

Student Ingerid Ane Spørck  
Modellforsøk for ulik bruk  
av ledevoller og  
bruåpninger i forbindelse  
med bru over skredløp

Trondheim, 29.mai, 2013

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel: Modellforsøk for ulik bruk av ledevoller og bruåpninger i forbindelse med bru over skredløp	Dato: 03.06.2013		
	Antall sider (inkl. bilag): 84		
	Masteroppgave	Prosjektoppgave	X
Navn: Stud. techn. Ingerid Ane Spørck			
Faglærer/veileder: Inge Hoff , Institutt for bygg, anlegg og transport			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Harald Norem, Geoteknikk- og skredseksjonen, Statens Vegvesen ved Vegdirektoratet			

<p>Ekstrakt:</p> <p>Når en benytter bru som sikringstiltak mot snøskred der snømasser skal føres under brua må en dimensjonere ledevoller i forkant av brua på en slik måte at skredmassene føres under brua og ikke skylles opp over brukanten og opp på vegbanen. Det er i denne oppgaven undersøkt tilbakeskylling og oppskylling av skredmasser på ledevoller da dette kan være medvirkende faktorer til at skred går opp og over brukanten i stedet for å bli ledet gjennom lysåpningen under brua.</p> <p>Det ble i denne prosjektoppgaven gjort modellforsøk ved ulik bruk av vinkler på ledevoller og lengde på lysåpning under bru ved utløsning av masser som skal etterligne tørrsnø. Forsøkene ble utført med ledevoller med vinkel på <math>10^\circ</math> , <math>20^\circ</math> og <math>30^\circ</math> . Lengden av lysåpning under bru ble satt til 4 cm, 8 cm og 12 cm. Masser av typen Ballotini ble benyttet som skredmasse. Det ble sendt tre kg Ballotini ned en modell av et skredområde i skala 1:100. Bevegelsene til massene ble registrert ved bruk av videokamera og dataene ble videre hentet ut fra filmene fra forsøkene og brukt som beregningsgrunnlag for videre analyser. Det ble også gjort forsøk med bru uten bruk av ledevoller og forsøk med dubling av skredmasser.</p> <p>Forsøkene gir en indikator på hvilke vinkler på ledevoller og lengder på lysåpninger under bru en bør benytte for å få minst mulig oppskylling på ledevoller, kortest tilbakeskylling av skred og lavest mulig høyde på skredmasser i forkant av bru etter skredsituasjonen er over.</p> <p>De viktigste funnene fra forsøkene er:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ved liten vinkel på ledevoll vil høyden av gjenliggende masser etter endt skredsituasjon være mindre enn ved bruk av ledevoller med stor vinkel.</li><li>• Tilbakeskyllingen øker i lengde og høyde ved bruk av ledevoller med store vinkler.</li><li>• Liten lysåpning under bru fører til større oppskyllingshøyder og større lengde på tilbakeskyllingsbølgen.</li><li>• Avstand mellom bølgetopp og bølgefront på tilbakeslagsbølge øker etter hvert som bredden av åpningen under bru minker</li><li>• Når det ikke benyttes ledevoller vil oppskyllingshøyden være høyere ved bruåpning på 8cm og 12 cm enn ved bruk av ledevoller.</li></ul>
---

Stikkord:

1. Snøskred
2. Sikringstiltak
3. Ledevoll
4. Tørrsnøskred



Faggruppe: Veg og transport

Postadresse  
Høgskoleringen 7A  
7491 Trondheim  
Telefon 73 59 46 40  
Telefax 73 59 70 21

## FORDYPNINGSPROSJEKTOPPGAVE

VÅREN 2013

for

Stud techn. Ingerid Ane Spørck

### Modellforsøk for ulike bruk av ledevoller og bruåpninger i forbindelse med bru over skredløp

#### Bakgrunn

I løpet av de siste 30 årene har Statens Vegvesen sikret skredutsatte vegstrekninger med ulike typer tiltak. Erfaringen med bruken av disse tiltakene er variable. Mange av dagens tiltak er feildimensjonerte og har akutt behov for reparasjon og vedlikehold da de har blitt skadet på grunn av skred.

I mange av skredtilfellene de siste årene har det ikke vært mulig å oppnå en tilfredsstillende sikringseffekt mot skred med den kunnskapen og de metodene en bruker i dag.

For at en skal kunne bruke bru som sikringstiltak må en bygge brua slik at det ikke er fare for at massene skal samles opp under brua. Når det har gått et skred og masser har stanset opp under brua vil skredmasser som utløses senere «klatre» på de gjenliggende massene og skredet vil kunne gå over brua i stedet for igjennom lysåpningen. Det er derfor et behov for økt kunnskap om tilbakeslagsbølger og oppskyllingshøyder ved bruk av ledevoller i forbindelse med snøskred da dette er medvirkende faktorer til at skred stanser opp på uønskede plasseringer.

#### Oppgaven

Denne oppgaven går ut på å gjennomføre modellforsøk med simulert snøskred for å undersøke endringer i tilbakeslagsbølger og oppskyllingshøyder ved ulike bruk av ledevoller og lysåpning på bru over skredløp. Formålet med forsøkene er å studere vinkler på ledevoller og størrelse på lysåpning under bru.

Sentrale punkter i denne oppgaven er:

- Gjennomgang og vurdering av tilgjengelig litteratur
- Utarbeide et forsøksprogram

- Gjennomføre og tolke forsøkene
- Undersøke under hvilke forhold tilbakeslagsbølger oppstår og hvordan oppskylling av skred påvirkes av lysåpning og vinkler på ledevoller

## Generelt

Ovenstående tekst er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil, om nødvendig, kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Evt. justeringer må skje i samråd med veileder og faglærer ved instituttet.

Normert arbeidsbelastning for prosjektoppgaven er 7,5 studiepoeng som tilsvarer 12 ukebelastningstimer, dvs tilsvarende ca. 192 arbeidstimer pr student.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundigheten i bearbeidningen, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal ha sammendrag, innholdsfortegnelse (med fortegnelse over evt. vedlegg og bilag) og komplett paginering. Alt kildemateriale som ikke er av generell karakter, skal angis slik at man uten problemer kan finne tilbake til kilden. Dette gjelder også opplysninger og informasjon som er gitt muntlig.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og hovedoppgave ved Institutt for bygg- og anleggsteknikk». Dette er retningslinjer for det gamle BA-instituttet, men de gjelder også for Institutt for bygg, anlegg og transport.

(<http://www.ivt.ntnu.no/bat/undervisning/rapportveiledning.pdf>)

Instituttet vil ha full rett til å bruke resultatene av arbeidet, som om det var utført av en ansatt under den ordinære arbeidsbelastning. Bruk av resultatene til publisering etc. kan bare skje i samarbeid med og etter avtale med faglærer og student (og eventuelt ekstern samarbeidspartner).

### **Innleveringsfrist:**

Oppgavebesvarelsen i original (uinnbundet) samt to kopier skal leveres til instituttet innen

**Fredag 7. juni 2013 kl 1500.**

I tillegg skal en elektronisk versjon av oppgavebesvarelsen leveres/sendes til faglæreren.

**Veileder:** Harald Norem (Statens vegvesen) og Inge Hoff (NTNU)

**Ekstern kontakt:** N/A

Institutt for bygg, anlegg og transport

Dato: 15. februar 2013

Rev. 28. mai 2013



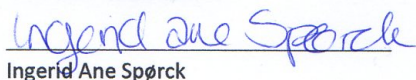
Inge Hoff  
(sign)

# Forord

Denne prosjektoppgaven er utført ved institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU ved fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi. Oppgaven gir 7,5 studiepoeng, og er gitt av Harald Norem i Statens Vegvesen ved Vegdirektoratet.

Gjennom denne oppgaven har jeg fått verdifull hjelp og god veiledning fra min veileder på NTNU, Professor Inge Hoff. Min veileder hos Statens Vegvesen, Harald Norem, har vært en stor drivkraft i prosjektet da han har bidratt med god kompetanse om emnet. I tillegg har jeg fått god hjelp av Gunne Håland ved Statens vegvesen med nyttige innspill underveis. Jeg retter også en stor takk til Jan Erik Molde ved vegteknisk laboratorium på NTNU som har finpusset og bygget videre på modellen som ble benyttet i forsøkene. Jeg vil også takke Helge Johan Fjellanger Fosse ved institutt for datateknikk og informasjonsvitenskap ved NTNU for god teknisk hjelp med avlesning av data fra videofilmene fra forsøkene.

Trondheim 01.06.2013



Ingerid Ane Spørck



# Sammendrag

I løpet av de siste 30 årene har Statens Vegvesen sikret skredutsatte vegstrekninger med ulike typer tiltak. Ulike skredtyper krever ulike typer tiltak. Snøskred deles inn i to hovedgrupperinger; løssnøskred og flakskred. Disse skredtypene deles inn i undergrupperinger etter glideflatens plassering, utløsningsfaktor, grad av fuktighet og bevegelsesmåte. Det er i denne oppgaven sett på skred av typen løssnøskred med tørre skredmasser.

Erfaringer med bruk av sikringstiltak mot snøskred er variable og mange av dagens tiltak har et sterkt behov for vedlikehold og reparasjon. Tiltakene har blitt skadet da de ikke har blitt dimensjonert riktig i forhold til krefter og bevegelser i skredene.

Det finnes flere typer sikringstiltak en kan benytte ved sikring av samferdselsanlegg mot skredmasser. Disse tiltakene kan blant annet være ledevoller, bru over skredløp, fangvoller og bremsekjegler.

Når en benytter bru som sikringstiltak der snømasser skal føres under brua må en dimensjonere ledevoller i forkant av brua på en slik måte at skredmassene føres under brua og ikke skylls opp over brukanten og opp på vegbanen.

Det er i denne oppgaven undersøkt tilbakeskylling og oppskylling av skredmasser på ledevoller da dette kan være medvirkende faktorer til at skred går opp og over brukanten i stedet for å bli ledet gjennom lysåpningen under brua.

Det er noe mangelfull kunnskap om hvordan en bør plassere ledevoller og hvilken størrelse en bør ha på lysåpning under bru for at skredmasser ikke skal stanse i forkant av brua.

Det ble i denne prosjektoppgaven gjort modellforsøk ved ulik bruk av vinkler på ledevoller og lengde på lysåpning under bru ved utløsning av masser som skal etterligne tørrsnø. Masser av typen Ballotini ble benyttet som skredmasse. Det ble sendt tre kg Ballotini ned en modell av et skredområde i skala 1:100. Bevegelsene til massene ble registrert ved bruk av videokamera og dataene ble videre hentet ut fra filmene fra forsøkene og brukt som beregningsgrunnlag for videre analyser. Det ble også gjort forsøk med bru uten bruk av ledevoller og forsøk med doubling av skredmasser.

Forsøkene ble utført med ledevoller med vinkel på  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  og  $30^\circ$ . Lengden av lysåpning under bru ble satt til 4 cm, 8 cm og 12 cm.

Forsøkene gir en indikator på hvilke vinkler på ledevoller og lengder på lysåpninger under bru en bør benytte for å få minst mulig oppskylling på ledevoller, kortest tilbakekylling av skred og lavest mulig høyde på skredmasser i forkant av bru etter skredsituasjonen er over.

De viktigste funnene fra forsøkene er listet opp under:

- Ved liten vinkel på ledevoll vil høyden av gjenliggende masser etter endt skredsituasjon være mindre enn ved bruk av ledevoller med stor vinkel.
- Tilbakeskyllingen øker i lengde og høyde ved bruk av ledevoller med store vinkler.
- Liten lysåpning under bru fører til større oppskyllingshøyder og større lengde på tilbakeskyllingsbølgen.
- Avstand mellom bølgetopp og bølgefront på tilbakeslagsbølge øker etter hvert som bredden av åpningen under bru minker
- Når det ikke benyttes ledevoller vil oppskyllingshøyden være høyere ved bruåpning på 8cm og 12 cm enn ved bruk av ledevoller.
- Ved bruåpning med bredde på 4 cm vil oppskyllingshøyden være større når det ikke er benyttet ledevoller enn når det er benyttet ledevoll med vinkel på  $10^\circ$ .
- Når det ikke er benyttet ledevoller vil høyeste oppskylling oppstå tidligere enn ved bruk av ledevoller.
- For alle forsøk der det ikke er benyttet ledevoll vil det oppstå tilbakeskylling.



# Abstract

During the last 30 years, the Norwegian Public Roads Administration have secured stretches of road that are exposed to snow avalanches with different types of measures. There are various kinds of avalanches and they all require unique kinds of actions. Snow avalanches are separated into two types of main categories; avalanches with loose materials and flaked avalanches. These main categories are separated into under groups based on the location of the sliding surface, the triggering factor, the level of humidity and the manner of its movements. In this project, there has been focus on dry avalanches with loose materials.

Experiences with use of safety measures against avalanches are variable and many of the measures have a strong need for maintenance and repairing. The means have been damaged because they are not dimensioned correct in relation to the movements and the forces in the avalanches.

There exists several types of safety measures for securing infrastructure against avalanches. These measures are among others; leading meadows, bridge over avalanche trails, meadows for collecting snow loads and braking cones.

When you build bridges over avalanche trails, it is important to construct leading meadows on the upper side of the bridge so that the avalanche is lead under the bridge and that the snow masses do not crawl up and over the bridge and further on to the road.

In this project, there has been focus on reflection waves and up-flushing of snow on leading meadows because this may be a contributing factor to avalanches flowing over the bridge instead of going under the bridge and through the free span.

There are some lack of knowledge on placement of leading meadows and the size of the free span under the bridge so that avalanches do not stop in front of the bridge.

This project includes model experiments with use of different angles on the leading meadows and different length on the opening under the bridge with experiment masses that shall emulate dry snow. Ballotini was used as experiment mass. The masses had a weight of 3 kg, and it was sent down a model resembling an avalanche area with the scale of 1:100. The movements was recorded with a camera, and the data was collected from the tapes for further analysis.

The experiments were conducted with leading meadows with angles of  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  and  $30^\circ$ . The opening under the bridge was 4 cm, 8 cm and 12 cm. It was also conducted an experiment without the use of leading meadows, and experiments where double masses were used.

The results gave an indicator for which angles and how big the opening under the bridge should be to get less up-flushing on the leading meadows, short length on

## VIII

---

the reflection waves and small height on the masses in front of the bridge after there has been an avalanche situation.

The most important findings are listed here:

- By using a small angle on the leading meadows, the height of the masses after an avalanche situation will be smaller than with use of leading meadows with large angles.
- The reflection wave will increase in length and height with an increased angle on the leading meadows.
- A small opening under the bridge will lead to a larger height of the up-flushing wave and a longer reflection wave.
- The distance between the top and the front for the reflection wave will increase as the width of the opening under the bridge decreases.
- When leading meadows is not utilized, the up-flushing will be higher when an opening under the bridge of 8 cm and 12 cm is used.
- When a free span of 4 cm is used, there will be higher up-flushing when it has not been used leading meadows than there will be when there are used leading meadows with an angle of  $10^\circ$ .
- When leading meadows has not been used, the highest up flushing will occur earlier.
- For all experiments not using leading meadows, up-flushing will occur earlier.

# Innhold

<b>Forord</b>	<b>III</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Innhold</b>	<b>IX</b>
<b>Figurer</b>	<b>XIII</b>
<b>Tabeller</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Generelt om snøskred</b>	<b>3</b>
2.1 Klassifisering av ulike skredtyper . . . . .	3
2.2 Løssnøskred . . . . .	4
2.3 Flakskred . . . . .	4
2.4 Våtsnøskred . . . . .	5
2.5 Tørrsnøskred . . . . .	5
2.6 Sørpeskred . . . . .	5
2.7 Skredterreng . . . . .	6
2.8 Utløsningsområde . . . . .	6
2.9 Skredløp . . . . .	7
2.10 Utløpsområde . . . . .	8
2.11 Spor etter skred i terreng og vegetasjon . . . . .	8
<b>3 Sikringstiltak av veier mot snøskred</b>	<b>9</b>
3.1 Overbygg og tunneler . . . . .	9
3.2 Bru over skredløpet . . . . .	10
3.3 Terrengtiltak . . . . .	11
3.4 Ledevoll . . . . .	12
3.5 Fangvoll . . . . .	14
3.6 Bremseskjegler . . . . .	15
3.7 Bred grøft og flytting av veg . . . . .	15
<b>4 Erfaringer med bruk av ledevoller i Norge</b>	<b>19</b>
4.1 E39 Festøy-Ørsta . . . . .	21
4.2 Fv65 Festøy Standal . . . . .	23
4.3 Rv13 Dragsvik- Vetlefjorden . . . . .	24
4.4 Rv615 Hyen-Sandane . . . . .	26
4.5 Seljesvora/Jonsoksvora . . . . .	27

---

<b>5</b>	<b>Tilbakeskyllingsbølger og frysing av skred</b>	<b>29</b>
5.1	Frysing av skred . . . . .	29
5.2	Tilbakeskyllingsbølger . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Metode</b>	<b>33</b>
6.1	Valg av modell . . . . .	33
6.2	Modellen . . . . .	33
6.3	Skredet . . . . .	34
6.4	Forsøksprogrammet . . . . .	35
6.5	Måleutstyr og evaluering av data . . . . .	37
<b>7</b>	<b>Observasjoner</b>	<b>39</b>
7.1	Oppskyllingshøyde ved bruk av forskjellige lysåpninger . . . . .	39
7.2	Oppskyllingshøyder ved bruk av ulike vinkler på ledevoller . . . . .	41
7.3	Hvor og når oppstår høyeste oppskylling . . . . .	42
7.4	Tilbakeslagsbølge ved ulik bruåpning . . . . .	42
7.5	Tilbakeslagsbølge ved ulike vinkler på ledevoll . . . . .	43
7.6	Uten voller tilbakeskylling og oppskylling . . . . .	44
7.7	Forsøk med dobbel masse . . . . .	44
7.8	Skred med lavere startpunkt . . . . .	44
7.9	Høyde på masser i forkant av brukanten når skredsituasjonen er over . . . . .	44
<b>8</b>	<b>Resultat</b>	<b>45</b>
8.1	Oppskylling på ledevoll ved ulike lengder på lysåpning under bru . . . . .	45
8.2	Oppskylling på brukant i forhold til oppskylling på ledevoll . . . . .	48
8.3	Oppskylling på ledevoll ved ulike vinkler på ledevoller . . . . .	49
8.4	Hvor og når oppstår høyeste oppskylling . . . . .	51
8.5	Tilbakeslagsbølge ved ulik bruåpning og vinkel på ledevoll . . . . .	52
8.6	Bølgetopp og bølgefront for tilbakeslagsbølge . . . . .	53
8.7	Uten voller, tilbakeskylling og oppskylling . . . . .	54
8.8	Forsøk med dobbel masse . . . . .	55
8.9	Høyde på masser i forkant av brukanten når skredsituasjonen er over . . . . .	55
8.10	Sammenligning av energilinjer . . . . .	56
<b>9</b>	<b>Analyser og diskusjon</b>	<b>59</b>
9.1	Skalering av modellen . . . . .	59
9.2	Diskusjon av resultatene . . . . .	60
9.3	Sammenligning av energilinjer . . . . .	62
9.4	Etterprøvbarehet av forsøkene . . . . .	62
9.5	Feilkilder . . . . .	62
<b>10</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografi</b>	<b>69</b>

---

<b>A</b>	<b>Skisser av modellen</b>	<b>71</b>
A.1	Eksisterende modell . . . . .	71
A.2	Forsøk med lysåpning 4 cm . . . . .	72
A.3	Forsøk med lysåpning 8 cm . . . . .	73
A.4	Forsøk med lysåpning 12 cm . . . . .	74
A.5	Ledevoll- og bruveggdetaljer . . . . .	77
<b>B</b>	<b>Gjennomføring av forsøk</b>	<b>79</b>
B.1	Generellt om forsøkene . . . . .	79
B.2	Forsøkene som skal kjøres . . . . .	79
<b>C</b>	<b>Data fra forsøkene - Excel</b>	<b>81</b>
<b>D</b>	<b>Videoer</b>	<b>83</b>



