

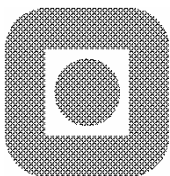
Laboratorieforsøk for utforming av  
terrengtiltak mot snøskred

(Laboratory experiments for the design of  
earth structures)

Hovedoppgave 2005

for

Linda Elisabeth Brateng



INSTITUTT FOR BYGG ANLEGG OG TRANSPORT  
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
NTNU

Reg. nr.:









Oppgavens tittel: Laboratorieforsøk for utforming av terrengtiltak mot snøskred	Dato: 06.06.05 Antall sider (inkl. bilag): 129		
	Hovedoppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Stud.techn. Linda Elisabeth Brateng			
Faglærer/veileder: Professor Harald Norem			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: -			

<p>Ekstrakt:</p> <p>Denne oppgaven inneholder et omfattende modellforsøk av terrengtiltak for sikring mot snøskred. Formålet er å finne en utforming og plassering av terrengtiltak på et jevnt skrånende utløpsområde som kan gi et godt grunnlag for skredsikring. I tillegg inngår tilsvarende forsøk for å utarbeide forslag til skredsikring av skredområdet Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal. I tillegg til dette omfatter oppgaven bakgrunn i skreddynamikken og modellover for å kunne gjennomføre og analysere modellforsøkene.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Stikkord:

1. laboratorieforsøk
2. skredsikring
3. terrengtiltak – bremsekjegler og fangvoller
4. snøvern

\_\_\_\_\_  
(sign.)





**HOVEDOPPGAVE**  
VÅREN 2005  
for

Linda Elisabeth Brateng

Laboratorieforsøk for utforming av terrengtiltak mot snøskred

Laboratory experiments for the design of earth structures

**Bakgrunn**

De siste 30 årene har Statens vegvesen sikret flere av sine skredutsatte vegstrekninger med terrengtiltak, bremsekjegler, ledevoller og fangdammer. Erfaringene med disse tiltakene er variable. I mange tilfeller har terrengtiltakene redusert skredfrekvensen mot veggen til et akseptabelt nivå, mens det i andre tilfeller ikke har vært mulig å oppnå en tilfredsstillende sikkerhet mot skred ved hjelp av slike tiltak.

Det er utført få systematiske forsøk med hensyn til utforming og plassering av slike tiltak. De siste fem årene har det riktignok vært utført enkelte modellforsøk med hensyn til utforming av bremsekjegler og fangdammer, men plasseringen av dem i terrenget er lite undersøkt.

Målsettingen med denne oppgaven er å gjennomføre modellforsøk for å studere hvordan terrengtiltakene bør plasseres innbyrdes for å oppnå en best mulig sikringseffekt innenfor en praktisk utforming av tiltakene. Det er også ønskelig å utføre modellforsøk med hensyn til skredområdet Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal

**Oppgave**

Oppgaven er delt inn i to deler. Den mest omfattende er modellforsøk med utforming og plassering av terrengtiltak på et jevnt skrånende utløpsområde. Den andre delen omfatter tilsvarende forsøk på en terrengmodell av Nakkefonna og utarbeiding av forslag til skredsikring av dette skredområdet. I tillegg kreves det at kandidaten setter seg inn i det teoretiske grunnlaget for modellover og skreddynamikk for å gjennomføre og analysere modellforsøkene.

Del 1 omfatter:

Utarbeide forslag til undersøkelsesprogram, og definere målsettingen med forsøkene

Gjennomføre det foreslåtte programmet  
Analysere resultatene med hensyn til overføring til praktiske forhold

Del 2 omfatter:

Gjennomføring av modellforsøk med terrengmodell av Nakkefonna  
Foreslå sikring av rv60 forbi Nakkefonna.

### **Generelt**

Oppgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis. Eventuelle justeringer må skje i samråd med veileder og faglærer ved instituttet (samt med ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt).

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidingen og selvstendighet i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside
- tittelside med ekstrakt og stikkord, (mal til forside og tittelside finnes på instituttets hjemmesider)
- sammendrag, innholdsfortegnelse inkl. oversikt over vedlegg og bilag
- referanser til kildemateriale som ikke er av generell karakter, dette gjelder også for muntlig informasjon og opplysninger
- besvarelsen skal ha komplett paginering

Besvarelsen med underliggende materiale leveres også i digital form.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og hovedoppgave ved Institutt for bygg- og anleggsteknikk».  
(<http://www.ivt.ntnu.no/bat/undervisning/rapportveiledning.pdf>)

I tillegg til selve rapporten skal det innleveres en kortfattet (tilsv. 1-2 A4-sider inkl. evt. illustrasjoner) populærvitenskapelig oppsummering av arbeidet, beregnet for publisering på internett. Denne oppsummeringen leveres elektronisk i form av html-fil og bør redegjøre for hensikten med arbeidet og for gjennomføringen og de vesentligste resultater og konklusjoner av arbeidet. Oppsummeringen innpasses i html-mal gitt av instituttet.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet som om det var utført av en ansatt, såfremt annet ikke er avtalt på forhånd.

### **HMS:**

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet.

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i Retningslinje for HMS ved feltarbeid og –kurs, tokt,



befaringer og ekskursionsjoner m.m.(Kapittel 7.13 i NTNUs HMS-Håndbok). Studenten skal i tillegg få utdelt brosjyren Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU. Begge dokumentene er tilgjengelig på fakultetets HMS-sider på internett (<http://www.ivt.ntnu.no/adm/hms/>).

Instituttet anbefaler at studenten tegner egen ulykkesforsikring. Velferdstinget og SiT har forhandlet frem en forsikringsordning spesielt tilpasset studenter (se fakultetets HMS-sider: <http://www.ivt.ntnu.no/adm/hms/>).

**Økonomisk støtte/SVV-avtale:**

I samsvar med samarbeidsavtalen mellom Statens vegvesen (SVV) og NTNU får kandidaten utbetalt et beløp på 10.000 kr ved innlevering av oppgaven for legitimerede og ulegitimerede utlegg. NTNU videresender 1 eksemplar til h.h.v Statens vegvesen region Midt og Vegdirektoratet.

**Innleveringsfrist:**

Arbeidet med oppgaven starter mandag 10. januar 2005, og skal gjennomføres i løpet av 21 uker (inkl 1 uke ferie/bevegelige helligdager).

Besvarelsen i original (uinnbundet) og fire innbundne kopier, samt html-oppsummering og besvarelsen i digital form skal leveres senest mandag 6. juni 2005.

Veileder ved NTNU: Professor Harald Norem

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursionsjoner skal NTNUs HMS-regler følges. Studenten bekrefter dette med sin signatur samt gjennom å krysse av og følge punktene under.

- Jeg bekrefter at jeg har lest Retningslinje for HMS ved feltarbeid og –kurs, tokt, befaringer og ekskursionsjoner.
- Jeg bekrefter å ha mottatt brosjyren Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU

Dato: 10. januar 2005

Linda Elisabeth Brateng

Stud.techn.

Harald Norem

Faglærer

Institutt for bygg, anlegg og transport



## Forord

Denne hovedoppgaven er utført ved Institutt for bygg, anlegg og transport, ved NTNU. Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven "Utforming av kjebler og voller som sikring mot snøskred" utført av undertegnede høsten 2004.

Laboratorieforsøkene i denne rapporten er med på å bevisstgjøre sikringseffekten ved bruk av terrengtiltak. Resultater fra modellforsøkene danner grunnlag ved prosjekteringen av skredområdet Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal. Det er i den sammenheng vært gjennomført befaringer av dette skredområdet og samtaler med Statens vegvesen.

Oppgaven er gjennomført i samarbeid mellom NTNU og Statens vegvesen. Jeg vil derfor takke disse for økonomisk støtte i arbeidet. Takk til Arnold Hustad for gode og nyttige innspill underveis. Ved utførelse av oppgaven har det vært utført modellforsøk ved vegteknisk laboratorium ved NTNU. Jeg vil derfor takke Tore Menne og Stein Hoseth for god hjelp i forbindelse med dette arbeidet. I tillegg vil jeg takke NBI og Faggruppa for veg og samferdsel for lån av utstyr og programvare. Til slutt vil jeg rette en spesiell takk til professor Harald Norem ved NTNU for god veiledning og godt samarbeid underveis.

Trondheim 06.06.05

---

Linda Elisabeth Brateng



## Sammendrag

Sikring av skredutsatte vegstrekninger med terrengtiltak innebærer retardering av skredmasser ved å flytte jordmasser. Terrengtiltakene omfatter bremsekjegler, ledevoller og fangdammer. Tradisjonelt i Norge er det vanlig å sikre veger mot snøskred med bremsekjegler, fangvoller og ledevoller. Erfaringer tilsier at tiltakene enkelte steder viser tilstrekkelig sikringseffekt, mens det andre steder ikke tilfredsstillende den sikkerheten som kreves. Bakgrunnen for hvordan utforming og plassering av tiltakene bør være er lite vurdert i litteraturen, og det har derfor vært nødvendig å øke bakgrunnsstoffet for å vite om bruk av terrengtiltak er samfunnsøkonomisk.

Det er utført to tidligere modellforsøk som grundig og systematisk har vurdert effekten av å sikre mot snøskred med terrengtiltak. Forsøkene er uavhengige, men bygger på de samme forutsetningene, og har konkludert med de samme trendene. Modellforsøket som er presentert i denne rapporten er en videreføring av dette, men med litt andre forutsetninger. Dette gjelder i hovedsak utforming av konstruksjonen. Alle modellforsøkene har tatt for seg en grundig analyse av bremsekjegler, mens dette modellforsøket også vektlegger effekten av voller. Denne oppgaven inneholder også valg av sikringstiltak og prosjektering av skredområdet Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal.

Forsøket er utført på en 3m lang renne, med 3kg modellmasse som simulerer snø. Renne er leddet, der øvre renne har 43° helning og nedre renne varierer med 11° og 14° helning. Den nedre del av renna har varierende bredde, slik at massene sprer seg fritt i renna. Forsøksmassen som er brukt er et granulært glassmateriale med partikkeldiameter 0,1 mm, med navnet ballotini. Terrengtiltakene omfatter bremsekjegler, rette voller og buede voller. Disse har ulike utforminger med hensyn til vinkel, høyde, bredde og lengde. Høyden varierer mellom 1cm til 4cm, og helningen på sidene varierer mellom 30° og 90°.

Resultatene skisserer trender for hvordan kjegler og voller bør plasseres og utformes for å gi best mulig effekt. For å komme frem til dette er analysert energi i massen vektlagt. Den totale mengden energi er summen av kinetisk og potensiell energi. Andelen av kinetisk og potensiell energi vil variere avhengig av størrelsen på farten i massen. Hastighetshøyden kan derfor brukes som et mål på hvor stor andel bevegelsesenergi som er i massen. Helningen på en energilinje forteller hvor fort hastighetshøyden synker. Dette er et uttrykk for hvor fort massen bremses ned og stoppes. Balansen mellom uttak av energi som skyldes tørrfriksjon og hastighetsbetinget friksjon viser at dette har et tilnærmet konstant forhold, ved at energilinjene ligger parallele. Dette gir at effekten av bremsetiltak kan finnes der det er energitap. Summen av alle energitapet langs skredløpet er lik den totale hastighetshøyden. Ved sikring mot skred med kjegler er hvert enkelt energitap i massen en funksjon av det generelle tapet mellom masse og terreng, samt plassering, høyde, vinkel og tetthet av kjeglene. Det samme gjelder for vollene, bortsett fra at tettheten er konstant lik 1. Dette er vist i følgende likning,

$$h_t = \frac{f \cdot L}{d} \cdot \frac{v_0^2}{2g} + k_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + k_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + k_3 \cdot \frac{v_3^2}{2g} + \dots$$

Her er tapskoeffisientene,  $k_i$  et mål på effekten av hver rad med tiltak for å bremse snømassene. Det første leddet presenterer friksjonstap mellom masse og terreng.

Resultatene skisserer en del generelle trender for utforming og plassering av kjegler og voller. Dette er kort summert i punktene under.

- Både voller og kjegler øker effekten ved økt høyde og vinkel på sidene
- Voller bør plasseres så langt nede i skredutløpet som mulig
- Kjegler bør plasseres så langt oppe i skredutløpet som mulig

- Rekker med kjebler sprer massen bedre enn kjebler plassert i plogmønster
- Effekten øker med økt antall rader med tiltak, så fremt ikke massen kastes over tiltakene.
- Kastelengden til massen over tiltakene stemmer med teorien
- Tettheten av kjebler i rekke bør ligge mellom 0,7 og 0,8
- Vollens ledeevne øker med redusert avbøyningsvinkel og økt høyde og helning på vollveggene.

Resultater fra disse og tidligere modellforsøk er i stor grad brukt som bakgrunn for sikring av området Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal. Valget falt på 2 rekker med kjebler plassert langt oppe i skredutløpet og en voll nede ved vegen er valgt for sikring av Nakkefonna. Øverste rekke har en helning på 2:1, fordi det er denne rekka som skal ta ut mesteparten av energien. Rad 2 kan ha en mindre helning normalt på skredet, fordi denne rekka tar ut mindre energi på grunn av lavere hastighet i massene. Helningen er derfor satt til 1:1. Både rad 1 og rad 2 står på et fundament for å heve kjeblene på en rimelig måte.

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>iii</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b> .....	<b>v</b>
<b>Figurliste</b> .....	<b>ix</b>
<b>Tabelliste</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>14</b>
<b>2 Snødekket</b> .....	<b>15</b>
2.1 Oppbygging av snødekket .....	15
2.2 Setning, kryp og glidning .....	15
2.3 Spenninger i snødekket.....	16
2.4 Snøskred i bevegelse .....	18
<b>3 Vandring av energi i snøskred</b> .....	<b>20</b>
3.1 Teoretisk grunnlag fra hydromeknikken .....	20
3.2 Energibalanse.....	21
3.3 Analysemetode i modellforsøk.....	24
3.3.1 Energibetraktninger .....	24
3.3.2 Energitalp ved bruk av energilinje .....	25
3.3.3 Effektberegninger .....	26
<b>4 Beregningsmodeller for snøskred</b> .....	<b>27</b>
4.1 Dynamiske beregningsmodeller .....	27
4.1.1 Voellmys beregningsmodell.....	27
4.1.2 Salms og Kørnens beregningsmodeller .....	28
4.1.3 PCMs beregningsmodell.....	30
4.1.4 NIS` beregningsmodell .....	30
4.2 Topografiske modeller.....	33
4.2.1 Lied og Bakkehøis statistiske $\alpha/\beta$ – modell .....	33
4.3 Drøfting av beregningsmodeller .....	34

<b>5</b>	<b>Skredsikring av veger ved bruk av terrengtiltak .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Typer av terrengtiltak.....</b>	<b>36</b>
5.1.1	Bremsekjeger .....	36
5.1.2	Fangvoller .....	37
5.1.3	Ledevoller .....	38
<b>5.2</b>	<b>Erfaringer med terrengtiltak i Norge .....</b>	<b>39</b>
<b>5.3</b>	<b>Tidligere modellforsøk.....</b>	<b>39</b>
5.3.1	Resultater fra Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004).....	39
<b>5.4</b>	<b>Modellovene.....</b>	<b>42</b>
5.4.1	Teori.....	42
5.4.2	Modellover i modellforsøket.....	43
<b>6</b>	<b>Modellforsøk .....</b>	<b>45</b>
<b>6.1</b>	<b>Metode.....</b>	<b>45</b>
6.1.1	Konstruksjonen .....	45
6.1.2	Masse .....	46
6.1.3	Terrengtiltak .....	46
6.1.4	Gjennomføring .....	48
6.1.5	Måleprogram.....	49
<b>6.2</b>	<b>Feilkilder.....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>Observasjoner .....</b>	<b>54</b>
<b>7.1</b>	<b>Fartsutvikling.....</b>	<b>54</b>
<b>7.2</b>	<b>Støt, kast og avsetning.....</b>	<b>54</b>
7.2.1	Kjeger (K).....	55
7.2.2	Plogvoll (PV).....	62
7.2.3	Rette voller (RV) .....	62
7.2.4	Buede voller (BV).....	64
<b>8</b>	<b>Resultater .....</b>	<b>67</b>
<b>8.1</b>	<b>Uten tiltak, UT .....</b>	<b>67</b>
8.1.1	Nedre renne med 14° helning.....	67
8.1.2	Nedre renne med 11° helning.....	68
8.1.3	Sammenlikning mellom nedre renne med 11°- og 14° helning .....	69
<b>8.2</b>	<b>Kjeger og plogvoll.....</b>	<b>71</b>
8.2.1	Fart og energilinjer .....	71



8.2.2	Effekten av kjebler og voller.....	75
<b>8.3</b>	<b>Rette voller.....</b>	<b>81</b>
8.3.1	Utløpslengde.....	81
8.3.2	"Klatrehøyde" langs voll ved 15° avbøyning ( $\alpha$ ) i planet.....	82
8.3.3	Spredning av masse.....	84
8.3.4	Fart og energilinje.....	85
8.3.5	Effekten av rette voller (RV).....	89
<b>8.4</b>	<b>Buede voller.....</b>	<b>91</b>
8.4.1	Utløpslengde.....	91
8.4.2	"Klatrehøyde" langs voll.....	94
8.4.3	Spredning og størrelse av masse.....	94
8.4.4	Fart og energilinje.....	96
8.4.5	Effekt av buede voller (BV).....	98
<b>9</b>	<b>Analyse.....</b>	<b>100</b>
<b>9.1</b>	<b>Uten tiltak.....</b>	<b>100</b>
9.1.1	Froudes tall.....	100
9.1.2	Energilinje.....	100
<b>9.2</b>	<b>Kjebler.....</b>	<b>101</b>
9.2.1	Energilinjen.....	101
9.2.2	Effekten av enkle rader.....	102
9.2.3	Effekt av flere rader og kastelengde.....	103
9.2.4	Forholdet til tidligere skisserte retningslinjer.....	104
9.2.5	Dimensjonering av sikring ut fra tapsfaktorer.....	105
<b>9.3</b>	<b>Rette og buede voller.....</b>	<b>105</b>
9.3.1	Energilinje.....	105
9.3.2	Ledeevne.....	106
9.3.3	Effekt.....	108
9.3.4	Forhold til tidligere skisserte retningslinjer.....	109
<b>10</b>	<b>Skredsikring av området Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal.....</b>	<b>112</b>
<b>10.1</b>	<b>Skredområdet Nakkefonna.....</b>	<b>112</b>
10.1.1	Dagens situasjon.....	112
10.1.2	Dimensjonerende utløpslengde og hastighet.....	114
<b>10.2</b>	<b>Sikring av området med terrengtiltak.....</b>	<b>115</b>
10.2.1	Vurdering av området.....	115
10.2.2	Valget av sikringstiltak.....	115

10.2.3	Bruk av resultater fra modellforsøk til sikring av Nakkefonna .....	119
<b>11</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>123</b>
<b>12</b>	<b>Litteraturliste.....</b>	<b>126</b>
	<b>Vedlegg A – Beregning av utløpslengde når terrenghelning er kjent .....</b>	<b>128</b>
	<b>Vedlegg B.....</b>	<b>129</b>

## Figurliste

Figur 2.1 Setning på horisontal mark, kryp og glidning i hellende terreng .....	15
Figur 2.2 Viskøs deformasjon av snø (McClung og Schaerer (1998)).....	16
Figur 2.3 Strekk- og trykksoner i snødekket (Domaas (1980)).....	16
Figur 2.4 Spenning i snødekket på jevnt hellende terreng (Domaas (1980)).....	17
Figur 2.5 a) densitet- og hastighetsfordeling i skred, b)skredets bevegelsesmotstand (Domaas (1980)).....	18
Figur 2.6 skredmasser i bevegelse - a) i ro - b) i bevegelse (Domaas (1980)).....	18
Figur 3.1 Ulike strømnings situasjoner i vassdrag (NVE, 1998).....	20
Figur 3.2 Bernoullis likning (Norem, 2004) .....	22
Figur 3.3 Bernoullies likning grafisk for snøskred. Her dominerer coulombfriksjonen i skredet. (Norem 2004) .....	23
Figur 3.4 Energibetraktning i renna .....	24
Figur 3.5 Skisse av energilinjer med og uten tiltak. Disse blir betraktet som parallelle ved frentstilling av effekten til tiltak, $X_k$ er utløpslengden ved bruk av tiltak. ....	26
Figur 4.1 Definisjon av skredmasse i likevekt (Lied og Harbitz, 1996).....	32
Figur 4.2 skisse over parametere i $\alpha/\beta$ – metoden (Lied og Harbitz (1996)).....	33
Figur 5.1 Plassering av bremsekjegler (Norem (1993)).....	36
Figur 5.2 Skisse over utforming og plassering av kjegler etter Lied og Kristensen (2003) .....	37
Figur 5.3 Modellen i forsøkene til Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004) .....	40
Figur 5.4 Effekt ved ulik plassering av en rad (Brateng, 2004) .....	41
Figur 5.5 Effekt ved kombinasjoner av tiltak (Brateng, 2004) .....	41
Figur 5.6 Parallelle energilinjer for 45K (Brateng, 2004).....	41
Figur 6.1 Renne med dimensjoner og utløp av masse uten bruk av tiltak. Helning i øvre renne er 43° og 11° og 14° i nedre renne. ....	45
Figur 6.2 Utforming av K og RK samt kjegler på 1cm høyt fundament.....	47
Figur 6.3 dimensjoner på utforming og plassering av rette voller øverst og buet voll til venstre .....	48
Figur 6.4 Definisjoner og dimensjoner av modell.....	49
Figur 7.1 "Støvsky" i front av massen før den treffer en ledevoll. ....	54
Figur 7.2 Folder av masse som går over voll.....	55
Figur 7.3 Prosjektil som dannes ved kvadratiske kjegler på rekke, 137 cm nede i renna.....	56
Figur 7.4 Prosjektil som dannes ved rektangulære kjegle på rekke, 137 cm nede i renna.....	56
Figur 7.5 Prosjektil som dannes ved kvadratiske kjegler i plogform, 137 cm nede i renna.....	56
Figur 7.6 Prosjektilene er utydelige ved rektangulære kjegler i plog, 137 cm nede i renna .....	56
Figur 7.7 Støt mellom masse og kjegler med ulik tetthet, ved 1,37m. Det er 1cm mellom øverst til venstre. 2 cm mellom øverst høyre og 1,5cm mellom plassert ved 1,5m til venstre (Nakkefonna).....	56
Figur 7.8 Avsetning av masse ved bruk av 60K2-137 plassert i plogform og på rekke. Rekken sprer massen høyere opp enn plogformen.....	57
Figur 7.9 Avsetning av masse ved bruk av 60RK2-137 plassert i plogform og på rekke .....	57
Figur 7.10 Kast av masse over plogformet kvadratiske kjegler. Tydelig ulike lengder som kastes.....	58
Figur 7.11 Kast av masse over plogformede rektangulære kjegler.....	58
Figur 7.12 Bildeserie av kast av masse over 60K2-137 + 60K2-180 fra to vinkler.....	60
Figur 7.13 Avsetning av masse ved bruk av 60K2-137 og varierende plasseringen av den andre raden, 60K2. Her er rad 2 plassert ved 160, 180 og 200 .....	60
Figur 7.14 Avsetning av masse ved bruk av 60K2-137 og varierende plasseringen av den andre raden, 45K2. Her er rad 2 plassert ved 160, 180 og 200 .....	61

Figur 7.15 Avsetningen etter sikringstiltak slik de skal være i Nakkefonna.....	61
Figur 7.16 Massene blir kastet konsentrert til side ved bruk av plogvoll. ....	62
Figur 7.17 Plogvoll konsentrerer massene. ....	62
Figur 7.18 Massen som kastes over 90° rett voll normalt på strømningsretning.....	63
Figur 7.19 Massen som kastes over 60° rett voll normalt på strømningsretning. Kastelengden er noe lengre enn ved bruk av 90° voll. ....	63
Figur 7.20 Massen som kastes over 30° rett voll normalt på strømningsretning. Kastelengden er større enn for 60° og 90° voller.....	63
Figur 7.21 Sammenstøt med 90RV3-150-90. Kastevinkel er tilnærmet lik helning på voll. ....	64
Figur 7.22 Sammenstøt med 30RV3-150-90.....	64
Figur 7.23 Sammenstøt med 60RV4-150-90. Vollen er plassert 150 cm nede i renna. ....	64
Figur 7.24 Sammenstøt med 60RV4-180-90. Vollen er plassert 180 cm nede i renna. . Kastevinkelen blir mindre.	64
Figur 7.25 30° buet voll som ikke har noen retarderende effekt på massene.....	65
Figur 7.26 60° buet voll som viser en tydelig frontmasse "stikker" som ikke tatt igjen av de bakre massene som går over vollen.....	65
Figur 7.27 90° buet voll som har gode evner til å lede masse.....	65
Figur 7.28 Rekkefølgen etter hvordan ulike faser i avsetningen av masser skjer for ledevoller.....	66
Figur 8.1 Fartsprofil for masser uten bruk av tiltak ved 14° helning. Ved avstand 1,35 m nede i renna er det knekk og retningsendring. Det er derfor markert med diskontinuitet i profilet. ....	67
Figur 8.2 Energilinje for masser uten tiltak i renna, 14° helning.....	68
Figur 8.3 Fartsprofil for nedre renne med 11° helning.....	69
Figur 8.4 Energilinje til masser i nedre renne med 11° helning.....	69
Figur 8.5 Sammenlikning av fartsprofil for 11° og 14° helning på nedre renne.....	70
Figur 8.6 Sammenlikning av energilinje for 11° og 14° helning på nedre renne.....	70
Figur 8.7 Fartsprofil av kjegler og plogvoll plassert 1,37 m ned i nedre renne, 14° helning.....	71
Figur 8.8 Energilinje for kjegler og plogvoll plassert 1,37 m ned i nedre renne, 14° helning.....	71
Figur 8.9 Spredning av masser ved plassering av 60K -1,37m nede i nedre renne og 14° helning på renne. Tallene angir antallet kjegler i plogformet plassering.....	72
Figur 8.10 Fartsprofil av masse over RV plassert normalt på skredet ved 1,5 m.....	72
Figur 8.11 Energilinje ved bruk av RV plassert normalt på skredet ved 1,5 m.....	72
Figur 8.12 Fartsprofil ved bruk av kjegler med ulik høyde, vinkel og plassering.....	73
Figur 8.13 Energilinje ved bruk av kjegler med ulik høyde, vinkel og plassering.....	73
Figur 8.14 Fartsprofil med 60° kjegler på 30° fundament, ulik tetthet.....	73
Figur 8.15 Energilinje for 60° kjegler på 30° fundament, ulik tetthet.....	73
Figur 8.16 Fartsprofil ved sikring av Nakkefonna (med fundament).....	74
Figur 8.17 Energilinje ved sikring av Nakkefonna (med fundament).....	74
Figur 8.18 Kast og energilinje for Nakkefonna (med fundament).....	75
Figur 8.19 Kast og energilinje for kombinasjon av tiltak i Nakkefonna (med fundament).....	75
Figur 8.20 Effekt av 60° kjegler og plogvoll plassert 1,37 m ned i nedre renne, 14° helning.....	76
Figur 8.21 Effekten av RV plassert normalt på skredet ved 1,5 m.....	76
Figur 8.22 Effekten av kjegler med ulik høyde, vinkel og plassering.....	76
Figur 8.23 Effekt av kjegler på 30° fundament med variabel tetthet.....	77
Figur 8.24 Effekten som funksjon av plassering. Kjegler er heltrukne linjer (11° renne), voller er stiplet (14° renne).	77
Figur 8.25 Spredning av masse over kjegler plassert ved 1,37m og 1,8m.....	78
Figur 8.26 Effekt ved kombinasjon av to rader. Første rad står fast ved 1,37m, mens rad 2 varierer i plassering	

mellom 1,6m til 2,0m. Skisse er vist til høyre.....	78
Figur 8.27 Effekt som funksjon av høyden på tiltakene .....	79
Figur 8.28 Effekten som funksjon av helning på tiltakene. Kjegler er heltrukne linjer og voller er stiplet eller enkle punkt.....	80
Figur 8.29 Effekten som funksjon av tettheten. Merk at kjeglene er plassert ved 1,37m og vollene er plassert ved 1,50m .....	80
Figur 8.30 Effekt av sikringstiltak i Nakkefonna .....	81
Figur 8.31 Sammenlikning av effekt for kombinasjoner i Nakkefonna (kjegler med og uten fundament).....	81
Figur 8.32 Utløpslengde for masse ledet langs vollaksen. Vollene er plassert ved 1,5m og 1,8m. ....	82
Figur 8.33 Utløpslengde for masse som krysser vollaksen. Vollene er plassert ved 1,5m og 1,8m. ....	82
Figur 8.34 Profil av "klatrehøyder" på voller med avbøyning på 15°, plassert 1,5m nede i renna.....	83
Figur 8.35 Profil av "klatrehøyden" på voller med avbøyning på 15°, plassert 1,8m nede i renna.....	83
Figur 8.36 Spredning av masser når voll er plassert 1,5m nede i renna.....	84
Figur 8.37 Spredning av masser når voll er plassert 1,8m nede i renna.....	85
Figur 8.38 Fartsutvikling i massen langs vollaksen for 15°, 30° og 50° .....	85
Figur 8.39 Fartsutvikling i massen over vollaksen for 30°, 50° og 90° .....	85
Figur 8.40 Energilinjier for 60RV3 plassert 1,8m nede i renna. Vollene er plassert i 15° og 30° på skredretning. Likningene angir trendlinja for energilinjene. ....	86
Figur 8.41 Energilinjier for 60RV3 plassert 1,8m nede i renna. Vollene er plassert i 50° og 90° på skredretning. Likningene angir trendlinja for energilinjene. ....	87
Figur 8.42 Energilinjier for masse over og som ledes langs voll for 90RV3, plassert 1,8m nede i renna og med vollene plassert 50° og 90° på skredretning. ....	88
Figur 8.43 Energilinjier for masse over og som ledes langs voll for 90RV3, plassert 1,8m nede i renna og med vollene plassert 50° og 90° på skredretning. ....	89
Figur 8.44 Effekt som funksjon av vinkelplasseringen i planet .....	90
Figur 8.45 Effekt av 60RV som funksjon av høyden, plassert i profil 1,8m.....	90
Figur 8.46 Effekt av 60RV som funksjon av plasseringen i lengdeprofillet. Høyden er 3cm.....	90
Figur 8.47 Effekten av RV som funksjon av helning på vollveggen. Høyden er 3 cm og plasseres i profil 1,5 og 1,8m .....	91
Figur 8.48 Utløpslengde for ledet masse som funksjon av plassering av voll. Dimensjonerende skred har et utløp på 2,83m.....	91
Figur 8.49 Utløpslengde av ledet masse som funksjon av plassering for BV2 øverst til venstre, BV3 øverst til høyre og BV4 nede til venstre .....	92
Figur 8.50 Utløpslengde for masse som krysser vollakse som funksjon av plassering til vollen.....	93
Figur 8.51 Utløpslengde av masse som krysser vollaksen som funksjon av plassering. Dette er vist for BV2 øverst til venstre, BV3 øverst til høyre og BV4 nede til venstre .....	93
Figur 8.52 Sammenlikning av "klatrehøyde" på voll ved bruk av 4cm høy voll plassert 1,5, 1,8 og 2,1m nedover i renna. Vinkelen varierer mellom 30° og 90° .....	94
Figur 8.53 Spredning av masse.....	95
Figur 8.54 Mengden av masse som passerer vollaksen som funksjon av plasseringen til vollen.....	95
Figur 8.55 Lengder og mengde masse som krysser vollaksen for BV2, BV3 og BV4 plassert 1,5, 1,8 og 2,1m nede i renna.....	96
Figur 8.56 Energilinjier og fart for 60BV3 plassert ved i profil 1,8m.....	97
Figur 8.57 Energilinjier og fart for 90BV3 i profil 1,8m .....	97
Figur 8.58 Effekten av buede voller som funksjon av plassering i renna .....	98

Figur 8.59 Effekten av buede voller som funksjon av høyden på vollene .....	98
Figur 8.60 Effekten som funksjon av helning på voll.....	99
Figur 8.61 Effekten av BV kombinert med kjepler som funksjon av plassering. Kjeplerekken står fast på 1,37m. BV varierer plasseringen. ....	99
Figur 9.1 Sammenlikning av effekt for 60K med variabel tetthet.....	103
Figur 9.2 Buet voll leder masser i ulike faser .....	107
Figur 9.3 Strømning av masse over 30BV4. Den reelle vinkel på vollen er avhengig av plassering i renne.....	107
Figur 9.4 Sammenstilling av utløpslengde og effekt mellom rette og buede voller .....	109
Figur 9.5 nødvendig høyde av fangvoll etter Norem (1993) .....	110
Figur 9.6 nødvendig høyde på ledevoll etter Norem(1993). $\alpha$ er $25^\circ$ .....	111
Figur 10.1 Skredområdet Nakkefonna .....	114
Figur 10.2 Utløpslengde, hastighet og hastighetshøyde for dimensjonerende skred i Nakkefonna, etter Norem 2005b .....	114
Figur 10.3 Nedre del av terrenget i Nakkefonna. Bildet er tatt i X=1200.....	115
Figur 10.4 Bergmassen til venstre i bildet settes av til masse under bygging. Bildet er tatt fra fot øvre kjeplerad	116
Figur 10.5 snitt rad 1 ved X = 1250 .....	117
Figur 10.6 snitt rad 2 ved X = 1340 .....	117
Figur 10.7 snitt voll ved X = 1520 .....	117
Figur 10.8 tverrsnitt av alle 4 kjeplene ved X = 1250.....	117
Figur 10.9 tverrsnitt av alle 5 kjeplene ved X = 1340.....	118
Figur 10.10 Sammenlikning av energilinje for natur og modell, størrelsesforhold mellom modell og natur er skissert på x - aksene.....	120
Figur 10.11 Energitalp ved sikring av Nakkefonna .....	121

## Tabelliste

Tabell 5.1 Fart, flyteøyde og Froude tall for forsøkene til Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004).....	40
Tabell 6.1 Oversikt over ulike typer utforming brukt i modellforsøket .....	46
Tabell 6.2 Eksempler på navngiving av delforsøk .....	47
Tabell 6.3 Ulike utforminger i delforsøkene (• forsøkene som er utført) .....	49
Tabell 6.4 Plassering av de ulike utformingene i delforsøkene .....	50
Tabell 6.5 Plassering av de ulike typer buede voller i forsøksserien. ....	50
Tabell 6.6 Plassering av 60K2 i 3 ulike forsøksserier .....	51
Tabell 9.1 Froude tall for snøskred i natur og modell.....	100
Tabell 9.2 maksimal utløpslengde ved ulike helninger på nedre del av renna i dette modellforsøket med fri spredning av masse på nedre del av renna.....	101
Tabell 10.1 Forholdet mellom natur og modell i Nakkefonna.....	120
Tabell 10.2 Sammenlikning av kastelengder over kjebler, forsøk og teori.....	122

## 1 Innledning

Sikring av skredutsatte vegstrekninger med terrengtiltak innebærer retardering av skredmasser ved å flytte jordmasser. Terrengtiltakene omfatter bremsekjegler, ledevoller og fangdammer. Sikring med terrengtiltak har vist variable resultater langs norske veger. Erfaringer tilsier at tiltakene enkelte steder viser tilstrekkelig sikringseffekt, mens det andre steder ikke tilfredsstillende den sikkerheten som kreves.

For å øke bevisstheten innen dette er det nødvendig å se på utformingen og plasseringen av de ulike terrengtiltakene. Kunnskapen om terrengtiltak er mangelfullt på grunn av lite systematisert forskning på området. Det har riktignok i den senere tid vært gjennomført enkelte modellforsøk med hensyn til utforming av terrengtiltak, men plasseringen av disse innbyrdes og i terrenget har vært lite vektlagt.

Formålet med denne hovedoppgaven er å opparbeide et bedre grunnlag for å vite hvordan terrengtiltak skal brukes som sikring mot snøskred. Modellforsøkene i oppgaven vektlegger derfor utformingen, plasseringen og kombinasjoner av tiltak for å vise effekten av slike konstruksjoner.

Denne oppgaven bygger videre på arbeidet som er gjort i prosjektoppgaven "Utforming av kjegler og voller som sikring mot snøskred" høsten 2004 (Brateng 2004). Prosjektoppgaven inneholder utførelse av liknende modellforsøk for kjegler. I tillegg til dette er det gjort en del modellforsøk på Island, som også er nærliggende å finne sammenhenger til. Resultatene omkring forsøk med voller og til dels kjegler er knyttet opp mot tidligere retningslinjer som er utarbeidet for plassering og utforming.

I tillegg til omfattende modellforsøk med utforming og plassering av terrengtiltak på et jevnt skrånende utløpsområde, er det utarbeidet et forslag til skredsikring av skredområdet Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal. Som bakgrunn for forståelse og vurdering av resultater inngår den teoretiske bakgrunnen i skreddynamikken og modellover for å kunne gjennomføre og analysere modellforsøkene.

Den første delen av oppgaven tar for seg kort teori om oppbygging av snødekket, der forhold mellom spenninger og krefter redegjøres. Deretter fortsetter oppgaven å greie ut om hvordan energien i en snøskred vandrer avhengig av hvilken fase deler av skredet er i. Hastighetshøyden som utgjør en energilinje er her meget sentral. Etter dette presenteres en rekke beregningsmodeller som brukes for å dimensjonere utløpslengde og fart i snøskred. Her inngår forståelse av parametere som er viktige input i dimensjoneringen og dermed forståelsen av hvordan skred kan retarderes. Etter dette blir ulike terrengtiltak presentert i forhold til funksjon og retningslinjer for utforming som finnes i dag. Resultater fra tidligere modellforsøk er også omtalt i tillegg til teori omkring overføring av resultat fra modellforsøk til natur. Modellforsøkene er deretter presentert med gjennomgang av metoden som er brukt, observasjoner under forsøk, fremstilling av resultater og analyse av dataene. Resultater fra modellforsøkene er deretter brukt i prosjektering av skredområdet Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal.

Vedlagt i rapporten følger to vedlegg. Vedlegg B inneholder et utvalg av videoopptak og bilder fra forsøkene, samt oppgaven elektronisk.



## 2 Snødekket

Snødekket er en lagvis sammensetning med variasjon av løsere og fastere lag. Snødekket innehar derfor avgjørende egenskaper, for om det skal utarte seg snøskred i massene. Dette kapitlet tar kort for seg hva som har betydning for at et snødekke glir ut og lager et snøras. Innholdet i dette kapitlet er hentet fra McClung og Schaerer (1998) og Lied og Kristensen (2003)

### 2.1 Oppbygging av snødekket

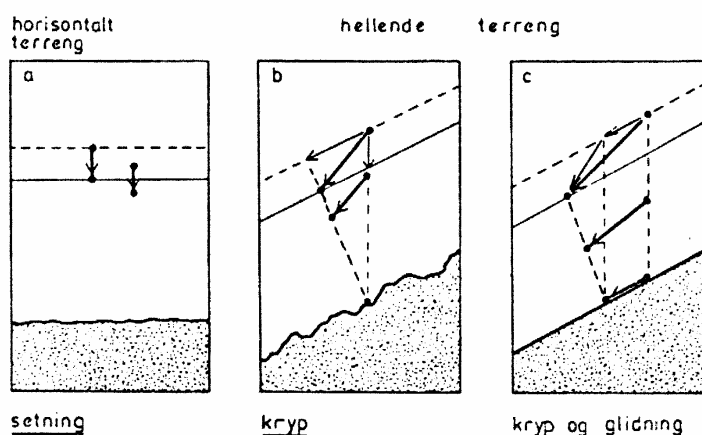
Snødekket bygges opp ved at iskrystaller dannes i atmosfæren ved en sammensetning og oppbygging av luftens vannmolekyler. Når disse iskrystallene avleires dannes snødekket. Oppbyggingen av snødekket vil i stor grad avhenge av temperatur og fuktighetsforhold nede ved bakken. Fordelingen av snøen vil så bli bestemt av terrengformene og vinden. Vinden vil føre til at snøkrystallene drives langs bakken, avrundes og pakkes. Pakkingen øker med økende vind, luftfuktighet og temperatur. Snødekket består av ulike sjikt fordi nedbøren kommer i perioder, samtidig som temperatur, fuktighet og vind endres med tiden.

Når iskrystallene er avsatt begynner de å forandre fasong. Iskrystallenes form er ustabil både i seg selv og fordi de nå ligger i kontakt med hverandre. Endring av form på iskrystallene kalles metamorfose. Temperaturen på de enkelte sjikt i snødekket vil bestemme i hvilken grad det skjer en metamorfose. Temperaturgradienten i snødekket forårsaker en materialstrøm fra varmere til kaldere deler av snødekket, og vil bestemme typen metamorfose – som nedbrytende-, oppbyggende- eller smeltemetamorfose.

### 2.2 Setning, kryp og glidning

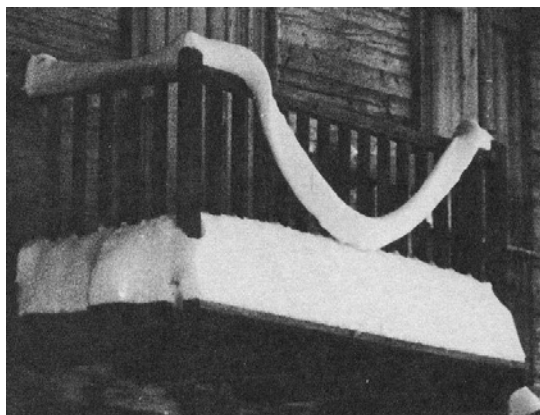
Snødekket vil i de fleste tilfeller ha en økende densitet nedover i snødekket. Snødekket vil sette seg etter hvert som iskrystallene belastes av den overliggende snøens tyngde og ved at de utsettes for metamorfose. Med dette øker muligheten for utvikling av porøse sjikt med tiden. Setningen er størst i den øvre del av snødekket og avtar med dybden. Når terrenget er horisontalt er det kun horisontal setning som finner sted i snødekket.

Når terrenget er skrånende vil snødekket også være utsatt for kryp. Kryp er en bevegelse som er sammensatt av setning og bevegelse av snødekket parallelt med underlaget. Bevegelsen er forårsaket av tyngden. Resultantkraften gir iskrystallene en skrå bevegelse som kalles kryp. Kryptet er størst i øvre del av snødekket, og avtar med dybden. Nede ved bakken kryper ikke snøen. Både setninger og kryp er vist i figur 2.1.



Figur 2.1 Setning på horisontal mark, kryp og glidning i hellende terreng

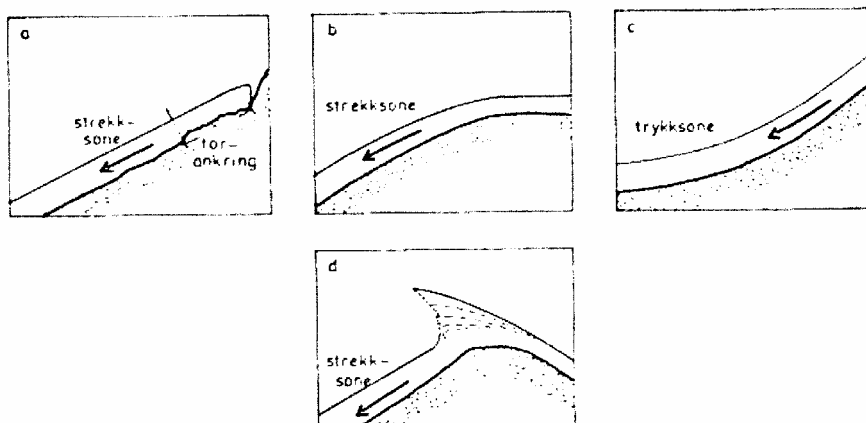
Når snøen ikke er frosset til bakken og underlaget i det skrånede terrenget er jevnt vil det kunne oppstå glidning. Glidningen skjer langs bakken og er like stor gjennom hele snødekket. Glidning avhenger av bakkens ruhet, helningsvinkel, snødekkets egenskaper og temperatur ved bakken. Kryp- og glidehastighet blir bestemt av skjærspenning og viskositet i snødekket. Når temperaturen stiger vil viskositeten reduseres, og følgelig glidningen øke. Viskositeten kan forklares om "stivheten" i snøen. Dette er vist i figur 2.1 og figur 2.2.



Figur 2.2 Viskøs deformasjon av snø (McClung og Schaerer (1998))

### 2.3 Spenninger i snødekket

Ved kryp og glidning vil spenninger kunne oppstå i snødekket. Når spenningene er små kan snødekket justere likevekten ved metamorfose. Strekkspenninger vil oppstå i konvekse partier, nedenfor forankringssoner, ved lokale ujevnheter og lokale svakheter i snødekket. De konkave partiene vil utsettes for trykkspenninger parallelt med underlaget. Mellom strekk- og trykkspenningene vil det være en nøytral sone. Dette er vist i figur 2.3



Figur 2.3 Strekk- og trykksoner i snødekket (Domaas (1980))

Stabiliteten i snømassene vil avhenge av tyngde og helningsvinkel. Mellom sjiktene eller mellom snødekket og terrenget vil det oppstå skjærspenninger. De indre spenningene i snødekket forårsaket av overliggende snøsjikt må ikke overstige materialets fasthet. Fastheten i snødekket avtar når temperaturen stiger til smeltepunktet. Ved snøfall øker fastheten i snødekket, men det gjør også spenningene. Spenningsøkningen skjer momentant med vektøkningen, mens fastheten mellom iskrystallene trenger tid for å utvikle seg. Ved stor intensitet og varighet av snøfall vil spenningene bli større enn fastheten, og snøskred kan utløses.

Domaas (1980) beskriver balansen i et snødekke på en uniform uendelig helning med likning [ 2.2 ]. Skjærstyrken i glideplanet i snødekket kan uttrykkes som en kombinasjon mellom kohesjon og friksjon, som i likning [ 2.1 ].

$$\tau_s = c + \rho g d \cdot \cos \psi \cdot \tan \varphi \quad [ 2.1 ]$$

der

$\tau_s$  = skjærstyrken

$\tan \varphi$  = friksjonskoeffisient

$c$  = kohesjon i snøen

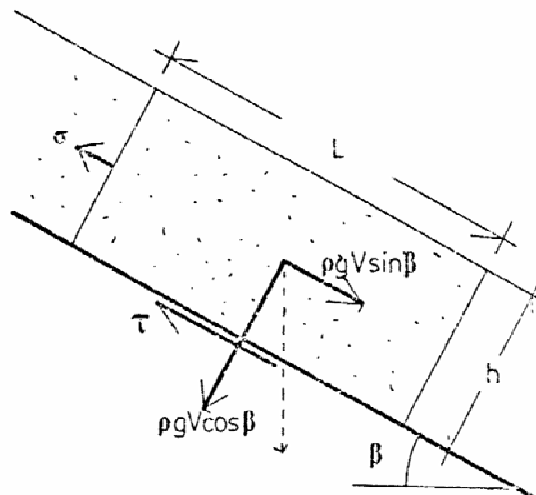
$d$  = tykkelsen på laget under glidesjiktet

$\rho$  = densitet

$\psi$  = terrenghelning

Lied og Kristensen (2003)

Et snødekke på et uniformt hellende terreng kan betraktes som i figur 2.4



**Figur 2.4 Spenning i snødekket på jevnt hellende terreng (Domaas (1980))**

Spenningsene i et snødekke vil være i likevekt når strekkspenningen i snødekket, skjærspenningen mot underlaget og tyngden av snømassen er i balanse. Likevekten i likning [ 2.2 ] må oppnås.

$$\sigma + \tau \cdot \frac{L}{h} - \rho g L \cdot \sin \beta = 0 \quad [ 2.2 ]$$

der

$\sigma$  = strekkspenning i snødekket

$\tau$  = skjærspenning i snødekket

$L$  = lengden

$h$  = snødybden

$\rho$  = densitet

$\beta$  = helning terreng

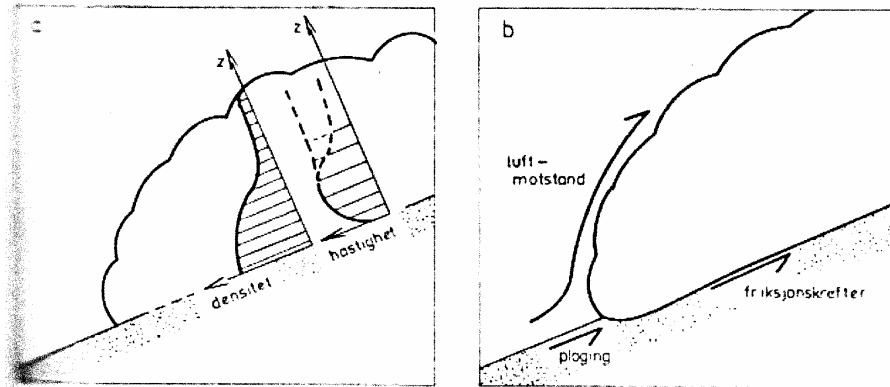
Domaas (1980)

Forholdet  $L/h \gg 1$  er konstant. Derfor vil tyngdens parallellkomponent også være konstant. Strekkfastheten vil være mye lavere enn skjærfastheten, fordi de fleste materialer har relativt liten bruddmotstand mot strekkspenninger.

## 2.4 Snøskred i bevegelse

Domaas (1980) og Lied og Kristensen (2003) forteller at etter skredet er løst ut vil massene delvis pløye i den snøen som skredet går over. Skredet vil på den måten øke sin masse, avhengig av mengde masse i skredet, fastheten i underliggende snø, kapasiteten til skredet og terrengformasjonene i skredbanen.

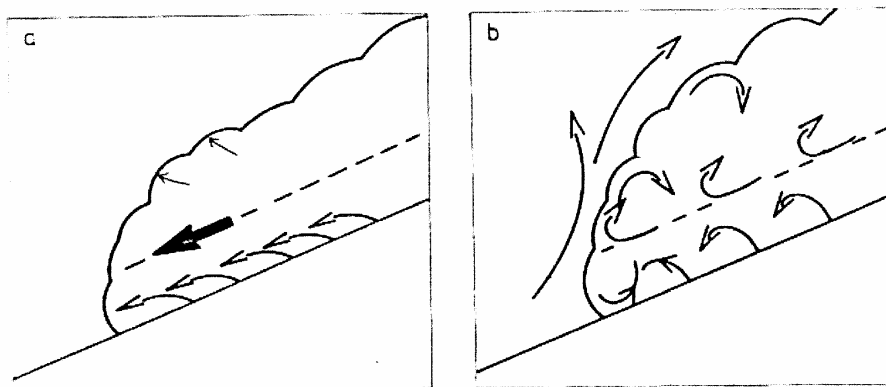
Hvis hastigheten blir stor utvikles det en skredsky av massenes øvre del på grunn av stor luftmotstand. Skredmassene presser luften foran seg opp og forbi, noe som fører til skjærspenninger mellom luft og skredmasser. Dette er vist i figur 2.5.



