24 viser en skisse av modellen med aksesystem (x, y, z), sett ovenfra og fra siden. Den viser også rotasjonspunktet for ledevollen under forsøkene. Skissen av modellen illustrerer at venstre side er venstre side sett bakfra og har positiv y-verdi.  $y = 0$  ved senterlinjen,  $x = 0$  i overgang mellom nedre renne og rutebord, og  $z = 0$  ved  $x = 360$  cm som vil si ved enden av rutebordet. Øvre renne har en helning på  $23,0^\circ$  og nedre renne på  $13,8^\circ$ . Bredden på rennen er 60 cm. Rutebordet har en bredde på 200 cm og ruter på 20 x 20 cm. Etter utbygging vil deler av rutebordet være 253 cm bredt på det bredeste, se Figur 25. Rutebordet har et fall på 10 cm fra øvre til nedre del og kanter på sidene slik at vannet og massene føres ned i kassen ved enden av bordet.

Under forsøkene står en kasse i den øvre rennen, med fronten ved  $x = -311$  cm, som en slipper skredmassene fra og en annen kasse ved enden av bordet for å fange opp massene, slik som illustrert i Figur 24. Kassene, se Figur 26, som brukes under forsøkene er identiske. Døren på kassen er hengslet omtrent  $\frac{1}{3}$  fra toppen.





Figur 24: Skisse av modell, sett ovenfra og fra siden.



Figur 25: Skisse av rutebord, før og etter utbygging.



Figur 26: Kasse (foto: Christiansen).



### 3.3 Skredmateriale

Forsøkene utføres med en grusig sand med  $d_{90} = 2,7$  mm og  $d_{50} = 1,2$  mm. Kornfordelingsskjema er lagt ved som Vedlegg C. Figur 27 viser et bilde av skredmaterialet på millimeterpapir og som en kan se er kornene kantet. Materialet er det samme som Fiskum (2012) og Hiller og Jenssen (2009) nyttet.



Figur 27: Skredmateriale på millimeterpapir (foto: Christiansen).

### 3.4 Forsøksoppsett

Det utføres 3 – 4 forsøk per forsøksserie for å få et godt grunnlag å analysere skredhendelsene ut fra.

Forsøkene navngis ut fra hvilket sikringstiltak som nyttes. Skredene med varierende kanallengde nummeres som S(nummer)K(lengde på kanal). For eksempel skred 2 med kanallengde 1,2 m vil skrives S2K(1,2). Skredene uten voll vil navngis som S(nummer)(-), for eksempel vil skred 1 betegnes S1(-). Skredene med fang- og ledevoll navngis etter hvilket skred ved de gitte betingelsene det er, treffvinkelen, TV, skredet har på vollen og helning på skredsiden av vollen, H, S(nummer)TV(°)H(°). For eksempel skred nummer 2 for treffvinkel  $40^\circ$  og helning på skredsiden av vollen  $72^\circ$  vil skrives S2TV(40)H(72).

Tabell 1 viser forsøksoppsettet i form av sikringstiltak, antall skred, hvilke resultater forsøksseriene gir, materialforhold og initialbetingelser og når forsøkene utføres.

**Tabell 1: Forsøksoppsett.**

Beskrivelse av forsøksseriene	Forsøk	Parametere som registreres	Materialforhold og initialbetingelser	Utføres
<b>Sidevoll</b>	S1/2/3K(0) S1/2/3K(1,2) S1/2/3/4K(2,4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Strømning</li> <li>- Hastighet</li> <li>- Utbredelse</li> <li>- Flyte høyde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 60 kg grusig sand og 20 kg vann</li> <li>- Helning på kasse, 23 °</li> <li>- Med omrøring</li> <li>- Masser horisontalt i kassen</li> </ul>	Høsten 2012
<b>Testforsøk</b>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tid materiale bruker på å forlate kassen</li> <li>- Mengde materiale igjen i kassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 80 kg grusig sand og 20 kg vann</li> <li>- Helning på kasse 23 ° og 28 °</li> <li>- Uten omrøring og med omrøring</li> <li>- Masser skyvet opp mot døren</li> </ul>	Våren 2013
<b>Uten voll</b>	S1/2/3(-)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tid materiale bruker på å forlate kassen</li> <li>- Mengde materiale igjen i kassen</li> <li>- Strømning</li> <li>- Hastighet</li> <li>- Utbredelse</li> <li>- Flyte høyde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 80 kg grusig sand og 20 kg vann</li> <li>- Helning på kasse, 28 °</li> <li>- Med omrøring</li> <li>- Masser skyvet opp mot døren</li> </ul>	Våren 2013
<b>Fangvoll</b>	S1/2/3TV(90)H(90) S1/2/3TV(90)H(72) S1/2/3TV(90)H(34)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tid materiale bruker på å forlate kassen</li> <li>- Mengde materiale igjen i kassen</li> <li>- Strømning</li> <li>- Hastighet</li> <li>- Oppskyllingshøyde</li> <li>- Utbredelse</li> <li>- Flyte høyde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 80 kg grusig sand og 20 kg vann</li> <li>- Helning på kasse, 28 °</li> <li>- Med omrøring</li> <li>- Masser skyvet opp mot døren</li> </ul>	Våren 2013
<b>Ledevoll, treffvinkel 40 ° og 20 °</b>	S1/2/3TV(40)H(90) S1/2/3TV(40)H(72) S1/2/3TV(40)H(34) S1/2/3TV(20)H(90) S1/2/3TV(20)H(72) S1/2/3TV(20)H(34)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tid materiale bruker på å forlate kassen</li> <li>- Mengde materiale igjen i kassen</li> <li>- Strømning</li> <li>- Hastighet</li> <li>- Oppskyllingshøyde</li> <li>- Utbredelse</li> <li>- Flyte høyde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 80 kg grusig sand og 20 kg vann</li> <li>- Helning på kasse, 28 °</li> <li>- Med omrøring</li> <li>- Masser skyvet opp mot døren</li> </ul>	Våren 2013

Ut fra parameterne som registreres fremstilles følgende resultater:

- Beskrivelse av skredhendelsen / -mekanismene
- Hastighetsforløp
- Energilinjer
- Oppskyllingshøyde
- Utbredelse
- Flytehøyde

Som forsøksoppsettet viser nyttes det to ulike materialforhold, der forskjellen er 20 kg grusig sand. Total materialmengde 100 kg er tilsvarende nyttet i Fiskum (2012). Det er i begge tilfeller fullstendig mettede masser.

For å undersøke effekten av kanalisering er det utført forsøk med tre ulike kanallengder, 0 m, 1,2 m og 2,4 m. Sidevollene plasseres som en forlengelse av rennen i modellen for å danne en kanal.

For å undersøke sikringstiltakene fang- og ledevoll utføres det forsøk med følgende treffvinkler, 90 °, 40 ° og 20 °, og for hver av treffvinklene vil tre helninger på skredsidene av vollen undersøkes, 90 °, 72 ° (3 : 1) og 34 ° (1 : 1,5). Helningen på vollen er i forhold til rutebordet som har en helning på 10 cm over en lengde på 3,6 m. Fangvollen, vollen med treffvinkel 90 °, plasseres med senter i  $(x, y) = (30, 0)$  cm. Ledevollene skal ha et felles rotasjonspunkt,  $(x, y) = (30, -30)$  cm. Ideelt sett vil rotasjonspunktet være  $(x, y) = (x, 0)$  cm, men i så tilfelle vil senteret bli plassert et stykke ut på rutebordet,  $x \approx 80$  cm, og dermed vil skredet miste en del hastighet før det når frem til vollen og dette er ikke ønskelig. Med bakgrunn i at forsøkene med varierende kanallengde viser en tendens til at skredfronten er fremst på høyre side, antas det at et forskjøvet rotasjonspunkt ikke er av særlig betydning.

Årsaken til at forsøkene med varierende kanallengde viser en tendens til at høyre del av fronten er fremst i nedre renne er ukjent. Dette utdypes nærmere i Kapittel 5.1.3 « Strømning i rennen,  $x = -3,1 - 0$  m ». Omrøringen kan påvirke strømningen så under forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll vil derfor den siste omrøringen være sentrert i senter av kassen for å se om det har noen innvirkning.

### 3.5 Utstyr, oppsett og bruksområde

Dokumentering av skredhendelsene er viktig for å kunne beskrive og analysere skredene og til dette benyttes kameraer, ultralydsensor og skanner.

Tabell 2 viser en oversikt over utstyret med kommentar. Ved å filme og ta bilder av skredene vil en få et godt bilde av skredets oppførsel og utbredelse, og i tillegg kan en hente ut informasjon om hastighet ulike steder i skredløpet og oppskyllingshøyde på vollene. Høyhastighetskamera gir veldig gode og detaljerte bilder av skredhendelsen. Hastighet som beregnes ut fra filmer vil være en gjennomsnittshastighet over et område på enten ca. 100 eller 200 mm.

Tabell 2: Utstyrsoversikt.

Utstyr	Kommentar
<b>Kamera H1</b>	Høyhastighetskamera som tar 300 bilder per sekund (29 bilder per sekund). For å få gode bilder er det spesielt viktig med godt lys.
<b>Kamera V1</b>	Videokamera som tar 25 bilder per sekund.
<b>Kamera V2</b>	Videokamera som tar 25 bilder per sekund.
<b>Kamera V3</b>	Videokamera som tar 30 bilder per sekund.
<b>Kamera V4</b>	Videokamera som tar 24 bilder per sekund.
<b>Ultralydsensor</b>	Ultralydsensoren registrerer avstanden ned til underlaget og viser avstanden på et display. Dermed kan flomskredbølgen illustreres, siden tykkelsen på skredet, flyteøyden, registreres. Ultralydsensoren oppdaterer seg 14 ganger i sekunder og vil bli plassert over senterlinjen i rennen ved $(x, y) = (-50, 0)$ cm.
<b>Skanner</b>	Skanneren festes til en horisontal arm og gjør en avlesning per 5 mm i y-retning av modellen. Armen flyttes manuelt nedover i x – retning til all skredmassen på rutebordet er skannet.

Vedlegg D gir sammenheng mellom kameraenes navngiving i prosjektoppgaven, Christiansen (2012), og i denne oppgaven, i tillegg til sammenheng mellom nummereringen av forsøkene.

### 3.6 Initiering av forsøkene og initialbetingelser

I forsøkene som utføres består suspensjonen av en mengde vann og materiale som klassifiseres som flomskred. Initieringen vil foregå ved at døren på kassen åpnes og holdes oppe til all massen har kommet ut av kassen. Flomskredforsøket vil dermed skille seg fra flomskred i naturen, beskrevet i Kapittel 2.2 «Initiering av flomskred», ved at skredet allerede

ved initiering klassifiseres som fullt utviklet flomskred istedenfor at flomskredet utvikles underveis. For å få en skredoppførsel tilnærmet lik den til et fullt utviklet flomskred i naturen nyttes det en malingsblander helt frem til skredene initieres for å få blandet skredmassen slik at den forlater kassen mest mulig som en suspensjon med jevn strømming.

Forsøkene modellerer altså den delen av flomskred i naturen der flomskredet er fullt utviklet. I den øvre delen av et reelt skred foregår initieringen og utviklingen. Dette sees på som den mest representative og repeterbare måten å undersøke flomskred i modellforsøk.

### **3.7 Testforsøk**

I etterkant av forsøkene der effekten av kanalisering undersøkes, Christiansen (2012), er det ønskelig å se nærmere på forsøksrutinen for å optimalisere den. Det utføres derfor testforsøk før forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll for å se på initialbetingelsene og redusere antall variable. Erfaringer fra testforsøkene nyttes, men resultater presenteres ikke.

Hovedfokuset ved testene er å få all massen ut av kassen slik at skredene blir mest mulig identiske. De tidligere forsøkene viser stor variasjon i mengde materiale som ligger igjen i kassen og dermed blir skredvolum en variabel.

Under de første testforsøkene skyves massene opp mot døren slik at ca. 15 cm materiale er synlig i overflaten, se Figur 28, i motsetning til i de tidligere forsøkene hvor de lå horisontalt i kassen og var dekket av vann. Ved å skyve massene opp mot døren slik at de ligger på skrå får massene et vanntrykk i bakkant som bidrar til å skyve en større andel av massene ut av kassen. Dette tiltaket fører til at en større andel masser forlater kassen, men fremdeles er andel masser igjen i kassen veldig varierende. Deretter tiltes kassen 5 ° ekstra, totalt 28°, i tillegg til at massene skyves opp mot døren. Resultatet blir bedre, men variasjonen er fremdeles stor, så derfor vil andel masser igjen i kassen bli registrert etter skredhendelsen.



**Figur 28: Massenes plassering i kassen før omrøring og initiering av skred (foto: Christiansen)**

For å få mest mulig like initialbetingelser utføres det testforsøk uten omrøring av massene ettersom at omrøringen ikke er standardisert, i tillegg til at massene skyves opp mot døren og kassen er tiltet til  $28^\circ$ . Dette fører til at massene forlater kassen så å si fullstendig og i løpet av kort tid, gjennomsnittlig tid er 2,6 s for 3 skred, men massene separerer seg i stor grad slik at det kommer vann strømmende oppå de mer grovkornete massene. Ettersom det er ønskelig med en suspensjon av vann og materiale vil forsøkene utføres med omrøring for at de skal bli mer lik skredhendelsene i naturen.

## 4 Resultater

Kapittelet inneholder resultatene fra forsøkene som skal analyseres. Resultatene er basert på informasjon fra videoer og bilder av forsøkene. Først beskrives strømming, etterfulgt av hastighetsforløp- og energilinjediagram. Deretter presenteres oppskyllingshøyde og utbredelse og til slutt en illustrasjon av flomskredbølgen i form av flytehøydediagram.

### 4.1 Strømning

Både strømmingen i skredet og formen på skredfronten varierer mye i forsøkene og strømmingen og formen henger tett sammen. Det kan være variasjoner både mellom forsøkene utført med varierende kanallengde og de uten voll og med fang- og ledevoll og innad. Fronten kan være buet, rett, skrå eller ha en eller flere avstikker. I tillegg varierer det om den består av kun «fryste<sup>3</sup>» masser, en vannrik suspensjon eller en blanding og i så tilfelle hvilke områder som har hvilken type suspensjon. Frontens form og suspensjonstype kan også variere nedover skredløpet innen et enkelt skred. For de fleste skredene dannes det en ny skredfront i løpet av skredhendelsen og det varierer når den første skredfronten blir tatt igjen og en ny front dannes.

#### 4.1.1 Observasjoner fra kassen

Hvordan massene forlater kassen påvirker skredoppførselen og er derfor av interesse. Kassen filmes under forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. Når døren åpnes kan en se en vegg av materiale som kollapser og skredfronten består av grovkornet materiale etterfulgt av en mer vannrik suspensjon, se Figur 29. Den prikkete, gule linjen viser overgangen mellom det grovkornete materialet og den vannrike suspensjonen.

---

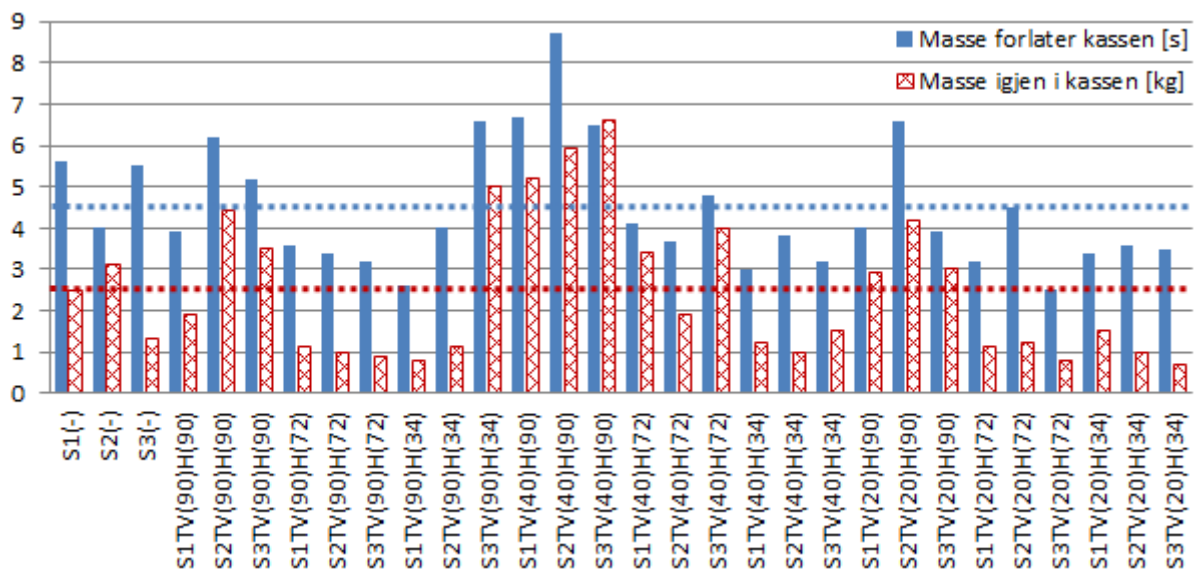
<sup>3</sup> Begrepet «fryste» masser er definert i ordforklaringen og forklares nærmere i kapittel 4.1.2 ««Fryste» masser».





Figur 29: Vegg av masse og skredfront med grovkornet suspensjon, skred S1(-) (foto: Christiansen).

Figur 30 viser tiden massen bruker på å forlate kassen og mengde masse igjen i kassen etter skred under forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. De stiplede linjene angir gjennomsnittsverdiene. Massen bruker gjennomsnittlig 4,5 s på å forlate kassen med tilhørende standardavvik 1,5 (100 %), og det er 2,5 kg masse igjen i kassen med standardavvik 5,3 (100 %). Diagrammet er basert på Vedlegg E. Tiden massene bruker på å forlate kassen er relativt jevn, mens det er større spredning i hvor stor andel masser som er igjen i kassen etter skredhendelsen.



Figur 30: Tiden massen bruker på å forlate kassen [s] og masse igjen i kassen etter skred [kg] for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll.



Det er utført tre testforsøk uten omrøring, men med ellers like initialbetingelser, med kasse tiltet til 28 ° og masser skjøvet opp mot døren, og de viser at det tar i gjennomsnitt ca. 2,6 s for massene å forlate kassen og at den tømmes så å si fullstendig.

#### 4.1.2 «Fryste» masser

Et begrep som brukes mye for å beskrive suspensjonen under strømmingen er «fryste» masser og dette er illustrert i Figur 31 og markert med rødt. At materialet «fryser» vil si at det oppfører seg som et effektivspenningsmateriale, som er et materiale som domineres av effektivspenninger. Suspensjonen går fra å være viskøs til et effektivspenningsmateriale som følge av at vann og korn separeres og en får en økning i den interne friksjonen.

Det «fryste» materialet kommer til syne ved at det er mer kornet, mens i en vannrik suspensjon er kornene mindre tydelige. Både under forsøkene med varierende kanallengde og forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll er det «fryste» masser. I skredene med varierende kanallengde er det mindre områder med «fryste» masser og vannrike masser, mens for skredene uten voll og med fang- og ledevoll er det et tydelig skille, med «fryste» masser i front og en vannrik suspensjon bak. Dette kommer også frem av Figur 31.



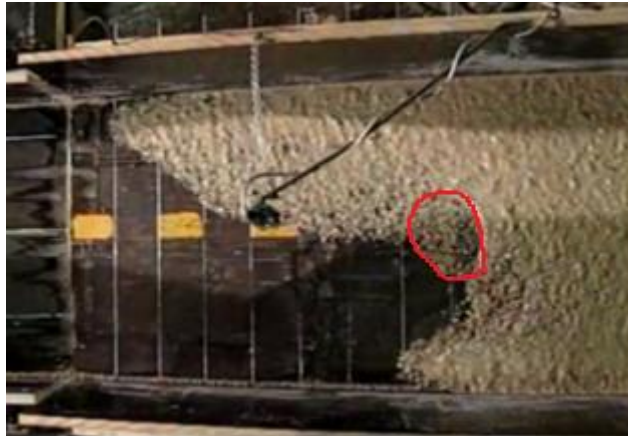
Figur 31: "Fryst" materiale markert med rødt, t.v. skred S2K(1,2) og t.h. skred S1TV(90)H(90) (foto: Christiansen).

#### 4.1.3 Strømning i rennen, $x = -3,1 - 0$ m

Strømningen varierer nedover rennen i form av ulike suspensjonstyper og i formen på skredfronten. Skredmassen separerer seg og det varierer hvor de vannrike og grovkornete massene havner i tverrsnittet.

Under forsøkene med varierende kanallengde er suspensjonen ofte mer vannholdig på sidene enn i midten der massene har en tendens til å «fryse». Skredfronten er ofte «taggete» og i de

fleste skredene er høyre side av fronten lengst fremme mens den midtre delen med «fryste» masser henger igjen, markert med rødt, se Figur 32. Mange av skredene har kanaler med raskere strømming bak skredfronten og disse ligger som oftest langs sidene.



**Figur 32: Form på skredfront i nedre renne, S3K(2,4) (foto: Christiansen).**

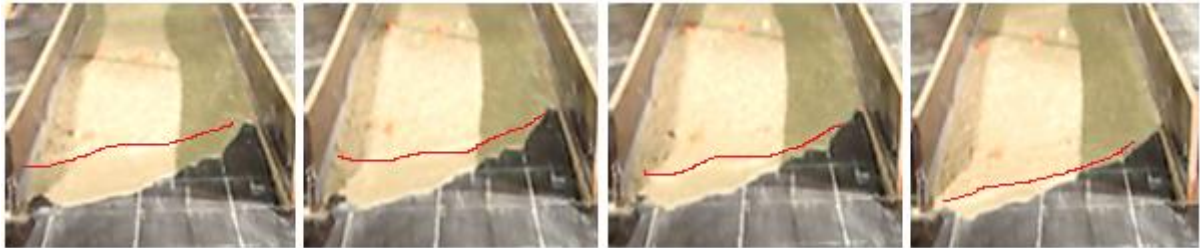
Forsøkene utført uten voll og med fang- og ledevoll har en del tilfeller der det først er en buet skredfront bestående av «fryste» masser. Bak fronten ser en tydelig en vannrik suspensjon som opptar hele eller deler av tverrsnittet som strømmer oppå de grovere massene og har større hastighet. Den vannrike suspensjonen tar igjen de «fryste» massene og danner en avstikker eller en helt ny front, hvor formen på den nye fronten varierer. I tilfellene hvor den vannrike suspensjonen danner en avstikker minner fronten om den for skredene med varierende kanallengde. Figur 33 viser utviklingen av skredfronten til S1TV(20)H(72) i rennen,  $x = -3,1 - 0$  m. Først er fronten en bue med grovkornet materiale, og så blir den tatt igjen av en vannrik suspensjon på høyre siden som strømmer forbi og danner en ny front. Det dannes som oftest en ny skredfront bestående av en vannrik suspensjon i løpet av strømmingen i rennen eller ved overgangen til rutebordet, innen  $x = 0$  cm, for skredene uten voll og med fang- og ledevoll.