# Figurer

2.1	Klassifikasjon av snøskred i løssnøskred og flaskskred, og videre inndeling i undergrupper. (Vegdirektoratet, 2011). . . . .	3
2.2	Prinsippskisse av et skredområde. (Lied, K og Kristensen, K, 2003)	7
3.1	Eksempel på skredoverbygg som også fungerer som en tunnelportal. (Vegdirektoratet, 2011). . . . .	10
3.2	Eksempel på bru bygd som sikringstiltak mot skred. (Vegdirektoratet, 2011). . . . .	11
3.3	Eksempel på ledevoll for sikring mot snøskred og sørpeskred. Vollkrona er dessverre ikke bygget med jamn stigning i øvre delen av vollen, og på dette partiet har skred gått over vollen, Sandvika, Sogn og Fjordane (Foto: Harald Norem) (Vegdirektoratet, 2011). . . . .	12
3.4	Foto av fangvoll med bratt tørrmur på begge sider, Rv 7, Indre Rotagjelet, Hordaland. (Foto: H. Norem) (Vegdirektoratet, 2011). . .	14
3.5	Skredvoll og bremsekjelder ved Neskaupstaður , Island. (Multiconsult, 2013) . . . . .	16
3.6	Når vegen flyttes mer enn 30 m fra fjellsiden har en sikret vegen mot de fleste skred av normal størrelse. (Foto: H. Norem) (Vegdirektoratet, 1993) . . . . .	16
4.1	Tilstand på sikringstiltak ved Saltrefonna i 2012 (Aas, 2012) . . . . .	21
4.2	Storegjølet Nord, mai 2012. (Aas, 2012) . . . . .	22
4.3	Storegjølet Sør-magasin og dagmagasin til stikkrenna (Aas, 2012) . .	23
4.4	Seljesvora, februar 2012 (Aas, 2012) . . . . .	24
4.5	Sandskreda, snøskred sperrer vegen (Aas, 2012) . . . . .	25
4.6	Ramsteina (Aas, 2012) . . . . .	26
4.7	Storesvora-skredmasser har fylt opp tiltaket (Aas, 2012) . . . . .	27
4.8	Seljesvora/Jonsoksvora sett fra nord (Aas, 2012) . . . . .	28
5.1	Foto av bru hvor skredet har stoppet opp under brua. White River Bridge, Oregon (Vegdirektoratet, 2012) . . . . .	29
5.2	Bygging av bru og ledemurer for å styre skredmassene under vegen, Ponte Rossa, Biasca, Sveits, Foto: Giorgio Valenti (Vegdirektoratet, 2012) . . . . .	30
5.3	Posisjon for bølgefront i forhold til skredmasser og skredretning . . .	31
5.4	Tilbakeskyllingsbølgen oppstår etter at bølgefronten har truffet en hindring, og denne bølgen er motsatt rettet av skredretningen . . . .	32

6.1	Bildet til venstre viser modellen i laboratoriet (Foto: Brateng (2005)). Bildet til høyre viser modellen i laboratoriet med påsatte ledevoller og bruvegger. Her er det lagt på dobbeltsidig tape for å etterligne friksjon i utløpsområde. Belegget er påført av Linda Brateng. (Foto: Ingerid Ane Spørck) . . . . .	34
6.2	Plassering av kameraer er vist med gul pil. Kamera til venstre er omtalt som «Webkamera på stativ», kamera til høyre er omtalt som «BAT-kamera». Bildet er tatt med kameraet omtalt som «Rødt kamera». . . . .	37
7.1	Oppskylling ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel $30^\circ$ (Oppskyllingshøyde 6,20 cm) . . . . .	40
7.2	Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på $30^\circ$ (Oppskyllingshøyde 3,10 cm) . . . . .	40
7.3	Oppskylling ved bruåpning på 12 cm og ledevollvinkel på $30^\circ$ (Oppskyllingshøyde 2,75 cm) . . . . .	40
7.4	Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på $30^\circ$ (Oppskyllingshøyde 3,10 cm) . . . . .	41
7.5	Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på $20^\circ$ (Oppskyllingshøyde 2,90 cm) . . . . .	41
7.6	Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på $10^\circ$ (Oppskyllingshøyde 2,10 cm) . . . . .	41
7.7	Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på $30^\circ$ (lengde 18 cm) . . . . .	42
7.8	Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på $30^\circ$ (lengde 11 cm) . . . . .	42
7.9	Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 12 cm og ledevollvinkel på $30^\circ$ (lengde 2 cm) . . . . .	43
7.10	Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på $30^\circ$ (lengde 18 cm) . . . . .	43
7.11	Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på $20^\circ$ (lengde 17 cm) . . . . .	43
7.12	Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på $10^\circ$ (lengde 12 cm) . . . . .	44
8.1	Oppskylling på ledevoll med $30^\circ$ og ulike lengder for lysåpning under bru. . . . .	46
8.2	Oppskylling på ledevoll med $20^\circ$ og ulike lengder for lysåpning under bru. . . . .	46
8.3	Oppskylling på ledevoll med $10^\circ$ og ulike lengder for lysåpning under bru. . . . .	47
8.4	Oppskyllingshøyde ved 4 cm bruåpning og varierende vinkel på ledevoller. . . . .	49
8.5	Oppskyllingshøyde ved 8 cm bruåpning og varierende vinkel på ledevoller. . . . .	50



8.6	Oppskyllingshøyde ved 12 cm bruåpning og varierende vinkel på ledevoller. . . . .	50
8.7	Oppskyllingshøyder uten bruk av ledevoll med ulike bruåpninger . .	54
8.8	Beregning av energilinje for skred uten bru og ledevoll. . . . .	57
A.1	Eksisterende modell, sett forfra . . . . .	71
A.2	Eksisterende modell, sett fra siden . . . . .	71
A.3	Oppsett med bru med lysåpning 0,04 m og vinkel på ledevoller er 30 grader . . . . .	72
A.4	Oppsett med bru med lysåpning 0,04 m og vinkel på ledevoller er 20 grader . . . . .	72
A.5	Oppsett med bru med lysåpning 0,04 m og vinkel på ledevoller er 10 grader . . . . .	73
A.6	Oppsett med bru med lysåpning 0,08 m og vinkel på ledevoller er 30 grader . . . . .	73
A.7	Oppsett med bru med lysåpning 0,08 m og vinkel på ledevoller er 20 grader . . . . .	74
A.8	Oppsett med bru med lysåpning 0,08 m og vinkel på ledevoller er 10 grader . . . . .	74
A.9	Oppsett med bru med lysåpning 0,12 m og vinkel på ledevoller er 30 grader . . . . .	75
A.10	Oppsett med bru med lysåpning 0,12 m og vinkel på ledevoller er 20 grader . . . . .	75
A.11	Oppsett med bru med lysåpning 0,12 m og vinkel på ledevoller er 10 grader . . . . .	76
A.12	Ledevoll venstre side . . . . .	77
A.13	Ledevoll høyre side . . . . .	77
A.14	Bruvegg og bruplate . . . . .	77



# Tabeller

4.1	Krav til sikringseffekt (Hammersland, 2001) . . . . .	19
4.2	Sikringstiltak som er vurdert i sammenheng med Pernille Aas sin masteroppgave i 2012. . . . .	20
6.1	Liste og forklaring av forsøkene . . . . .	36
8.1	Y-aksen viser høyde på oppskyllingen målt i meter. Høyden er ikke lik for de ulike diagrammene. X-aksen viser tiden målt i sekunder. Den blå linjen viser oppskyllingshøyden ved brukanten, og den orange linjen viser oppskyllingshøyden på ledevollene. Tid på alle grafer er 0,72 sekunder. Gradtallene på venstre side av tabellen angir vinkel på ledevoller. . . . .	48
8.2	Tid og sted for høyeste oppskylling . . . . .	51
8.3	Lengde på tilbakeslagsbølger . . . . .	52
8.4	Y-aksen viser høyde på oppskyllingen målt i meter. Høyden er lik for de ulike diagrammene. X-aksen viser lengden på nedre del av renna målt i meter, der bru er plassert der kurvene starter på punkt 1,82. Den blå linjen viser bølgefrontens posisjon, og den orange linjen viser bølgetoppens posisjon. Gradtallene på venstre side av tabellen angir vinkel på ledevoller. . . . .	53
8.5	Lengde og tid på tilbakeslagsbølge for forsøk uten ledevoll . . . . .	55
8.6	Sammenligning av forsøk med dobbel masse . . . . .	55
8.7	Høyde og posisjon av gjenliggende masser når skredsituasjonen er over . . . . .	56
9.1	Volum, masse og tetthet av Ballotini . . . . .	59
9.2	Skredstørrelser (NGI, 2013) . . . . .	60
9.3	Sammenstilling av alle resultater . . . . .	61
B.1	Liste og forklaring av forsøkene . . . . .	80



# 1 | Innledning

Hver eneste vinter skjer det ulykker som følge av snøskred i Norge. Særlig vegnettet er berørt. Statens Vegvesen har lenge jobbet med å sikre skreutsatte vegstrekninger med ulike typer tiltak. Mange av dagens sikringstiltak er i dårlig stand og har behov for vedlikehold og reparasjon da tiltakene har vært for dårlig dimensjonert.

Det er mangelfull kunnskap om snøskred og det har derfor vært vanskelig å bygge tiltak med en god nok sikringseffekt. Ett av tiltakene en kan benytte for å sikre veger mot snøskred er bru over skredløp. Det er da behov for å bygge ledevoller på oversiden av brua slik at skredmassene blir ført under bruåpningen. Kunnskap om terrengtiltak er mangelfull da forskningen som har vært gjort er lite systematisk.

For at en skal kunne benytte bru over skredløp som et sikringstiltak må en bygge på en slik måte at det ikke er fare for at skredmassene skal stoppe opp under brua. Dersom dette hender vil det ved neste skred som utløses være fare for at massene «klatrer» på de gjenliggende massene, og skredet vil gå over brua og vegbanen.

Det er behov for økt kunnskap om tilbakeslagsbølger og oppskyllingshøyder ved bruk av ledevoller i forbindelse med snøskred da dette er medvirkende faktorer til at skredmassene kan stanse opp på uønskede steder.

Formålet med denne oppgaven er å opparbeide et bedre grunnlag for hvordan tilbakeslagsbølger og oppskyllinger oppfører seg ved ulik bruk av tiltak. Det vil også bli sett på hvordan høyder på gjenliggende masser etter endt skredsituasjon endres i forhold til vinkler på ledevoller og lysåpning under bru.

Det er gjort modellforsøk for å finne sammenhenger mellom skredenes oppførsel og plassering og utforming av tiltak.

Første del av oppgaven tar for seg teori om snøskred. Det blir også beskrevet hva som menes med tilbakeslagsbølger, frysing av skred og oppskyllingshøyder.

Den neste delen av oppgaven tar for seg hvordan modellforsøkene skal gjennomføres og hvordan modellen er bygget opp. Det er blitt simulert snøskred for å undersøke endringer i skredmassenes oppførsel ved ulik bruk av vinkler på ledevoller og åpning under bru.

Siste del av oppgaven tar for seg resultater og observasjoner av de gjennomførte forsøkene. Her vil alle innsamlede data bli analysert og diskutert.

Vedlagt oppgaven følger alle filmer av forsøkene som er gjennomført.



## 2 | Generelt om snøskred

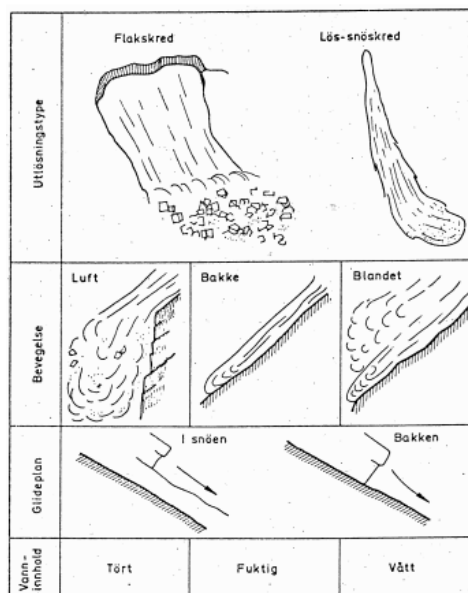
“Snøskred er en fellesbetegnelse på snø som av naturlige eller kunstige årsaker er satt i bevegelse” (Vegdirektoratet, 2011). Snøskred er delt inn i flere hovedgrupper da skred oppstår med mange variasjoner.

### 2.1 Klassifisering av ulike skredtyper

Det finnes to hovedgrupperinger av snøskred; løssnøskred og flakskred. Disse hovedtypene defineres på grunnlag av skredenes bruddform. En oversikt over skredtyper vises i figur 2.1.

Disse hovedgruppene deles igjen inn i undergrupperinger etter:

- Glideflatens plassering (om snøen glir mot snø eller mot bakken)
- Utløsningsfaktor (om skredet er naturlig eller kunstig utløst)
- Grad av fuktighet (tørt, fuktig eller vått)
- Bevegelsesmåte (tunge masser langs bakken, snøsky eller blandet skred)



Figur 2.1: Klassifikasjon av snøskred i løssnøskred og flakskred, og videre inndeling i undergrupper. (Vegdirektoratet, 2011).

## 2.2 Løssnøskred

Løssnøskred oppstår typisk rett etter kraftige snøfall når snøen er fersk og bindinger mellom krystallene i snølagene er svake. Denne typen skred kan også oppstå i sammenheng med temperaturendringer og når det skjer endringer i vanninnholdet til snødekket. Når vanninnholdet endres vil bindingene i dekket være svake og dette vil medføre at snøen lett kan bli satt i bevegelse.

Denne typen skred har en karakteristisk dråpeform. Volumet og utløpsdistansen for løssnøskred er ofte beskjedne, og fører derfor til mindre skade på natur og infrastruktur enn andre skredtyper, men ved riktige forhold kan løssnøskred ha et stort volum og skredaktiviteten kan være hyppig i perioder slik at det fører til sperrede veier.

Et løssnøskred oppstår ofte i et punkt der det oppstår lokal utglidning. Et typisk eksempel på dette er at det faller snøballer fra skavler eller trær ned på snødekket. Skredet starter ofte rett nedenfor spesielt bratt terreng.

Ettersom utglidningen utvikler seg drar snøen med seg nye snøkorn, og skredet vokser. Bredden på skredet blir større etter hvert som det beveger seg nedover i skredbanen, og det oppstår en dråpeformasjon på skredet. Etter hvert som terrenget flater seg ut vil skredet stoppe opp relativt fort. (Vegdirektoratet, 2011).

## 2.3 Flakskred

Når det oppstår et flakskred løsner snøen i store flak over et gitt areal. Et flakskred løsner langs en markert bruddkant i øvre del av skredet, og beveger seg langs et glideplan med liten ruhet. Bruddkantens høyde varierer fra 0,5m og i sjeldne tilfeller opp til 10 m. Bruddkanten er normalt noen titalls meter bred, men kan i noen tilfeller bli opptil 1-2 km bred. Snødekket inneholder ofte lag med forskjellige egenskaper på grunn av skiftninger i værforhold. Lag som er porøse på grunn av kalde perioder og tørr luft anses som de svakeste lagene da de har spesielt dårlig bæreevne.

Når det oppstår nye snølag oppå de porøse lagene vil det være en svak binding mellom det porøse og de overliggende lagene. Når de overliggende lagene blir belastet av nedbør, steinsprang, skiløpere, avsetning av foksne eller kollapsede snøskavler kan dette føre til at det kalde porøse laget går til brudd. Laget vil ofte løsne i flak på grunn av de sterke bindingene i overliggende lag. (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

Flakskred er den typen skred som tradisjonelt har gjort størst skade da disse kan bli svært store. Skredene består vanligvis av en snøskydel som består av suspenderte snøpartikler fra skredmassene og en del med skredmasser som går langs bakkenivået. I enkelte skred kan det også oppstå lag med store snøballer. Snøskydelen kan bli inntil 50 m høy, og i den bratteste delen av skredbanen vil fronten av snøskydelen



ligge 10-20 meter bak fronten av skredet. Når terrenget flater seg ut vil snøskyen nå igjen skredet og den kan ha et utløp på flere hundre meter lenger enn de andre skredmassene.

Snøskydelen vil i motsetning til resten av skredet ikke bli like styrt av terrengformasjonene, og snøskydelen og resten av skredet vil derfor ofte skille lag når terrenget endrer retning.

Massene som beveger seg lags bakken har ofte stor tetthet (100-300 kg/m<sup>3</sup>). Derksom snømassene over glidelaget har en stor fasthet vil snøflaket i liten grad gå i oppløsning, og i korte skredbaner kan flaket være tilnærmet intakt når skredet stanser opp. Volumet av flakskredene varierer fra 100- 1 000 000 m<sup>3</sup>. Tørre skred kan få en hastighet på inntil 60-70 m/s, mens store fuktige skred kan få en hastighet på over 40 m/s. (Vegdirektoratet, 2011).

Denne typen skred er dimensjonerende for beregninger av utløpsdistanser og belastninger på sikringstiltak. (Vegdirektoratet, 2011).

## 2.4 Våtsnøskred

Denne typen skred oppstår oftest i perioder der temperaturen stiger og snødekket begynner å smelte. Våtsnøskred kan oppstå både som flakskred og løssnøskred. Når temperaturen stiger vil det samle seg vann i snømassene og dette vil igjen føre til at bindingene mellom snøkrystallene blir svakere. Et tørrsnøskred kan omformes til et våtsnøskred på veg nedover fjellsiden ved skifte av klima lags skredbanen og ved at det dannes varmeenergi når skredet beveger seg nedover. (Vegdirektoratet, 2011).

## 2.5 Tørrsnøskred

For denne typen skred er temperaturen lav over en lenger periode, og tørrsnøskred dannes derfor ofte i høyere fjellområder der temperaturen er jevnt lav. Tørrsnøskred skaper mest skade, og hastigheten kan komme opp til 60 til 70 m/s. (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2011b).

## 2.6 Sørpeskred

Sørpeskred inneholder store mengder vann, og forutsetningen for utløsning av sørpeskred er at det over en tidsperiode er større tilsig enn avrenning av vann og snødekket må være 0,5 m eller tykkere. (Vegdirektoratet, 1993). Dette fører til at oppførselen til skredet er nærmere flomskred enn snøskred. Denne typen skred oppstår ved milde temperatur, ved snøsmelting og ved mye nedbør (Norges vassdrags-

og energidirektorat, 2011b). Når snødekket blir utsatt for høy fuktighet og mildt klima vil porevolumet mellom snøkornene bli fylt med fritt vann. Skredene har derfor liten bindekraft, og oppfører seg lignende flomskred. Når en skal sikre mot sørpeskred gjør en dette på samme måte som med flomskred. Sikring av flomskred er beskrevet i Statens Vegvesen sin håndbok 284 «Flomskred og sørpeskred». (Vegdirektoratet, 2011). Flomskred utløses vanligvis i helninger mellom  $5^0$  og  $25^0$ , men det har forekommet skred av denne typen i helninger som er både større og mindre. Sørpeskred kan forårsake store materielle skader, og sørpeskredene utløses der tilsiget av vann er størst, og der grunnen er lite permeabel. Disse skredene oppstår oftest i fjorddistriktene der en kan oppleve stor nedbørintensitet og store snødybder. Siden skredet inneholder store mengder vann vil skredet ikke komme til ro før det når et tilnærmet horisontalt terreng. Skredene har stor erosjonsevne og kan gjøre store skader på grunnen. (Vegdirektoratet, 1993).

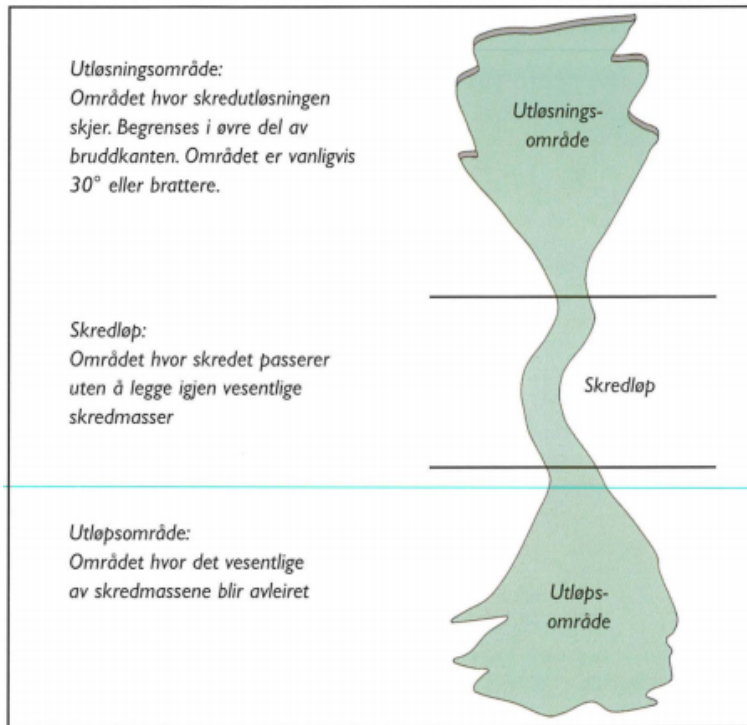
## 2.7 Skredterreng

Et skredområde deles inn i tre hoveddeler, se figur 2.2. Utløsningsområdet er det området der skredet løsner. Dette området er begrenset av det punktet som utløser skredet og den nedre delen av flaket som glir ut. Områder i en fjellside som er brattere enn  $30^0$  og som ikke er dekket av vegetasjon er mulige utløsningsområder. Skredløpet er det området der skredet passerer uten å legge igjen betydelige mengder masse. Utløpsområdet er den nederste delen av skredområdet der skredet blir bremsset opp. Her har terrenget som regel en vinkel på maksimum  $20^0$ . Det er stor variasjon i terreng der det kan gå skred. I Norge er høydeforskjellen mellom start- og stoppunkt som regel mellom 5-1500m.