Figur 2.5 a) densitet- og hastighetsfordeling i skred, b) skredets bevegelsesmotstand (Domaas (1980))

Det er rimelig å tro at det meste av skredmassene vil følge terrenget. Skredets bevegelsesmotstand består av luftmotstand på skredmassene og skredskyen, plogging i fronten av skredmassene, indre motstand og motstand mellom skredsnøen og underlaget.

Den indre motstanden i skredet er sammensatt. Dette skyldes i følge Voellmy ruheten på bevegelsesplanet. Salm mener at indre motstand skyldes bevegelsen mellom partikler som støter mot hverandre. Den indre motstanden er dermed skjærspenning mellom de enkelte snøkorn som igjen gir et energitap. Se skisse av dette i figur 2.6. (Lied og Harbitz (1996))



Figur 2.6 skredmasser i bevegelse - a) i ro - b) i bevegelse (Domaas (1980))

Når massene strømmer ut på jevne flater uten for stor gradient vil massene begynne å avleire. Hvordan massene avleires avhenger av type masse og type skred. Våtsnøskred vil ofte demme seg opp i nedre del skredavleiringen, mens tørr snø pleier å dra seg ut i lengderetning med en dybdefordeling med små variasjoner.

Tørr skredsnø glir på to måter. Det kan løsne som et flak der kohesjonskrefter holder det sammen. Flaket glir enten langs bakken eller langs et annet snølag. Skredet kan også starte ved at neste kohesjonsløs snø glir og ruller over hverandre. Snøflak som glir begynner hurtig å dele seg i snøblokker. Snøblokkene vil deretter rulle på hverandre i en turbulent bevegelse. Hastighet kan dermed finnes ved hjelp av tyngden og friksjonskoeffisienten mellom flaket og den bærende overflaten.

Tørr støvsnø blir virvlet opp i luften og spres ved turbulens. Tørr kornet snø glir, spretter og ruller i en turbulent strøm. Våt snø danner rullende klumper og snøballer som spretter og brytes ned hele tiden, eller beveger seg som en snøsørpe. Snø som strømmer ned en fjellside følger helningen som en vannstrøm, viser turbulens, deformeres lett ved skjærkrefter og gir inntrykk av væskens hastighetsfordeling. Det virker derfor rimelig å anta at bevegelsen har noen av væskens egenskaper. Dimensjonene av kornene er små i forhold til dimensjonene på strømmen av skred. Skredsnø vil ha en del luft i mellom kornene og klumpene av masse. Dette tyder på at analogien med væske kan tillates.

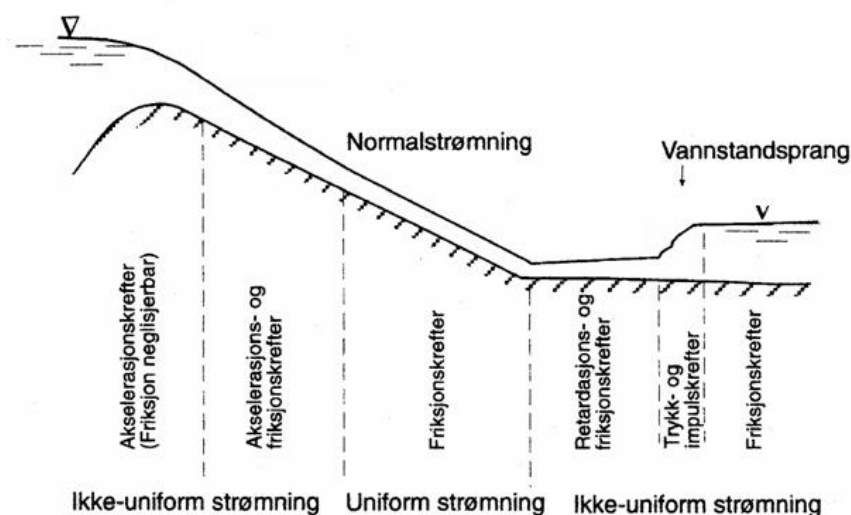
### 3 Vandring av energi i snøskred

For å finne ut hvordan kjegler og voller bør utformes for å stoppe snøskred, er det tradisjonelt blitt brukt enkle energibetraktninger (Hákonardóttir, 2004). Skredsnø er et vanskelig medium å beskrive. Det har derfor vært nødvendig å bruke kjente medier for å kunne lage teoretiske modeller. Metodene som brukes til å finne utløpslengder og fart i skredene er fundamentert på et teoretisk grunnlag og på vurdering av terrengparametere. De fleste teoretiske modeller bygger på kunnskap fra hydrodynamikken, hvor massene beskrives ut fra å være en flytende væske. Snømassene vil i tillegg ha egenskaper som granulær masse. På grunn av mangel på data om snø og snøskredets bevegelse er beregningsmodeller brukt til å forstå fagområdet. Modellene er derfor bygd opp på antagelser som igjen er med på å begrense modellens resultater.

De geometriske grensene for strømmen i et skred er svært kompliserte fordi de varierer i tid og rom. Dette gjør det derfor nødvendig å finne modeller som er flerdimensjonale for å komme nærmest bevegelsene i naturen. Kapittel 3 tar opp hvordan energi vandrer i skred. Det vil ligge som grunnlag for presentasjon av beregningsmodeller i kapittel 4.

#### 3.1 Teoretisk grunnlag fra hydromeknikken

Ved å ta utgangspunkt i et strømningsbilde med varierende vannspeil vil massene i starten av bevegelsen være preget av akselerasjon, det vil si treghets- og tyngdekrefter (figur 3.1). Når løpet har helning vil friksjonskrefter få en større betydning. Hastigheten vil øke inntil friksjonen blir så stor at den energien som går tapt, tilsvarer tilført potensiell energi. En tilstrekkelig lang nok strekning med jevn helning, vil dermed føre til parallell bunn og overflate på masse, såkalt normalstrømning (uniform strømning). Ved overgang fra bratt til slakere kanal vil massene bli retardert. Vannstandssprang dannes dermed når helningsendringen er stor nok (figur 3.1). Vannstandssprang er diskontinuitet i overflaten på massene, der trykk og impuls krefter dominerer. Strømmen kan være turbulent eller laminær. I en turbulent strøm beveger partiklene seg i uregelmessige baner omkring hovedretningen. I laminær strøm glir partiklene parallelt med bunnen. (NVE, 1998) Ved å analysere et snøskred kan disse bevegelsene gjenkjennes.



Figur 3.1 Ulike strømningssituasjoner i vassdrag (NVE, 1998)

Strømning karakteriseres av tre ulike tilstand.

- *Kritisk strømning*: når den spesifikke energien er på et minimum i en gitt utstrømning. Spesifikk energi er summen av energihøyden og dybden av strømmen i et punkt. Spesifikk energi,  $E = y + v^2/2g$ ,  $y$  er høyden av strømmen og  $v$  er farten i strømmen
- *Overkritisk strømning*: når farten er høyere enn ved kritisk strømning og dybden i strømmen er lavere
- *Underkritisk strømning*: når farten er lavere enn ved kritisk strømning og dybden i strømmen er større

(Crowe, Elger og Robertson, 2001)

Froudes tall (Fr) brukes til å vurdere overgangen mellom de ulike strømningsforholdene.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad [ 3.1 ]$$

der

$v$  = fart [m/s]

$g$  = gravitasjonskonstanten [m/s<sup>2</sup>]

$y$  = høyden på strømmen [m]

Når  $Fr < 1$  gjelder dette en underkritisk strømning. Hvis  $Fr > 1$  betegnes strømmingen overkritisk, og når  $Fr = 1$  karakteriserer strømmingen som kritisk. (Crowe, Elger og Robertson, 2001) Froudetallet for snøskred er ca. 10. Det vil si at snøskred har overkritisk strømning (Hákonardóttir, Hogg, Batey og Woods, 2003).

Kraftbalansen i strømmende vannmasser kan forklares ut fra summene av bevegelsesmengde, trykk, gravitasjonskrefter, akselerasjonskrefter og friksjonskrefter. Vannstandsprang forklarer tapet av krefter som skjer ved overgang fra overkritisk til underkritisk strømning i massene. Utseende av vannstandsprang varierer med størrelsen av Froudes tall. Froudes tall mellom 4.5 og 9 er stasjonære sprang og Froudes tall større enn 9 er kraftige sprang. (NVE, 1998)

### 3.2 Energibalanse

Energibalansen uttrykkes ved hjelp av Bernoullis formel, likning [ 3.2 ]. Energien blir presentert i energihøyde/hastighetshøyde. Energihøyden representerer partiklenes kinetiske energi.

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad [ 3.2 ]$$

der

$H$  = energihøyden

$z$  = stedshøyden

$p/\gamma$  = trykkhøyden

$v^2/2g$  = hastighetshøyden

(Crowe, Elger og Robertson, 2001)

Et skred i bevegelse vil hele tiden ha en total bevegelsesmengde som uttrykkes gjennom kinetisk og potensiell energi. Summen av kinetisk og potensiell energi vil være konstant.

$$E_k = E_p \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad [ 3.3 ]$$

der

$E_k$  = kinetisk energi

$E_p$  = potensiell energi

$m$  = masse [kg]

$h$  = høydeforskjell

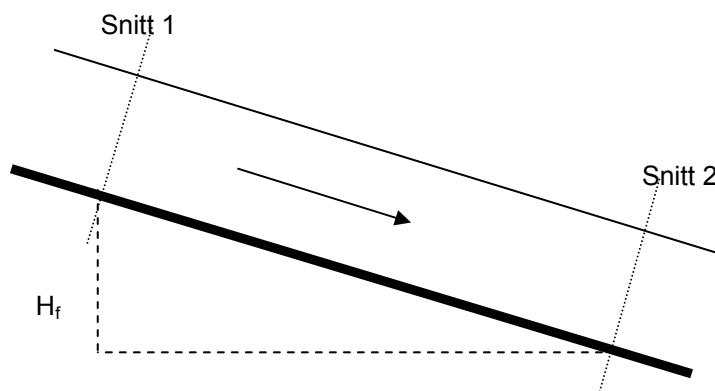
Ved bruk av Bernoullis formel fra snitt 1 til snitt 2 i en strøm følger likning [ 3.4 ] og figur 3.2. Her vil kinetisk energi som går over til potensiell energi uttrykkes som tapt kinetisk energi,  $H_f$

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + H_f \quad [ 3.4 ]$$

der

$H_f$  = tapet av kinetisk energi fra snitt 1 til snitt 2 (figur 3.2)

Årsaken til tapet av energi skyldes oftest turbulens og friksjon. Da vil energihøyden synke i strømretningen. (Crowe, Elger og Robertson, 2001)



Figur 3.2 Bernoullis likning (Norem, 2004)

Bernoullie kan brukes til å uttrykke snøskred. I figur 3.3 illustreres Bernoullis likning for snøskred.

For å finne bremseeffekten som terrenget yter på et snøskred, kan en se på energiforandringen i skredet. Det er flere forhold som har innvirkning på tapet av energi i snøras. Dette gjelder blant annet coulombfriksjon (tørrfriksjon) og hastighetsbetinget friksjon (viskøs friksjon) generelt og støttap spesielt ved bruk av bremsetiltak. (Bakkehøi mfl., 2003) Coulombfriksjonen, såkalt tørrfriksjon, skyldes motstanden som hele tiden vil være mellom massen og bakken. Hastighetsbetinget friksjon blir større, jo høyere farten er. Det vil si at motstanden øker når hastigheten øker, og betegnes som en "roeffekt". (Norem, 2004)

Coulombfriksjonen,  $\mu$  medfører et energitap proporsjonalt til horisontal lengde og normalkraften i skredløpet. Den hastighetsbetingede friksjonen øker med farten i skredet. Det betyr at langsomme skred mister mindre energi per meter sammenlignet med raske skred. Dette betyr at alle skred har en bestemt fart der gravitasjonskrefter er balansert mellom coulombfriksjon og hastighetsbetinget friksjon. Tap av energi skjer også ved støt mellom skred og hinder. Her forsvinner energi som funksjon av sammenpressing og turbulens i massene. (Bakkehøi mfl., 2003)

Tapet av kinetisk energi,  $H_f$  i snøskred, er summen av coulombfriksjon og hastighetsbetinget friksjon, som igjen er funksjon av fart og lengde, se likning [ 3.5 ].

$$H_f = \mu L + Av^2L \quad [ 3.5 ]$$

der

$\mu$  = friksjonsvinkel [°], 0.25-0.35 (14°-19°)

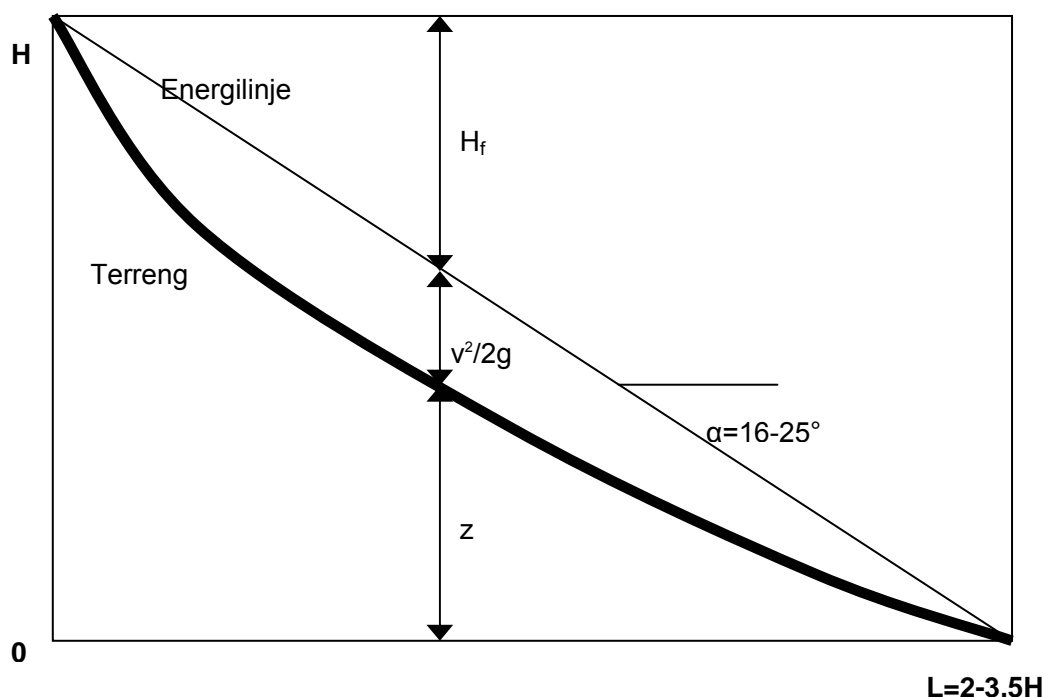
$L$  = horisontal lengde av snøskred [m]

$A$  = konstant, avhengig av farten i skredet, "roeffekten"



Hastighetshøyden som ble presentert i Bernoullis likning kan illustreres ved bruk av en energilinje. Energilinja til et snøskred avhenger derfor kun av farten langs utløpslengden i skredet for å kunne presenteres. Det betyr at energitapet på grunn av dette kan finnes ved hjelp av analyse av hastighetshøyden i skredet. (Norem, 2004)

Når energilinja er tilnærmet rett mellom start- og stoppunkt viser dette at tørrfriksjon er det dominerende leddet i likning [ 3.5 ]. Derimot vil hastighetsbetinget friksjon dominere når energilinja får et svingete løp. Da dominerer det andre leddet, med hastighet i annen potens, i likning [ 3.5 ]. Den svingete linjen avhenger altså av økt hastighet, der høyest hastighet har størst hastighetshøyde. Når hastigheten holder seg konstant vil energilinja ligge parallell med terrenget. Den største endringen i hastighet, vises på energilinja som det punktet med størst helning, med hensyn til terrenget. Dette representerer altså punktet med størst akselerasjon. Hastighetshøyden som energilinja representerer vil ikke kunne gjenvinnes, derfor kan ikke energilinja stige, kun synke. Energilinja med dominerende andel coulombfriksjon er illustrert i figur 3.3 (Norem, 2004)



**Figur 3.3** Bernoullis likning grafisk for snøskred. Her dominerer coulombfriksjonen i skredet. (Norem 2004)

I en energilinje med dominerende hastighetsbetinget friksjon vil hastighetshøyden være stor i øvre deler av skredet og motsvarende liten ved nedre deler av skredet. Utløpsområdet vil ha en mindre helning sammenlignet med utløsningsområdet.

Vinkelen nederst i skredets energilinje forteller i hvilken grad materialet bremses avhengig av friksjonen. Denne vinkelen blir derfor definert som friksjonsvinkelen i skredet. Altså den største vinkelen massene i skredet kan ha før massene beveger seg og raser.

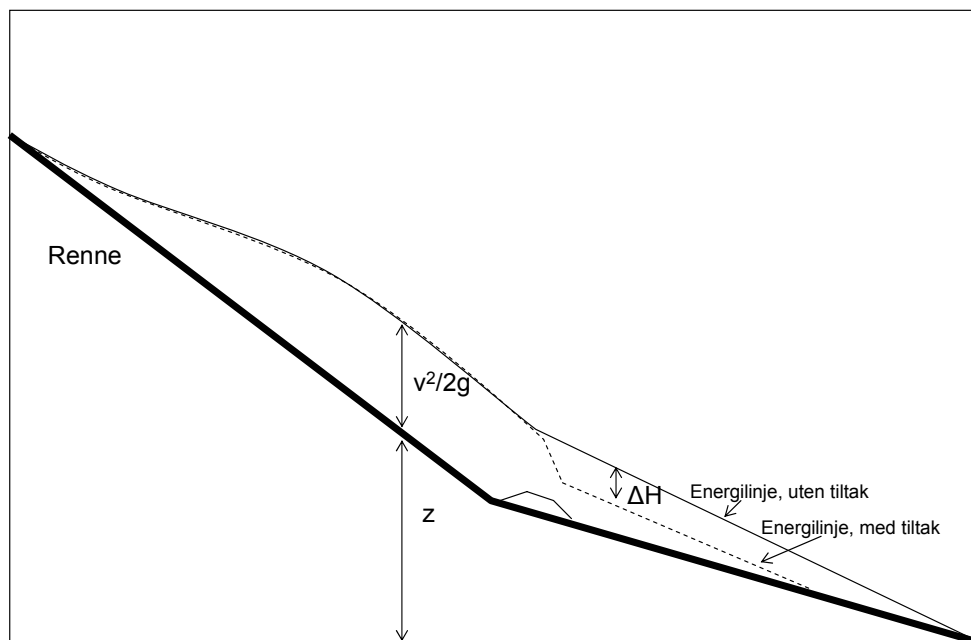
Friksjonsvinkelen forteller i hvilken grad det er coulombfriksjon eller hastighetsbetinget friksjon som er dominerende i skredet. Jo mindre vinkelen er, jo større andel hastighet og mer hastighetsbetinget friksjon er tatt ut. Friksjonsvinkelen vil nærme seg parallell med terrenget. Når hastigheten synker vil coulombfriksjonen dominere i skredet og friksjonsvinkelen øker. (Norem, 2004)

### 3.3 Analysemetode i modellforsøk

For å finne energitapet er forsøkene analysert ved hjelp av energibetraktningene som er gjort i kapittel 3.2. Det blir her vist at energitapet avhenger av en coulombfriksjon og en hastighetsbetiget friksjon. Størrelsen på energitapet vil avhenge av farten i skredmassene, friksjon og turbulens.

#### 3.3.1 Energibetraktninger

Hastighetshøyden,  $H_f$  vil fortelle hvordan energitapet utvikler seg i skredet ved bruk av ulike typer terrengtiltak. Ved å se denne hastighetshøyden i forhold til en normert hastighetshøyde når skredet ikke treffer noen tiltak i skredløpet, kan en se hvordan tapet av energi utvikler seg. Dette energidiagrammet er skissert i figur 3.4. I toppen av renna vil det ikke være noe fart i massene, og følgelig vil det ikke være noe energitap. Når massene beveger seg nedover renna vil massene få en høyere fart inntil de treffer bremsetiltak og bremses av en slakere vinkel. Da vil massene tappes for energi. Ved maksimal utløpslengde i nedre del av renna vil massene igjen være i ro, og følgelig vil all kinetisk energi være tatt ut. Det er dette som presenteres i energidiagrammet. Det normerte skredet har ingen tiltak i skredløpet, og vil derfor representere maksimal utløpslengde og energi.



Figur 3.4 Energibetraktning i renna

Figur 3.4 viser av vinkelendringen i energilinja i øvre del av renna at akselerasjonen stiger i massene her. Etter hvert kan en se at massene inntar en konstant fart, fordi energilinja ligger parallell med renna.

### 3.3.2 Energitap ved bruk av energilinje

For å presentere modellforsøkene som er utført, er det lagt stor vekt på å studere energitapet\* i skredet etter sammenstøtet med terrengtiltak. Terrengtiltak plasseres nedover i renna med ulike plasseringer. Energitapene i skredet er i betydningen av et kinetisk energitap. Hvert tiltak i skredbanen for å bremse massene har et eget potensial for å ta ut en viss mengde kinetisk energi. Dette kan presenteres ved hjelp av tapsfaktorer som betegnes ved  $k_i$ . Det totale tapet av energi betegnes med total hastighetshøyde,  $h_t$ , likning [ 3.6 ].

$$h_t = \sum_{i=1}^{\infty} h_i = h_1 + h_2 + h_3 + \dots \quad [ 3.6 ]$$

Hastighetshøyden,  $h_t$  er dominert av tapet ved endring av hastighet, det vil si kvadratet av hastigheten ved gitt profil der tapene skjer i skredet. Totalt tap av hastighetshøyde kan dermed finnes ved likning [ 3.7 ].

$$h_t = \frac{f \cdot L}{d} \cdot \frac{v_0^2}{2g} + k_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + k_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + k_3 \cdot \frac{v_3^2}{2g} + \dots \quad [ 3.7 ]$$

der

- f = friksjonsfaktor mellom masse og underlag
- L = lengden av hele skredbanen, fra start til stopp
- d = bredden av øvre renne
- $k_1$  = energitap når masse møter knekken i renna
- $k_2$  = energitap når masse møter 1. rad med tiltak
- $k_3$  = energitap når masse møter 2. rad med tiltak
- $v_0$  = hastighet i øvre renna
- $v_1$  = hastighet når masse møter knekken i renna
- $v_2$  = hastighet når masse møter 1. rad med tiltak
- $v_3$  = hastighet når masse møter 2. rad med tiltak

Energitapet blir med dette en funksjon av hastighetsendringer på grunn av friksjon, lengde, bredde, vinkel og knekk i renne, vinkel på tiltak, høyde på tiltak, tettheten av tiltak og treffpunkt mellom masse og tiltak. I tillegg til dette vil spredning av masse etter passering av forrige tiltak gi en spredningseffekt som inkluderes i neste tapsledd

---

\* Energitapet som blir omtalt i forbindelse med modellforsøkene er ment i betydning av kinetisk energitap

### 3.3.3 Effektberegninger

I Brateng (2004) ble det funnet at energilinjene ved bruk av ulike terrengtiltak ligger parallelt. Dette bygger på at energitapet har et tilnærmet konstant forhold til utløpslengden på grunn av balansen mellom tørrfriksjon og hastighetsbestemt friksjon, se figur 3.5. Det betyr at energilinja er bestemt når utløpslengden og friksjonsvinkelen i det dimensjonerende skredet er bestemt. Dette betyr at tapet av hastighetshøyde kan finnes når utløpslengden er bestemt. Videre kan dette brukes til å finne effekten av hvert enkelt tiltak. Effekt er derfor brukt for å uttrykke virkningen de ulike sikringstiltakene yter på massene. Effekten er beskrevet i likning [ 3.8 ].

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{\Delta X}{X_t} \quad [ 3.8 ]$$

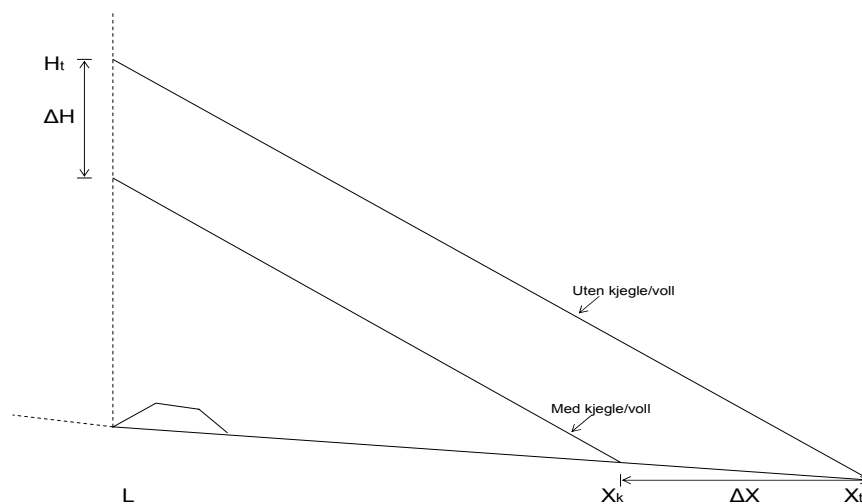
der

$\Delta H$  = endring i energihøyde [m]

$H_t$  = total energihøyde, uten tiltak [m]

$\Delta X$  = endring mellom utløpslengde uten tiltak og utløpslengde med tiltak [m]

$X_t$  = maksimal utløpslengde når det ikke er brukt tiltak [m]



**Figur 3.5** Skisse av energilinjer med og uten tiltak. Disse blir betraktet som parallelle ved fremstilling av effekten til tiltak,  $X_k$  er utløpslengden ved bruk av tiltak.

Videre kan effekten, som er andel tapt energi i forhold til den totale energimengden ved det gitte punktet, i massene uttrykkes ved hjelp av likning [ 3.9 ]. Effekten angir dermed i hvilken grad et tiltak har redusert energien i massene.

$$\text{Effekt} = \frac{X_t - X_k}{X_t - L} \quad [ 3.9 ]$$

der

$X_k$  = utløpslengde ved bruk av tiltak [m]

$L$  = plassering av tiltak [m]

## 4 Beregningsmodeller for snøskred

I dette kapitlet følger en del ulike beregningsmodeller som er valgt ut for å forstå innhold i skreddynamikken og dynamiske og topografiske modeller.

### 4.1 Dynamiske beregningsmodeller

Den hydrodynamiske betraktningmåten er benyttet i en rekke modeller gjennom tiden. Voellmy, Salm, Kørner, Perla mfl. og Norem mfl. er bare et utvalg av personer som har tatt i bruk hydrodynamikken.

#### 4.1.1 Voellmys beregningsmodell

Den eldste og mest kjente beregningsmetoden for hastighet og rekkevidde på snøskred ble utviklet av Voellmy. Dette er en endimensjonal dynamisk modell basert på generell hydraulisk teori for åpen kanalstrøm. Voellmys modell er tyngdepunktbasert. (Norem, 2004)

Snøskredet betraktes som en væske som akselererer hurtig fra ro til en stabil terminal hastighet i en lang hellende kanal. Bevegelsen beskrives videre i et plan bestemt av bevegelsesretning og skredets flyte høyde. Forandring i skredets bredde under bevegelsen tas det ikke hensyn til.

Snøskredets terminale hastighet finnes ut fra Newtons 2. lov, likning [ 4.1 ].

$$v_t = \sqrt{\xi \cdot h (\sin \psi_0 - \mu \cos \psi_0)} \quad [ 4.1 ]$$

der

$v_{\max}$  = maksimal hastighet [m/s]

$h$  = skredets flyte høyde [m]

$\xi$  = relativ terrengruhet og hastighetsavhengig friksjon

$\psi_0$  = terrenghelningen i skredbanen [°]

$\mu$  = friksjonskoeffisienten (coulombfriksjon)

(Lied og Harbitz, 1996)

I følge Voellmy vil det i de fleste tilfeller kunne ses bort fra  $\mu$ , slik at likning [ 4.2 ] gjelder.

$$v_{\max} \approx \sqrt{\xi \cdot h \cdot \sin \psi_0} \quad [ 4.2 ]$$

Snøskredet vil akselerere til en hastighet som holder seg konstant. Deretter vil skredet begynne å retardere. Her må tyngdens parallellkomponent balanseres av skjærspenningen i bunnen og ved toppen av massene. Voellmy antar at skjærspenningen mellom skredmassene og luften over er som i likning [ 4.3 ]. Dette er analogt med dynamisk drag i turbulent strøm.

$$\tau_{xz} = k \cdot v^2 \quad [ 4.3 ]$$

der

$\tau_{xz}$  = skjærspenning

$k$  = ruhetsfaktor

$v$  = hastighet

(Domaas (1980))

Skjærspenningen mellom skredsnøen og underlaget antas å bestå av et dynamisk drag<sup>†</sup>, men siden skredsnøen består av klumper og blokker som glir og støter på underlaget er et friksjonsledd inkludert. Friksjonsleddet er avhengig av normalkomponenten av snøens tyngde. Likning [ 4.1 ] viser

---

<sup>†</sup> Drag er kraften i strømningsretningen

hastigheten for massen når balansen mellom tyngdens parallellkomponenter og skjærspenning er oppnådd. Her er densiteten og drag- koeffisienten samlet til en enkelt konstant  $\xi$ , friksjonstallet. Friksjonsleddet kan sies å bestå av coulombfriksjon,  $\mu$  og hastighetsbetinget friksjon.

Voellmys modell finner videre skredets utløpslengde i likning [ 4.5]. Utløpslengden beregnes fra det punktet i skredbanen hvor terrenghelningen blir så liten at skredet begynner å miste hastighet. For å komme frem til uttrykket har Voellmy brukt energilikningen i likning [ 4.4 ].

$$E_k = E_p + A_r + A_v + A_s \quad [ 4.4 ]$$

der

$E_k$  = kinetisk energi i knekkpunkt

$E_p$  = potensiell energi i knekkpunkt

$A_r$  = indre friksjonsarbeid

$A_v$  = strømmotstand i utløpssonen

$A_s$  = økt motstand fra det enkelte snøpartikkel når knusing av blokker øker

$$S = \frac{v^2}{2g(\mu \cos \psi_1 - \sin \psi_1) + \frac{v^2 g}{\xi h_a}} \quad [ 4.5 ]$$

der

$S$  = skredets utløpslengde [m]

$\Psi_1$  = terrenghelningen i utløpsområdet [°]

$h_a$  = høyden på avlagret snø i utløpsområdet [m]

(Lied og Kristensen, 2003)

Voellmys modell er mye brukt i hele verden. Modellen krever en del kjente verdier som i praksis er veldig vanskelig å finne. I tillegg til dette er modellen veldig følsom, og krever dermed nøye målinger for å gi troverdige tall. Små endringer i inngangsparametrene fører til store variasjoner i hastighet og utløpsdistanse. For at inngangsparametere som  $h$ ,  $\psi$  og  $\mu$  skal gi troverdige verdier må en i detalj bli kjent med deres variasjoner. For å finne dette, må modellen kalibreres mot virkelige skred. (Lied og Kristensen, 2003)

#### 4.1.2 Salms og Kørnens beregningsmodeller

Både Salms og Kørnens beregningsmodell holder seg i stor grad til Voellmys betraktninger.

Det som skiller Salms modell fra Voellmys er bruken av en indre friksjonsvinkel. Salm sier at skredsnøen er et flytende medie som oppfattes som en strøm av klumper. Videre antas at friksjonsvinkelen som virker langs en lengdeenhet kan betraktes som en funksjon av hastigheten og kan uttrykkes ved en Taylor- rekke, som vist i likning [ 4.6 ].

$$R(v) = R(0) + \frac{R'(0)}{1!} \cdot v + \frac{R''(0)}{2!} \cdot v^2 + \dots \quad [ 4.6 ]$$

der

$R(v)$  = friksjonskrefter langs en lengdeenhet

$R(0)$  = friksjonskrefter mellom snøen og underliggende snø eller bakke

$\frac{R'(0)}{1!} \cdot v$  = viskositet i snøen

$\frac{R''(0)}{2!} \cdot v^2$  = leddet er proporsjonalt med friksjonsflaten og densiteten

(Domaas (1980))

Kørner beholder motstandskreftene, friksjonskreftene ( $R_1$ ) og den turbulente flytemotstanden ( $R_2$ ) fra Voellmys modell. Kørner presenterer likning [ 4.7 ].

$$R = R_1 + R_2 = \mu \cdot D_f \cdot \rho \cdot g \cdot \cos\beta + \rho \cdot g \cdot \frac{v^2}{\xi} \quad [ 4.7 ]$$

der

$R$  = motstandskraft

$R_1$  = friksjonskraft

$R_2$  = turbulent flytemotstand

$\mu$  = tørrfriksjonskoeffisienten

$\beta$  = helning

$D_f$  = skredsnøens tykkelse under skredbevegelsen, flyte høyde

$\xi$  = friksjonstall

(Domaas (1980))

Likning [ 4.7 ] gir differensiallikningen [ 4.8 ]

$$\frac{dv}{dt} = g \cdot (\sin\beta - \mu \cdot \cos\beta) - \frac{1}{k} v^2 \quad [ 4.8 ]$$

der

$k = D_f \xi / g$

Dette gir hastigheten i likning [ 4.9 ]

$$v = \sqrt{D_f \cdot \xi \cdot a} = \sqrt{D_f \cdot \xi (\sin\beta - \mu \cos\beta)} \quad [ 4.9 ]$$

Hastighetsuttrykket blir med dette tidsavhengig. Det samme blir også uttrykket for utløpslengde, likning [ 4.10 ]. Kørner sier videre at alle partikler i bevegelse beveger seg likt langs parallelle linjer. Bevegelsen kan dermed betraktes som tyngdepunktsatsen og foregå ved ren glidning.

$$s = k \cdot \ln \text{Cosh} \left( \frac{v_k}{k} t \right) \quad [ 4.10 ]$$

der

$v_k$  = kritisk hastighet

Svært få skred blir observert når de går. Denne tidsavhengigheten er dermed bare med på og forvanske bruken praktisk.

Energilinjen til massen kan tegnes opp som en rett linje mellom skredmassenes tyngdepunkt før start og etter avleiring. Gradienten til linja kan forklares som gjennomsnittlig friksjonskoeffisient. Den vertikale avstanden mellom energilinja og tyngdepunktets bane er hastighetshøyden og forteller om hastigheten til massen. Til sammenligning vil Voellmys modell trenge en konkav energilinje på grunn av at friksjonen er hastighetsavhengig.

#### 4.1.3 PCMs beregningsmodell

PCM-modellen ble innledet av Perla, Cheng og McClung i 1980. Denne modellen er en-dimensjonell og beskriver skredets bevegelse ved å bruke et tyngdepunkt. Massesenterets bevegelse i skredet bygger på Newtons lov om at forandring av bevegelsesmengde betyr summen av krefter som virker på massen.

Skredets masse ( $M$ ) endres kontinuerlig fordi masse som tilføres og avleires i skredbanen kontinuerlig endres. Derfor sier PCM at det eneste logiske referansepunkt til et snøskred er startpunktet. Dette er innlemmet i likning [ 4.11 ], som er tangentlikningen til et skred som beveger seg i en bane med en viss krumming.

$$\frac{1}{2} \frac{dv^2}{ds} = g(\sin\beta - \mu \cos\beta) - \frac{D}{M} v^2 \quad [ 4.11 ]$$

der

$M$  = skredets masse [kg]

$D$  = koeffisient for dynamisk motstand (drag), hastighetsbetinget friksjon

$\mu$  = tørrfriksjonskoeffisient

$\beta$  = terrenghelning [ $^\circ$ ]

(Lied og Harbitz, 1996)

Det tas hensyn til parameterne for tørrfriksjon og forholdet mellom masse og drag (dynamisk motstand),  $M/D$ . Den hastighetsbetingede friksjon kommer til uttrykk gjennom forholdet  $M/D$ . (Lied, 1998)

Likningen blir løst numerisk med hensyn på friksjonskoeffisienten ( $\mu$ ) og forholdet  $M/D$  ved at hele skredbanen deles i korte segmenter, der  $\beta$  er konstant. Hvert segment har en egen vinkel  $\beta_i$ , en lengde  $L_i$ , friksjonsverdi  $\mu_i$  og en  $(M/D)_i$ -verdi. I overgangen mellom hvert segment korrigeres det for energitap. Skredhastigheten beregnes for hvert segment i hele baneprofilen. (Lied og Kristensen, 2003) Problemet med denne to-parametermodellen er at en har to ukjente,  $\mu$  og  $M/D$ , der en må velge den ene parameteren for å finne den andre. Det samme er også problemet i Voellmys modell.

Videre gir likningen [ 4.12 ] maksimal hastighet i skredet,  $v_{\max}$ . Her vil  $\mu$  og  $M/D$  måtte være konstante på uendelig lang skråning med konstant helning  $\beta$ .

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{Mg}{D} (\sin\beta - \mu \cos\beta)} \quad [ 4.12 ]$$

(Lied og Kristensen, 2003)

Likning [ 4.12 ] er i analogi med Voellmys uttrykk for hastighet, med den forskjell at faktoren  $Mg/D$  erstatter  $\xi h$ .

#### 4.1.4 NIS` beregningsmodell

NIS-modellen er funnet av Norem, Irgens og Schieldrop. Dette er en to-dimensjonell modell som beskriver snøskredet som et deformerbart legeme der hastighet og flyte høyde varierer i tid og rom. Modellen er basert på fire ulike parametere. Dette er skredets bruddhøyde, utløpslengde, friksjonskoeffisient og skjærviskositet. (Norem, 2004)

Modellen deler hele skredet opp i små elementer som gjør snøens påvirkning av endringer i terrenget mer reelt. Balansen av masse og bevegelsesmengde løses ved hjelp av numeriske beregninger. Hastighet og flyte høyde beregnes for et hvert element.



Skredbanen har varierende helning og følgelig vil det derfor dannes sentrifugalkrefter. Endringen i helning kan ikke være så stor at det blir ”knekk” og oppstår kast av masse og store komprimeringer. Snøen utgjør et granulært, visko- plastisk materiale med dispersivt trykk<sup>‡</sup> som former en skjærstrøm med eller uten en sliphastighet langs bakken. Skjærstrømmen uttrykkes med tilhørende varierende høyde og uttrykker skjærspenningen. Når erosjon er inkludert i beregningen er ikke sliphastighet inkludert. Når erosjon ikke inkluderes vil sliphastighet langs bakken ha betydning i modellen. (Lied og Harbitz, 1996) Modellen konsentrerer seg om den tyngre delen av massen når den beveger seg i nedre del av skredløpet.

Spenningene i skredet vil være et uttrykk for massens viskoelastisitet og plastiske egenskaper. Normalspenningene i modellen uttrykkes ved likning [ 4.13 ] og [ 4.14 ]. Normalspenningen blir delt opp i tre ulike deler. Dette er effektivtrykket, poretrykket og det dispersive trykket. Den normalspenningen som overføres gjennom kornskjelettet er effektivtrykket. Poretrykket er lufttrykket i de åpne porene i kornskjelettet. Den viskøse delen av skredmassene uttrykkes ved det dispersive trykket, som avhenger av hastighetsgradienten (tøyningsrate). Det dispersive trykket skyldes volumøkningen når hastigheten øker i skredet. Da vil partiklene oppta mer plass enn ved tettete kulelagring når snøen ligger i ro. (Norem, Irgens og Schieldrop, 1987) Uttrykk for normalspenningene i x- og y-retning er vist under.

$$\sigma_x = p_e + p_u - \rho(v_1 - v_2) \left( \frac{dv_x(y)}{dy} \right)^2 \quad [ 4.13 ]$$

$$\sigma_y = p_e + p_u + \rho v_2 \left( \frac{dv_x(y)}{dy} \right)^2 \quad [ 4.14 ]$$

der

$\sigma_x, \sigma_y$  = normalspenning i x- og y-retning, sett fra underlaget

$v_1, v_2$  = normalspenningsviskositeten

$p_e$  = effektivtrykk

$p_u$  = poretrykk

$v$  = hastighet parallelt med underlaget

$\rho$  = gjennomsnittlig densiteten i skredmassen

$\frac{dv_x(y)}{dy}$  = skjærhastighet parallell med terrenget ved høyde, y

(Norem, Irgens og Schieldrop, 1987)

Skjærspenningene i snøskredet beskrives ved bruk av likning [ 4.15 ]. Dette er summen av coulombfriksjon, kohesjon og det dynamiske skjæret. For tørre skred antas det at kohesjon har liten betydning. Coulombfriksjonen er produktet av effektivtrykket og friksjonskoeffisienten. Friksjonskoeffisienten avhenger av størrelse, ruhet og fuktigheten til partiklene i massen. Dette er gitt av tangens til friksjonsvinkelen. De plastiske egenskapene presenteres ved  $a + \mu p_e$ , som er skjærkraft. Det dynamiske skjæret avhenger av hastighetsgradienten i skredmassene. (Norem, Irgens og Schieldrop, 1987). I figur 4.1 er parametrene skissert.

$$\tau_{xy} = a + \mu p_e + \rho m \left( \frac{dv(y)}{dy} \right)^2 \quad [ 4.15 ]$$

der

$a$  = kohesjon

$\mu$  = friksjonskoeffisient,  $\tan B = \mu$ , hvor B er indre friksjonsvinkel

$m$  = skjærspenningsviskositet

(Norem, Irgens og Schieldrop, 1987)

---

<sup>‡</sup> Dispersivt trykk betyr at normalspenningene i skredet avhenger av tøyningsraten

Av de viktigste input- parametrene er friksjonskoeffisienten og bruddhøyden til skredet  
Den kritiske høyden på massene,  $h_{krit}$  er av avgjørende betydning for om skredet kommer i ubalanse og løses ut. Dette ses i likning [ 4.16 ].

$$h_{krit} = \frac{a}{\rho g (\sin \psi - \mu \cos \psi)} \quad [ 4.16 ]$$

Hastighet i skredet finnes ved likning [ 4.17 ] når kohesjon,  $a = 0$  (tørr snø). Kohesjon vil være ulik null når overflaten av snøen er fuktig.

$$v = v_0 + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{gh^3 (\sin \psi - \mu \cos \psi)}{m - \mu v_2}} \quad [ 4.17 ]$$

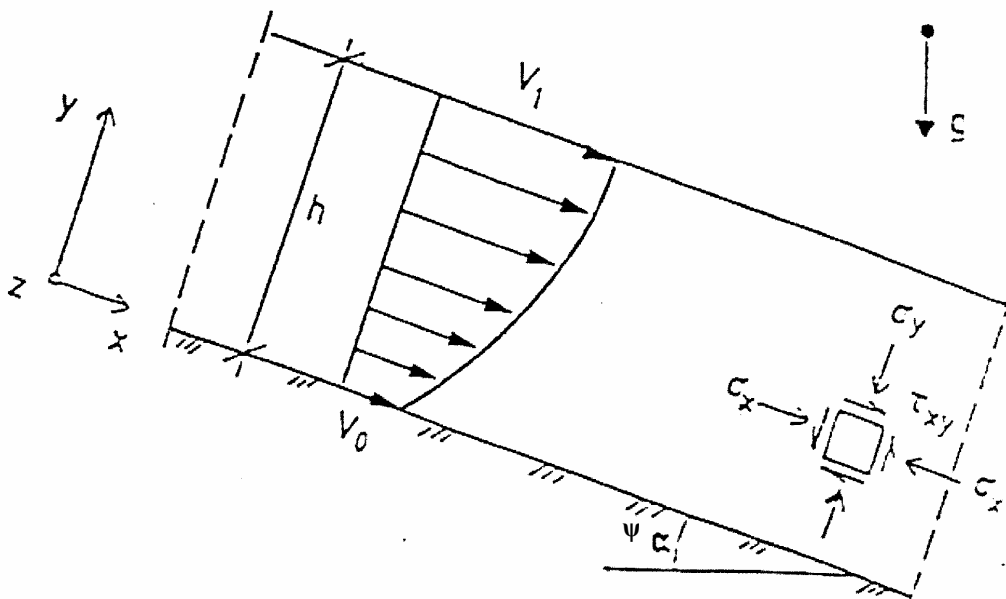
der

$h$  = skredets flyte høyde [m]

$\Psi$  = terrenghelning

$v_0$  = skredets slipp hastighet

(Norem, Irgens og Schieldrop, 1987)



Figur 4.1 Definisjon av skredmasse i likevekt (Lied og Harbitz, 1996)

I den numeriske modellen er kohesjon, skjærspenning på oversiden av massene og erosjon ikke inkludert. Modellen kan brukes med fire ulike kombinasjoner av input. Beregninger kan gjøres med grunnlag i varierende flyte høyde og slipp hastighet, eller varierende flyte høyde og ingen slipp hastighet, eller varierende flyte høyde og et uniformt fartsprofil, eller konstant flyte høyde og fartsprofil.

Verdiene på materialparametrene må finnes ved hjelp av forsøk. Modellen omfatter ikke effekten av temperatur- og volumendringer.

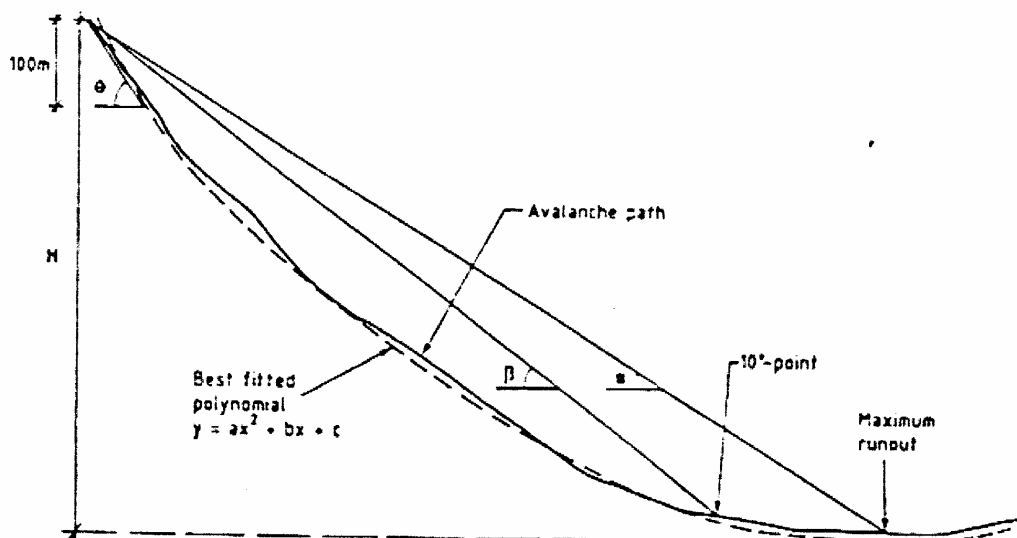
## 4.2 Topografiske modeller

Snøskredets utløpslengde kan også beregnes ut fra terrengparametere. Det er flere modeller som tar i bruk dette. I denne sammenheng kan snøen ses bort ifra. Lied og Bakkehøi lagde en slik metode i 1979. Metoden er basert på kjennskap til det enkelte skreds maksimale utløp i dalbunnen. Ut fra statistisk behandling av tidligere inntrufne snøskred kan utløpslengden beregnes.

### 4.2.1 Lied og Bakkehøis statistiske $\alpha/\beta$ – modell

Det er en tydelig sammenheng mellom skredbanens helningsvinkel og utløpslengde eller  $\alpha$ - vinkel i denne modellen. Den dimensjonerende utløpslengden avhenger i denne modellen av form, type skred som opptrer i skredområdet og dimensjonerende returperiode for skredet.

I modellen kan  $\alpha$  finnes ut fra parametere hentet fra topografien i gjeldene skredbane. Der er  $\alpha$  vinkelen mellom skredets nederste avsetning og øvre kant av utløsningsområdet i fjellsiden.  $\beta$  angir helning mellom skredets start og punktet i skredbanen med helning er  $10^\circ$ .  $\beta$  er den dominerende parameteren i likning [ 4.18 ]. Dette har sammenheng med at tørre skred normalt pleier å begynne nedbremsing ved terrenghelning  $10^\circ$ . (Lied, 1998) Metoden er skissert i figur 4.2.



Figur 4.2 skisse over parametere i  $\alpha/\beta$  – metoden (Lied og Harbitz (1996))

$$\alpha = 0,92\beta - 7,9 \cdot 10^{-4} H + 2,4 \cdot 10^{-2} H y'' \theta + 0,04 \quad [ 4.18 ]$$

der

$\alpha$  = vinkel mellom nedre og øvre kant [ $^\circ$ ]

$\beta$  = helning [ $^\circ$ ]

$\theta$  = vinkelen i utløsningsområdet [ $^\circ$ ]

$y''$  = skredbanens krumning

$H$  = skredet totale fallhøyde [m]

(Lied og Harbitz (1996))

De norske fjellsideene kan som regel beskrives gjennom paraboliske likninger som  $y = ax^2 + bx + c$ . Krumningen på skredbanen vil da være beskrevet ved den 2. deriverte til  $y$ . Skredet vil falle en høyde,  $H$ . Da vil massene avgi varme på grunn av friksjonen i skredbanen. Dette er bare en liten del av skredets totale potensielle energi. Metoden viser også at skred som blir kanalisert ned skredbanen får en lengre utløpslengde sammenlignet med skred som følger åpne baner.

Denne enkle topografiske og statistiske modellen trenger parametere som er enkle å finne uavhengig av snøforholdene. Modellen er derfor benyttet mye for å beregne rekkevidden av skred både i Norge og andre land som Canada, USA, Island, Østerrike og Japan. (Lied og Kristensen, 2003)

Den topografiske modellen er blitt videreutviklet ved at fire av de mest like skredbaneprofilene sammenlignes med profilet der skredutløp skal beregnes. Disse skredbanene skal ha likest mulig baneprofil som den skredbanen det søkes å finne for å innsnevre usikkerheten i rekkeviddeberegninger. (Lied, 1998)

### 4.3 Drøfting av beregningsmodeller

Voellmy utarbeidet den første beregningsmodellen. Salm og Kørner tok samme utgangspunkt som Voellmy, men Salm skiller seg fra Voellmy ved at han betrakter friksjonsvinkel som en funksjon av hastigheten langs skredbanen. Kørner gjør uttrykkene for hastighet og utløpslengde tidsavhengig, noe som bare er upraktisk for å finne input - parametere. Perla har tatt et litt annet utgangspunkt og diskutert et M/D-forhold (masse/drag) på et statistisk grunnlag. Modellen inneholder samme problemstillinger som Voellmy sin modell, men Perla unngår å bruke friksjonstallet og skredets flyte høyde. Dette er to vanskelige parametere å få kjennskap til. Perla sin modell er en massesentermodell.