**Figur 33: Strømning og separasjon i S1TV(20)H(72) i rennen (foto: Christiansen).**

#### 4.1.4 Strømning på rutebordet, $x = 0 - 3,6$ m

I forsøkene med kanallengde 0 m og uten voll brer skredmassene seg noe utover ved  $x = 0$  cm. Sidevollene, med lengde 1,2 m og 2,4 m, er en forlengelse av rennen i modellen som opprettholder kanaliseringen av skredmassene et stykke videre. Det varierer når den første skredfronten stopper opp og om massene bak strømmer over de fremre og danner en ny skredfront som fører til utvidet utløpsområde. Ny skredfront dannes etter  $x = 0$  cm i forsøkene med varierende kanallengde. Figur 34 viser hvordan de bakre massene skyller over de fremre for S4K(2,4). Den bakre skredfronten er markert med en rød strek for å tydeliggjøre fronten.



Figur 34: Dannelse av ny skredfront, ca. 10 hundredeler mellom hvert bilde, fra skred S4K(2,4) (foto: Christiansen).

I forsøkene med fangvoll og forskjellige helninger på skredsidene av vollen strømmer suspensjonen oppetter vollen og så mot siden i tillegg til at en bølge slår tilbake mot skredretningen og fører til mye bevegelse i massene, se Figur 35. En del masser blir liggende igjen inntil vollen i etterkant.



Figur 35: Bevegelse i møte med fangvoll for S2TV(90)H(90). T.v. oppskyllingshøyde, i midten bevegelse sideveis og tilbakeslag og t.h. bevegelse i massene grunnet tilbakeslag (foto: Christiansen).

Ledevoll, både med treffvinkel  $20^\circ$  og  $40^\circ$ , endrer skredets retning. Når skredfronten treffer vollen skyller den oppover vollen og strømmer langs den. I de fleste tilfeller slår bølgen tilbake. Det dannes som oftest en ny front av massene som slår tilbake, først er den relativt smal og så brer den seg utover. Figur 36 viser strømning langs vollen for S1TV(20)H(72).

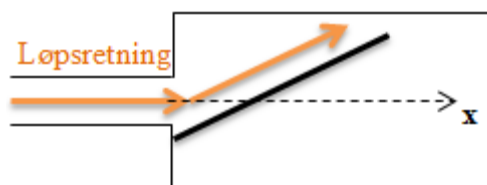




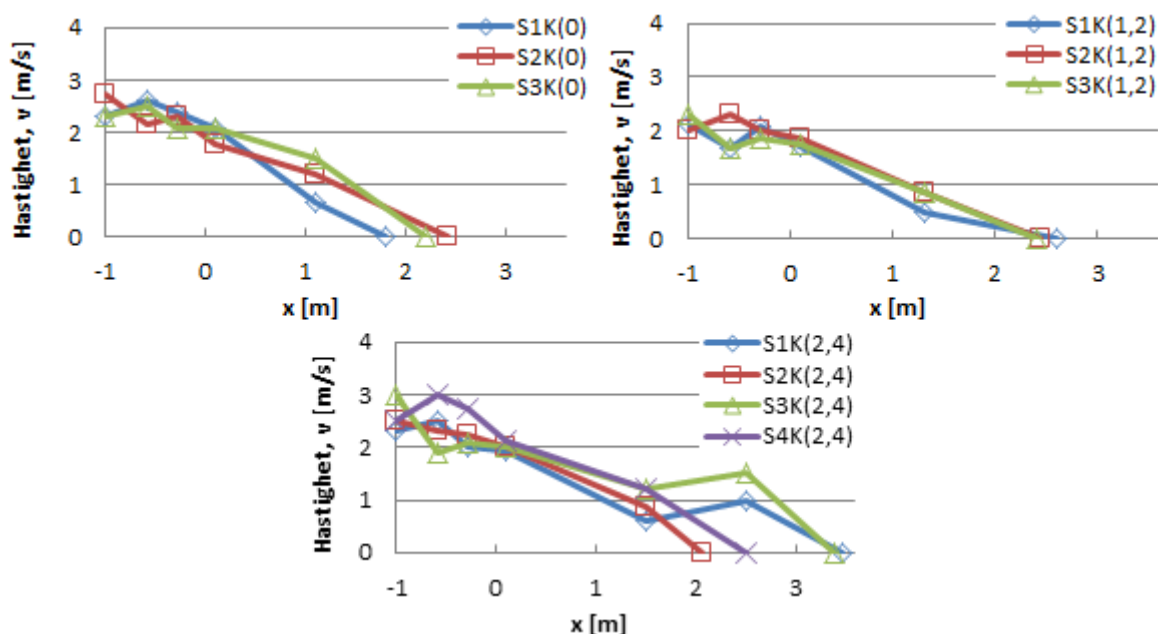
Figur 36: Strømning langs voll, tilbakeslag gir ny front som brer seg utover, S1TV(20)H(72) (foto: Christiansen).

#### 4.1.5 Hastighetsforløp

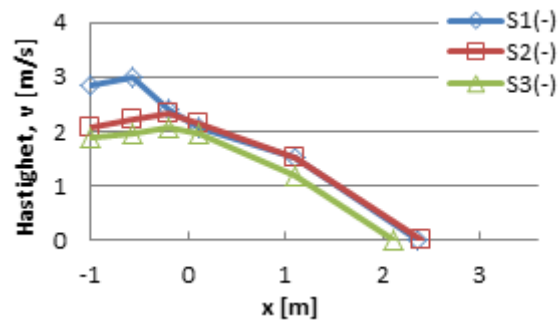
Ved å se på fronthastighetene gjennom skredbanen kan diagrammer med hastighetsforløp konstrueres. Hastigheten måles i skredets løpsretning, se Figur 37, og ved frontens senter. Figur 38 - 42 presenterer hastighetsforløpene for forsøkene og de er basert på gjennomsnittlige fronthastigheter fra Tabell F.1, 3 - 5, Vedlegg F.



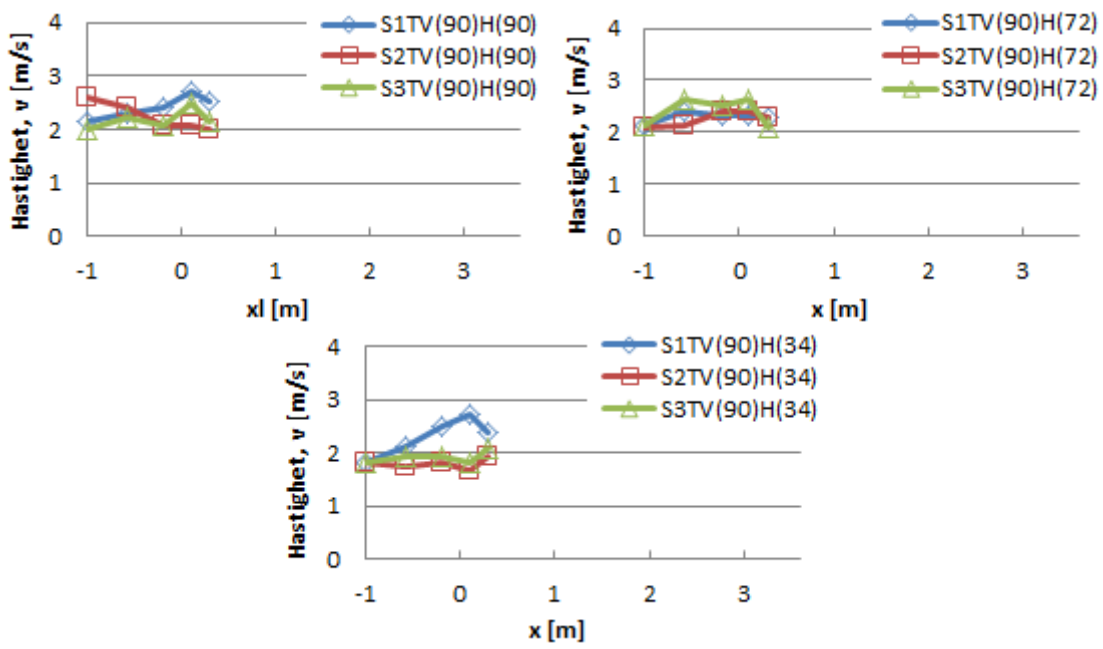
Figur 37: Illustrasjon av skredets løpsretning i forhold til x-akse.



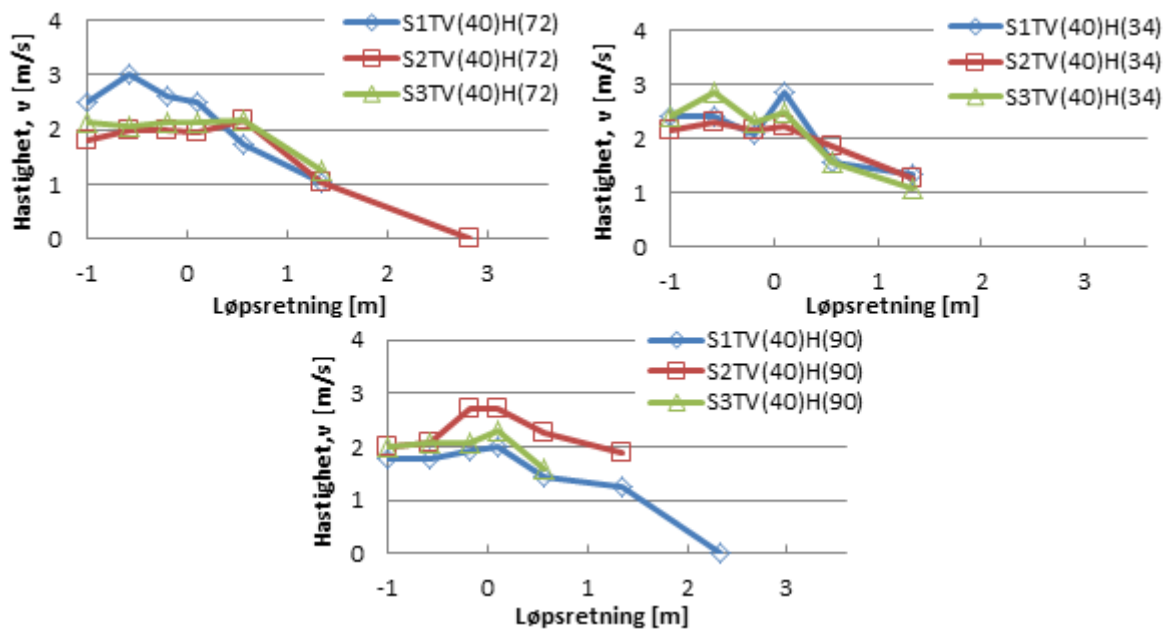
Figur 38: Hastighetsforløp, forsøk med kanallengde 0 m, 1,2 m og 2,4 m.



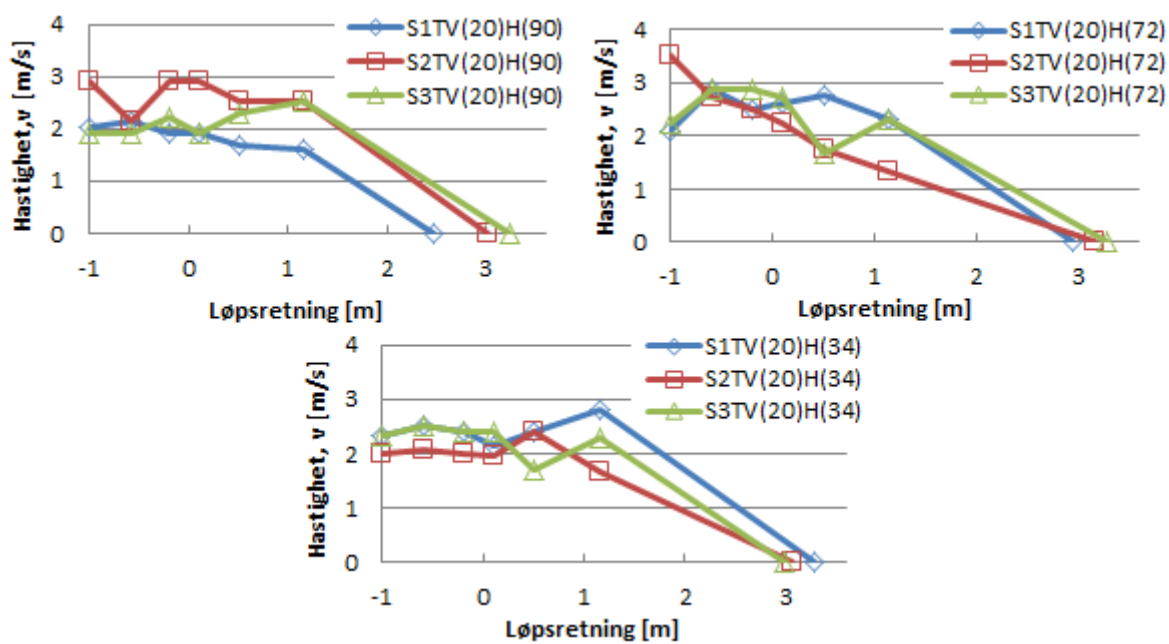
Figur 39: Hastighetsforløp, forsøk uten kanal og voll.



Figur 40: Hastighetsforløp, forsøk med fangvoll med helning 90 °, 72 ° og 34 °.



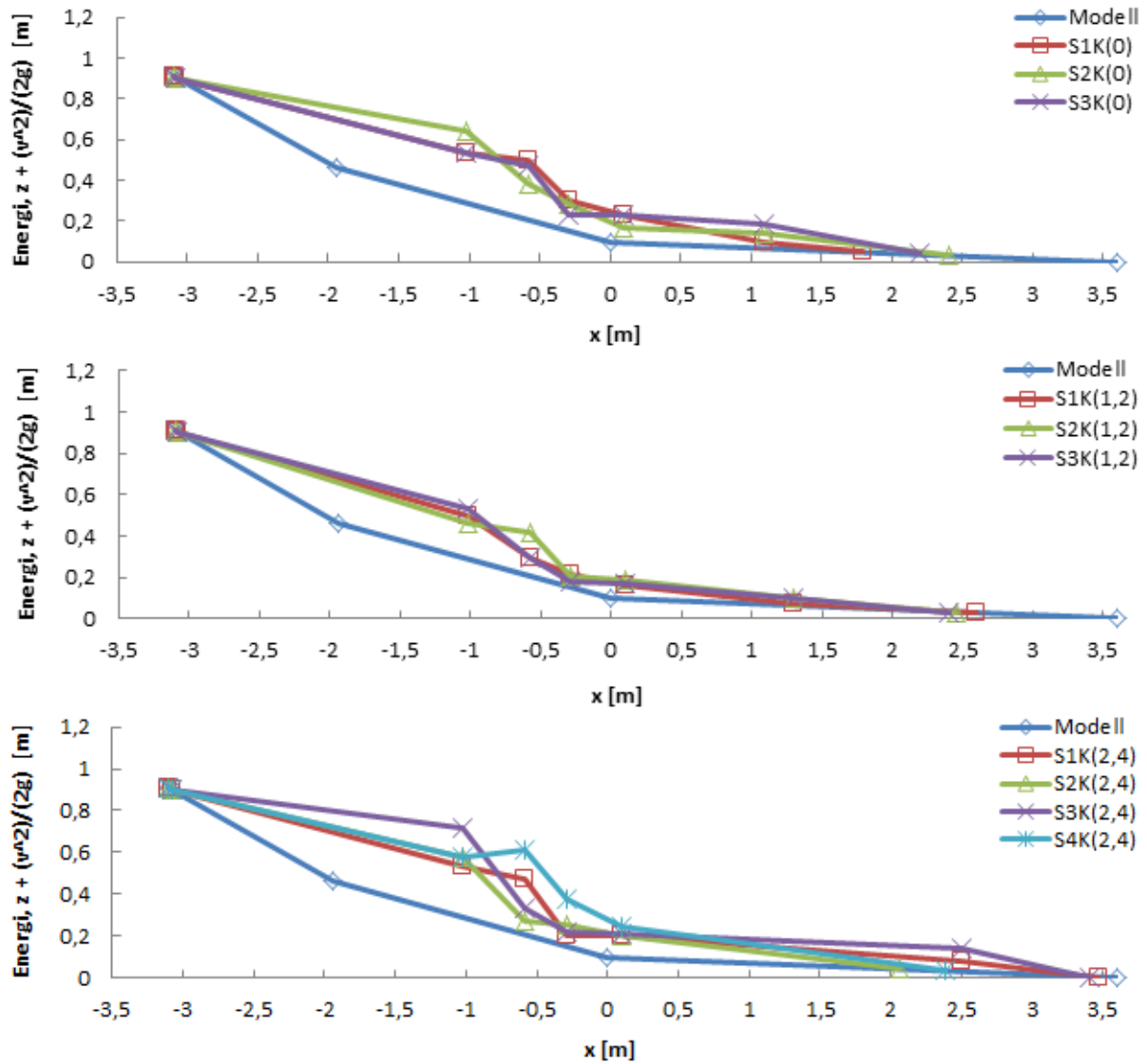
Figur 41: Hastighetsforløp, forsøk med ledevoll med treffvinkel 40 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °.



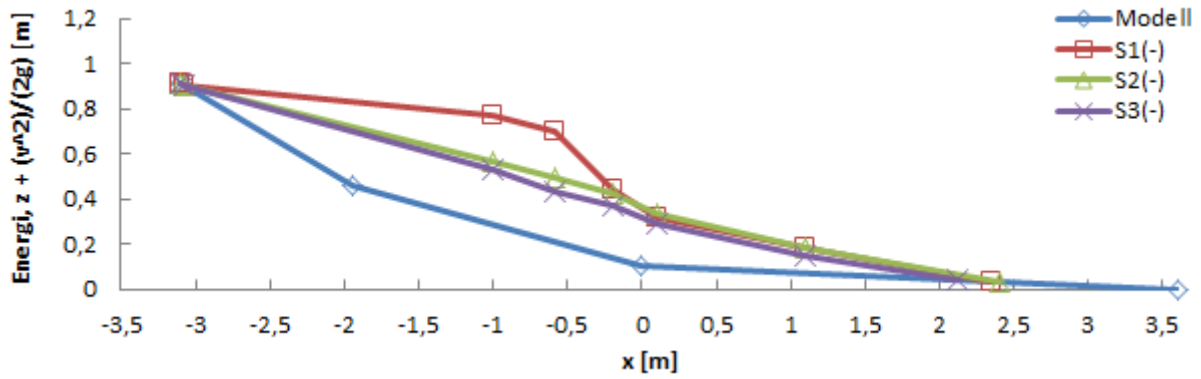
Figur 42: Hastighetsforløp, forsøk med ledevoll med treffvinkel 20 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °.

### 4.1.6 Energilinjer

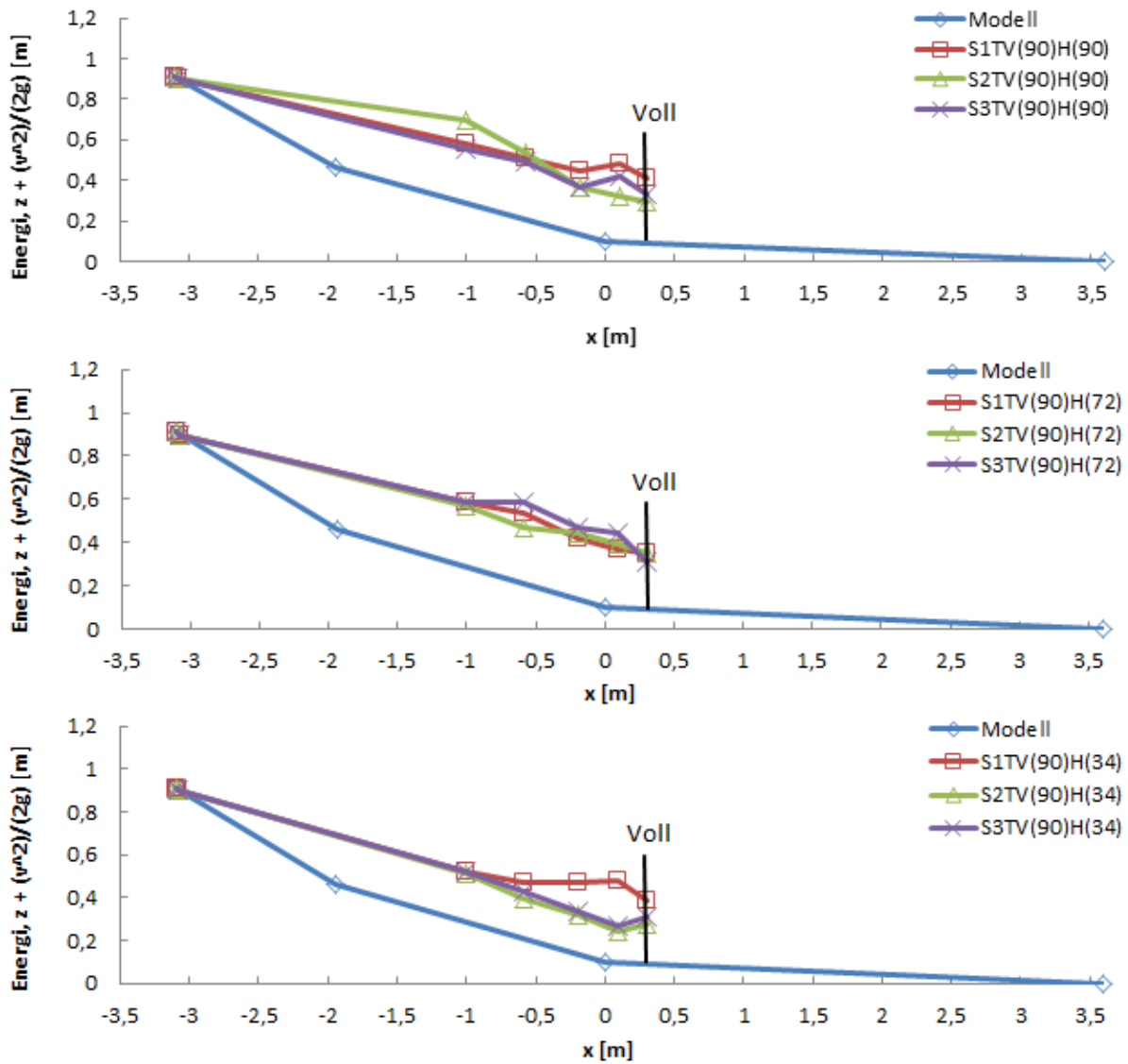
Ved å foreta en energibetraktning basert på hastighetshøyde og stedshøyde kan energilinjer tegnes. Figur 43 - 47 viser energilinjen til skredfronten, basert på Tabell F.1, 3 – 5, Vedlegg F, og en kan se hastighetshøyden i forhold til «terrengnivå». Energilinjen henviser til skredets løpsretning og modellen til x-retningen, se Figur 37.



Figur 43: Energilinje, forsøk med kanallengde 0 m, 1,2 m og 2,4 m.