Frekvenser i hvert skredområde varierer fra område til område. I noen skredområder kan det gå skred flere ganger i året, mens i andre områder kan det gå over 100 år mellom hver gang det går et skred (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

## 2.8 Utløsningsområde

Graden av skredfare avhenger mye av helningen på terrenget. Det kreves en viss minimumshelning på terrenget for at skred skal kunne utløses og fortsette bevegelsen nedover. Det finnes ingen spesifikk nedre grense på helning av terreng for at et skred skal løses ut, dette avhenger av snøforholdene og skredtypen. Som en hovedregel kan en si at alle terreng med helninger brattere enn  $30^0$  er mulige snøskredområder dersom disse områdene ikke er dekket med tett vegetasjon. Når en skal vurdere et terreng med hensyn til snøskredfare er det viktig å ta hensyn til om området er utsatt for vind og snødrift. Helninger som er lite utsatt for vind får ofte en oppsamling av fokksnø og er derfor mer utsatt for snøskred. De vanligste partiene der skred blir utløst er i større botner, åpne skåler og forsenkninger, brat-



Figur 2.2: Prinsippskisse av et skredområde. (Lied, K og Kristensen, K, 2003)

te elvegjel, svaberg og konvekse partier. Av de nevnte terrengformasjonene er det i skar og elvegjel skred oftest utløses (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

## 2.9 Skredløp

Som vist i figur 2.2 er skredløpet området imellom utløsnings- og utløpsområdet. Dette området har vanligvis en helning på 20<sup>0</sup> til 25<sup>0</sup>. De fleste skredløp følger senkninger i terrenget. Utløsningsområdet snevres ofte inn ved overgangen til skredløpet. Dersom terrenget i skredløpet deler seg i to baner vil også skredet kunne deles seg i to baner. Dette gjelder spesielt for løssnøskred. De skredene som har et skredløp som ikke følger dype senkninger i terrenget vil kunne ha en stor bredde, og denne bredden kan være like stor som bredden på utløsningsområdet. I mange skred der dette er tilfelle vil bredden av skredløpet kunne være over 1 km (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

## 2.10 Utløpsområde

Ved små og våte skred vil disse kunne stanse opp i terreng med helninger på  $25^{\circ}$  til  $15^{\circ}$ . Et vanlig utløpsområde er i bunn av fjellfoten i overgangen til dalbunn. Ved store og tørre skred vil utløpsområdet være mye lenger, og oppbremsinger på slike skred vil ikke starte for fullt før helningen på terrenget har kommet ned under  $10^{\circ}$ . Utløpsområdet i disse tilfellene kan gå mange hundre meter utover horisontalt terreng, og i enkelte tilfeller vil de også kunne gå opp over fjellsider på andre sider av dalen. Utløpsområdet ligger gjerne på bekke- og elvevifter (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

## 2.11 Spor etter skred i terreng og vegetasjon

Skredskader ødelegger vegetasjon i fjellsidene og de kan grave opp undergrunnen. En kan derfor ofte se tydelige spor etter snøskred. De fleste fjellsider i Norge er dekket av løsmasser som er satt igjen etter at isen trakk seg bort for ca. 10. 000 år siden. I de områdene hvor det går hyppige skred vil disse løsmassene være transportert videre nedover fjellsidene av snømassene. Skredene graver i løsmassene slik at det blir dannet trange renner (raviner). Midt i skredløpet er erosjonen størst, og ut til sidene av løpet legges materialet igjen (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

Der hvor det har gått et skred kan en se skader på trær og annen vegetasjon. Disse skadene sees best som brudd på trestammer, grener som er knekt og trær som er bøyd nedover. Snøskredskadet skog vil ha et brudd i stammen i den høyden der snøhøyden var ved tidspunktet for skredet. Det er spesielt skredsiden av treet som skades. Snøskydelen av skredet fører til et annet brudd høyere opp på stammen. Skog som er rammet av skred vil ofte bare ha grener i skredretningen (Vegdirektoratet, 2011). Det er vanskelig å skille skader fra snøskred fra skader som har kommet på grunn av andre typer skred, vind eller snøsig (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

Rotsystemet til skog som er rammet av snøskred er ikke ødelagt. Derfor vil skog som har vært utsatt for skred ofte ha en litt friskere grønnfarge om våren. Nedpressede trær kan reise seg igjen, og nye knopper kan dannes. Et annet tegn på skredaktivitet er når en mindre stein ligger på toppen av en større stein. Dette skjer fordi skredet tar med seg de minste massene (Vegdirektoratet, 2011).

# 3 | Sikringstiltak av veier mot snøskred

Det kreves ofte store og kostbare tiltak når en skal sikre effektivt mot snøskred. Der- som et veganlegg ligger midt i et skredutsatt område kan det være billigere å flytte anlegget til en annen lokasjon enn det er å sikre anlegget. Det kan være vanskelig å anslå hvor store fremtidige skred kan bli i et område og det er derfor alltid en fare at innførte sikringstiltak ikke er godt nok dimensjonert. Både skredhastigheten og skredvolumet kan overgå forventede verdier og dette kan føre til at snømassene vel- ter over sikringsvoller eller bryter ned tiltak. En må derfor alltid regne med en risiko når en planlegger et tiltak og det må gjøres et nytte/kostnadsoverslag slik at ikke tiltaket overgår verdiene av anlegget som skal sikres. Det kan i mange tilfeller være billigere å flytte skredutsatte anlegg enn det vil være å bygge sikringstiltak.

Et ønske eller behov for et sikringstiltak kan ofte være styrt av frykten for skred mer enn den reelle risikoen. I et område kan sannsynligheten for trafikkulykker være større enn sannsynligheten for snøskred, men sikkerheten mot skred skal være høy i forhold til sikkerheten mot andre ulykker (Lied, K og Kristensen, K, 2003).

For et hvert sikringstiltak er det viktig at en oppnår best mulig sikkerhet og frem- kommelighet som mulig til en lavest mulig kostnad. Sikringstiltakene må ikke føre til dårligere sikkerhet og fremkommelighet for trafikanter, driftspersonell eller fast- boende.

Det er utviklet en rekke forskjellige sikringstiltak med ulike kostnader og effekter og det er de mest kostbare tiltakene som gir best effekt og som er mest anvendelige i ulikt terreng. De rimeligere tiltakene er ofte tilpasset en bestemt skredtype og ett bestemt terreng (Vegdirektoratet, 2011).

## 3.1 Overbygg og tunneler

Overbygg og tunneler er de sikringstiltakene som gir best sikkerhet mot snøskred. Disse sikringstiltakene brukes bare der andre sikringsmetoder ikke gir tilfredsstil- lende sikringseffekt, dette er fordi det er store kostander ved å bygge både tunneler og overbygg. Den høye kostnaden har ført til at disse tiltakene ofte blir bygget litt for korte. Figur 3.1 viser et viser et skredoverbygg.

Overbygg som er bygget kortere enn 30 m har en gjennomsnittlig sikringseffekt på 50%, mens overbygg som er lenger enn 200 m har en sikringseffekt på gjennem- snittlig 95%.

Ofte kan det være vanskelig å bestemme plasseringen av tunnelportalen da skred- faren kan være stor over lengere strekk og det ikke vil være lønnsomt å bygge

tunnelen så langt. I slike situasjoner må en bygge portalen slik at den kan motstå belastninger fra snøskred og steinsprang (Vegdirektoratet, 2011).



Figur 3.1: Eksempel på skredoverbygg som også fungerer som en tunnelportal. (Vegdirektoratet, 2011).

På endeavslutningen av tunnelen er det utformet en ledemur som er trukket inn mot ledevollen slik at den hindrer skredsnø mot å trenge inn i vegen.

Det er viktig å utforme overbygget slik at det er trafikksikkert, har god linjeføring, gode lysforhold og er godt drenert. Ytre vegg i overbygget er ofte laget med søyler for å lage gode lysforhold inne i overbygget. Dette kan bare utføres dersom helningen på terrenget er stor nok til å føre snømassene videre nedover fjellsiden og ikke bygges opp på utsiden av overbygget. Dersom snøen bygger seg opp på utsiden vil snømassen etter hvert ledes inn i overbygget. I tillegg vil det dersom helningen ikke er stor nok suges snø inn i overbygget ved løssnøskred, noe som fører til dårlig sikt. Det vil også ved stor soloppvarming kunne dannes is på vegbanen i overbygget, og dyr vil legge seg nær åpningen. Dette kan løses ved å bygge ferister og vannrister nær åpningen.

Foten på ledevoller som bygges i forbindelse med overbygg skal ha en bredde som ikke er mindre enn bredden av skredet i skredbanen (Vegdirektoratet, 2011).

## 3.2 Bru over skredløpet

Når en veg krysser et skredutløp som er godt kanalisert kan det å bygge en bru være et godt sikringstiltak. Det er størrelsen av skredet som er dimensjonerende for bruas lysåpning. Ved å bygge bru over skredløpet får veien en fin linjeføring. Brua beskytter ikke mot snøskydelen av skredet, og dette er et risikomoment spesielt ved

store skred (Vegdirektoratet, 2011). Figur 3.2 viser et eksempel på en bru bygget over et skredløp.



Figur 3.2: Eksempel på bru bygd som sikringstiltak mot skred. (Vegdirektoratet, 2011).

For at en skal kunne bruke bru som sikringstiltak må en bygge brua slik at det er liten fare for at massene skal samles opp under brua. Det er derfor viktig at bredden på lysåpningen til brua er like stor som bredden på skredløpet og at helningen på terrenget er lik over en lengere strekning både før og etter brua.

Brua kan bli utsatt for store krefter dersom skredet når opp til brua og dersom massene samler seg oppunder brua og presser bruplata oppover. Det er derfor en helt bestemt metode for å konstruere slike bruer. Når en konstruerer en slik bru må en tenke på at også rekkverket skal tåle mye krefter, spesielt krefter som blir påført dersom snøskydelen av skredet treffer dette.

Når det har gått et skred under brua må en fjerne gjenliggende masser slik at det neste skredet som går får fri bane under brua. Nettopp derfor må en tenke på at det skal være fremkommelig for anleggsmaskiner og personell slik at masser kan fjernes fra bruas lysåpning (Vegdirektoratet, 2011).

### 3.3 Terrengtiltak

Et skred lar seg i stor grad styre av terrengformasjonene. En kan endre og bremse ned skred ved å omforme terrenget. Et terrengtiltak har som mål å styre skredmasser mot områder hvor de ikke kan skade infrastrukturen og å bremse ned skred slik at de ikke når frem til infrastruktur.

Dersom en vil styre skred utenom infrastruktur kan en benytte seg av ledevoller eller ledemurer. Dersom en er ute etter å bremse ned et skred kan en bruke bremseskjeller

eller fangvoller. Kjegler og voller er mest effektive der det er lite snø på bakken i utløpsområdet og skredet består av faste masser med moderat størrelse.

En systematisk kartlegging over flere år av ulike terrengtiltak har vist at sikringstiltakene er utformet slik at de er mest effektive mot våtsnøskred, men har en mindre effekt på tørrsnøskred. Grunnen til dette er at snøskydelen passerer over tiltakene og vil ikke hindres av tiltak som ligger på bakkenivå.

Terrengtiltak vil aldri gi full sikkerhet mot skred da snømassene kan ha et for stort volum og snøhøyden kan bli høyere enn tiltakene. Derimot vil aldri terrengtiltak gi en negativ effekt på trafikken i motsetning til skredoverbygg. Terrengtiltak vil i mange tilfeller gi en bedre total sikkerhet i forhold til overbygg samtidig som det er en mye billigere sikringsmetode.

Et terrengtiltak vil alltid være et stort inngrep i naturen, og tiltakene vil bryte med de naturlige landskapsformene. Det er viktig at det i planleggingsfasen tas hensyn til det eksisterende terrenget (Vegdirektoratet, 2011).

### 3.4 Ledevoll

Ledevoller benyttes for å lede snøskred vekk fra områder der de gjør skade. En kan for eksempel sture skredmassene parallelt med vegen og til et område der snømassene kan lagres. En bruker som nevnt også ledenvoller til å styre et skred over et skredoverbygg og en kan bruke ledenvoller til å styre skredmasser under en bru.



Figur 3.3: Eksempel på ledenvoll for sikring mot snøskred og sørpeskred. Vollkrona er dessverre ikke bygget med jamn stigning i øvre delen av vollen, og på dette partiet har skred gått over vollen, Sandvika, Sogn og Fjordane (Foto: Harald Norem) (Vegdirektoratet, 2011).

For at ledenvollene skal ha en god effekt må en legge vekt på lokalisering, utforming og dimensjonering av vollene. En må vurdere spesielt:

- Høyden på vollene



- Vinkel mellom skredet og vollens retning
- Helning langs vollkrona og helningen i skredløpet i skredets retning
- Utforming av retningsendringer ved bruk av buede voller
- Utforming av utgravningsområdet
- Helning på skredsiden av vollen
- Drenering av vollområdet og vegen
- Erosjonssikring av området

Vinkelen mellom skredet og vollen bør ikke være for stor. Vinkelen bør ikke være større enn  $20^\circ$ , men en har tidligere oppnådd gode resultater med vinkler på opptil  $30^\circ$ . Ledevoller har hatt best effekt der hyppigheten av våtsnøskred er stor. Ved tørre snøskred og sørpeskred er effekten dårligere.

Dersom en ønsker å styre skredmasser parallelt med jernbane eller veg vil vinkelendringen på skredet bli stor. Da må en endre vinkelen på vollene gradvis slik at skredene klarer å følge vollene og høyden av vollene må være stor (Vegdirektoratet, 2011). Brateng (2005) gjennomførte flere modellforsøk for å se på effekten av ledenvoller og bremsekjegler. Det ble gjennom disse forsøkene funnet at:

- Ved voller med en vinkel på  $15^\circ$  i forhold til skredet gikk skredmassene ikke over vollene.
- Det var en større tendens til at skredene flyter over buede voller enn rette voller.
- Mengde snø som fløt over vollene ble redusert jo lenger ut i skredbanen vollene var lokalisert.
- Snøen som flyter over vollene er registrert i to faser. I første fase er det frontbølgen som blir kastet over vollen. Denne avsetningen har en kort utløpsdistanse. Når frontbølgen har truffet vollen vil masser samles opp foran ledenvollen og masser lenger bak i skredet vil flyte over de oppsamlede massene og vollen. Her er utløpsdistansen større.
- De største avsetningene får en ved store retningsendringer og slake vallsider.
- Vallsider bør gjøres så bratte som økonomisk forsvarlig for å hindre at skredet flyter over vollen.

De viktigste faktorene en må ta hensyn til når en skal velge effektiv vollhøyde er:

- Hastighet på skred
- Skredets flyte høyde
- Skredets bredde
- Vinkel mellom skred og voll

- Snømengde på bakken før skred inntreffer

Både rette og buede voller bør plasseres så langt ut i skredløpet og så nært veg som mulig. Grunnen til dette er at skredmassene er lettere å styre ved lavere hastighet. Det er mulig å redusere skredets utløpsdistanse på opptil 100-150m. For buede ledevoller må en foreta retningsendringer over en lengere strekning enn for rette voller. Når en benytter buede voller vil reduksjon i utløpsdistanse være opptil 50-100m. Massene for å bygge en ledevoll bør tas fra skredsiden av vollene. På denne måten øker en vollhøyden samtidig som en skaper plass til skredmassene (Vegdirektoratet, 2011).

### 3.5 Fangvoll

Hensikten med å benytte fangvoller er å stanse skredet før det når frem til vegen. Dette gjøres ved at det bygges en voll normalt på skredretningen. Vollen plasseres ofte tett inntil vegen. En kan også bygge fangvoller for å redusere hastigheten og utløpslengden på skredet ved å bygge fangvollene lenger fra vegen, og la skredene passere vollene. De viktigste faktorene for vollens effektivitet er:

- Vollens effektive høyde
- Helningen på skredsiden av vollene
- Utformingen av terrenget på oversiden av vollene
- Skredets hastighet når den treffer vollene
- Skredets flyte høyde og volum
- Om skredet er vått eller tørt



Figur 3.4: Foto av fangvoll med bratt tørrmur på begge sider, Rv 7, Indre Rotagjelet, Hordaland. (Foto: H. Norem) (Vegdirektoratet, 2011).

Felt- og modellforsøk viser at de fremre massene blir stanset av fangvollene, mens masser lengere bak i skredet kan gå over vollene etter at massene i fronten har lagt

seg foran vollen og redusert dens effektive høyde. Dette tiltaket har langt bedre effekt ved våtsnøskred enn ved tørrsnøskred. Bruk av fangvoller er mest effektive ved moderate hastigheter hvor det er liten intern bevegelse i skredmassene.

På samme måte som ved bygging av ledevoller bør massene en skal benytte til å bygge fangvoller tas på skredsidene av vollene for å maksimere den effektive høyden av vollen. Dersom det tas ut for mye masser i forkant av vollen vil dette føre til at hastigheten på skredet øker, det er derfor viktig at dimensjonerende vollhøyde regnes ut fra opprinnelig terreng (Vegdirektoratet, 2011).

### 3.6 Bremseskjegler

Bremseskjegler brukes til å bremse skred og redusere utløpsdistansen. Disse plasseres i god avstand til vegen. Denne typen tiltak øker den indre friksjonen i skredet og skaper store interne bevegelser i massene. Det er viktig å ta hensyn til kjeglens plassering i terrenget og utforming i forhold til hverandre.

Denne typen terrengtiltak har blitt brukt i Norge siden 1976.

Bremseskjegler brukes ofte sammen med fangvoller. Kjeglene bremser hastigheten på skredet, mens fangvollene stanser skredet på et bestemt punkt.

Når en skal plassere kjeglene må en tenke på:

- Sikringseffekt med hensyn på å redusere utløpsdistansen er størst ved plassering av kjeglene høyt oppe i skredbanen.
- Jo høyere oppe kjeglene er plassert, jo større sannsynlighet er det for at de blir dekket av masser i løpet av vinteren.
- Det er vanskelig å drive anleggsarbeid høyt oppe i et skredområde.

Det vanligste er å plassere kjeglene i rader etter kotene i terrenget. Når et skred treffer bremseskjegler vil snømassene kastes opp i luften og gjøre kraftige sprang (Vegdirektoratet, 2011).

### 3.7 Bred grøft og flytting av veg

De fleste skred som sperrer veger er relativt små og de passerer vegen med noen få meter. I disse tilfellene kan vegen sikres med enkle terrengtiltak. I slike situasjoner kan det være effektivt å flytte vegen eller å grave ut dype grøfter.

Ved bruk av grøfter skal skredet stoppes effektivt og det skal være mulig å komme til og fjerne snømassene før neste skred utløses. Grøftene bør utformes med en så bratt skjæring som mulig. Dette gjør at skredet treffer vertikalt på grøfta og skredet får et stort energitap. Best effekt får en når skredmassene faller nesten loddrett ned i grøfta.



Figur 3.5: Skredvoll og bremsekjegler ved Neskaupstaður , Island. (Multiconsult, 2013)



Figur 3.6: Når vegen flyttes mer enn 30 m fra fjellsiden har en sikret vegen mot de fleste skred av normal størrelse. (Foto: H. Norem) (Vegdirektoratet, 1993)

Bredden på grøfta må utformes med tanke på skredets volum og hastighet. Ofte er det ønskelig å etablere en grøft på 10-15m. Dersom det er behov for større sikrings-tiltak enn dette kan det bygges fangvoller i tillegg da dette er mer kostnadseffektivt enn å bygge en større grøft.

En kan også velge å flytte vegen vekk fra fjellsiden slik at sannsynligheten for skred er mindre. I noen tilfeller kan vegen flyttes ut på en fylling i vann slik at en får et sjømagasin imellom fjellsiden og vegen. Skredmassene som fanges i dette

sjømagasinet vil stoppes effektivt av vannmassene og snøen vil smelte effektivt. Dersom det skulle komme et større skred vil det kunne genereres store bølger i magasinet, og dette kan være farlig for trafikantene. En annen ulempe ved bruk av vannmagasin er at en da må bygge rekkverk på fyllingen i vann og dette rekkverket må rehabiliteres ved store skred når vann og skredmassene skader dette.

Bygging av sjømagasin er en uheldig estetisk løsning. Det er viktig at en oppnår god utskifting av vannet i magasinet for at det ikke skal oppstå økologisk uheldige konsekvenser (Vegdirektoratet, 1993, 2011).



## 4 | Erfaringer med bruk av ledevoller i Norge

Pernille Aas skrev i 2012 en hovedoppgave der hun vurderte sikringstiltak mot snøskred i Norge, (Aas, 2012). Dette kapittelet tar for seg funn i gjort i denne oppgaven. Aas undersøkte i alt 14 sikringstiltak langs fire vegstrekninger i Møre og Romsdal og Sogn og Fjordane, se tabell 4.2. Tiltakene bestod av diverse typer terrengtiltak og overbygg som har blitt oppført på ulike tidspunkt. Undersøkelsen viste at mange av tiltakene var underdimensjonerte. Ledevoller var for korte og lave, overbygg var for korte og mange av tiltakene hadde et akutt behov for vedlikehold og reparasjon av skader.

Sikringseffekten av nye tiltak er beregnet etter en metode utarbeidet av Hammersland (2001). Sikringstiltakets effekt er beregnet ved å se på antall stengninger etter tiltaket ble bygget mot antall stengninger før tiltaket ble bygget:

$$SE = \left(1 - \frac{\text{antall stengninger etter bygd tiltak}}{\text{antall stengninger før bygd tiltak}}\right)$$

Hammersland satte også opp et minimumskrav til sikringseffekt for forskjellige tiltak. Kravene er vist i tabell 4.1.