De dynamiske modellene viser at det tas forskjellige hensyn til ulike parametere. Både Voellmy og PCM- modellene er en-dimensjonell, og tar hensyn til tørr friksjon og hastighetsavhengig friksjon. Gjennom erfaringer gjort i flere år har det vist seg at Voellmy-modellen er for enkel til å modellere hastighet i naturlige snøras. Det største unøyaktigheten er funnet i nedre deler av skredområdet. Både Voellmy- og PCM- modellene tar hensyn til ytre krefter som opptrer på skredmassen. Modellene gir derimot ingen informasjon om de indre kreftene som opptrer i skredmassene. NIS sin skredmodell tar derimot hensyn til flere av skredets fysiske egenskaper. Dette gjelder skredets tykkelse og lengde, fysiske egenskaper ved snøen og deformasjoner i skredet. Her fungerer spenningene i skredet som uttrykk for massens viskoelastisitet og plastiske egenskaper (Norem, Irgens og Schieldrop, 1987).

Spesielt hensynet til skredets flyte høyde er vektlagt på ulike måter i modellene. Dette fører til at hastigheten på skredet vil være svært ulike. PCM- modellen ser bort i fra skredets flyte høyde, og sier dermed at hastigheten er uavhengig av denne høyden. NIS- modellen derimot beregner at en økning i flyte høyden vil gi stor økning i hastigheten. Voellmy sin modell forteller også at hastigheten er avhengig flyte høyden. Økningen i hastighet som skyldes økning i flyte høyde er derimot ikke så stor som i NIS- modell. Dette ses fra likningene [ 4.1 ], [ 4.12 ] og [ 4.17 ].

Ved målinger av naturlig skred er det vist at relativ terrengruhet,  $\xi$  avhenger sterkt av flyte høyden i skredet. NIS- modellen brukt uten slipphastighet,  $v_0$ , viser en modell som ligner utvikling i et naturlig skred veldig bra. (Norem, Irgens og Schieldrop, 1987)

Tørrfriksjon og hastighetsavhengig friksjon tas hensyn til både i Voellmy- og PCM- modellen. Tørrfriksjon uttrykkes ved  $\mu$ , mens den hastighetsbetingede friksjonen uttrykkes ved  $g/h*\xi$ , der  $\xi$  er relativ terrengruhet. I PCM- modellen blir den hastighetsbetingede friksjon uttrykt i forholdet M/D, og finnes ved tilbakeregning av skredet.

Utløpslengden i et skred er mest vanlig å definere som avstanden fra punktet der skredmassene begynner å retardere. Friksjonsforholdene i et skred er ikke så godt kjent at dette punktet kan finnes nøyaktig. (Domaas (1980)) Valg av referansepunkt for å finne utløpslengde kan derfor lett tilføre store feil under beregninger. PCM gjør unntak fra dette og sier at det eneste logiske referansepunkt er der skredet starter på grunn av mengde masse kontinuerlig endres.

De statistiske modellene ser bort i fra parametere knyttet til snøens egenskaper. Disse vektlegger i

stedet parametere som hentes hentet fra topografien i gjeldene skredbane. Det har vist seg at dette gir gode resultater fordi sammenhengen mellom utløpslengde og terrenghelning er tett. Lied og Bakkehøis statistiske  $\alpha/\beta$  – modell gjelder da først og fremst for tørrsnøskred i kyststrøk.

Skredmassenes tendens til å bre seg ut til sidene er lite omtalt i bruken av modeller. Denne parameteren forvansker atskillige beregninger. I tillegg til dette er terrenget bestemmende for hvor mye et skred kan bre seg utover eller bli kanalisert. Parameteren vil mest sannsynlig føre til et korter utløp der massene har mulighet til å spre seg, men parameteren kan også gi lengre utløp der massene blir kanalisert hele skredløpet.

Erfaringer gjort ved bruk av beregningsmodeller tilsier at en bør være varsom med å stole for mye på resultatene. Modellene er likevel viktige for å påpeke dynamikken i snøskredene. Vurderingen av størrelsene på parametrene er det som først og fremst gjør modellene vanskelige å bruke. Små variasjoner på parametrene gir ofte store utslag i resultatene.

## 5 Skredsikring av veger ved bruk av terrengtiltak

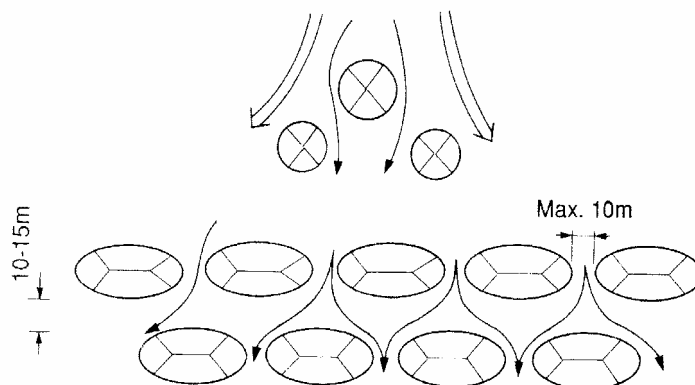
Det finnes ingen anerkjente retningslinjer for hvordan terrengtiltak bør utformes, spesielt er kunnskapen omkring utformingen av bremsekjegler mangelfull. Det finnes heller ingen anerkjente metoder for hvordan retarderende effekt er ved bruk av tiltak. (Jóhannesson og Hákonardóttir, 2003) Hammersland, Norem og Hustad (2000) har derimot samlet inn erfaringer gjort ved bruk av dette. I tillegg er det gjort noen forsøk både i fullskala og som modellforsøk den siste tiden. Modellforsøk er omtalt i kapittel 5.3.

### 5.1 Typer av terrengtiltak

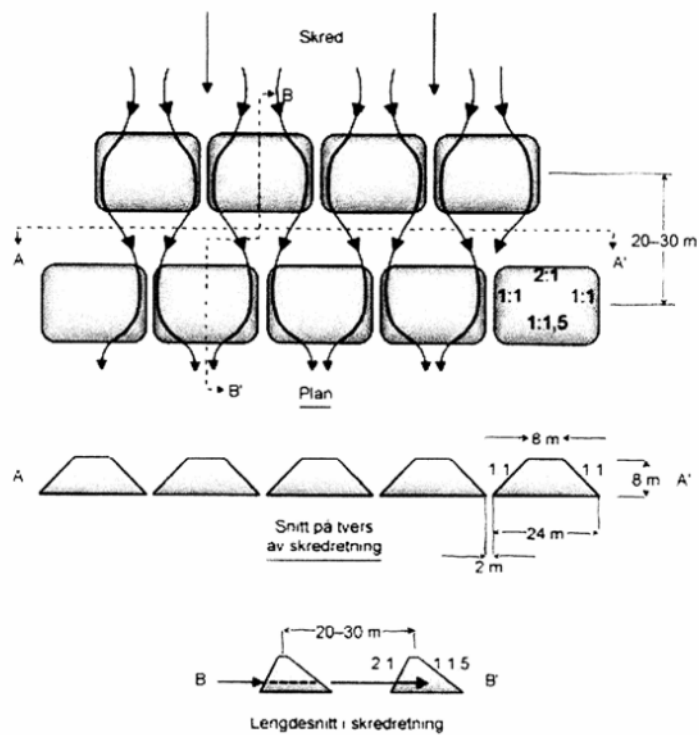
Skredsikring ved bruk av terrengtiltak betyr omforming av terrenget for å oppnå styring og retardasjon av skredmassene. Terrengtiltakene omfatter bremsekjegler, ledevoller og fangvoller. Hensikten med bremsekjegler er at de skal ta ut energi i skredet og følgelig retardere massene. Dette skjer ved at kjeglene har økt overflateareal og dermed øker friksjonen langs bakken, samtidig som den indre friksjonen øker på grunn av store interne bevegelser. Fangvoller er plassert på tvers av vegen og har muligheter til opplagring av masser i front. Vollen vil derfor være naturlig å bruke til å stoppe skredet på den gitte plasseringen. Ledevollenes oppgave er å lede skredet i en bestemt retning, slik at en kan ivareta sikkerheten på et skjermet område. Kunnskap om helninger på terreng, vinkel og høyde på tiltak og plassering i utløpsområde og innbyrdes plassering av tiltak er viktig for å få høy grad av utnyttelse. Den beste måten å ta ut mest energi og følgelig redusere utløpslengden maksimalt, vil være ved en kombinasjon av alle disse tiltakene.

#### 5.1.1 Bremsekjegler

Bremsekjegler bygges normalt opp av løsmasser. Der kjeglens effektivitet avhenger av avstander mellom dem (tetthet), vinkel, plassering og deres høyde i forhold til flyte høyden til skredet. I Statens vegvesen sin håndbok 167, "Snøvern", av Norem (1993), legges det vekt på at kjeglesystemet bør ha stor utstrekning i skredretning slik at massene blir påvirket over en lengre strekning. Skredmassene bør spres sidevegs for å øke friksjonen og følgelig redusere flyte høyde og fart. Det er derfor nødvendig å omforme terrenget i kjegleområdet for å hindre skredet å følge kanaliserte løp. For å oppfylle dette, anbefales det at 1-3 kjegler plasseres relativt høyt og sentralt oppe i skredløpet. Nedenfor bør det være 3-4 rader sjakkbrettmønstret plassering av kjegler. Høyden på disse kjeglene bør være 4-8 meter. For å unngå at massene går diagonalt gjennom rekkene med tiltak, anbefales det at kjeglene bygges opp som små voller med lengde lik kjeglens høyde. Avstanden mellom kjeglene i hver rekke bør ikke være større enn 10 m. Se dette illustrert i figur 5.1 under. Bremsekjeglene anbefales ikke brukt i helninger større enn 15°.



Figur 5.1 Plassering av bremsekjegler (Norem (1993))



**Figur 5.2** Skisse over utforming og plassering av kjepler etter Lied og Kristensen (2003)

McClung og Schaerer (1998) sier at kjepler har størst effekt på fuktige og trege masser. Effekten er tilsvarende liten av hurtige snøskred. Det blir videre anbefalt at kjepler ikke bør bygges i helninger større enn  $15^\circ$  til  $20^\circ$ . Konstruksjonene må dimensjoneres for mer enn et skred, og det bør være minst to rader med kjepler – i sjakkbrettmønster. Videre må kjeplene stå plassert så tett som mulig, med nedre kant inntil nabokjeqlen. Kjeplene har en optimal høyde på 5 til 6 m, utover dette øker ikke effekten stort. På toppen av kjeqlen bør området være 2 m flatt og bredt. Vegetasjon bør anlegges så tidlig som mulig på kjeqlene av jord, for å unngå erosjon.

### 5.1.2 Fangvoller

Virkingen av fangvollen avhenger av høyden og sidehelningen til vollen, snøens egenskaper og snøens og terrengets parametere. Det er vanlig at høyden på vollen beregnes ut fra forholdet mellom potensiell og kinetisk energi som er presentert i kapittel 3.2.

Høyden på vollen kan beregnes ut fra likning [ 5.1 ].

$$H = k \cdot \frac{v^2}{2g} + H_{\text{snø}} \quad [ 5.1 ]$$

der

$H$  = nødvendig vollhøyde [m]

$v$  = fart i skredet [m/s]

$k$  = konstant, varierer mellom 0,7 og 1,0 ("roeffekten")

$H_{\text{snø}}$  = snøhøyden i fronten av vollen

Norem (1993)

$k$ -verdien varierer avhengig av "roeffekten", som er omtalt i kapittel 3.2. Dette betyr at  $k$  nærmer seg 0,7 ved fuktige skredmasser,  $k$  nærmer seg 1,0 ved tørrsnøskred og sørpeskred. Dette betyr at motstanden blir større når farten øker, og høyden må nødvendigvis økes på vollen. Likning [ 5.1 ] sier at vollhøyden er sterkt avhengig av farten i skredet.

Lied og Kristensen (2003) anbefaler en vollhøyde ut fra likning [ 5.2 ]. De setter at den kinetiske energien i skredet må være lik den potensielle energien ved masser i ro. Dette gir en høyde av voll som kan kjennes igjen som hastighetshøyden ved skissering av energilinje for skredet, se kapittel 3.2.

$$h_v = \frac{v^2}{2g} \quad [ 5.2 ]$$

der

$h_v$  = høyde på voll [m]

Lied og Kristensen (2003)

I tillegg til  $h_v$  må også høyden av snøen på bakken, flytehøyden i skredet inkluderes for å finne en nødvendig høyde på vollen. Lied og Kristensen (2003) følger her likning [ 5.1 ] til Norem (1993). Hensynet til type snø er derimot ikke tatt i likning [ 5.2 ].

Norem (1993) anbefaler at arealet bak vollen bør være et bredt horisontalt areal, minimum 3m av vedlikeholdshensyn. McClung og Schaerer (1998) skisserer retningslinjer for å finne hvor stor lagringsplass som er nødvendig bak fangvollen. De anbefaler at plassen bør være 2 til 5 m bred. Avsetningen av snøen har en helning på 10 - 25° og tetthet i avsatt masse ligger mellom 250 – 400 kg/m<sup>3</sup> snø, slik at volum av lagringsplass kan finnes.

Norem (1993) råder til at høyden på voller med steile sider kan reduseres noe sammenlignet med voller med mindre vinkler. Bratt vollside er mer effektivt. Erfaringer tilsier at fangvoller bare er effektive hvis skredhastigheten i fronten av vollen er mindre enn 20 m/s. Dessuten anbefales det at voller kombineres med kjegler for å få et mer effektivt system av tiltak.

### 5.1.3 Ledevoller

Ledevoller har ikke til hensikt å stoppe skredet ved gitt plassering, men skal gi retningsendring i massene. Høyden på leddevoller kan finnes ved likning [ 5.3 ].

$$H = k \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \sin^2 \alpha + H_{\text{snø}} \quad [ 5.3 ]$$

der

$\alpha$  = vinkelen mellom skredets og vollens retning. (Settes denne lik 90° vil likningen også gjelde en fangvoll)

Norem (1993)

Der skredet treffer vollsiden bør vinkelen ikke være større enn 25°. Det anbefales at vinkelen øker nedover i skredbanen for å unngå sprang over voll. I tillegg bør det settes til side god plass mellom terrenget og voll til lagring av skredmasser. Ledevollen bør ha konstant stigning på vollkrona fremfor konstant høyde over bakken. (Norem (1993))

Lied og Kristensen (2003) anbefaler at plasseringen av vollene må gi minst mulig retningsendring for skredet. Dessuten vil plassering av voll i bratt terreng vil lede snøen lettere enn voll på horisontalt plan. I likhet med fangvoller vil hastigheten også her være det mest dominerende ledd for å finne høyde på voll. Ved dimensjonering av leddevoller bør energitapet i massen ligge mellom 0 og 25% avhengig av helningen på vollsidene. Her vil voller med brattere sider ha større ledeeffekt enn slake. Dimensjonerende høyde på vollsiden finnes ved likning [ 5.4 ].

$$v_n = v \cdot \sin \alpha \quad [ 5.4 ]$$

der

$\alpha$  = vinkelen mellom skredets og vollens retning.

$v_n$  = skredhastighetens normalkomponent



Stigehøyden blir i følge Lied og Kristensen (2003) som vist i likning [ 5.5 ]. Stigehøyden vil her øke med økt vinkel mot strømningsretningen.

$$h = \frac{(v \cdot \sin \alpha)^2}{2g} \quad [ 5.5 ]$$

## 5.2 Erfaringer med terrengtiltak i Norge

Bruken av terrengtiltak som bremsekjegler, fangvoller og ledevoller ble først benyttet i Norge i 1976. (Hammersland, Norem og Hustad, 2000) Erfaringer med bremsekjegler siden den gang er noe varierende. De er effektive mot skred som er av et mindre volum og masser som er fuktige. Terrengtiltak har vist seg mest effektive der det er lite naturlig snø på bakken, der skredmassene er faste og har en moderat størrelse. Tiltakene egner seg derfor best i lavlandet og nærme kysten, og minst egnet i høyfjellet. Snøskydelen av skredet hindres derimot ikke av disse tiltakene. Terrengtiltakene representerer alltid store inngrep i terrenget og trenger derfor tilpasning til eksisterende område ved planlegging. (Norem (1993))

I Norge gjennomført Hammersland, Norem og Hustad (2000) en evaluering av sikringsmetoder på 130 snøskredutsatte steder langs vegene. Av disse er 37 av plassene sikret med terrengtiltak. Evalueringen var basert på intervjuer, befaringer og regulariteten til vegene.

Evalueringen viste også at 75% av terrengtiltakene hadde en effektivitet på 70%. I tillegg hadde mer enn 20% av tiltakene mer enn 90% effektivitet. Effektivitet er forholdet mellom antallet stegninger etter bygging av sikringstiltak og antallet stegninger før bygging av sikringstiltak.

Disse studiene fant og bekreftet at terrengtiltak er mest effektivt mot fuktig og våt snø. I tillegg ble det konkludert med at terrengtiltak har liten effekt i høyfjellet. Det viste seg at de eldste terrengtiltakene hadde liten effekt sammenlignet med nyere. Det førte til at 22% av tiltakene ble rekonstruert, dermed økte effektiviteten med 20% hos 90% av disse rehabiliterte konstruksjonene. Det ble registrert i de samme studiene at terrengtiltakene lett kan erodere ved våte skred og sedimentasjon.

## 5.3 Tidligere modellforsøk

Det har vært gjennomført forsøk både i fullskala og som nedskalerte laboratorieforsøk. Det er her valgt å legge vekt på resultater fra tidligere modellforsøk gjort av Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004).

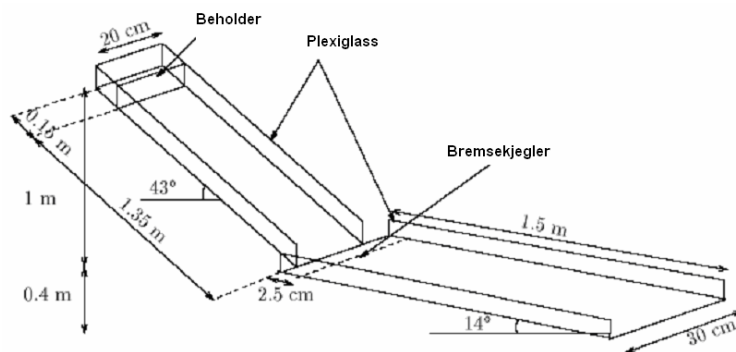
### 5.3.1 Resultater fra Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004)

I 1995 gjorde Chu, Hill, McClung, Ngun og Sherkat en forsøksstudie som tok for seg utforming av kjegler og voller. Dataene fra disse forsøkene ble sammenlignet med endimensjonale beregningsmodeller. Forsøket gikk ut på å sende en granulær masse ned ei renne med varierende vinkel på både renne og hinder. Renne var hengslet direkte i ei plate som fungerte som hinder. Resultatene viste at den endimensjonale modellen til Voellmy ikke tilfredstilte resultatene forsøkene viste.

Siden dette har Kristin Martha Hákonardóttir (2004) utført tilsvarende systematiske forsøk i modellrenner for å finne den mest effektive utformingen på bremsekjegler og voller. Gjennom dette arbeidet ble det konkludert med en rekke prinsipper for hvordan utformingen bør være. Dette er fremdeles bare prinsipper for hvordan bevegelsens møte med tiltak fungerer. For å komme frem til ennå tydeligere og pålitelige retningslinjer for utforming må det studeres videre. Sikring mot snøskred krever ofte kombinasjoner av flere rader med tiltak for å gi høyere bremseeffekt. Problemstillingen går da ut på hvor tiltak bør plasseres, innbyrdes avstand ved bruk av flere rader, samt type utforming som fungerer best sammen. En systematisk utførelse av modellforsøk med hensikt å finne ut av dette ble

gjennomført av Brateng høsten 2004. Dette arbeidet bygde delvis opp under Kristin Martha Hákonardóttir (2004).

Modellforsøkene til Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004) ble gjennomført i en 3m lang modell som vist i figur 5.3. I tillegg til dette utførte Hákonardóttir forsøk i 6, 9 og 34m lang renne. Den 3m lange renna var 0,2m bred i øvre del og 0,3m bred i nedre del. Det førte til at massene ikke kunne spre seg fritt i utløpsområdet, men likevel vise tendenser til bevegelse i massene. Det ble brukt 2 kg ballotinimasse ved utførelsen i begge modellforsøkene. Forsøkene ble filmet og analysert på denne måten. Brateng (2004) analyserte resultatene ut fra tap i kinetisk energi ved bruk av hastighetshøyder, i tillegg til effekten av reduserte utløpslengder.



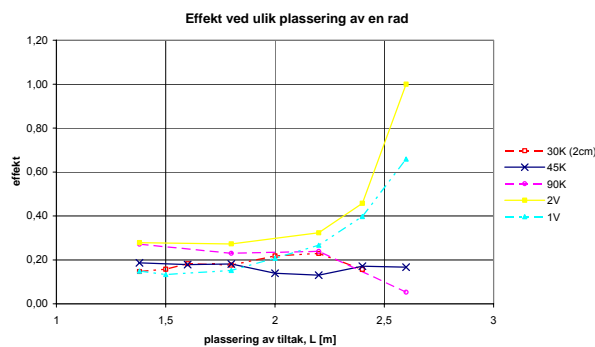
Figur 5.3 Modellen i forsøkene til Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004)

Resultatene til Brateng stemte godt med de resultatene Hákonardóttir fant i sitt arbeid. Forskjellen i de to uavhengige forsøkene er først og fremst ruheten som fører til ulike utløpslengder. Hos Brateng ble maksimal utløpslegde målt til 2,73m. I tillegg til dette lå effekten av tiltakene litt lavere hos Brateng enn sammenlignet med Hákonardóttir. Fart, flyte høyde og Froudetall er vist for de to modellforsøkene i tabell 5.1.

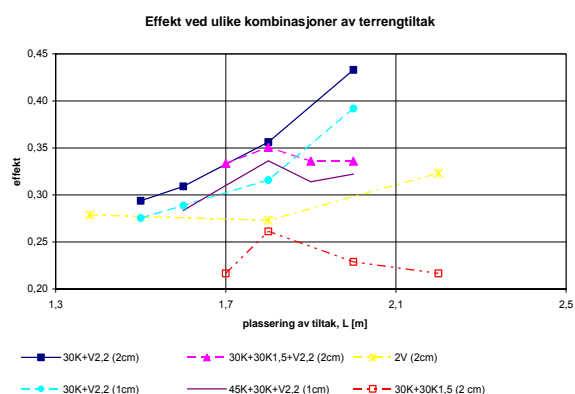
Tabell 5.1 Fart, flyte høyde og Froude tall for forsøkene til Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004)

	Fart [m/s]	Flyte høyde [m]	Fr
Hákonardóttir (2004)	2,7	0,006 ± 0,001	11,2
Brateng (2004)	3	0,006 ± 0,001	12,4
Tørrensøskred	40 – 45	1,5	10 - 12

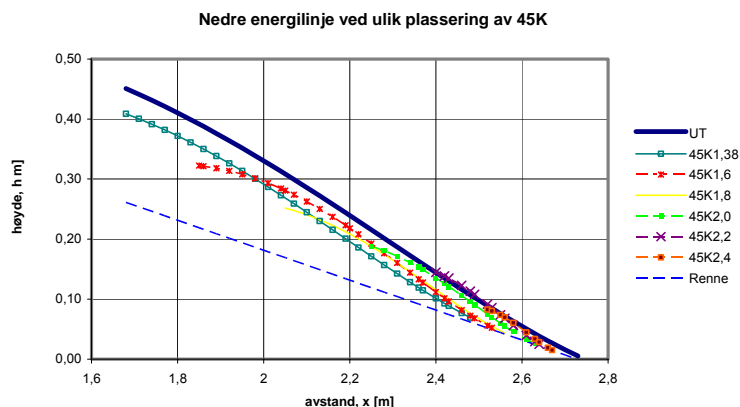
Brateng (2004) fokuserte mye på energilinje ved fremstilling av resultatene. Dette viste at massen oppnådde konstant fart i øvre renne. I tillegg ble det vist at tapet av hastighetshøyde ved bruk av tiltak gir et tilnærmet parallelt forhold til energilinja for skred uten tiltak i nedre renne se figur 5.6. Dette gjør forholdet mellom tap av hastighetshøyde og utløpslengde lineært og dermed enkelt å bruke effektberegninger for å finne tapet av energi ved ulike tiltak. Energitalpet i skredet kan dermed finnes grafisk med denne metoden. Beregningene av energilinje ble gjort ut fra trendlikningen til fartsutviklingen av massen. På den måten ble fartsutviklingen en tilnærming til den reelle avlesningen.



Figur 5.4 Effekt ved ulik plassering av en rad (Brateng, 2004)



Figur 5.5 Effekt ved kombinasjoner av tiltak (Brateng, 2004)



Figur 5.6 Parallele energilinjer for 45K (Brateng, 2004)

Resultatene til de to uavhengige modellforsøkene til Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004) viser samme tendenser. Beregninger av effekt er vist i figur 5.4 og figur 5.5. Resultatene er summert i punktene under.

- i. Høye voller viser en entydig effektivitet. Jo høyere, jo mer effektive. Se figur 5.4.
- ii. Kjegler øker effektiviteten kun inntil en viss høyde, utover dette er ikke gevinsten stor i form av høyere effektivitet. Hákonardóttir sier optimal høyde på kjeglene kan være inntil høyden er omtrent dobbel så stor som tykkelsen på strømmen.
- iii. Lave kjegler (der  $H/h < 2$ ) er mer effektivt enn lav voll.
- iv. Voll er mer effektiv, jo lengre ned i utløpsområdet den plasseres.
- v. Kjeglene er mer effektivt, jo lengre opp i utløpsområdet de plasseres.
- vi. Høyden på hinderet bør være omtrent den samme som bredden,  $H/B=1$
- vii. Større tetthet hos kjeglene gir økt effektivitet. Større overflateareal gir også mer friksjonsflate. Lavere tetthet av kjegler gir en økt sklieffekt av massene.
- viii. Kjegler med stor vinkel er mer effektive enn kjegler med liten vinkel. Jo brattere kjeglen er, jo mer energi tar den ut, forutsatt at de er plassert høyt oppe i utløpsområdet.
- ix. Ved kombinasjon av to tiltak, en voll og en kjeglerad, bør vollen plasseres langt nede i utløpsområdet og kjeglene bør plasseres så høyt opp i området som mulig.
- x. Ved kombinasjon av tre rader med tiltak, en voll og to rader med kjegler, bør den midtre raden plasseres slik at den fanger opp massene som faller ned rett etter den første raden. Det vil si at plassering av den andre raden bør være en funksjon av kastelengden over første rad.

- Plassering av den andre raden lengre foran eller bak enn dette, gir en kraftig reduksjon i effektivitet og økt utløpslengde.
- xi. Ved kombinasjon av kjebler og voller vil det være fornuftig å tro at effektiviteten av disse vil være på omtrent 35 %.
  - xii. For å stoppe et skred fullstendig må høyden på tiltaket være like høy som hastighetshøyden i skredet.
  - xiii. Når høyden på kjeblene øker, øker også vinkelen der massene kastes over hinderet.
  - xiv. Ved en oppstrøms vinkel på kjeble ( $\alpha$ ) større enn  $60^\circ$ , oppnås bare et marginalt energitap i nedbremsning av skredet (Hákonardóttir, 2004).
  - xv. Når  $H/h$  øker, vil kastevinkelen over kjeblen nærme seg  $75^\circ$  istedenfor  $90^\circ$ . Det skyldes sannsynligvis kilen av masse som bygges opp i front av kjeblen (Hákonardóttir, 2004).

Brateng fant at ved bruk av kun en rad med kjeble (90K2-137) gav dette en effekt på omtrent 28%. Hákonardóttir fant at den mest effektive raden med kjebler bremser utløpslengden med omtrent 30%. Ved bruk av to rader med kjebler ble utløpslengden redusert med omtrent 40%. Det vises derfor til at bremsekjebler har en betydelig virkning i å retardere skredmasser, masser med høyt Froude tall.

I tillegg til dette har Hákonardóttir (2004) utført forsøk med ledevoller. Hun har funnet at flyteøyden langs voller holder seg tilnærmet konstant langs vollaksen når  $Fr$  er lik 12. Oppsettet og konstruksjonen av modellen som Hákonardóttir her har brukt i disse ulike delforsøkene er derimot ulik den konstruksjonen som er brukt i de tidligere omtalte forsøk. Resultater i detalj er derfor vanskelige å overføre til resultater som kommer i kapittel 8.

## 5.4 Modellovene

Ved å overføre resultatene fra modellforsøk til natur, kan en finne hvordan skredsikringen vil opptre i virkeligheten. Til dette brukes modellover.

Alle betingelsene som naturen gir vil ikke kunne være mulig å oppfylle inne i et laboratorium. Dette gjelder spesielt terrengformasjonene og klimaet. Modellforsøk i et laboratorium er til gjengjeld enkle å gjennomføre. De er tidsbesparende, lette å observere, forholdene mellom hvert forsøk er stabile og håndtering av masser er rimelige å jobbe med. Forsøk i 1:1 forhold vil være vanskeligere å observere og forholdene under forsøkene vil ofte varierende. Dessuten trengs det langt mer utstyr og ressurser for å gjennomføre.

### 5.4.1 Teori

Norem (1974) og Novak og Cábalka (1981) forteller at en modell som skal kunne gi de ønskede opplysninger må tilfredsstillende tre betingelser. Dette gjelder geometrisk likedannethet, kinematisk likedannethet og dynamisk likedannethet.

- *Geometrisk likedannethet* gjelder når modellene er en kopi av naturen, der alle lineære dimensjoner (lengder og vinkler) er redusert med samme faktor.
- *Kinematisk likedannethet* gjelder der modellen har hastigheter som reduseres med samme faktor og en geometrisk utforming som lik naturen. Forholdet mellom hastigheter og akselerasjoner må holdes konstant. Strømningshastighet i ballotinien inngår her, samt partikkelhastigheten.
- *Dynamisk likedannethet* gjelder der alle krefter som virker i et bestemt punkt i naturen og modellen har samme forhold til hverandre. Det betyr at resultanten av kreftene må ha samme innbyrdes forhold. Følgelig vil akselerasjonene av de enkelte partiklene i ethvert punkt ha samme retning og størrelse. De viktigste kreftene på væskeelement i en strøm vil være treghet, friksjon og gravitasjon.

Det er tradisjonelt blitt brukt energibetraktninger med rot i hydromeknikken for å beskrive bevegelsene i skred, som omtalt i kapittel 3. Ved utledning av en modellov er det derfor vesentlig å ta utgangspunkt i grunnleggende strømningslover. Bevegelsen av en væskepartikkel følger Newtons andre lov i likning [ 5.6 ].

$$\bar{K} = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad [ 5.6 ]$$

der

K = treghetskraft

m = masse [kg]

v = hastighet [m/s]

T = tid [s]

Videre kan treghetskraften, K settes lik summen av gravitasjonskraften og friksjonskraften i likning [ 5.7 ].

$$\rho \cdot d^3 \frac{dv}{dt} = \rho \cdot d^3 \cdot g + C_D \cdot \mu \cdot v \cdot d \quad [ 5.7 ]$$

der

$\rho \cdot d^3 \frac{dv}{dt}$  = treghetskraft, K

$\rho \cdot d^3 \cdot g$  = gravitasjonskraft/tyngdekraft, T

$C_D \cdot \mu \cdot v \cdot d$  = friksjonskraft, F

v = hastighet [m/s]

g = gravitasjonskonstanten [m/s<sup>2</sup>]

$\rho$  = tetthet

$\mu$  = dynamisk viskositet

d = flyte høyde

$C_D$  = konstant

Her oppfattes høyresiden som en ytre kraft, treghetskraften, og samtlige krefter som virker på partikkelen skal være i likevekt. Treghetskraften, tyngdekraften, viskositetskrefter og trykkrefter er krefter som er rimelig å tro vil påvirke ballotinien i modellforsøkene. Alle disse størrelsene vil forekomme i strømmingen, men med varierende størrelse. Det viser seg at en kun kan utvikle korrekte modellover når ikke alle kreftene er av samme størrelsesorden. Det er derfor veldig viktig å vite hvilke krefter som har betydning i modellforsøkene.

#### 5.4.2 Modellover i modellforsøket

I praktiske modellforsøk vil enten den geometriske eller den kinematiske modellmålestokken være bestemt av laboratoriestyrets begrensninger. Valget av det ene kriteriet vil være bestemmende for det andre kriteriet.

I denne rapportens modellforsøk er det interessant å finne optimale plasseringer og utforminger på terrengtiltak for å retardere og lede skred på en best mulig måte. Det er derfor nødvendig å gjengi alle mål i naturen i samme forhold, både vinkel og lengde. Den geometriske likedannetheten må derfor være oppfylt. Dermed er det geometriske likedannetheten bestemmende for den kinematiske modellmålestokken

Reynoldstallet og Froudetallet er eksempler på tall som betegner forholdet mellom de kreftene med mest betydning. I dette forsøket er det hurtige massebevegelser og Froudetallet er derfor det aktuelle forholdet å ta hensyn til.

*Froudes modellov* gjelder der gravitasjonskreftene dominerer. Forholdet mellom treghetskraft og gravitasjonskraft blir følgende, vist i likning [ 5.8 ].

$$\frac{K}{T} = \frac{\rho \cdot d^3 \cdot \frac{dv}{dt}}{\rho \cdot d^3 \cdot g} = \frac{v^2}{d \cdot g} \quad [ 5.8 ]$$

der

$$\frac{v}{\sqrt{d \cdot g}} = \text{Froudes tall, Fr}$$

Froudetallet må være like stort i naturen som i modellen. Det vil si at likning [ 5.9 ] må være oppfylt.

$$\frac{v_m^2}{d_m \cdot g_m} = \frac{v_n^2}{d_n \cdot g_n} \quad [ 5.9 ]$$

Dermed må likning [ 5.10 ] være lik 1, for at Froudes modellov skal gjelde.

$$\frac{v_s^2}{d_s \cdot g_s} = 1 \quad [ 5.10 ]$$

Siden tyngdens akselerasjon er tilnærmet konstant,  $g_s = 1$ , må hastighetsskalaen bli som i likning [ 5.11 ]:

$$v_s = \sqrt{d_s} \quad [ 5.11 ]$$

I disse modellforsøkene blir det i tillegg tatt hensyn til helningen på energilinjen. Tapet av hastighetshøyde må være lik for skred i modell og natur. Det betyr at et riktig skalert tilfelle vil gi et tilfelle der energilinjen for modell kan legges over energilinjen i naturen. Bruk av modellovene er gjort i kapittel 10. Der blir resultater fra modellforsøkene overført til sikring av skredområdet Nakkefonna ved hjelp av modellovene.

## 6 Modellforsøk

Dette modellforsøket skal studere hvordan terrengtiltak bør utformes og plasseres innbyrdes for å oppnå en best mulig sikringseffekt. Systematiske forsøk må derfor utføres for å finne dette. I forsøket inngår også direkte rettede forsøk for sikring av skredområdet Nakkefonna langs Rv 60 i Møre og Romsdal. Modellforsøket omfatter derfor bruk av kjegler, voller og plasseringen av disse i terrenget.

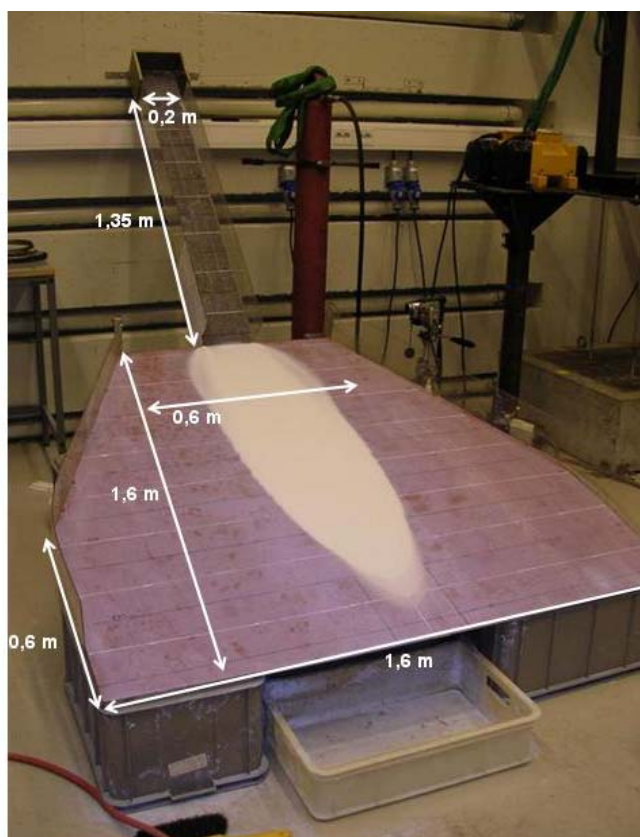
### 6.1 Metode

Utformingen av modellen i dette forsøket bygger videre på modellforsøkene i Brateng (2004). Konstruksjonen av modellen er derimot videreført noe fra dette, ved at nedre del av renna kan spre massene uten å bli kanalisert av sidevegger.

Dette modellforsøket simulerer sikring av veger mot snøskred, ved å bruke terrengtiltak som sikringsmetode. Omgivelsene etterlignes av en 3 meter lang leddet renne, der nedskalerte terrengtiltak er plassert i den nedre delen av renna. Utførelsen av forsøkene skjer ved at en granulær masse sendes ned renna. Forsøkene ble filmet slik at bevegelser og parametere kunne tas ut for analyse.

#### 6.1.1 Konstruksjonen

Renna er laget av kryssfiner med plexiglass på sidene. Den er 3,1 meter lang. Øvre del av renna er 1,5 meter lang, 0,2 meter bred og en helning på  $43^\circ$ . Den nedre del av renna har varierende bredde, som vist i figur 6.1, for å gi massene mulighet til å spre seg. Lengden på nedre renne er 1,6 meter og helningen er  $11^\circ$  og  $14^\circ$ . Ved forsøk med  $11^\circ$  helning på nedre renne, ble knekken i renna også gjort noe avrundet med en folie. Folien hevet det dypeste knekkpunktet med ca 0,003 m. Øverst i renna er det en beholder som ble brukt til å løse ut massene. Dimensjoner på renna er illustrert i figur 6.1 og figur 6.4. Renna ble belagt med dobbeltsidig tape. Denne tapen tilpasset friksjonen i renna. Kjente avstander ble merket opp både i plan og tverrprofil for avlesing (se figur 6.1).



Figur 6.1 Renne med dimensjoner og utløp av masse uten bruk av tiltak. Helning i øvre renne er  $43^\circ$  og  $11^\circ$  og  $14^\circ$  i nedre renne.

### 6.1.2 Masse

Materialet i forsøksmassene er ballotini. Dette er et granulært glassmateriale med partikkeldiameter 0,1 mm. Ballotini har en tetthet,  $\rho$  lik 1600 kgm<sup>-3</sup>. Friksjonsvinkelen,  $\varphi^{\S}$  i materialet ligger mellom 21° – 23°, og dynamisk friksjonsvinkel,  $\delta$  mellom 19° og 21°. Dette gir en coulombfriksjon (tørrfriksjonen) i materialet mellom 0,34 – 0,38. I alle forsøkene ble det brukt 3 kg masse ballotini.

### 6.1.3 Terrengtiltak

Terrengtiltakene omfatter bremsekjegler, rette voller og buede voller. Disse har ulike utforminger med hensyn til vinkel, høyde, bredde og lengde. Bremsekjeglene er lagd av tremateriale, mens vollene er lagd av plastmateriale.

Brateng (2004) har funnet at kjegler har best effekt når de er plassert så høyt som mulig oppe i renna. Vollene beholder mest av effekten når tiltak plasseres lengre ned i renna. Dette er lagt til grunn ved plassering av kjegler og voller i dette modellforsøket. Oversikt over de ulike typer utforminger med forklaring er vist i Tabell 6.1.

**Tabell 6.1 Oversikt over ulike typer utforming brukt i modellforsøket**

Navn	ID	Helning tiltak, $\beta$ [°]	Høyde, H [cm]	Tetthet, A**
Uten tiltak	UT	-	-	-
Kvadratisk/ rektangulær/ skrå kjegler	K RK SK	45 60	2 3	0,73 (60K2 og 3) 0,82(60RK2 og 3) 0,67 (45K2 og 3) 0,82 (60K2_0 +30F1) 0,73 (60K2_1 +30F1) 0,67 (60K2_2 +30F1) 0,78 (60RK_1,5 + 30F1) 0,80 (60RK_1 +30F1) 0,75 (60RK_2 +30F1) 0,87 (60K1_0 +30F1)
Plogvoll	PV	60	2	1
Rett voll	RV	30 60 90	2 3 4	1
Buet voll (10° mht X)	BV	30 60 90	2 3 4	1
Fundament	F	30	1	1

\*\* A er tetthet av tiltak, tildekt tverrsnittsareal dividert på totalt tverrsnittsareal.

Ved omtale av forsøkene er det nødvendig å følge navnregler for hvordan hvert enkelt forsøk med sin spesielle sammensetning av tiltak skal kunne kjennetegnes. Dette er en sammensetning i følgende rekkefølge;

helning + ID + høyde + plassering i lengdeprofil + avbøyningsvinkel voll, eventuelt tetthet kjegle.

<sup>§</sup> Friksjonsvinkelen,  $\varphi$  er den maksimale helningen der materialet kan ligge i ro.



Dette er vist i et utvalg av eksempler i tabell 6.2.

Tabell 6.2 Eksempler på navngiving av delforsøk

Navn	ID	Høyde [cm]	Helning tiltak, $\beta$ [°]	Plassering [cm]	Tetthet (kjegle) / avbøyningsvinkel (voll)	Kjennemerke
Kjegle	K	2	60	137	ingen avstand mellom hver kjegle	60K2-137
Kjegle	K	2	60	150	1 cm	60K2-150 1
Rett voll	RV	3	60	180	15	60RV3-150-15
Buet voll	BV	3	60	180	-	60BV3-180

Figur 6.2 under viser utforming av og definisjoner på kjegler og oppsettet av plogformede kjegler og kjegler på fundament.



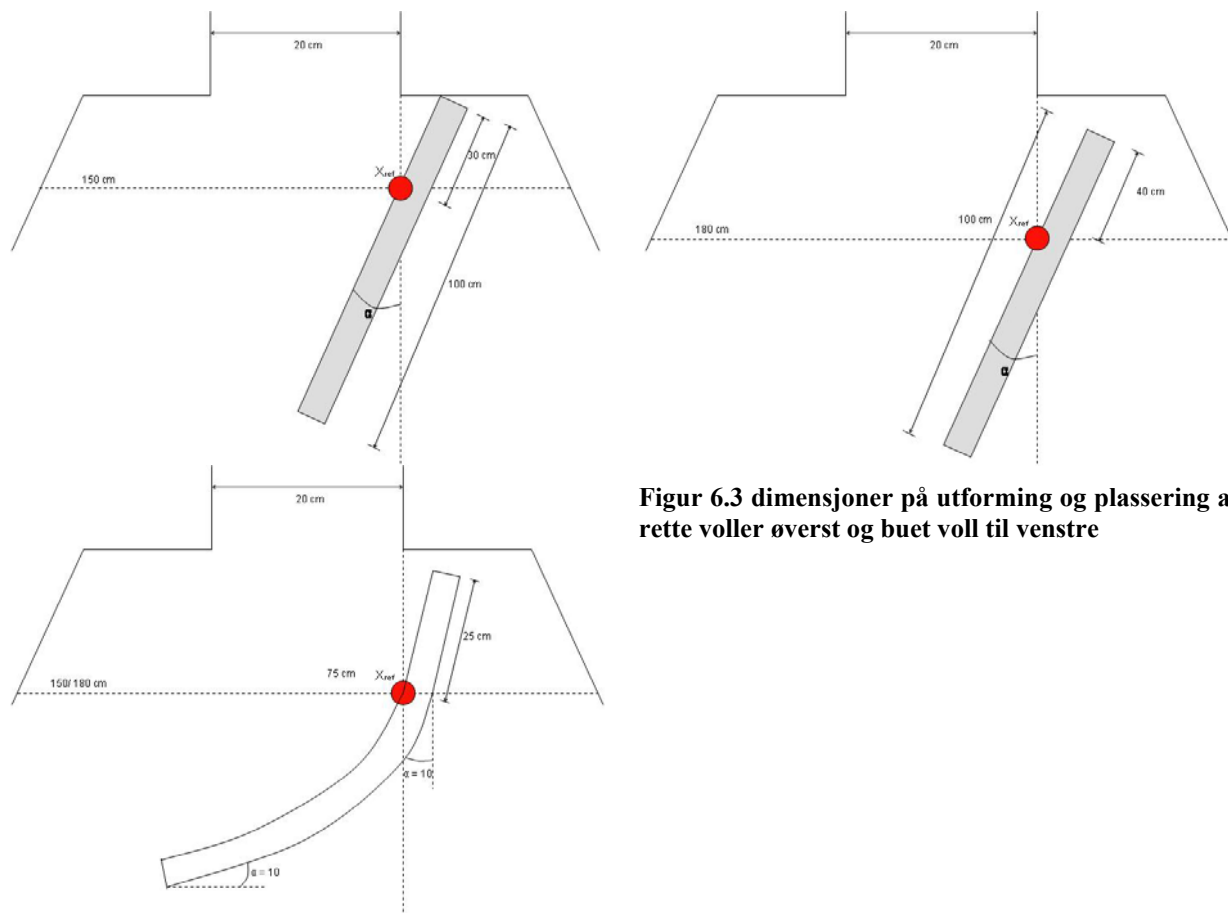
Figur 6.2 Utforming av K og RK samt kjegler på 1cm høyt fundament

Plasseringen av tiltakene var som følger under og dimensjoner er skissert i figur 6.3;

**Kjegler (K):** fremre kant av kjeglen ble plassert på angitt plassering. Fremre kant vil si foten av kjeglen. Ei kjegle er alltid plassert på senterlinje i renna.

**Rette voll (RV):** De rette vollene var 1 meter lange. De ble plassert med fremre kant (foten av vollen) ved angitt avbøyningsvinkel. Ved plassering av vollen 1,8m nede i renna er profil 0,4m på vollen plassert i Xref. Ved plassering av vollen 1,5m nede i renna er profil 0,3m på vollen plassert i Xref.

**Buede voll (BV):** De buede vollene ble satt sammen av to moduler, 0,25m rett voll + 0,50m buet voll. Total lengde på vollen var 0,75m. BV har en vinkel på  $10^\circ$  med hensyn til skredretningen ved  $X_{ref}$ . Modulen på 0,5m ble montert i punktet  $X_{ref}$  og 0,25m- modulen ble en forlengelse av dette. Radius på modulen er 0,4m og buelengde på 0,5m.



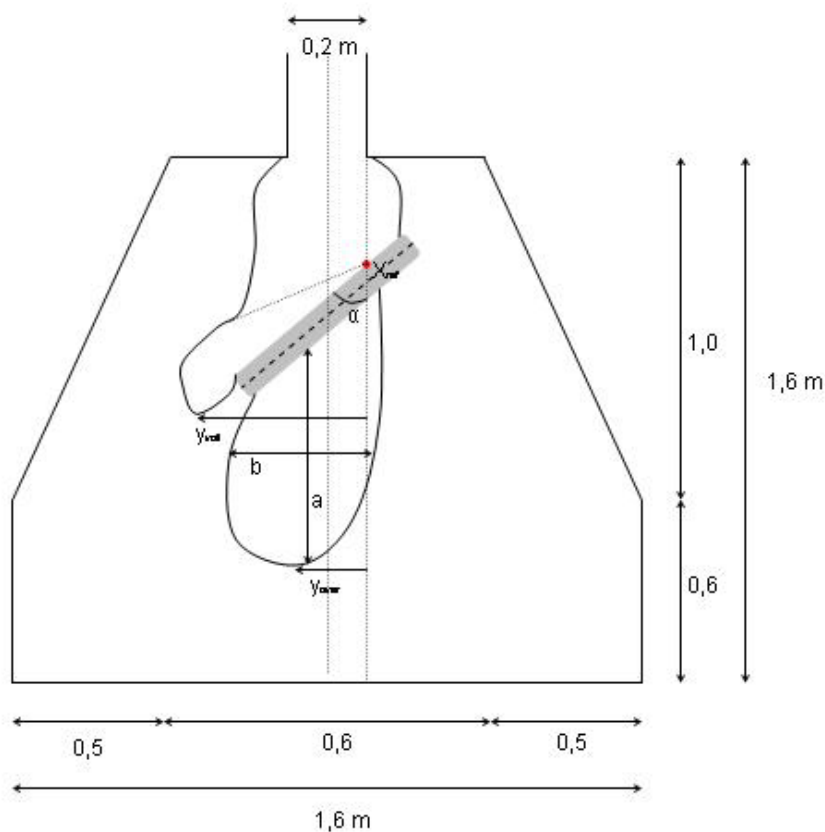
**Figur 6.3** dimensjoner på utforming og plassering av rette vuller øverst og buet voll til venstre

#### 6.1.4 Gjennomføring

3 kg masse ble brukt under hele modellforsøket. Massene ble veid opp på vekt med et grams nøyaktighet. Under forsøket ble massenes bevegelser dokumentert ved hjelp av digitale videokamera fra to vinkler. Massene ble dermed filmet både i front og fra siden.

Modellforsøkene ble utført i 5 ulike forsøksserier. Hver forsøksserie omfatter delforsøk med ulike utforminger og plassering av tiltak. Forsøksprosedyren er beskrevet i kapittel 6.1.5.