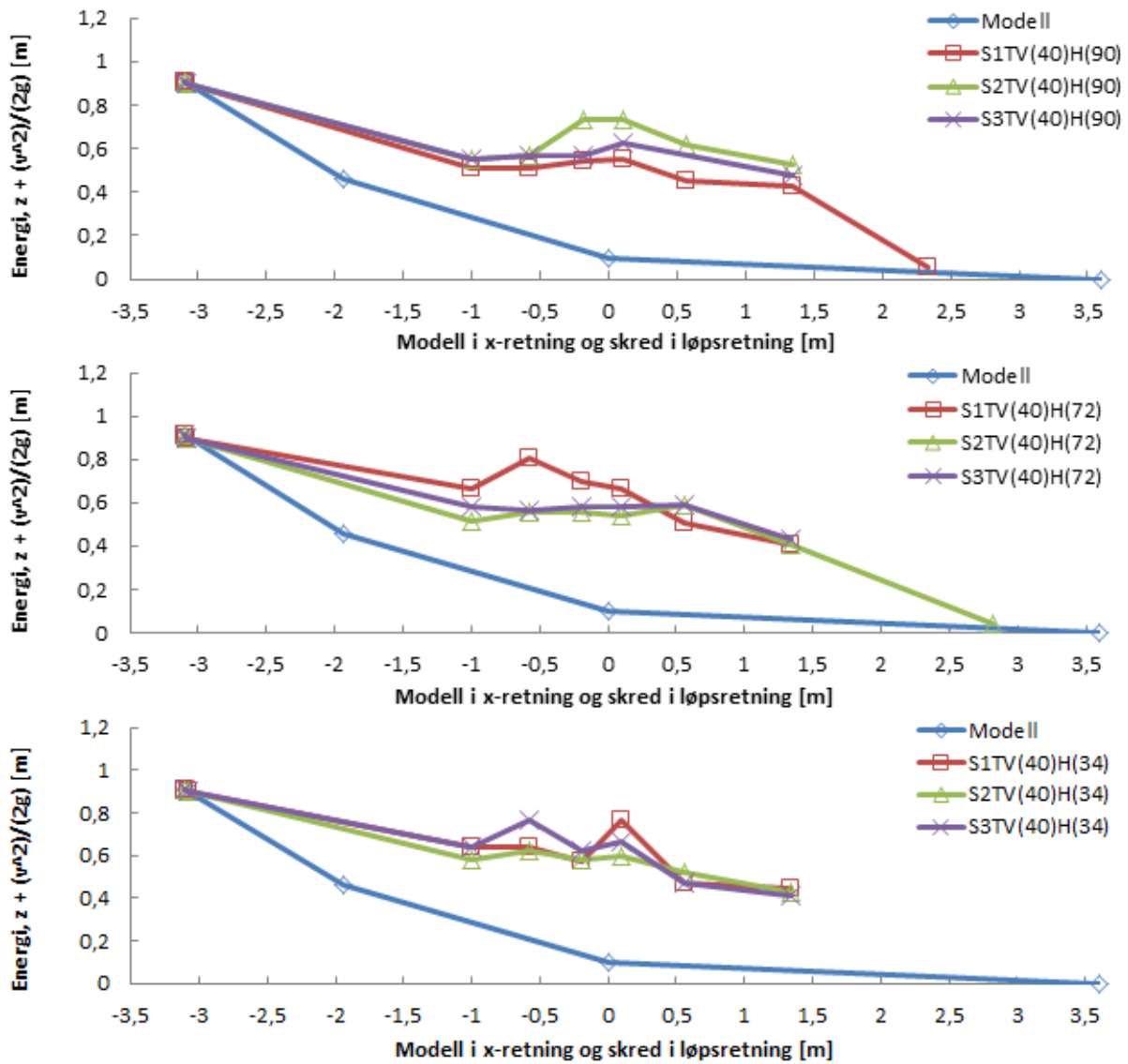


Figur 44: Energilinje, forsøk uten kanal og voll.

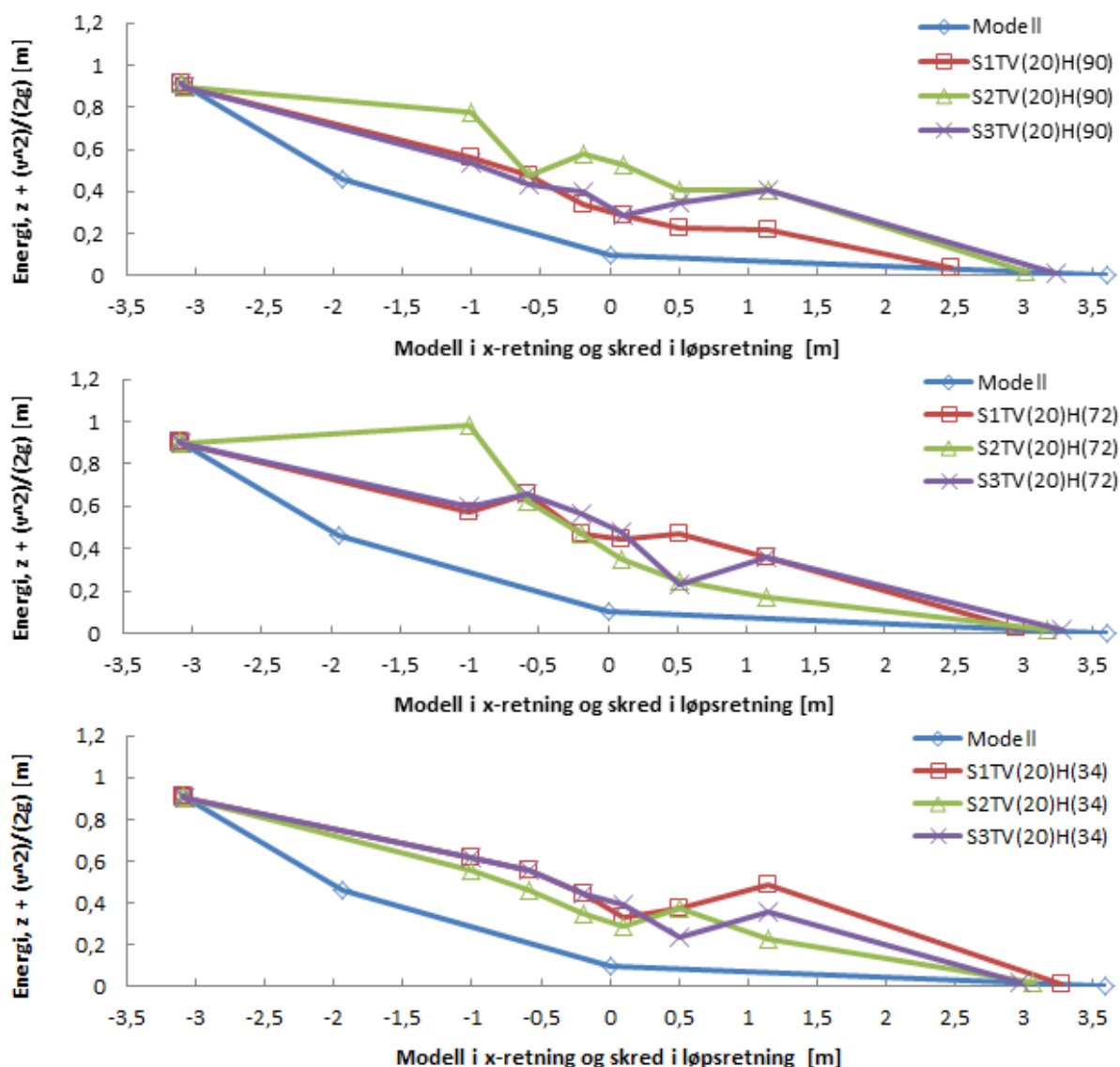


Figur 45: Energilinje, forsøk med fangvoll med helning 90 °, 72 ° og 34 °.





Figur 46: Energilinje, forsøk med ledevoll med treffvinkel 40 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °.



Figur 47: Energilinje, forsøk med ledevoll med treffvinkel 20 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °.

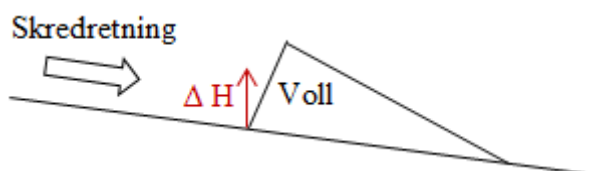
## 4.2 Oppskyllingshøyde og utbredelse

Her presenteres oppskyllingshøyden der det er relevant, etterfulgt av skredenes utbredelse. For forsøkene med fangvoll fremstilles ikke utbredelsen av skredmassene ettersom den ble påvirket av modellen ved at skredmassene gikk i veggene som rammer inn rutebordet. I disse forsøkene er det oppskyllingshøyden med tanke på å bestemme nødvendig høyde på vollen som er i fokus.

Det foreligger data fra skanning av skredmassene, men prosessering av data er ikke et tema i denne studien.

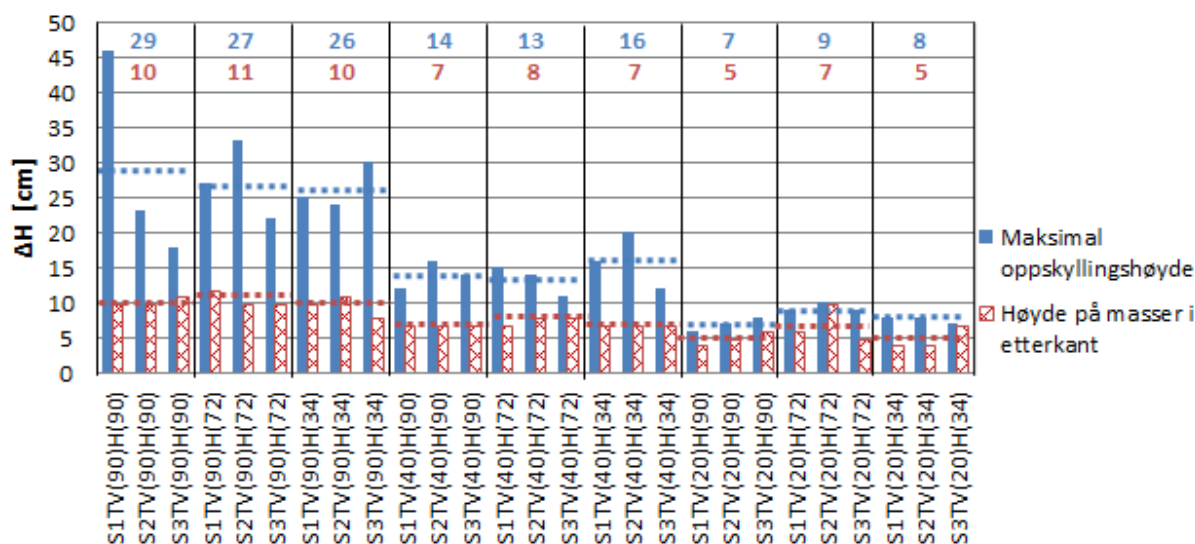
### 4.2.1 Oppskyllingshøyde, fang- og ledevoll

Når skredmassene treffer en hindring skyller massene oppetter hindringen og oppskyllingshøyde kan registreres. Oppskyllingshøyden,  $\Delta H$ , er her definert som den høyden inntil vollen som suspensjonen når opp til, målt fra foten av vollen og vertikalt opp, se Figur 48.



Figur 48: Illustrasjon av oppskyllingshøyde.

Figur 49 viser maksimal oppskyllingshøyde for frontbølgen og høyde på skredmassene etter skredhendelsen basert på verdier fra Tabell G.1-2, Vedlegg G. De stiplede linjene angir gjennomsnittlig verdi for hver forsøksserie, med tilhørende verdi notert øverst i diagrammet.



Figur 49: Maksimal oppskyllingshøyde og høyde på gjenliggende masser.

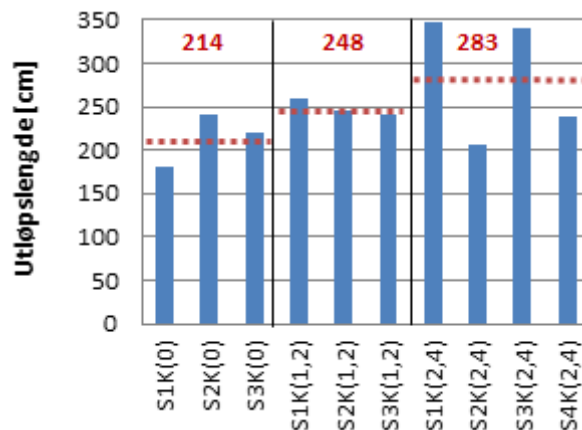
### 4.2.2 Utbredelse

Utløpsområdet defineres av Norem og Sandersen (2012) som en ytre begrensning av de avsatte skredmassene som kan føre til skade på konstruksjoner, som nevnt i Kapittel 2.6 «Sikringstiltak». I denne oppgaven settes det også krav til en viss sammenheng i sedimentet. Uten sammenheng i sedimentet antas det at massene har for lite krefter (impact) til å kunne føre til skade på konstruksjoner. Figur 50 viser området som defineres som utløpsområdet i denne oppgaven. Definerings av utløpsområdet er en subjektiv vurdering.

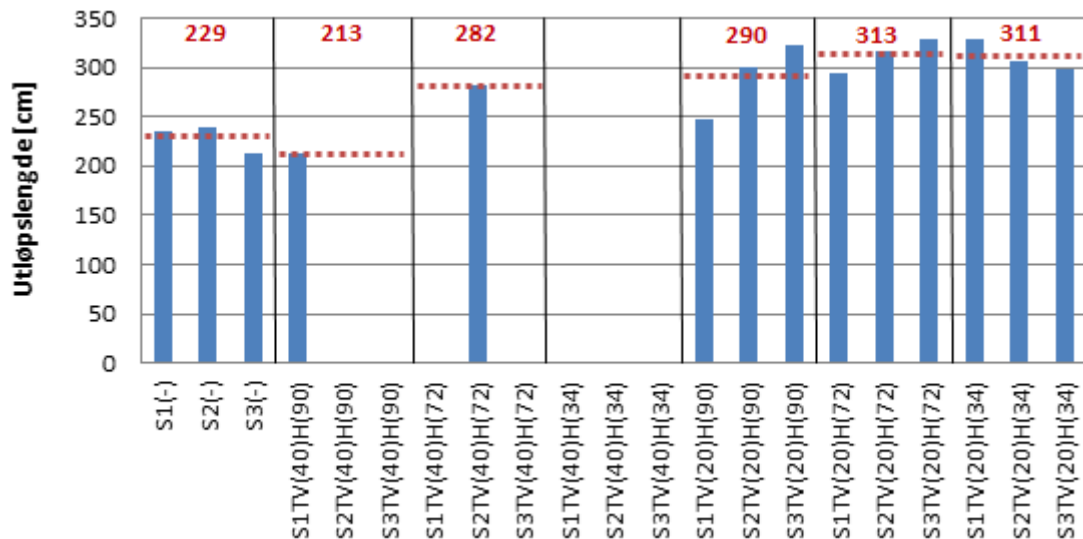


Figur 50: Definisjon av utløpslengde, t.v. S2K(0) og t.h. S1TV(40)H(72) (foto: Christiansen).

Figur 51 og 52 viser utløpslengde i skredretning for de utførte skredene med varierende kanallengde, uten voll og med ledevoll, basert på Tabell F.1, 3 – 5, Vedlegg F. Den stiplede linjen indikerer gjennomsnittsverdi per forsøksserie, med tilhørende verdi angitt øverst i diagrammet. Kun to av utløpslengdene for skredene med ledevoll med treffvinkel  $40^\circ$  presenteres, de resterende skredenes utbredelse ble begrenset av modellen. For å finne utløpslengden i skredretning for forsøkene med ledevoll er det tatt utgangspunkt i rotasjonspunktets plassering,  $(x, y) = (30, 30)$  cm, fordi dette som regel er treffpunktet mellom skred og voll. Utløpslengden blir dermed 30 cm + den resterende lengden langs vollen.

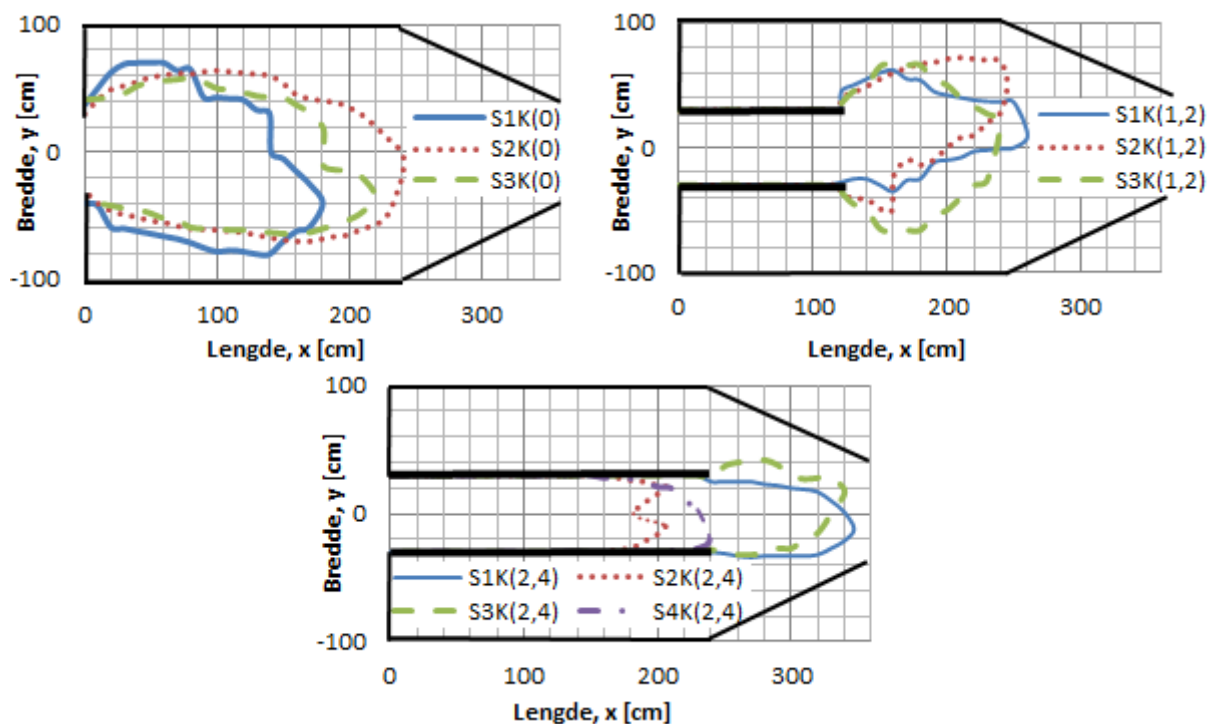


Figur 51: Utløpslengde for forsøk varierende kanallengde.

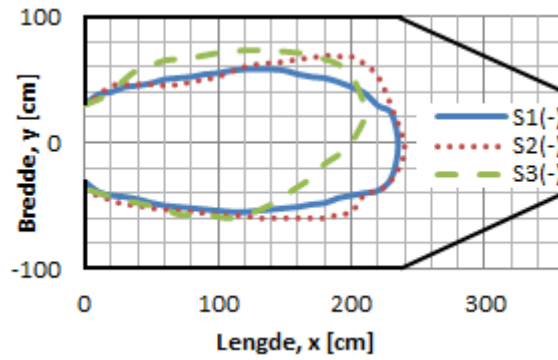


Figur 52: Utløpslengde for forsøk uten voll og med ledevoll.

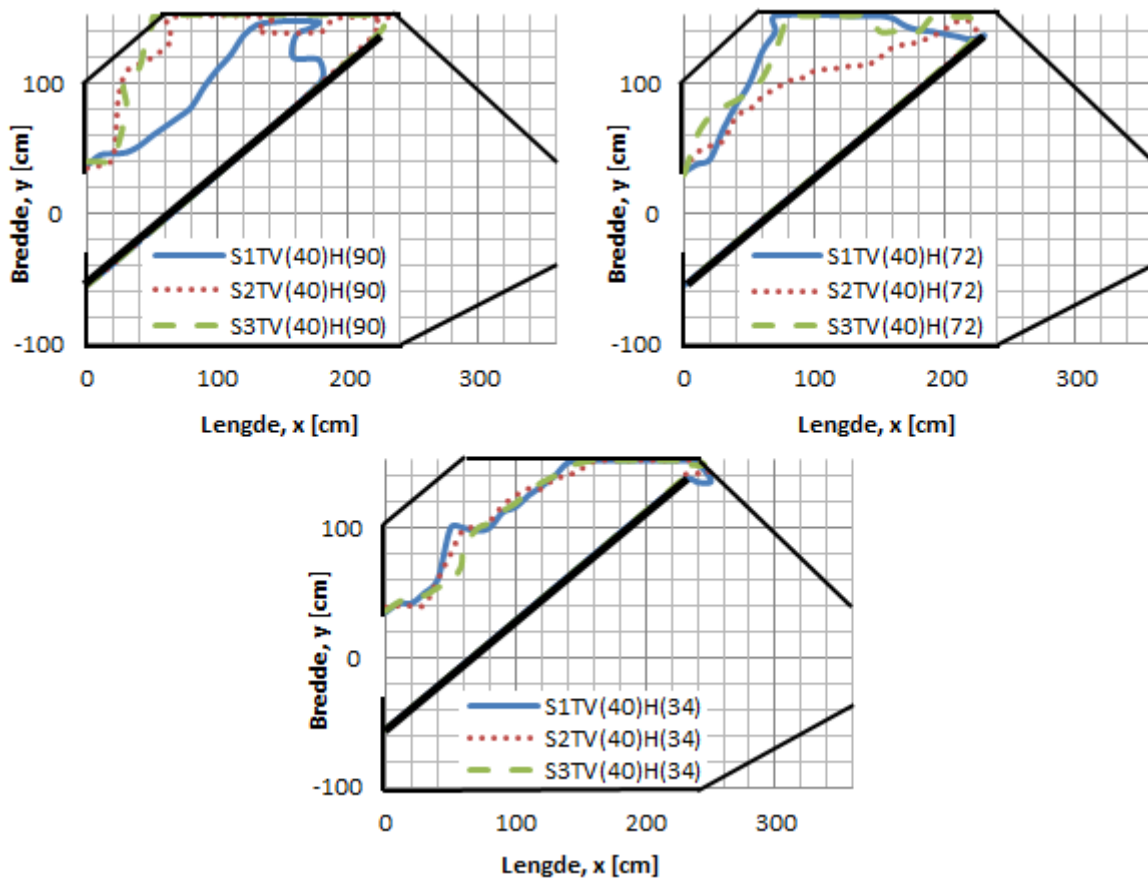
Figur 53 - 56 viser utbredelsen av forsøkene med varierende kanallengde, uten voll og med ledevoll, treffvinkel 40 ° og 20 °. Ved alle forsøkene ender hovedmengden av skredmassene opp på rutebordet mens det ligger et tynt sedimentdekke igjen i rennen.