Sikringsmetode	Krav til minimums sikringseffekt i %
Overbygg	90 -100
Rørtunnel	90
Terrengtiltak, enkeltvis eller i kombinasjon	70

Tabell 4.1: Krav til sikringseffekt (Hammersland, 2001)

Beregningene til Pernille Aas viste at de yngre tiltakene hadde en svært god effekt på snøskred. Årsaken til dette var at de yngre tiltakene var bedre tilpasset terreng og frekvens.

Av de sikringstiltakene som er vurdert av Pernille Aas vil det kun bli sett nøyere på tiltak av typen ledevoll i dette kapittelet.

	Tiltak	Bygd
<b>E39 Festøy – Ørsta</b>		
Saltrefonna	Ledevoll og bremsekjegler	2001
Storegjølet Nord	Ledevoll	2001
Storegjølet Sør	Ledevoll	2001
<b>Fv65 Festøy – Standal</b>		
Årsnesfonna	Overbygning	1987
Longeneset	Stålrørstunnel	1987
Breisvedet	Sjømagasin	1986
Seljesvora	Ledevoll, fangvoll og bremsekjegler	1987/1995
<b>Rv13 Dragsvik – Vetlefjorden</b>		
Sandskreda	Ledevoll	1999
Nautskreda	Betongrørstunnel	1999
Ramsteina	Overbygg/ledevoll	1972/2005
Breiskreda	Betongrørstunnel	2002
<b>Rv615 Hyen – Sandane</b>		
Storesvora	Ledevoll	2009
Seljesvora/Jonsoksvora	Ledevoll/fangvoll	2009
Blomasvora	Fangvoll	2009

Tabell 4.2: Sikringstiltak som er vurdert i sammenheng med Pernille Aas sin masteroppgave i 2012.



## 4.1 E39 Festøy-Ørsta

De mest utsatte skredbanene på dette strekket har få utløsningsområder. Strekningen er periodevis utsatt for skred og skredene kan bli svært store.

### 4.1.1 Saltrefonna

Denne skredbanen er særlig utsatt for snø- og sørpeskred. Bilder av skredløpet vises i figur 4.1. De første terrengtiltakene på denne strekningen kom i 1978 og bestod av 6 kjegler og en ledevoll på 50-60 m som ligger plassert på oversiden av vejen. Tiltakene har hatt god effekt på snøskred, men dårlig effekt på sørpeskred.

Det ble i 1999 planlagt nye sikringstiltak som bestod av ett nytt magasin, og en ny ledevoll inntil vejen.



Figur 4.1: Tilstand på sikringstiltak ved Saltrefonna i 2012 (Aas, 2012)

Magasinet ble planlagt med bunnivå 3 m under vegbanenivå, og høyden på ledevollen ble planlagt til 3 m over vegbanenivå og 25 m lang. Vollen skulle bygges 3 meter fra vegbanekant. Utbedringene ble utført i 2001. Det ble registrert en skredhendelse etter 2001 som førte til sperring av veg, dette var et sørpeskred. Et mindre skred gikk i 2001, men dette ble stoppet av tiltakene.

Sørpeskredet ble utløst i 2004 og gjorde store skader på terrengtiltakene. Skredet førte med seg mye steinmasser og bremsekjeglene ble svært erodert.

Det ble registrert syv skredhendelser som har ført til sperret veg før utbedringene i 2001, og én hendelse etter. Dette vil si at området er 86% bedre sikret mot ras enn før utbedringene (Aas, 2012).

### 4.1.2 Storegjølet Nord

I dette området er det vanlig med både snø- og sørpeskred, men det har oftest vært sørpeskredene som har ført til stenging av veg. Det ble laget en plan for utbedring

av tiltak i 1999 der det ble bestemt at det skulle bygges en ny lede- og fangvoll nær vegen. Avstanden mellom voll og veg skulle være 2,5 m og høyden på vollen skulle være 2 m over vegbanenivå. Det ble også planlagt en ny stikkrenne med bunn 3 m under vegbanenivå. Ledevollen følger vegen.

Det gikk to kraftige skred i 2001 og 2004. Disse har satt kraftige spor i tiltaket. Mye tyder på at skredene har klatret opp på en naturlig voll og glidd ned over sørsiden av fangvollen. Deler av skredet har blitt kastet over vollen. Terrenget har blitt erodert av skredene, og deler av den naturlige vollen har sklidd ut. Dette kan sees i figur 4.2.

I perioden før 2001 ble det registrert syv skred der vegen ble stengt, mens etter 2001 er det bare registrert to hendelser der vegen ble stengt. Dette fører til en sikringsgrad på 71% (Aas, 2012).



Figur 4.2: Storegjølet Nord, mai 2012. (Aas, 2012)

### 4.1.3 Storegjølet Sør

Dette området er veldig utsatt for sørpeskred. Skredbanen er bratt, og de største skredene kan gå rett i fjorden. Det er uvisst om andre skredtyper har ført til stenging av vegen. Det ble i perioden 1978-1979 bygget en voll og et mindre magasin. Det er registrert 4 episoder som har ført til stenging av veg i perioden 1975-1995.

Det ble i 1995 planlagt utbedring av voll, magasin og vannløp. Vollen skulle være 35 m lang og 3,5 m høy over vegbanenivå i sør og 4,5 m høy i nord. Avstand mellom voll og veg ble satt til 3,5 m. Dagmagasinet skulle være 2 til 3 meter under vegbanenivå, og stikkrenna skulle være 22 m lang.

Det gikk et sørpeskred i Storegjølet Sør i 2004, dette skredet ble kastet av den naturlige vollen, videre over den nye vollen og over vegen. Vegen måtte sperres.

Dette skredet antas å være et 100 årsskred. Dersom det ikke hadde vært bygges sikringstiltak ville skadene vært større. Sikringstiltaket vises i figur 4.3. Tiltaket fikk ingen store skader etter skredet.

Det var fem stengninger av vegen i perioden 1979 til 1997 på grunn av skred. Nye tiltak ble bygget i 2001 og etter disse tiltakene ble bygget har det kun vært dette ene skredet som har ført til stengning av vegen. Dette gir en sikringseffekt på 80% (Aas, 2012).



Figur 4.3: Storegjølet Sør-magasin og dagmagasin til stikkrenna (Aas, 2012)

## 4.2 Fv65 Festøy Standal

Fjellene på denne strekningen er høye og bratte og har flere potensielle utløsningsområder. Strekket er svært utsatt for skredhendelser og vegen ble tidligere stengt flere ganger per vinter på grunn av skred.

### 4.2.1 Seljesvora

Seljesvora har en bratt skredbane med jevn stigning. Se figur 4.4. Skredet kan deles i to på veg nedover skredbanen. I dette området skulle det egentlig bygges en rørtunnel. Gravearbeidene ble påbegynt og så satt på vent over en vinter. Det viste seg at vollene som var påbegynt i forbindelse med tunnelen fungerte godt som skredvoll og planen om å bygge rørtunnelen ble forkastet.

Skred på dette strekket delte seg ofte i to skredløp ned mot vegen. Vollen som ble bygget i forbindelse med tunnelen ble forlenget i retning mot Breisvedet. Det ble i tillegg planlagt tre kjepler og en ledevoll langs søndre skredløp. Tiltaket er tilpasset at skredet kan deles seg i to. Det har også blitt bygget en ledevoll i forlengelse av fangvollen mot Breisvedet i nord. Disse tiltakene ble utført i 1995.

Det ble i perioden 1988 til 1996 registrert fire sperringer av vegen som følge av skred. Tiltakene ble ferdig bygget i 1995 og det er registrert fire skred som har sperret vegen i perioden 1996 til 2007. I tillegg gikk det ett skred vinteren 2012. Sikringseffekten er negativ da vegen har blitt sperret hyppigere etter at tiltak er bygget. Selv om beregningen av sikringseffekten er negativ kan tiltakene ha hatt en positiv effekt da det er registrert at vollen antakelig har stanset seks av ti skred.

Tiltakene har ikke taklet store skredmasser. Grunnen til dette er at magasinet har vært overfylt av masser. Etter hvert skred bør massene fjernes fra magasinet (Aas, 2012).



Figur 4.4: Seljesvora, februar 2012 (Aas, 2012)

### 4.3 Rv13 Dragsvik- Vetlefjorden

Denne strekningen er østvendt og er svært utsatt for skredhendelser. Skredbanene har flere mulige utløsningsområder. Dette gjør at skred lett kan utløses uten stor påvirkning fra nedbør og vind. Området er svært snørikt om vinteren og fjellsidene er bratte. Det finnes ingen alternativ veg dersom denne vegen blir stengt, og det er farlig å bevege seg langs denne strekningen i dårlig vær.

#### 4.3.1 Sandskreda

Denne skredbanen er utsatt for skred omtrent hvert tredje år. I perioden fra 1975 til 1995 ble vegen stengt 20 ganger på grunn av snøskred. Bilde av skredepisode på denne strekningen vises i figur 4.5.

I 1994 ble det laget to planer for snøskredsikring av Sandskreda. Dette var to alternative forslag hvor det ene forslaget gikk ut på å bygge et overbygg med lengde på 90 m. Det andre forslaget gikk ut på å forlenge og forhøye en naturlig knekk i terrenget med en ledevoll og å bygge ett magasin.

Forslag nummer to ble valgt. Høyden på vollen ble planlagt å være 11 til 14 m høy, men ble bygget med en høyde på 10 m på det høyeste.

Ved et skred i 2011 gikk skredet over ledevollen. Grunnen til dette var at vollen hadde fått redusert sin effektive høyde på grunn av masser fra tidligere skred. Det kan også tenkes at vollen er bygget for lav.

Som nevnt tidligere ble det utløst 20 skred som førte til stenging av veg i perioden 1975 til 1995. I perioden 1995 til 1998 ble det registrert at vegen ble stengt to ganger på grunn av snøskred, og fra 1998 til sommeren 2012 ble vegen sperret tre ganger. Dette gir en sikringsgrad på 86% (Aas, 2012).



Figur 4.5: Sandskreda, snøskred sperrer vegen (Aas, 2012)

### 4.3.2 Ramsteina

Ramsteina er en svært bratt skredbane. Her går det ofte snøskred. Strekningen er sikret med et skredoverbygg som er 180 m langt i 1972. Dette vises i figur 4.6. Da overbygget ble laget ble det feilplassert og derfor har vegen vært sperret omtrent annethvert år siden tiltaket stod ferdig. Den er bare på sørsiden av overbygget at vegen har vært sperret.

Det ble i 1986 planlagt å bygge ledevoll på den søndre delen av overbygget. Ledevollen skulle være 20 m lang og ha en høyde på 3 m. Vollen skulle føres så langt utover taket på overbygget som mulig. Overbygget skulle også forlenges mot sør.

Ved en befaring i mai 2012 var det store mengder skredmasser som var avsatt på taket og ved fjordsiden av overbygget. I 2012 gikk et skred over ledevollen. Dette førte til stengning av vegen.

Det ble registrert 12 vegsperringer mellom 1975 og 1995. Vegen ble etter det bare stengt en gang i 2012. Tiltakene ble vurdert til en sikringseffekt på 95%. Overbygget har hatt god effekt etter at det ble utført utbedringer (Aas, 2012).



Figur 4.6: Ramsteina (Aas, 2012)

## 4.4 Rv615 Hyen–Sandane

Skredbanene langs denne strekningen er svært bratte. Skredene utløses som regel ved nedbør og vind og vegstrekningen er ofte utsatt for sørpeskred.

### 4.4.1 Storesvora

Her kan det gå relativt store snøskred og det kan også gå sørpeskred og flomskred. Utløpsområdet er veldig ofte utsatt for nedbør og vind. Mange av skredene når aldri vegen. Skredene følger som regel elvedeløpet som følger fjellsiden. I perioden 1975 til 1995 var vegen stengt 40 ganger på grunn av skred. I en rapport fra 2006 er Storesvora merket med en stengningsfrekvens på 10 per år.

Det ble lagt frem et forslag om å bygge ledevoll i Storesvora i 1992. Det var ønskelig å lede skredene parallelt med vegen mot sør. Vollen skulle være 340 m lang. Det ble også planlagt en fangvoll på 20 m i enden.

I plantegninger fra 2006 ble vollen planlagt 470 m lang. Tiltaket stod ferdig i 2008 og ledevollen var 470 til 500 m lang. Tiltaket vises i figur 4.7. Høyden på vollen var 8 til 10 m. Det gikk i 2011 et stort snøskred som førte til sperring av vegen. Dette er den eneste hendelsen etter ombyggingen en vet om der vegen har blitt sperret. Andre skred har blitt stanset av vollen og massene har ligget igjen i magasinet.

Som nevnt tidligere ble det registrert 40 vegsperringer mellom 1975 til 1995. I tillegg var det en vegsperring i 1997. Det er regnet at tiltakene har gitt en sikringseffekt

på 98 %, medregnet skredet i 2011.



Figur 4.7: Storesvora-skredmasser har fylt opp tiltaket (Aas, 2012)

## 4.5 Seljesvora/Jonsoksvora

Ved Seljesvora går det skred nesten hvert år og disse skredene er som oftest tørrsnøskred. Skredene blir utløst på grunn av nedbør og vind. Skredløpet er bratt og følger et bekkeløp mot fjorden. Det er få registrerte snøskredhendelser med stenging av veg på dette stedet. 150 m sør for Seljesvora ligger Jonsoksvora. Her pleier det å løsne ett skred sent i sesongen.

Begge steder har skredene en tendens til å deles i to. Dette fører til at alle skred kan stenge vegen på to steder.

Ved Seljesvora er det registrert fem stengninger av veg på grunn av snøskred i perioden 1975 til 1995. I samme periode er det registrert ti sperringer i Jonsoksvora. Det ble planlagt en ledevoll og et magasin som tiltak mot snøskredene. Se figur 4.8.

Vollen skulle være 320 m lang, og høyden skulle være 7 m. Tiltakene ble bygget i 2008. Vollene har tegn til erosjon i nordenden. 120 m fra tiltakets søndre ende ligger det igjen mye løsmasser.

Alle skred som har gått i ettertid har blitt stanset av tiltaket eller ikke nådd frem til tiltaket. Dette gir en sikringseffekt på 100% (Aas, 2012).



Figur 4.8: Seljesvora/Jonsoksvora sett fra nord (Aas, 2012)



# 5 | Tilbakeskyllingsbølger og frysing av skred

## 5.1 Frysing av skred

Når en skal lede skredmasser under en bru ved hjelp av ledevoller er det viktig at skredet ikke stanser opp under bruåpningen. Da vil skredet «fryse fast» i lysåpningen under brua. Dette kan føre til at skredmasser som utløses senere klatrer opp på massene som er «frosset» og skredmassene vil dermed bevege seg over lysåpningen og brua i stedet for igjennom lysåpningen slik det er tenkt.

En forutsetning for at skredmasser ikke skal fryse i lysåpningen er at det er en jevn helning på terrenget både før og etter innsnevringen av skredet og plasseringen av brua. Det finnes eksempler på at det er sprengt ut basseng i forkant av brua. Dette har ført til at skredmassene har stoppet opp i forkant av brua og når det har kommet nye skred så har de nye skredene flytt på toppen av de tidligere skredmassene og tatt med seg brua.

Bruer er dyre konstruksjoner og når et skred ødelegger en bru får dette store konsekvenser for fremkommeligheten på veien og i tillegg store økonomiske konsekvenser. Når en bygger en skredbru bør lysåpningen på denne være større enn  $100 m^2$ .

En bør redusere bredden på skred før skredet styres inn mot brukonstruksjonen. Innsnevringen av skredet bør foretas over en lengere strekning slik at skredet ikke treffer utenfor lysåpningen av brua. En skal være forsiktig med å redusere bredden av skredet for mye da dette kan føre til at massene stopper opp (Vegdirektoratet, 2012). Eksempel på et flomskred som har stanset opp i lysåpningen til brua er vist i figur 5.1.



Figur 5.1: Foto av bru hvor skredet har stoppet opp under brua. White River Bridge, Oregon (Vegdirektoratet, 2012)

I de fleste tilfeller der en finner skredbruer er brua lokalisert i utløpsområdet av skredet der skredhastigheten er redusert i forhold til hastigheten en finner i den

bratteste delen av skredløpet.

En kan regne belastningen på brua ved hjelp av likning (5.1). Den totale horisontale lasten til brua,  $P_{skred}$  blir:

$$P_{skred} = k * 0,5 * \rho_s * v^2 * h * L \quad (5.1)$$

$k$  er en konstant,  $h$  er høyden på konstruksjonen og  $L$  er spennvidden til brua. Denne metoden er beregnet å bruke på flom og sørpeskred, og ikke på tørrsnøskred som er tema i denne oppgaven. Likningen viser derimot hvordan prinsippet med beregning av horisontallast beregnes.

Likning (5.1) forutsetter at skredet treffer hele brukonstruksjonen på samme tid, men i praksis vil bare deler av brua bli truffet. Det vil i tillegg virke vertikale krefter opp under brudekket dersom skredet stopper opp i lysåpningen. Det finnes ingen kjent metode for å finne disse vertikale kreftene. Den vertikale kraften vil trykke brudekket oppover (Vegdirektoratet, 2012).

Det finnes flere eksempler på bruer som er blitt ødelagt av flom og sørpeskred. Det er blant annet en fagverksbru med spennvidde på 50 m i Harreneselva i Finnmark som ble tatt av det tredje sørpeskredet som skjedde på den samme dagen.



Figur 5.2: Bygging av bru og ledemurer for å styre skredmassene under vegen, Ponte Rossa, Biasca, Sveits, Foto: Giorgio Valenti (Vegdirektoratet, 2012)

Ved bygging av bru over et skredområde må en legge vekt på at skredmassene er godt kanalisert frem mot brua, at brua har tilstrekkelig høyde og bredde for å slippe igjennom skredmassene og at terrenget er utformet slik at skredmassene ikke bremses opp rett før eller rett under brua.

Figur 5.2 viser eksempel på bruk av ledemurer og bru for å styre skredmasser under vegbanen.

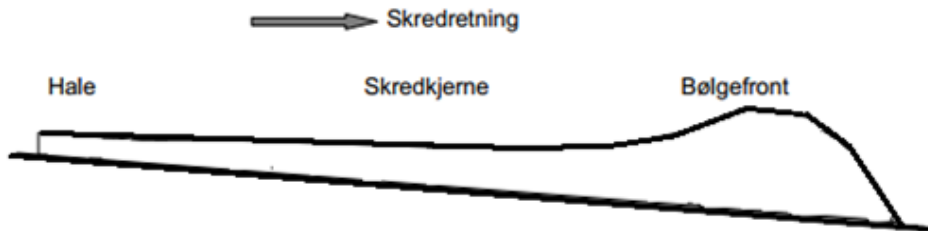
Det ble i 2009 utført enkle modellforsøk av flomskred som styres under bruer (Hiller og Jenssen, 2009). Målet med disse forsøkene var å studere oppskyllingshøyden på vollene som funksjon av treffvinkel på vollene og bredden av brua. Det ble også sett på om skredmassene ville stoppe opp dersom bruåpningen ble for liten. Resultatene viste at oppskyllingshøyden øker vesentlig når vinkelen mellom skredet og vollen øker og vinkelen på ledevoller bør ikke overstige 20-30 grader ved innsnevring på begge sider.

Ledevoller som en bygget i skredløpet bør bare benyttes der en har rimelig grunn til å tro at skredmassene vil holde seg i bevegelse uten store nedbremsinger (Vegdirektoratet, 2012).

## 5.2 Tilbakeskyllingsbølger

Et skred vil bevege seg fremover med en frontbølge i fremre del av skredet. En tilbakeskyllingsbølge vil si en bølge som er motsatt rettet av skredets retning. Denne bølgen oppstår når skredmassene treffer en hindring, som for eksempel ledevoller eller brukant.

Figur 5.3 viser hvordan et skred beveger seg med en bølgefront i forhold til skredmassene.



Figur 5.3: Posisjon for bølgefront i forhold til skredmasser og skredretning

Tilbakeskyllingsbølgen oppstår når skredet treffer en hindring. Som vist i figur 5.4.

Tilbakeskyllingsbølgen, eller refleksjonsbølgen, beveger seg i retning mot skredretningen. Denne bølgen oppstår dersom en snevrer inn skredet med stor vinkel på ledevoller og når vinkel på hindring står normalt på skredretningen. Der det oppstår tilbakeskyllingsbølger kan dette føre til frysing av skred. Dette gjelder når det er snakk om tørre og finkornige (kohesive) skredmasser. Frysing av skredmassene vil skje der hvor tilbakeskyllingsbølgen stopper opp (personlig kommunikasjon Harald



Figur 5.4: Tilbakeskyllingsbølgen oppstår etter at bølgefronten har truffet en hindring, og denne bølgen er motsatt rettet av skredretningen

Norem, 29.mai 2013). Det er derfor ønskelig å bygge ledevoller på en slik måte at det ikke oppstår tilbakeslagsbølger.

Når en bølge møter en hindring vil en del av bølgens energi bli reflektert. Når hindringen står vertikalt på bølgen vil nesten all energien til bølgen bli reflektert (CEM, 2002). Refleksjonsloven sier at en bølge som treffer en barriere vil alltid reflekteres med en vinkel som er lik den vinkelen de traff barrieren med (The Physics Classroom, 2013).