Hvert delforsøk med ulike plasseringer ble gjennomført to ganger for å kontrollere repeterbarheten. For hvert forsøk ble maksimal utløpslengde i x- og y- retning for masse over voll og ledet masse registrert, det vil si  $X_{voll}$ ,  $X_{over}$ ,  $y_{voll}$  og  $y_{over}$  iflg figur 6.4. I tillegg til dette ble dimensjonen til massene som gikk over voll, a og b iflg. figur 6.4, og mengden masse over voll registrert. Observasjoner av fart, flyte høyde, klatrehøyde på voll, spranget av masse over tiltak og øvrig bevegelse av masse funnet ved analysing av filmene. Programvaren Adobe Premiere Pro ble benyttet til videobehandling, med analyse av 25 bilder per sekund. For å kontrollere om materialet og renna beholdt sine egenskaper gjennom forsøkene ble forsøket uten bruk av tiltak gjennomført avslutningsvis.



Figur 6.4 Definisjoner og dimensjoner av modell

### 6.1.5 Måleprogram

Modellforsøkene ble gjennomført i 5 ulike forsøksserier med tilhørende delforsøk. Programmet for gjennomføringen er beskrevet under i punkt 1 - 5.

1. Uten tiltak (UT);

Forsøket gav data for hvor stort et maksimalt dimensjonerende skred ville være med hensyn til fart, utløpslengde og bredde i både 11° og 14° helning på nedre renne. Her er det ikke satt inn sikringstiltak i renna.

2. Rette ledevoller (RV);

De rette ledevollene med ulike utforminger ble plassert med ulike vinkler ( $\alpha$ ) og avstander ( $X$ ) med hensyn til strømningsretning. Måleprogrammet for de rette vollene er presentert i tabell 6.3 og tabell 6.4. Forsøksserien er utført på 14° renne.

Tabell 6.3 Ulike utforminger i delforsøkene (• forsøkene som er utført)

Høyde voll, H [cm]	Vinkel, $\beta$ [°]		
	30	60	90
2		•	
3	•	•	•
4		•	

Tabell 6.4 Plassering av de ulike utformingene i delforsøkene

Plassering, X [cm]	Vinkel, $\alpha$ [°]						
	15	20	30	40	50	60	90
150	•	*	•	*	•	*	•
180	•	*	•	*	•	*	•

\* plasseringen gjelder kun for delforsøkene 60RV3-150 og 60RV3-180

• plasseringen gjelder for alle delforsøkene

Under forsøk ble utløpet for massene over voll og de som ble ledet av voll avlest, samt spredning og flyte høyde klangs voll.

### 3. *Buede ledevoller (BV)*

De buede ledevollene med ulike vinkler og høyder ble plassert på ulike avstander nede i renna. Denne vollen er plassert med en vinkel på 10° langs x- retning. Måleprogrammet for buede voll er vist i tabell 6.5. Forsøket er utført på 14° renne.

Tabell 6.5 Plassering av de ulike typer buede voll i forsøksserien.

Plassering, X [cm]	Vinkel, $\alpha$ [°] *		
	30	60	90
140		□	
150	•	•	•
160		□	
170		□	
180	•	•	•
190		□	
200		□	
210	•	•	•
220		□	

\* alle de buede vollene med 30°, 60° og 90° utforming inkluderer forsøk i 2-, 3- og 4 cm høyde

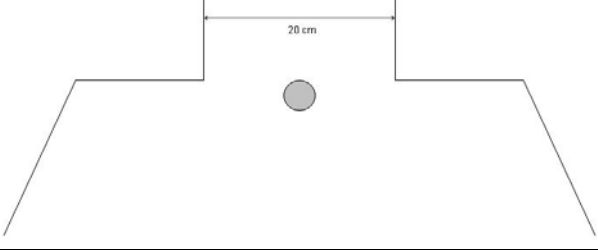
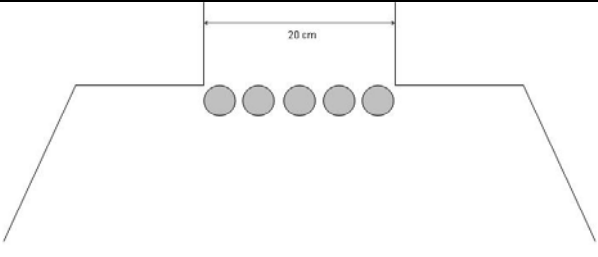
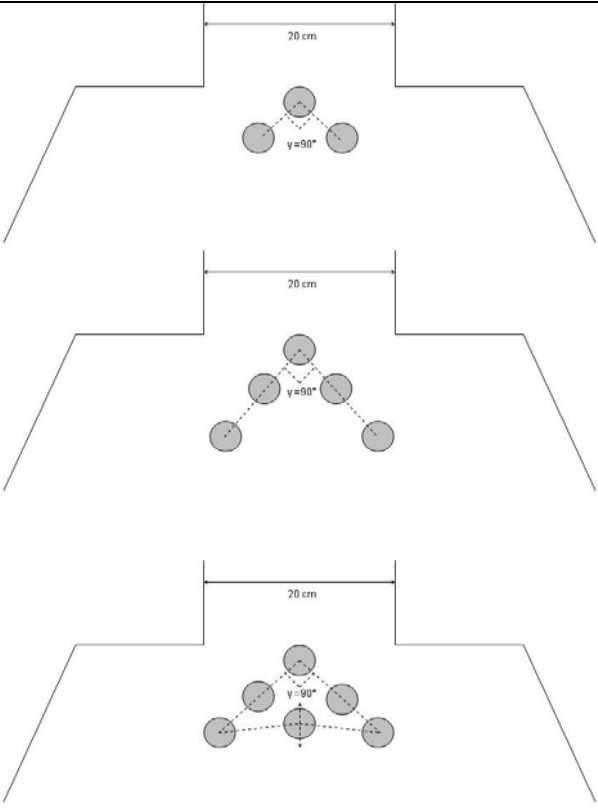
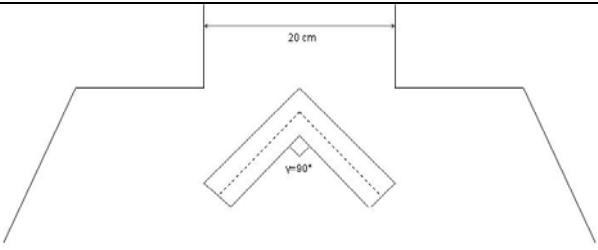
□ plasseringen gjelder kun 60BV3

Under forsøk ble utløpet for massene over voll og de som ble ledet av voll avlest, samt spredning og flyte høyde klangs voll.

4. *Kjegl*er (K) og *plogvoll* (PV)

Alle kjeglene og plogvullen var 2 cm høye og med 60° helning. Disse ble plassert 137 cm nede i renna med ulike formasjoner. Dette er vist i tabell 6.6. Renna hadde 14° helning.

**Tabell 6.6 Plassering av 60K2 i 3 ulike forsøksserier**

Delforsøk	Utforming
Enkeltvis	
Lineær rekke, ved 137 cm	
Plogformet m/ 3, 5 og 6 kjegl	
Plogvoll, 90° åpningsvinkel og 20 cm avstand	

5. Kombinasjoner av terrengtiltak i forbindelse med Nakkefonna:

Ved prosjektering av sikringstiltakene langs Rv 60 i området Nakkefonna ble det utført en simulering av skisserte muligheter. I tillegg til systematiske delforsøk i forbindelse med dette.

I denne forsøksserien ble det lagt inn en buet overgang i knekken i renna samt at helningen på renna ble senket til 11°. I forsøkene ble det brukt kjebler med 2- og 3cm høyde og 45° og 60° helning på veggene til tiltakene. Både en og kombinasjoner med to rader kjeblerekker ble utført med varierende plassering i renna. I tillegg til dette kombinasjon av kjeblerekke med buet voll. Utover dette gikk deler av forsøkene ut på å variere tettheten av oppsettet av kjebler på rekke ved å variere avstanden mellom kjeblene fra ingen til 2cm. Som et supplement for å redusere kostnader ved bygging av kjebler ble kjebler plassert oppe på et fundament med 1cm høyde og 30° vinkel i front. Til slutt ble den besluttede løsningen for hvordan sikring av Nakkefonna skal bygges simulert i renna, overføring av dimensjoner ble gjort ved hjelp av modellover.

## 6.2 Feilkilder

Materiale, instrumenter, konstruksjon, gjennomføring, analyse, overføring fra modell til natur, tolkning og fremstilling er alle kilder til at resultatene i forsøket skisserer gale premisser for utforming og plassering av tiltakene.

Ved gjennomføring av forsøkene ble fremmede partikler blandet i ballotinien. Det ble forsøkt å holde dette på et minimum ved å ha gode rutiner for å unngå dette. Slitte og knuste partikler gir mer overflate og slitt og polert overflate i renna vil kunne gi mindre friksjon i renna. Det fører til at repeterbarheten i forsøkene blir dårligere. Ved avslutning av forsøkene ble det gjort en kontroll av utløpslengden i renna uten tiltak. Resultatet viste at repeterbarheten var god. En kan derfor gå ut fra at slitt materiale og renne ikke har hatt stor innvirkning på resultatene.

Utløsning av massene skjer ved at ei plate trekkes opp i beholderen. Massene vil da være løse, uten bindinger, i tillegg til å bli løst ut med tyngdepunktet nærme plata. Naturlige ras består som regel av masser som er bundet sammen i et flak, flakskred. Tyngdepunktet vil her ligge et stykke fra utløsningsområdet. Ut fra analyse av modellscredene er det funnet at farten oppnår konstant verdi, slik at forutsetningene før massen treffer tiltakene er like i alle modellscredene og som i naturen.

Massenes evne til å oppnå konstant fart i øvre del av renna er viktig for å finne et representativt froudetall for strømmingen. Froudetallet er igjen interessant for å vite om strømmingen kan sammenlignes med naturlige snøras. I disse forsøkene ble det oppnådd en konstant fart. Dette ble funnet ved analyse av videotapene. Avlesning av videotapene er igjen en usikkerhet i seg selv.

Definisjon av maksimalt utløp ble satt til å gjelde uansett hvor i bredden av renna det maksimale utløpet var. Det er derimot vanligvis ingen markert overgang mellom avsatt masse i front og renne. Grensen for hvor tykk avsetningen av massene skulle være ved avlesning ble gjort på skjønn. Ved en veldig utflytende overgang mellom masse og renne kan forskjellen i avlesning være opp mot ± 2cm. Grensen for dette er imidlertid gjort av samme person, derfor er variasjonen begrenset mellom de forskjellige avlesningene.

Instrumenteringen setter begrensinger for hvor nøyaktig resultatene kan være. Flyteøyden ble lest rett ut fra videotapen plassert rett ut for tverrsnittet nederst i øvre del av renna. Dette vil kunne gi en liten feilprosent fra faktisk opptredende høyde. Fart ble målt ut fra videotape i front av renna, med 25 bilder i sekundet. Farten ble funnet ved å lese av forflytninger av massene i front av massene. Massene preges av laminær og turbulent strømming ned renna. I strømningsfronten vil partikler i overkant av massen legge seg over partikler som ligger langs bunnen. Det fører til at partiklene i front stadig skifter posisjon og gir inntrykk av en annen fartsfordeling enn den reelle. I tillegg til dette vil unøyaktig avlesning av strømningsfront fra tape gi usikkerheter i fartsprofilen. Diskontinuiteten i

knekken i renna ble tatt hensyn til i analysen av forsøkene. Massene ble ikke analysert i knekken slik at energitapet fra øvre renne til nedre renne blir uavhengig fremstilt.

Ved oppveing av masse har nøyaktigheten vært god. Vekta har en et grams nøyaktighet. Det har derimot vært noen utettheter i beholderen som massene helles over i før de sendes. Det er ikke mye masse som har forsvunnet mellom hvert forsøk, dessuten har alle forsøkene hatt de samme vilkårene.

Massene har dessuten ikke de samme egenskapene som naturlig snø har. Ballotinen er ikke koherent og partiklene har alle ideell kuleform. Materialet er tørt og ensgradert. Dette kan antagelig være en stor feilkilde ved overføring av resultater fra modell til natur.

Måling av profilet av rennende masse nedover vollaksen gjengir hvor høyt oppe på vollen massene har beveget seg. Avlesningen av dette presenterer en kilde til feil.

Hele forsøket er nedskalert og er derfor en usikkerhet for hvordan dette kan gjengis i virkelig størrelsesorden. Ved overføring av resultat fra modell til Nakkefonna er det funnet at helningen på energilinje er ulike. Det vil derfor være forhold i overføringen som gir rom for usikkerhet.

## 7 Observasjoner

Det meste av observasjonene bygger på analyse av video fra forsøkene. Programvaren Adobe Premiere Pro ble brukt til videobehandling. Bevegelsen til massene kan da sees på 25 bilder per sekund. Dette viser tydelig hvordan bevegelsene er i de ulike situasjonene.

Når massene strømmer ned renna viser de et visuelt strømningsbilde som likner de samme bevegelsene i naturen. Massen i forsøkene har derimot liten støvskydel sammenlignet med naturen, men viser tydelig hvordan massene nærme terrenget opptrer. Strømmen av partikler avhenger av fart og flyte høyde i massene og utforming og plassering av ulike tiltak. Massenes bevegelse ned renna kan studeres i video i vedlegg B.

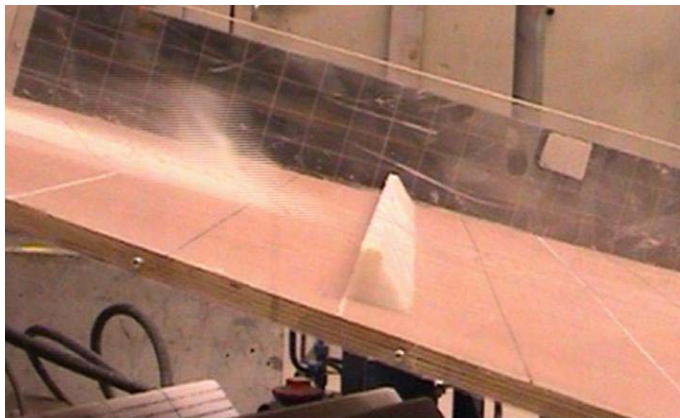
### 7.1 Fartsutvikling

Når massene løses ut fra beholderen øker farten jevnt inntil massene når en fart som stabiliserer seg på 3,1 m/s i nedre del av øvre renne. Når massene stabiliserer seg i nedre del av renna tyder det på at massene klarer å oppnå konstant flyte høyde før de treffer nedre renne. Flyte høyden i nedre del av renna er observert til  $0,0065 \pm 0,001$  m. Når massene treffer knekken i renna skjer det en retningsendring på  $29^\circ$  (for  $14^\circ$  helning på nedre renne). Dette fører til at farten i massene synker jevnt med utløpslengden. Strømning av masse uten tiltak viser at farten reduseres ved at partikler i front flyter på toppen av partikler som allerede har redusert fart betraktelig og legger seg til ro. Massene underst ser derfor ut til å fungere som et glidesjikt eller her som et "kulelager" i front av massene. Friksjon mellom masse og underlag ser ut til å være bestemmende for hvor lett masse lar seg retardere i dette sjiktet. Jo lettere underlaget klarer å bremse massene, jo kortere blir utløpslengde. Når mer masse bremses mot underlaget blir bevegelsesmengden mindre og farten reduseres. Både massen,  $m$  og farten,  $v$  beveger seg mot 0. Det vil si at  $mv \rightarrow 0$ , når utløpslengden,  $X$  og friksjonen,  $\mu \rightarrow \infty$ .

### 7.2 Støt, kast og avsetning

Når massene treffer terrengtiltakene kastes og retarderer massene i varierende grad over tiltakene. Dette avhenger av farten i massene og tiltakenes høyde, vinkel, tetthet og plassering. Bevegelsene til massene er først og fremst avhengig av type terrengtiltak.

Generelt for alle forsøk gjelder at når tiltakene plasseres lengre ned i renna, går mer av massenes passering fra å være et kast til å gli rolig over. I alle forsøkene blir det dannet en liten "støvsky" i front når massene strømmer i øvre renne, se figur 7.1. Den avtar gradvis når hastigheten reduseres i nedre deler av renna. I tillegg til dette begynner hastigheten til massene merkbart og reduseres når knekken i renna er passert.



Figur 7.1 "Støvsky" i front av massen før den treffer en ledevoll.  
Vollen er her plassert 180 cm nede i renna.



Når massene legger seg til ro, avsettes de i hovedsak symmetrisk om senterlinje når utforming og plassering av kjebler også er symmetrisk. Dette er vist i figur 7.8 og figur 7.9.

Uansett hvilke tiltak som benyttes blir massene også lagret opp, oppstrøms for tiltaket. Opplagringen blir ujevn over bredden, avhengig av type tiltak og plasseringen av det. De avsatte massene blir liggende i den naturlige helning for ballotinimassen. Avsetningen rett nedstrøms tiltakene er lavere, sammenlignet med forkanten. Tykkelsen av massene bak tiltak vil øke litt noe lengre nedstrøms, inntil de avtar igjen mot maksimal utløpslengde. Energitalpet i skredet fører også til at det danner seg tydelige folder i nedre del av de avsatte massene. Foldingen er vist i figur 7.2.

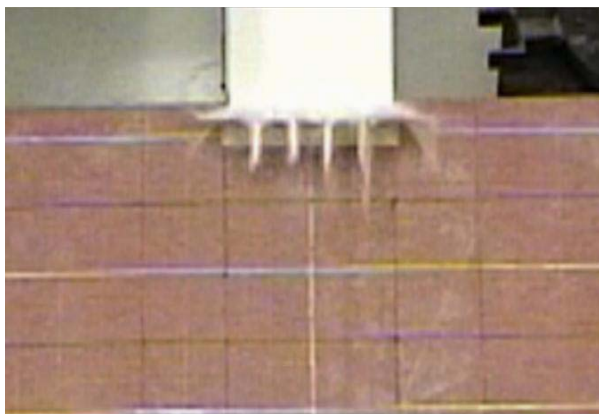


**Figur 7.2 Folder av masse som går over voll**

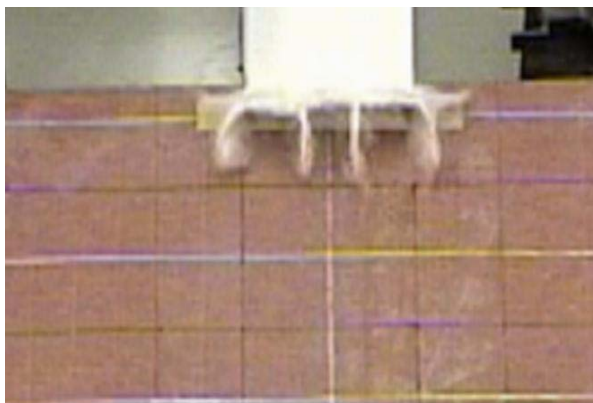
### 7.2.1 Kjebler (K)

Kjeglene ble plassert 1,37m nede i renna, deretter gradvis nedover. Når massene treffer kjeglene kastes deler av massene opp med en tilnærmet samme vinkel som kjeglene har. Når tiltakene flyttes lengre ned blir denne kasteeffekten gradvis borte. Massen får da etter hvert en mer glidende flyt over kjeglene. Dette gjelder også for voller og er illustrert for dem i figur 7.21 til figur 7.24. Kjebleraden ble alltid plassert midt på senterlinja, slik at ei kjeble alltid ble stående i senter av skredet.

De første massene som lander vil være de første til å tappes for energi, og vil derfor legge seg nederst. Nye lag med påfølgende masse vil legge seg over de første massene. De første massene som ikke kastes opp og over tiltakene, strømmer som prosjektil mellom kjeglene, se figur 7.3 til figur 7.6. I figur 7.7 er prosjektil for kjeglerekker med ulik tetthet på fundament vist. Prosjektilet blir bredere og mer masse når strømmer på når mellomrommet øker. Prosjektilene vil mot slutten av skredbevegelsen bli så tappet av energi og legge seg ned. Påfølgende masse legger seg også delvis over denne del av strømningsfronten. I noen tilfeller blir derimot dette prosjektilet liggende som et tynt lag av masse å være utgjørende for den maksimale utløpslengden. Dette er spesielt framtreddende når en øker avstanden mellom kjeglene i bredden (når tettheten reduseres). De bakre massene vil dermed ikke klare å ta igjen prosjektilene i alle skred. Ved bruk av kun en enkel kjeble høyt oppe i nedre renne, er det spesielt fremtreddende at når deler av massene kastes opp, vil resterende masse få en mindre bevegelsesmengde slik at redusert mengde masse er utslagsgivende for utløpslengde. I en slik situasjon er turbulens mellom partikler oppe ved tiltakene mindre på grunn av at kun en kjebleenhet er benyttet.



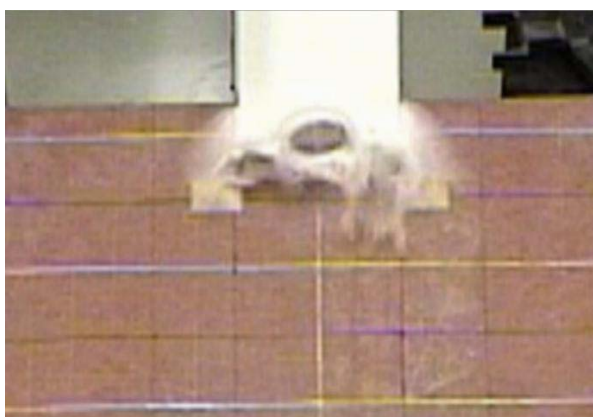
**Figur 7.3** Prosjektil som dannes ved kvadratiske kjebler på rekke, 137 cm nede i renna.



**Figur 7.4** Prosjektil som dannes ved rektangulære kjebler på rekke, 137 cm nede i renna.



**Figur 7.5** Prosjektil som dannes ved kvadratiske kjebler i plogform, 137 cm nede i renna.

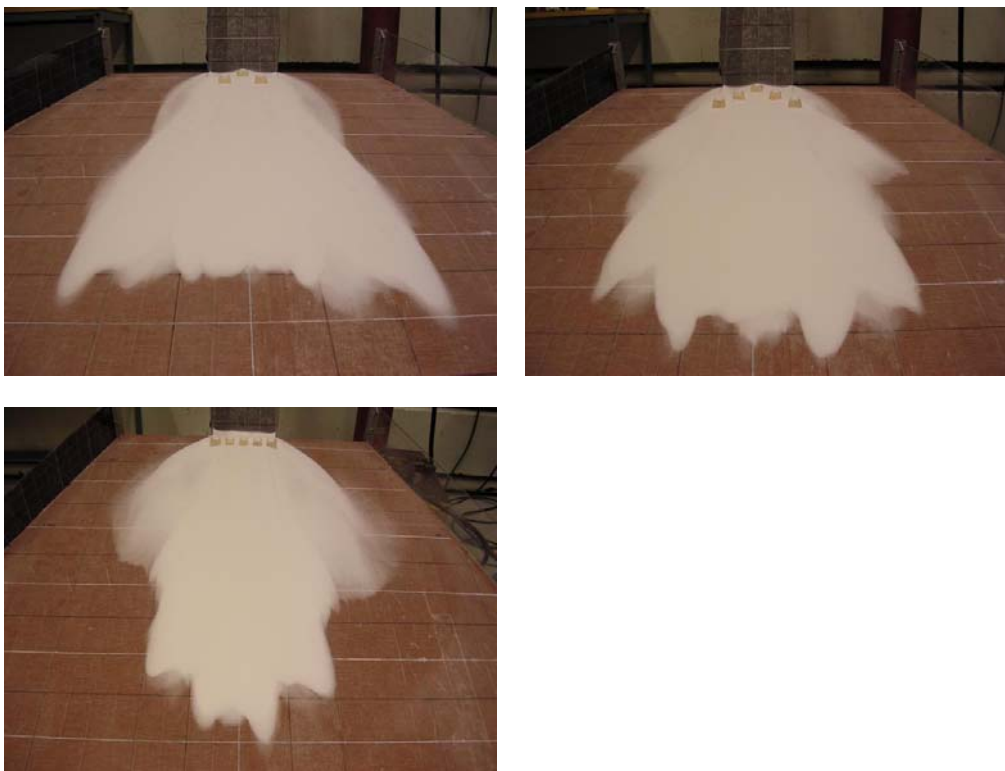


**Figur 7.6** Prosjektilene er utydelige ved rektangulære kjebler i plog, 137 cm nede i renna.



**Figur 7.7** Støt mellom masse og kjebler med ulik tetthet, ved 1,37m. Det er 1cm mellom øverst til venstre. 2 cm mellom øverst høyre og 1,5cm mellom plassert ved 1,5m til venstre (Nakkefonna)

Kvadratformede kjebler som er plassert på rekke har en bedre evne til å spre massene enn kjebler som er plassert i et plogformet mønster, som vist i tabell 6.6. Dette er derimot ikke så tydelig hos kjebler som er rektangulærformede. De kvadratformede kjeblene ser også ut til å gi en jevnere spredning enn de rektangulære. De rektangulære kjeblene kaster ofte "armer" av masse ut til sidene. Dette er vist i figur 7.8 og figur 7.9.



**Figur 7.8** Avsetning av masse ved bruk av 60K2-137 plassert i plogform og på rekke. Rekken sprer massen høyere opp enn plogformen.



**Figur 7.9** Avsetning av masse ved bruk av 60RK2-137 plassert i plogform og på rekke

En kan se at rekken med kjegler begynner å ta ut energi høyere oppe enn den plogformede plasseringen, se figur 7.3 til figur 7.6. Det kan se ut til at den indre uroen som oppstår når massen treffer kjeglene er med på å kaste masser ut på sidene. Her ser det ut til at de fremre massene hindrer de påfølgende massene, og det blir kollisjon mellom de ulike fasene med masser som strømmer på. Den plogformede plasseringen av kjegler gir også endringer i kastelengde av masse ettersom kjeglene plasseres lengre ned i renna, se figur 7.11 og figur 7.10. Den øverste og sentrerte kjeglen har lengre kastelengde enn kjeglene ute på sidene. Dette viser at massene har tapt energi fra knekken og ned til de nedre kjegleparene.



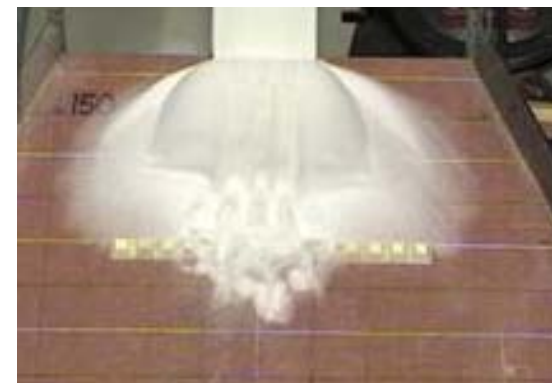
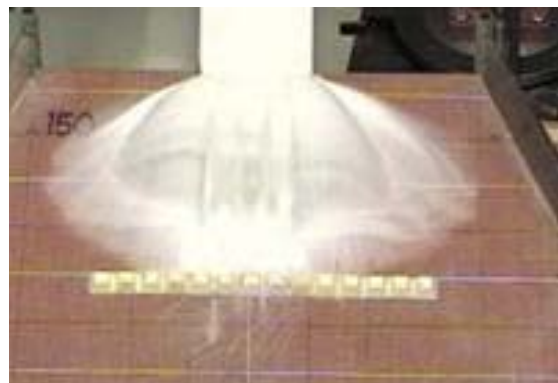
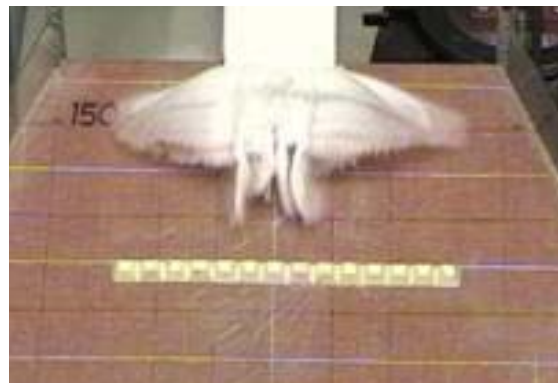
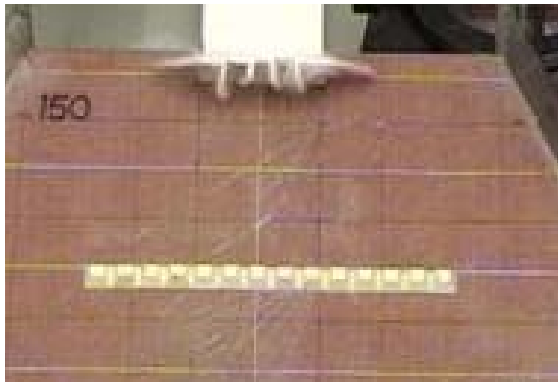
**Figur 7.10** Kast av masse over plogformet kvadratiske kjegler. Tydelig ulike lengder som kastes.

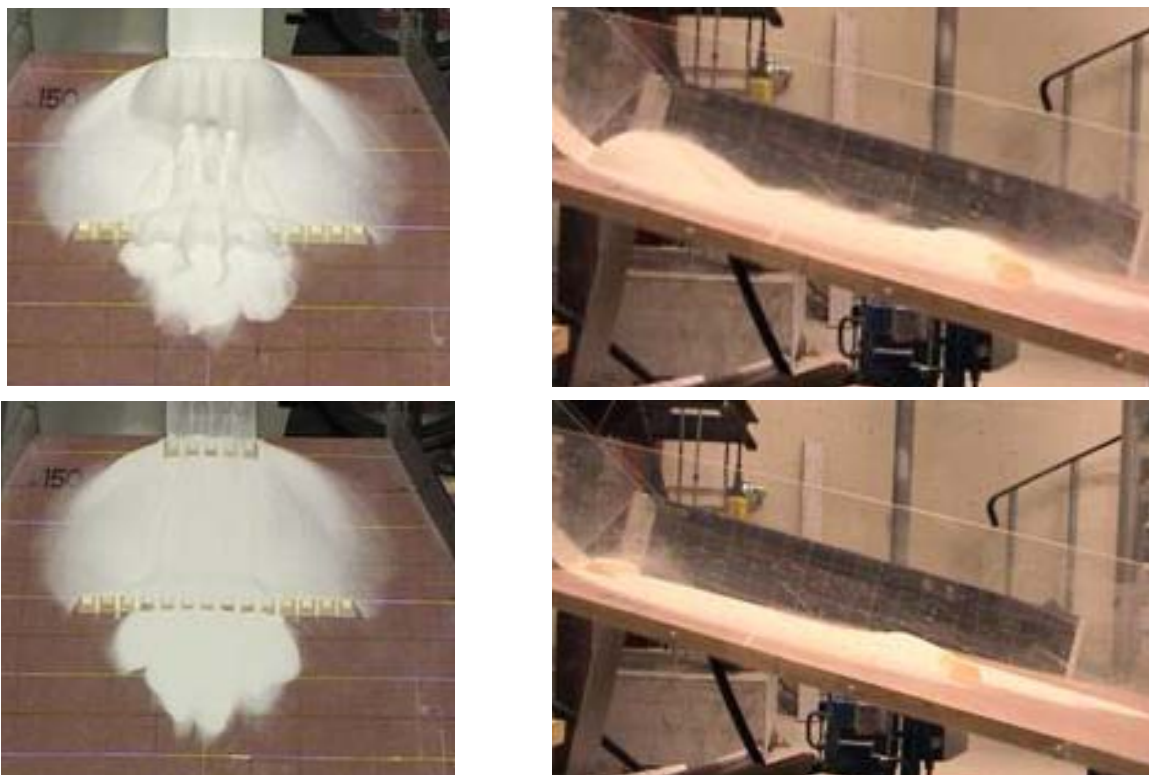


**Figur 7.11** Kast av masse over plogformede rektangulære kjegler

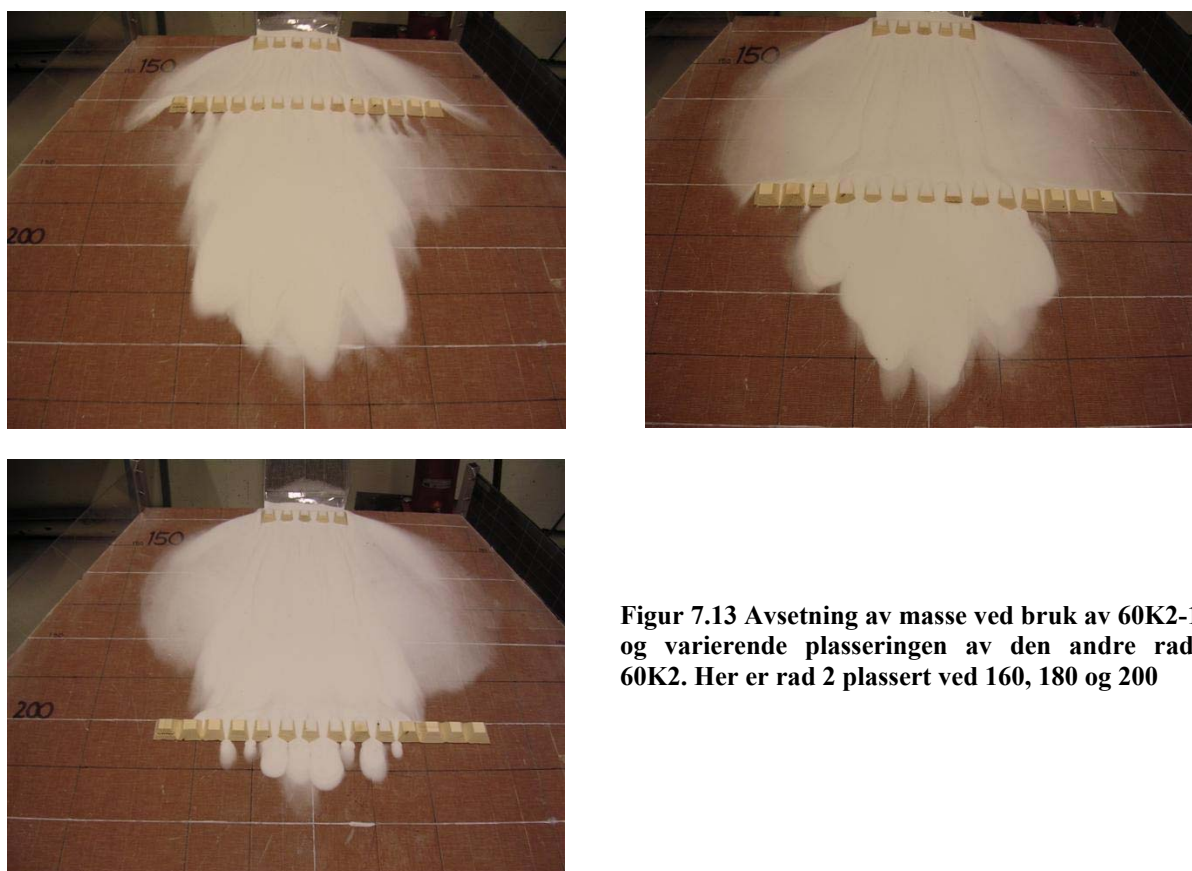
Ved bruk av flere rader med tiltak viser det seg at avstanden mellom disse radene må være så stor at massen ikke kastes over den andre raden når de strømmer over den første. Ut fra observasjoner i filmene varierer denne avstanden avhengig av hvor i renna den øverste raden plasseres. Kastelengde avtar når radene plasseres lengre nede i renna. Hvis øvre rad plasseres 1,37m nede i renna bør den andre raden plasseres ved omtrent 1,8m. Dette er vist i figur 7.12.

Ved bruk av flere rader vil massene spre seg når den passerer den første raden. Den andre raden vil utnytte denne effekten ved at en større bredde av rad nummer to vil være med på å jobbe med massene. Som resultat av dette ser det ut til at tykkelsen på massen, hastigheten, og dermed energien er tilsvarende redusert. Den totale andelen av energi er da mindre og graden av retningsendring og kollisjon vil skje i mindre grad. Når rekkene sprer massen bra og i tillegg fanger mye masse oppstrøms tiltaket blir bevegelsesmengden raskt redusert. Dette er vist i to bildeserier i figur 7.13 figur 7.14 under. Merk likheten av fordeling av masse ved de to kombinasjonene 60K2-137 + 60K2 og 60K2-137 + 45K2. Avsetningen av masse slik den er i Nakkefonna er vist i figur 7.15.

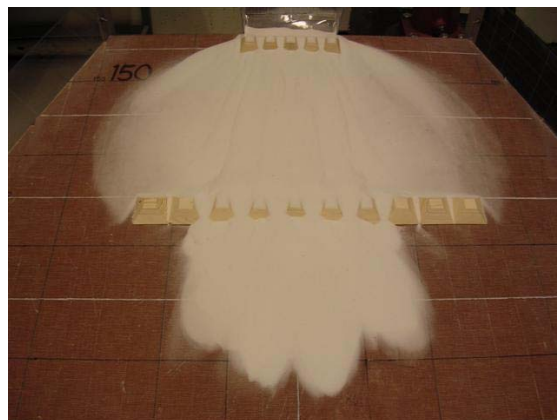




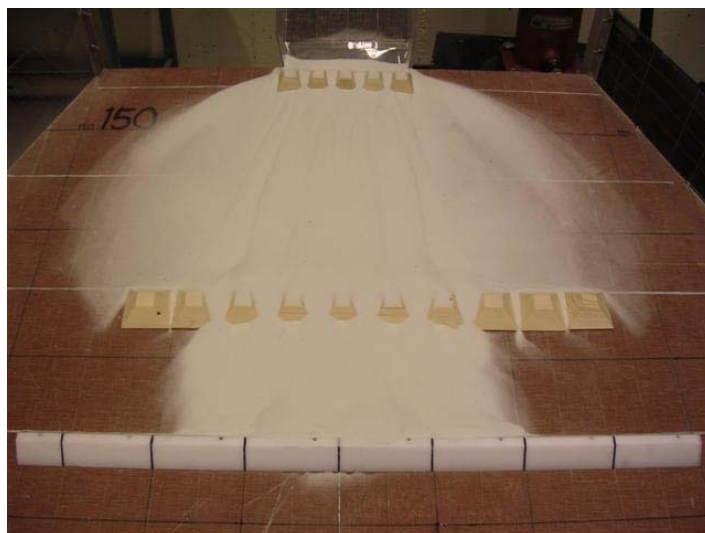
Figur 7.12 Bildeserie av kast av masse over 60K2-137 + 60K2-180 fra to vinkler



Figur 7.13 Avsetning av masse ved bruk av 60K2-137 og varierende plasseringen av den andre raden, 60K2. Her er rad 2 plassert ved 160, 180 og 200



**Figur 7.14** Avsetning av masse ved bruk av 60K2-137 og varierende plasseringen av den andre raden, 45K2. Her er rad 2 plassert ved 160, 180 og 200



**Figur 7.15** Avsetningen etter sikringstiltak slik de skal være i Nakkefonna

### 7.2.2 Plogvoll (PV)

Plogvollen ble plassert 137 cm nede i renna, samme plassering som den plogformede plasseringen av kjeglene var (tabell 6.6). Her blir massene på samme måte som for kjeglene, kastet over vollen. Massene blir mer konsentrert kastet ut til sidene. Det er mindre masse som legger seg langs senterlinje nedenfor plogvollen. Dette ses i figur 7.16 og figur 7.17.



**Figur 7.16** Massene blir kastet konsentrert til side ved bruk av plogvoll.



**Figur 7.17** Plogvoll konsentrerer massene.

### 7.2.3 Rette voller (RV)

Massene lar seg enklest avbøye av rette voller plassert  $15^\circ$  på strømningsretning. Større vinkel enn dette fører til at massene flyter over vollene med varierende lengde og masse. Denne vinkelen avbøyer all masse hos de fleste vollene. Det fører til at en får et kanalisert løp ned renna av masse, langs vollen. Utløpslengden blir derfor lengre enn  $X_{maks}$  i slike tilfeller. Det gjenspeiler seg i alle rasene at der det strømmer mest masse er det lengste utløpet. Dette gjelder uansett om det er langs voll eller over voll.

Strømmen av masse ser ut til å kunne deles opp i ulike faser. De først massene i fronten ser ut å komme med en slik energi at deler av massen ledes av vollen, den andre delen av denne massen kastet direkte over vollen, som en stikker. Den delen av massen som kastes direkte over er ofte liten og godt styrt av vollen, slik av avstanden fra senterlinjen i renna er stor sammenlignet med avstanden ut til senter i skred når det kommer til ro. De påfølgende massene følger på både langs voll, når vinkelen er liten nok til å styre skred, og over voll. Den påfølgende massen over voll legger seg som folder over de første massene som ble kastet over vollen, de såkalte frontmassene eller ofte betegnet som en "stikker". Frontmassene, i likhet med kjeglene, legger seg til ro slik at massene bak kommer og legger seg over. Når vinkel blir så stor at vollen ikke klarer å styre de bakre massene i nevneverdig grad, vil de bakre massene legge seg veldig nærme senterlinja i renna. Da vil avstanden mellom frontmassene og sluttmassene av skredet bli stort. Dette gjelder spesielt voller som har gode styringsevner, men som det likevel går masse over. Dette er høye voller med store vinkler i konstruksjonen, eksempelvis  $90^\circ$  voller plassert  $30^\circ$  til  $50^\circ$  på X-akse. Brattere vinkel på vollen ser ut til å lede massen bedre langs vollen. Ved lavere vinkler på voll glir massene letter over vollen, uten å bli avbøyd. Voller plassert  $90^\circ$  på X-akse har ingen styringsevne på frontmassene. Denne tendensen er tydeligere og observer hos buede voller enn rette voller, men den er tilstede ved begge typer voller. Dette er vist i figur 7.28 for buede voller.

Når voll plasseres lengre nede i renna glir mindre masse over vollen. Derfor vil avstanden mellom frontmasse og sluttmasse være tydeligere når voller plassert lengre nede i renna. Frontmassen vil raskere bli dekket til når vollen plasseres lengre oppe i renna, fordi mer av den bakre massen vil passere vollen.



Den delen av sluttmassene som ikke glir over vollen, men som ledes inntil vollen vil til slutt falle tilbake over tidligere masser som er avbøyd av vollen. Det ser ut til at denne massen mister skyvet fra påfølgende masser bakenfra, og derfor faller tilbake. Helt i slutten av bevegelsen av masse langs og over voll bygger massene seg opp i front av vollen. Denne kilen ser ut til å ha en vinkel nær naturlig helning for ballotinimassen.

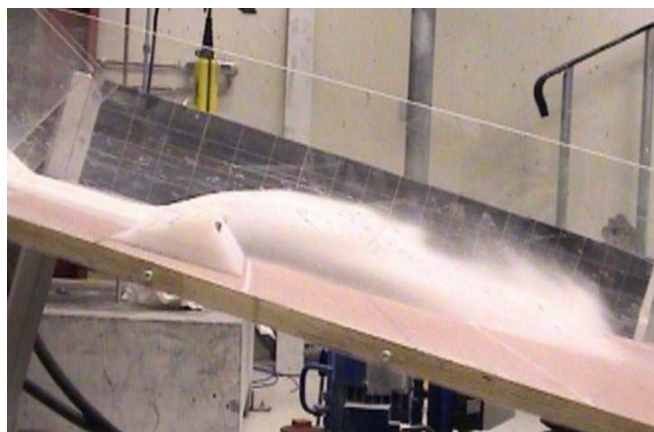
Kastelengden av masse over voller som er plassert normalt på strømningsretningen varierer med vinkelen på konstruksjonen. I figur 7.18 til figur 7.20 kan en se at brattere vinkel i konstruksjon gir litt kortere kastelengde over voll. Dette skyldes trolig at brattere vinkel tar ut mer energi enn en slakere vinkel gjør. Dette kan ses ved at større vinkel i konstruksjonen kaster masser høyere enn slake vinkler. Dette kan ses i figur 7.21 til figur 7.24.



**Figur 7.18** Massen som kastes over 90° rett voll normalt på strømningsretning.



**Figur 7.19** Massen som kastes over 60° rett voll normalt på strømningsretning. Kastelengden er noe lengre enn ved bruk av 90° voll.



**Figur 7.20** Massen som kastes over 30° rett voll normalt på strømningsretning. Kastelengden er større enn for 60° og 90° voller.



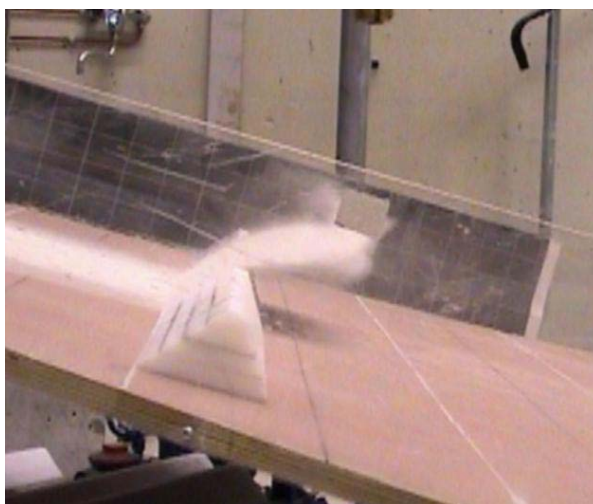
**Figur 7.21 Sammenstøt med 90RV3-150-90. Kastevinkel er tilnærmet lik helning på voll.**



**Figur 7.22 Sammenstøt med 30RV3-150-90**



**Figur 7.23 Sammenstøt med 60RV4-150-90. Vollen er plassert 150 cm nede i renna.**



**Figur 7.24 Sammenstøt med 60RV4-180-90. Vollen er plassert 180 cm nede i renna. . Kastevinkelen blir mindre.**

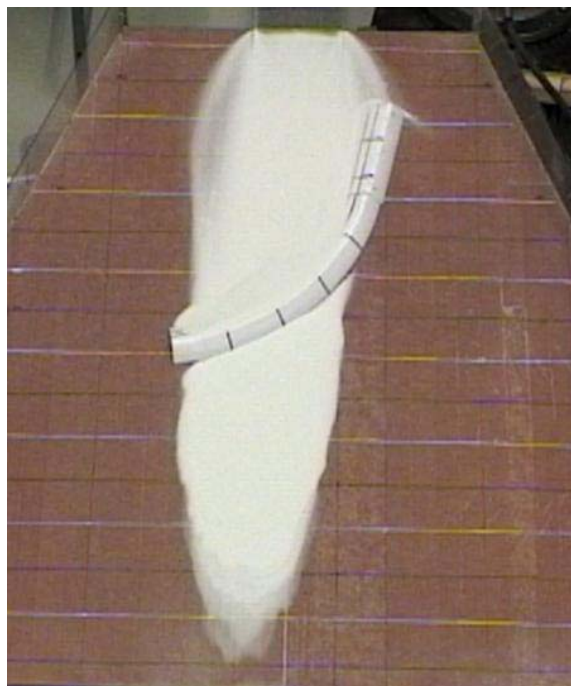
#### 7.2.4 Buede voller (BV)

Massenes bevegelse når de møter buede voller er lik bevegelsen ved bruk av rette voller. For de buede vollene er oppdelingen i ulike faser imidlertid tydeligere enn for rette voller. Her vises det en tydelig sammenheng mellom ledeevne, styringsevnen av frontmassen som går over og plasseringen av sluttmassen som går over vollen.

Generelt for alle de ulike buede vollene som er brukt kan en se at mengden av frontmasse (”stikker”) som kastes over er større sammenlignet med rette voller. Frontmassen er den første massen i fronten av skredet som går over vollen, men som tydelig lar seg styre av vollen. Omtrent samtidig, i tid, blir også deler av frontmassen ledet av vollen ut til siden. Generelt for alle vollene gjelder også at de er dårlige til å styre sluttmassen som går over. Dette er vist i figur 7.28.

Gjennomgående for alle forsøk med buede voller med liten vinkel (30°), var at disse ikke ytte noe effekt på massene. Massen gikk rett frem uhindret av vollen. De buede vollene med 60° og 90° vinkel i konstruksjonen viste i stedet mye bedre effekt. 60°- vollene styrte frontmassene til en viss grad. Sluttmassene lot seg i liten grad styre og la seg godt over de første frontmassene som gikk over, når

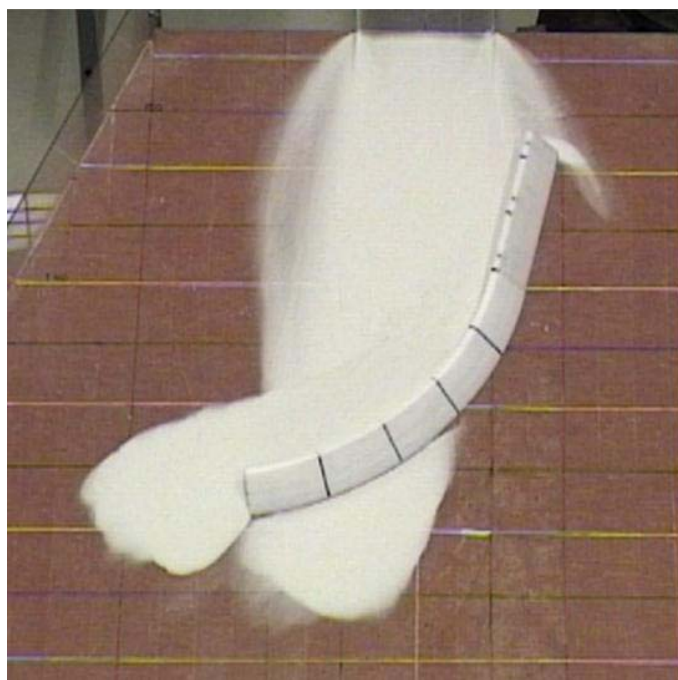
vollen var plassert høyt oppe i renna. Når vollen ble plassert lengre ned i renna klarte ikke sluttmassene å ta igjen frontmassen, og frontmassen ble bestemmende for maksimal utløpslengde. 60°-voller var generelt dårlig til å lede masse sammenlignet med 90°- voller. 90°- voller styrte frontmassen tydelig, og sluttmassene klarte i varierende grad å ta igjen og legge seg over frontmassen. Ledeevnen til 90°- vollene var merkbart mye bedre enn for voller med lavere vinkel. Dette er vist i figur 7.25, figur 7.26 og figur 7.27.