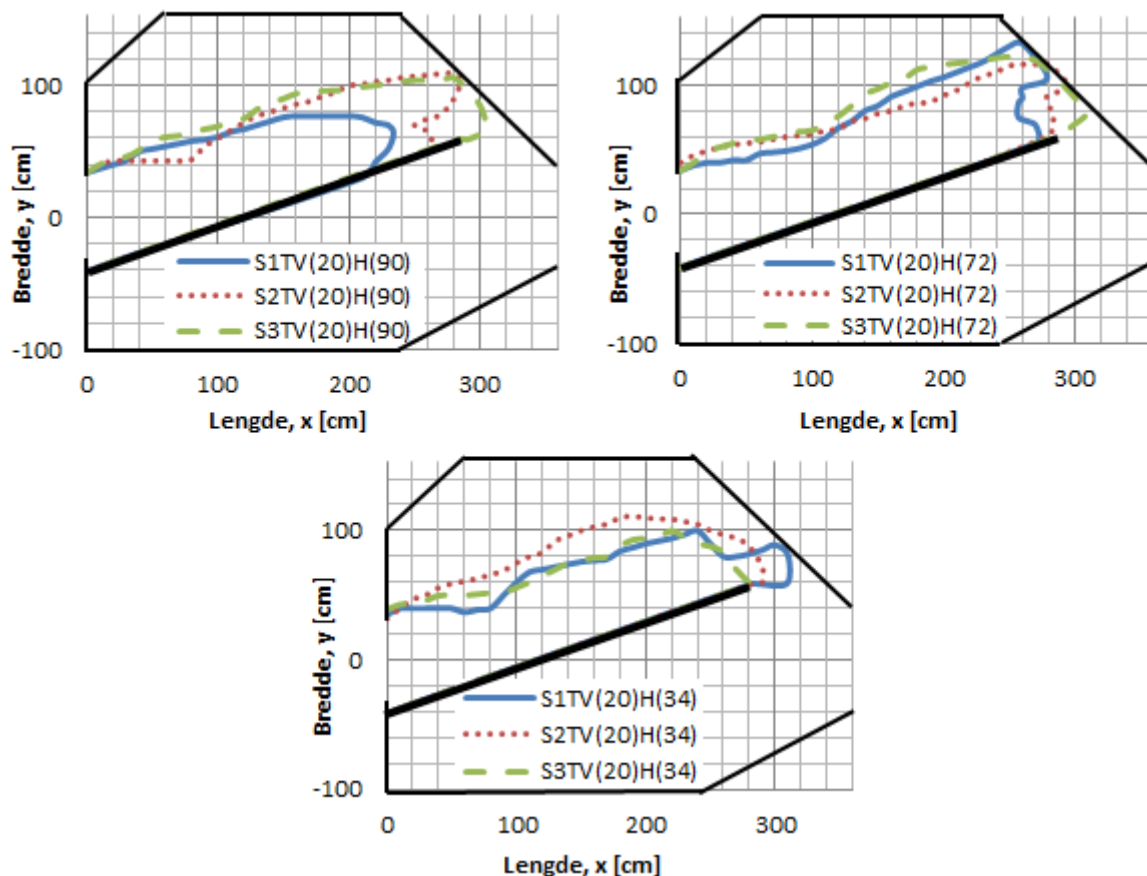
Figur 53: Utbredelse, forsøk med kanallengde 0 m, 1,2 m og 2,4 m.



Figur 54: Utbredelse, forsøk uten kanal og voll.



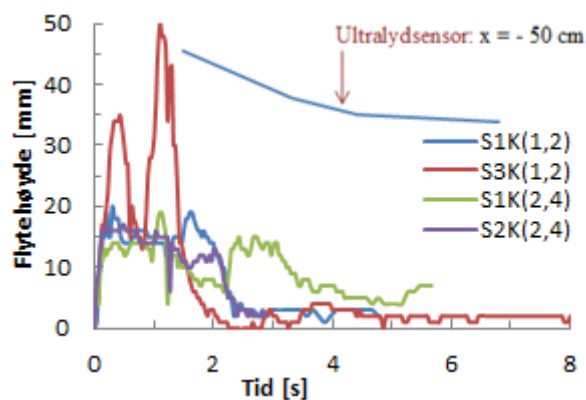
Figur 55: Utbredelse, forsøk med ledevoll med treffvinkel  $40^\circ$  og helning  $90^\circ$ ,  $72^\circ$  og  $34^\circ$ .



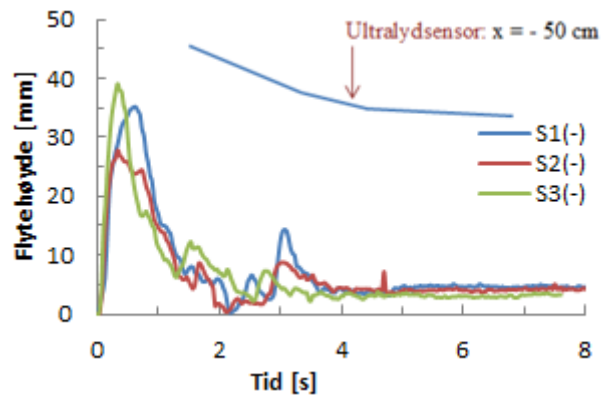
Figur 56: Utbredelse, forsøk med ledevoll med treffvinkel  $20^\circ$  og helning  $90^\circ$ ,  $72^\circ$  og  $34^\circ$ .

### 4.3 Flyte høyde

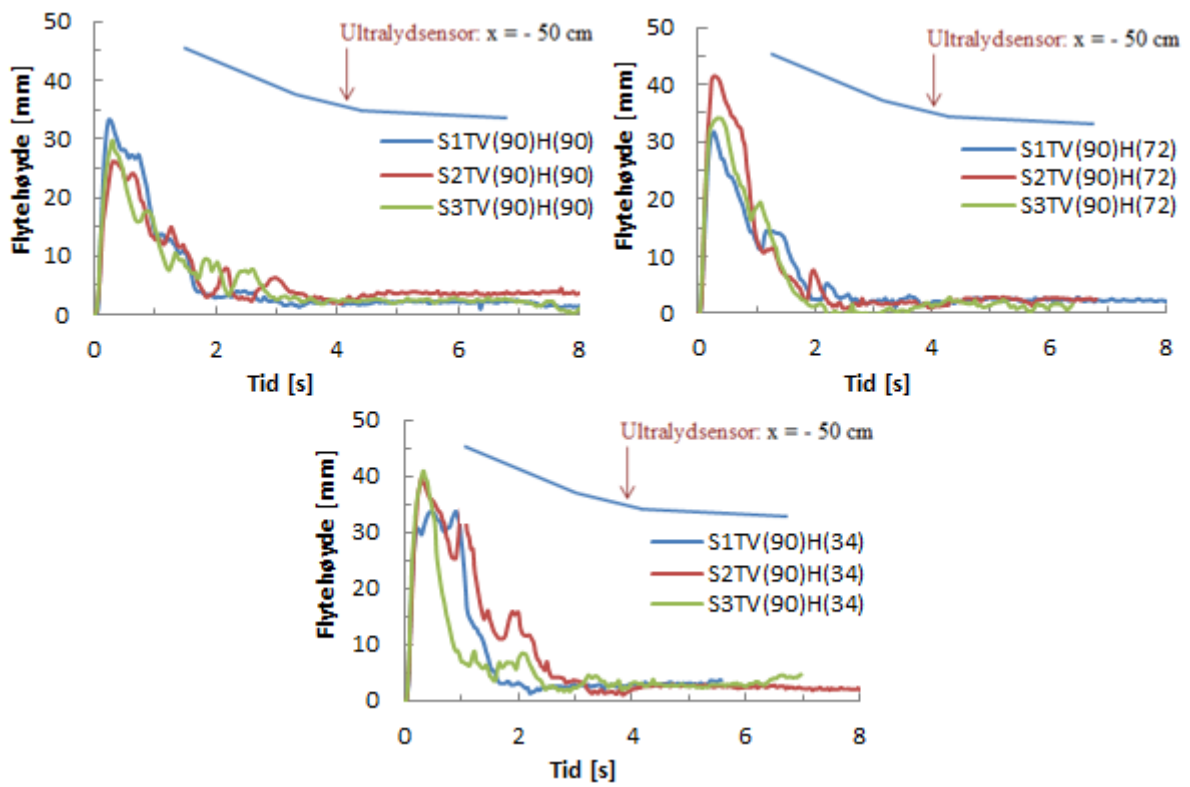
Figur 57 - 61 illustrerer flomskredbølgene til skredene ved å vise flyte høyden til noen utvalgte forsøk med varierende kanallengde og til alle forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. Som nevnt i prosjektoppgaven Christiansen (2012) kommer skred i form av en eller flere bølger.



Figur 57: Flyte høyde, noen utvalgte forsøk med kanallengde 1,2 m og 2,4 m.

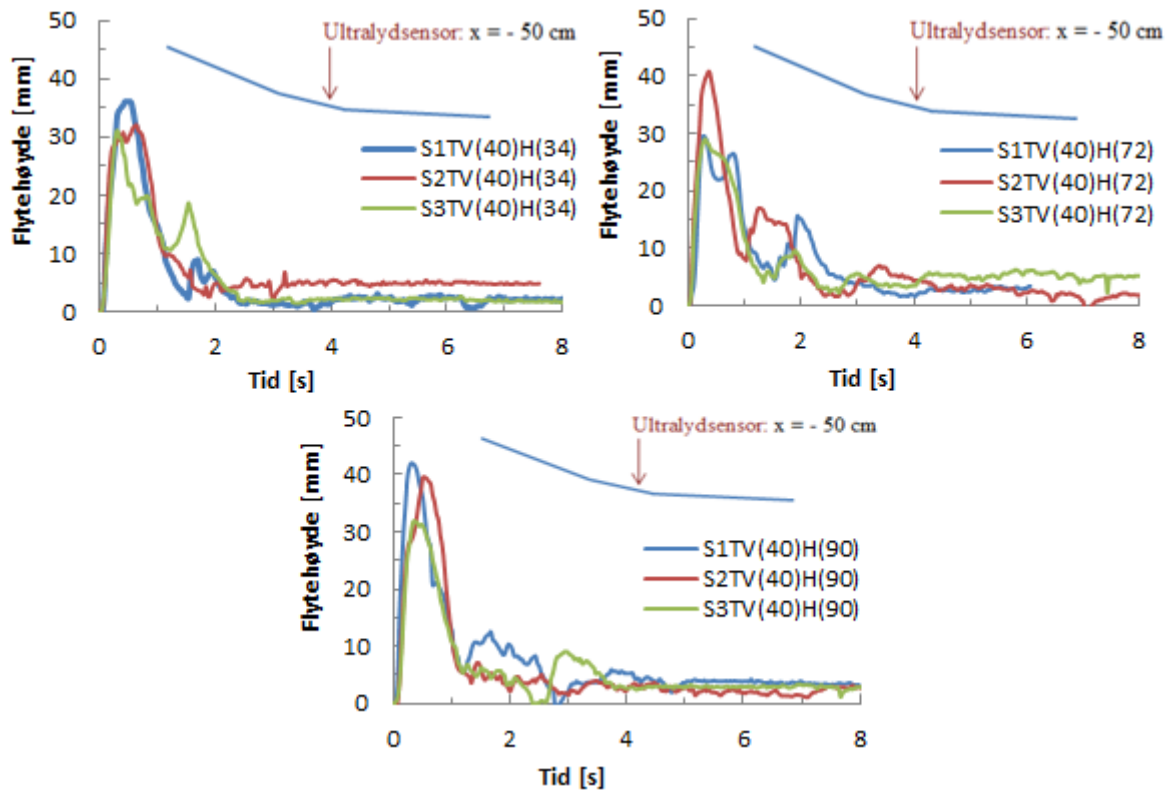


Figur 58: Flyte høyde, forsøk uten kanal og voll.

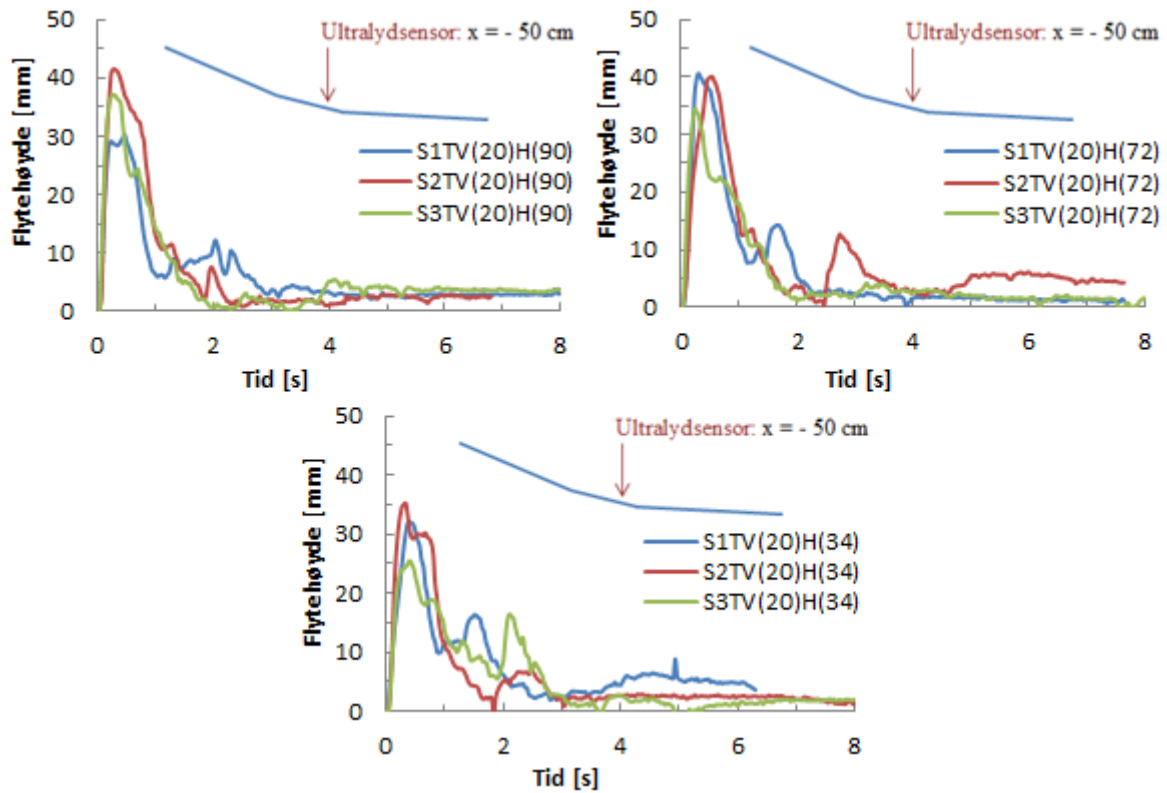


Figur 59: Flyte høyde, forsøk med fangvoll med helning 90 °, 72 ° og 34 °.





Figur 60: Flytehoeide, forsok med ledevoll med treffvinkel 40 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °.



Figur 61: Flytehoeide, forsok med ledevoll med treffvinkel 20 ° og helning 90 °, 72 ° og 34 °.

#### 4.4 Feilkilder

Som følge av nedskalering er det en viss usikkerhet i målingene knyttet opp i mot skalaeffekter. Skalaeffekten er her lik for alle forsøkene. Dette gjør at strømmingen ikke vil være helt sammenlignbar med en skredhendelse i naturen og sikringstiltakene vil dermed ikke nødvendigvis ha samme effekt.

Det er mange kilder til variasjon i slike forsøk. Separasjonen av suspensjonen har størst innvirkning og er samtidig vanskelig å kontrollere i forhold til å få repeterbare forsøk. Separasjonen virker blant annet inn på hvor lang tid massene bruker på å forlate kassen og hvor mye som er igjen og på strømmingen som igjen påvirker hastigheten, utbredelsen og flyte høyden. Prosessen med omrøring av suspensjonen i kassen er ikke standardisert, men i forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll ble siste omrøring utført midt i kassen.

Når hastigheten til skredfronten hentes ut fra videoklipp ved å registrere tiden skredfronten bruker på å forflytte seg en viss lengde, øker usikkerheten når antall bilder per sekund går ned og når kameravinkelen avviker fra vertikalen. Det er her valgt å se på hastigheten som er ved senterlinjen, det vil si hastigheten til skredfronten og ikke til et spesifikt korn. Dette bidrar i noen av skredene til «feil» i hastighetsmåling på grunn av transversal bevegelse i strømmingen og det blir dermed ikke den fremadrettede hastigheten til skredfronten som måles. Den transversale bevegelsen fører til at det registreres en høyere hastighet enn den skredfronten beveger seg med.

Defineringen av utbredelsen er som nevnt i Kapittel 4.2.2 «Utbredelse» subjektiv og er i forsøkene forsøkt holdt så lik som mulig.

Overgangen mellom ledevollene og bordet var under forsøkene med lav helning på skredsiden av vollen ikke helt jevn og påvirker derfor strømmingen til skredmassene i møte med vollen. Påvirkningen ble forsøkt holdt på et minimum ved å teipe overgangen.

Det er noe svinn ved hvert forsøk i form av vann og materiale som ikke føres ned i kassen etter endt forsøk, men dette er forsøkt holdt på et minimum. Kassene veies tomme mellom hvert forsøk for å ha kontroll hvis kassenes vekt endrer seg. Før forsøk veies kassene med massene oppi og vann tilføres hvis svinn har oppstått.

Ruheten på materialet i modellen er ikke likt og dette kan påvirke målingene. Rennen, rutebordet og sidevollene er av lik ruhet – relativt glatt, lakkert overflate. Fang- og ledevollene er også lakkert, men har en mer ujevn og ru overflate.

Modellen har noen skjevheter, i øvre renne en helning mot høyre på  $0,8^\circ$ , i nedre renne,  $0,3^\circ$ , og i tillegg er det uregelmessigheter i rutebordet, avvik på  $0,1 - 0,3^\circ$  fra horisonten.

## 5 Analyse og diskusjon

I dette kapitlet analyseres og diskuteres resultatene i rekkefølgen strømning, oppskyllingshøyde, utbredelse og flyte høyde. Resultatene sammenlignes seg i mellom og med teori fra Kapittel 2 «Litteratur» løpende. Analysen og diskusjonen baserer seg på resultatene og på videoer og bilder fra forsøkene. Til slutt presenteres anbefalinger til videre arbeid.

I forsøkene med varierende kanallengde vil hovedfokuset være effekten kanalisering har på utløpslengde. For fang- og ledevoll er hovedfokuset på oppskyllingshøyde i forhold til treffvinkel og helning på skredsidene av vollen, og for ledevoll vil det i tillegg være fokus på utløpslengde i forhold til treffvinkel og helning på skredsidene av vollen.

Resultatene viser store variasjoner. Skredmassen er ikke en homogen suspensjon og vil dermed ha varierende oppførsel i hvert skred som følge av separasjon av suspensjonen med tanke på hvor de vannrike og «fryste» massene befinner seg. I tillegg vil faktorer som hvordan og hvor lenge massene omrøres og skjevheter og rystelser i modellen kunne påvirke forsøkene. Dette fører til at ikke alle avvik i resultatene kan forklares og at en istedenfor må se på det overordnede bildet.

### 5.1 Strømning

For forsøkene med varierende kanallengde dannes det først en ny skredfront etter  $x = 0$  cm. I forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll blir fronten i de fleste tilfeller tatt igjen innen  $x = 0$  cm. Årsaken er variasjon i separasjon av suspensjonen som trolig kommer av at massene i forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll ligger oppetter døren før omrøring og får et vanntrykk i bakkant.

#### 5.1.1 Observasjon fra kassen

Når massene forlater kassen i forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll kommer det en front av grovkornet masse etterfulgt av en vannrik suspensjon, og dette kan komme av at massene skyves opp mot døren før omrøring.

Testforsøkene viser at suspensjonen forlater kassen mer effektivt uten omrøring enn med og at uten omrøring klarer suspensjonen å overvinne friksjonskreftene slik at alt materialet forlater kassen. Årsaken til dette er ukjent. Når suspensjonen ikke omrøres blir det tydeligere separasjon enn ved omrøring som følge av sedimentering av suspensjonen.

### 5.1.2 «Fryste» masser

Skredene er konstruert med relativt mye vann i forhold til masse. Som nevnt i Kapittel 3.3 «Skredmateriale» er det for begge mengdeforholdene fullstendig mettede masser. Dermed burde muligheten for at suspensjonen «fryser» være minimal ettersom det at massene «fryser» skyldes at det er for liten konsentrasjon av vann i det området der «frysing» oppstår. Når suspensjonen går mot å være et effektivspenningsmateriale og «fryser» fører det til redusert hastighet i dette området grunnet økt friksjon innad i materialet og mot underlaget.

Det er vanskelig å finne en årsak til at suspensjonen separerer seg i form av områder med «fryste» masser og områder med mer vannrik suspensjon. Årsaken til de mindre områdene med «fryste» masser som ofte opptrer under forsøkene med varierende kanallengde er ukjent. Det ville være mer logisk om de «fryste» områdene oppstod langs veggene siden skredmassen der vil oppleve høyere friksjon enn i midten av rennen og at vannet dermed strømmer fra de grove massene. Dette er et tema for videre arbeid.

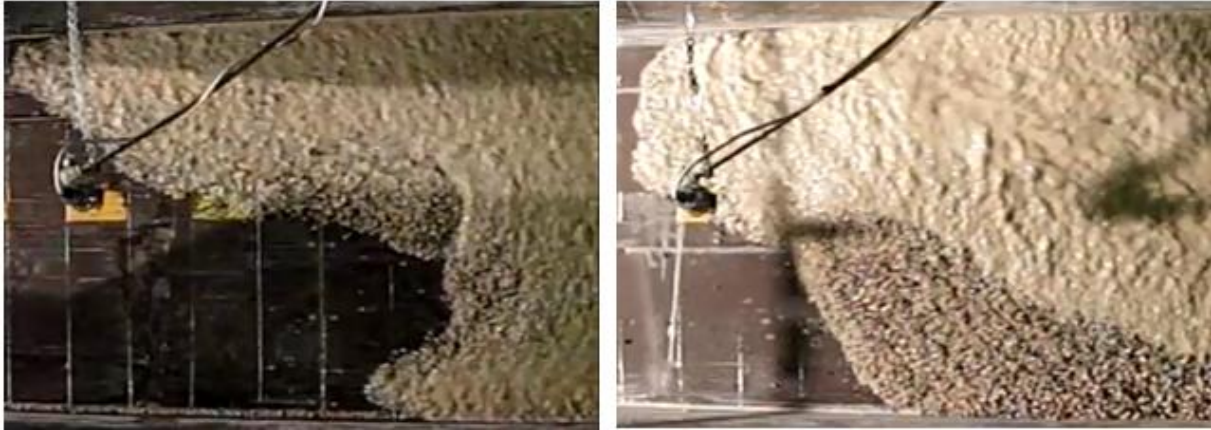
Skredene uten voll og med fang- og ledevoll har en tydeligere separasjon av skredmassene enn skredene med varierende kanallengde til tross for at forsøkene med varierende kanallengde har et større forhold vann i forhold til materiale. Det ser ut til at endringen av initialbetingelsen med tanke på at massene skyves opp mot døren før initiering fører til en større separasjon av skredmassene.

### 5.1.3 Strømning i rennen, $x = - 3,1 - 0 \text{ m}$

Det er store variasjoner i strømningen for forsøkene utført med varierende kanallengde og forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. Disse er utført med ulik materialmengde og noe forskjellige initialbetingelser så noe forskjell i strømningen i rennen,  $x = - 3,1 - 0 \text{ m}$ , er å forvente.