# 6 | Metode

## 6.1 Valg av modell

Modellforsøk er forsøk som utføres ved hjelp av modeller for å finne frem til de mest hensiktsmessige konstruksjonene for en situasjon. Det kan være lurt å bruke en modell når teoretiske forhold er uoversiktlige eller beregningene er tidkrevende, SNL (2007).

En kan bruke eksakte kopier av virkelige konstruksjoner (skalamodeller) eller modeller for å undersøke en typisk situasjon (prinsippmodeller).

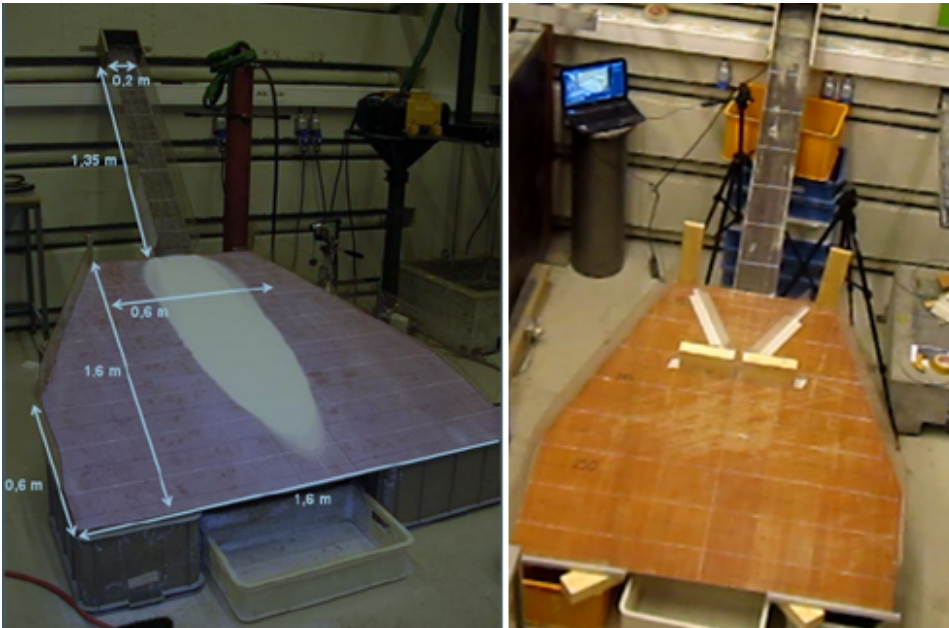
Modellen i dette prosjektet er en prinsippmodell da dette gir resultater som kan overføres til flere områder. Formålet med å utføre forsøkene i en modell er å få kunnskap om utforming av ledevoller med tanke på tilbakeslagsbølger og oppskylling av skred. Mer om oppskylling av skred finnes i underkapittelet «6,5 Måleutstyr og evaluering av data». Modellforsøket simulerer sikring av veger mot snøskred ved å bruke ledevoller og skredbru som sikringstiltak.

Modellen er bygget i målestokk 1:100. Jeg bruker samme modell som ble benyttet i forsøkene til Linda Brateng, (Brateng, 2005). Dersom det hadde blitt benyttet en større modell hadde denne ikke fått plass inne i laboratoriet, i tillegg ville det blitt kostbart å bygge en ny modell i forhold til å bruke den eksisterende modellen.

## 6.2 Modellen

Detaljerte tegninger av modellen finnes i vedlegg A og figur 6.1 viser bilde av modellen i laboratoriet.

Modellen består av en øvre renne med helning  $43^\circ$  og en nedre del som representerer utløpsområdet med helning  $11,3^\circ$ . Plassering i lengderetning er gitt etter rennas senterlinje der avstanden på toppen av øvre renne er punkt null. Aksen har samme helning som overflaten på modellen og er dermed ikke horisontal. I knekket mellom øvre renne og utløpsområdet er lengden 135 cm. Lengderetningen er dermed positiv i samme retning som skredets utløpsretning. Brua ligger plassert ved lengden 182 cm. Brukantene og ledevollene står normalt på modellen. Brukantene er 13,5 cm høye, den samme høyden har ledevollene. Grunnen til dette er at det ikke er ønskelig at skredmassene skal gå over ledevoller og brukanter da forsøket går ut på å se på blant annet maksimum oppskyllingshøyde. Ledevollene er 51 cm lange. Ledevollene er festet kant i kant med enden av brukantene. Skredet samles opp i en boks i øvre del av øvre renne. Skredet utløses ved at veggen mellom boksen og øvre renne fjernes.



Figur 6.1: Bildet til venstre viser modellen i laboratoriet (Foto: Brateng (2005)). Bildet til høyre viser modellen i laboratoriet med påsatte ledevoller og bruvegger. Her er det lagt på dobbeltsidig tape for å etterligne friksjon i utløpsområde. Belegget er påført av Linda Brateng. (Foto: Ingerid Ane Spørck)

Renna er laget av kryssfiner med pleksiglass på sidene. Modellen er 3,1 meter lang. Øvre del av renna er 1,5 meter lang og 0,2 meter bred. Nedre del av renna har varierende bredde og er 1,6 meter lang. Ledevollene er laget av pleksiglass, og har markert opp linjer for hver cm over overflatenivå (se vedlegg 1).

Hele overflaten av modellen er belagt med dobbeltsidig tape slik at friksjonen i forsøksområdet skal ligne friksjon på terreng i et ekte skredområde.

### 6.3 Skredet

Skredet som brukes i dette forsøket skal etterligne tørrsnøskred. Det ble gjort forsøk med to forskjellige mengder masse, 3 kg og 6 kg. Materialet som brukes som forsøksmasser er Ballotini. Dette materialet skal forestille tørrsnø i forsøkene. Ballotini er et granulært glassmateriale med partikkeldiameter 0,1mm og en tetthet  $\rho$  lik  $1,5 \text{ g/cm}^3$  (Econova (2010)). Friksjonsvinkelen  $\varphi$  i materialet ligger mellom  $21^\circ$ - $23^\circ$  og den dynamiske friksjonsvinkelen  $\delta$  ligger mellom  $19^\circ$  og  $21^\circ$ . Tørrfriksjonen i materialet (coulombfriksjonen) ligger mellom 0,34-0,38 (Brateng (2005)).

## 6.4 Forsøksprogrammet

Målsettingen med forsøkene var å studere oppskyllingshøyde på ledevoller i forbindelse med skredbru som funksjon av helning på vollene. I tillegg ble det sett på når tilbakeslagsbølger oppstår, og oppskyllingshøyde på brukant i forhold til oppskylling på ledevoll.

Det ble utarbeidet et gjennomføringsdokument for forsøkene Dette dokumentet ligger som vedlegg B og ble laget som et hjelpemiddel til gjennomføring av forsøk.

Granulære masser (Ballotini) ble sendt nedover renna. Forsøkene ble filmet fra tre ulike vinkler for å finne parametere og bevegelser som skal analyseres.

Bredden av bruåpningen ble satt til 4 cm, 8 cm og 12 cm. Vinkelen på ledevoller er valgt ut fra retningslinjer for snøskred der vinkel er anbefalt mindre enn  $30^\circ$  (Vegdirektoratet, 2012). De tre vinklene som ble brukt i forsøkene var  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  og  $30^\circ$ . Vinkelen til ledevollene er gitt som vinkel mellom senterlinje og ledevoll.

Det var i alt ni hovedforsøk som ble kjørt. Dette er de ni forskjellige variantene av bredde på bruåpning og vinkel på ledevoller. Hvert forsøk ble kjørt med tre repetisjoner.

I tillegg ble det kjørt to tilleggsforsøk med dobling av skredvolumet (dobling av skredmasser) og reduksjon i hastigheten på skredet (dvs. skredet starter lenger ned i renna i stedet for på toppen av renna). Disse forsøkene ble kjørt med 8 cm bruåpning og  $20^\circ$  vinkel på ledevoller. Startposisjon for skred med reduksjon i hastighet ble satt til 15 cm lenger ned i renna enn startposisjon for de andre skredene.

Det ble også kjørt forsøk med de tre ulike bruåpningene uten bruk av ledevoller og et forsøk uten ledevoller eller bru. Det sistnevnte forsøket ble kjørt for å sammenligne helning på energilinjer med forsøkene til Linda Brateng i 2005.

Det var totalt 11 forsøk som ble kjørt med tre repetisjoner hver. I tillegg ble det kjørt forsøk uten bruk av ledevoller eller bru (fire forsøk). Dette gir totalt 37 forsøk.

Nummer på forsøk er oppgitt i x,x,x. Første verdi angir lysåpning på brua i cm. Andre verdi angir vinkelen på ledevollene. I forsøk uten ledevoller er andre verdi angitt som null. Tredje verdi angir om det er første, andre eller tredje repetisjon av forsøket. Forsøk der massen av kulene er endret har bokstaven «m» etter nummer på repetisjon. Forsøk der startposisjonen til kulene er endret har bokstaven «s» etter nummer på repetisjonen.

Skredet som heter «Utløpslengde» er det skredet som er kjørt uten bru og uten ledevoller. Dette er kun gjort for å sammenligne forsøket med de forsøkene som er gjort av Linda Brateng.

Nummer på forsøk	Dato	Skredmasse (kg)	Startposisjon (m fra topp renne)	Bruåpning (m)	Vinkel ledevoll (°)
4,30,1	22.04.2013	3	0,15	0,04	30
4,30,2	22.04.2013	3	0,15	0,04	30
4,30,3	22.04.2013	3	0,15	0,04	30
4,20,1	22.04.2013	3	0,15	0,04	20
4,20,2	22.04.2013	3	0,15	0,04	20
4,20,3	22.04.2013	3	0,15	0,04	20
4,10,1	22.04.2013	3	0,15	0,04	10
4,10,2	22.04.2013	3	0,15	0,04	10
4,10,3	22.04.2013	3	0,15	0,04	10
8,30,1	22.04.2013	3	0,15	0,08	30
8,30,2	22.04.2013	3	0,15	0,08	30
8,30,3	22.04.2013	3	0,15	0,08	30
8,20,1	22.04.2013	3	0,15	0,08	20
8,20,2	22.04.2013	3	0,15	0,08	20
8,20,3	22.04.2013	3	0,15	0,08	20
8,10,1	25.04.2013	3	0,15	0,08	10
8,10,2	25.04.2013	3	0,15	0,08	10
8,10,3	25.04.2013	3	0,15	0,08	10
12,30,1	25.04.2013	3	0,15	0,12	30
12,30,2	25.04.2013	3	0,15	0,12	30
12,30,3	25.04.2013	3	0,15	0,12	30
12,20,1	25.04.2013	3	0,15	0,12	20
12,20,2	25.04.2013	3	0,15	0,12	20
12,20,3	25.04.2013	3	0,15	0,12	20
12,10,1	25.04.2013	3	0,15	0,12	10
12,10,2	25.04.2013	3	0,15	0,12	10
12,10,3	25.04.2013	3	0,15	0,12	10
8,20,1m	25.04.2013	6	0,15	0,08	20
8,20,2m	25.04.2013	6	0,15	0,08	20
8,20,3m	25.04.2013	6	0,15	0,08	20
8,20,1s	25.04.2013	3	0,3	0,08	20
8,20,2s	25.04.2013	3	0,3	0,08	20
8,20,3s	25.04.2013	3	0,3	0,08	20
4,0,1	02.05.2013	3	0,15	0,04	-
8,0,1	02.05.2013	3	0,15	0,08	-
12,0,1	02.05.2013	3	0,15	0,12	-
utløpslengd	02.05.2013	3	0,15	-	-

Tabell 6.1: Liste og forklaring av forsøkene



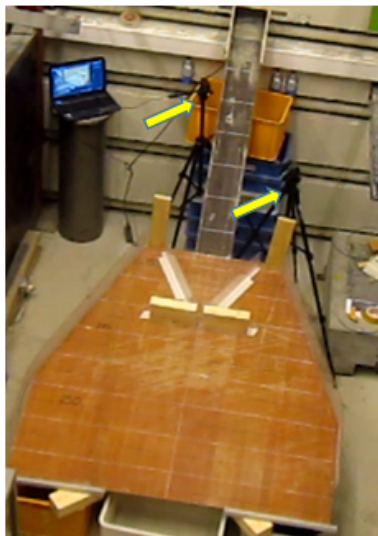
Forholdet mellom skredløpet og bruåpningen ble valgt slik at det ligner forholdet i vanlige bruer i vegsystemet.

Forsøksprogrammet ble bestemt i samarbeid med Harald Norem i Vegdirektoratet, og er vist i tabell B.1.

## 6.5 Måleutstyr og evaluering av data

Det ble brukt masser av typen Ballotini under hele modellforsøket. Massene ble veid opp på vekt med ett grams nøyaktighet.

Alle forsøk ble filmet med tre forskjellige kameraer fra tre forskjellige vinkler. Plasseringen av disse er vist i figur 6.2.



Figur 6.2: Plassering av kameraer er vist med gul pil. Kamera til venstre er omtalt som «Webkamera på stativ», kamera til høyre er omtalt som «BAT-kamera». Bildet er tatt med kameraet omtalt som «Rødt kamera».

Under forsøket ble massenes bevegelser dokumentert ved hjelp av alle tre kameraer. Analyser er gjort ved hjelp av «BAT-kamera» da dette kamerat hadde best oppløsning, best vinkel med tanke på avlesninger og flest bilder per sekund. Dette kamerat tok 50 bilder per sekund, og dataene har derfor blitt analysert ved posisjon til masser for hvert 0,02 sekund. Videoer fra alle forsøk og fra alle tre kameraer ligger vedlagt på CD bakerst i rapporten. «Rødt kamera» og «Webkamera på stativ» er brukt som kontroll for verdiene som er blitt lest av med «BAT-kamera».

De 11 første forsøkene ble gjennomført med tre repetisjoner. De fire siste forsøkene ble gjennomført kun en gang da repetisjonene for de 11 første forsøkene ga

tilnærmet like resultater.

For hvert forsøk ble det registrert posisjon av skred og oppskyllingshøyder på ledevoller og brukant for hvert 0,02 sekund. Dette ble brukt til å beregne hastighet av skred og se på forholdet mellom vinkel på ledevoll og nevnte verdier. Det ble laget tid-lengdeprofil som resultat av data fra videoene. Med oppskyllingshøyde menes den maksimale høyden skredet skyller opp på ledevoll og brukant.

Det er tegnet opp linjer på modellen på tvers av lengderetningen til skredet for å kunne lese av posisjonen til massene.

Programmet VLC ble benyttet til å analysere filmene. Her kan en se filmene i bilde for bilde for hvert 0,02 sekund.

Data fra målingene av skredet «Utløpslengde» ble brukt for å sammenligne helning på energilinjer med data fra forsøkene til Linda Brateng, 2005.

Posisjon for skred er beregnet ved å se på bevegelsen av bølgefronten til skredet. Dette er gjort i samsvar med metode som er beskrevet i Vegdirektoratet (2012).

Dersom en skal sammenligne resultater fra dette modellforsøket med modellforsøk gjort av Linda Brateng må helning på energilinjer være tilnærmet lik. Energilinjer er beregnet slik det er beskrevet i Vegdirektoratets rapport nr. 73- Flom og sørpeskred (Vegdirektoratet, 2012). Energilinjene er funnet fra formelen:

$$H_e = H_z + H_p + H_k \quad (6.1)$$

$H_e$  er energilinjen

$H_z$  er stedshøyden

$H_p$  er trykkenergien som tilsvare skredets flytehøyde. Gitt fra formelen

$$H_p = (\rho gh)/(\rho g) = h$$

$H_k$  angir skredets hastighethøyde og er gitt ved formelen:  $H_k = v^2/2g$

Lengder for beregning av energilinjer for forsøket «Utløpslengde» starter på 1,35 meter fordi det er ved denne distansen at nedre del av renna starter.

## 7 | Observasjoner

Observasjoner er gjort ved å se på filmene av forsøkene, disse ligger i vedlegg D. Gjennom å se på disse filmene kommer det tydelig frem hvordan skredmassene beveger seg ved ulik bruk av ledevoller og bruåpninger.

Linda Brateng nevnte i sin rapport i 2005 at snøskydelen av skredet er mindre enn sammenlignet med naturen. Dette gjelder også for mine forsøk da det er samme forsøksmasse (Ballotini) som er blitt benyttet.

Det er ikke studert hastighet i øvre del av renna. Rett etter at massene har truffet nedre del av renna (utløpsområdet) har massene en hastighet på 4m/s-5m/s.

Hastigheten på skred med startpunkt 15 cm lenger ned i øvre renne har samme hastighet etter skredet har truffet utløpsområdet som skredene som har startet høyere opp i renna. Det er derfor ikke regnet videre på dette skredet da det vil gi samme resultater som forsøk utløst høyere opp i renna. Dette tyder på at skredet har oppnådd sin maksimale hastighet (terminalhastighet) før det treffer utløpsområdet. Når terminalhastighet er oppnådd vil hastigheten til skredmassene ikke lenger akselerere.

Når massene treffer knekket i renna (overgangen mellom øvre renne og utløpsområde) synker hastigheten i massene med utløpslengden.

Ved bruk av ledevoller med ulik vinkel kastes og retarderes massene i varierende grad opp og langsetter vollen og brukant.

I alle forsøk oppstår det en snøskydel når massene treffer knekken mellom utløpsområdet og øvre renne. Ved alle lengder på bruåpning og vinkel på ledevoller lagres massene opp oppstrøms for tiltaket.

### 7.1 Oppskyllingshøyde ved bruk av forskjellige lysåpninger

Det ble observert at den høyeste oppskyllingen oppstår ved liten bruåpning. Oppskyllingshøyden av skredmasser var dobbelt så høy ved bruåpning på 4 cm i forhold til bruåpning på 8 cm. Oppskyllingen var en god del mindre ved bruåpning på 12 cm i forhold til bruåpning på 8 cm. Forskjellige oppskylling ved bruk av forskjellige bruåpninger med ledevollvinkel på 30° er vist i henholdsvis figur 7.1, 7.2, og figur 7.3.



Figur 7.1: Oppskylling ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel  $30^\circ$  (Oppskyllingshøyde 6,20 cm)



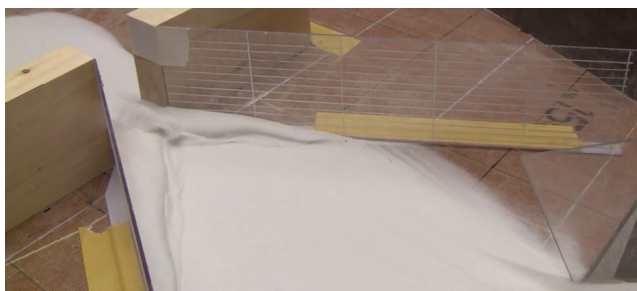
Figur 7.2: Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  (Oppskyllingshøyde 3,10 cm)



Figur 7.3: Oppskylling ved bruåpning på 12 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  (Oppskyllingshøyde 2,75 cm)

## 7.2 Oppskyllingshøyder ved bruk av ulike vinkler på ledevoller

Det ble observert at den høyeste oppskyllingen oppstår ved stor vinkel på ledevoll. Dette gjelder for alle lengder på bruåpning. Det ble observert at oppskyllingen var mindre desto mindre vinklene på ledevollene var. Forskjellige oppskylling ved bruk av forskjellige vinkler på ledevoller med bruåpning på 8 cm er vist i henholdsvis figur 7.4, figur 7.5, og figur 7.6.



Figur 7.4: Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på 30° (Oppskyllingshøyde 3,10 cm)



Figur 7.5: Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på 20° (Oppskyllingshøyde 2,90 cm)



Figur 7.6: Oppskylling ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på 10° (Oppskyllingshøyde 2,10 cm)

### 7.3 Hvor og når oppstår høyeste oppskylling

I alle forsøkene med unntak av forsøk med bruåpning 4 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  er den høyeste oppskyllingen like høy på ledevoll og på brukant. I forsøk med bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  oppstår den høyeste oppskyllingen på ledevollen.

Ut ifra mine forsøk kan det se ut som at vinkel på ledevoll og lengde på bruåpning ikke påvirker tiden det tar fra skredmasser treffer bruåpning til høyeste oppskylling finner sted.

### 7.4 Tilbakeslagsbølge ved ulik bruåpning

Det ble observert at lengden på tilbakeslagsbølgen er større desto mindre bruåpning en har. Dette er vist ved ledevollvinkel på  $30^\circ$  i henholdsvis figur 7.7, figur 7.8 og figur 7.9.



Figur 7.7: Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  (lengde 18 cm)



Figur 7.8: Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 8 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  (lengde 11 cm)



Figur 7.9: Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 12 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  (lengde 2 cm)

## 7.5 Tilbakeslagsbølge ved ulike vinkler på ledevoll

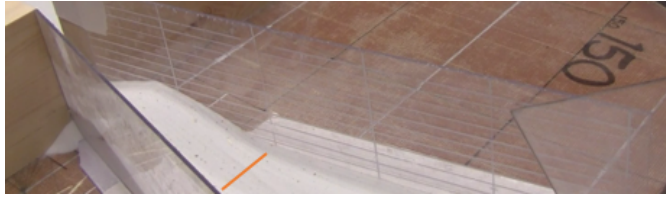
Det ble observert at lengden på tilbakeslagsbølgen er større jo større vinkel en har på ledevoll. Dette er vist ved bruåpning 4 cm i henholdsvis figur 7.10, figur 7.11 og figur 7.12. Ved  $10^\circ$  vinkel på ledevoll og 8cm og 12cm bruåpning ble det ikke registrert noen tilbakeslagsbølge.