**Figur 7.25** 30° buet voll som ikke har noen retarderende effekt på massene

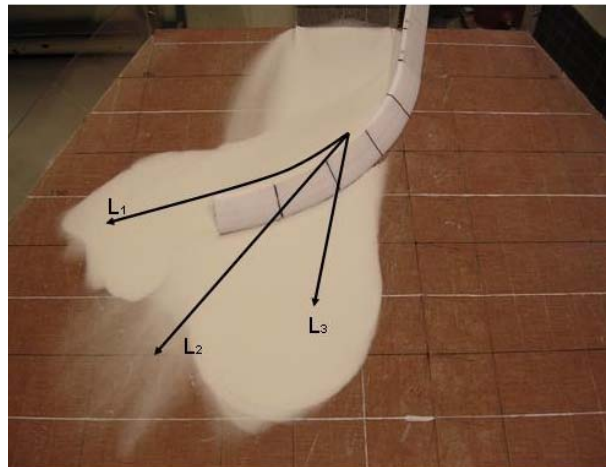
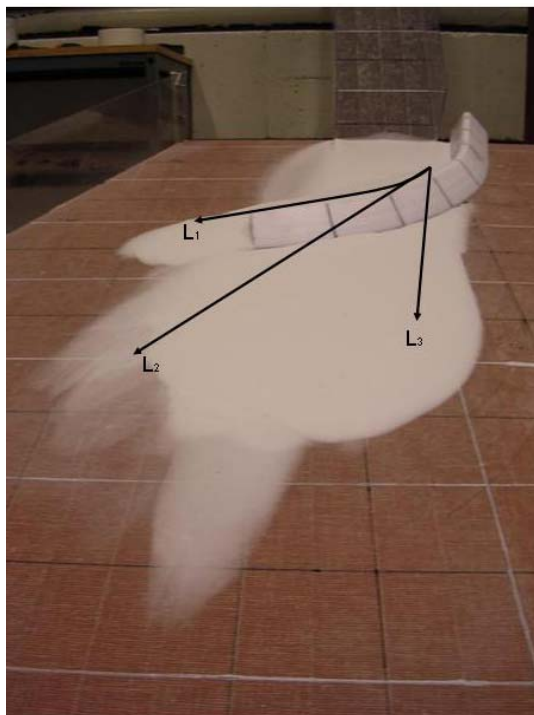


**Figur 7.26** 60° buet voll som viser en tydelig frontmasse "stikker" som ikke tatt igjen av de bakre massene som går over vollen



**Figur 7.27** 90° buet voll som har gode evner til å lede masse

For buede voller gjelder det også at massene langs og over voll bygger seg opp i front av vollen som en kile i slutten av skredbevegelsen, samtidig som sluttmassene faller tilbake på masser som allerede har lagt seg i ro.



**Figur 7.28** Rekkefølgen etter hvordan ulike faser i avsetningen av masser skjer for ledevoller

## 8 Resultater

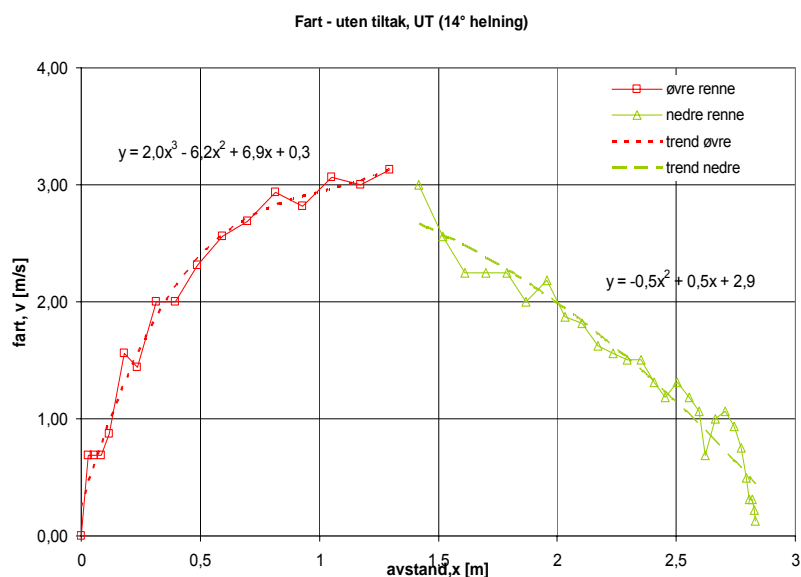
De fem forsøksseriene ble gjennomført etter kapittel 6.1.5. Det betyr at de forsøkene ble utført i renne med 11° og 14° helning i nedre del. Det er kun forsøkene i forbindelse med sikring av skredområdet Nakkefonna som er utført med 11° helning i nedre del av renna. Resultatene i dette kapitlet er samlet etter virkningen av de ulike typene parametere.

Resultatene er presentert etter metoder som er omtalt i kapittel 3.3. Det er derfor lagt vekt på å vise fartsutvikling og følgelig energihøyden til skredene og effekten av tiltakene.

### 8.1 Uten tiltak, UT

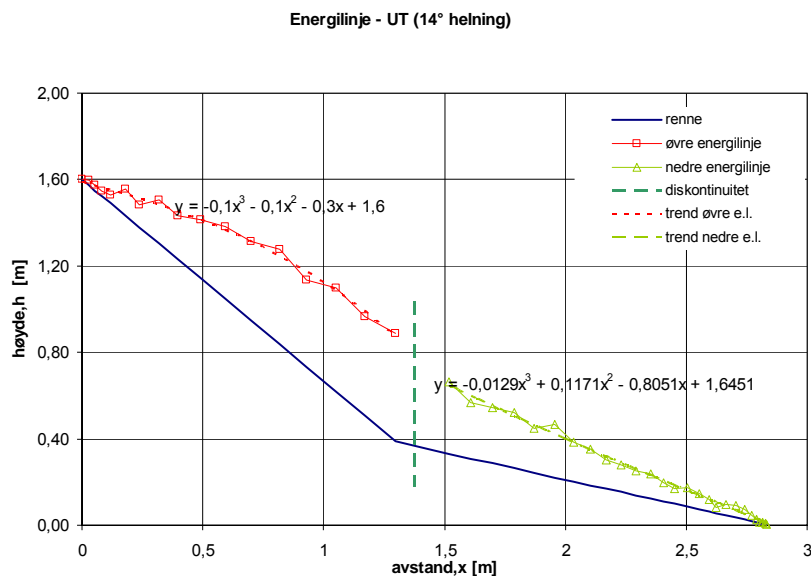
#### 8.1.1 Nedre renne med 14° helning

Den maksimale utløpslengden var 2,83 meter for skred uten tiltak i renne med 14° helning. I figur 8.1 er maksimal fart i øvre renne beregnet til 3,1 m/s. 3 kg masse gav en flytehode,  $f_h$  på  $0,0065 \pm 0,001$  m. Dette gir Froude tall lik 12,3. Sannsynligvis ligger tallet dermed i intervallet 11,4 – 13,3. Naturlige skred har et Froude tall i størrelsesorden 10.



**Figur 8.1 Fartsprofil for masser uten bruk av tiltak ved 14° helning. Ved avstand 1,35 m nede i renna er det knekk og retningsendring. Det er derfor markert med diskontinuitet i profilet.**

Fartsutviklingen i figur 8.1 er brutt av diskontinuiteten i knekken ved profil 1,35. I knekken blir farten betydelig redusert. Trendlikningene i figur 8.1 beskriver dette.



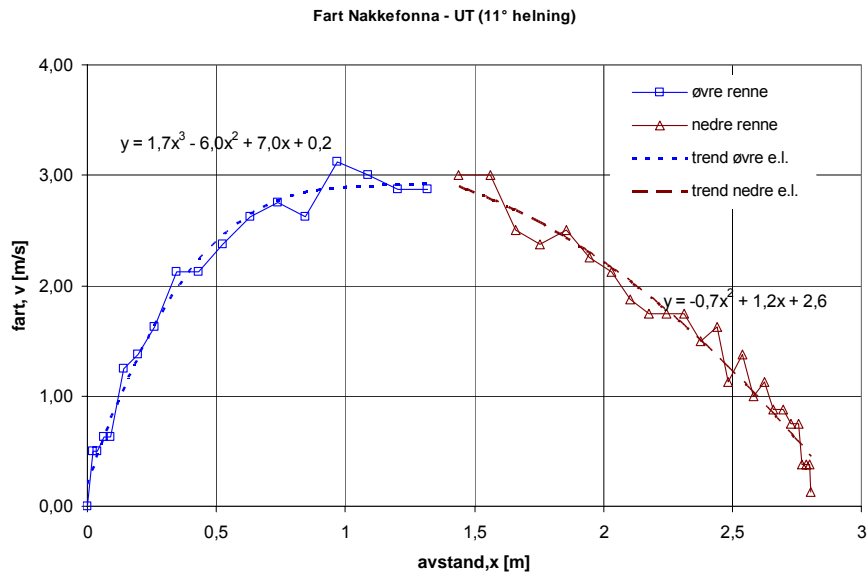
**Figur 8.2 Energilinje for masser uten tiltak i renna, 14° helning**

Energilinjen i figur 8.2 viser at massene mellom 0 – 0,8 m i øvre renne akselererer. Farten øker her fra 0 – 3 m/s. Den hastighetsbetingede friksjonen er dominerende i dette området. I avstanden mellom 0,80 – 1,35 m er farten tilnærmet konstant og tørrfriksjonen dominerer. I knekkområdet blir tydelig energi tatt ut av massene ved at farten reduseres. Farten blir jevnt redusert til den stopper, det vil si at massen retarderer mest som en funksjon av tørrfriksjonen. Studier av video viser at massenes endring av fart skyldes at bakre masser kommer med høyere fart, legger seg over fremre front. Når disse nye massene kommer i front mister de raskt energien ved at massen tiltar en veldig lav flyte høyde og nye masser legger seg over disse igjen. Friksjonsvinkelen i nedre renne er 27° (0,51). Total hastighetshøyde,  $h_t$  er 0,34.

Ved kontroll av utløpslengden avslutningsvis i modellforsøket, viste det seg at utløpslengden holdt seg konstant gjennom hele forsøket.

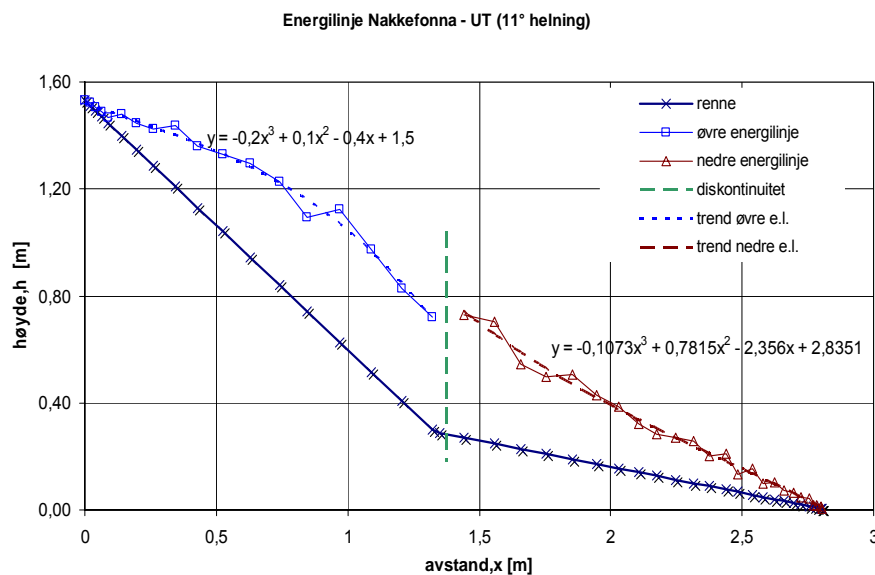
### 8.1.2 Nedre renne med 11° helning

Da nedre del av renna ble satt til 11° helning ble maksimal utløpslengde 2,81 meter. Endringer i renna besto også i at knekken ble noe avrundet med en folie. Maksimal fart i øvre renne ble fortsatt beregnet til 3,1 m/s og en flyte høyde på  $0,0065 \pm 0,001$  m. Froudetallet vil fortsatt ligge i området 11,4 – 13,3 (12,3).



Figur 8.3 Fartsprofil for nedre renne med 11° helning

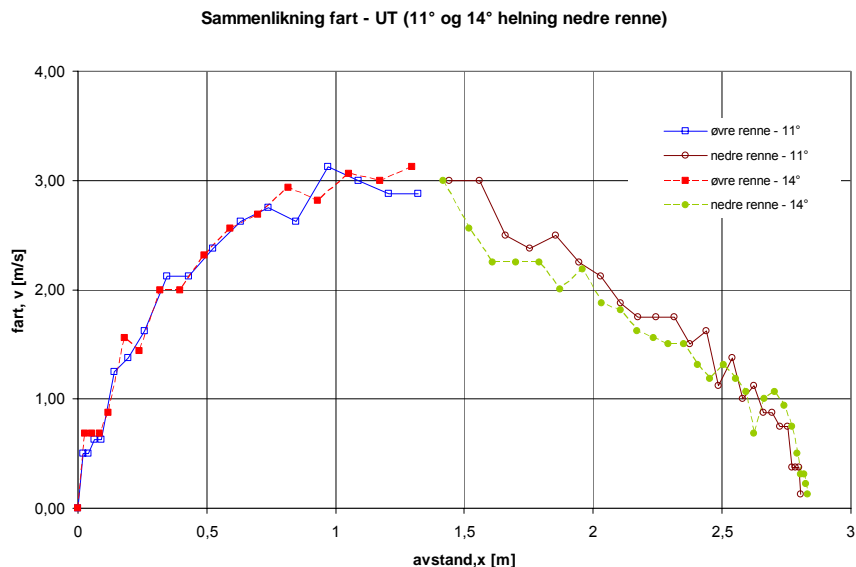
Fartsprofilen i figur 8.3 og energilinjens i figur 8.4 viser at massene også her akselererer mest i øvre renne mellom 0 – 0,9 meter. Fra 0,9 – 1,35 meter ned i renna holder farten seg tilnærmet konstant. I knekkområdet er det ikke like tydelig at massen mister så mye energi som sammenlignet med 14° helning. Energien bevares bedre gjennom knekken. Vel 0,2 – 0,3 m nede i nedre renne skjer det et større energitap per lengdeenhet enn sammenlignet med resten av energitapet i denne delen av renna. Dette skyldes trolig skifting av masser i front, ved at bakre masser kommer med større fart og legger seg over fronten. Farten blir jevnt redusert ned den gjenværende delen av renna. Friksjonsvinkelen i nedre renne er 28° (0,53). Total hastighetshøyde,  $h_t$  er 0,46.



Figur 8.4 Energilinje til masser i nedre renne med 11° helning

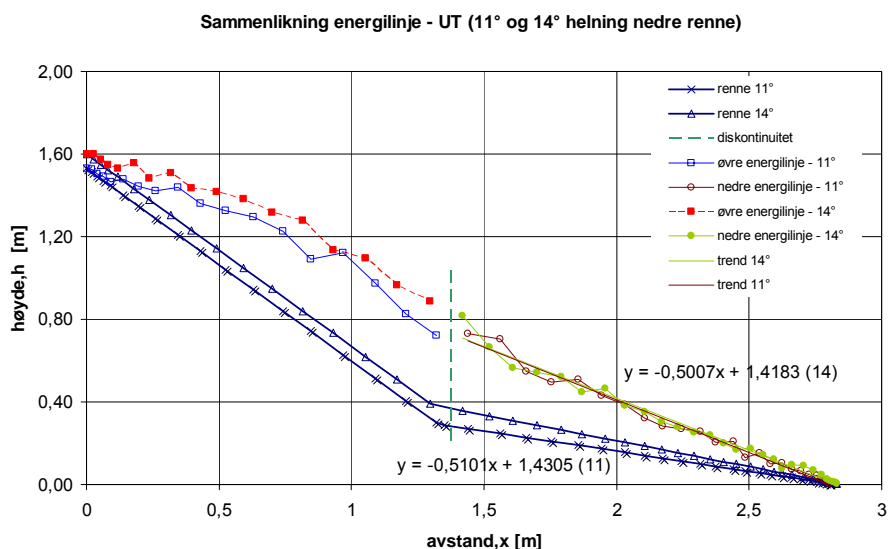
### 8.1.3 Sammenlikning mellom nedre renne med 11°- og 14° helning

Sammenlikning av de to profilene for fart og energilinje for masser i 11°- og 14° helning er vist i figur 8.5 og figur 8.6. Det går frem at farten i renna med 14° helning blir raskere redusert, sammenlignet med farten i 11° renne. Forskjellen mellom rennene ligger også i avrundingen av knekken ved bruk av 11° renne. Figurene viser også at massene generelt får et større tap av energi pr meter omtrent 0,3 – 0,4 m nede i nedre renne og i stoppsonen, sammenlignet med midtre deler av nedre renne.



**Figur 8.5 Sammenlikning av fartsprofil for 11° og 14° helning på nedre renne**

Figur 8.6 viser sammenlikning av energilinjene for rennene med ulike helninger. Massene i renna med 11° helning bremses raskere opp enn for 14° helning, ved at friksjonsvinkelen er større. I figur 8.6 er de lineære trendlinjene med likninger lagt til for å vise parallelliteten for energilinjene når tiltak ikke benyttes. På bakgrunn av dette og Brateng (2004) kan en dermed finne energilinjen for renne med 11° uten folie, når dette gir en utløpslengde på 2,7 m. Reduksjonen i utløpslengde gir dermed et fall i hastighetshøyde, h lik 0,0664.



**Figur 8.6 Sammenlikning av energilinje for 11° og 14° helning på nedre renne**



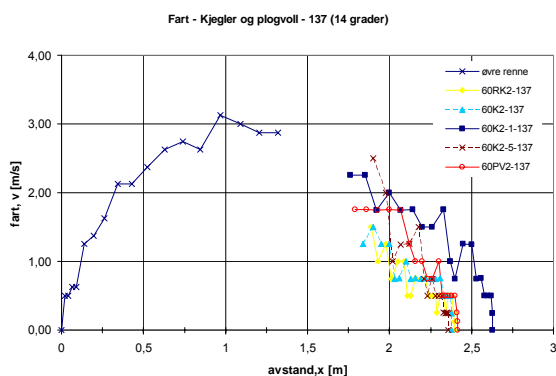
## 8.2 Kjegler og plogvoll

De fleste forsøkene med en kjegele alene eller kjegele på en rad var plassert ved profil 1,37 m. Når nedre renne ble satt til  $11^\circ$  ble det i tillegg utført forsøk med varierende plassering av en rad lengre ned i renna og med kombinasjoner av to rader med kjegele. Kombinasjoner med en og to rader kjegele og voll ble også utført, men i mindre omfang. Forsøk med plogvoll i profil 1,37, samt resultater ved bruk av voller normalt på skredretning inngår også i resultatene under. Kjegeleenes høyde varierer mellom 2 og 3 cm og vinkelen varierer mellom  $45^\circ$  og  $60^\circ$  grader på renna. Vollene varierer i høyde mellom 2 til 4 cm med vinkel mellom  $30^\circ$  og  $90^\circ$ .

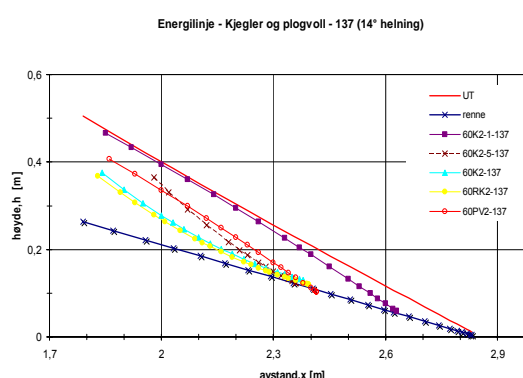
### 8.2.1 Fart og energilinjer

#### Kjegele i renne med $14^\circ$ helning:

Fartsprofilen i figur 8.7 og energilinja i figur 8.8 viser at rekke med kjegele, både kvadratiske og rektangulære, har lavest fart nede i renna. Det vil si at disse tiltakene gir størst tap av hastighetshøyde ved passering av masse. Masser som passerer kjegele som er plassert i plogform mister lite energi ved selve passeringen. De oppnår derimot tap av fart og energi lengre nede i renna. De store sprangene i fartsendingene i figur 8.7 for denne type plassering forteller at frontmasser legger seg til ro og bakenforliggende masser tar opp ny front, kombinert med at plogformet kjegeleoppsett har dårligere evne til å spre massene høyt oppe i renna. Dette er spesielt tydelig for 60K2-1-137 ved profil 2,35 og for 60K2-5-137 ved profil 2,2. Disse effektene vises hos energilinjene ved at linjene får et buet løp i forhold til massenes energitap uten bruk av tiltak, se figur 8.8. Her vil farten beholdes nedover i renna, men raskt reduseres ved at bakre masser "kveler" de fremre massene og spres i bredden lengre nede i renna. Disse langsomme skredene mister mindre energi per meter enn skred med kjegele i rekke. Disse tar energien raskere ut.



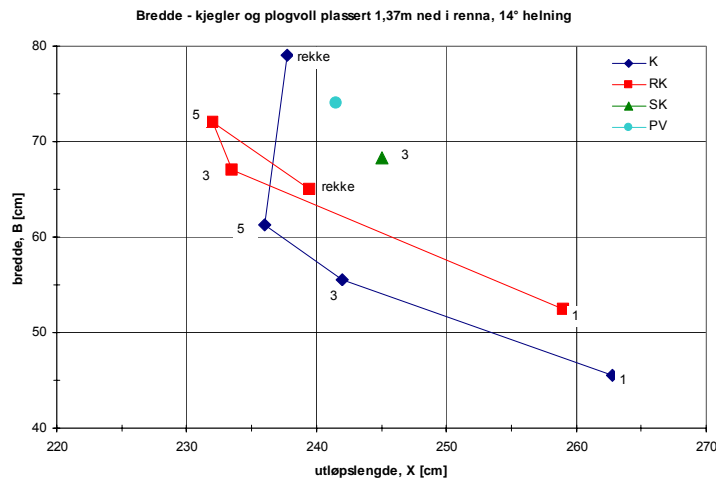
**Figur 8.7** Fartsprofil av kjegele og plogvoll plassert 1,37 m ned i nedre renne,  $14^\circ$  helning



**Figur 8.8** Energilinje for kjegele og plogvoll plassert 1,37 m ned i nedre renne,  $14^\circ$  helning

Energilinja i figur 8.8 har en helning på  $27^\circ$ . Tapet av energi hos de ulike tiltakene viser en parallellitet i forhold til massens friksjonsvinkel. Det tyder på at det meste av tapet av hastighetshøyde skjer ved passering av tiltak, og deretter jevnt nedover i renna. Den hastighetsbetingede friksjonen ser ut til å ha mest betydning for rekkene av kjegele. Når massen inntar en konstant fart og folder og spredning dominerer i utløpet gir dette et buet løp på energilinja. Dette er antydnet hos energilinja for 60K2 og 60RK2.

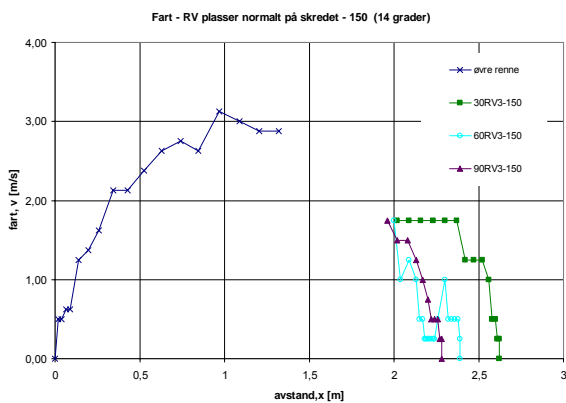
Kjegele ( $B=2H$ ) plassert i plogformet mønster spres massene mindre enn rekke gjør, se figur 8.9. Kjegele på rekke med  $B=H$  spres massen tydelig best. Plogvoll spres massen godt nede i renna, der massene blir tydelig konsentrert og ledet ut til sidene. Det ble også forsøkt med kjegele i plogmønster med den sjette kjegele plassert rett bak kjegele i front, dvs. 6 kjegele. Dett gav ingen økt effekt.



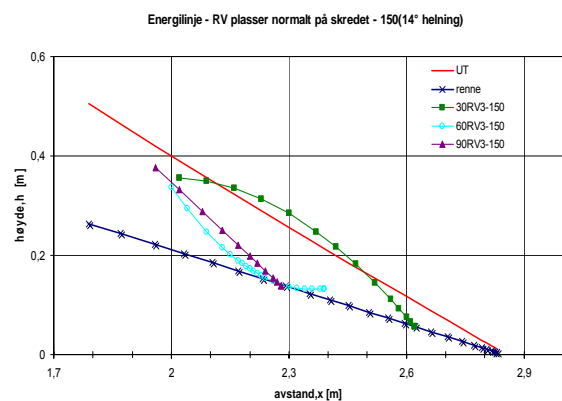
**Figur 8.9 Spredning av masser ved plassering av 60K -1,37m nede i nedre renne og 14° helning på renne. Tallene angir antallet kjebler i plogformet plassering.**

Voller plassert normalt på skredet i 14° helning:

Fartsprofilen i figur 8.10 og energilinjen i figur 8.11 forteller at farten og dermed energien blir raskt tatt ut ved bruk av 90RV3. Det fører til at energitapet er større per meter for 90RV3 sammenlignet med UT. Farten holder seg tilnærmet konstant, tross økt utløpslengde, før den raskt reduseres ved bruk av 30RV3. Derfor har ikke energilinjen for 30RV3 tapet av hastighetshøyde som trengs for å følge parallelliteten til UT. Den lineære energilinjen mellom start og sluttunkt ivaretar derimot dette. 60RV3 mister mye hastighetshøyde på grunn av at frontmasse mister all fart 2,2 m nede i renna, før den igjen akselererer på grunn av bakre masser som tar igjen fronten som har stoppet. Dette gir også en lineær energilinje som ligger parallell med UT fra start- til stoppunkt. Kun betraktning av en lineær energilinje i disse tilfellene viser at energilinjen vil ligge parallellt med UT.



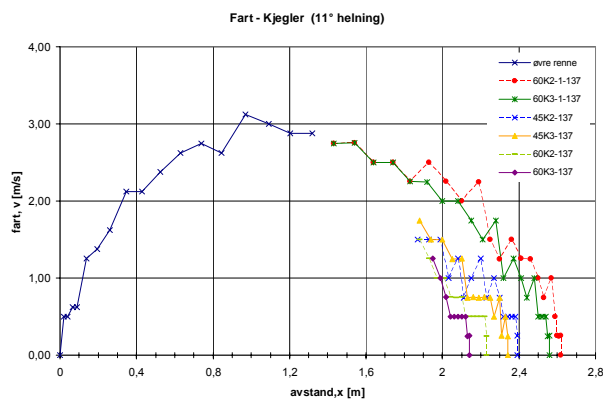
**Figur 8.10 Fartsprofil av masse over RV plassert normalt på skredet ved 1,5 m**



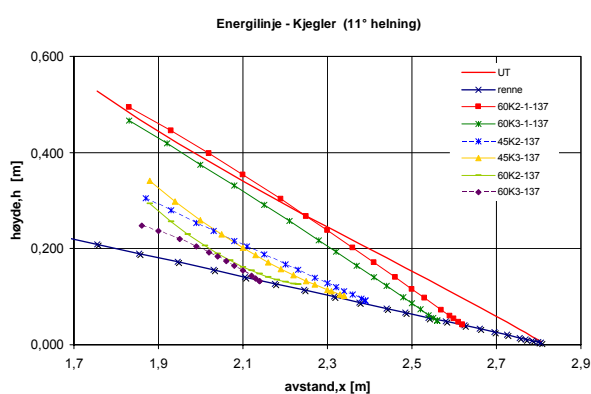
**Figur 8.11 Energilinje ved bruk av RV plassert normalt på skredet ved 1,5 m**

Kjeglere i renne med 11° helning:

Fartsprofilen i figur 8.12 og energilinjen i figur 8.13 viser at farten og energien blir tidligere tatt ut ved bruk av rekker med kjeglere som har 60° helning og 2 og 3 cm høyde. Deretter har kjeglere med 45° vinkel noe mindre tap av energi sammenlignet med 60°-kjeglene på rekke. Hastighetshøyden som tas ut ved bruk av kun en kjeGLE på topp er svært liten og nesten uten effekt for bremsing av skredet. Det ses ved at fartsreduksjonen i nedre renne ikke har noe betydelig fall, før den kommer vel 2,2m ned i renna. Skredet bremser sannsynligvis mest på bakgrunn av de få massene som kastes opp og dermed reduserer bevegelsesmengden i skredet. Parallelliteten mellom energilinjene for kjeglerekke og UT er tilnærmet konstant. Det viser at tørrfriksjonen dominerer i nedre deler av renna etter passering av tiltakene.



**Figur 8.12** Fartsprofil ved bruk av kjeglere med ulike høyde, vinkel og plassering

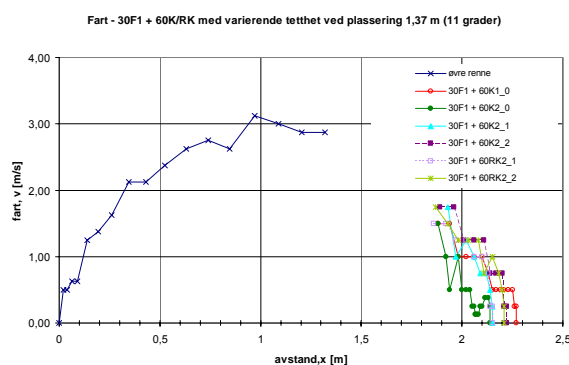


**Figur 8.13** Energilinje ved bruk av kjeglere med ulike høyde, vinkel og plassering

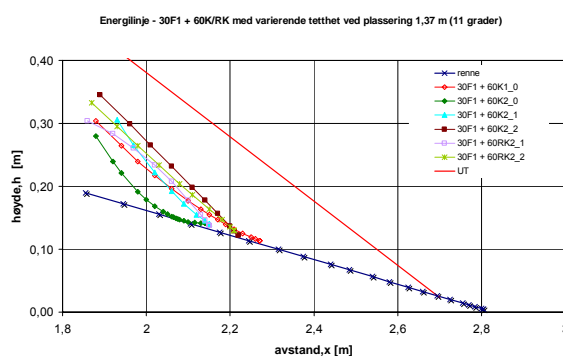
Kjeglere med ulike høyder og tetthet på 30° fundament i 11° helning:

For å heve kjeglere på en kostnadseffektiv måte ble kjeglere med 60° helning og 1- og 2 cm høyde satt på et 1 cm høyt fundament med 30° helning. 30° helning er rimeligere å bygge sammenlignet med 60° helning. Samtidig ble avstanden mellom hver enkelt kjeGLE justert for å finne hvilken innvirkning dette kan gi. En viss avstand mellom kjeglene er nødvendig for å gjennomføre vedlikehold av anlegget. Disse forsøkene er utført i renne med 11° helning uten bruk av folie i knekken. Det betyr at maksimalt utløp uten bruk av tiltak er på 2,7m.

Figur 8.14 og figur 8.15 viser fartsprofil og energilinje for disse 60° kjeglene på 30° fundament. Alle delforsøkene har tatt ut omtrent den samme mengden med hastighetsenergi, forskjellene er små. Fartsreduksjonen er jevn og dermed er helningen på energilinjene tilnærmet like og parallelle med helningen til UT. Det betyr at tørrfriksjonen dominerer i nedre del av renna. 60K2 uten mellomrom tar ut mest hastighetsenergi. 60K2 med mellomrom på 2 cm tar ut minst hastighetsenergi.



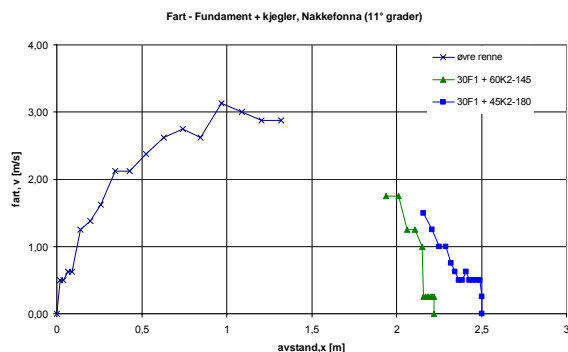
**Figur 8.14** Fartsprofil med 60° kjeglere på 30° fundament, ulike tetthet



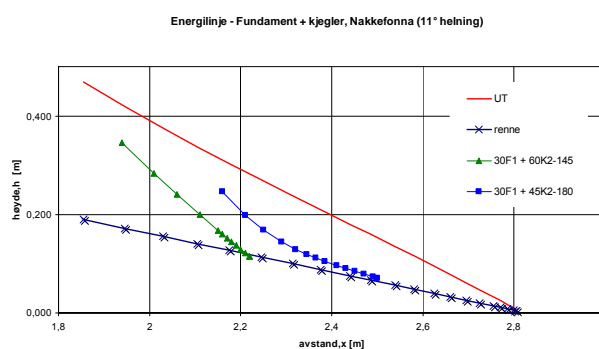
**Figur 8.15** Energilinje for 60° kjeglere på 30° fundament, ulike tetthet

Kombinasjoner av kjebler og voller for sikring av skredområdet Nakkefonna, 11° helning:

Sikring av skredområdet Nakkefonna er omtalt i kapittel 10. Det er her kommet frem til at sikring skal foregå med 60° kjebler på 30° fundament i øvre rekke, 45° kjebler på 30° fundament i andre rekke og 45° voll nærme vegen. Alle de enkelte kjeblene har et mellomrom på 1,5 cm. Kjeblene har i dette forsøket en  $B = 2H$ , for å tilnærme beslutningene i Nakkefonna. Resultatet av dette er presentert i figur 8.16 til figur 8.19.



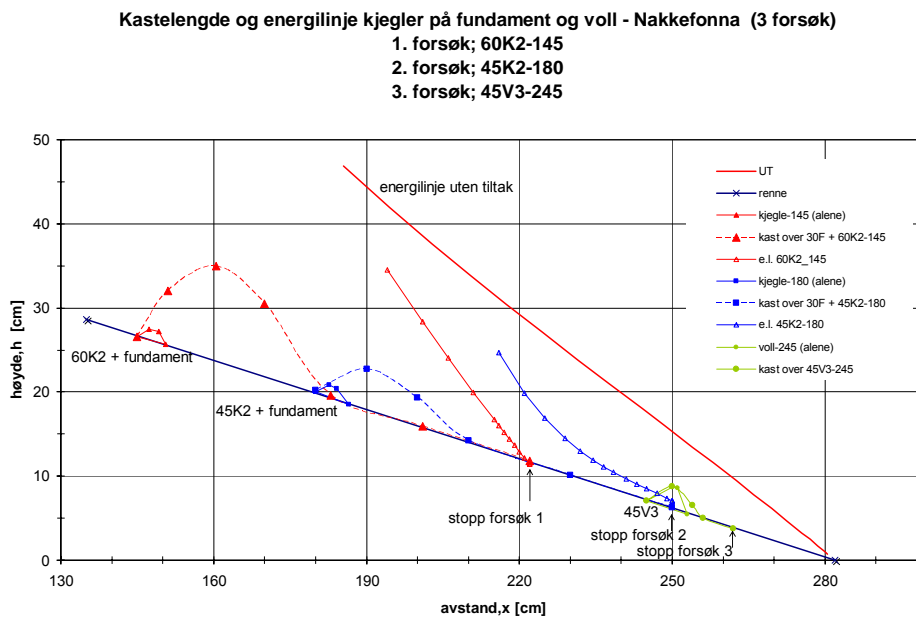
**Figur 8.16 Fartsprofil ved sikring av Nakkefonna (med fundament)**



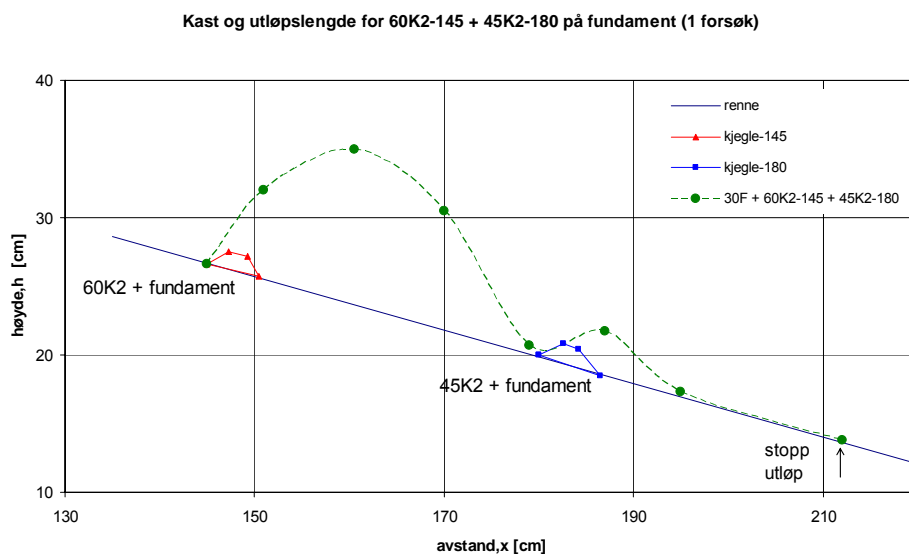
**Figur 8.17 Energilinje ved sikring av Nakkefonna (med fundament)**

Figur 8.16 og figur 8.17 viser fartsprofilen og energilinjen for tiltakene i Nakkefonna. Endringen i fart viser at nedbremsingen av masser følger en bratt kurve, og energilinjen er da brattere enn UT. Den nedre delen av nedbremsingen med 45K2 gir at farten holder seg konstant og at den kinetiske energien bevares i massen. Energilinjen følger dermed parallelt med terrenget fra  $X \approx 2,35$  til stopp. Tørrfriksjonen og den hastighetsbetingede friksjonen ser ut til å gi forskjellige resultat avhengig av plassering og tetthet av kjebler. Energitalpet ved bruk av 45K2 viser at den hastighetsbetingede friksjonen dominerer. Det kan virke som om kjebler med lavere tetthet plassert i nedre deler av renna får et energitalp dominert av tapet fra den hastighetsbetingede friksjonen.

I figur 8.18 er kastelengde, gjennomsnittlig høyde av kastet og energilinjen sammenliknet for de tre forskjellige delforsøkene. Massen blir kastet over 60K2-145 og lander ca 1,8m nede i renna. Høyden på kastet er i størrelse 15cm. Massen som kastes over 45K2-180 lander 2,1m nede i renna og blir kastet ca 8 cm opp. Vollen 2,45m nede i renna lager ikke noe tydelig kast, massen renner rolig over. Figur 8.18 viser også energitalpet etter at massene har landet. Det er tydelig at massen som passerer tiltakene har mistet mye energi på grunn av stor reduksjon av farten etter kastet. I figur 8.19 er kastet ved kombinasjonen av de to rekkene med kjebler i samme forsøk. Sammenliknet med kastet over 45K2 i figur 8.18 er kastet ved bruk av to tiltak redusert ned til en kaste høyde på ca 3cm. Utløpslengden i dette delforsøket er på 2,12m, 0,1m kortere enn ved bruk av kun 60K2.



**Figur 8.18 Kast og energilinje for Nakkefonna (med fundament)**



**Figur 8.19 Kast og energilinje for kombinasjon av tiltak i Nakkefonna (med fundament)**

Lengden av kastet over kjebler og voller er lest av der de fremre massene lander. Det vil si at den andre raden med kjebler kan plasseres litt lengre opp enn avlest landingspunkt. Høyden til neste kjeblerad vil kunne fange opp kastet før massene lander.

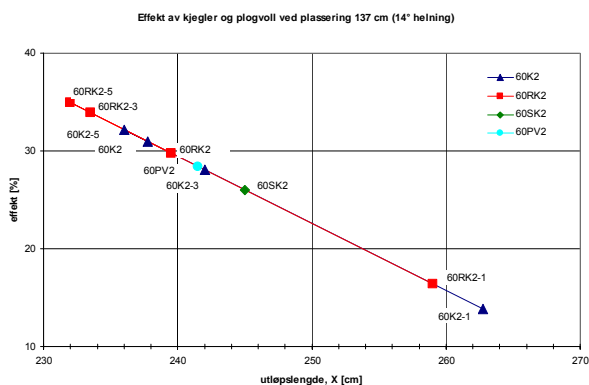
### 8.2.2 Effekten av kjebler og voller

Energitapet som kjebler og voller yter på massen kan måles i effekt, jfr. kapittel 3.3. Effekten vil da være en funksjon av parametrene som betinger tapet i massen. Høyde og vinkel på tiltak og tettheten og plasseringen av tiltak er parametre som varierer i delforsøkene. Disse bestemmer utløpslengden til massen.

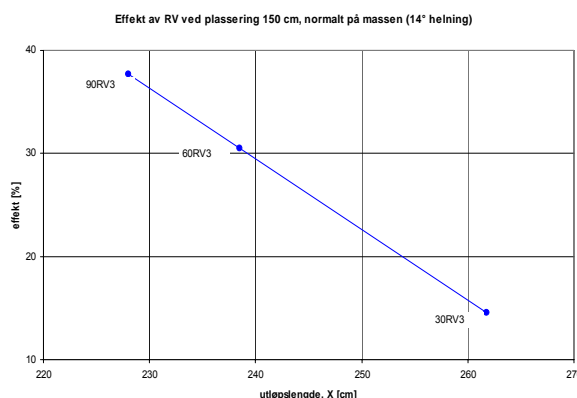
Effekt som funksjon av utløpslengde:

Effekten av kjebler i renne med 14° helning er presentert som funksjon av utløpslengde i figur 8.20. Her er alle tiltakene plassert 1,37m nede i renna, og effekten ligger mellom 14% – 38%. Ei enkel kjeble gir minst effekt. Rad av kjebler gir merkbart større effekt. En rad med 60° helning og høyde 2 cm gir en effekt på 31% (H=B). Rektangulære kjebler (B=2H) plassert i et plogformet mønster gav en effekt opp mot 35%, men disse sprer massen mindre enn rekker gjør, se figur 8.9. Kjebler med B=2H har større effektivitet når de er plassert i plogmønster sammenlignet med kjebler med B=H. Kjebler på rekke med B=H sprer massen tydelig best. Plogvoll har en effektivitet på 28%.

Effekten av rette voller plassert normalt på skredretning øker med økt vinkel på vollens side. Figur 8.21 viser at 90RV3-150 har en effekt på 38%, mens 30RV3-150 har en effekt på 15%. 60RV3-150 har en effekt på 31%.

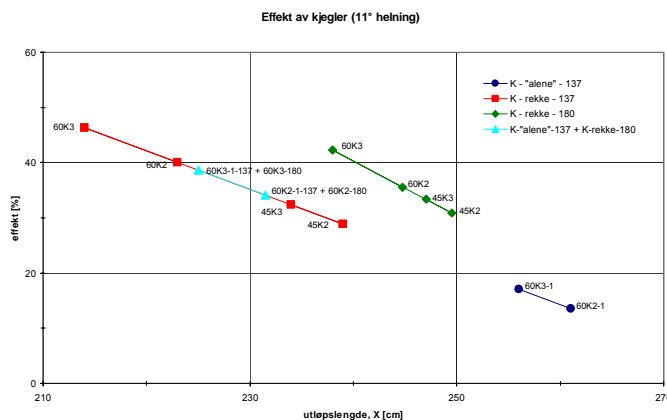


**Figur 8.20** Effekt av 60° kjebler og plogvoll plassert 1,37 m ned i nedre renne, 14° helning



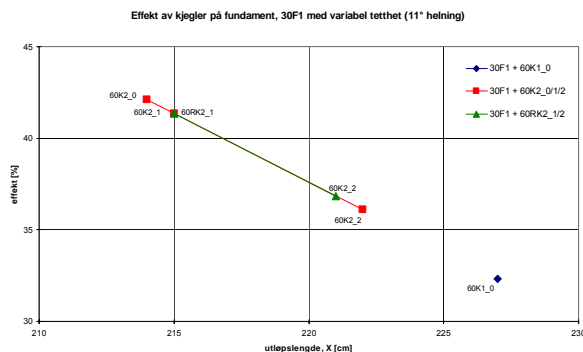
**Figur 8.21** Effekten av RV plassert normalt på skredet ved 1,5 m

Effekten av kjebler plassert i renne med 11° helning er vist i figur 8.22. Effekten av kjebler alene ved profil 1,37m er 14% for 2 cm høy kjeble og 17% for 3 cm høy kjeble. Den største effekten har rekker av kjebler plassert ved 1,37m. 60K3 tar ut en effekt på 46% av massen. 60K2 har en effekt på 41%. 45K gir en effekt i omtrent samme størrelsesorden på 30%. Når vinkelen er mindre ser det ut til at høyden har mindre å si for effekten av dem. Kjeblerekker med 45K plassert 1,8m nede i renna har en effekt i nesten samme størrelsesorden. 60K3 plassert 1,8m nede i renna har størst effekt, med 42%. Energien som tas ut vil riktignok være mindre på grunn av at den totale mengden energi som er å ta bort er mindre så langt nede i renna.



**Figur 8.22** Effekten av kjebler med ulik høyde, vinkel og plassering

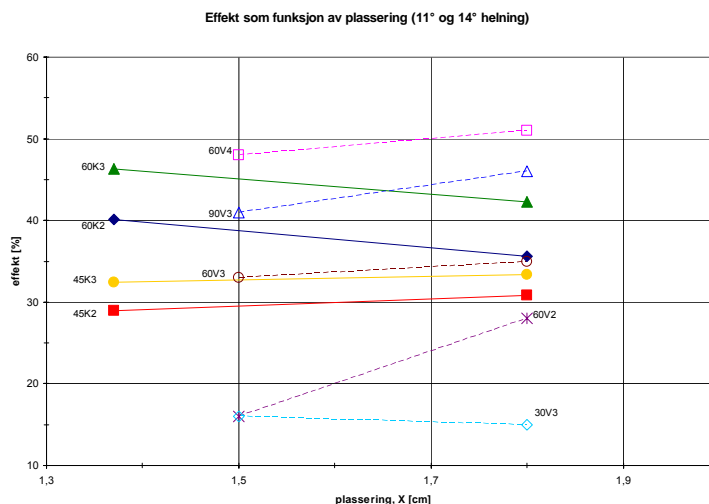
Effekten av 60K med ulik høyder og tetthet på 30 fundament, er vist i figur 8.23. Disse delforsøkene er utført i renne med 11° helning uten bruk av folie i knekken. Det betyr at maksimalt utløp uten bruk av tiltak er på 2,7m. 60K1 + 30F1 gav en effekt på 32%. Det er 8% lavere effekt enn bruk av kun 60K2 uten fundament. 60K2 på fundament med ingen og 1 cm avstand mellom kjeplene gav samme effekt, 41%, det vil si 5% lavere enn kun bruk av 60K3. Med avstand mellom kjeplene på 2 cm sank effekten av 60K2 til 36%. De rektangulære kjeplene med samme mellomrom og høyde gav samme effekt som de kvadratiske kjeplene.



Figur 8.23 Effekt av kjepler på 30° fundament med variabel tetthet

Effekt som funksjon av plassering:

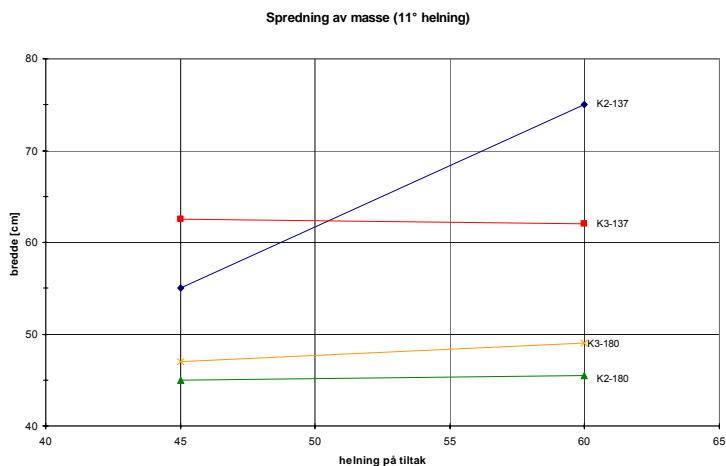
I figur 8.24 er effekten som funksjon av plassering av tiltak vist. Dette viser at kjepler med 60° helning (60K) tydelig gir redusert effekt når de plasseres lengre nede i utløpet. 45K viser ingen til svak økning i effekt når de plasseres lengre nede i renna. Effekten ved bruk av voller ser generelt ut til å øke når vollen plasseres lengre ned i utløpet.



Figur 8.24 Effekten som funksjon av plassering. Kjepler er heltrukne linjer (11° renne), voller er stiplede (14° renne).

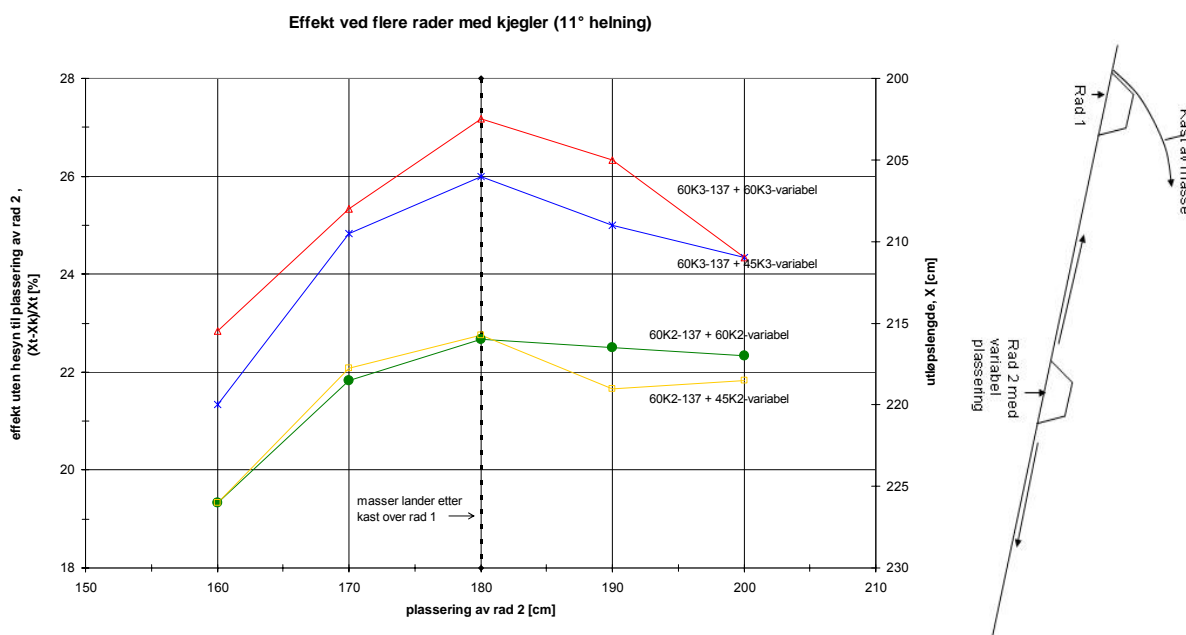
Det er tydelig at når tiltakene plasseres lengre opp i renna blir også spredningsbredden større. Det er kun K2-137 som øker spredningsbredde når vinkelen på tiltaket øker til 60°. K3 holder spredningsbredden konstant uavhengig av om helningen på tiltaket øker. Dette er vist i figur 8.25.