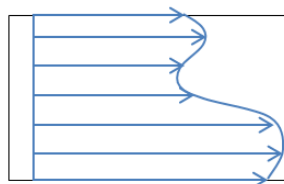
Figur 62 viser en vanlig form på skredfronten for forsøkene med varierende kanallengde og for forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. I utgangspunktet forventer en en form på skredfronten lik den ved laminær strømning, se Figur 4. Ved laminær strømning strømmer partiklene i parallelle sjikt, mens ved turbulent strømning beveger vannpartiklene seg i uregelmessige baner omkring strømrretningen. For å vurdere om en strømning er laminær eller turbulent kan en se på Reynolds tallet, som tidligere nevnt i Kapittel 2.4 «Strømning». I følge H. Norem (personlig kommunikasjon, 10. januar 2013) bør en være forsiktig med å bruke betegnelsene laminær og turbulent strømning på flomskred. Flomskred har en volumetrisk

tetthet på 40 – 70 % som gjør at avstanden mellom partiklene ikke er stor nok til at strømmingen kan bli turbulent. Flomskred kjennetegnes av separasjon av skredmassene heller enn av homogen masse og dette ligger i skredtypen. Resultatene fra forsøkene støtter opp om Norem sin forskning.



**Figur 62: Skredfront, t.v. skred S3K(2,4) og t.h. skred S1TV(20)H(72) (foto: Christiansen).**

Skredmassen i forsøkene med varierende kanallengde separerer seg slik at suspensjonen ofte er mer vannholdig på sidene enn i midten der massene har en tendens til å «fryse» og hastigheten blir dermed større langs sidene. Dette bidrar til at skredfronten får en «taggete» form, se Figur 63.



**Figur 63: Illustrasjon av hastighetsprofil i forsøk med varierende kanallengde.**

I forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll er fronten som regel en ujevn bue med «fryste» masser som blir tatt igjen av en vannrik suspensjon som enten danner en helt ny front eller en avstikker.

Strømningen i forsøkene varierer og det er usikkert hvor vidt strømmingene, i form av separasjon av suspensjonen og formen på skredfronten, er reelle eller knyttet til modellen ettersom tverrsnittet på rennene er forskjellige. Figur 64 illustrerer forskjellen på tverrsnittet til rennen i modellen og hvordan den ofte ser ut i naturen.



**Figur 64: Illustrasjon av tverrsnitt på rennen i modellen og naturen.**

Vedlegg H viser at i nedre renne, ved  $x = -50$  cm, er høyre side fremst i 60 % av forsøkene med varierende kanallengde og 47 % av forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. Forsøkene indikerer at ved å ha siste omrøring i midten av kassen reduseres antall forsøk der høyre side av skredfronten dominerer, og i tillegg får en tilfeller der midten er fremst. Dette indikerer også at formen på skredfronten er knyttet til initieringen av forsøkene og ikke kun separasjonen av skredmassene, og ikke nødvendigvis vil oppstå slik i naturen. Dette er bare en indikasjon ettersom siste omrøring under forsøkene utført med varierende kanallengde ikke er registrert. Omrøring kan være av betydning ettersom at suspensjonen sedimenteres veldig hurtig i forsøkene. Tiden fra omrøring og til skredet initieres er også av betydning for hvordan strømmingen blir, men ikke i forhold til skjevheter på skredfronten i rennen. Det ulike mengdeforholdet antas å ikke ha betydning for akkurat dette fenomenet. Årsaken kan være skjevheter i modellen, men disse er relativt små, under  $1^\circ$  avvik mot høyre i rennen, og det er vanskelig å se at de skal være av betydning. Bevegelser i modellen under forsøk kan også tenkes å virke inn, men heller ikke disse er store nok til å være av betydning.

#### **5.1.4 Strømning på rutebordet, $x = 0 - 3,6$ m**

I forsøkene med kanallengde 0 m og uten voll brer skredmassene seg noe utover ved  $x = 0$  cm som følge av manglende innsnevring, men beholder i stor grad retningen sin fremover.

I forsøkene med fangvoll skyller suspensjonen oppetter vollen før den strømmer til siden og i de fleste tilfeller slår deler av suspensjonen tilbake i skredretningen. I møtet med ledevollen får suspensjonen en forhøyet strømning og strømmingen endrer retning. I de fleste tilfellene slår suspensjonen tilbake. Det dannes som oftest en ny front av massene som slår tilbake som først er relativt smal og så brer den seg utover som følge av retningen den får av møtet med vollen. I hvilken grad suspensjonen skyller oppover vollen i forsøkene med fang- og ledevoll avhenger av helningen på skredsiden av vollen og treffvinkelen, dette vil diskuteres under Kapittel 5.2.1 «Oppskyllingshøyde, fang- og ledevoll». Skredmassene slår generelt mer tilbake i møtet med voll med høy treffvinkel, og mengden av materiale som slår tilbake øker med økende helning på skredsiden av vollen. Dette kommer av at energitapet ved slak helning og lav treffvinkel foregår over en lengre tidsperiode enn det momentane støtet som oppstår i møte med steil voll med høy treffvinkel.

Det er flere faktorer enn formen på skredfronten ved møtet med ledevollen som spiller inn på strømmingen langs vollen og avsetningen av massene, som når skredfronten treffer vollen, hvor mye bevegelse som skapes på grunn av de bakre massenes møte med skredfronten som

slår over, hvor de «fryste» massene og vannrike kanalene er lokalisert i skredet og sedimenteringen av grove masser.

Treffpunktet til skredfronten på ledevollen støtter opp om antagelsen om at å forskyve rotasjonspunkt mot høyre til  $(x, y) = (30, -30)$  cm istedenfor å ha det sentrert ikke er av betydning som følge av at skredfronten har en tendens til å være fremst på høyre side, se Kapittel 5.1.3 «Strømning i rennen,  $x = -3,1 - 0$  m». Det er ønskelig at skredfronten skal treffe vollen i rotasjonspunktet og dette er tilfellet, se Vedlegg I.

### 5.1.5 Hastighet og energi

Det er stor variasjon i fronthastigheten for de ulike skredene, som en kan se i Figur 38 - 42 som illustrerer hastighetsforløpene. Og innenfor hvert enkelt skred er det variasjoner i hastigheten som ikke stemmer overens med helningen på rennen og endring av skredretning. Hastigheten avtar ikke nedover skredbanen som forventet som følge av energitap på grunn av friksjon mot underlaget, endring av skredbanens gradient og endring av skredets retning, heller ikke etter oppnådd maksimal hastighet. Dette skyldes trolig strømmingen til skredmassene.

Avlesningen av fronthastigheten påvirkes av transversal bevegelse i skredfronten og i skredene uten voll og med fang- og ledevoll, hvor det dannes en vannrik avstikker, kan påvirkningen på enkelte avlesninger bli stor.

Områder med «fryste» masser vil som nevnt strømme saktere enn områder med vannrik suspensjon, men det er ikke funnet en sammenheng mellom hastigheten for skred med en liten andel «fryste» masser i front i forhold til skred med en stor andel «fryste» masser, der de «fryste» massene dekker hele eller deler av fronten. Tidvis kan det se ut til å være en sammenheng mellom hastigheten og mengde «fryste» masser i front, og sammenhengen er mer fremtredende i forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll der separasjonen er kraftigere. Skredene S1/3K(1,2) har en noe lavere hastighet enn skred S2K(1,2) ved  $x = -58$  cm, 1,67 m / s mot 2,31 m / s, se Tabell F.1, Vedlegg F. Figur 65 viser bilder fra skredene S1/2/3K(1,2) rundt  $x = -58$  cm. Bildene viser at i skred 3 er det et større område med «fryste» masser i midten og til venstre som gjør at hastigheten er lavere der enn til høyre. I forhold til skred 2 er andelen «fryste» masser veldig stor og det kan se ut til å være årsaken til forskjellen i hastigheten. Det er derimot ikke stor forskjell i andel «fryste» masser mellom skred 1 og 2. Årsaken til variasjonen i hastigheten er ukjent.





**Figur 65: Skredmasser rundt  $x = -60$  cm for skredene S1/2/3K(1,2) (foto: Christiansen).**

I skred S1(-) har den vannrike suspensjonen tatt igjen fronten ved målingen ved  $x = -97$  cm, i forhold til for skred 2 og 3 der det fremdeles er «fryste» masser i front ved  $x = -58$  cm, og dette er trolig årsaken til høyere hastighet ved målingene i skred 1.

Tabell 3 og 4 viser en oversikt over gjennomsnittshastigheten til skredfronten og tilhørende standardavvik i nedre renne for forsøkene med varierende kanallengde og forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. Tabellene er basert på Tabell F.1, 3 – 5, Vedlegg F. Fronthastigheten fra utslipp og frem til rutebordet,  $x = -3,1 - 0$  m, skal i teorien være lik for skredene med likt materialforhold siden modellen, suspensjonen og initialbetingelsene ikke endres. Dette er ikke tilfellet og skyldes variasjon i strømmingen.

**Tabell 3: Gjennomsnittlig fronthastighet i nedre renne for forsøk med varierende kanallengde.**

Tiltak Sidevoll	Gjennomsnittlig fronthastighet, $v_{gj}$ [m / s]		
	$x = -102$ [cm]	$x = -58$ [cm]	$x = -19$ [cm]
<b>Gjennomsnitt</b>	2,41	2,26	2,18
<b>Standardavvik [100 %]</b>	0,27	0,41	0,24

**Tabell 4: Gjennomsnittlig fronthastighet i nedre renne for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll.**

Tiltak Uten voll og med fangvoll og ledevoll	Gjennomsnittlig fronthastighet, $v_{gj}$ [m / s]		
	$x = -97$ [cm]	$x = -58$ [cm]	$x = -19$ [cm]
<b>Gjennomsnitt</b>	2,19	2,31	2,28
<b>Standardavvik [100 %]</b>	0,38	0,35	0,27

Gjennomsnittshastigheten for skredene med varierende kanallengde viser en tendens til at skredene mister hastighet nedover i rennen, men dette kommer ikke frem hvis en ser på hvert enkelt skred og er ikke tilfelle for skredene uten voll og med fang- og ledevoll.

Tabell 5, 6 og 7 viser en oversikt over gjennomsnittshastigheten til skredfronten og tilhørende standardavvik på rutebordet for forsøkene med varierende kanallengde og forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. Tabellene er basert på Tabell F.1, 3 – 5, Vedlegg F. For kanallengde 2,4 m er det kun i to skred at skredmassene som bidrar til utløpslengden strømmer forbi  $x = 250$  cm og det er kun fra disse to skredene at hastigheten registreres ved denne målingen.

**Tabell 5: Gjennomsnittlig fronthastighet på rutebordet for forsøk med varierende kanallengde.**

Tiltak	Gjennomsnittlig fronthastighet, $v_{gi}$ [m / s]				
	x = 10 [cm]	x = 110 [cm]	x = 130 [cm]	x = 150 [cm]	x = 250 [cm]
<b>Gjennomsnitt</b>	1,93 <sup>(alle)</sup>	1,12 <sup>K(0)</sup>	0,74 <sup>K(1,2)</sup>	0,97 <sup>K(2,4)</sup>	1,25 <sup>K(2,4)</sup>
<b>Standardavvik [100 %]</b>	0,14	0,34	0,17	0,25	0,25

**Tabell 6: Gjennomsnittlig fronthastighet på rutebordet for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll.**

Tiltak	Gjennomsnittlig fronthastighet i løpsretning, $v_{gi}$ [m / s]		
	x = 10 [cm] (alle)	x = 20 [cm] (fangvoll)	x = 110 [cm] (uten voll)
<b>Gjennomsnitt</b>	2,30	2,25	1,40
<b>Standardavvik [100 %]</b>	0,33	0,19	0,14

**Tabell 7: Gjennomsnittlig fronthastighet langs ledevoll.**

Tiltak	Gjennomsnittlig fronthastighet i løpsretning, $v_{gi}$ [m / s]			
	Treffvinkel 40 °		Treffvinkel 20 °	
	x = 50 [cm]	x = 110 [cm]	x = 50 [cm]	x = 110 [cm]
<b>Gjennomsnitt</b>	1,85 <sup>(8 skred)<sup>4</sup></sup>	1,30 <sup>(alle)</sup>	2,18 <sup>(alle)</sup>	2,15 <sup>(alle)</sup>
<b>Standardavvik [100 %]</b>	0,30	0,26	0,40	0,47

Hastigheten ved enden av kanalen er større ved kanallengde 2,4 m enn ved 1,2 m. Dette er ikke som forventet ettersom skred i teorien mister energi og dermed hastighet nedover

<sup>4</sup> Ikke registrert hastighet for skred S3TV(40)H(90) på grunn av kollisjon mellom venstre og høyre avstikker langs voll som forstyrret avlesing.

skredbanen. Dannelse av ny skredfront skjer for forsøk med kanallengde 1,2 m ved  $x = 1,2 - 1,8$  m og for kanallengde 2,4 m ved  $x = 1,2 - 2,4$  m. Det er ikke funnet en sammenheng mellom hastighet og dannelse av ny front. Årsaken til høyere hastighet ved enden av kanal 2,4 m enn ved 1,2 m er ukjent.

Hastigheten langs vollen er større for treffvinkel  $20^\circ$  enn  $40^\circ$  og dette kommer av at energitapet øker med økende treffvinkel. Helningen gir ingen entydig påvirkning på hastigheten.

I noen av forsøkene får skredmassene en hastighetsøkning langs vollen, se Tabell F.4 – 5, Vedlegg F. Hvorvidt skredmassene får en fartsøkning skyldes strømmingen langs vollen og kan også komme av beregningen av hastigheten som i noen tilfeller blir mer unøyaktig når massene strømmer langs vollen.

Energilinjediagrammene viser terminalhastigheten der energilinjene er parallell med modellen, mens i hastighetsforløpsdiagrammene kan den sees som den maksimale konstante hastigheten ettersom at suspensjonen ikke lenger akselererer. Rundt en tredjedel av skredene oppnår terminalhastighet over kortere distanser i bunnen av nedre renne. En av grunnene til at de resterende skredene ikke oppnår terminalhastighet og at den varer så kort for de som oppnår den kan komme av separasjonen av skredmassene og strømmingen til suspensjonen. Lengden på rennen kan også være årsaken, da en lengre renne vil øke muligheten for å oppnå terminalhastighet.

Et fall i energilinjene ved  $x = 0$  cm, ved endring av skredbanens helning, er forventet i diagrammene for hastighetsforløp og energilinjene siden dette i teorien vil føre til reduksjon av hastigheten til suspensjonen. Det forventes også et fall i energilinjene ved skredmassenes møte med ledevollen. Energilinjediagrammene viser at energilinjene ikke er jevne linjer, men at de har mange sprang. Ut fra hastighetsforløpets diagrammer er dette å vente siden energilinjene bygger på stedshøyde og hastighetshøyde. Årsaken til de uventede sprangene, både som økning og fall, er at skredene kommer i pulser, at skredmassene separeres samt variasjon i strømmingen. Separasjon av skredmassene gir «fryste» masser og kanaler med raskere strømming som er med på å gi variasjon i hastigheten nedover i rennen.

Resultatene for forsøkene med varierende kanallengde viser et tidligere sprang, rundt  $x = -1 - 0$  m. For forsøkene uten voll og med fangvoll er ikke fallene i energilinjene like utbredt, kun to av de tolv skredene har slike fall, de andre har mindre fall eller får en stigning.

Energilinjene for forsøkene med ledevoll har mange sprang. Noen av skredene viser en økning av energi i møte med vollen. Dette er ikke forventet og skyldes økningen i hastighet langs vollen som nevnt ovenfor.

Ved tilbakeberegning av registrerte skred har en som nevnt i Kapittel 2.5 «Utløpslengde» kommet frem til at energilinjens helning i utløpsområdet, fra  $20^\circ$  punktet, skal variere mellom 0,2 – 0,3, hvor mindre skred eller skred med grove masser vil gi lavest verdi og store skred eller skred med høy andel finstoff vil gi høy verdi. Vedlegg J gir en oversikt over helningen på energilinjen i utløpsområdet for forsøkene med varierende kanallengde, uten voll og med ledevoll, treffvinkel  $40^\circ$  og  $20^\circ$ . Helningen på energilinjene er beregnet både med utgangspunkt fra  $x = 0,1$  m og ved å ta utgangspunkt i området etter  $x = 0,1$  m der energilinjen har en jevn helning. Verdien fra førstnevnte vil kunne sammenlignes med forventet helning fra teorien som nevnt ovenfor. For skredene med ledevoll med treffvinkel  $40^\circ$  gikk skredmassene i vegg før de stanset for de fleste skredene, og bakgrunnen for verdien på helningen på energilinjen er derfor mindre.

I forsøkene med ledevoll utgjør utgangspunktet for beregning av helningen en forskjell og gir generelt lavere helning for energilinjene beregnet fra  $x = 0,1$  m.

Variasjonen i hastigheten påvirker helningen på energilinjen. Ut fra helningen på energilinjene fra  $x = 0,1$  m og utover kan alle skredene betegnes som små skred eller skred bestående av grovt materiale. En kan se en trend til at energilinjen er slakere ved bruk av sidevoller enn når materialet får strømme fritt og at ledevoll med treffvinkel  $20^\circ$  kan gi samme påvirkning på energilinjen som sidevoller, dette er tilfellet ved helning  $90^\circ$  og  $34^\circ$ . Ved treffvinkel  $40^\circ$  er det usikkert om ledevollen bidrar til økt utløpslengde. Det er noe mangelfull data her som følge av at utløpslengden kun kunne registreres for to av skredene og disse er relativt forskjellige. Noe høyere hastighet ved  $x = 0,1$  m og kortere utløpslengde gir en brattere helning på energilinjen enn ved treffvinkel  $20^\circ$ . Økningen av materialmengden og endringen av initialbetingelsene har påvirket hastigheten ved  $x = 0,1$  m i større grad enn utløpslengden og dermed gitt en økning i energilinjens helning.

Energitap, i form av potensiell energi og hastighetsenergi, kommer blant annet som følge av friksjon mot underlaget og friksjon innad i suspensjonen i tillegg til reduksjon av helningen i skredbanen, som følge av manglende innsnevring av skredet og støt mot vollene. Ved bruk av ledevoller opp til en viss treffvinkel vil skredmassene få en kanaliseringseffekt av vollen, som

ved bruk av sidevoller, som bidrar til et økt utløp i forhold til forsøk uten voll. Dette vil i teorien gjenspeile seg i helningen på energilinjens ved at den er lavere ved bruk av voller enn uten. Ettersom at treffvinkel 40 ° gir utløpslengde noe lavere enn for treffvinkel 20 ° er det trolig at maksgrensen for treffvinkel for når ledevollene gir en kanaliseringseffekt er i området 40 °, men dette bør undersøkes videre. Om vollen bidrar til kanaliseringseffekt avhenger blant annet av om energitapet som følge av retningsendringen er mindre enn bevaringen av energi som kommer av at skredet ikke får mulighet til å bre seg utover til siden.

Endringen av materialmengde og initialbetingelser påvirker energilinjens ved at den får en brattere helning. Dette stemmer godt overens med teori om at større skred vil gi en større helning enn mindre skred, se Kapittel 2.5 «Utløpslengde». Side- og ledevollenes påvirkning på energilinjens er ikke som forventet, men dette skyldes strømmingens påvirkning på hastigheten og dermed avlesingen av helningen på energilinjens. Hvis en tar utgangspunkt i utløpslengden vil helningen på energilinjens være slakere for forsøkene med voll enn de uten, opptil en viss treffvinkel som nevnt ovenfor.

Modellen som brukes under forsøkene er omtrent i målestokk 1 : 20 og dette gir ut fra formelen i Kapittel 2.4.2 «Hastighet»:

$$v_{modell} = \frac{v_{natur}}{\sqrt{20}}$$

Hastigheten i forsøkene stemmer overens med skred i naturen som har en hastighet på mellom 5 – 10 m / s som nevnt i Kapittel 2.1 «Generelt om flomskred», der hastigheten øker med skredstørrelsen. Dette tilsvarer en hastighet i modell på 1,12 – 2,24 m / s. Gjennomsnittlig hastighet i nedre renne har vært i det øvre sjiktet og noen ganger litt over. For forsøkene med varierende kanallengde varierer gjennomsnittlig fronthastighet mellom 2,18 – 2,41 m / s (Tabell 3), mens for forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll varierer den mellom 2,19 - 2,31 m / s (Tabell 4). Dette tilsvarer 9,75 – 10,78 m / s og 9,79 – 10,33 m / s i naturen, så forsøkene har relativt høy hastighet og den er relativt lik. Endringen i materialmengde og initialbetingelser har enten ikke hatt særlig innvirkning på hastigheten eller så har endringene nullet hverandre ut.

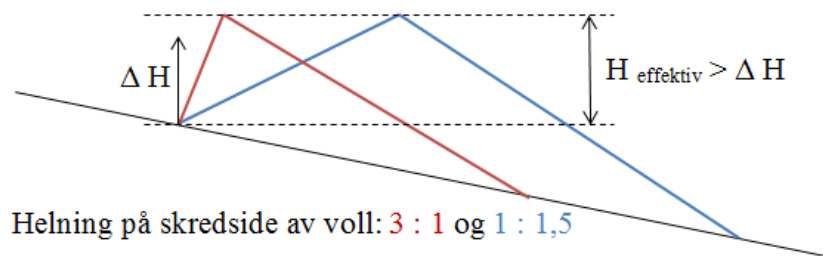
Mannings formel er i utgangspunktet en formel for å beregne hastighet for newtonsk væske. For å kunne anvende denne på flomskred må det tas hensyn til suspensjonstypen ved valg av Mannings tall og dette gir en verdi for Mannings tall på 11,2 og 11,5 m<sup>1/3</sup> / s for hastighet 5 og 10 m / s, se Kapittel 2.4.2 «Hastighet». Forsøkene med varierende kanallengde gir ved bruk

av Mannings formel og Mannings tall 11,2 og 11,5  $\text{m}^{1/3} / \text{s}$  hastighet 4,00 og 4,11  $\text{m} / \text{s}$  og uten voll og med fang- og ledevoll hastighet 3,18 og 3,27  $\text{m} / \text{s}$ . Se Vedlegg K for valg av verdier og utregning. Maksimal gjennomsnittlig verdi for skredene i nedre renne blir overestimert ved bruk av denne formelen. Graden av overestimering henger sammen med helningen på energilinjen og Manningstallet. Forsøkene med varierende kanallengde har helning 0,29 på energilinjen og forsøkene uten kanal og med fang- og ledevoll har verdi 0,13. Med bakgrunn i at helningen på energilinjen i utløpsområdet foreslås til 0,2 – 0,3 i Kapittel 2.5 «Utløpslengde», indikerer forsøkene at Manningstallet bør reduseres. Ved beregning av Manningstallet antas flyte høyden i størrelse 1 – 2 m, mens forsøkene gir flyte høyde i størrelse 0,5 – 0,7 m.

## 5.2 Oppskyllingshøyde og utbredelse

### 5.2.1 Oppskyllingshøyde, fang- og ledevoll

For å ivareta sikkerheten ved dimensjonering av vollhøyden må den effektive høyden være større enn oppskyllingshøyden, se Figur 66.

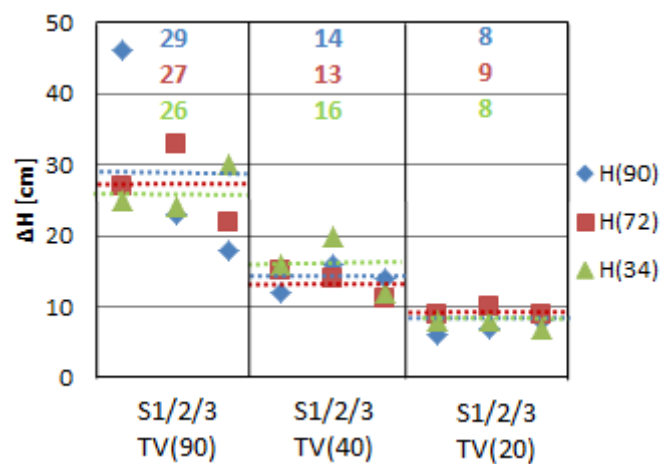


Figur 66: Oversikt over effektiv vollhøyde og oppskyllingshøyde.