Figur 7.10: Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på  $30^\circ$  (lengde 18 cm)



Figur 7.11: Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på  $20^\circ$  (lengde 17 cm)



Figur 7.12: Lengde på tilbakeslagsbølge ved bruåpning på 4 cm og ledevollvinkel på  $10^\circ$  (lengde 12 cm)

## 7.6 Uten voller tilbakeskylling og oppskylling

Når det ikke er benyttet ledevoller har skredet skylt høyere opp eller like høyt opp på brukanten som ved bruk av ledevoller med vinkel  $30^\circ$  bortsett fra ved bruåpning på 4 cm og ledevoll på  $30^\circ$ .

Tilbakeskyllingen av skredet er kortere enn ved bruk av ledevoller med vinkel på  $30^\circ$ , bortsett fra ved bruåpning på 12 cm.

Høyeste oppskylling oppstår tidligere når det ikke er benyttet ledevoller.

## 7.7 Forsøk med dobbel masse

Forsøkene med dobbel masse skyller lenger opp over vollen enn skred med halvparten av denne massen. Det tar lenger tid før høyeste oppskylling oppstår med dobbel masse, og lengden på tilbakeskyllingsbølgen er lengere.

## 7.8 Skred med lavere startpunkt

Skredet som startet lenger ned i renna enn de andre skredene oppførte seg likt som skred som startet høyere opp. Det vil derfor ikke bli sett mer på dette skredet i denne oppgaven.

## 7.9 Høyde på masser i forkant av brukanten når skredsituasjonen er over

Høyden på massene som ligger igjen etter skredet har gått vil være mindre jo mindre vinkel en har på ledevollene.

Større bruåpning gir lavere høyde på masser etter skredet har gått.



## 8 | Resultat

Modellforsøkene som er gjennomført vil gi en indikator på når og hvordan tilbakeskylling oppstår og hvordan en bør konstruere ledevoller og bruåpning for å hindre dette. Resultatene vil også vise hvordan vinkler på ledevoller og lengde på bruåpning påvirker oppskyllingshøyde.

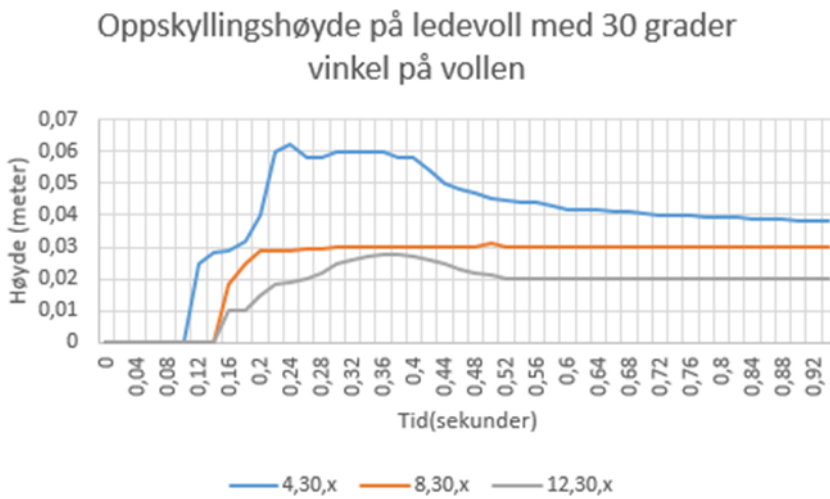
Det er ikke gjort videre utarbeidelse av resultater for skred som starter lenger ned i øvre renne (forsøk 8,20,x,s) da dette forsøket oppførte seg likt som forsøk som startet høyere opp i renna (forsøk 8,20,x). Alle resultater er funnet ved å se på filmer tatt med BAT-kamera. Filmene fra de to andre kameraene (rødt kamera og webkamera på stativ) er brukt som kontroll. I de forsøkene der det er gjort tre repetisjoner er resultatene for repetisjon to og tre brukt som kontroll opp imot repetisjon nummer en. Ved å se på repetisjonene for forsøkene viste det seg at alle repetisjoner gav tilnærmet like resultater. Filmene ligger som vedlegg D.

Alle utregninger er gjort i programmet Excel, og dette er vist i vedlagt DVD i vedlegg C. Alle figurer som er vist i dette kapittelet vil være gjengitt i større format i vedlegg C. Som nevnt i kapittelet «Observasjoner» synker hastigheten i massene med utløpslengden når massene treffer knekket i renna (overgangen mellom øvre renne og utløpsområde). Dette kan sees ved hastighetsmålingene i vedlegg C.

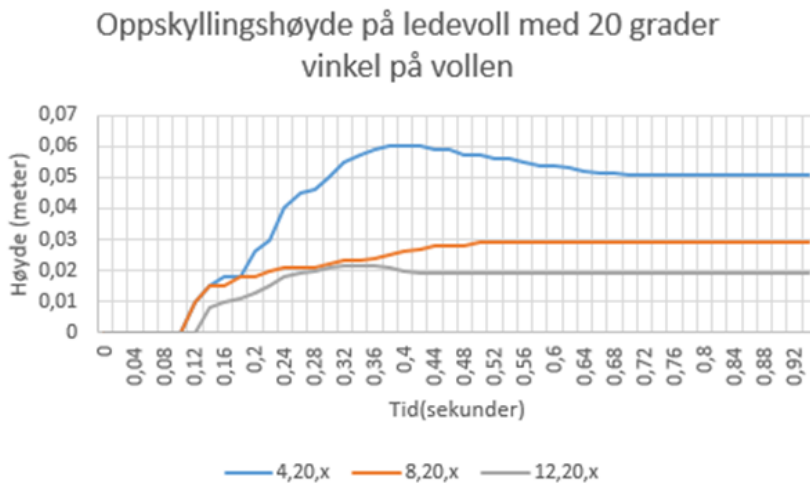
### 8.1 Oppskylling på ledevoll ved ulike lengder på lysåpning under bru

Det er registrert ulike høyder på oppskylling på ledevoll ved ulik åpning på lysåpning under bru. Figur 8.1, figur 8.2 og figur 8.3 under viser ulike høyder på oppskylling over ledevoll ved bruk av ulike lysåpningslengder. En ser ut ifra resultatene at uansett vinkel på ledevoll, så vil oppskyllingshøyden bli større jo mindre lysåpning en har på brua.

Den høyeste oppskyllingen oppstår ved liten bruåpning og den laveste oppskyllingen oppstår ved stor bruåpning. Dette gjelder for alle de tre vinklene på ledevoller som forsøkene er kjørt med. Høyeste oppskylling ved bruåpning på 4 cm i forhold til bruåpning på 8 cm er dobbelt så høy eller høyere ved alle vinkler på ledevoller.

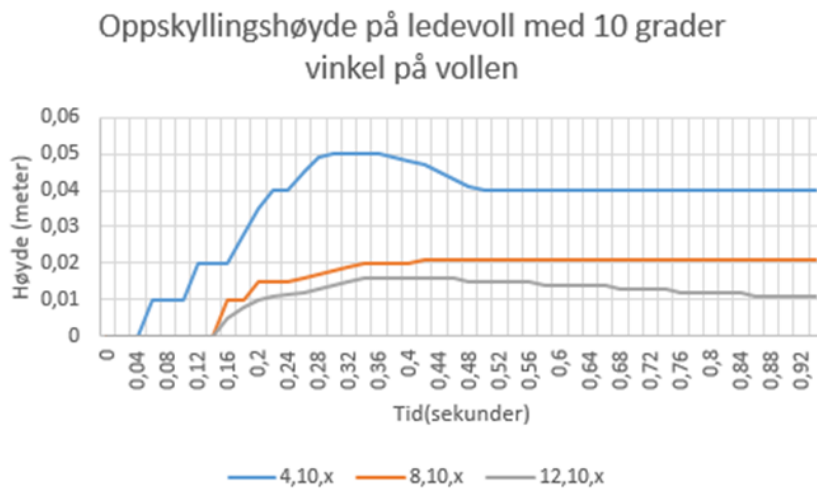


Figur 8.1: Oppskylling på ledevoll med 30° og ulike lengder for lysåpning under bru.



Figur 8.2: Oppskylling på ledevoll med 20° og ulike lengder for lysåpning under bru.

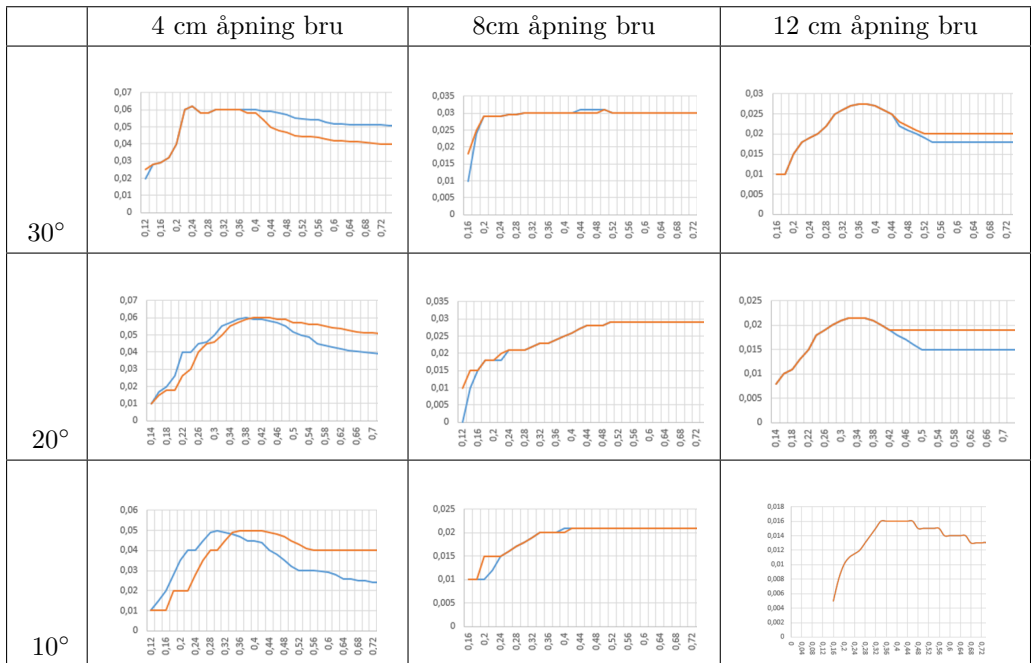
## 8.1. Oppskylling på ledevoll ved ulike lengder på lysåpning under bru



Figur 8.3: Oppskylling på ledevoll med 10° og ulike lengder for lysåpning under bru.

## 8.2 Oppskylling på brukant i forhold til oppskylling på ledevoll

Oppskyllingen som skjer ved brukanten er ikke alltid av samme høyde som høyeste oppskylling på ledevollen. En kan se forskjell i høyde på høyeste oppskylling på ledevoll og oppskylling på brukant i tabell 8.1.



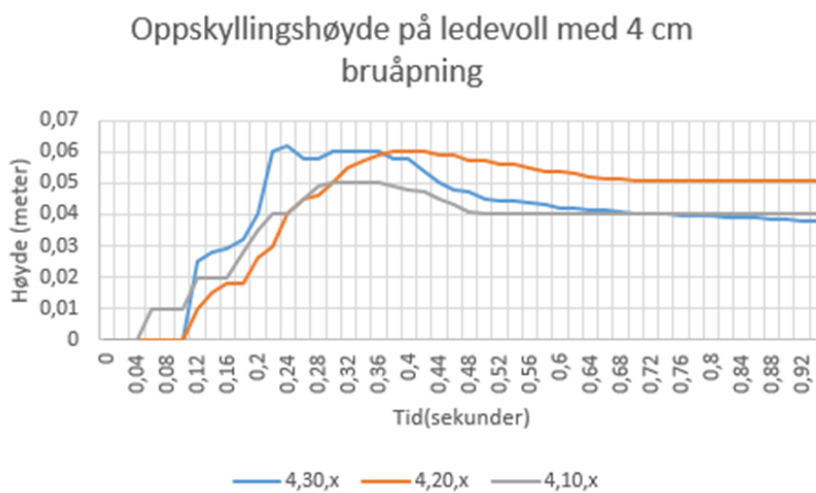
Tabell 8.1: Y-aksen viser høyde på oppskyllingen målt i meter. Høyden er ikke lik for de ulike diagrammene. X-aksen viser tiden målt i sekunder. Den blå linjen viser oppskyllingshøyden ved brukanten, og den orange linjen viser oppskyllingshøyden på ledevollene. Tid på alle grafer er 0,72 sekunder. Gradtallene på venstre side av tabellen angir vinkel på ledevoller.

Høyden på oppskyllingen varierer ned vinkler på ledevoll og lysåpning under bru. Ut ifra grafen kan en se at høyeste oppskylling på ledevoll oppstår samtidig eller etter at høyeste oppskylling på brukant har oppstått. Det vil si at enten så oppstår høyeste oppskylling for brukant og ledevoll samtidig, eller så oppstår høyeste oppskylling på brukant først.

For fire av tilfellene over vil høyden på massene som ligger igjen etter skredet har gått være høyest ved ledevoll. På ett av tilfellene vil høyden av massene etter skredet har gått være høyest på brukant. I resten av tilfellene vil høyden være lik på begge steder.

## 8.3 Oppskylling på ledevoll ved ulike vinkler på ledevoller

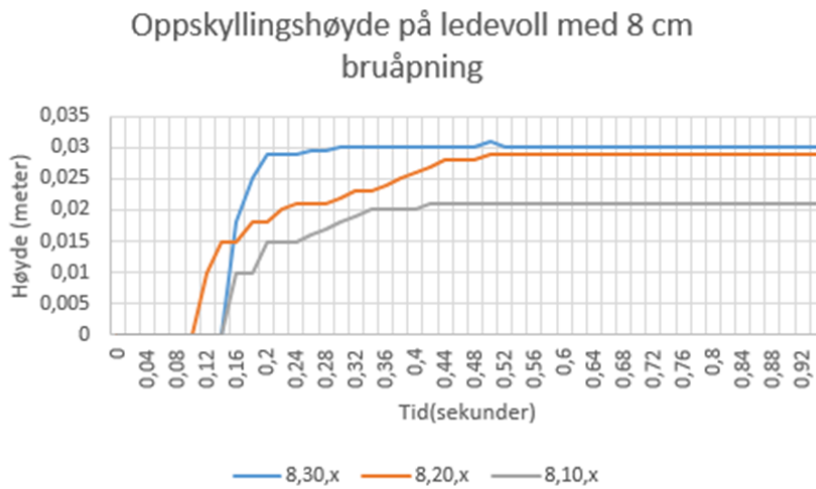
Ut ifra resultatene er det registrert at oppskyllingshøyden varierer etter vinkel på ledevoll. Dette vises i figur 8.4, figur 8.5 og figur 8.6.



Figur 8.4: Oppskyllingshøyde ved 4 cm bruåpning og varierende vinkel på ledevoller.

For bruåpning på 4 cm er høyden på oppskyllingen på ledevoll:

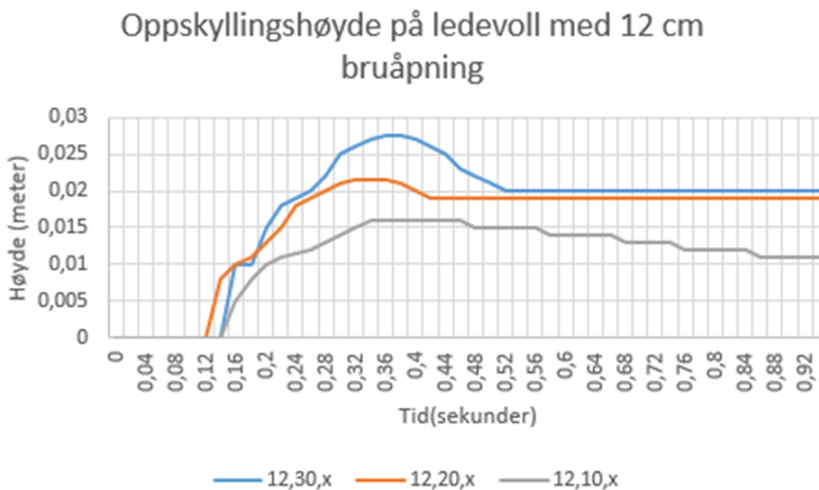
- 0,062 meter ved vinkel på 30°
- 0,060 meter ved vinkel på 20°
- 0,050 meter ved vinkel på 10°



Figur 8.5: Oppskyllingshøyde ved 8 cm bruåpning og varierende vinkel på ledevoller.

For bruåpning på 8 cm er høyden på oppskyllingen på ledevoll:

- 0,031 meter ved vinkel på  $30^\circ$
- 0,029 meter ved vinkel på  $20^\circ$
- 0,021 meter ved vinkel på  $10^\circ$



Figur 8.6: Oppskyllingshøyde ved 12 cm bruåpning og varierende vinkel på ledevoller.

For bruåpning på 12 cm er høyden på oppskyllingen på ledevoll:

- 0,028 meter ved vinkel på 30°
- 0,022 meter ved vinkel på 20°
- 0,016 meter ved vinkel på 10°

For alle lengder på bruåpning øker oppskyllingshøyden etter hvert som vinkelen på ledevoll øker.

## 8.4 Hvor og når oppstår høyeste oppskylling

Det ble målt hvor og når høyeste oppskylling oppstår. Tiden for høyeste oppskylling er målt fra det tidspunktet skredet treffer bruåpningen. Dette er vist i tabell 8.2.

Bruåpning (cm)	Vinkel på ledevoll (°)	Tid (sekunder)	Sted
4	30	0,12	På ledevoll
4	20	0,26	Ledevoll og brukant
4	10	0,18	Ledevoll og brukant
8	30	0,28	Ledevoll og brukant
8	20	0,36	Ledevoll og brukant
8	10	0,18	Ledevoll og brukant
12	30	0,22	Ledevoll og brukant
12	20	0,2	Ledevoll og brukant
12	10	0,2	Ledevoll og brukant

Tabell 8.2: Tid og sted for høyeste oppskylling

Det er bare for forsøk med 4 cm bruåpning og 30° vinkel på ledevoll at høyeste oppskylling som oppstår skjer på ledevoll. I alle andre forsøk er den maksimale høyden på oppskylling lik for ledevoll og ved bruåpning. Det som skiller høyeste oppskylling i de andre forsøkene er tiden den oppstår på. Dette er beskrevet i kapittelet «Oppskylling på brukant i forhold til oppskylling på ledevoll».

Ut ifra mine resultater ser jeg ingen klar sammenheng over tid for høyeste oppskylling, vinkel på ledevoll og bruåpning.

## 8.5 Tilbakeslagsbølge ved ulik bruåpning og vinkel på ledevoll

Det ble målt lengder på tilbakeslagsbølgen for de ulike oppsettene. Resultatet av dette er vist i tabell 8.3.

Bruåpning (cm)	Vinkel på ledevoll (°)	Lengde på tilbakeslagsbølge
4	30	0,18 meter
4	20	0,17 meter
4	10	0,12 meter
8	30	0,11 meter
8	20	0,08 meter
8	10	Ingen tilbakeslagsbølge
12	30	0,02 meter
12	20	0,02 meter
12	10	Ingen tilbakeslagsbølge

Tabell 8.3: Lengde på tilbakeslagsbølger



## 8.6 Bølgetopp og bølgefront for tilbakeslagsbølge

I tabell 8.4 kan en se utviklingen av bølgetopp og bølgefront på tilbakeslagsbølgen. Bølgetoppen starter der hvor massene treffer brua. Dette vil være ved lengden 1,82m. Starten av bølgetoppen og bølgefronten beveger seg fra nederst til høyre i grafen og på skrått oppover mot venstre.

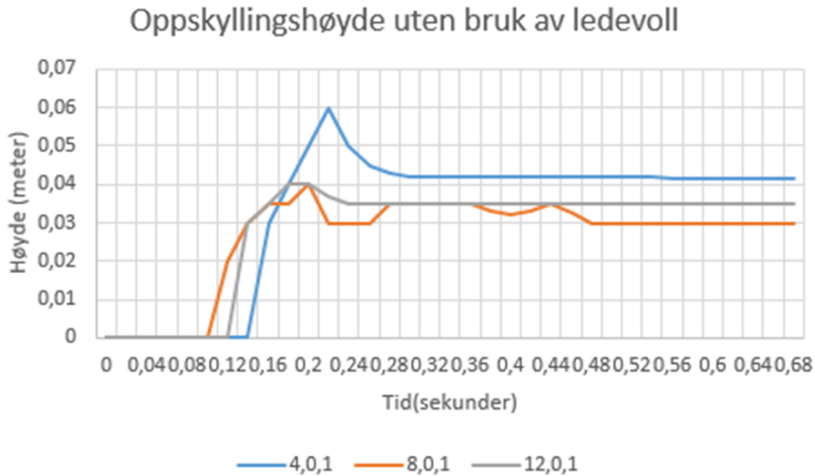
	4 cm åpning bru	8cm åpning bru	12 cm åpning bru
30°			
20°			
10°		Ingen tilbakeskylling	Ingen tilbakeskylling

Tabell 8.4: Y-aksen viser høyde på oppskyllingen målt i meter. Høyden er lik for de ulike diagrammene. X-aksen viser lengden på nedre del av renna målt i meter, der bru er plassert der kurvene starter på punkt 1,82. Den blå linjen viser bølgefrontens posisjon, og den orange linjen viser bølgetoppens posisjon. Gradtallene på venstre side av tabellen angir vinkel på ledevoller.