Økning og reduksjon av effekt som skyldes endring av plassering har derfor støtte i at bredden av spredningen øker når tiltakene plasseres høyere opp i renna. Økt vinkel på tiltakene gir ikke nødvendigvis en økning i spredningsbredde.



Figur 8.25 Spredning av masse over kjegler plassert ved 1,37m og 1,8m

I figur 8.26 er effekten av kombinasjoner med to kjeglerekker vist. I tillegg til dette er et forsøk med kombinasjon med voll gjennomført. Effekten i denne figuren gjelder som en funksjon av dimensjonerende utløpslengde og utløpslengde i det aktuelle forsøket. Plasseringen av aktuelt tiltak inngår ikke effektberegningen. Kombinasjoner med to rekker 60K3 gir den korteste utløpslengden og beste effekten. Kombinasjonen mellom 60K3 og 45K3 gir litt lengre utløpslengder. To rekker 60K2 og kombinasjoner med 60K2 og 45K2 gir litt dårligere effekt og lengre utløpslengder enn sammenlignet med 60K3. Alle kombinasjoner gir kortest utløpslengden og best effekt ved plassering av den andre raden i profil 1,8m. Når plasseringen av den andre raden øker nedover i renna synker den total hastighetsenergien i massen. Jo mindre total energi, jo mindre energi kan tas ut for å gi god effekt. Plassering av den andre raden ved profil 1,6m gav generelt dårlig effekt, fordi mye av massen ble kastet over.



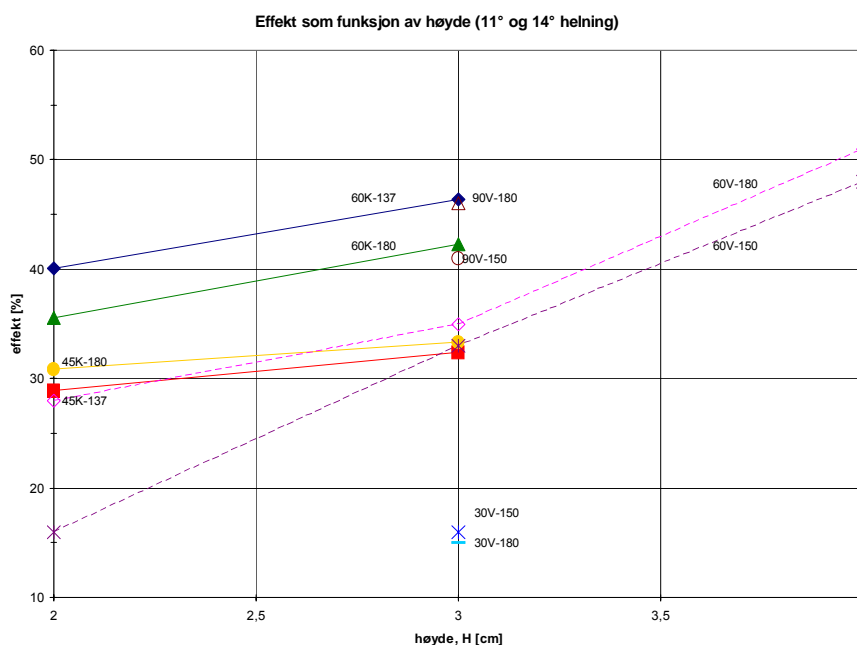
Figur 8.26 Effekt ved kombinasjon av to rader. Første rad står fast ved 1,37m, mens rad 2 varierer i plassering mellom 1,6m til 2,0m. Skisse er vist til høyre.



Kombinasjoner med to rekker kjebler og en voll, alle 2 cm høye, gav kortest utløpslengde og en effektivitet på 29% (den midtre rad er den variable) Effektiviteten av denne kombinasjonen var den samme uavhengig av om midtre rad var 45° eller 60°.

#### Effekt som funksjon av høyde;

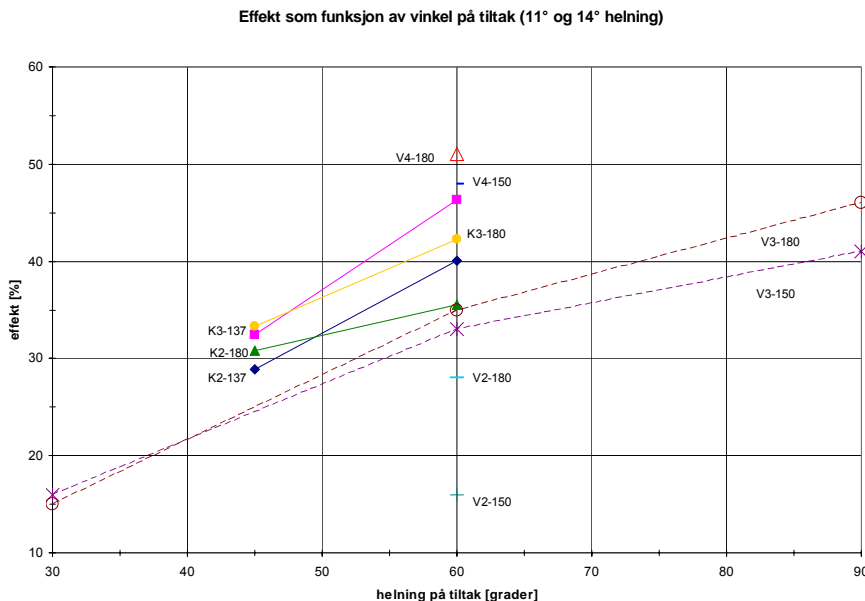
Effekt som funksjon av høyden på tiltakene er vist i figur 8.27. Økning av høyde på 60K fører til at effekten øker lineært. Økningen av effekt er her uavhengig av plassering i renna. Økningen av høyde på 45K fører også til en lineær økning av effekten, men ikke så stor som sammenlignet med 60K. Økningen av effekt er også her uavhengig av plassering i renna. Effekten er generelt større jo brattere helning tiltaket har. Voller følger den samme tendensen som kjebler. For voller stiger effekten raskere per høydeøkning, sammenlignet med kjebler. Voller ser også ut til å følge en lineær økning i effekt med økt høyde. Økning av effekt er større mellom 30V og 60V, enn sammenlignet med 60V og 90V. Effekten av 60V2-150 er ut fra dette like stor som 30V3-150, dvs. 16%. Effekten av 60V3-150 er til sammenligning lik 33%. I figur 8.28 vises det tydelig at effekten av lave voller er svært avhengig av plasseringen av vollen. Lave voller har større effekt jo lengre nede i renna de er plassert. Voller med stor høyde ser ut til å ha en mindre forskjell i effekt som avhenger av plassering i renna. Alle vollene har likevel størst effekt om de plasseres lengre nede i renna.



**Figur 8.27 Effekt som funksjon av høyden på tiltakene**

#### Effekt som funksjon av vinkel;

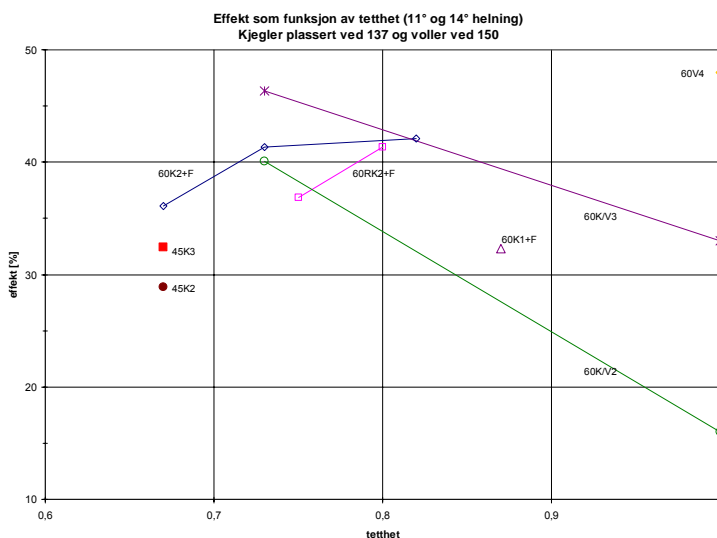
Effekt som funksjon av vinkel på tiltak er vist i figur 8.28. Det er generelt fremtredende at effekten øker med økt vinkel på tiltak. Det er tydelig at effekten er større per økt grad med helning på tiltak når tiltaket er plassert høyt oppe i renna. For vollene er det tendens til at økningen av effekt er større for helninger mellom 30° og 60°, enn økningen per grad mellom 60° og 90°. Ved 60° helning på tiltak har lave voller minst effekt, men effekten øker jo lengre ute i renna de plasseres. Dette er spesielt tydelig for lave voller. Kjebler viser tydelig at de er mest effektive når de plasseres høyt oppe i renna.



Figur 8.28 Effekten som funksjon av helning på tiltakene. Kjegler er heltrukne linjer og vollene er stiplet eller enkle punkt.

Effekt som funksjon av tetthet:

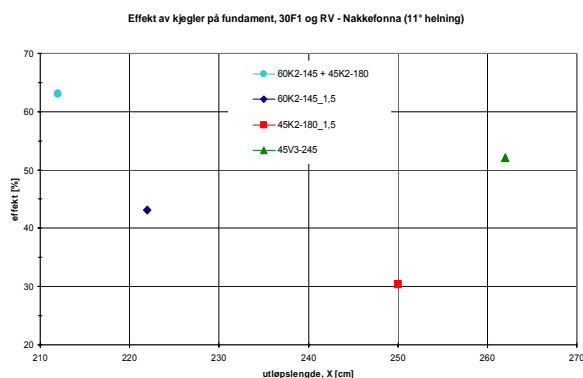
Figur 8.29 viser effekten som funksjon av tettheten til rekker med tiltak plassert høyt oppe i renna. Kjeglene har samme plassering ved 1,37m i 11° helning, mens vollene har samme plassering ved 1,5m i 14° helning. Effekten av tiltakene ser ut til å synke med økt tetthet. Samtidig gir tiltak med for liten tetthet også synkende effekt. Det ser ut til at tiltak har et toppunkt når tettheten ligger rundt 0,7-0,8 høyt oppe renna. Kjegler på fundament med lik høyde, 60° helning, men ulik tetthet (betyr her lik avstand mellom enhetene i kjeglerekka, men ulik tetthet i forhold til utforming) gir samme effekt. Forskjellen i tetthet er parallellforskjøvet i forhold til hverandre, men effekten er lik. 45K og 60K med ulik høyde, men lik tetthet, har mest effekt når høyden er større. Dette tyder på at tiltak med samme tetthet og vinkel og ulike høyder gir best effekt med størst høyde. Tiltak med lik høyde og lik vinkel og ulik tetthet gir samme effekt. Ulik tetthet betyr i dette tilfellet utformingen av enheten i kjeglerekka.



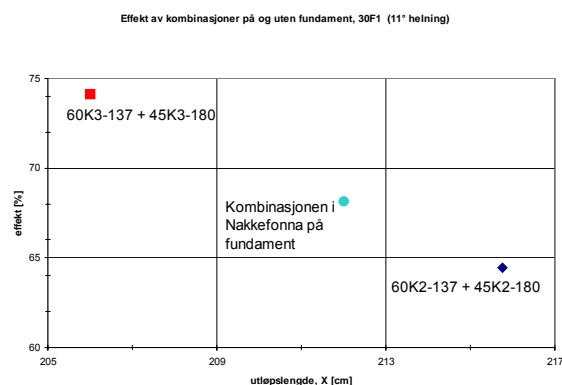
Figur 8.29 Effekten som funksjon av tettheten. Merk at kjeglene er plassert ved 1,37m og vollene er plassert ved 1,50m

Effekt ved sikring av skredområdet Nakkefonna:

Effekten som funksjon av utløpslengde ved kombinasjon av kjebler og voller for sikring av skredområdet Nakkefonna er vist i fire forskjellige delforsøk i figur 8.30. 60K2 på fundament plassert ved profil 1,45m gir kortest utløpslengde av enkel tiltak, og en effekt på 43%. Dette er 3% lavere effekt enn kun bruk av tette 60K3, tross dens plassering ved 1,37m. Kun bruk av 45K2 på fundament plassert ved 1,8m gav en effekt på 30%. Bruk av kun tette 45K3 ved 1,8 m gav 3% større effekt. Effekten ved bruk av fundament og mindre tetthet gir altså henimot den samme effekt. Effekten av kun 45V3 ved 2,45m gav en effekt på 52%. Kombinasjonen av begge kjeblerekkene gav en effekt på 68%. Effekten av tette 60K3-137 + 45K3-180 var 74%, mens effekten av tette 60K2-137 + 45K2-180 var 65%. Det betyr at effekten av den endelige kombinasjonen i Nakkefonna med fundament ligger mellom disse forskjellige høydene, i tillegg må hensyn til plasseringen av sikring i Nakkefonna er lengre nede i renna. Sammenlikningen av dette er vist i figur 8.31.



Figur 8.30 Effekt av sikringstiltak i Nakkefonna



Figur 8.31 Sammenlikning av effekt for kombinasjoner i Nakkefonna (kjebler med og uten fundament)

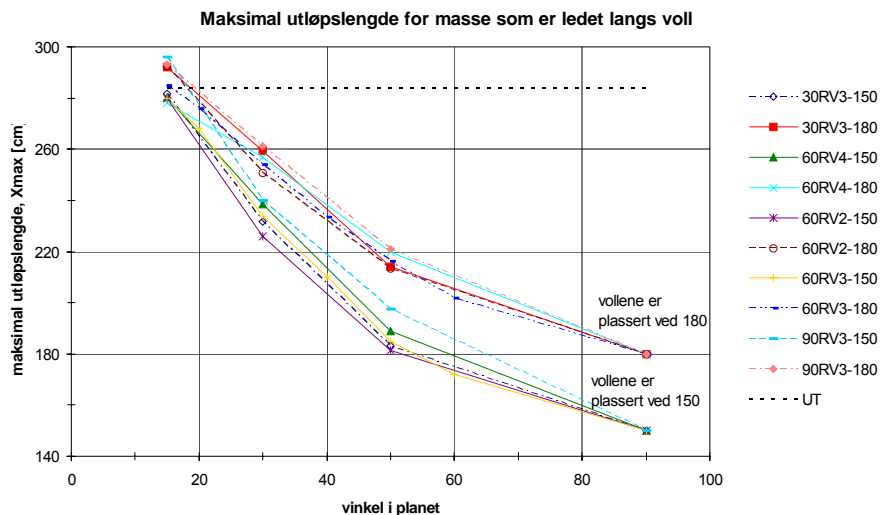
### 8.3 Rette voller

Alle forsøk med rette voller (RV) er utført i renne med helning på nedre del på 14° og etter måleprogrammet i kapittel 6.1.5. Det vil si at forsøk der de rette vollene er plassert med avbøyningsvinkel ( $\square$ ) på 15°, 30°, 50° og 90° er gjennomgående for alle tilfeller. Forsøk med 60RV er utført i 3 ulike høyder, mens 30RV og 90RV er utført i færre versjoner.

#### 8.3.1 Utløpslengde

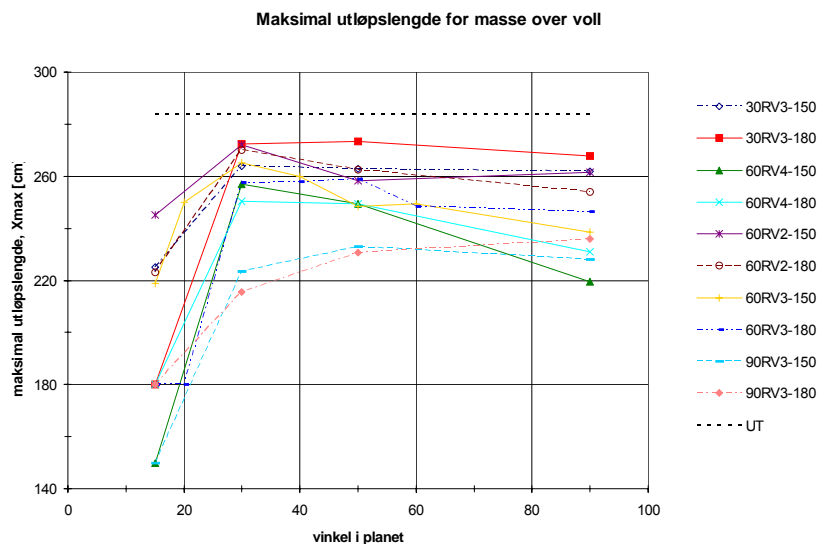
Utløpslengden varierer som en funksjon av vinkel og høyde på tiltak, avbøyningsvinkel i planet og plasseringen i x- retning. Disse parametrene bestemmer hvor stor utløpslengden blir av massen som ledes langs eller krysser vollaksen,  $X_{voll}$ . I figur 8.32 er utløpslengden for massen ledet langs vollaksen vist. Dette angir at når avbøyningsvinkelen ( $\alpha$ ) er liten blir massene ledet til og med utover utløpslengden til dimensjonerende skred på grunn av kanalisering. Dette er spesielt tydelig ved bruk av stor vinkel på vollsiden. Når  $\alpha$  øker blir utløpslengde langs voll kortere, inntil den stopper  $\alpha$  står normalt på skredretning. Plassering av vollen lengre ned i renna fører til at utløpslengden blir lengre. Forskjellen i utløpslengde reduseres når  $\alpha$  reduserer og øker når  $\alpha$  øker.

Når vollene har samme plassering ved henholdsvis profil 1,5m og 1,8m følger generelt rekkefølgen i utløpslengde der 90RV3 har lengst utløp, deretter 60RV4 og så følger 60RV3, 30RV3 og 60RV2 i omtrent samme størrelsesorden.



**Figur 8.32 Utløpslengde for masse ledet langs vollaksen. Vollene er plassert ved 1,5m og 1,8m.**

Figur 8.33 viser utløpslengden for masse som krysser vollaksen,  $X_{\text{over}}$ . Når vollen er plassert med  $\alpha$  lik  $15^\circ$  går det ingen masse over vollen. Når  $\alpha$  nærmer seg  $30^\circ$  øker utløpslengden til kryssende masse. Utløpslengden til kryssende masse holder seg etter dette stabil når  $\alpha$  øker mot  $90^\circ$ . Det er kun 90RV3, og til dels 60RV4, som viser tendens til å lede massen bedre enn de andre vollene når  $\alpha$  øker. 30RV3 og 60RV2 viser dårlig evne til å lede massene på grunn av deres store utløpslengde av masse som krysser vollaksen. Utløpslengden varierer lite som funksjon av plasseringen til tiltakene i renneprofilen. Det er en  $\alpha$  der utløpslengden for massene er minimal og like lang for masse over og langs voll. Dette er gjennomgående for  $\alpha$  lik  $30^\circ - 50^\circ$ .

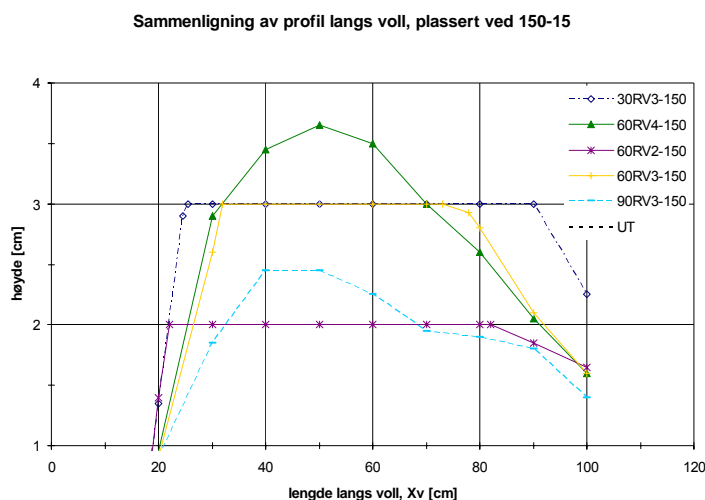


**Figur 8.33 Utløpslengde for masse som krysser vollaksen. Vollene er plassert ved 1,5m og 1,8m.**

### 8.3.2 "Klatrehøyde" langs voll ved $15^\circ$ avbøyning ( $\alpha$ ) i planet

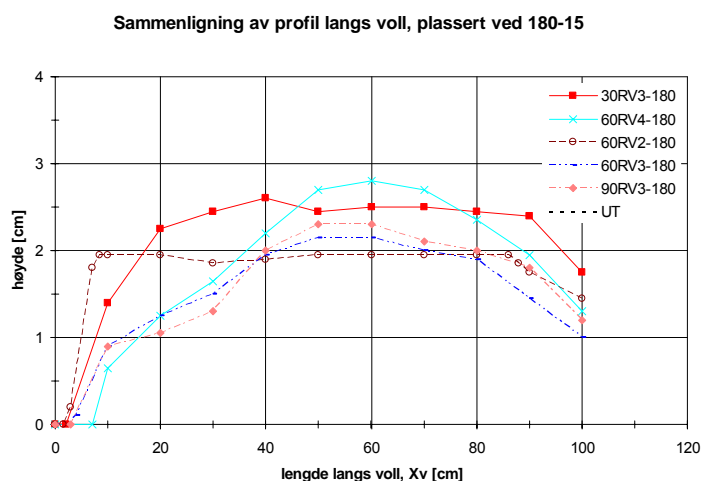
Det er kun voller med avbøyningsvinkel på  $15^\circ$  som fullstendig leder massene langs vollaksen, riktignok med unntak for 60RV3, 60RV2 og 30RV3 plassert ved 1,5m. Dette er derfor det nærmeste en kommer en fullstendig profil av "klatrehøyden" på vollsiden.  $\alpha$  utover  $15^\circ$  fører til at massene går over vollen.

Figur 8.34 viser "klatrehøyden" på vollen ved plassering 1,5m nede i renna og  $\alpha$  lik  $15^\circ$ . Her går massene over 60RV3, 60RV2 og 30RV3. Krysningsbredden av masse er ca 0,25m bredere hos 30RV3 sammenlignet med 60RV3. 60RV4 når en maksimal klatrehøyde på 3,7cm i profil 0,5 langs vollaksen, det vi si at massen klatrer opp 90% av høyden på vollen. Massene når en klatrehøyde på 2,5 cm i profil 0,5m langs vollaksen ved bruk av 90RV3. Det betyr at massen klatrer opp 82% av høyden på vollen.



**Figur 8.34 Profil av "klatrehøyder" på voller med avbøyning på  $15^\circ$ , plassert 1,5m nede i renna**

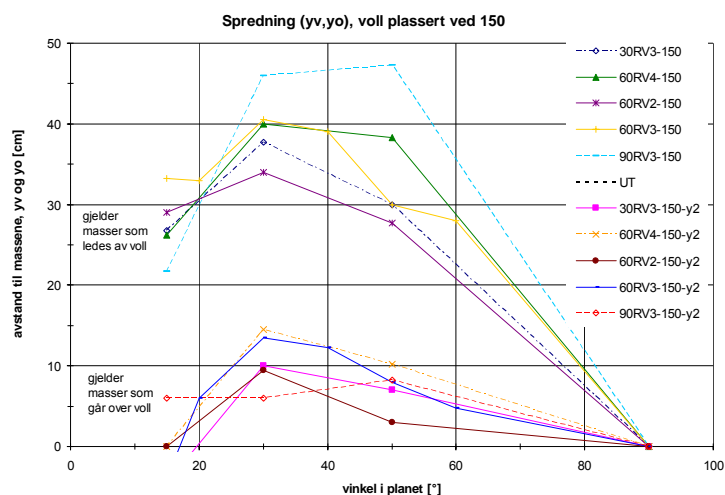
Figur 8.35 viser "klatrehøyden" på voller plassert 1,8m nede i renna og  $\alpha$  lik  $15^\circ$ . Her fungerer alle vollene som ledevoller. 30RV3 og 60RV2 leder masser på grensen av det de klarer. Massene bruker 98% og 87% av høyden til rådighet for å lede massen. 60RV3, 90RV3 og 60RV4 bruker henholdsvis 72%, 77% og 70% av høyden til rådighet for å lede massene. Dette tyder på at økt vinkel og høyde på vollen øker ledeevnen av massene.



**Figur 8.35 Profil av "klatrehøyden" på voller med avbøyning på  $15^\circ$ , plassert 1,8m nede i renna**

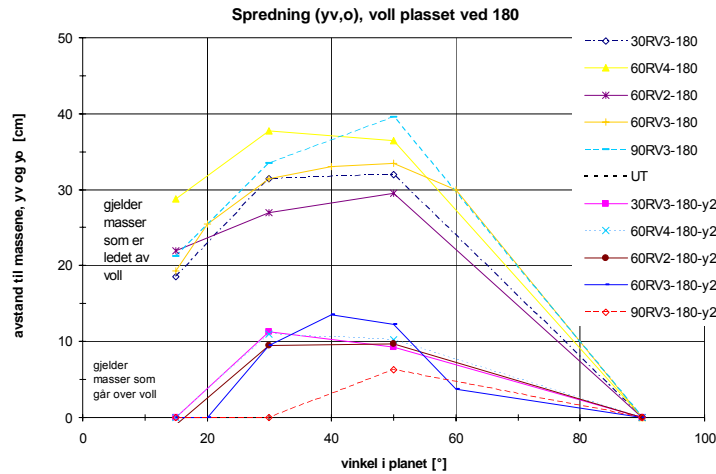
### 8.3.3 Spredning av masse

Spredning av masser når vollen er plassert 1,5m nede i renna er vist i figur 8.36. Når  $\alpha$  øker blir spredningsbredden større, inntil avbøyningsvinkelen når  $90^\circ$ .  $\alpha$  mellom  $30^\circ$  og  $60^\circ$  gir den største spredningsbredden. For masser som ledes av vollen viser 90RV tydelig den beste spredningsevnen. Deretter sprer 60RV4, 60RV3, 30RV3 og 60RV2 i synkende rekkefølge. Spredning av masser over voll viser den samme tendensen, med unntak av 90RV som tydelig sprer massen mindre sammenlignet med tendensen for masse langs voll. Dette skyldes trolig at massene er preget av et kast over vollen ved 90RV, i motsetning til flyten av masser som dominerer når helninger på vollene er mindre enn  $90^\circ$ . Når massen blir preget av kastegenskaper ser det til at energien tas bedre ut av massen, og at masser som kommer i bakre deler av raset flyter på masser som ligger foran vollveggen. På den måten blir disse bakre massene ledet rett over vollen uten avbøying, men med redusert energi. Når vinkelen på vollen avtar fra  $90^\circ$  blir massene mer ledet av helningen på vollen, på den måten får massen som krysser vollen et mer ledet løp over. Forløpet for 90RV følger trinnene skissert i figur 7.28.



**Figur 8.36 Spredning av masser når voll er plassert 1,5m nede i renna**

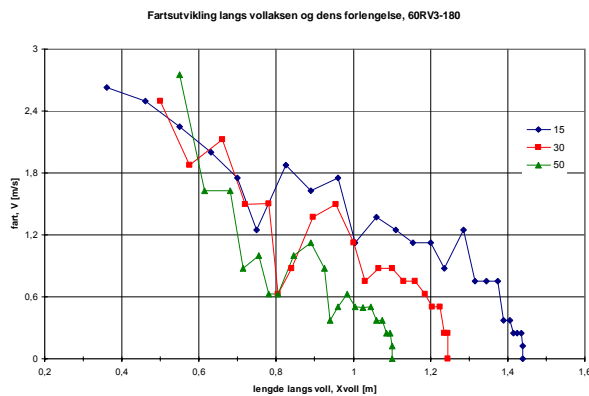
Figur 8.37 viser spredningen av masse 1,8m nede i renna. Spredning av masse er mindre, men viser de samme tendensene som når vollene plasseres 1,5m nede i renna. 90RV leder derimot ikke massen like tydelig som når den er plassert ved 1,5m. Det er her ennå mer tydelig at 90RV leder massen som krysser vollaksen dårlig sammenlignet med de andre vollene, på grunn av at ledeevnen er stor når  $\alpha$  øker. RV90 leder massene bra langs vollaksen, slik at massene som går over blir lite styrt på grunn av at de klatrer på massene som ligger foran vollveggen og flyter over. Dette gjelder spesielt de bakre massene.



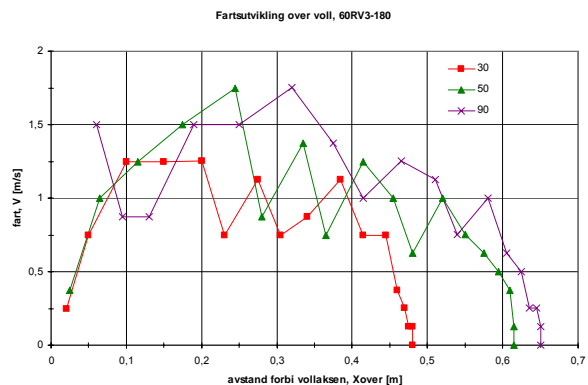
Figur 8.37 Spredning av masser når voll er plassert 1,8m nede i renna

### 8.3.4 Fart og energilinje

Fartsutviklingen i massen er vist i figur 8.39 og figur 8.38 for 60RV3 plassert 1,8m nede i renna. Treffpunktet er ved 1,8m. 15° avbøyer massen fullstendig, mens 90° går massen bare over vollen. Massen som ledes langs vollaksen har et lengre utløp og bevarer farten bedre utover i renna. Når avbøyningen er mindre bevares mer av farten og dermed energien. Massen som krysser vollaksen bevarer farten best og lengst når den plasseres normalt på skredet. Jo mer normalt på skredet vollen plasseres, jo bedre bevares farten og energien i massen som passerer. Dette skyldes også at en større mengde masse passerer vollen når den plasseres med en større vinkel på skredretning. Dette avhenger da også av helning og høyde på vollveggen.



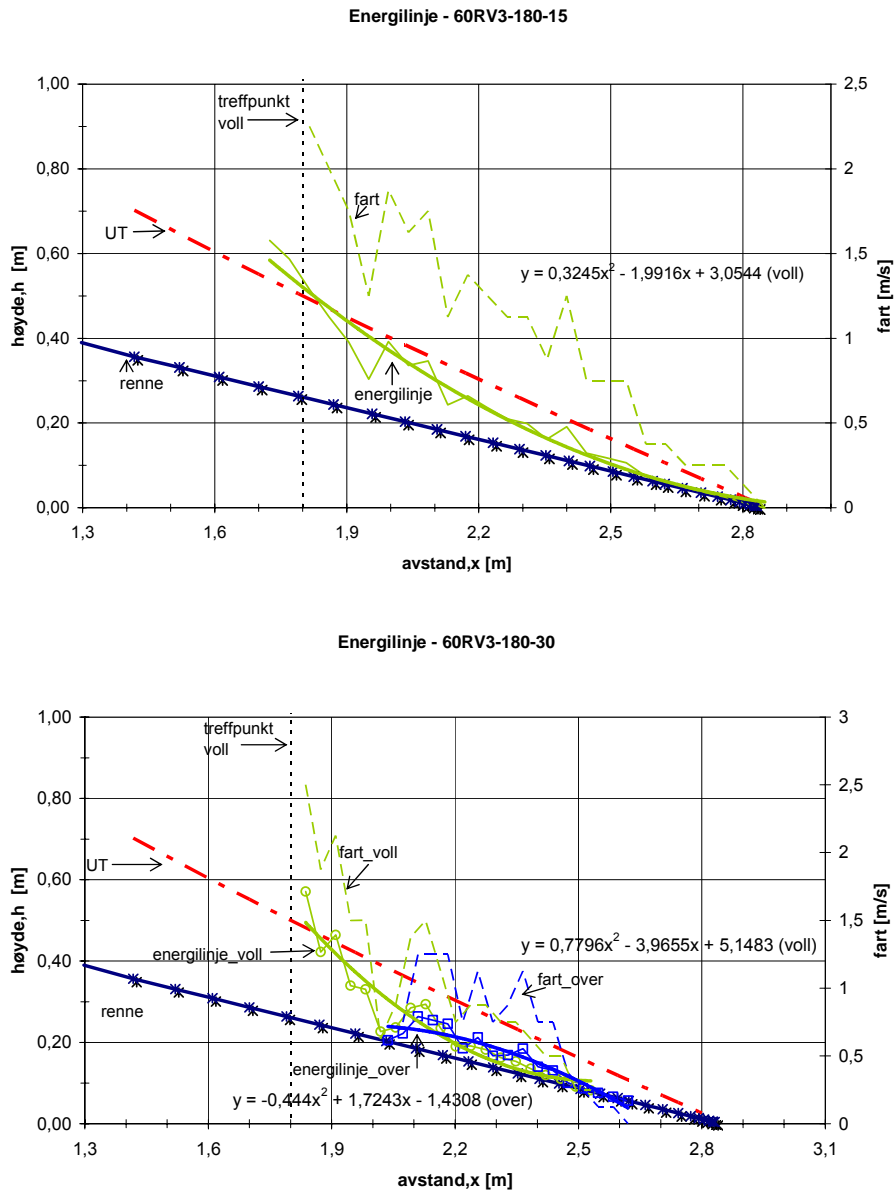
Figur 8.38 Fartsutvikling i massen langs vollaksen for 15°, 30° og 50°



Figur 8.39 Fartsutvikling i massen over vollaksen for 30°, 50° og 90°

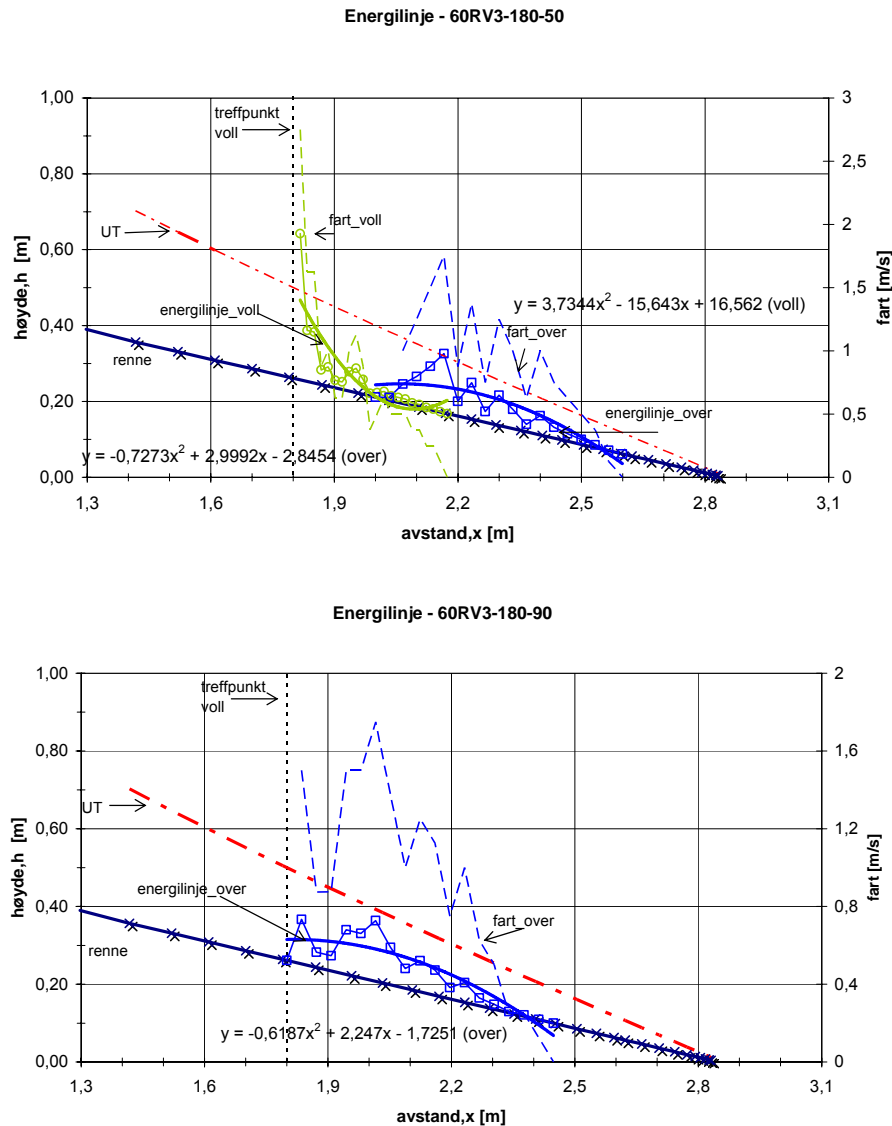
Figur 8.40 og figur 8.41 under viser energilinjene og fartsutvikling ved samme delforsøk som omtalt over. Farten for massen som ledes langs vollen avtar raskt før den stabiliserer seg. Dette skyldes at fronten av massen treffer midt på vollen over en lengde på omtrent 0,2m. Deretter mister massen mye fart på grunn av en stor retningsendring før den ledes ned langs vollen. Dette finnes igjen i energilinjen ved at hastighetshøyden også reduseres raskt i starten. Etter dette ser energilinjen ut til å stabilisere seg, men er fortsatt preget av hastighetsbetinget friksjon. Fartsreduksjonen til massene som krysser vollaksen er jevn, men også skiftende på grunn av fronter som legger seg oppe på hverandre og masser som spres og skifter retning. Det gir ei energilinje som er preget av konstant

hastighetshøyde og tørrfriksjon. Helningen på energilinja for massene som går over ligger tilnærmet parallelt med energilinja uten tiltak. Energilinja for masser som ledes langs vollen har derimot en større helning når  $\alpha$  øker. Det tyder på en raskere oppbremsing av massen. Når  $\alpha$  er liten ligger energilinja tilnærmet parallelt med energilinja for uten tiltak.



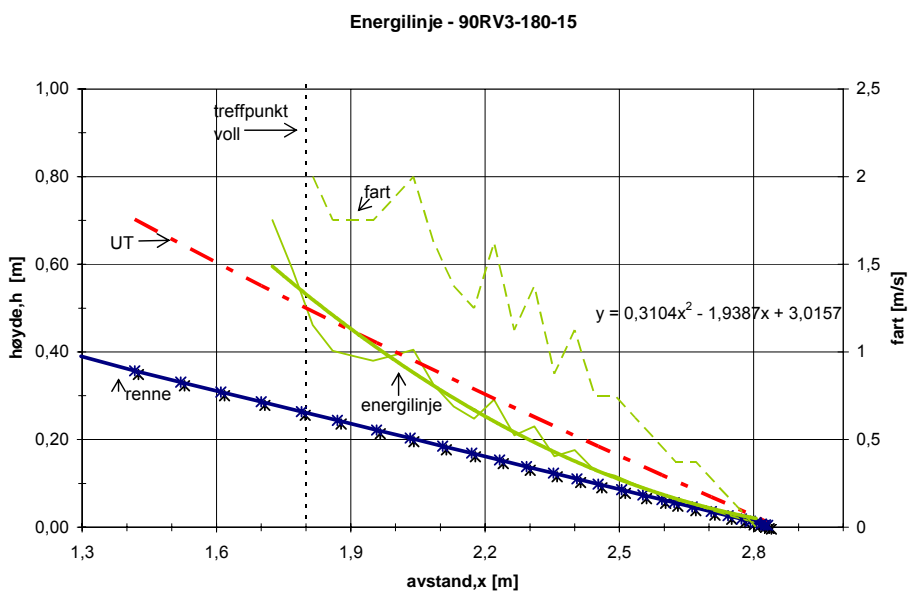
Figur 8.40 Energilinjener for 60RV3 plassert 1,8m nede i renna. Vollene er plassert i 15° og 30° på skredretning. Likningene angir trendlinja for energilinjene.





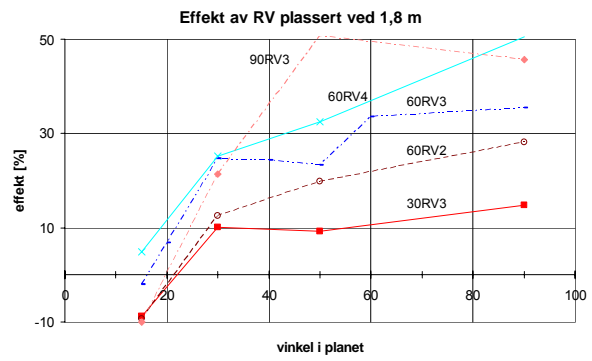
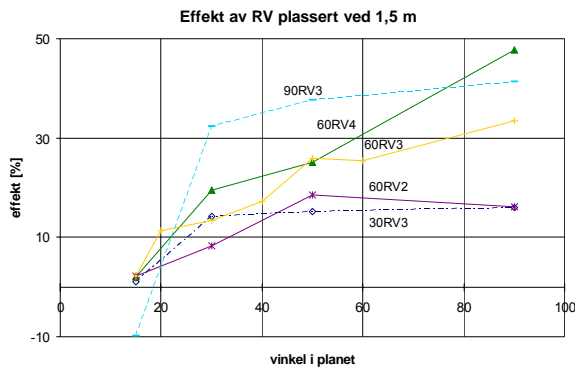
**Figur 8.41 Energilinje for 60RV3 plassert 1,8m nede i renna. Vollene er plassert i 50° og 90° på skredretning. Likningene angir trendlinja for energilinjene.**

Figur 8.42 og figur 8.43 viser fart og energilinje for 90RV3 plassert 1,8m nede i renna. Dette delforsøket viser den samme tendensen som er vist for 60RV3 ved 1,8m. Massen som ledes er til dels preget av hastighetsbetinget friksjon. Massene som går over vollen er mer parallell med energilinjen uten tiltak og dermed dominert av tørrfriksjon. Når  $\alpha$  øker, reduseres hastighetshøyden for masse som ledes langs vollen og stiger for massen som krysser vollen. Fartsutviklingen langs vollen reduseres jevnt ved liten  $\alpha$ , men reduseres raskere når  $\alpha$  øker.



**Figur 8.42 Energilinje for masse over og som ledes langs voll for 90RV3, plassert 1,8m nede i renna og med vollene plassert 50° og 90° på skredretning.**

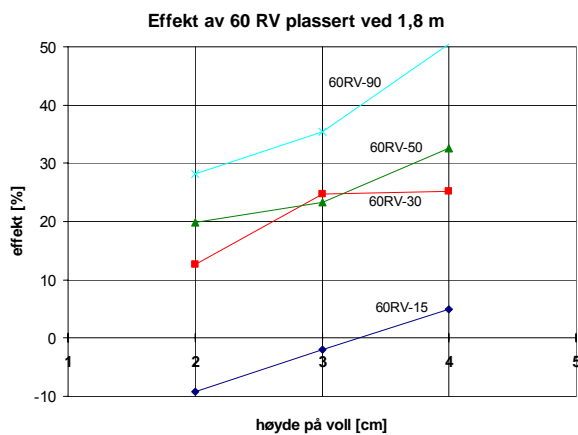




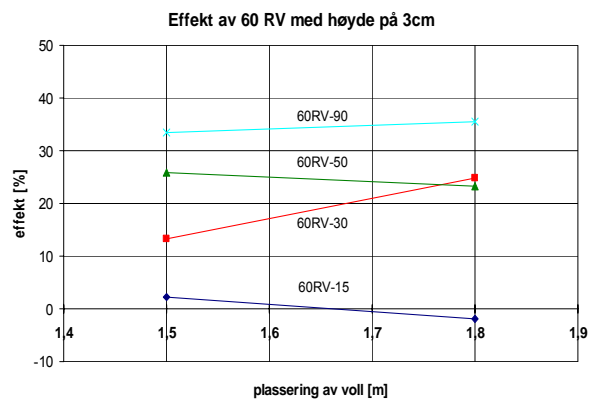
Figur 8.44 Effekt som funksjon av vinkelplasseringen i planet

I figur 8.45 er effekten av 60RV funksjon av høyden på vollen. Vollene er plassert ved profil 1,8m. Effekten av vollen øker generelt med høyden. For vollene normalt på skredet øker effekten omtrent 1:1 med økt høyde. Økningen av effekten vokser tilnærmet lineært. Forskjellen i effekt når  $\alpha$  er 30° og 50° er svært liten. Økningen i effekt er større mellom 15°- og 30°, enn mellom 50° og 90°. Økningen av effekt er derfor større når vinklene er små. 60RV normalt på skredet gir den største effekten i dette tilfellet på 50%.

Figur 8.46 viser effekten som funksjon av plasseringen til vollen i lengdeprofilen. 60RV3 er brukt. Effekten holder seg nærme konstant ved flytting av vollen lengre ned i renna. Den vil likevel ta ut mer energi lengre oppe fordi den totale mengden energi er større der. En økning av effekt er bare å ane ved  $\alpha$  lik 30° når vollen plasseres lengre nede i renna, i tillegg til en liten økning for RV-90.

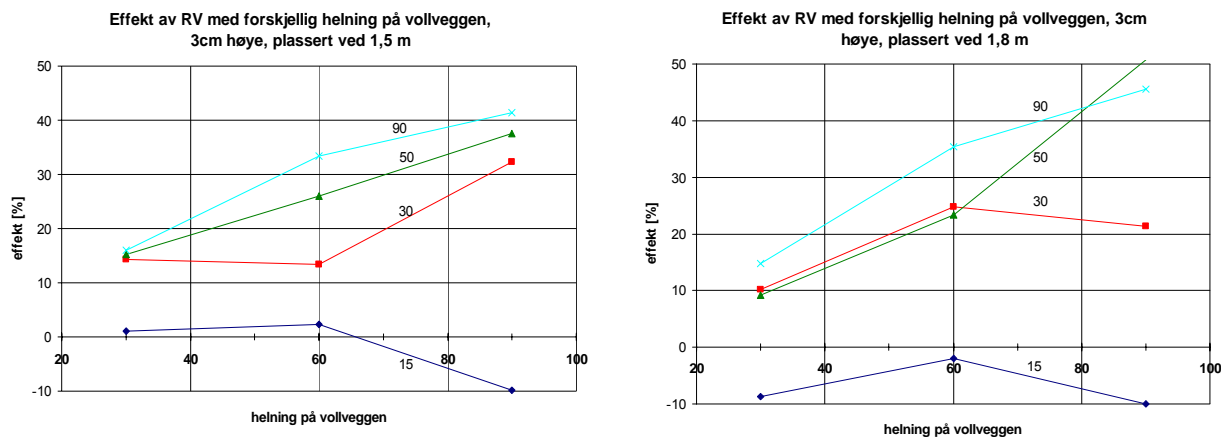


Figur 8.45 Effekt av 60RV som funksjon av høyden, plassert i profil 1,8m



Figur 8.46 Effekt av 60RV som funksjon av plasseringen i lengdeprofilen. Høyden er 3cm

Effekten som funksjon av helning på vollveggen er presentert i figur 8.47. Alle vollene har en høyde på 3cm og er plassert ved 1,5m og 1,8m. Effekten av vollene ser ut til å øke med økende helning på vollveggen. Unntaket er voll plassert med  $\alpha$  lik 15°. Vollvegg i 90° plassert 15° på skredretning er svært lite effektivt. Den gjør strømmen av masse mer konsentrert og dermed ledes massen lengre. Generelt gir derfor  $\alpha$  lik 15° dårlig effekt. 90° vollvegg er mest effektivt når den står mellom 50°-90° på skredretning. Effekten øker jo lengre ned i renna vollene plasseres, spesielt for  $\alpha$  mellom 30° - 90°. Effekten av en vollvegg på 30° er omtrent den samme når  $\alpha$  er mellom 30° - 90°.



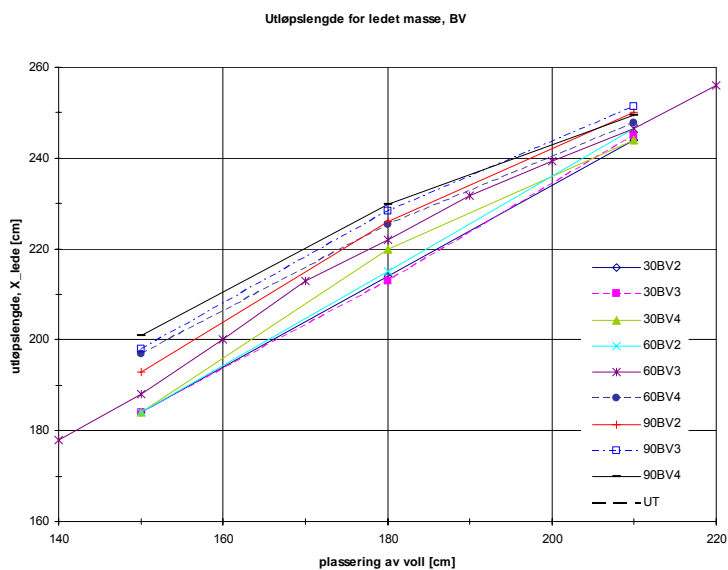
Figur 8.47 Effekten av RV som funksjon av helning på vollveggen. Høyden er 3 cm og plasseres i profil 1,5 og 1,8m

### 8.4 Buede voller

Alle forsøk med buede voller (BV) er utført i renne med helning på nedre del på 14° og etter måleprogrammet i kapittel 6.1.5. Dette betyr forsøk med en fast avbøyningsvinkel i renna men med varierende plassering i lengderetning og varierende høyde og vinkler på sidene på vollen.