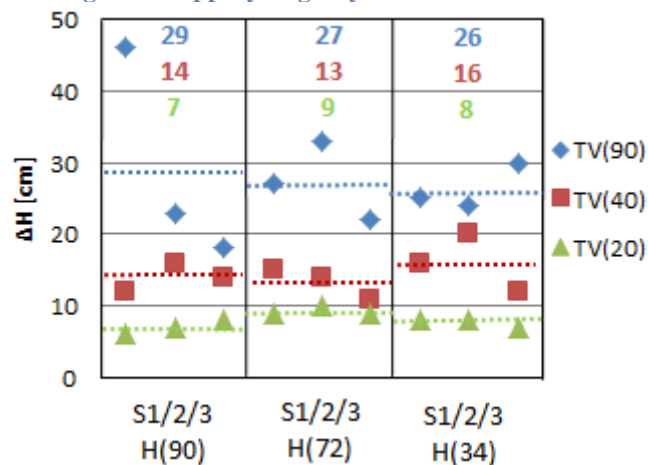
Tabell 8 viser gjennomsnittlig oppskyllingshøyde til frontbølgen for hver forsøksserie (3 skred) og i hvilken høyde massene legger seg til ro etterpå med tilhørende standardavvik. Figur 67 og 68 viser oppskyllingshøyden til frontbølgen i forhold til treffvinkel og helning på skredsidene av vollen og oppsummerer et av hovedspørsmålene i oppgaven. Diagrammene viser to forskjellige fremstillinger av samme data. Tabellen og diagrammene er basert på Tabell G.1 – 2, Vedlegg G.

Tabell 8: Gjennomsnittlig oppskyllingshøyde for forsøk med fang- og ledevoll.

Skred	Maksimal oppskyllingshøyde, $\Delta H$ [cm]		Høyde på gjenliggende masser [cm]	
	Gjennomsnitt	Standardavvik [100 % ]	Gjennomsnitt	Standardavvik [100 % ]
TV(90)H(90)	29	12	10	1
TV(90)H(72)	27	5	11	1
TV(90)H(34)	26	3	10	1
TV(40)H(90)	14	2	7	0
TV(40)H(72)	13	2	8	1
TV(40)H(34)	16	3	7	0
TV(20)H(90)	7	5	5	1
TV(20)H(72)	9	1	7	2
TV(20)H(34)	8	1	5	1



Figur 67: Oppskyllingshøyde ut fra treffvinkel.



Figur 68: Oppskyllingshøyde ut fra helning på skredsidene av vollen.

Forsøkene med treffvinkel  $90^\circ$  og helning på skredsidene av vollen  $90^\circ$  har størst standardavvik. Her er det målingen for skred S1TV(90)H(90) som skiller seg ut med maksimal oppskyllingshøyde på 46 cm, mens gjennomsnittlig verdi er 29 cm. Tabell G.1, Vedlegg G viser at skred 1 har høyere hastighet rett før møtet ved vollen enn de to andre og dette ser ut til å være årsaken til den høye oppskyllingshøyden i tillegg til at skredet har kun vannrike masser i front, mens de to andre skredene har noe «fryste» masser i fronten på høyre side. Ser en på alle forsøkene med fangvoll under ett er det ikke funnet en entydig sammenheng mellom fronthastigheten i møtet med vollen og påvirkningen fra suspensjonens front på oppskyllingshøyden.

Figur 67 og 68 viser at oppskyllingshøyden øker med økende treffvinkel. Dette kan komme av at ved økende treffvinkel blir sammenstøtet med vollen og retningsendringen til massene større. Helningen på skredsidene av vollen gir ikke en entydig påvirkning på oppskyllingshøyden. Dette kan komme av at tapet av energi ved sammenstøtet og som følge av friksjon når suspensjonen strømmer oppetter vollen er relativt jevnt.

Tabell 9 viser gjennomsnittlig oppskyllingshøyde for forsøk med ledevoll og treffvinkel  $40^\circ$  og  $20^\circ$ , både i modellstørrelse og skalert opp. Som nevnt i Kapittel 2.6.1.1 «Sidevoll og ledevoll» er det vanlig med effektiv vollhøyde på 4 – 5 m og treffvinkelen bør helst være mindre enn  $15 - 20^\circ$ . Resultatene støtter opp om størrelsen på den effektive høyden, ved å vise oppskyllingshøyder lavere enn effektiv vollhøyde, og viser at ved treffvinkel større enn anbefalt bør den effektive høyden økes for å ivareta sikkerheten.

**Tabell 9: Gjennomsnittlig oppskyllingshøyde for forsøk med ledevoll og treffvinkel  $40^\circ$  og  $20^\circ$ , både i modellstørrelse og skalert opp.**

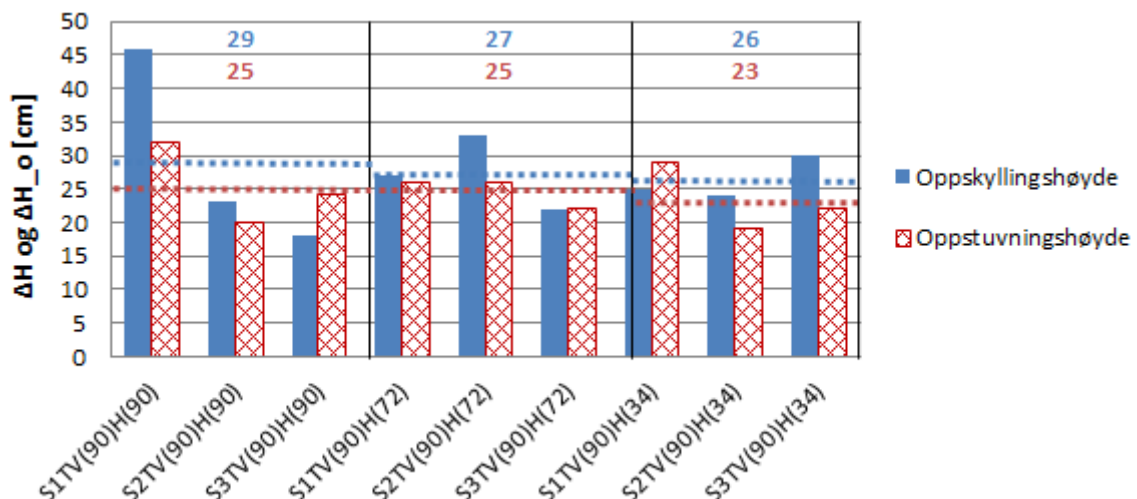
Ledevoll		Helning		
		$90^\circ$	$72^\circ$	$34^\circ$
<b>Treffvinkel <math>40^\circ</math></b>	Modell	0,14 m	0,13 m	0,16 m
	Natur	2,8 m	2,6 m	3,2 m
<b>Treffvinkel <math>20^\circ</math></b>	Modell	0,07 m	0,09 m	0,08 m
	Natur	1,4 m	1,8 m	1,6 m



Ligning 15 for oppstuvningshøyden støtter opp om forsøkene som viser at treffvinkelen er av betydning for oppstuvningshøyden, men ikke helning på skredsidene av vollen da denne kun tar hensyn til treffvinkelen. Oppstuvningshøyden er den andelen av oppskyllingshøyden som kommer av skredets retningsendring og tar utgangspunkt i hastighetshøyde.

Gjennomsnittlig fronthastighet langs voll ved  $x = 50$  cm for skredene med treffvinkel  $40^\circ$  og  $20^\circ$ , skalert opp  $1,85$  m / s og  $2,18$  m / s, gir oppstuvningshøyde  $1,4$  m og  $0,6$  m i naturen. Som nevnt i Kapittel 2.6.1.1. «Sidevoll og ledevoll» gir skred med hastighet  $5 - 10$  m / s oppstuvningshøyde på henholdsvis  $0,1 - 0,6$  m og  $0,5 - 2,1$  m for treffvinkel  $40^\circ$  og  $20^\circ$ . Forsøkene ligger i det øvre sjiktet med tanke på hastighet, så ut fra oppstuvningshøyden ser det ut til at formelen er mer nøyaktig for vinkler  $< 20^\circ$ .  $20^\circ$  bør settes som øvre grense ved bruk av formelen og dette passer med at treffvinkelen generelt bør være mindre enn  $15 - 20^\circ$ .

For forsøkene med fangvoll gir Ligning 15 oppstuvningshøyde som er relativt lik oppskyllingshøyden under forsøkene, se Figur 69. I tillegg til å beregne oppstuvningshøyde ved treffvinkel  $< 20^\circ$  kan formelen brukes for å estimere oppskyllingshøyden ved treffvinkel  $90^\circ$  og dermed nødvendig vollhøyde. Her er oppstuvningshøyden lik hastighetshøyden som følge av  $90^\circ$  treffvinkel. Gjennomsnittlig oppskyllingshøyde for fangvoll på  $29$ ,  $27$  og  $26$  cm, henholdsvis helning  $90^\circ$ ,  $72^\circ$  og  $34^\circ$ , tilsvarer  $5,8$ ,  $5,4$  og  $5,2$  m i naturen, og dette viser at effektiv høyde for fangvoller må være større enn for ledevoller og at den generelt øker med økende treffvinkel.



Figur 69: Oppskyllingshøyde vs. oppstuvningshøyde for forsøk med fangvoll.

Figur 49 og Tabell 8 som viser maksimal oppskyllingshøyde og høyde på gjennliggende masser for skredene med fang- og ledevoll viser at høyden på massene som blir liggende igjen oppetter vollen også øker ved økende treffvinkel. Dette kan komme av at strømmingen bak

ikke klarer å føre med seg like mye av de grove massene videre siden retningsendringen og dermed energitapet blir såpass stort. At helningen i liten grad påvirker høyden kan komme av at massene legger seg foran vollen slik at massene som strømmer bak ikke påvirkes av den opprinnelige helningen på vollen.

Ut fra forsøkene er det vanskelig å se om de første massene sedimenteres inntil vollen slik at strømmen bak ikke påvirkes av vollens opprinnelig helning som diskutert i Kapittel 2.6.1.1 «Sidevoll og ledevoll», illustrert i Figur 17 a). Det kan dermed ikke konkluderes vedrørende om en vil få full utnyttelse av en steil vegg. Forsøksresultatene med en steil fangvoll støtter opp om at ved bruk av en steil vegg vil en få en trykkbølge bakover som reduserer energien i skredet, se Figur 17 b). Når massene slår tilbake i skredretningen mister massene bak energi som følge av sammenstøtet og dermed bremses skredmassene ned. I forsøkene med ledevoll slår massene som oftest tilbake i møtet med vollen ved treffvinkel  $40^\circ$  og ved stor helning på skredsiden av voll for treffvinkel  $20^\circ$ . Ved treffvinkel  $20^\circ$  ser ikke dette ut til å påvirke massene bak i særlig grad ettersom massene som strømmer bak i stor grad kan strømme uforstyrret på grunn av den lave treffvinkelen. Ved treffvinkel  $40^\circ$ , spesielt ved høy helning på skredsiden av vollen, bremser massene som slår tilbake i møtet med vollen opp de som kommer strømmende bak.

### 5.2.2 Utbredelse

Utløpsområdet defineres som det området der det er en viss sammenheng i sedimentet, se Figur 50. Både utløpslengde og -form er sterkt avhengig av strømmingen i skredbanen i form av hvor det er kanaler med raskere strømming og områder med «fryste» masser. Ved laminær strømming kan en for eksempel forvente en symmetrisk utløpsform om senterlinjen.

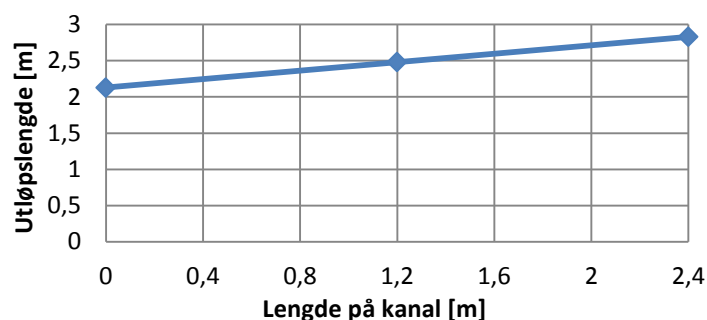
Tabell 10 viser gjennomsnittlig utløpslengde med tilhørende standardavvik per forsøksserie for skredene utført med varierende kanallengde, uten voll og med ledevoll, treffvinkel  $40^\circ$  og  $20^\circ$ , basert på Tabell F. 2 - 5 i Vedlegg F.

**Tabell 10: Gjennomsnittlig utløpslengde med tilhørende standardavvik for forsøk med varierende kanallengde, uten voll og med ledevoll, treffvinkel 40 ° og 20 °.**

<b>Tiltak</b>	<b>Skred</b>	<b>Gjennomsnittlig utløpslengde i løpsretning [cm]</b>	<b>Standardavvik [100 %]</b>
<b>Sidevoller</b>	S1/2/3K(0)	214	25
	S1/2/3K(1,2)	248	8
	S1/2/3/4K(2,4)	283	62
<b>Uten voll</b>	S1/2/3(-)	229	12
<b>Ledevoll</b>	S1/2/3TV(40)H(90)	233 (et skred)	-
	S1/2/3TV(40)H(72)	282 (et skred)	-
	S1/2/3TV(40)H(34)	-	-
	S1/2/3TV(20)H(90)	290	32
	S1/2/3TV(20)H(72)	313	14
	S1/2/3TV(20)H(34)	311	13

For kanallengde 2,4 m er standardavvik til gjennomsnittlig utløpslengde stort. Skredene S1/3K(2,4) og S2/4K(2,4) er sammenlignbare med hensyn på utløpslengde. Den store variasjonen kommer av strømmingen. Det er ikke funnet sammenheng mellom når den første fronten stanser og utløpslengden. Skredene S2/4K(2,4) har kortest utløpslengde, kortere enn skredene med kanallengde 1,2 m, og i begge skredene strømmer det en vannrik suspensjon lenger enn registrert utløpslengde. Årsaken til den korte utløpslengden er ukjent.

Sidevollene holder skredmassen samlet lengre og opprettholder dens flyteegenskaper og fører dermed til et lengre og smalere utløp i forhold til forsøk uten voll, som vist i Figur 53 - 56, med unntak av skred S3K(1,2) som er relativt bredt. Kanallengde 2,4 m gir skredene en relativt symmetrisk utbredelse som følge av at kanalen får større mulighet til å rette opp eventuelle skjeve strømminger. En kan i disse forsøkene ikke forutse en utløpslengde ut fra hastigheten i skredbanen. Hastigheten varierer nedover skredbanen og hastigheten ved ende av kanal svarer ikke til endelig utløpslengde for den gitte kanallengden. Figur 70 oppsummerer utløpslengden i forhold til kanallengden og oppsummerer et av hovedspørsmålene i oppgaven. Diagrammet viser at utløpslengden øker med kanallengden.



Figur 70: Lengde på kanal versus utløpslengde.

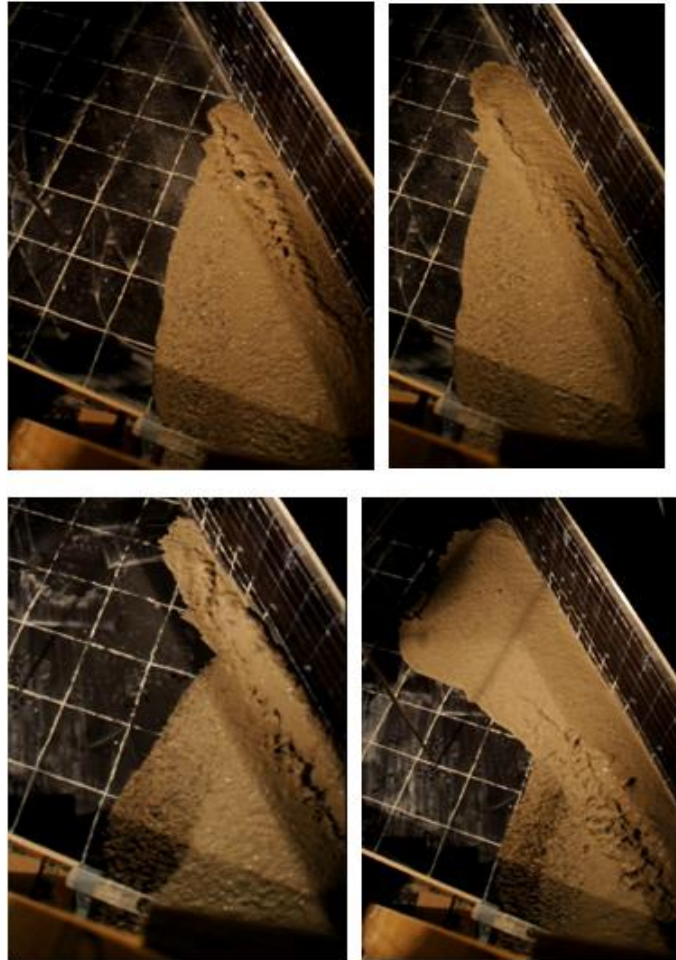
Tabell 11 viser at økt materialmengde og de gitte endringene i initialbetingelsene gir økt utløpslengde. Økningen av mengde grusig sand gir en økning av energi i form av potensiell energi. Flyteegenskapene til skredmassen avhenger av dens metningsgrad som påvirker energitapet via friksjon. Under alle forsøkene er massene fullstendig mettet og dermed vil energiøkningen føre til lengre utløp siden friksjonen ikke øker som følge av økningen av materialmengden. Det er ingen konklusjon å trekke fra massens påvirkning på hastighet.

Tabell 11: Fronthastighet og utløpslengde for forsøk med kanallengde 0 m og uten voll.

Skredmasse [kg]	Gjennomsnittlig fronthastighet i løpsretning [m/s]					Utløpslengde [cm]
	x = -97 cm	x = -58 cm	x = -19 cm	x = 10 cm	x = 110 cm	
80 (S1-3K(0))	2,45	2,42	2,15	1,97	1,12	214
100 (S1-3(-))	2,19	2,31	2,28	2,30	1,40	229

Under forsøkene med ledevoll med treffvinkel  $40^\circ$  strømmer de fleste skredene i sideveggen og i de tilfellene registreres ikke utløpslengden. Skredene S1TV(40)H(90) og S2TV(40)H(72) er unntak og skiller seg i tillegg ut med smale utløp. Årsaken til forskjellen i utløpslengde er trolig hvor hovedmengden av materialet avsettes. For skred S1TV(40)H(90) sedimenteres materialet tidligere enn ved skred S2TV(40)H(72). Det er en tendens til at høy helningsvinkel på skredsiden av vollen fører til ekstremt brede utløp. Dette henger sammen med at ved høy helning blir tilbakeslaget større i møtet med vollen og de bakre massene kolliderer da med massene som slår over og gir et bredt utløp. I tilfeller der massene slår over langt nede, avhengig av frontens møte med vollen, får de bakre massene strømme langs vollen og dette gir smalere utløp. Figur 71 viser at det skapes mer bevegelse i massene ved skred S2TV(40)H(90) enn ved skred S1TV(40)H(90) og dette kommer av et større tilbakeslag og av at tilbakeslaget skjer nærmere x = 0 cm som gjør at de bakre massene ikke klarer å komme på innsiden og inntil vollen. Skred 1 skiller seg ut med en smal utbredelse med tanke på

treffvinkel og helning. Ved helning  $34^\circ$  strømmer massene i større grad oppetter vollen og får en rolig endring av vinkel, noe som gir smalere utløp, i tillegg til at massene ikke slår tilbake i like stor grad og hindrer massene bak i å strømme langs vollen.

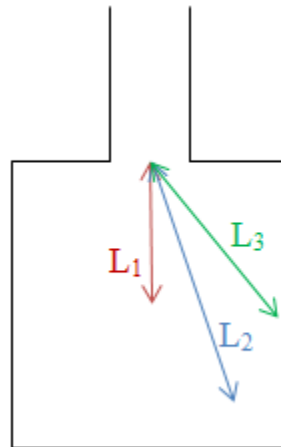


**Figur 71: Strømning i møte med voll, to tidspunkt. Øverst S1TV(40)H(90) og nederst S2TV(40)H(90) (foto: Christiansen).**

Ved treffvinkel  $20^\circ$  er ikke variasjonene i utløpets bredde så store og utløpslengden er med unntak av skred S1TV(20)H(90) relativt stabil. Skredene med treffvinkel  $20^\circ$  får alle relativt smale utløp. Overordnet er utløpet noe bredere ved helning  $72^\circ$  og  $90^\circ$  enn ved  $34^\circ$ . Skredmassene opplever en relativt liten vinkelendring og dette gjør at overslaget blir mindre enn for treffvinkel  $40^\circ$ . De ytterste massene kommer relativt langt ned på rutebordet før de blir påvirket av vollen og massene som slår over, og inntil de påvirkes beholder de retningen sin fremover. Skred S2TV(20)H(34) brer seg utover allerede ved  $x = 0$  cm og får et bredere utløp enn de to andre ved lik helning. Ved helning på skredsiden av vollen  $90^\circ$  blir utløpslengden noe kortere enn ved helning  $72^\circ$  og  $34^\circ$  som gir relativt lik utløpslengde. Det kan se ut til at stor helning påvirker sedimenteringen og dermed utløpslengden. Dette bør undersøkes videre i sammenheng med 3D-bilde av avsetningen som vil vise hvor materialet

sedimenteres både i utbredelse og høyde. Tapet av energi ved sammenstøtet med vollen og som følge av friksjon når suspensjonen strømmer oppetter vollen gir ikke lik påvirkning på utløpslengden slik det ser ut til ved registrering av oppskyllingshøyde.

Forsøkene med ledevoll og treffvinkel  $20^\circ$  gir lengre utløp enn skredene uten voll, men det kan ikke trekkes en slutning om lengden på skredene utført med  $40^\circ$  treffvinkel siden modellen ikke er stor nok til at forsøkene kan utføres uforstyrret. Som nevnt i Kapittel 5.1.5 «Hastighet og energi» kan skredmassene oppleve en kanaliseringseffekt som følge av vollene og dermed få bedre flyteegenskaper og et lengre utløp, se Figur 72. Dette gjelder opp til en viss treffvinkel. Ved for høy treffvinkel vil skredet miste mye energi i sammenstøtet med vollen. Resultatene viser en tendens til at en stor treffvinkel gir bredere utløp enn en liten og at utløpet blir smalere ved lavere helning på skredsiden av vollen.



Figur 72: Illustrasjon av treffvinkel versus utløpslengde.

### 5.3 Flyte høyde

Flyte høydediagrammene viser at flomskred kommer i pulser der den første bølgen er den største. Skred S3K(1,2) ser ut til å være et unntak med to høye målinger. Video av skredhendelsen gir en logisk forklaring på den siste og høyeste målingen som vil forklares under. Frontbølgen består også av en grovere suspensjon enn strømmingen bak som er mer vannrik og har et større finstoffinnhold. Fronten av skredet vil være høyest og bak fronten vil det være et jevnt og relativt flatt område.