En ser ut ifra grafen i tabell 8.4 at avstanden mellom bølgetopp og bølgefront øker etter hvert som åpningen på brua minker. Bølgefronten beveger seg foran bølgetoppen. Forsøk med liten bruåpning viser større avstand mellom bølgetopp og bølgefront.

## 8.7 Uten voller, tilbakeskylling og oppskylling

Det ble gjort forsøk uten bruk av ledevoller. Figur 8.7 viser at det vil oppstå høyest oppskylling her også ved bruåpning på 4 cm.



Figur 8.7: Oppskyllingshøyder uten bruk av ledevoll med ulike bruåpninger

Høyeste oppskylling uten bruk av ledevoller er:

- 0,06 meter ved bruåpning på 4 cm
- 0,04 meter ved bruåpning på 8 cm
- 0,04 meter ved bruåpning på 12 cm

Dette viser at det bare er ved bruåpning på 4 cm at oppskyllingshøyden er større ved bruk av ledevoll på 30°. I alle andre forsøk er oppskyllingshøyden større når det ikke benyttes ledevoll.

Det oppstår tilbakeskylling for alle forsøk når det ikke er benyttet ledevoller. Forsøkene viser at i disse tilfellene vil bølgetoppen for tilbakeslagsbølgen bli stående i bruåpningen, mens fronten av tilbakeslagsbølgen vil bevege seg oppover i skredløpet. Tabell 8.5 viser hvor lang tid det tar fra skredmassene treffer brukanten til høyeste oppskylling oppstår. Den viser også lengden på tilbakeskyllingsbølgene.

Det tar kortere tid fra skredmasser treffer brukant til høyeste oppskylling oppstår når det ikke er benyttet ledevoller.

Ved bruåpning på 4 cm vil lengden på tilbakeskyllingsbølgen være kortere ved bruk av ledevoller. Ved bruåpning på 8 cm vil bølgen være kortere uten bruk av ledevoller

Bruåpning	Lengde på tilbakeskyllingsbølge	Tid fra første treff til høyeste oppskylling oppstår
4 cm	0,09 meter	0,06 sekunder
8 cm	0,09 meter	0,06 sekunder
12 cm	0,08 meter	0,06 sekunder

Tabell 8.5: Lengde og tid på tilbakeslagsbølge for forsøk uten ledevoll

bare ved vinkel på  $30^\circ$ . For bruåpning på 12 cm er tilbakeskyllingsbølgen lengere når det ikke benyttes ledevoll.

## 8.8 Forsøk med dobbel masse

Noen data fra forsøk med dobbel masse (6 kg) er vist i tabell 8.6. Der er verdiene sammenlignet med verdier for forsøk med 8 cm åpning,  $20^\circ$  vinkel på ledevoll og masser på 3 kg. Tid før høyeste oppskylling vil si den tiden det tar fra skredmassene møter bruåpningen til høyeste oppskylling oppstår

Bru-åpning	Vinkel	Masse	Lengde på tilbakeslagsbølge	Høyeste oppskylling	Sted for høyeste oppskylling	Tid før høyeste oppskylling
8 cm	$20^0$	3 kg	0,08m	0,029m	-	0,36 sek
8 cm	$20^0$	6 kg	0,11m	0,051m	Ledevoll	0,84 sek

Tabell 8.6: Sammenligning av forsøk med dobbel masse

Alle verdier for forsøk med dobbel masse er større enn forsøk med halvparten av denne massen. Det tar lenger tid før høyeste oppskylling oppstår med denne massen, og lengden av tilbakeskyllingsbølgen er større.

Høyeste oppskylling ved denne situasjonen vil skje på ledevoll og ikke ved brukant slik som ved bruk av samme oppstillingen og 3 kg masser.

## 8.9 Høyde på masser i forkant av brukanten når skredsituasjonen er over

Høyden på tilbakeskyllingsbølgen vil være lik høyden på massene etter skredsituasjonen er over. Posisjonen til bruåpningen er, som nevnt i metodekapittelet, på merket 1,82 meter. Mengde og posisjon av masser etter skredsituasjonen er over, er vist i tabell 8.7.

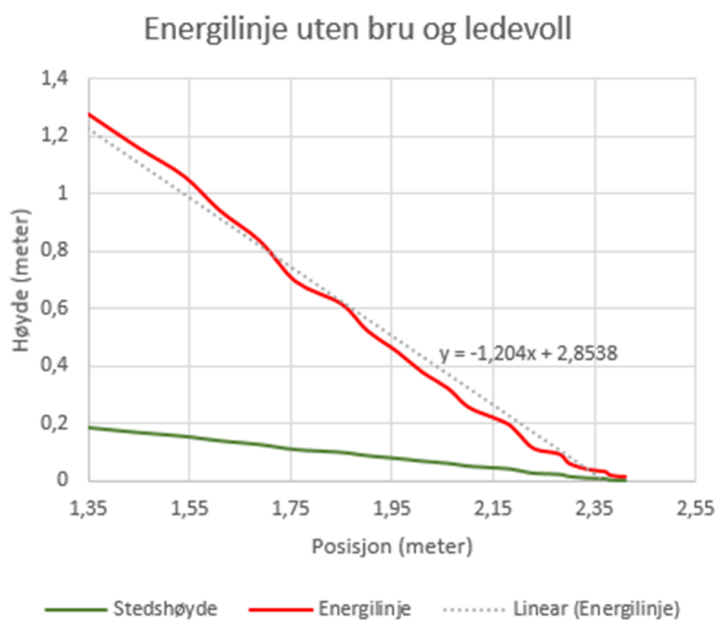
Bruåpning	Vinkel ledevoll	Masse	Høyde på masser etter skredsituasjonen er over	Posisjon av masser
4 cm	30 <sup>0</sup>	3 kg	0,05 meter	1,79 meter
4 cm	20 <sup>0</sup>	3 kg	0,051 meter	1,80 meter
4 cm	10 <sup>0</sup>	3 kg	0,040 meter	1,77 meter
8 cm	30 <sup>0</sup>	3 kg	0,030 meter	1,71 meter
8 cm	20 <sup>0</sup>	3 kg	0,029 meter	1,79 meter
8 cm	10 <sup>0</sup>	3 kg	0,021 meter	1,82 meter
12 cm	30 <sup>0</sup>	3 kg	0,020 meter	1,81 meter
12 cm	20 <sup>0</sup>	3 kg	0,019 meter	1,81 meter
12 cm	10 <sup>0</sup>	3 kg	0,011 meter	1,82 meter
4 cm	Ingen ledevoll	3 kg	0,042 meter	1,82 meter
8 cm	Ingen ledevoll	3 kg	0,030 meter	1,82 meter
12 cm	Ingen ledevoll	3 kg	0,035 meter	1,82 meter
8 cm	20 <sup>0</sup>	6 kg	0,050 meter	1,77 meter

Tabell 8.7: Høyde og posisjon av gjenliggende masser når skredsituasjonen er over

Resultatene viser at høyden på gjenliggende masser vil være mindre ved små vinkler på ledevollene enn ved store vinkler på ledevollene. Resultatene viser også at mindre bruåpning gir større høyde på gjenliggende masser.

## 8.10 Sammenligning av energilinjer

Data fra målingene av skredet «Utløpslengde» ble regnet ut ved hjelp av utregninger av hastigheter i posisjoner fra filmene. Dette er vist i figur 8.8.



Figur 8.8: Beregning av energilinje for skred uten bru og ledevoll.



# 9 | Analyser og diskusjon

Ut ifra mine resultater ser vi at at ved bruk av ledevoller med liten vinkel vil oppskyllingshøyden være mindre. Resultatene viser også at ved stor lysåpning under brua vil oppskyllingshøydene bli mindre.

Høyden på gjenliggende masser vil være større desto større vinkel en har på ledevoll og desto mindre lysåpning en har under brua.

## 9.1 Skalering av modellen

Det ble brukt skala 1:100 i modellforsøkene. Det vil si at en meter i modellen tilsvarer 100 meter i naturen.

Det er i forsøkene brukt tre og seks kilo masser. Ved en masser på 3 kg har Ballotini et volum som er vist i tabell 9.1. Tetthet på Ballotini er  $1500 \text{ kg/m}^3$ , dette er gitt fra econova (2010). For å skalere opp volum i modellen til volum i virkeligheten må dette prinsipielt ganges med målestokken i tredje potens.

Tetthet ( $\text{kg/m}^3$ )	Masse (kg)	Volum ( $\text{m}^3$ )	Skalert (1:100) ( $\text{m}^3$ )
1500	3	0,002	2000
1500	6	0,004	4000

Tabell 9.1: Volum, masse og tetthet av Ballotini

Tørr snø har en densitet på om lag 200-300  $\text{kg/m}^3$ . Et lite-middels stort skred har volum på 1000-10 000  $\text{m}^3$  (NGI, 2013), dette er beskrevet i tabell 9.2. Det vil si at forsøkene som er gjennomført i virkeligheten er kategorisert som små til middels store skred.

Høyden på oppskylling i de ulike forsøkene ble målt. Disse hadde en høyde på 0,016-0,062 meter. Med en modellskala på 1:100 vil dette si en oppskylling på 1,6-6,2 meter i naturen.

Hastighetene som er målt i dette forsøket ligger på 5 m/s i «knekken» på renna. Fra «knekken» og nedover mot bruåpningen synker hastigheten til 0 m/s. Frudes tall er:  $Fr = (v/gh)*1/2$ . Dette vil si at en må gange opp hastigheten med kvadratrotten av målestokken for å regne om hastighet fra modell til hastighet i virkeligheten. En hastighet på 5 m/s vil tilsvare en hastighet på 50 m/s i naturen. 50m/s tilsvarer 180 km/t. Dette vil være normal hastighet for et løssnøskred i virkeligheten (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2011a).

Lysåpningene på brua er henholdsvis 4 cm, 8 cm og 12 cm. Dette vil tilsvare 4 meter, 8 meter og 12 meter i virkeligheten. Høyden på bruåpningen er 13,5 cm.

Størrelse	Utløpslengde	Skadepotensial	Volum
1	Utglijding	Lokal snøforflytning uten fare for omgivelsene. Relativt ufarlig for skiløpere	Utløp < 50 m Volum < 100 m <sup>3</sup>
2	Små skred	Skredet stopper i fjellsiden Kan begrave, skade eller drepe en person	Utløp < 100 m Volum < 1000 m <sup>3</sup>
3	Middels stort skred	Skredet når frem til foten av fjellsiden. Kan begrave og ødelegge biler eller skade store lastebiler. Kan skade mindre bygninger og skog.	Utløp < 1000 m Volum < 10000 m <sup>3</sup>
4	Stort skred	Skredet når frem til slakt terreng. Kan nå frem helt til dalbunnen. Kan begrave og ødelegge store biler og tog. Kan ødelegge større bygninger og skogsområder.	Utløp > 1000 m Volum > 10000 m <sup>3</sup>

Tabell 9.2: Skredstørrelser (NGI, 2013)

Dette tilsvarer 13,5 meter i virkeligheten. Det er anbefalt at bygging av bru der skredmasser skal passere under brua burde ha en lysåpning på minimum 100 m<sup>2</sup>. Modellen oppfyller denne anbefalingen ved forsøk med 8 cm og 12 cm åpning da åpningen av brua skalert opp blir 108 m<sup>2</sup> og 162 m<sup>2</sup>. Forsøk med bruåpning 4 cm gir en lysåpning på 54 m<sup>2</sup> og det er i forsøk med denne lysåpningen at en har fått resultater med de høyeste oppskyllingshøydene.

For snøskred varierer skredhastigheten vanligvis mellom 10 m/s til 30 m/s der det er aktuelt å bruke ledevoller. I området der ledevollene er plassert i disse forsøkene stemmer dette overens med hastighetene som er registrert her, da hastigheten synker fra 50 m/s og ned til 0 m/s i området mellom knekken på renna og bruåpningen. Detaljerte data for hastigheter vises i DVD i vedlegg C Det betyr at modellen viser en sannsynlig hendelse i naturen der det er benyttet ledevoller.

Dette viser at modellforsøkene som er gjort viser en realistisk skredsituasjon når en ser på beregninger av volum på masser og hastigheter på skred.

## 9.2 Diskusjon av resultatene

Modellforsøkene viser at oppskyllingshøyden, tilbakeskyllingslengden og forholdet mellom toppen og fronten av tilbakeskyllingsbølgen er avhengig av vinkel på ledevoller og lysåpning under brua. Høyden på gjenliggende masser i forkant av brua er også avhengig av disse to faktorene. Resultatene gir ingen klar indikasjon på hvordan høyden på gjenliggende masser blir påvirket av lengden på lysåpning under



bru når det ikke er benyttet ledevoller.

Høyden for gjennliggende masser ved forsøk 4,20,x er større enn ved forsøket 4,30,x. Dette strider imot de andre forsøkene, da alle andre forsøk har vist at jo større vinkel en har på ledevoll, jo større blir høyden for gjenliggende masser. Her kan det ha skjedd avlesningsfeil, eller så kan resultatet tyde på at med så liten bruåpning og store vinkler på ledevoll så er maksimal høyde for gjenliggende masser oppnådd med en vinkel på 20°.

De 11 første forsøkene ble gjennomført med tre repetisjoner. Det ble sett igjennom filmer fra disse 11 forsøkene og alle tre repetisjoner. Repetisjonene av samme forsøk viste seg å være tilnærmet like. Det ble derfor valgt å ikke kjøre de resterende forsøkene med repetisjoner.

Hastigheter for skredmasser ble funnet ved å registrere strekning og tid for masser for hvert 0,02 sekund. Hastigheten ble regnet som strekning på tid for hvert 0,02 sekund.

De samlede resultatene vises i tabell 9.3.

Åpning (cm)	Vinkel Ledevoll (°)	Masse (kg)	Lengde tilbake-skyllings-bølge (m)	Høyeste opp-skylling (m)	Sted (ledevoll eller bru)	Tid fra første treff til høyeste opp-skylling (sekunder)	Høyde på masser etter skred-situasjonen er over (m)
4	30	3	0,18	0,062	ledevoll	0,12	0,05
4	20	3	0,17	0,06	lik	0,26	0,051
4	10	3	0,12	0,05	lik	0,18	0,04
8	30	3	0,11	0,031	lik	0,28	0,03
8	20	3	0,08	0,029	lik	0,36	0,029
8	10	3	-	0,021	lik	0,18	0,021
12	30	3	0,02	0,028	lik	0,22	0,02
12	20	3	0,02	0,022	lik	0,2	0,019
12	10	3	-	0,016	lik	0,2	0,011
8	20	6	0,11	0,051	ledevoll	0,84	0,05
4	-	3	0,09	0,06	bru	0,06	0,042
8	-	3	0,09	0,04	bru	0,06	0,03
12	-	3	0,08	0,04	bru	0,06	0,035
Ingen bru	-	3	-	-	-	-	-

Tabell 9.3: Sammenstilling av alle resultater

En kan se at der det oppstår tilbakeskylling vil høyden på masser etter endt skred-

situasjon være høyere enn der det ikke oppstår tilbakeskylling. Dette trenger ikke nødvendigvis å ha noe å gjøre med om det har oppstått tilbakeskylling. Det kan heller ha noe å gjøre med vinkel på ledevoll og lysåpning under bru.

En ser at der det oppstår en stor tilbakeskyllingslengde vil høyden på gjenliggende masser være større.

Ved bruk av liten lysåpning under bru vil massene ha mindre passasje å trenge igjennom. Dette fører til at større masser må passere lysåpningen samtidig, og høyden på oppskylling og gjenliggende masser vil derfor bli større.

Forsøkene viser tydelig at små vinkler på ledevollene gir en lavere høyde på gjenliggende masser når skredsituasjonen er over. Det er tidligere nevnt at der skredet møter ledevollene må avstanden mellom vollene være lik bredden av skredet for at skredet skal bli snevret inn med ledevollene. Med små vinkler på ledevoller må ledevollene trekkes langt opp i skredområdet for å oppnå en avstand imellom seg som er lik bredden av skredet. Dette vil være dyrt og vanskelig å bygge, og en må derfor finne et kompromiss mellom skredets bredde og vinkel og lengde på ledevoller.

### 9.3 Sammenligning av energilinjer

Det ble gjort en beregning av energilinje for forsøket uten tiltak. Dette vises i vedlegg C. Helning på energilinje for utløpsområdet til skred ligger vanligvis på 0,4:1 (Vegdirektoratet, 2012). Jeg hadde forventet å få en helning på energilinjen i nærheten av beskrevet verdi.

I mine beregninger er helningen på energilinjen 1,3:1. Dette fører til at energilinjen ikke blir sammenfallende med energilinjer for naturlige skred. Dette skyldes sannsynligvis forskjell i ruhet mellom modell og i naturen. Det kan også forekomme avvik på grunn av forskjell i materiale. Den interne friksjonen vil også være ulik ved bruk av Ballotini og snø.

### 9.4 Etterprøvbarehet av forsøkene

Det vil være enkelt å etterprøve resultatene da forklaring av modellen og filmer fra forsøk er vist i oppgaven. Metode er beskrevet i detalj og materialet er oppgitt med masse og tetthet.

### 9.5 Feilkilder

Ved gjennomføring av forsøkene kom det «rusk» i skredmaterialet. Ballotiniene ble også utsatt for fukt da forsøkene ble gjennomført i et laboratorium med en viss

luftfuktighet. Det ble forsøkt å holde skredmaterialene fri for «rusk» og fukt. Ballotinen er benyttet i tidligere forsøk og hadde derfor en del fremmede partikler fra før av. Det kan også ha oppstått slitasje på overflatene til forsøksmaterialet.

Utløsningen av skredmaterialene skjer i dette forsøket ved at en plate trekkes opp fra en beholder. Massene som utløses er løse og har ingen bindinger. Naturlige ras med tørrsnø skjer som regel ved at noen masser løsner og drar med seg andre masser. Utløsningen av skredmasser vil derfor ikke være lik i forsøkene som er gjennomført og i naturen.

Hastighet og posisjon av masser er gjort ved avlesning av videoer. Dette gir en usikkerhet ved avlesningen. Det var ved avlesning av filmer vanskelig å se forskjell på snøskydelen og fronten av massene, og her kan det derfor ved noen forsøk være avlest feil verdier.

Knekken på renna mellom øvre renne og utløpsområdet vil ikke være like tydelig markert i naturen som i modellen. Dette gjør at oppførselen til massene kan avvike fra oppførsel i naturlige skred.

Oppmåling av masser i forsøkene har vært nøyaktige med noen grams unøyaktighet. Det har vært noen lekkasjer i modellen som har gjort at deler av massene har forsvunnet under forsøkene.

Modellen er en nedskalert kopi av naturen og avlesninger av posisjoner og høyder i forsøkene kan derfor utgjøre en usikkerhet. Med en skala på 1:100 i forsøkene kan skalaeffekten påvirke resultatet.

Det er i hovedsak avlest verdier fra kamera som peker til venstre på modellen. Det kan utgjøre en usikkerhet at masser på høyre side av modellen ikke er avlest med samme presisjon som masser på venstre side.



# 10 | Konklusjon

Dette prosjektet omfattet planlegging av forsøksprogram, utførelse av forsøk og analysering av data.

De generelle observasjonene fra forsøkene viser at desto større vinkel en har på ledevoll, desto høyere vil skredet skylle opp og høyder på gjenliggende masser vil være større. Mindre åpning på ledevoll gir større oppskyllingshøyder og større høyde på gjenliggende masser.

Desto større vinkel en har på ledevoller, og desto mindre bredde en har av åpningen under brua, jo lenger vil tilbakeskyllingsbølgen gå. Ved lang tilbakeskyllingsbølge vil høyden på gjenliggende masser være større.

Større skredvolum gir høyere oppskylling, større høyde på gjenliggende masser, lenger tilbakeskyllingsbølge og lenger tid før høyeste oppskylling oppstår.

Ut ifra forsøkene som er gjennomført i dette prosjektet kan det se ut som at vinkel på ledevoll og lengde på bruåpning ikke påvirker tiden det tar fra skredmasser treffer bruåpning til høyeste oppskylling oppstår.