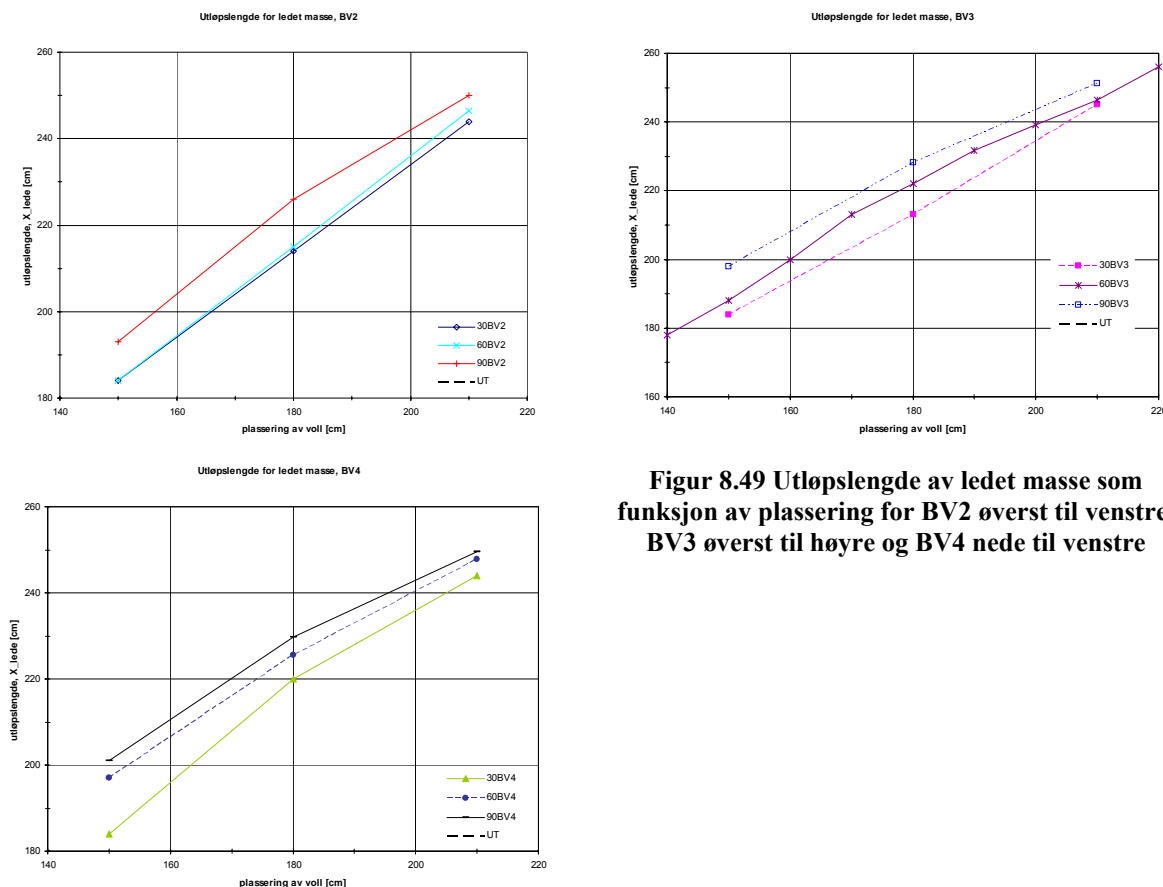
#### 8.4.1 Utløpslengde

Utløpslengden varierer som funksjon av vinkel og høyde på tiltakene og plasseringen i lengderetning. I figur 8.48 og figur 8.49 er utløpslengde for ledet masse som funksjon av plasseringen til vollen sammenstilt for alle delforsøkene. Utløpslengden for massene øker med plasseringen av vollen. Generelt ser det ut til at utløpslengden øker lineært med økt plassering nedover i renna. Det vil si at utløpslengde og plassering har et stigningsforhold på 1:1. Forskjellen i utløpslengde er størst når vollene plasseres lengre oppe i renna. Generelt gjelder det at 90BV gir de lengste utløp, deretter 60BV og 30BV etter synkende høyde. Evnen til å lede massene er derfor svært avhengig av høyde og vinkel på voll.



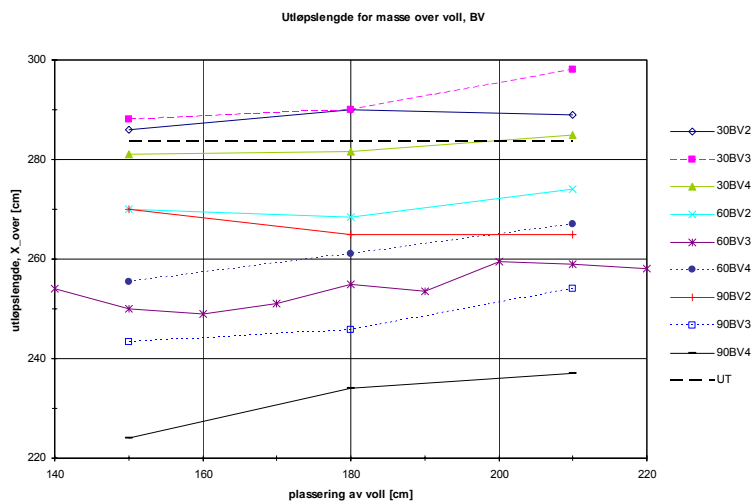
Figur 8.48 Utløpslengde for ledet masse som funksjon av plassering av voll. Dimensjonerende skred har et utløp på 2,83m.

I Figur 8.49 er utløpslengde for ledet masse vist når de er delt opp etter høyden på vollen. Stigningsforholdet viser tydelig et forhold i størrelsesorden 1:1.



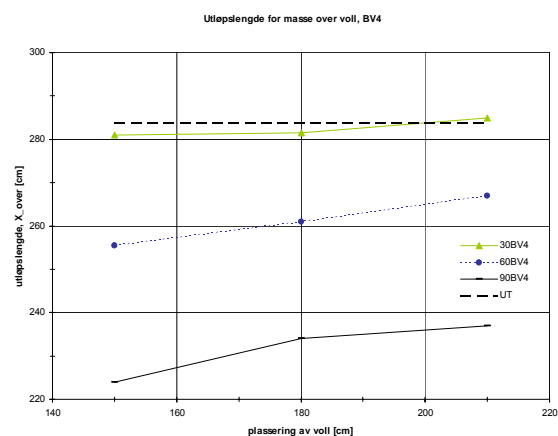
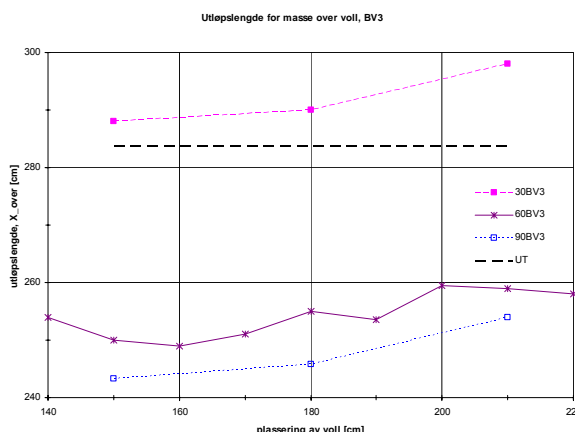
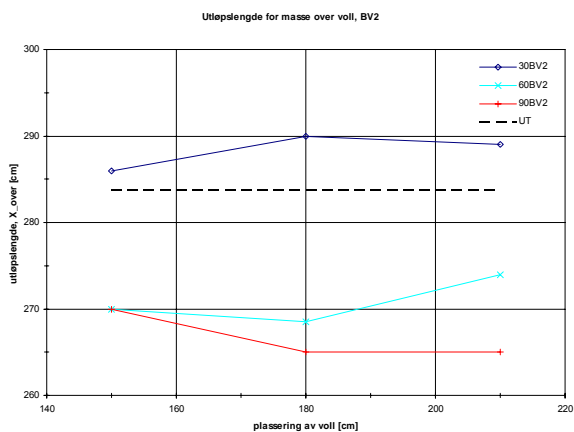
**Figur 8.49 Utløpslengde av ledet masse som funksjon av plassering for BV2 øverst til venstre, BV3 øverst til høyre og BV4 nede til venstre**

Figur 8.50 og figur 8.51 viser utløpslengden til massen som krysser vollaksen som funksjon av plassering av voll i renna. Figuren viser at plasseringen har lite å si for maksimalt utløp av masse over voll. Det er kun en liten tendens til at utløpet øker når plasseringen av voll øker nedover i renna. Trenden er, som i likehet med masse over rett voll, slik at 90BV gir kortest utløpslengde for massene over voll og dermed viser at den har de beste evnene til å lede massen. Spesielt 4cm høy voll med 90° helning viser god ledeevne. Generelt gjelder det videre at 90BV gir kortest utløpslengde, deretter 60BV og 30BV. Innenfor hver type med helning på voll skiller ledeevnen seg ut ved høyden på tiltaket. Et unntak er funnet ved bruk av 60BV3 og 60BV4. 60BV3 viser kortere utløpslengde enn 60BV4. Dette skyldes avsetning av masser i faser. Dette kan forklare med at 60BV4 kaster en "stikker" med masse fra de fremre delene i skredet med stor hastighet over vollen og ned i renna. Dette legger seg til ro som en ganske tynn avsetning av masse. De bakre massene kommer seinere i skredet, men når ikke frem til de første massene som legger seg ned og dermed blir utslagsgivende for maksimalt utløp. Avsetningen av masse for 60BV3 skjer ved at massen legger seg som en jevn og tykk avsetning helt ned til maksimalt utløp ved at de bakre massene klarer å ta igjen de første avsatte frontmassene.



**Figur 8.50 Utløpslengde for masse som krysser vollakse som funksjon av plassering til vollen**

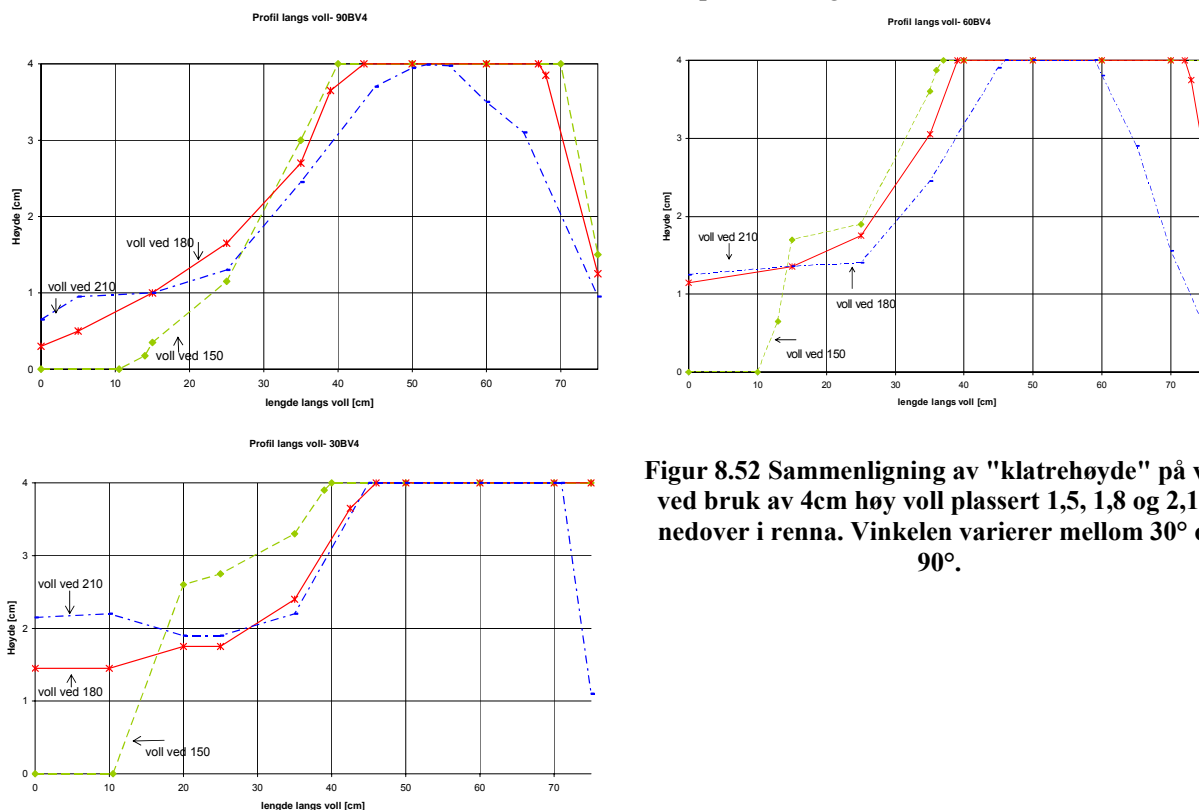
Figur 8.51 viser utløpslengde for masse over voll når utløpslengden er delt opp etter høyden på vollen. Utløpslengden viser kun en veldig liten økning av utløpslengde når plasseringen øker nedover i renna.



**Figur 8.51 Utløpslengde av masse som krysser vollaksen som funksjon av plassering. Dette er vist for BV2 øverst til venstre, BV3 øverst til høyre og BV4 nede til venstre**

### 8.4.2 "Klatrehøyde" langs voll

Figur 8.52 viser profilene av hvordan masser har "klatret" opp på veggene på 4cm høye voller med 30°, 60° og 90° helning. Når helningen på vollen reduseres øker mengden masse som går over vollen. Massen går lettere over vollen jo høyere oppe i renna den plasseres og når  $\alpha$  øker.

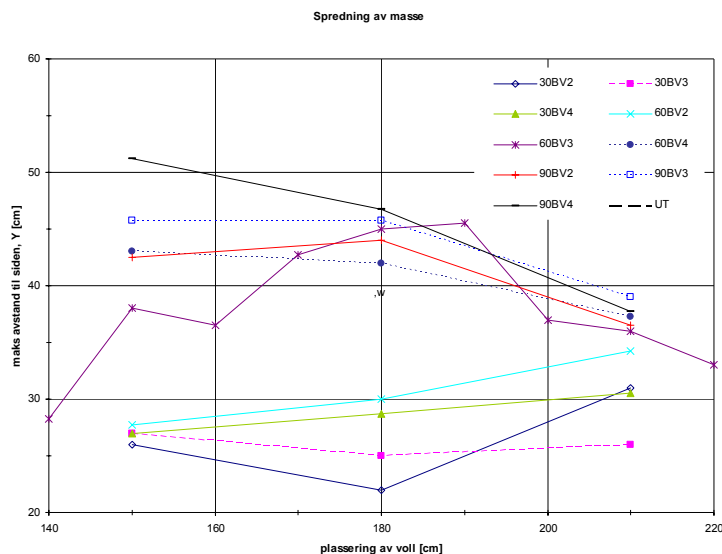


**Figur 8.52 Sammenligning av "klatrehøyde" på voll ved bruk av 4cm høy voll plassert 1,5, 1,8 og 2,1m nedover i renna. Vinkelen varierer mellom 30° og 90°.**

### 8.4.3 Spredning og størrelse av masse

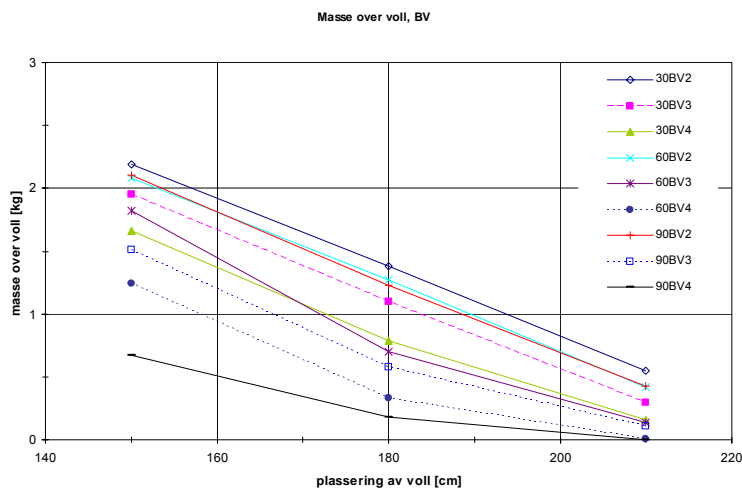
Figur 8.53 viser spredningen av masse som funksjon av plasseringen av vollen. Dette viser at evnen til å spre massene avtar når vollene plasseres lengre ned i renna. Differansen mellom evnen til å spre er størst når tiltakene plasseres langt oppe i renna. 90BV sprer massene best, deretter 60BV og 30BV. Spredningsbredden øker med økt vinkel og høyde på voll.





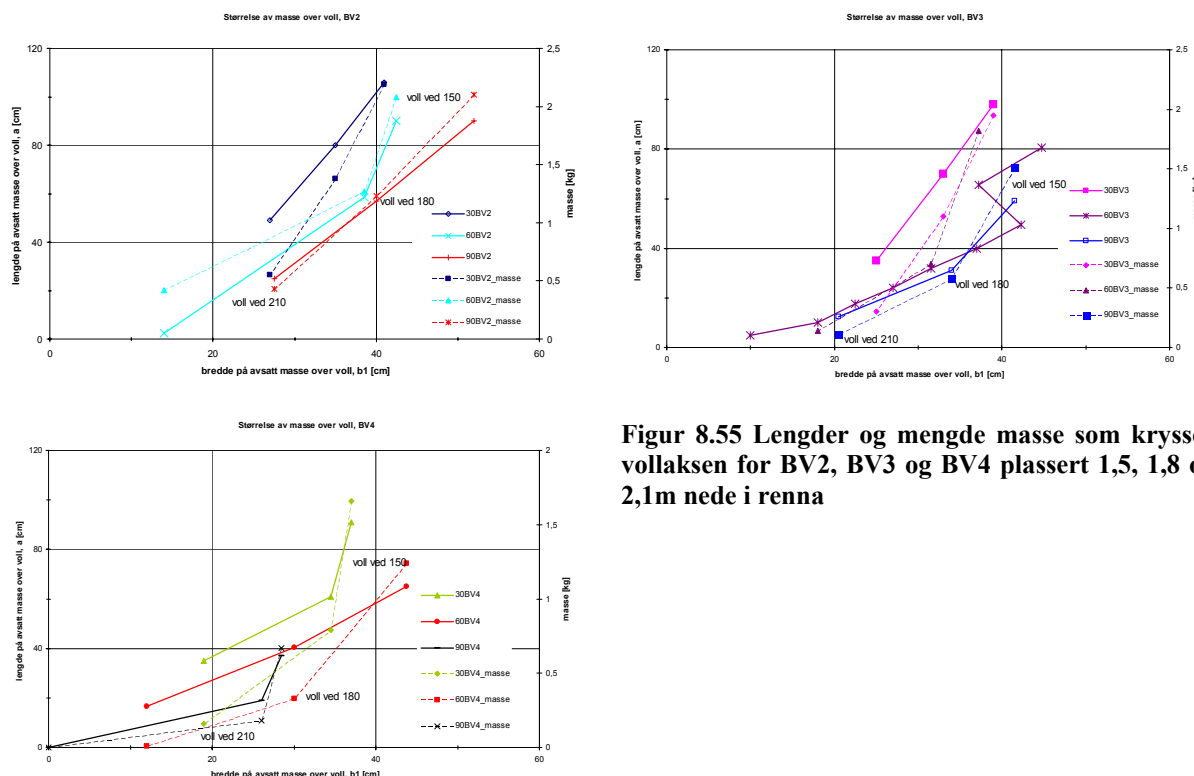
Figur 8.53 Spredning av masse

Figur 8.54 viser mengden av masse som passerer vollaksen som funksjon av plasseringen av vollen. Dette viser at mengden med masse som passerer øker jo lengre oppe i renna vollen plasseres. Vollene viser en reduksjon i masse over voll på 20-25 g/cm. Unntaket er 90BV-4 som har vist spesielt gode evner til å spre og bremse utløpslengden. Denne vollen har en reduksjon på rundt 11 g/cm.



Figur 8.54 Mengden av masse som passerer vollaksen som funksjon av plasseringen til vollen

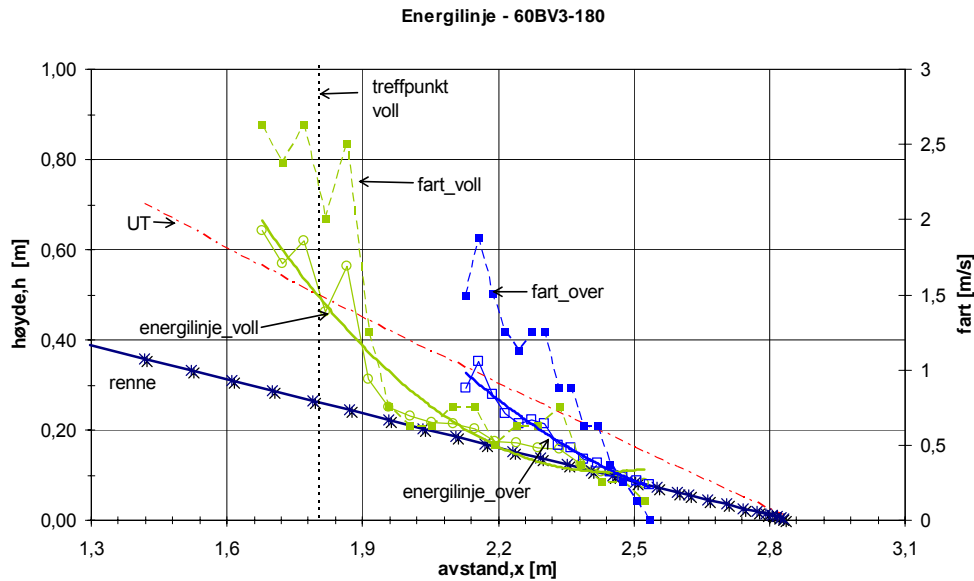
I figur 8.55 er lengde og mengde av masser som passerer vollen presentert etter høydene på vollen. Dette viser at mengde masse og lengde på avsetning som funksjon av avsatt bredde har størst økning for 30BV. Stigningen for 60BV er mindre, mens 90BV stiger minst. Dette stemmer med forholdene mellom utløpslengdene i figur 8.50. Samtidig blir økningen av mengde masse mindre når høyden på tiltakene øker. Bredden på avsatt masse øker når vinkelen øker på vollen. Dette betyr at tykkelsen av avsatt masse må avta med økende vinkel på vollen.



**Figur 8.55** Lengder og mengde masse som krysser vollaksen for BV2, BV3 og BV4 plassert 1,5, 1,8 og 2,1m nede i renna

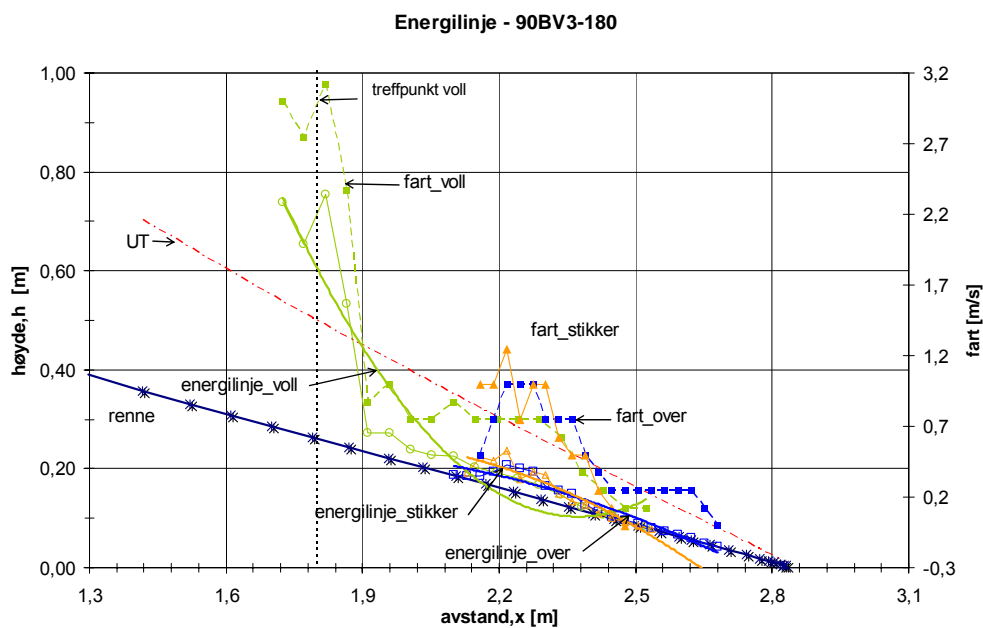
8.4.4 Fart og energilinje

Bevegelsen av masse foregår i ulike faser. Dette er spesielt tydelig ved bruk av buede voller som er plassert litt nede i renna. Massene fordeler seg her jevnt mellom masse som ledes og masse som renner over vollen. Dette er fremstilt for 90BV3 i figur 8.57 under. I figur 8.56 er fart og energilinje presentert for 60BV3, og forløpet i energilinjene er delt i to faser. For 60BV3 møter fronten av massen vollen med stor fart, mens farten reduseres kraftig i det massen gjør retningsendringen langs vollen. Farten holder seg jevn og lav langs vollen inntil den stopper. Energilinjen for massen som kun ledes langs vollen vil derfor holde seg parallell med energilinjen til UT. Total energilinje for masse langs voll gir derimot klart form av å være dominert av hastighetsbetinget friksjon. Farten i massen som krysser vollen blir jevnt redusert. Helningen på energilinjen til massen over vollen er større enn helning på UT, som betyr at nedbremsingen er større i massene som går over vollen.



**Figur 8.56 Energilinje og fart for 60BV3 plassert ved i profil 1,8m**

Figur 8.57 viser farten og energilinjen til 90BV3 ved 1,8m. Her er farten og energilinjen til masse over og langs voll presentert. Massen som ledes langs vollen får en rask reduksjon av fart i det massen treffer vollen og blir retningsendret. Når massen renner langs vollen er farten jevn og lav. Helningen på energilinjen er tydelig preget av endringen i farten. Blant massene som krysser vollaksen kastes en "stikker" av masse over vollen først. Denne kommer med stor fart og stopper raskt opp når den møter renna på grunn av dens tynne avsetningshøyde. "Stikkeren" legger seg som et tynt lag nede i renna. Helningen på energilinjen er tilnærmet parallell med energilinjen UT. En tid senere kommer bakre masser som renner over vollen. Disse massene er tykke og beveger seg med jevn fart nedover renna. Bevegelsesmengden ser ut til å bli godt bevart i massen. Dette gir en helning på energilinjen på ligger veldig parallell med renna og er derfor til dels hastighetsbetiget.



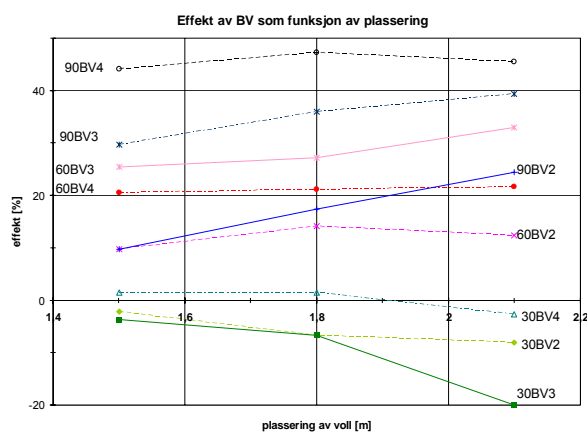
**Figur 8.57 Energilinje og fart for 90BV3 i profil 1,8m**

### 8.4.5 Effekt av buede voller (BV)

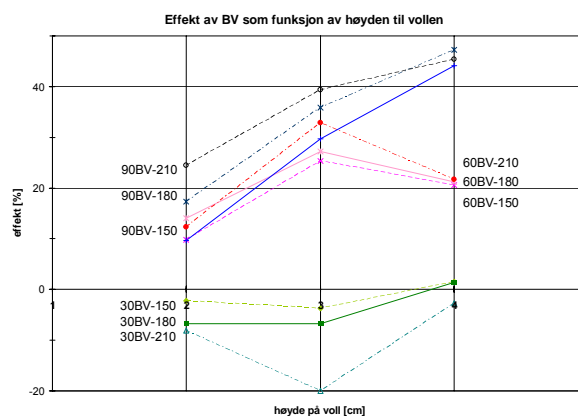
Figur 8.58, figur 8.59 og figur 8.60 viser effekten av buede voller som funksjon av plasseringen, høyden og helning på vollene. Effekten i disse delforsøkene er funnet ut fra maksimal utløpslengde uavhengig av om dette er ledet masse eller massen som går over vollen. Der effekten er negativ betyr det at tiltaket har gitt en lengre utløpslengde enn det dimensjonerende modellskredet gir.

Figur 8.58 viser effekten som funksjon av plassering av vollen. Effekten viser generelt en svak økning når vollen plasseres lengre nede i renna. 30BV fører til at utløpslengden øker utover dimensjonerende skred, og gir derfor tydelig dårligst effekt. Effekten tenderer til å synke med økende plassering nedover i renna for disse. 90BV gir best effekt, der effekten øker med høyden.

I figur 8.59 presenteres effekten som funksjon av høyde på vollen. Dette viser entydig at effekten av 90BV øker lineært med høyden, med et forhold 1:1, 1 cm høyere tiltak gir 10% bedre effekt. Denne sammenhengen avtar litt når vollen plasseres lengre nede i renna. 60BV viser tydelig en økning i effekt inntil høyden når 3cm. Høyde utover dette fører til at effekten synker tilsvarende. Tendensen av effekten av 30BV mer uklar, men det ser ut til at effekten holder seg konstant inntil høyden når 3 cm. Økt høyde utover dette fører til at effekten av vollen øker. Generelt ser det ut til at effekten øker med økende høyde på voll.

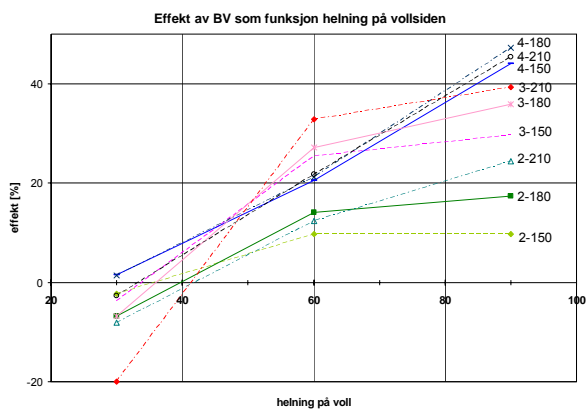


Figur 8.58 Effekten av buede voller som funksjon av plassering i renna

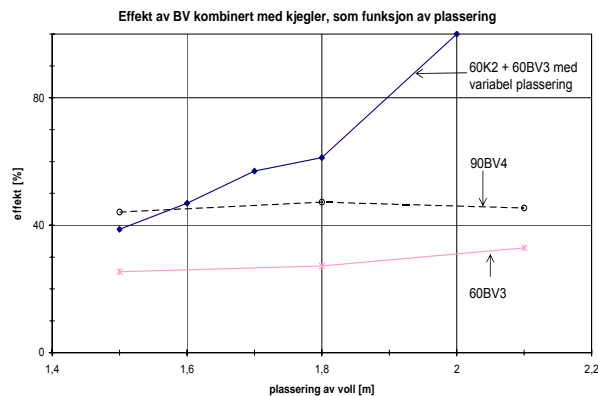


Figur 8.59 Effekten av buede voller som funksjon av høyden på vollene

Figur 8.60 viser effekten som funksjon av helning på vollveggen. Økt vinkel på vollen betyr entydig økt effekt uansett plassering i renna. Økningen av effekt er spesielt tydelig for 4 cm høye voller uansett plassering. Både 2- og 3cm høye voller viser størst økning i effekt når helning på vollen øker fra 30° til 60°. Økningen i effekt avtar når helningen øker fra 60° til 90°. Generelt ser det ut til at effekten øker med økt vinkel på voll, økt høyde på voll og når plasseringen av vollen øker nedover i renna.



Figur 8.60 Effekten som funksjon av helning på voll



Figur 8.61 Effekten av BV kombinert med kjepler som funksjon av plassering. Kjeplerekken står fast på 1,37m. BV varierer plasseringen.

Kombinasjon av buet voll med kjepler er vist i figur 8.61, der kjeplerekken 60K2 står fast 1,37m nede i renna og vollen varierer plasseringen. Ved plassering av BV ved 1,5m gir kombinasjonen av kjeple og voll 6% bedre effekt enn kun bruk av BV. Når BV gradvis plasseres nedover i renna øker effekten av kombinasjonen. Effekten er hele tiden funksjon av plasseringen av BV, det vil si at effekten er andel energi tatt ut av total energi til enhver tid. Når BV i kombinasjon med kjepler er plassert ved 1,8m er forskjellen i effekt 34% enn ved kun bruk av BV. Dette viser at effekten av kjepler høyt oppe kombinert med buet voll langt nede i utløpet gir best effekt.

## 9 Analyse

Resultatene viser en rekke tendenser som er samlet og bearbeidet videre i dette kapitlet. Resultatene er satt i lys av tidligere forsøk og tidligere skisserte retningslinjer for utforming og plassering av tiltak.

### 9.1 Uten tiltak

#### 9.1.1 Froudes tall

Resultatene viser at modellskredene har en flyte høyde på  $0,0065 \pm 0,001$  m. Maksimal hastighet i skredet er 3,1 m/s. Dette gir et Froude tall i størrelsesorden 12,3. Naturlige skred har et Froude tall på ca. 10. Froude tallet for dimensjonerende skred i Nakkefonna ligger på 11,7. Froudetallet i modellen og naturen er nesten i lik størrelsesorden slik at resultatene fra modellforsøkene med hensyn til dette er overførbare til naturen. Tabell 9.1 viser en sammenstilling over dette, samt modellforsøkene som er utført av Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004). Det viser at modellskredene i alle de uavhengige modellforsøkene er i samme størrelsesorden.

**Tabell 9.1 Froude tall for snøskred i natur og modell**

Type	Froudetall, Fr	merknad
Tørrsnøskred	10	(Hákonardóttir K.M, 2004)
Nakkefonna	11,7	tørrsnøskred
Modellskred (her)	12,3	modellmassen ballotini
Modellskred i kanalisert renne (Brateng, 2004)	12,4	modellmassen ballotini (Brateng, 2004)
Modellskred i kanalisert renne (Hákonardóttir, 2004)	11,2	modellmassen ballotini (Hákonardóttir, 2004)

Modellskredene viser ut fra observasjoner trolig en tilsvarende densitet – og hastighetsfordeling som vist i figur 2.6. Støvsyken er tydelig mindre slik at fordelingen avtar raskere i z- retning enn vist i figuren. Dette kjennetegnes gjennom de tydelige dannelser av folder i massen ved bevegelse. Foldingen kan videre kjennetegnes gjennom figur 3.1. Trykk og impuls krefter kombinert med friksjonskrefter ser ut til å være årsak til foldingen av masser.

#### 9.1.2 Energilinje

I øvre renne oppnår modellskredet maksimal fart omtrent 0,8 m ned i renna. Det betyr at massen får konstant fart og ingen økt akselerasjon når den treffer knekk og sikringstiltak i renna. Farten antas derfor som konstant ved alle de ulike delforsøkene. Dette er i likhet med de andre modellforsøkene også.

I tabell 9.2 er det en sammenstilling over maksimal utløpslengde og friksjonsvinkel ved ulike helninger på nedre del av renna. Helningen på energilinjer for naturlige skred ligger vanligvis mellom 0,4 og 0,5. Modellskredenes friksjonsvinkel ligger i overkant av dette, slik at energilinjen ikke blir sammenfallende med energilinjene for naturlige skred. Dette skyldes sannsynligvis for stor ruhet i modellen, slik at modellskredene bremser raskere opp enn hva naturlige skred gjør.

**Tabell 9.2 maksimal utløpslengde ved ulike helninger på nedre del av renna i dette modellforsøket med fri spredning av masse på nedre del av renna**

Helning [°]	Utløpslengde, $X_{\text{maks}}$ [m]	Friksjonsvinkel	Total hastighetshøyde [m]	Merknad
14	2,83	0,51/27°	0,34	
11	2,81	0,53 /28°	0,46	med folie i knekk
11	2,70	-	-	

Knekken i renna ble avrundet ved bruk av 11° renne slik at bevaringen av energi og følgelig hastighetshøyde er tydeligere i denne helningen av renna. Helning med 11° viser en liten økning i friksjonsvinkelen sammenlignet med 14° renne. Med bakgrunn i resultater fra Brateng (2004) blir det likevel konkludert med at energilinjene for også disse modellskredene viser parallellitet. Det er dermed mulig å finne forløpet av energitapet når utløpslengden er kjent. Det åpner muligheten for å bruke sammenhengen i likning [ 3.9 ] om effekt.

Dataene fra forsøkene UT på 11°- og 14° renne gjør det mulig å finne utløpslengde når helningen er kjent i renna. Dette gir et energitap per grad helning på 0,02213. Dette gir igjen en energihøyde per lengdeenhet på 0,51. Ved å ta utgangspunkt i 14° helning som et nullpunkt for helning på renna kan utløpslengde finnes for ulike helninger når Froudetallet er i samme størrelsesorden som her. Tillegget i hastighetshøyde når renna endrer helning er så liten at den neglisjeres. Dette er satt opp i likning [ 9.1 ] og [ 9.2 ] og vist detaljert i vedlegg A.

$$\text{utløpslengde, } X = \frac{\text{hastighetshøyde}_{\text{pr\_grad}} \times \text{ant\_grader}(\text{fra } 14^\circ)}{\text{hastighetshøyde}_{\text{pr\_lengde}}} \pm 2,83 \quad [ 9.1 ]$$

$$X = \frac{0,02213 \times \text{ant\_grader}}{0,5108} \pm 2,83 = 0,0433 \times \text{ant\_grader} \pm 2,83 \quad [ 9.2 ]$$

## 9.2 Kjegler

Kjeglens funksjon er å bremse snømassene. Virkningen av dette avhenger av utforming og plassering til kjeglene, i tillegg til snøens egenskaper og terrengets parametere. Dette er satt i sammenheng under ved hjelp av energilinje som et verktøy for å finne kjeglens parametere.

### 9.2.1 Energilinjen

Tapet av hastighetshøyde og helning på energilinjene for bruk av kjegler gir et tilnærmet parallelt forhold til energilinjen for UT, selv om energilinjen i tilfeller har større helning eller mer svingete løp. Ved analyse av energilinjen er avlest fart brukt direkte i beregning av energilinje. Brateng (2004) tok ut en trendlikning fra avlest fart og benyttet denne videre i beregning av energilinje. Bruk av avlest fart direkte inn i energilinjeberegninger gir mer ujevnheter i energilinjen, men fartsutviklingen ligger på den måten nærmere den reelle avleste farten. Parallelliteten i dette modellforsøket sammenlignet med parallelliteten i Brateng (2004) ligger derfor trolig godt nærme hverandre, tross den forskjellen som ligger i konstruksjonen og analysemetoden.

Energilinjen ved tap av energi over voll normalt på skredet er tydelig mer dominert av hastighetsbestemt friksjon enn sammenlignet med kjeglene. Dette kan skyldes realiteten eller

metodiske feil i analysen og beregningsmetode, som nevnt over og i kapittel 6.2. Effekt er likevel funnet for voll selv om betingelsen i likning [ 3.9 ] ikke er oppfylt.

### 9.2.2 Effekten av enkle rader

Effekten av kjebler er uttrykt som funksjon av utløpslengde, plassering, høyde, vinkel på kjeble og tetthet i kapittel 8.2.2. Når effekten er funksjon av utløpslengde forteller dette at kjebler plassert alene i front har liten effekt. Når kjeblene plasseres på rekke i front gir dette vel en dobling av effekten. Kjebler med  $B = 2H$  viser litt høyere effekt når de plasseres i plog sammenliknet med rekker. Kjebler med  $B = H$  på rekke og med høyde 2 cm sprer masse best, mens de rektangulære sprer bredere i plogform. Kjebler på rekke tar ut mest energi når massen passerer selve raden, trolig på grunn av jevn og god spredning av masse høyt oppe. Plogform fører til at fart bevares lengre ned i renna, men energi tapes raskt når massen spres lengre nede. Forskjellene er så små (maks 5%) at kjebler i rekke og plogmønster kan sies å yte generelt samme effekt på massen. Effekten ligger for 60K2 i 11° renne i en verdi av 40%. 60K2 på fundament gir en effekt på 44%, her inngår en økning i høyde på 1cm, mens 60K3 har effekt på 47%.

Effekten av kjebler med 60° helning viser en tydelig reduksjon av effekt når de plasseres lengre nede i renna, dette stemmer med Brateng (2004). Når helningen på kjeblene reduseres viser effekten konstant utvikling når raden plasseres lengre nede i renna. Vollene viser derimot en tydelig økning i effekt når de plasseres lengre nede renna. Disse tendensene stemmer med figur 5.4 hos Brateng (2004).

Det er tydelig at spredningsbredden avtar når tiltak plasseres lengre nede i renna. Forskjellen i spredningsbredde er 15-20 cm forskjell ved plassering av tiltak fra 1,37m til 1,8m. Når vinkelen på tiltaket øker holder spredningsbredden seg konstant. Det er kun ved bruk av K2 ved 1,37m at spredningsbredden øker raskt når vinkelen øker fra 45° til 60°. Dette har sannsynligvis noe med graden av uorden som skapes på grunn av tettheten og mengden overflateareal på kjeblene. Når tiltaket plasseres langt oppe i renna vil effekten derfor nødvendigvis øke fordi spredningsbredden øker.

Effekt som funksjon av høyde på tiltak viser at effekten øker med økning av høyde på tiltak. Stigningen av effekt er større per høydeøkning for voller enn for kjebler, og stigningen av effekt er større per høydeøkning med økende vinkel på kjeblen. Dette betyr at voller som har stor høyde og plasseres langt nede i renna har et stort potensial for å fange opp snøskred. Dette forutsetter da at bevegelsen av snø er rolig og at massene ikke har energi til å bli kastet over.

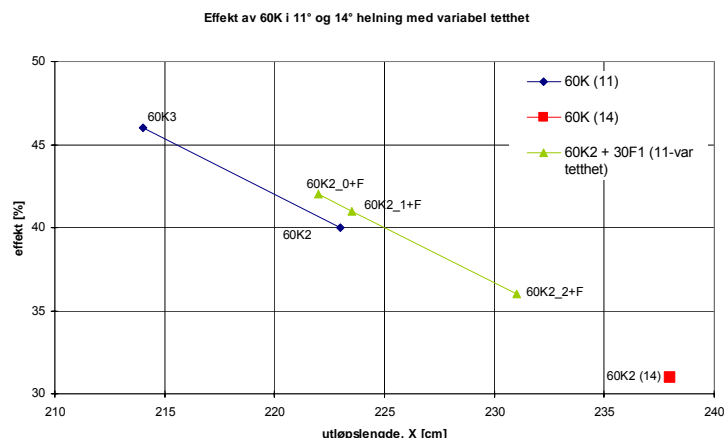
Effekten som funksjon av vinkel på tiltak sier at effekten øker med økt vinkel på tiltak. Denne økningen er større når tiltaket er kjeble og kjebleraden er plassert langt oppe i renna. Plassering av rad lengre ned i renna og økende vinkel gir mindre stigning av effekt. Effekten av voller øker også med økende vinkel, men effekten er uavhengig av plassering.

Effekt som funksjon av tetthet viser at effekten avtar med økt tetthet når tiltak er plassert høyt oppe i renna. Samtidig avtar effekten når tettheten blir for lav. Det ser ut til at tettheten av tiltak høyt opp i renna bør ligge mellom 0,7 og 0,8. Det er tidligere vist at voller gir best effekt når tiltak plasseres langt nede i renna.

Ved prosjektering av Nakkefonna ble det funnet at kjebler med 60° på fundament med ulik tetthet mellom hver enkelt kjeble har en effekt mellom 32 – 42%. Forskjellen i effekt for kjebler med 1cm og ingen avstand mellom kjeblene er kun 1%, og kan derfor ses bort ifra. Når avstanden øker til 2cm gir dette 6% lavere effekt. Betydelig mengde av energi blir likevel tatt ut, slik at økt avstand mellom enkeltkjeblene har samme betydning som å øke høyden på kjeblene med 1cm, se figur 9.1. Effekten av å sette bratte kjebler på et fundament med slak helning har lite å si for økt effekt. Dette gjør det imidlertid rimeligere å bygge tiltak for å heve den effektive delen av kjeblene ved hyppig skredaktivitet og mye snø i terrenget. Dette øker sjansen for at kjeblen ivaretar sin funksjon over tid. Effekten av sikringskombinasjonen i Nakkefonna ligger mellom effekten av tette kjebler med høyde 2



og 3cm uten fundament, på tross av at plasseringen i Nakkefonna ligger med første rad 8cm lengre nede i renna. Resultatene fra forsøkene i Nakkefonna er nærmere forklart i kapittel 10.2.3.



Figur 9.1 Sammenlikning av effekt for 60K med variabel tetthet

### 9.2.3 Effekt av flere rader og kastelengde

Når to rader med tiltak kombineres bør effekten også øke for at det skal være lønnsomt å bygge flere rader med sikringstiltak. I følge figur 5.5 i Brateng (2004) bør rader med kjegler plasseres så langt opp som mulig i terrenget for å ta ut mest mulig energi. Plasseringen av rader innbyrdes avhenger så av kastelengden over raden foran. Rad nummer to må være plassert slik at den kan fange opp massene som kastes over raden foran. I dette modellforsøket er det funnet at ved kombinasjon av to rekker med tiltak ligger effekten mellom 23 - 29%. Denne effekten betyr da andel utløpslengde som er innspart av total utløpslengde. Det betyr en effekt på maks 86% ved effekt i betydning andel innspart utløpslengde fra plasseringen til nedre tiltak. I tillegg til dette ble det funnet at effekten ved bruk av 60K2-137 kombinert med 60K2 eller 45K2 gav samme effekt, altså uavhengig av vinkel på rad 2. Dette var ikke tilfelle for bruk av 3 cm høye voller, der effekten økte med økt vinkel og høyde. Dette viser at kjeglene inntil en viss høyde oppnår en tilfredsstillende effekt, der helningen på rad 2 har liten betydning for andel økt effekt. Effekten med dimensjoner utover dette gir bare marginal økning av effekten. Forskjellen i effekt mellom 2- og 3 cm høye tiltak med samme vinkel er 6%.

Plassering av rad 1 i profil 1,37m og rad 2 i profil 1,8m gir gjennomgående kortest utløpslengde uavhengig av hvilke kombinasjoner med høyde og vinkel på tiltak som brukes. Mindre avstand mellom rekkene enn dette fører til at massen kastes over nedre rekke. Utløpet øker mer om rad 2 plasseres for nærme rad 1, sammenliknet med om rad 2 plasseres for langt ned. Når høyden på tiltakene øker utover 2 cm høyde reduseres effekten raskere når avstanden mellom rad 1 og rad 2 blir øker utover 0,4m. Kastelengden for masse over 60K ved 1,37m kan anslås til 0,4m, og dette holder seg tilnærmet konstant uavhengig av vinkel på tiltak. Kastelengden vil synke når tiltakene plasseres lengre ned i renna og terrenget. Kastehøyde kan anslås til ca 0,18m ved bruk av video. Kastelengde- og høyde for 45K ved 1,37 er observert til ca 0,45m i x- retning og 0,15 i y- retning 0,2m etter tiltak

Kastelengde kan finnes ved likning [ 9.3 ], og kastehøyden med likning [ 9.4 ]. I modellforsøkene har massen en fart på ca 2,9m/s rett foran tiltak 1,37m nede i renna.  $V_0$  er farten etter retningsendringen i massen på grunn av tiltak, og antas derfor lik 2,0m/s. Kastevinkel settes lik helningen på tiltakene. Dette gir en kastelengde for 60K ved 1,37m i 11° helning på renne lik 0,4m. Kastehøyden 0,2m etter tiltak blir da beregnet til 0,18m. Kastelengde- og høyde for 45K ved 1,37m ligger da med lengde på 0,5m og høyde på 0,14m 0,2m etter tiltak. Dette viser at kastelengde og kastehøyde av modellmasse over tiltak stemmer med teoretisk kastelengde. Bruken av dette og sammenstilling av resultat er vist i kapittel 10.2.3 for Nakkefonna.

$$S_x = (v_0 \cos \alpha) \cdot t \quad [9.3]$$

der

$\alpha$  = kastevinkel og helning til tiltak [ $^\circ$ ]

$v_0$  = skredets starthastighet over tiltak (etter retningsendring) [m/s]

$t$  = tiden kastet brukt [s]

$$S_y = (v_0 \sin \alpha) \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \quad [9.4]$$

#### 9.2.4 Forholdet til tidligere skisserte retningslinjer

Norem (1993) anbefaler at sikringssystemet bør ha stor utstrekning. I tillegg bør massene spres slik at friksjonen øker og flytehøyde og fart kan reduseres. Resultatene viser dette ved at flere rader med sikring gir bedre effekt og at spredning av masse tydelig gir økt effekt. Videre anbefaler Norem (1993) at 1-3 kjegler bør plasseres høyt og sentralt opp i skredløpet og 3 – 4 rader sjakkmonstret plassering av kjegler nedenfor, med høyde 4-8 meter. Avstand mellom hver kjegle bør være maks 10m. Lied og Kristensen (2003) anbefaler i likhet med Norem at rekkene med kjegler bør plasseres langt nede i skredbanen, der hastigheten og volumet av massen er minst mulig. Resultatene viser at ei enkel kjegle plassert høyt oppe gir svært dårlig effekt sammenlignet med en hel rekke. Det anbefales derfor at bruken av rekker benyttes høyere opp i terrenget der dette er mulig fremfor kjeglebruk lengre nede i skredløpet. I så fall bør kjeglene byttes ut med voller, de øker tydelig effekten jo lengre ned i skredløpet de plasseres. Effekten av kjegler avtar med økt plassering nedover i skredløpet.

Lied og Kristensen (2003) anbefaler at avstanden mellom to rekker bør være 25 – 30m, eller så stor at skredmassen ikke kastes over raden nedenfor. Resultatene viser både ved kasteformel og ved observasjon at dette blir en alt for kort avstand. Kastelengden høyt oppe i skredløpet er nærme 70 – 100m avhengig av farten. Videre skisserer Lied og Kristensen at høyden på kjeglen bør være 8 m, i tillegg til at helningen på kjeglen oppstrøms bør være 2:1. På sidene bør helningen være 1:1, og nedstrøms bør de være 1:1,5. Dette en helning på  $60^\circ$  i front, som stemmer med resultatene i forsøkene. Men resultatene anbefaler at denne stramme konstruksjonen bør videreføres på tverrsidene også, for å ivareta tettheten og innby til turbulens blant partiklene. Radene med kjegler forutsettes da å plasseres høyt oppe i skredløpet. Jo større høyden på tiltaket er, jo bedre effekt er det, men kjeglene ser ut til øker effekten inntil en høyde på ca. 6m. Høyde utover dette ser ut til å øke effekten kun marginalt. Vinningen av økt vinkel på kjeglen øker effekten mer fremfor økt høyde. Innenfor marginale rammebetingelser anbefales derfor bruk av bratt vinkel som første prioritet. McClung og Schaerer (1998) anbefaler en høyde på kjeglene på 5 til 6 m, utover dette øker ikke effekten stort. I tillegg bør toppen av kjeglen ha et område som er 2 m flatt og bredt. Resultatene i forsøket viser økt effekt, jo høyere kjeglen er bare det ikke overstiger tetthet 0,7 – 0,8.