Ut fra teorien om formen på en flomskredbølge som nevnt tidligere og i prosjektet (Christiansen 2012) vil det være nærliggende å tro at en får en høyere flomskredbølge der det er «fryste» masser i front enn der det er en vannrik suspensjon. Under forsøkene har det derimot ikke vist seg å være en sammenheng her med tanke på frontbølgens flyte høyde.

Tabell 12 viser gjennomsnittlig maksimal flyte høyde og gjennomsnittlig varighet på frontbølgen, med tilhørende standardavvik, med bakgrunn i Figur 57 - 61. Resultatene viser at en økning i materialemengden gir en høyere flyte høyde og en kortere varighet på frontbølgen, men tre av de fire skredene med fremstilt flomskredbølge med varierende kanallengde avviker fra forventet oppførsel som var en markert front i flomskredbølgen, så denne tendensen bør ikke vektlegges. Avviket fra forventet oppførsel forklares under. Standardavvikene er større for forsøkene med varierende kanallengde og dette er naturlig siden verdiene tar utgangspunkt i 4 skred, mot verdiene for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll som er basert på 30 skred.

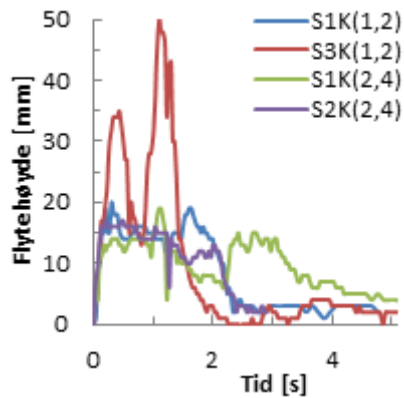
**Tabell 12: Oppsummering flyte høyde.**

Skred	Masseforhold	Maksimal flyte høyde, gjennomsnitt [mm]	Standard - avvik [100 %]	Varighet frontbølge, gjennomsnitt [s]	Standard - avvik [100 %]
<b>S1/3K(1,2) og S1/2K(2,4)</b>	20 kg vann 60 kg materiale	27	14	1,9	0,4
<b>Skred uten voll og med fang- og ledevoll</b>	20 kg vann 80 kg materiale	35	5	1,2	0,2

Ut fra eksisterende datagrunnlag kan en ikke trekke en slutning om suspensjonens mengdeforhold og størrelsens påvirkning på maksimal flyte verdi eller varighet av den fremre, høye delen av flomskredbølgen.

Flyte høyden til skredene med varierende kanallengde skiller seg ut, se Figur 73. Skredene S1K(1,2) og S1/2K(2,4) skiller seg også ut ved at de ikke har en markert bølgetopp, men en jevnere verdi over lengre tid som illustrerer frontbølgen. Som Figur 74 viser ser ikke fronten til de tre skredene lik ut. Skred S1K(1,2) har en oppsamling med «fryste» masser ved målingspunktet, skred S1K(2,4) har en smal stripe med «fryste» masser i front ved senterlinjen og skred S2K(2,4) har en liten oppsamling av «fryste» masser». Frontbølgens jevne flyte høyde istedenfor markante bølger er vanskelig å forklare. Ut fra forsøkene er det ikke funnet en sammenheng mellom «fryste» masser i front og høy flyte høyde på frontbølgen.





Figur 73: Flyte høyde for forsøk med varierende kanallengde, utsnitt av Figur 57.



Figur 74: Skred ved registrering av flyte høyde (foto: Christiansen).

Skred S3K(1,2) skiller seg også ut ved at den har to bølgetopper, der den første har en verdi rett over gjennomsnittet og den siste er størst med maksimal verdi ca. 50 mm. Disse to markerte bølgetoppene og deres høye verdier kommer av skredmassenes bevegelse. Som vist i Figur 75 er det en stor andel «fryste» masser som dominerer venstre side og midten av rennen i dette skredet. Disse massene stopper opp relativt tidlig, ved  $x = -70$  cm. For de bakre massene virker de fremre massene som har lagt seg til ro som en ledevoll og dette fører til at de bakre massene skyller oppetter «vollen» og blir ført mot høyre, og dette fører til den andre bølgetoppen og dens ekstreme flyte høydeverdi.



Figur 75: Strømning som skaper maksimal flyte høyde i skred S3K(1,2) (foto: Christiansen).



En del av flomskredbølgene får noen små høyder i bakkant av fronten også, men årsaken er ikke alltid klar. For eksempel ved skredene S2TV(90)H(34), S1TV(20)H(72) og S1TV(40)H(90) skyldes høyden at «fryste» masser virker som en voll for suspensjonen som strømmer bak, mens for blant annet skredene S1(-) og S3TV(40)H(34) er det ingen synlig årsak.

Som nevnt i Kapittel 2.5 «Utløpslengde» er det vanlig med flyte høyde på 1 – 2 m. Modellen er omtrent i målestokk 1 : 20. Hvis en skalerer opp verdiene fra Tabell 12 får en gjennomsnittlig flyte høyde 0,54 m for forsøkene med varierende kanallengde der flyte høyde er registrert og 0,70 m for forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll. Disse verdiene er en del lavere enn forventet ut fra vanlige verdier fra teorien og ut fra at skredhastigheten i nedre renne i forsøkene tilsier at skredene er relativt store. Det forventes økt flyte høyde med økt skredstørrelse.

#### **5.4           Anbefalinger til videre arbeid**

Kapittelet er ment som en støtte til senere modellforsøk med flomskred og vil inneholde temaer det vil være interessant å undersøke videre samt erfaringer som bør videreføres ved utførelse og registrering.

Som nevnt i Kapittel 4.4 «Feilkilder» fører separasjon av suspensjonen til stor variasjon i forsøkene. Årsaken til de lokale områdene med «fryste» masser som ofte opptrer under forsøkene med varierende kanallengde er ukjent og bør undersøkes videre. For å minske variasjonen av suspensjonens separasjon bør omrøringen standardiseres, for eksempel ved å benytte en trommel istedenfor kasse eller eventuelt lage et system med flere malingsblandere som kan festes i kassen. Tiden fra omrøring til initiering av skred bør være kortest mulig. Hvis omrøringen standardiseres vil det være interessant å se på om det blir like store variasjoner i separasjonen av suspensjonen, formen til skredfronten og strømmingen i skredet, spesielt med tanke på lokalisering av «fryste» masser og vannrik suspensjon. En sammenligning og undersøkelse av separasjon og strømming under modellforsøk opp mot skred i naturen vil være interessant.

En analyse av 3D-utbredelsen til skred i forbindelse med strømmingen er et spennende tema for analyse og diskusjon. Diagrammene vil kunne gi en bedre forståelse av sammenhengen mellom strømming og avsetning og hvordan sedimenteringen påvirker utløpslengden. Et 3D-diagram gjør det også mulig å undersøke hvor mye materiale som ligger igjen i rennen, og

hvor mye som er i utløpsområdet og hvor. En prosessering av data fra skanningen i denne studien bør utføres og skanning av skredmassene videreføres ved utførelse av nye modellforsøk.

Det bør utføres forsøk med flere kanallengder for å undersøke om forholdet mellom utløps- og kanallengde er lineært, slik det fremstår av Figur 70.

Som det kommer frem i forsøkene er ikke utløpsområdet i modellen stort nok til å registrere utløpslengden til skred med treffvinkel større enn  $20^\circ$ . Det vil være interessant å utføre flere skred med treffvinkel  $40^\circ$  og i tillegg skred med treffvinkel  $60^\circ$  for å se på et ytterpunkt med tanke på treffvinkel som er anbefalt i teorien. Ved å undersøke en treffvinkel gjerne opp mot  $60^\circ$  kan en undersøke når vollene gir skredmassene en kanaliseringseffekt og når treffvinkelen er så stor at energitapet i møte med vollen «tar over».

Forsøk med fangvoll som oppbevarer skredmassene bør også utføres for å opprette et forhold for nødvendig oppbevaringsareal, se Figur 21, i forhold til skredvolum.

Det vil være interessant å utføre forsøk uten voll og med side-, fang og ledevoll for flere skredstørrelser og flere materialforhold for å undersøke effekten på utløpslengde, kanaliseringseffekt, oppskyllingshøyde og nødvendig lengde på ledevoll. Et forslag er å øke skredstørrelsen med 50 og 100 %. Erfaringer fra Fiskum (2012) bør brukes ved vurdering av alternative materialforhold, da det ved stort finstoffinnhold viste seg å være problematisk å få massene ut av kassen. Det vil også være interessant å se på hvilken påvirkning en økning i skredstørrelsen eller endring av materialforhold vil få på separasjon av suspensjonen og strømmingen.

Effekten av mengdeforhold på flomskredbølgens form kom ikke frem av disse forsøkene da målerverdiene måtte hentes manuelt ut under forsøkene med varierende kanallengde og dette var et veldig tidkrevende arbeid. Det vil og være interessant å se mer på mengdeforholdets påvirkning på flyteøyden og om den uventede formen for skredene med varierende kanallengde der flyteøyden ikke hadde en markant topp et avvik eller reelt for det mengdeforholdet.

Det er vanskelig å konkludere med om forskjellene mellom forsøkene skyldes endringen i materialmengde eller endrede initialbetingelser. Det anbefales derfor å kun endre en parameter om gangen.

I videre forsøk anbefales det å vurdere ruheten på de ulike konstruksjonsdelene opp i mot det som vil være gjeldende i en naturlig skredrenne og det som er vanlig ved konstruksjon av voller.

Filming ved bruk av høyhastighetskamera med 300 bilder per sekund bør videreføres, spesielt i områder av stor interesse. Slike filmklipp gir en mer nøyaktig beregning av hastighet og mer detaljerte bilder. I skred med stor transversal bevegelse bør det vurderes å hente ut hastigheten til fronten, uten å fokusere på at den skal være ved senterlinjen siden en måling med transversal bevegelse vil gi større hastighet enn fronten faktisk har. For å dokumentere skredet best mulig via film og foto er det viktig at det benyttes flere sterke lyskilder for å unngå skyggepartier. Refleksjon mot kameraene må unngås da det fører til uklarheter.

Ultralydsensoren er et nyttig verktøy for å registrere flyte høyden til skredene ved et gitt punkt og det anbefales at den kobles opp mot en datalogger for å effektivisere arbeidet med fremstilling av flyte høydediagram.

## 6 Konklusjon

I følge H. Norem (personlig kommunikasjon, 10. januar 2013) kjennetegnes skredmassene i flomskred av separasjon heller enn av homogen masse og resultatene fra modellforsøkene støtter opp om dette. Suspensjonen separerer seg og en får «fryste» masser og vannrike masser. De «fryste» massene har økt friksjon innad og mot underlaget og dette fører til at de strømmer saktere enn vannrike masser. Årsaken til separasjonen må undersøkes videre da separasjonen kan være knyttet opp mot modellen og initieringen av skredene og dermed ikke være reell for skred i naturen.

Det er stor variasjon i strømmingen innad i forsøksseriene og mellom forsøkene med varierende kanallengde som er utført med 60 kg masse og 20 kg vann, og de uten voll og med fang- og ledevoll som er utført med en økning i 20 kg masse, totalt 100 kg. I tillegg er det noen forskjeller i initialbetingelsene, som helningen på kassen og massenes plassering i kassen før omrøring noe som påvirker strømmingen. Både hastigheten og utbredelsen er avhengig av strømmingen i skredmassene. I skredene med varierende kanallengde er ikke skillet mellom «fryste» og vannrike masser like tydelig som for skredene uten voll og med fang- og ledevoll. Her er det lokale områder med «fryste» masser og vannrik suspensjon, mens i forsøkene uten voll og med fang- og ledevoll består fronten av «fryste» masser etterfulgt av en vannrik suspensjon. Årsaken til at skillet blir tydeligere og mer todelt, kan være at massene skyves mer opp mot kassedøren.

Hastigheten til skredfronten varierer nedover skredbanen, med både stigning og reduksjon. Hastighetsendringene korrelerer ikke med skredbanens vinkelendring og endring av skredretningen og er et resultat av strømmingen og en følge av at skredmassene kommer i pulser. Det er ikke funnet en sammenheng mellom hastighet og mengde «fryste» masser i skredfronten. Energilinjene som konstrueres av stedshøyde og hastighetshøyde viser en uventet oppførsel med mange sprang isteden for et jevnt fall med et dropp ved endring i skredbanens helning og ved skredmassenes møte med vollene, som følge av variasjonene i hastighet nedover skredbanen. Skredene mister energi nedover skredbanen som følge av friksjon innad i suspensjonen og mot underlaget, reduksjon av skredbanenes helning, manglende innsnevring av skredet og støt mot vollene. Sammenlignet med verdier basert på erfaringsdata gir forsøkene uten voll lavere helning på energilinjen i utløpsområdet og lavere flyte høyde. Ved bruk av sidevoll blir helningen på energilinjen enda lavere siden utløpslengden øker.

Ved bruk av sidevoller opprettholdes skredets innsnevring og dermed dets flyteegenskaper og dette bidrar til lengre utløp enn for skred uten voller. En slik kanaliseringseffekt kan også oppstå ved bruk av ledevoller og fører til økt utløpslengde i forhold til skred uten voll, inntil treffvinkelen blir for stor. Kanaliseringseffekten ved bruk av ledevoller avhenger av om energitapet som følge av retningsendringen er mindre enn bevaringen av energien som følge av at skredet ikke brer seg utover til siden. Forsøkene viser at en stor treffvinkel mellom skredretningen og ledevollen fører til et bredere utløpt enn en mindre vinkel.

Figur 70 gir sammenhengen mellom lengde på kanal og utløpslengde slik at en for en gitt kanallengde kan lese av forventet utløpslengde. De utførte forsøkene med varierende kanallengde viser at kanalisering av skred fører til en lengre og smalere avsetning av skredmaterialet, samt en mer symmetrisk utbredelse.

I skredmassenes møte med fang- og ledevollene skyller de oppover vollen og slår tilbake. Figur 67 og 68 gir en sammenheng mellom oppskyllingshøyde, treffvinkel og helning på skredsidene av vollen slik at en enkelt kan dimensjonere vollen hvis skredstørrelsen og -materialet stemmer overens med forsøksmaterialet. Forsøkene viser at maksimal oppskyllingshøyde øker med økende treffvinkel. Helningen på skredsidene av vollen er derimot av liten betydning og dette kan komme av at energitapet i form av støt ved høy helning tilsvarer energitapet som følge av friksjon når suspensjonen strømmer oppover vollen ved lav helning. Bevegelsen hvor massene slår tilbake reduseres når helningen på skredsidene av vollen og treffvinkelen minskes.

Forsøkene viser at verdiene for hastighet og flyte høyde i forhold til skredstørrelse ikke stemmer helt overens med anbefalt verdi i teorien, da hastigheten i forsøkene er i det øvre sjiktet og flyte høyde i det nedre sjiktet i forhold til anbefalt.

Et større forsøksbasert datagrunnlag om sikringstiltak vil vise hvor stor effekt skredstørrelsen og materialinnholdet har på valg og dimensjonering av sikringstiltak.

En av de største utfordringene med flomskred er at det er vanskelig å vite hvor de vil inntreffe i tillegg til hvilken størrelse de vil ha og materialinnholdet. Dette fører igjen til at det er vanskelig å vite hvor en bør sikre og å velge sikringstiltak og dimensjonering. Modellforsøkene er et viktig tilskudd på et område der det mangler forsøksbasert data på skredhendelsen og voller som sikringstiltak.

## 7 Referanseliste

- Bakkehøi, S., Domaas, U. & Lied, K. (1983). Calculation of snow avalanche runout distance. *Annals of Glaciology*, 4: 24-29.
- Brateng, L., E. (2005). *Laboratorieforsøk for utforming av terrengtiltak mot snøskred*. Master: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for bygg, anlegg og transport. 129 s.
- Christiansen, L. F. (2012). *Flomskred – litteraturstudie og innledende modellforsøk for masteroppgave våren 2013*. Prosjekt: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, institutt for bygg, anlegg og transport.
- Crowe, C., T., Elger, D., F., Williams, B., C. & Robertson, J., A. (2010). *Engineering Fluid Mechanics*. 9 utg.: John Wiley & Sons, Inc.
- Fiskum, E. (2012). *Testing av ulike sikringstiltak i modellforsøk*. Master: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, institutt for bygg, anlegg og transport. 97 s.
- Gyldendal. *Reologi*. Den store danske: Gyldendal. Tilgjengelig fra: [http://www.denstoredanske.dk/It, teknik og naturvidenskab/Kemi/Petrokemi-Jordolie, benzin og asfalt/reologi](http://www.denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Kemi/Petrokemi-Jordolie,_benzin_og_asfalt/reologi) (lest 4. februar).
- Hiller, P. & Jenssen, L. (2009). Modellforsøk med flomskred mot bruer - Virkning av bruåpning og ledevoller: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for vann- og miljøteknikk.
- Huebl, J. & Fiebiger, G. (2005). Debris-flow mitigation measures. I: Jakob, M. & Hungr, O. (red.) *Debris-flow hazards and related phenomena*, s. XLII, 739 s., pl. : ill. Berlin: Springer published in association with Praxis PUBL.
- Hungr, O., Morgan, G. & Kellerhals, R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21 (4): 663-677.
- Høydal, Ø. A. & Kronholm, K. (2013). Flomskredsikring, utkast til håndbok Flomskredsikring: NGI.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *American Geophysical Union*, 35 (3): 245 - 296.
- Moe, A., Wieshofer, S., Bakkehøi, S. & Domaas, U. (2003). Avalanche run-out on counter-slopes. *Surveys in geophysics*, 24 (5): 617-631.
- Norem, H. (2011). Veger og snøskred - Håndbok om sikring mot snøskred - Høringsutgave. Nr. 27, 27: Vegdirektoratet. 94 s.
- Norem, H. & Sandersen, F. (2012). Flom- og sørpeskred, Håndbok 284 - Høringsutgave av veileder. Nr. 73: Statens Vegvesen. 102 s.
- Rickenmann, D. (2005). Runout prediction methods. I: Jakob, M. & Hungr, O. (red.) *Debris-flow hazards and related phenomena*, s. XLII, 739 s., pl. : ill. Berlin: Springer published in association with Praxis PUBL.
- Sellevoid, J., C. (2010). *Sikringsmidler mot vannrelaterte skred*. Prosjektoppgave: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for geoteknikk.
- Steinsenteret. *Jordarmering / Geonetting / Murarmering*. Tilgjengelig fra: <http://g-b.no/produkter/geosynteter/jordarmering-geonetting-murarmering> (lest 11. mars).
- Stortingsmelding. (2011 - 2012). *Hvordan leve med farene - om flom og skred*. energidepartement, D. k. o.-o.
- SVV. (2011). Veibygging - Håndbok 018: Statens vegvesen.
- Sæterbø, E., Syvertsen, L. & Tesaker, E. (1998). *Vassdragshåndboka*. Trondheim: Tapir. Tilgjengelig fra: <http://www.nb.no/nbsok/nb/e1041b5f4cd86198579e2ab562e47.nbdigital;jsessionid>

[=78F678E737BFF660677025212C1BDEBD.nbdigital2?lang=no#0](#) (lest 16. oktober 2012).

Takahashi, T. (2007). *Debris flow*. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis.

VanDine, D. (1996). Debris flow control structures for forest engineering. *Res. Br., BC Min. For., Victoria, BC, Work. Pap*, 8: 1996.

## Vedlegg

Vedlegg A	-	Mannings tall, flomskred. ....	a
Vedlegg B	-	Utrekning av dynamisk viskositet for flomskred. ....	b
Vedlegg C	-	Kornfordelingskjema. ....	c
Vedlegg D	-	Sammenheng mellom nummerering av skred og navngivning av kamera under prosjekt- og masteroppgave. ....	d
Vedlegg E	-	Observasjon fra kassen. ....	e
Vedlegg F	-	Hastighet og utløpslengde. ....	g
Vedlegg G	-	Oppskyllingshøyde og gjennomsnittshastighet ved / langs voll. ....	m
Vedlegg H	-	Form på skredfront i nedre renne. ....	p
Vedlegg I	-	Treffpunkt mellom skredfront og ledevoll. ....	q
Vedlegg J	-	Helning på energilinje i utløpsområdet. ....	r
Vedlegg K	-	Mannings formel, flomskredforsøk. ....	s



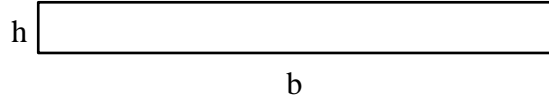
## Vedlegg A - Mannings tall, flomskred

For brede tverrsnitt er hydraulisk radius tilnærmet flyte høyden.

$$R_h = A / P$$

$$A = b * h$$

$$P = 2 * h + b$$



$$b \gg h \text{ fører til } R_h \approx h$$

Vanlig flyte høyde er i størrelsesorden 1 – 2 m, verdien øker med skredstørrelsen. Helning på energilinjen i utløpsområdet er mellom 0,2 – 0,3. Lav verdi for små skred eller skred med grove masser og høy for store skred eller skred med høyt finstoffinnhold. Hastigheten varierer som oftest mellom 5 – 10 m / s, den øker med skredstørrelsen.

Mannings tall er gitt ved:

$$M = \frac{v}{R^{2/3} \times \sqrt{I}} \quad [\text{m}^{1/3} / \text{s}]$$

$$\text{Lite skred: } M = \frac{5}{1^{2/3} \times \sqrt{0,2}} = \underline{11,2 \text{ m}^{1/3} / \text{s}}$$

$$\text{Stort skred: } M = \frac{10}{2^{2/3} \times \sqrt{0,3}} = \underline{11,5 \text{ m}^{1/3} / \text{s}}$$

## Vedlegg B - Utregning av dynamisk viskositet for flomskred

Terminalhastighet:

$$v_{term} = \frac{\rho g h^2}{\tau} \times (\sin\varphi - \mu \cos\varphi) \quad \leftrightarrow \quad \tau = \frac{\rho g h^2}{v_{term}} \times (\sin\varphi - \mu \cos\varphi)$$

Skråningsvinkelen,  $\varphi = 13,8^\circ$  (lik som i modellforsøkene)

Densiteten,  $\rho = 2000 \text{ kg / m}^3$  (generelt densitet mellom  $1800$  og  $2300 \text{ kg / m}^3$  for flomskred).