Forsøkene skisserer en del prinsipper for hvordan en bør utforme ledevoller og bruåpninger for å unngå store høyder på masser som ligger igjen etter skredsituasjonen er over. Disse prinsippene er summert opp i punktene under:

- Ved liten vinkel på ledevoll vil høyden av gjenliggende masser etter endt skredsituasjon være mindre enn ved bruk av ledevoller med stor vinkel.
- Tilbakeskyllingen øker i lengde og høyde ved bruk av ledevoller med store vinkler.
- Liten lysåpning under bru fører til større oppskyllingshøyder og større lengde på tilbakeskyllingsbølgen.
- Avstand mellom bølgetopp og bølgefront på tilbakeslagsbølge øker etter hvert som bredden av åpningen under bru minker
- Når det ikke benyttes ledevoller vil oppskyllingshøyden være høyere ved bruåpning på 8cm og 12 cm enn ved bruk av ledevoller.
- Ved bruåpning med bredde på 4 cm vil oppskyllingshøyden være større når det ikke er benyttet ledevoller enn når det er benyttet ledevoll med vinkel på 10°.
- Når det ikke er benyttet ledevoller vil høyeste oppskylling oppstå tidligere enn ved bruk av ledevoller.
- For alle forsøk der det ikke er benyttet ledevoll vil det oppstå tilbakeskylling.

Resultatene fra forsøkene som er gjort gir en indikator på hvordan en bør utforme ledevoller og lysåpninger under bru for å unngå at store masser skal samles opp på

fremsiden av brua. Resultatene gir også en indikator på når tilbakeskyllingsbølger oppstår og hvordan disse oppfører seg.

# 11 | Videre arbeid

Med resultatene som er funnet i dette prosjektet er det mange sammenhenger og observasjoner som kan gjøres. Ikke alt er dekket av denne rapporten da det ikke har vært tid til dette. Det har gjennom arbeidet med dette prosjektet blitt funnet flere sammenhenger som det kan være interessant å se nærmere på.

Prosjektet er gjort med samme helninger på øvre og nedre del av modellen gjennom hele arbeidet. Det kan være interessant å se på hvordan endringer på helninger i terrenget påvirker bruken av ledevoller med ulik vinkel og bruåpninger med forskjellig bredde. Det vil være nyttig for videre forskning å evaluere bruken av ledevoller i skredterreng med forskjellige helninger og å se hvordan dette påvirker skredets oppførsel.

Som nevnt i oppgaveteksten vil det ofte gå flere skred på samme sted med nærhet i tid og noen ganger rekker man ikke å fjerne masser i forkant av brua før neste skred utløses. Det som ofte skjer er at ved det første skredet samles det opp masse i forkant av brua, og dette kan føre til at det neste skredet kan «klatre» på disse massene og dermed gå over kjørebanelen. Det vil derfor være interessant å gjøre forsøk med to skred oppå hverandre og se på hvordan skredene «klatrer» på hverandre ved ulik bruk av ledevoller og lysåpninger.

Det vil være nyttig å se på nøyaktig posisjon for høyeste oppskylling i forhold til brukanten, og å se på nøyaktig posisjon for gjenliggende masser etter endt skredsituasjon. Dette kan gjøres ut ifra de filmene fra de forsøkene som er gjort i dette prosjektet.

I dette prosjektet er det ikke funnet noen sammenheng mellom vinkler på ledevoller, lengde på bruåpning og tid det tar før største oppskylling oppstår. Det vil være interessant å se om det finnes noen klar sammenheng på dette.

Det ble gjort forsøk med dobling av masser. Resultatene viste at i forsøk med dobbel masse så skyller skredet høyere opp på ledevollene. Det tar lenger tid før høyeste oppskylling oppstår og lengden på tilbakeskyllingsbølgen er lengere. Det hadde vært interessant å se mer på forholdene rundt dette og hvordan de ulike faktorene endrer seg ved endringer av mengde masse.

I dette prosjektet har det ikke vært fokus på utløpslengder etter skredet har truffet bru og ledevoller. Dette er noe en bør vurdere nærmere.

Forsøksprogrammet er utført med Ballotini som forsøksmasse. Ballotini har en densitet på  $1500 \text{ kg/m}^3$  og tørrsnø har en densitet på  $200\text{-}300 \text{ kg/m}^3$ . Det er mulig at resultatene hadde oppført seg annerledes dersom en hadde brukt forsøksmasser med densitet nærmere densiteten til tørrsnø. Mengde av masser som er benyttet tilsvarer størrelsen på et lite til middels stort skred. Det hadde vært interessant å se om sammenhenger mellom vinkler på ledevoller og lengde på bruåpninger hadde

oppført seg annerledes dersom en hadde benyttet større mengder masser slik at dette hadde tilsvart et større snøskred.

Det er ikke gjort noen omfattende dataanalyse for å se på sammenhengen mellom observert oppskylling og formler for beregning av oppskyllingshøyder.

I områder der det er aktuelt å sikre mot snøskred vil hvert terreng karakteriseres forskjellig. En må derfor skreddersy tiltak for hvert enkelt område. Gjennom dette forsøksprogrammet har det ikke blitt utarbeidet noen spesifikke retningslinjer for hvordan en skal utforme og plassere tiltak. Dette bør undersøkes grundigere.



# Bibliografi

- Aas, P. (2012). Vurdering av sikringstiltak mot snøskred. krevet av Pernille Aas ved institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU.
- Brateng, L. (2005). Laboratorieforsøk for utforming av terrengtiltak mot snøskred. Institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU.
- CEM (2002). Costal Engineering Manual- US Army Corps of Engineers EM 1110-2-1100. Chapter 7- Harbor Hydromechanics.
- Econova (2010). Material Safety Data Sheet: BALLOTINI glass beads MGL. Hentet fra: [http://www.eisenwerk-wuerth.de/uploads/media/BALLOTINI\\_glass\\_beads\\_MGL.pdf](http://www.eisenwerk-wuerth.de/uploads/media/BALLOTINI_glass_beads_MGL.pdf). Dato: 30.05.2013.
- Hammersland, E. (2001). Evaluering av rassikringstiltak - Intern rapport nr. 2205. Oslo: Statens vegvesen.
- Hiller og Jenssen (2009). Modellforsøk med flomskred mot bruer. Virkning av bruåpning og ledevoller. Klima og transport rapport nr. 2582. Skrevet av Priska Hiller og Lars Jenssen, Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.
- Lied, K og Kristensen, K (2003). Snøskred. Håndboken om snøskred. Forlag Vett og Viten, Nesbru, Norway. pp.200.
- Multiconsult (2013). Rassikting av Fjordgård i Lenvik kommune. Hentet den 11.april fra: <http://www.lenvik.kommune.no/PageFiles/28254/FjordgSkrevet> av: Sverre Hagen.
- NGI (2013). Snø- og skredleksikon Q-T-Skredstørrelse. Hentet fra: <http://www.ngi.no/no/snoskred/Snoskredleksikon/Snoskredleksikon-Q-T/>. Dato: 30.05.2013. Kontakt: Christian Jaedicke, Fagansvarlig Snøskred.
- Norges vassdrags- og energidirektorat (2011a). Kartlegging og vurdering av skredfare i arealplaner. Vedlegg 2 til NVEs retningslinjer: Flom- og skredfare i arealplaner. Skrevet av: Kalle Kronholm (NGI), Carl Bonnevie Harbitz, Frode Sandersen, Ulrik Domaas og Vidar Kveldsvik.
- Norges vassdrags- og energidirektorat (2011b). Rapport nr 18/2011 Plan for skredfarekartlegging - Delrapport snøskred og sørpeskred. Skrevet av: A. Taurisano og E. Øydvinn.
- SNL (2007). Store Norske Leksikon- Modellforsøk. Hentet fra: <http://snl.no/modellfors>
- The Physics Classroom (2013). Waves-Lesson 3, Behavior of Waves, Reflection, Refraction and Diffraction. Hentet fra: <http://www.physicsclassroom.com/Class/waves/u10l3b.cfm> Dato: 25.05.2013.

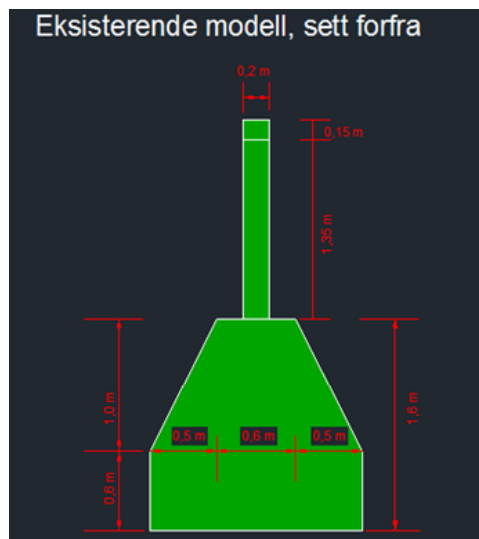
Vegdirektoratet (1993). SNØVERN-Håndbok 167. Skrevet av Harald Norem.

Vegdirektoratet (2011). Veger og snøskred-Håndbok om sikring mot snøskred-Høringsutgave. VD rapport nr. 27. Skrevet av Harald Norem.

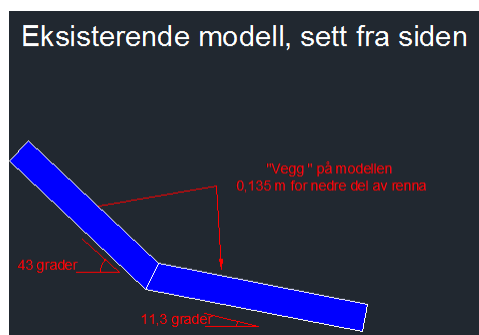
Vegdirektoratet (2012). Flom- og sørpeskred, Høringsutgave av veileder. Skrevet av Harald Norem, NPRA og Frode Sandersen.

# A | Skisser av modellen

## A.1 Eksisterende modell



Figur A.1: Eksisterende modell, sett forfra



Figur A.2: Eksisterende modell, sett fra siden

## A.2 Forsøk med lysåpning 4 cm



Figur A.3: Oppsett med bru med lysåpning 0,04 m og vinkel på ledevoller er 30 grader

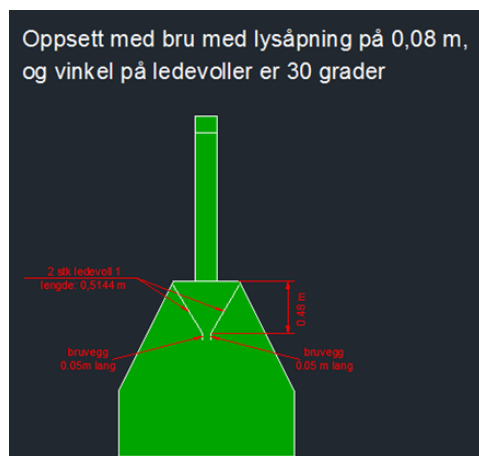


Figur A.4: Oppsett med bru med lysåpning 0,04 m og vinkel på ledevoller er 20 grader

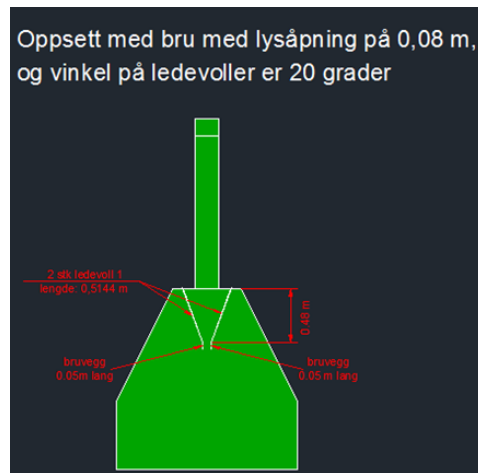


Figur A.5: Oppsett med bru med lysåpning 0,04 m og vinkel på ledevoller er 10 grader

### A.3 Forsøk med lysåpning 8 cm



Figur A.6: Oppsett med bru med lysåpning 0,08 m og vinkel på ledevoller er 30 grader

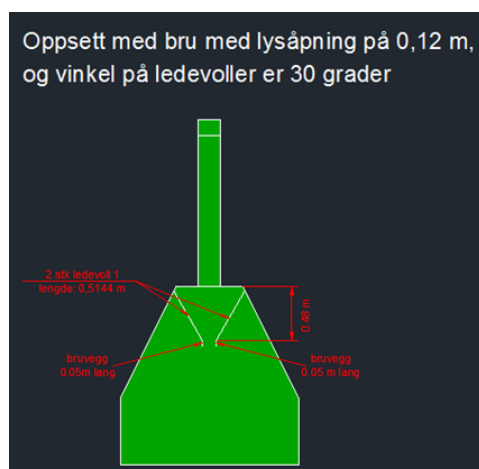


Figur A.7: Oppsett med bru med lysåpning 0,08 m og vinkel på ledevoller er 20 grader

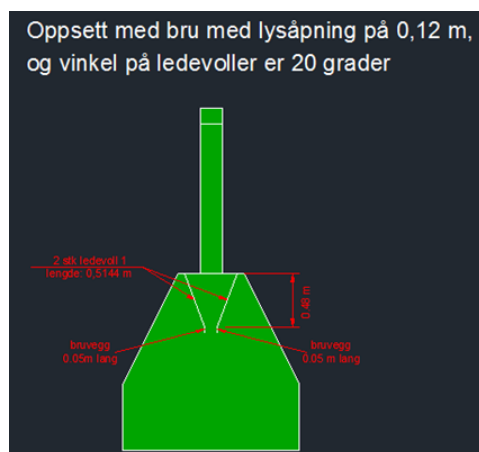


Figur A.8: Oppsett med bru med lysåpning 0,08 m og vinkel på ledevoller er 10 grader

#### A.4 Forsøk med lysåpning 12 cm



Figur A.9: Oppsett med bru med lysåpning 0,12 m og vinkel på ledevoller er 30 grader



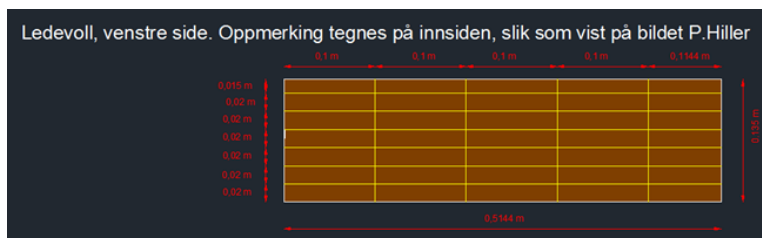
Figur A.10: Oppsett med bru med lysåpning 0,12 m og vinkel på ledevoller er 20 grader



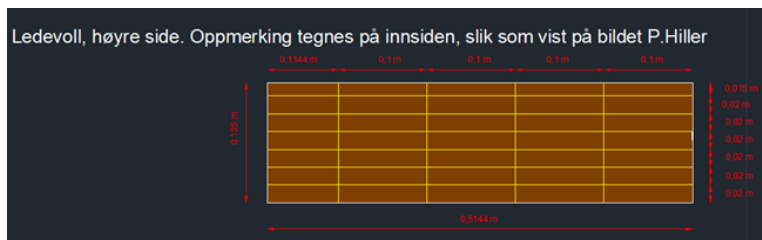
Figur A.11: Oppsett med bru med lysåpning 0,12 m og vinkel på ledevoller er 10 grader



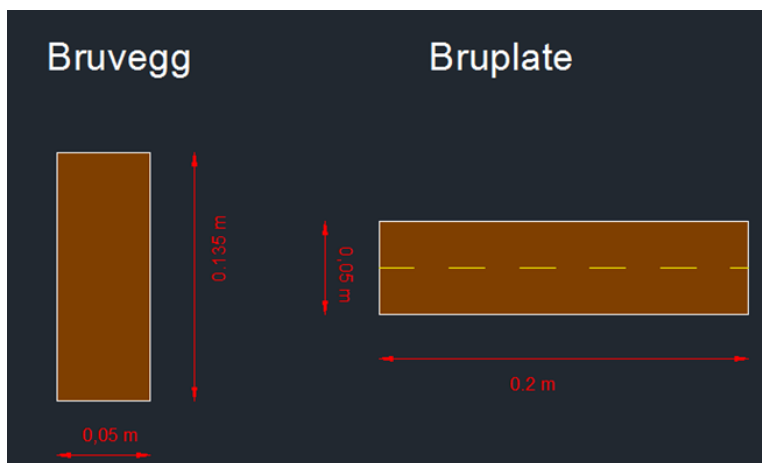
## A.5 Ledevoll- og bruveggdetaljer



Figur A.12: Ledevoll venstre side



Figur A.13: Ledevoll høyre side



Figur A.14: Bruvegg og bruplate



# B | Gjennomføring av forsøk

## B.1 Generellt om forsøkene

Bredden av bruåpningen og vinkelen til ledevollene varierer. Vinklene på ledevoller er valgt ut fra retningslinjer for snøskred (anbefalt vinkel mindre enn 20°-30°).

## B.2 Forsøkene som skal kjøres

Det er i alt 9 antall hovedforsøk som skal kjøres. Dette er de 9 forskjellige variantene av bredde på bruåpning og vinkel på ledevoller. Hvert forsøk kjøres med 3 repetisjoner.

I tillegg kjøres det 2 tilleggforsøk med dobling av skredvolumet (dobling av skredmasser) og reduksjon i hastigheten på skredet (dvs. skredet starter lengder ned i renna i stedet for på toppen av renna). Disse forsøkene kjøres med middels bruåpning og middels vinkel på ledevoller.

Det skal også kjøres forsøk med de 3 ulike bruåpningene uten bruk av ledevoller, og et forsøk uten ledevoller eller bru.

Oppskyllingshøyde, og posisjon for største oppskyllingshøyde måles i ettertid med bilder fra kamera og påtegnede markeringer på ledevollene.

Det vil ikke være aktuelt å gjøre som P. Hiller og måle skredtykkelse da jeg ikke har tilgang på utsyr (ultralydsensor) til dette.

Det er 11 forsøk som skal kjøres med 3 repetisjoner hver. I tillegg kjøres forøk uten ledevoller og bru (4 forsøk). Dette gir i alt 37 forsøk.

Nummer på forsøk er oppgitt i x,x,x. Første verdi angir lysåpning på brua i cm. Andre verdi angir vinkelen på ledevollene. I forøk uten ledevoller er andre verdi angitt som null. Tredje verdi angir om det er første, andre eller tredje repetisjon av forsøket.

Forsøk der massen av kulene er endret har bokstaven «m» etter nummer på repetisjon. Forsøk der startposisjonen til kulene er endret har bokstaven «s» etter nummer på repetisjonen.

Skredet som heter «Utløpslengde» er det skredet som er kjørt uten bru og uten ledevoller. Dette er kun gjort for å sammenligne forsøket med de forsøkene som er gjort av Linda Brateng.

Nummer på forsøk	Dato	Skredmasse (kg)	Startposisjon (m fra topp renne)	Bruåpning (m)	Vinkel ledevoll (°)
4,30,1	22.04.2013	3	0,15	0,04	30
4,30,2	22.04.2013	3	0,15	0,04	30
4,30,3	22.04.2013	3	0,15	0,04	30
4,20,1	22.04.2013	3	0,15	0,04	20
4,20,2	22.04.2013	3	0,15	0,04	20
4,20,3	22.04.2013	3	0,15	0,04	20
4,10,1	22.04.2013	3	0,15	0,04	10
4,10,2	22.04.2013	3	0,15	0,04	10
4,10,3	22.04.2013	3	0,15	0,04	10
8,30,1	22.04.2013	3	0,15	0,08	30
8,30,2	22.04.2013	3	0,15	0,08	30
8,30,3	22.04.2013	3	0,15	0,08	30
8,20,1	22.04.2013	3	0,15	0,08	20
8,20,2	22.04.2013	3	0,15	0,08	20
8,20,3	22.04.2013	3	0,15	0,08	20
8,10,1	25.04.2013	3	0,15	0,08	10
8,10,2	25.04.2013	3	0,15	0,08	10
8,10,3	25.04.2013	3	0,15	0,08	10
12,30,1	25.04.2013	3	0,15	0,12	30
12,30,2	25.04.2013	3	0,15	0,12	30
12,30,3	25.04.2013	3	0,15	0,12	30
12,20,1	25.04.2013	3	0,15	0,12	20
12,20,2	25.04.2013	3	0,15	0,12	20
12,20,3	25.04.2013	3	0,15	0,12	20
12,10,1	25.04.2013	3	0,15	0,12	10
12,10,2	25.04.2013	3	0,15	0,12	10
12,10,3	25.04.2013	3	0,15	0,12	10
8,20,1m	25.04.2013	6	0,15	0,08	20
8,20,2m	25.04.2013	6	0,15	0,08	20
8,20,3m	25.04.2013	6	0,15	0,08	20
8,20,1s	25.04.2013	3	0,3	0,08	20
8,20,2s	25.04.2013	3	0,3	0,08	20
8,20,3s	25.04.2013	3	0,3	0,08	20
4,0,1	02.05.2013	3	0,15	0,04	-
8,0,1	02.05.2013	3	0,15	0,08	-
12,0,1	02.05.2013	3	0,15	0,12	-
utløpslengd	02.05.2013	3	0,15	-	-

Tabell B.1: Liste og forklaring av forsøkene

# C | Data fra forsøkene - Excel

Vedlagt under ligger en CD med dataene fra forsøkene i Excel format.



# D | Videoer

Vedlagt under ligger en CD med videoer fra forsøkene.