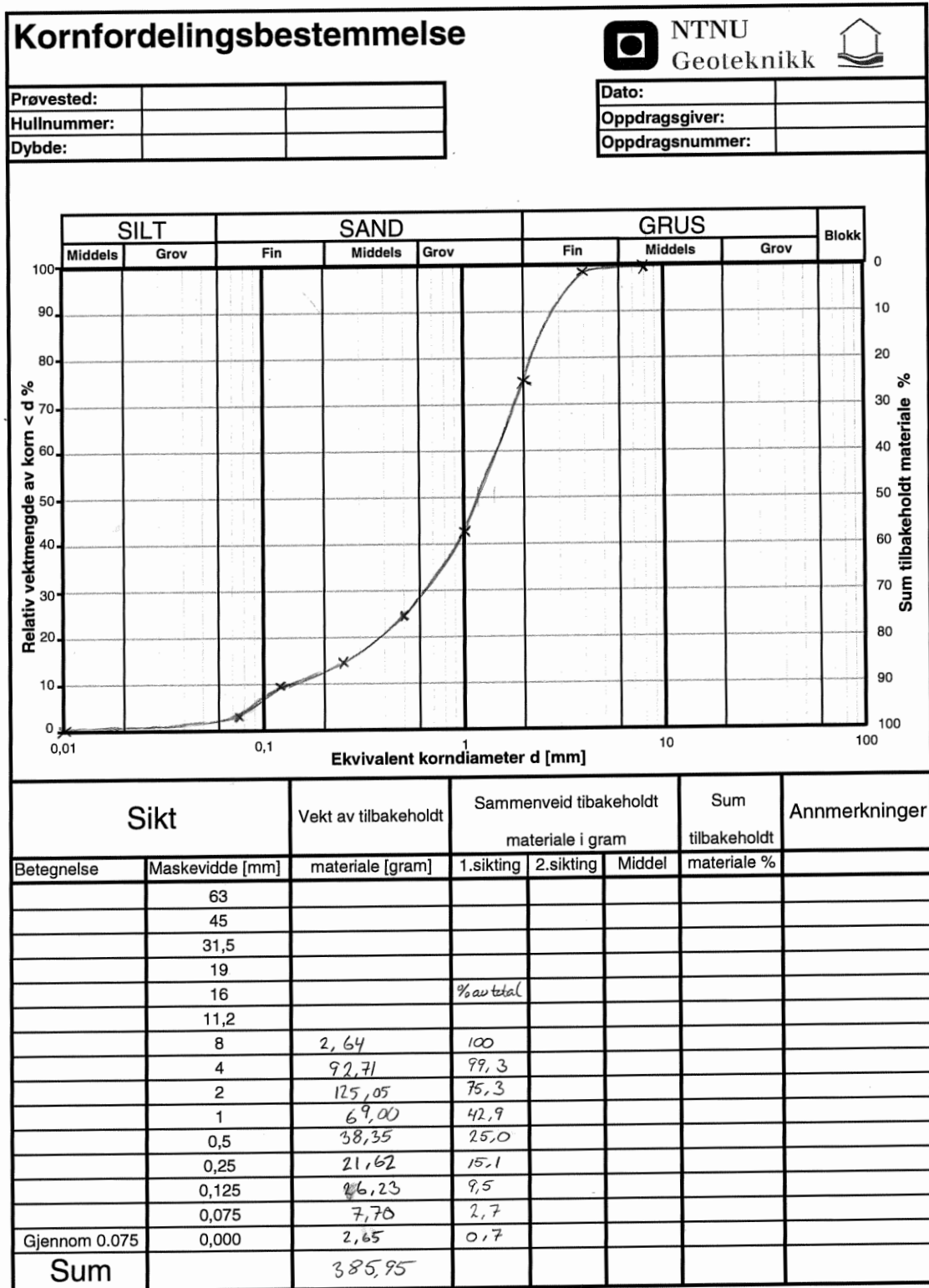
Tyngdeakselerasjon,  $g = 9,81 \text{ m / s}^2$

**Tabell B.1: Utregning av dynamisk viskositet med varierende parametre.**

$\rho \text{ [kg / m}^3\text{]}$	$g \text{ [m / s}^2\text{]}$	$h \text{ [m]}$	$v_{term} \text{ [m / s]}$	$\varphi \text{ [}^\circ\text{]}$	$\mu \text{ [-]}$	$\tau \text{ [Ns / m}^2\text{]}$
2000	9,81	2	5	13,8	0,007	<b>3634</b>
2000	9,81	2	10	13,8	0,007	<b>1819</b>
2000	9,81	2	5	13,8	0,15	<b>1458</b>
2000	9,81	1	5	13,8	0,007	<b>908</b>
2000	9,81	2	10	13,8	0,15	<b>729</b>
2000	9,81	1	10	13,8	0,007	<b>455</b>
2000	9,81	1	5	13,8	0,15	<b>364</b>
2000	9,81	1	10	13,8	0,15	<b>182</b>

Dette gir en variasjon i dynamisk viskositet mellom 182 - 3634 Ns / m<sup>2</sup>.

Vedlegg C - Kornfordelingsskjema



**Vedlegg D - Sammenheng mellom nummerering av forsøk og navngiving av kamera under prosjekt og master**

**Tabell D.1: Sammenheng mellom nummerering av forsøk under prosjekt og master.**

<b>Nummerering – master</b>	<b>Nummerering - prosjekt</b>
S1K(0)	Skred 02
S2K(0)	Skred 12
S3K(0)	Skred 13
S1K(1,2)	Skred 03
S2K(1,2)	Skred 05
S3K(1,2)	Skred 06
S1K(2,4)	Skred 08
S2K(2,4)	Skred 09
S3K(2,4)	Skred 10
S4K(2,4)	Skred 11

Kamera 1 = Kamera H1

Kamera 2 = Kamera V1

Kamera 3 = Kamera V3

## Vedlegg E - Observasjon fra kassen

Tabell E.1: Tid masse bruker på å forlate kassen og hvor mye som er igjen for forsøk uten voll og med fang- og ledevoll.

Skred	Kommentarer til utløp fra kasse		
<b>Generelt</b>	<p>Kassen er vinklet 30 °. Dør dras opp og holdes oppe under skred. Massene ligger litt oppover mot døren når skred slippes og dette gir et lite vanntrykk bak.</p> <p>Når luken åpnes kan en se en vegg av masser som kollapser. I front er det «fryste» masser og deretter en mer vannrik suspensjon. Massene strømmer ut av kassen i løpet av noen sekunder. Fronten er grovkornet og bak kommer en mer vannholdig suspensjon. I etterkant ligger det varierende mengde masser igjen i kassen. Avvik fra denne oppførselen kommenteres.</p>		
	Masse forlater kasse [s]	Masse igjen i kasse [kg]	Kommentar
<b>S1(-)</b>	5,6	2,5	
<b>S2(-)</b>	4,0	3,1	Noe masser kom sent ut av kassen.
<b>S3(-)</b>	5,5	1,3	
<b>S1TV(90)H(90)</b>	3,9	1,9	
<b>S2TV(90)H(90)</b>	6,2	4,4	
<b>S3TV(90)H(90)</b>	5,2	3,5	
<b>S1TV(90)H(72)</b>	3,6	1,1	
<b>S2TV(90)H(72)</b>	3,4	1,0	
<b>S3TV(90)H(72)</b>	3,2	0,9	
<b>S1TV(90)H(34)</b>	2,6	0,8	
<b>S2TV(90)H(34)</b>	4,0	1,1	
<b>S3TV(90)H(34)</b>	6,6	5,0	
<b>S1TV(40)H(90)</b>	6,7	5,2	Kom en klump ut av kassen til slutt, ca. 3 kg.
<b>S2TV(40)H(90)</b>	8,7	5,9	
<b>S3TV(40)H(90)</b>	6,5	6,6	
<b>S1TV(40)H(72)</b>	4,1	3,4	
<b>S2TV(40)H(72)</b>	3,7	1,9	Noe masser gikk sent ut av kassen.
<b>S3TV(40)H(72)</b>	4,8	4,0 (ca. 8)	Ca. 8 kg gikk ut av kassen helt til slutt og er tatt med i tiden massen bruker på å forlate kassen, deretter skled enda ca. 4 kg ut, men de er ikke tatt med i den tiden siden de ikke bidro til skredet.
<b>S1TV(40)H(34)</b>	3,0	1,2	
<b>S2TV(40)H(34)</b>	3,8	1,0	
<b>S3TV(40)H(34)</b>	3,2	1,5	

<b>Skred</b>	<b>Masse forlater kasse [s]</b>	<b>Masse igjen i kasse [kg]</b>	<b>Kommentar</b>
<b>S1TV(20)H(90)</b>	4,0	2,9	
<b>S2TV(20)H(90)</b>	6,6	4,2	Ca. 5 kg masse skled ut etter at skredet var ferdig og bidro dermed ikke til verken skred eller masse igjen i kasse.
<b>S3TV(20)H(90)</b>	3,9	3,0	Dør ble ikke holdt oppe grunnet at tauet løsnet, men var ikke i veien for skredet.
<b>S1TV(20)H(72)</b>	3,2	1,1	
<b>S2TV(20)H(72)</b>	4,5	1,2	
<b>S3TV(20)H(72)</b>	2,5	0,8	
<b>S1TV(20)H(34)</b>	3,4	1,5	
<b>S2TV(20)H(34)</b>	3,6	1,0	
<b>S3TV(20)H(34)</b>	3,5	0,7	En del masser kom sent ut av kassen.

## **Vedlegg F - Gjennomsnittshastighet og utløpslengde**

Tabell F.1: Utløpslengde og fronthastighet med tilhørende gjennomsnitt og standardavvik for skred med varierende kanallengde gjennom hele skredbanen. .... h

Tabell F.2: Utløpslengde for skred med varierende kanallengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik. .... i

Tabell F.3: Utløpslengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik og fronthastighet skredbanen for forsøk uten voll og med fangvoll. .... j

Tabell F.4: Utløpslengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik og fronthastighet i skredbanen for forsøk med ledevoll med treffvinkel  $40^\circ$ . .... k

Tabell F.5: Utløpslengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik og fronthastighet i skredbanen for forsøk med ledevoll med treffvinkel  $20^\circ$ . .... l

Tabell F.1: Utløpslengde og fronthastighet med tilhørende gjennomsnitt og standardavvik for skred med varierende kanallengde gjennom hele skredbanen.

Tiltak Sidevoll	Utløps- lengde [cm]	Fronthastighet, v [m / s]							
		x = - 102 [cm]	x = - 58 [cm]	x = - 19 [cm]	x = 10 [cm]	x = 110 [cm]	x = 130 [cm]	x = 150 [cm]	x = 250 [cm]
<b>S1K(0)</b>	180	2,31	2,61	2,40	2,07	0,67	-	-	-
<b>S2K(0)</b>	241	2,73	2,14	2,31	1,76	1,20	-	-	-
<b>S3K(0)</b>	220	2,31	2,50	2,07	2,07	1,50	-	-	-
<b>S1K(1,2)</b>	260	2,14	1,67	2,07	1,71	-	0,5	-	-
<b>S2K(1,2)</b>	245	2,00	2,31	2,00	1,88	-	0,86	-	-
<b>S3K(1,2)</b>	240	2,31	1,67	1,88	1,76	-	0,86	-	-
<b>S1K(2,4)</b>	347	2,31	2,50	2,00	1,94	-	-	0,60	1
<b>S2K(2,4)</b>	206	2,50	2,31	2,22	2,00	-	-	0,86	-
<b>S3K(2,4)</b>	340	3,00	1,88	2,07	2,00	-	-	1,2	1,5
<b>S4K(2,4)</b>	239	2,50	3,00	2,73	2,14	-	-	1,2	-
<b>Gjennom- snitt</b>	-	2,41	2,26	2,18	1,93	1,12	0,74	0,97	1,25
<b>Standard- avvik [100 %]</b>	-	0,27	0,41	0,24	0,14	0,34	0,17	0,25	0,25



**Tabell F.2: Utløpslengde for forsøk med varierende kanallengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik.**

<b>Skred Sidevoll</b>	<b>Utløpslengde [cm]</b>	<b>Gjennomsnitt</b>	<b>Standardavvik [100 %]</b>
<b>S1K(0)</b>	180	214	25
<b>S2K(0)</b>	241		
<b>S3K(0)</b>	220		
<b>S1K(1,2)</b>	260	248	9
<b>S2K(1,2)</b>	245		
<b>S3K(1,2)</b>	240		
<b>S1K(2,4)</b>	347	283	62
<b>S2K(2,4)</b>	206		
<b>S3K(2,4)</b>	340		
<b>S4K(2,4)</b>	239		

Tabell F.3: Utløpslengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik og fronthastighet i skredbanen for forsøk uten voll og med fangvoll.

Skred	Utløpslengde [cm]	Gjennomsnittlig utløpslengde [cm]   Standardavvik [100 %]	Fronthastighet i løpsretning, v [m / s]					
			Nedre renne x = - 97 cm]	Nedre renne x = - 58 cm]	Nedre renne x = - 19 cm]	Rutebord x = 10 [cm]	Rutebord x = 20 cm]	Rutebord x = 110 cm]
<b>S1(-)</b>	235	229   12	2,86	3,00	2,4	2,07	-	1,50
<b>S2(-)</b>	240		2,07	2,22	2,31	2,14	-	1,50
<b>S3(-)</b>	212		1,88	1,94	2,07	1,94	-	1,20
<b>S1TV(90)H(90)</b>	-	-	2,14	2,31	2,40	2,73	2,52	-
<b>S2TV(90)H(90)</b>	-		2,61	2,40	2,07	2,07	2,00	-
<b>S3TV(90)H(90)</b>	-		2,00	2,22	2,07	2,50	2,16	-
<b>S1TV(90)H(72)</b>	-	-	2,14	2,40	2,31	2,31	2,28	-
<b>S2TV(90)H(72)</b>	-		2,07	2,14	2,40	2,40	2,28	-
<b>S3TV(90)H(72)</b>	-		2,14	2,61	2,50	2,61	2,08	-
<b>S1TV(90)H(34)</b>	-	-	1,82	2,14	2,50	2,73	2,40	-
<b>S2TV(90)H(34)</b>	-		1,81	1,74	1,84	1,67	1,92	-
<b>S3TV(90)H(34)</b>	-		1,84	1,93	1,93	1,81	2,08	-

1.

Tabell F.4: Utløpslengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik og fronthastighet i skredbanen for forsøk med ledevoll med treffvinkel 40 °.

Tiltak	Utløpslengde [cm]	Gjennomsnittlig utløpslengde [cm]   Standardavvik [100 %]	Fronthastighet i løpsretning, v [m/s]					
			Nedre renne x = - 97 [cm]	Nedre renne v= - 58 [cm]	Nedre renne v= - 19 [cm]	Rutebord x = 10 [cm]	Rutebord x = 50 [cm]	Rutebord x = 110 [cm]
<b>S1TV(40)H(90)</b>	233	233   -	1,76	1,76	1,94	2,00	1,44	1,25
<b>S2TV(40)H(90)</b>	-		2,00	2,07	2,73	2,73	2,28	1,88
<b>S3TV(40)H(90)</b>	-		2,00	2,07	2,07	2,31	-	1,57
<b>S1TV(40)H(72)</b>	-	282   -	2,50	3,00	2,61	2,50	1,74	1,04
<b>S2TV(40)H(72)</b>	282		1,82	2,00	2,00	1,94	2,17	1,04
<b>S3TV(40)H(72)</b>	-		2,14	2,07	2,14	2,14	2,17	1,25
<b>S1TV(40)H(34)</b>	-	-	2,40	2,40	2,07	2,86	1,56	1,35
<b>S2TV(40)H(34)</b>	-		2,14	2,31	2,14	2,22	1,84	1,25
<b>S3TV(40)H(34)</b>	-		2,40	2,86	2,31	2,50	1,56	1,08

K

Tabell F.5: Utløpslengde med gjennomsnitt og tilhørende standardavvik og fronthastighet i skredbanen for forsøk med ledevoll med treffvinkel 20 °.

Tiltak	Utløpslengde [cm]	Gjennomsnittlig utløpslengde [cm]   Standardavvik [100 %]	Fronthastighet i løpsretning, v [m/s]					
			Nedre renne x = - 97 [cm]	Nedre renne x = - 58 [cm]	Nedre renne x = - 19 [cm]	Rutebord x = 10 [cm]	Rutebord x = 50 [cm]	Rutebord x = 110 [cm]
<b>S1TV(20)H(90)</b>	247	290   32	2,03	2,13	1,93	1,93	1,68	1,60
<b>S2TV(20)H(90)</b>	301		2,90	2,13	2,90	2,90	2,52	2,52
<b>S3TV(20)H(90)</b>	323		1,93	1,93	2,22	1,93	2,28	2,52
<b>S1TV(20)H(72)</b>	295	313   14	2,07	2,86	2,5	2,61	2,76	2,30
<b>S2TV(20)H(72)</b>	317		3,53	2,73	2,50	2,22	-	1,32
<b>S3TV(20)H(72)</b>	328		2,22	2,86	2,86	2,73	1,68	2,30
<b>S1TV(20)H(34)</b>	328	311   13	2,31	2,50	2,40	2,14	2,40	2,82
<b>S2TV(20)H(34)</b>	307		2,00	2,07	2,00	1,94	2,40	1,68
<b>S3TV(20)H(34)</b>	298		2,31	2,50	2,31	2,40	1,70	2,30

## **Vedlegg G - Oppskyllingshøyde og gjennomsnittshastighet ved / langs voll**

Tabell G.1: Oppskyllingshøyde og tilhørende fronthastighet ved voll for forsøk med fangvoll.

..... n

Tabell G.2: Oppskyllingshøyde og høyde på gjenliggende masser for forsøk med ledevoll. .. o

**Tabell G.1: Oppskyllingshøyde og høyde på gjenliggende masser og tilhørende fronthastighet ved voll for forsøk med fangvoll.**

Skred  Fangvoll	Oppskyllingshøyde, $\Delta H$ [cm]		Gjennomsnittlig fronthastighet i løpsretning [m/s],  $v$ $x = 20 \text{ cm}$	Kommentar
	Maksimal	I etterkant		
<b>S1TV(90)H(90)</b>	46	10	2,52	Vannrik suspensjon i front, stor sprut.
<b>S2TV(90)H(90)</b>	23	10	2,00	Vannrik suspensjon i front til høyre og «fryste» masser til venstre.
<b>S3TV(90)H(90)</b>	18	11	2,16	Vannrik suspensjon i front til høyre og «fryste» masser til venstre.
<b>S1TV(90)H(72)</b>	27	12	2,28	«Fryste» masser i front.
<b>S2TV(90)H(72)</b>	33	10	2,28	Vannrik suspensjon i front, stor sprut.
<b>S3TV(90)H(72)</b>	22	10	2,08	Vannrik suspensjon i front med noe «fryste» masser til høyre.
<b>S1TV(90)H(34)</b>	25	10	2,40	Vannrik avstikker til venstre og noe «fryste» masser til høyre.
<b>S2TV(90)H(34)</b>	24	11	1,92	Vannrik suspensjon i front på venstre side og noe «fryste» masser til høyre for midten.
<b>S3TV(90)H(34)</b>	30	8	2,08	Vannrik suspensjon i front på høyre side og «fryste» masser til venstre.

**Tabell G.2: Oppskyllingshøyde og høyde på gjenliggende masser for forsøk med ledevoll.**

Skred Ledevoll	Oppskyllingshøyde, $\Delta H$ [cm]	
	Maksimal	I etterkant
<b>S1TV(40)H(90)</b>	12	7
<b>S2TV(40)H(90)</b>	16	7
<b>S3TV(40)H(90)</b>	14	7
<b>S1TV(40)H(72)</b>	15	7
<b>S2TV(40)H(72)</b>	14	8
<b>S3TV(40)H(72)</b>	11	8
<b>S1TV(40)H(34)</b>	16	7
<b>S2TV(40)H(34)</b>	20	7
<b>S3TV(40)H(34)</b>	12	7
<b>S1TV(20)H(90)</b>	6	4
<b>S2TV(20)H(90)</b>	7	5
<b>S3TV(20)H(90)</b>	8	6
<b>S1TV(20)H(72)</b>	9	6
<b>S2TV(20)H(72)</b>	10	10
<b>S3TV(20)H(72)</b>	9	5
<b>S1TV(20)H(34)</b>	8	4
<b>S2TV(20)H(34)</b>	8	4
<b>S3TV(20)H(34)</b>	7	7

## Vedlegg H - Form på skredfront i nedre renne

Tabell H.1: Form på skredfront i nedre renne.

Tiltak	Skredfronten i nedre renne (rundt x = - 50 cm)			
	Høyre side fremst	Midten fremst	Venstre side fremst	Venstre og høyre side like langt fremme
<b>Variierende kanallengde</b>	6	-	2	2
<b>Uten voll og med fang- og ledevoll</b>	14	9	5	2



## Vedlegg I - Treffpunkt mellom skredfront og ledevoll

Tabell I.1: Treffpunkt mellom skredfront og ledevoll.

Skred Fangvoll	Treffpunkt mellom skredfront og ledevoll, (x, y) [cm]
S1TV(40)H(90)	(30, - 30)
S2TV(40)H(90)	(35, - 28)
S3TV(40)H(90)	(30, - 30)
S1TV(40)H(72)	(40, - 28)
S2TV(40)H(72)	(30, - 30)
S3TV(40)H(72)	(30, - 30)
S1TV(40)H(34)	(40, - 28)
S2TV(40)H(34)	(30, - 30)
S3TV(40)H(34)	(30, - 30)
S1TV(20)H(90)	(40, - 27)
S2TV(20)H(90)	(40, - 27)
S3TV(20)H(90)	(30, - 30)
S1TV(20)H(72)	(40, - 27)
S2TV(20)H(72)	(60, -17)
S3TV(20)H(72)	(40, - 27)
S1TV(20)H(34)	(30, - 30)
S2TV(20)H(34)	(40, - 27)
S3TV(20)H(34)	(30, - 30)

## Vedlegg J - Helning på energilinje i utløpsområdet

Tabell J.1: Oversikt over helningen på energilinjen i utløpsområdet for forsøkene med varierende kanallengde, uten voll og med ledevoll, treffvinkel 40 ° og 20 °.

Tiltak	Gjennomsnittlig helning på energilinjen i utløpsområdet		Standardavvik	
	Fra området der energilinjen har en jevn helning	Fra x = 0,1 m	Fra området der energilinjen har en jevn helning	Fra x = 0,1 m
<b>Kanallengde 0 m</b>	0,08	0,08	0,21	0,02
<b>Kanallengde 1,2 m</b>	0,06	0,06	0,20	0,01
<b>Kanallengde 2,4 m</b>	0,07	0,07	0,26	0,01
<b>Uten voll</b>	0,12	0,13	0,01	0,01
<b>Ledevoll, TV(40) og H (90, 72, 34)</b>	0,38 (1 skred)	0,22 (et skred)	-	-
	0,24 (1 skred)	0,19 (et skred)	-	-
	-	-	-	-
<b>Ledevoll, TV(20) og H (90, 72, 34)</b>	0,18	0,12	0,03	0,03
	0,15	0,14	0,04	0,02
	0,18	0,11	0,03	0,02

## Vedlegg K - Mannings formel, flomskredforsøk

$$v = M \times R^{2/3} \times \sqrt{I} \text{ [m / s]}$$

$$M = 11,2 - 11,5 \text{ [m}^{1/3} \text{ / s]}.$$

Modellen er omtrent i målestokk 1 : 20.

### Variierende kanallengde:

	Modell	Natur
Gjennomsnittlig flyte høyde for de registrerte skredene, $R = h$	- 0,027 m	=> 0,54 m
Helning på energilinjen i nedre renne, $I (x = [-1,1, 0,2])$	- 0,29	
<u><math>v = 4,00 - 4,11 \text{ m / s}</math></u>		

### Uten voll og med fang- og ledevoll:

	Modell	Natur
Gjennomsnittlig flyte høyde for de registrerte skredene, $R = h$	- 0,035 m	=> 0,70 m
Helning på energilinjen i nedre renne, $I (x = [-1,1, 0,2])$	- 0,13	
<u><math>v = 3,18 - 3,27 \text{ m / s}</math></u>		