Avstanden mellom hver kjegle bør i følge resultatene ikke overstige 4m, eller tetthet på 0,7 ved bruk av  $60^\circ$  kjegler, for å unngå for kraftig reduksjon i effekt. 10m avstand vil sannsynligvis ikke gi nok turbulens i massene ved passering høyt oppe i skredløpet. Lied og Kristensen (2003) anbefaler at avstanden mellom hver kjegle bør være lik bredden på vedlikeholdsmaskiner, ikke større. Dette stemmer med resultatenes anbefaling. McClung og Schaerer (1998) sier at kjeglene må stå plassert så tett som mulig, med nedre kant inntil nabokjegla. Dette vil være den beste løsningen om teorien, men i praktisk betydninger er dette vanskelig fordi konstruksjonene trenger vedlikehold. Tapet av bevegelsesenergi er summen av tapt hastighetshøyde, sammenpressing og turbulens.

### 9.2.5 Dimensjonering av sikring ut fra tapsfaktorer

Det totale energitapet i skredbevegelsen kan uttrykkes som i likning [ 3.6 ] og [ 3.7 ], der

$$h_t = \frac{f \cdot L}{d} \cdot \frac{v_0^2}{2g} + k_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + k_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + k_3 \cdot \frac{v_3^2}{2g} + \dots$$

Her er det totale energitapet summen av alle tap langs renna som gir reduksjon av energi. Energitalpene uttrykkes her gjennom friksjonstap i renna, tap av hastighetshøyde og tapene  $k_1, k_2, \dots, k_n$ . Friksjonstapet er avhengig av ruheten i renna og materialet. Renna er leddet og vil følgelig gi to ulike friksjonstap, øvre- og nedre friksjonstap, som uttrykkes gjennom  $f \cdot L/d = k_0$ . Knekkene i renna vil representere et energitap i form av retningsendring (svingtap) og endring ved at massen går fra kanalisering til åpen flate uten innspenning. Dette kan betegnes med tapsleddet  $k_1$ . Videre vil første kjeglerad representere neste tapsledd i likningen, betegnes som  $k_2$ . Tapsleddet i den andre raden med tiltak kan benevnes med  $k_3$ . Påfølgende tapsledd uttrykkes ettersom hvor mange steder det i tillegg tappes energi i skredløpet. Energitalpene i modellforsøkene kan uttrykkes ved at disse k- faktorene betegner effekten av sikringstiltakene. Effekten av tiltakene er da en funksjon av høyde, vinkel, tetthet og plassering av tiltaket. I tillegg til dette vil k- faktor for rad to inneha en virkning av spredningsbredden av massen ved passering av rad en. Summen av dette gjør det derfor mulig å finne det totale energitapet og dermed utløp ved ønsket kombinasjon av sikringstiltak, når dimensjonerende skred er beregnet. Ved å estimere resultatene som er presentert kan det være mulig å finne en beregningsmetode som finner energitap av ønskede sikringskombinasjoner. Parametere som høyde, vinkel, tetthet, plassering vil da være viktig inngangsdata. Dette kan deretter trolig være et uttrykk for andel indre uro i massen. Parametrene til kjeglene kan dermed ses i sammenheng med indre spenningsforhold og krefter i snøen. Den ytre påvirkningen av kjegler vil påføre en indre turbulens. Dette må brukes i sammenheng med beregningsmodellene som er presentert i kapittel 4, for å finne dimensjonerende skred. Fartsutviklingen langs skredbanen er i dette tilfellet veldig viktig input til sikringsberegningene. En beregningsgang i så tilfelle kan skisseres ved at Lied og Bakkehøis statistiske  $\alpha/\beta$  – modell brukes til å finne dimensjonerende utløpslengde. Deretter benytte NIS – modellen for å finne dimensjonerende fart i massene. Energitalpet kan deretter finnes ved estimerte tap ved ønsket sikringskombinasjoner.

Snømassen i natur vil ha andre egenskaper enn det modellsnøen viser, tross den likhet de viser i utløpslengde og oppførsel. Ulikheten gjelder først og fremst kohesjonen som opptrer i naturlige snømasser. Kohesjon danner spenningsforhold og glideplan som ikke er kommet frem i modellsnøen. Dette betyr at modellforsøkene trolig bør tilpasses denne egenskapen, på grunn av kileoppbyggingen som ofte dannes når natursnøen treffer tiltak. Kohesjon inngår i bergningsmodeller for å finne dimensjonerende fart, men dette vil sannsynligvis påvirke effekten som kjegle og voll yter. I tillegg til høyde, vinkel, tetthet og plassering vil kohesjon eller et samlet frisjonsstall trolig være riktig å ta hensyn til ved dimensjonering av sikring i skissert beregningsgang over.

## 9.3 Rette og buede voller

Fangvollen er plassert normalt på skredet. Her er tettheten konstant lik 1 og effekten vil følgelig være en funksjon av plassering, høyde og vinkel på vollen. For ledevoller er oppgaven å lede skredet bort fra området som trues av snømasser, det vil si å gi en retningsendring av massene. Effekten av voller varierer som funksjon av vinkel og høyde på tiltak, avbøyningsvinkel i planet og plassering av vollen.

### 9.3.1 Energilinje

Energilinen til voller plassert normalt på skredet er dominert av hastighetsbestemt friksjon. Dette viser at hastighetsenergien blir raskt tatt ut av massen, og helning på energilinen er følgelig ikke parallell med UT. Effekten av vollen er likevel brukt i analysen.

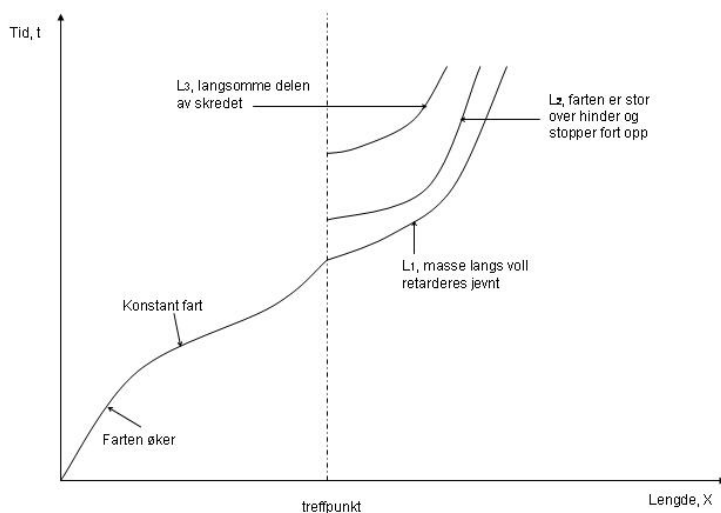
Energilinen til rette og buede ledevoller deles opp i energiliner langs- og over vollen. For rette voller

er tapet av hastighetshøyde langs voll dominert av hastighetsbetinget friksjon. Dette skyldes trolig hvordan fronten av skredet møter vollen der massen vil ha stor hastighet når den treffer voll, men raskt avta når massen har endret retning. Ses det kun på utviklingen av hastighetshøyde når massen går langs voll ligger energilinjen parallelt med UT. Samtidig vil strømmen av masse langs vollen være konsentrert og dermed være dominert av den hastighetsbetingede friksjonen. Hastighetshøyde til massene som krysser vollaksen er preget av god bevaring av fart nedover renna, men som brått stopper opp. Dette kommer sannsynligvis av kontinuerlig tilførsel av masse over vollen, og dermed holdes farten ved like uten at massen mister fart. Når avbøyningsvinkelen er liten ligger energilinjen mer parallelt med UT, men når den øker blir farten raskere redusert. For buede voller følger energilinjen for massen som ledes langs vollen samme utvikling som for rette voller. Energilinjen for massen som går over vollen viser også samme tendens som energilinjen for rette ledevoller der fasene av masse over vollen er delt opp. Når fasen ikke er delt opp, fører dette til at bevegelen disse massene har gir et tydelig vent på bakre masser som gir er reduksjon av fart inntil ny front tar igjen den raske frontmassen. Det fører til at energilinjen gir uttrykk for rask nedbremsing av massen. Ved å se bort fra denne mest sannsynlige feilkilden viser det seg at energilinjene for både rette og buede ledevoller har er likt hastighetsbilde og en lik endring i hastighetshøyde.

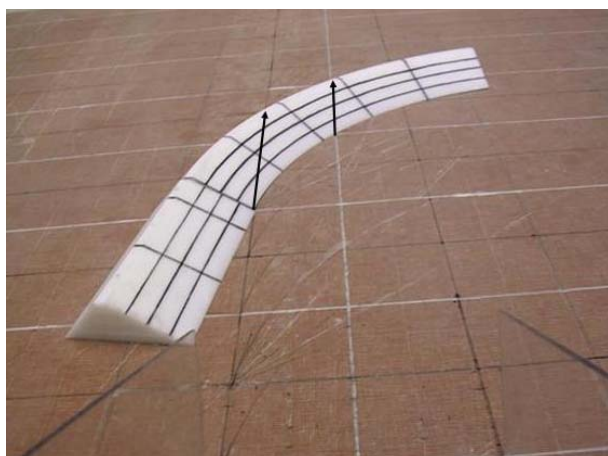
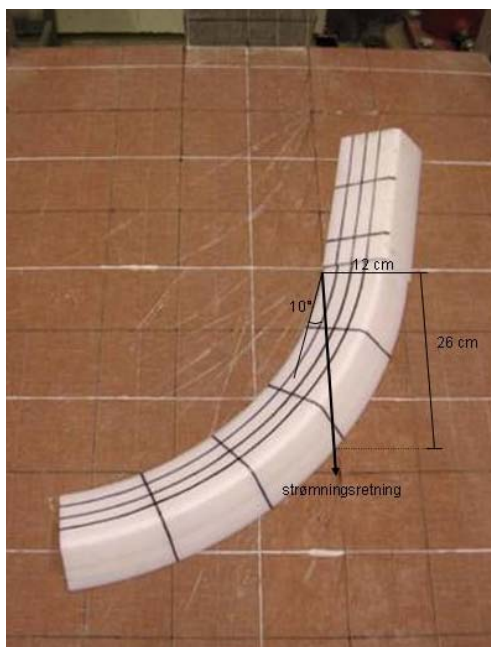
### 9.3.2 Ledeevne

Voller har økt ledesevne når vinkelen og høyden øker på vollen. Styringen av massen er størst når avbøyningsvinkelen er liten. Økt avbøyningsvinkel fører til at økt andel masse krysser vollen. Dette igjen fører til at spredningsbredden blir større inntil avbøyningsvinkelen blir 90°. Økt vinkel på vollveggen viser igjen den beste spredningsevnen. Spredningen av masse er større jo lengre oppe i skredløpet vollen plasseres. For buede voller gjelder også at økt høyde og vinkel på vollen øker ledesevnen. Massen går også her lettere over vollen jo lengre oppe i renna de plasseres. Spredningsevnen er bedre for buede voller når den plasseres lengre oppe i renna og øker ytterligere med økt vinkel og høyde på voll. Spredningsevnen til buet voll er generelt litt bedre enn for rette voller. Den buede vollen viser en evne til å redusere mengde masse over voll på 20-25 g/cm. Mengden reduseres altså når vollen plasseres lengre ned. Bredden av avsatt masse øker når vinkelen øker på vollen, og tykkelsen av avsatt masse avtar med økende vinkel på vollen. Dette viser at både rette og buede voller viser de samme tendenser for økt evnen til å lede masse.

Grunne til at de buede vollene viser dårligere virkning på snøen enn det de rette ledevollene gjør, skyldes trolig den reelle vinkelen som de buede vollene opererer med når snømassen treffer vollen. Ved å se i et tverrsnitt av vollen i det punktet treffer massen kan en se at reell vinkel er mindre enn vinkelen på vollen er når massen treffer normalt på vallsiden. For 30BV4 er den reelle vinkelen trolig bare 12°, ikke 30° som vollveggen representerer, i referansepunktet  $X_{ref}$ . Deretter øker den reelle vinkelen inntil vollen står normalt på skredretning. Dette er trolig forklaringen på den negative effekten de buede vollene gir snømassen i modellforsøket. I noen grad skyldes denne virkningen kanalisering av masse, men også reell vinkel i treffpunkt bør tas med i vurdering av vollhøyde, fordi det nå er kjent at effekten av vollen øker med økt høyde, vinkel og plassering i skredløpet. Dette er vist i figur 9.3 og figur 9.2.



**Figur 9.2** Buett voll leder masser i ulike faser



**Figur 9.3** Strømning av masse over 30BV4. Den reelle vinkel på vollen er avhengig av plassering i renne.

### 9.3.3 Effekt

#### Fangvoll:

Effekten er vurdert for både fangvoll og rette og buede ledevoller. For fangvoller plassert normalt på skredretning er effekten en funksjon for høyde, plassering og helning på vollvegg. Dette viser at effekten av voller øker med økt plassering nedover i skredløpet. Samtidig øker effekten med økt høyde og brattere vinkel på vollsiden. Dette betyr entydig at vollen viser mest nytte når den plasseres så nærme vegen som mulig, med en høyde og stor vinkel som er innefor rimelighetens grenser i utførelsen av konstruksjonen. Kombinert med kjebler viser vollen svært gode egenskaper. Da tar kjeblene ut store mengder kinetisk energi, slik at vollen fungerer som en snøfanger i stedet for en konstruksjon som skal jobbe og skape uordne i massen. Kombinasjonene fører også til at kjebleraden sprer massen godt og flyte høyde og fart reduseres slik at vollen kun skal fange opp masse.

#### Ledevoller:

Utløpslengden og dermed effekten av ledevoller varierer som funksjon av vinkel og høyde på tiltak, avbøyningsvinkel i planet og plassering av vollen. Utløpslengden av masse som ledes langs vollen øker når vollen plasseres lengre nede i renna. Utløpslengden av massen som ledes av buede voller øker lineært med økende plassering nedover i renna, der forholdet utløpslengde og plassering har stigning på 1:1. Når avbøyningsvinkelen ( $\alpha$ ) øker blir utløpslengde langs voll redusert. Ved svært liten  $\alpha$  øker utløpslengde til og med utover maksimalt dimensjonerende utløpslengde. Utløpslengde av masse som krysser vollaksen holder seg stabil når  $\alpha$  øker utover  $30^\circ$ . For de buede vollene gjelder det at massen som krysser vollaksen har en utløpslengden som holder seg tilnærmet konstant når plasseringen av vollen øker nedover i renna. De rette og buede vollen ser ut til å ha samme tendenser for utløpslengde av masse over voll. Spesielt er det for buede voller med  $30^\circ$  helning. Massen over vollen gir tydelig lengre utløp enn dimensjonerende utløpslengde. Dette skyldes trolig delvis kanalisering av massen ved øvre del av vollen. I tillegg er den reelle vinkelen på vollen mindre enn  $30^\circ$ .

Effekten er et mål ut fra maksimal utløpslengde uavhengig av om massen ledes eller krysser vollen. Effekt som funksjon av  $\alpha$  viser at 90RV3 og 60RV4 er de mest effektive vollene. Forskjellen i effekt for de ulike type vollene øker med økende  $\alpha$ .

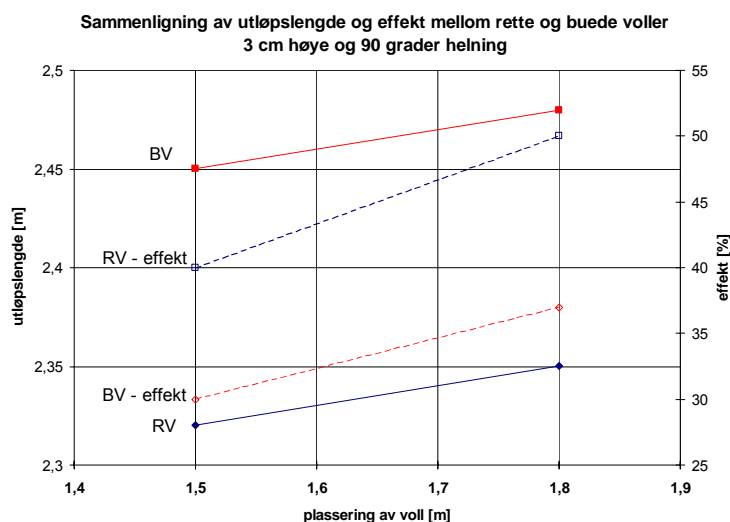
Effekt som funksjon av høyde på vollen viser at effekten øker med økende høyde. Økningen av effekt er større når  $\alpha$  er liten, bortsett fra plasseringen av fangvoll, normalt på. For buede voller er denne trenden veldig tydelig for 90BV. Når helningen på vollen reduseres har vollen en optimalisering av høyde. Effekten er størst når høyden er 3cm. Deretter synker effekten når høyden øker. 30BV viser blandede trender med økt høyde. Generelt kan det sies at effekten også øker med økt høyde på voll.

Effekt som funksjon av plasseringen av vollen viser en liten tendens til økt effekt med plassering lengre nede i renna. Dette gjelder både rette og buede voller.

Effekt som funksjon av helning på vollvegg viser at økende helning på veggen gir økt effekt. Dette er entydige trender for buede voller også, og spesielt tydelig for BV4. Utover dette viser økt helning størst økning med økning fra  $30^\circ$  til  $60^\circ$  for buede voller. Unntaket er for rette voller når vinkelen på vollvegg er stor og kombinert med liten  $\alpha$ , som gir kanalisert løp og dermed lengre utløp.

Generelt ser det ut til at effekten øker med økt vinkel på voll, økt høyde på voll og når plasseringen av vollen øker nedover i renna både for buede og rette voller. Tallforhold mellom de ulike utformingene av voller er vist under.

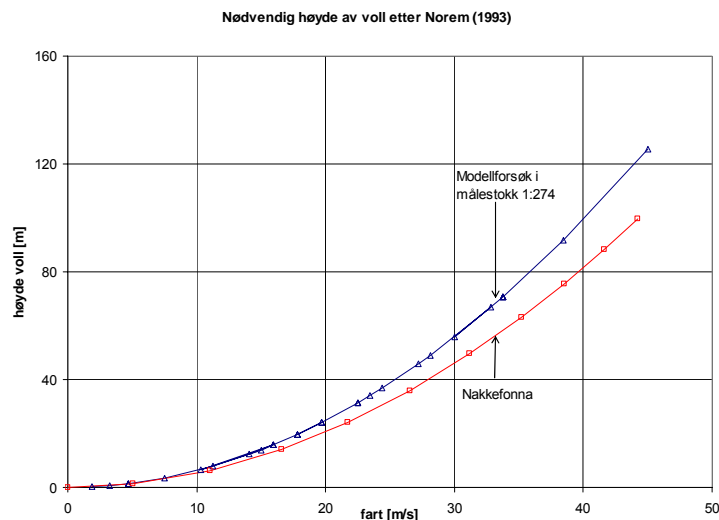
For å skissere forholdet mellom rette og buede voller er utløpslengden sammenlignet for  $90^\circ$  voller plassert både ved 1,5m og 1,8m i figur 9.4. Dette viser at effekten øker med økende plassering av vollen nedover i renna i en størrelsesorden på 10%. I tillegg til dette øker utløpslengden av massen 2-3 cm når plasseringen øker fra 1,5 til 1,8m nede i renna. Forholdet mellom rette og buede voller er konstant. Dette viser at rette voller er mer effektive enn buede voller i forhold til utløpslengde. Spredningen av massen er derimot litt større ved bruk av buede voller sammenlignet med rette voller.



**Figur 9.4 Sammenstilling av utløpslengde og effekt mellom rette og buede voller**

#### 9.3.4 Forhold til tidligere skisserte retningslinjer

Virkingen av fangvoller avhenger av høyden og vinkelen på vollveggen, snøens egenskaper og snøens og terrengets parametere. Høyden på voller med steile sider kan her reduseres noe sammenlignet med voller med mindre vinkler. Bratt vollside er mer effektivt i følge Norem (2003). Nødvendig vollhøyde blir funnet ut fra beregnet hastighetshøyde i likning [ 5.1 ]. Når  $k$  settes lik 1 gir dette for modellforsøket overført i målestokk 1: 274, som er tilpasset Nakkefonna, en høyde på voll nødvendige 50cm ved profil 1,37m nede i renna og nødvendige 130m i naturen. De samme bergningene gjort for 1,8m nede i renna viser et behov for 26cm i modell og 70m i natur. Farten i tilfellene er lik henholdsvis 3m/s og 2,25 m/s i framkant voll. Farten må ned på 3 m/s i naturen eller 0,22 m/s i modellen for å kunne sikre vegen med kun en voll på 2,5cm eller 6,5 m i naturen. Høyde av snø i terrenget er ikke medregnet her. Erfaringsvis blir det i Norem (2003) sagt at fangvoller bare er effektive hvis skredhastigheten i fronten av vollen er mindre enn 20 m/s. Det betyr ut fra beregningen og grafen under at vollen må være 20m høy for å stoppe skredet i Nakkefonna uten at masse skal kastes over. Forholdet er vist for høyde voll for oppskalert modellforsøk og beregnede data for Nakkefonna i figur 9.5.

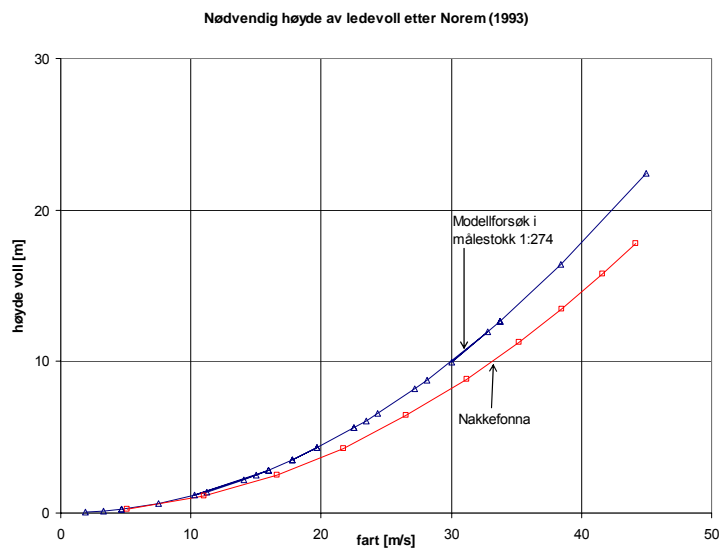


**Figur 9.5 nødvendig høyde av fangvoll etter Norem (1993)**

Lied og Kristensen (2003) anbefaler en vollhøyde ut fra likning [ 5.2 ] som inneholder det samme som Norem (2003), når det medregnes tørrsnø. De beregnede høydene for vollen stemmer bra med resultatene funnet i modellforsøkene for fangvollen, men vollen bør da ha en vinkel på vollsiden større enn  $30^\circ$  ut fra modellforsøket, Hákonardóttir (2004) og Brateng (2004). Voller anbefales uansett å kombineres med kjepler for å virke mer effektivt. Dette stemmer godt med erfaringer i natur og modell.

Ledevollen skal gi retningsendring av masse, ikke nødvendigvis stoppe det. Erfaringsvis har buede voller vist dårlige sikringsevne i naturen, noe som også er funnet i disse modellforsøkene. Likning [ 5.3 ] i Norem (1993) og likning [ 5.4 ] i Lied og Kristensen (2003) finner høyden av ledevoller. Dette viser at høyden på ledevoll i Nakkefonna må være 20m ved en fart på 45m/s. når farten er redusert til 20m/s kan høyden på vollen være 4,5m. Modellforsøket overført i målestokk 1:274 viser tilnærmet de samme resultat. Likningene bruk for modellen viser at voll plassert ved 1,37m med fart 3m/s gir en høyde på 8cm. Tilsvarende for plassering av voll ved 1,8mm og fart 2,25m/s gir en høyde på voll på 4,5cm. Plasseringen av vollen må være 2m nede i renna og fart 1,9m/s for å tilsvare en høyde på voll lik 3cm. Dette er vist i figur 9.6. Resultatene i modellforsøket ligger litt over dette, slik at likningen ikke vil være tilfredsstillende for sikring etter erfaringer gjort i modellforsøket. Høydene på vollene bør være større enn skissert her. Vinkelen når skredet treffer vollsiden er her satt til  $25^\circ$ .





Figur 9.6 nødvendig høyde på ledevoll etter Norem(1993).  $\alpha$  er  $25^\circ$ .

Lied og Kristensen (2003) anbefaler at plasseringen av vollene må gi minst mulig retningsendring for skredet. Samtidig vil voller med brattere sider ha større ledeeffekt enn slake. Dette vil overført til modellforsøkene tilsi at de rette vollene vil være mer effektive, fordi disse innbyr til mindre retningsendring. De rette vollene viste mindre spredning og kortere utløpslengde enn de buede. Samtidig stemmer det at brattere sider på vollen gir økt effektivitet og ledeevne.





**Kart 10.2 Dimensjonerende skred i Nakkefonna**

I dag er området sikret med 3 rekker kjepler, over en avstand på nesten 200 meter. Rekkene står helt inntil hverandre, der nedre rekke er plassert omtrent 20 meter fra vegskulder og øvre rekke 70 meter fra vegskulder. Til sammen er det 29 kjepler i dette området. 130 meter ovenfor vegen er det plassert en enkel kjeple for å beskytte en høyspentmast. Høyspentlinja som krysser skredområdet forsyner næringslivet i området med strøm. Området er vist i figur 10.1.



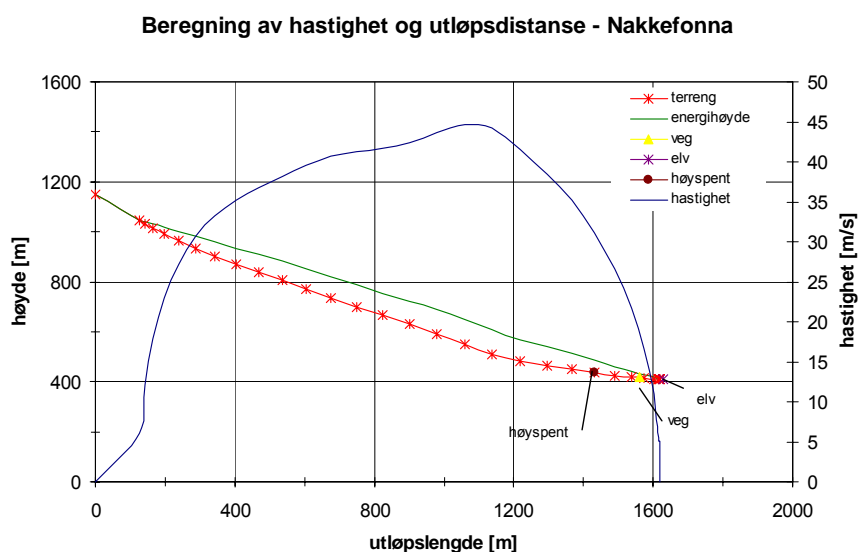
Figur 10.1 Skredområdet Nakkefonna

### 10.1.2 Dimensjonerende utløpslengde og hastighet

For å beregne dimensjonerende utløpslengde og hastighet til skredet er det benyttet to typer beregningsmodeller. Den topografiske modellen som er omtalt i kapittel 4.2.1 - Lied og Bakkehøis statistiske  $\alpha/\beta$  – modell, er brukt for å finne den dimensjonerende utløpslengden. Den dynamiske beregningsmodellen til Norem, Irgens og Schieldrop (1987) i kapittel 4.1.4 er brukt til å finne dimensjonerende hastighet i skredet.

Vegen ligger ved  $X = 1560$  og høyspenten ligger i  $X = 1420$ . Norem (2005b) har funnet at dimensjonerende utløpslengde  $X = 1620$ . Skredet vil derfor krysse vegen med  $60$  m. Elva ligger ved  $X = 1630$ . Flytehyden i skredet er  $1,5$  m. Dette er fremstilt i figur 10.2.

Massene fra beregningen ser ut til å akselerere helt ned til knekken i terrenget,  $X = 1200$ . Maksimal hastighet tyder på vil oppstå ved  $X$  lik  $1060$ m. Da har massen en fart på  $45$  m/s. Når massen passerer høyspentlinja har den en hastighet på ca  $31$  m/s og ved passering vegen ligger hastigheten på ca  $17$  m/s. Energilinja for skredet har en friksjonsvinkel på  $0,43$  eller  $24^\circ$ .



Figur 10.2 Utløpslengde, hastighet og hastighetshøyde for dimensjonerende skred i Nakkefonna, etter Norem 2005b

## 10.2 Sikring av området med terrengtiltak

### 10.2.1 Vurdering av området

Det er under befarung vurdert hvilke muligheter det er for å plassere terrengtiltak i området Nakkefonna. I første omgang ble det fokusert på at området med dens terrengform var godt egnet til bruk av kjebler der massene bremses opp. Bygging av ledevoller trenger mer masse og de tenderer til lengre utløpslengder. Bremsing av massene så ut til å være den beste løsningen. Ledning av masser ut til sidene var i så fall kun aktuelt på nordsiden, men på grunn av eksisterende veglinjen var dette ikke interessant. Flytting av veglinje er vurdert samtidig med dimensjoneringen av sikringstiltakene.

Befaring i terrenget avklarte hvilke deler av området som var best egnet for plassering av terrengtiltak. Terrengprofilen har en knekk og endring av terrengformasjon ved  $X = 1200$ . Her går terrenget fra å være en et trangt bekkeløp til å bli et åpent terreng med jevn helning mot vegen. Hastigheten i dette punktet ligger på ca 42 m/s. Se dette i figur 10.2. Figur 10.3 viser bilde av dette punktet.



**Figur 10.3 Nedre del av terrenget i Nakkefonna. Bildet er tatt i  $X=1200$**

Rader med kjebler bør plasseres så høyt opp som mulig, når dette er anleggsteknisk gjennomførbart. Kastelengden av masse over første rad med tiltak er begrensningen for hvor høyt opp den andre raden med tiltak kan plasseres. I dette tilfellet var det også viktig å verne høyspentlinjen ved  $X = 1420$ . Det er ikke ønskelig å flytte høyspentlinjen. Nedenfor høyspentlinjen er det et rom på 100 m som massene kan jobbe på inntil vollen. Nederst i området, inntil vegen, er det ønske om å sette opp en voll som sikring mot ras utover dimensjonert størrelse og ved økt hyppighet av ras og dermed økt sikkerhet for trafikantene. Området nedenfor bekkeløpet antas som fritt for omforming, for best effekt av terrengtiltakene.

### 10.2.2 Valget av sikringstiltak

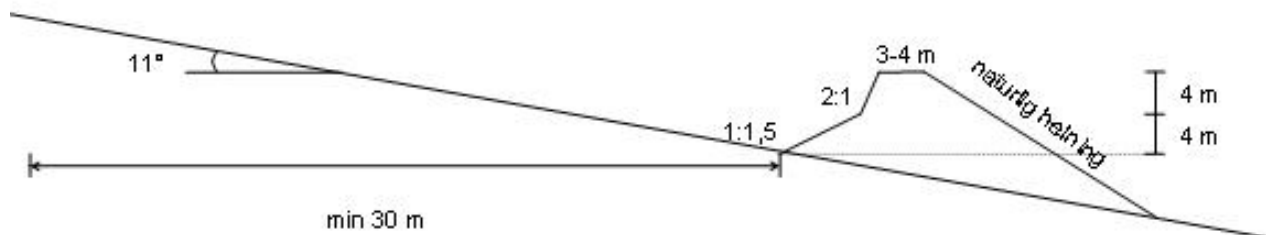
Valget av type sikringstiltak er 2 rekker med kjebler og en voll nede ved vegen. Dette har begrunnelse i resultatene i kapittel 8, analysen i kapittel 1, lokale tilpasninger på stedet, kostnadene og den anleggstekniske gjennomførbarheten..

Øverste rad med kjebler er valgt plassert ved  $X = 1250$ . 30 meter ovenfor dette punktet, til  $X = 1220$ , er planlagt brukt til masseuttak til anlegget. Uttaket er også nødvendig for å åpne en innsnevring i knekken slik at unødvendig kanalisering av masse unngås. Dette er vist i figur 10.4.

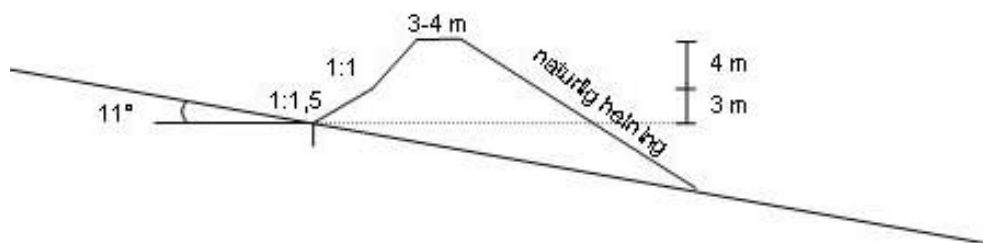


**Figur 10.4** Bergmassen til venstre i bildet settes av til masse under bygging. Bildet er tatt fra fot øvre kjeblerad

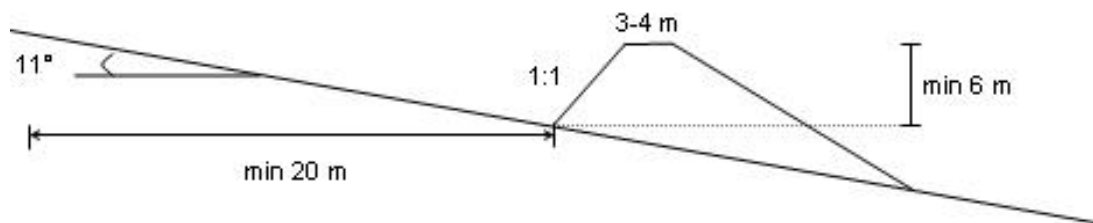
Fra figur 10.5 til figur 10.9, samt kart 10.3 er anbefalt sikring av Nakkefonna skissert. Snittene av de to rekkene med kjebler er skissert i figur 10.5, figur 10.6 og figur 10.7. Hele tverrsnittet av de to rekkene med kjebler er skissert i figur 10.8 og figur 10.9. Oversiktskart med plassering av tiltakene er skissert kart 10.3.



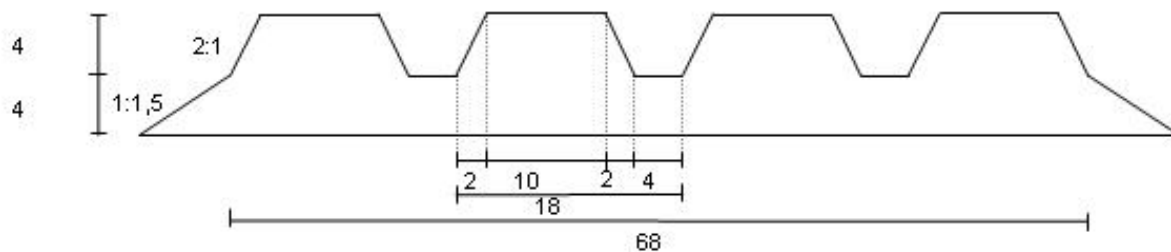
Figur 10.5 snitt rad 1 ved X = 1250



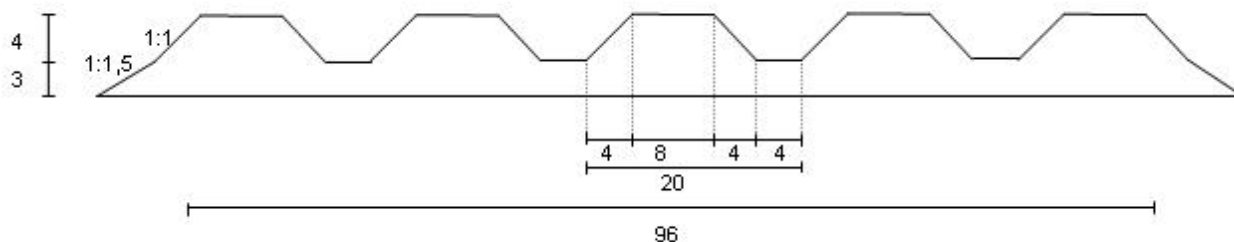
Figur 10.6 snitt rad 2 ved X = 1340



Figur 10.7 snitt voll ved X = 1520



Figur 10.8 tverrsnitt av alle 4 kjeplene ved X = 1250



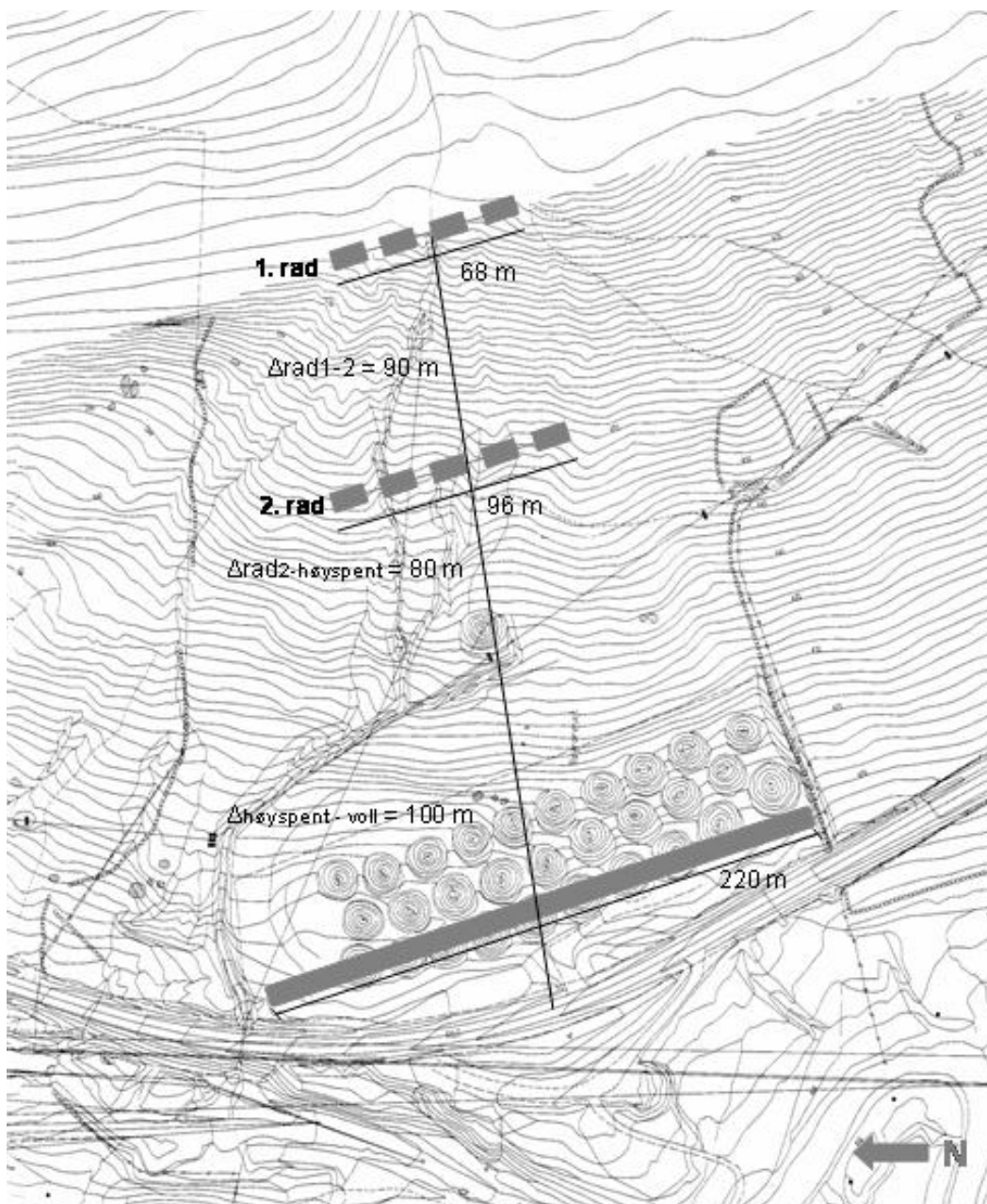
**Figur 10.9** tverrsnitt av alle 5 kjeglene ved  $X = 1340$

Øverste rekke (rad 1) bør holde en stram geometri, fordi det er denne rekka som skal ta ut mesteparten av energien. Rad 2 kan ha en mindre helning normalt på skredet, fordi denne rekka tar ut mindre energi på grunn av lavere hastighet i massene. Både rad 1 og rad 2 står på et fundament som er henholdsvis 3m og 4m høyt. I disse høydene inngår setninger av massen. 1:1,5 er en enkel og rimelig helning å bygge med jordmasser. 1:1 er også en forholdsvis enkel og rimelig helning. 2:1 er derimot mer komplisert og kostbar å bygge, fordi disse må tørrmures. Fundamentet i bunn av rad 1 og rad 2 hever kjeglene på topp. På den måten gjøres besparelser i anlegget ved at høyden nederst i radene bygges rimeligere. De nederste 2-3 meterne i rekkene er ofte tildekket av snømasser når skredene kommer. Disse vil derfor likevel ikke gi noen tydelig effekt. Kjeglene bygges med en lengde på topp på henholdsvis 8 og 10 meter. Bygging av kvadratiske kjegler krever mange tverrvegger. Det er derfor valgt å bygge rektangulære kjegler, som også kommer godt ut i modellforsøkene. De rektangulære kjeglene er i tillegg rimeligere og enklere både ved bygging og ved vedlikehold. Helningen på kjeglens tverrside er den samme som helningen på kjeglens frontside.

Kastelengden over første rad er dimensjonert til 90m. Det betyr at den andre raden med kjegler bør plasseres i  $X = 1340$ . Dette er 90 m nedenfor første rad og 80 m ovenfor høyspentlinja, langs senterlinje skred. Alle radene med sikring bør følge geometrien som er foreslått i figurene under.

Masseflyttingen i prosjektet er vurdert slik at massene i eksisterende kjegler skal brukes i den planlagte vollen. Eventuelle masser som samles for å tilstrebe helning på  $11^\circ$  i forkant voll brukes i voll. Ved overskuddmasser brukes disse til å øke høyden av vollen utover det som er prosjektert. Massene som sprenges i profil 1220 til profil 1250 brukes i de to radene med kjegler. Eventuelle behov for masser hentes ved utjevning av skredbanen mellom kjegleradene og ovenfor første rad.





Kart 10.3 Oversikt over plasseringen av sikringstiltakene

### 10.2.3 Bruk av resultater fra modellforsøk til sikring av Nakkefonna

Data fra befaringen ble brukt som grunnlag til å utføre nye modellforsøk. Forsøkene ble skalert slik at resultatene kan settes rett inn i de virkelige forholdene i Nakkefonna ved bruk av modeller.

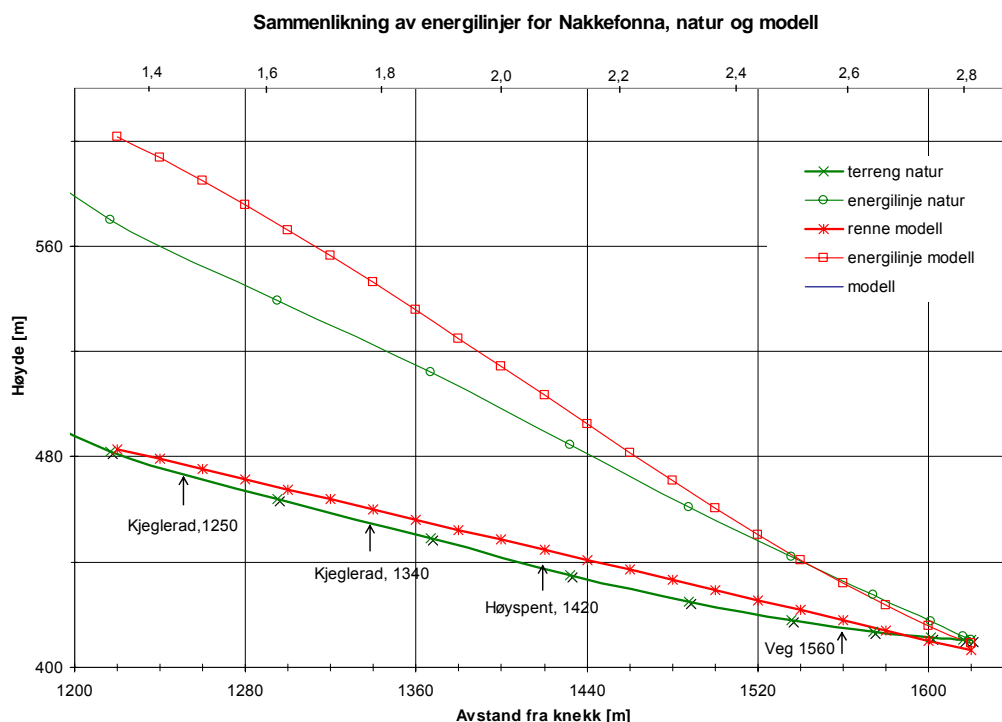
I kapittel 5.4 ble teorien bak modellovene omtalt. For masser med hurtige massebevegelser blir det dimensjonløse Froudes tall ofte benyttet. Forholdet i dette tallet er da avgjørende for sammenhengen mellom målestokkene for lengde og hastighet. Froudes tall i modell bør være det samme som Froudes tall i natur,  $Fr_{\text{natur}} = Fr_{\text{modell}}$ . Forholdene mellom modell og natur er vist i tabell 10.1.

Tabell 10.1 Forholdet mellom natur og modell i Nakkefonna

	Symbol	Benevning	Natur	Modell	Ønsket forhold	Endelig forhold	Kommentar
Skredhastighet	v	m/s	45	3,1	1:15	1:15	
Flytehode	h	m	1,5	0,0065	1:274	1: 231	85% oppfylt
Froudes tall	Fr	-	11,7	12,3	1:1	0,95	95% oppfylt
Helning energilinje	$\varphi$	- / °	0,43/23	0,53/28	1:1	0,81	81% oppfylt

$Fr = v/\sqrt{(gh)}$ , der h er skredet flytehode og v er hastigheten i skredet. I naturen settes altså hastigheten til 45 m/s og flytehodet lik 1,5 m. I modellen er hastigheten 3,1 m/s og flytehodet lik 0,0065 m.  $Fr_{modell}$  er da 12,3, mens  $Fr_{natur}$  er 11,7. Froudetallene er relativt like.

Egenskapene til materialet i skredet og ruheten langs bakken har betydning for hvordan hastighetshøyden avtar i skredmassene med utløpslengden. Energilinjen for både modell og natur er vist i figur 10.10. Energilinjen i naturen har en helning på 0,43, eller 23°. Modellen har en energilinje med helning på 0,53, eller 28°. Forskjellen i helning skyldes at ruheten i modellen har vært for stor for å sammenligne med naturen. Større helning på energilinja betyr at massene bremses raskere ned i modellen sammenlignet med hva som er naturlig i Nakkefonna. Forskjellen i hastighetshøyde ved X = 1220 er 88m i naturen og 119m i modellen, se figur 10.10. Når energilinjene er sammenfallende i området der sikringstiltakene skal plasseres, er resultatene fra modellen mulig å overføre til naturen. Tross forskjellen i energilinjene, er overføringen av resultater forsøkt.



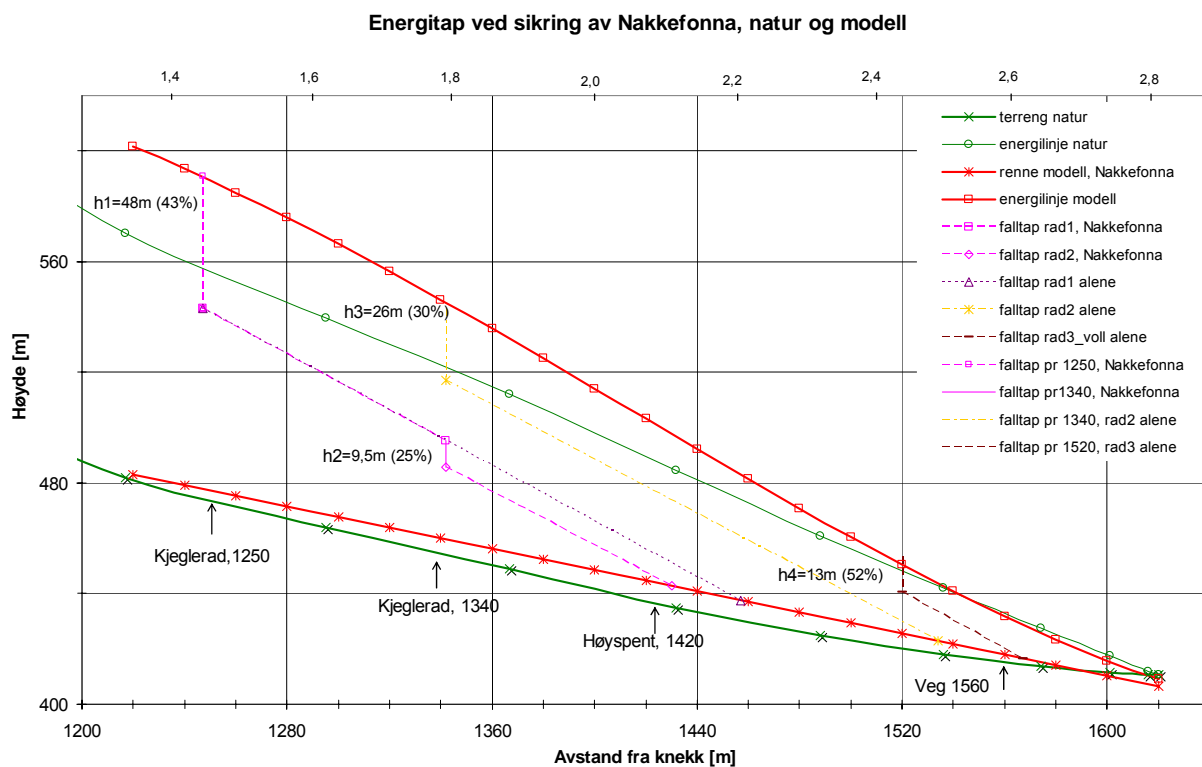
Figur 10.10 Sammenlikning av energilinje for natur og modell, størrelsesforhold mellom modell og natur er skissert på x - aksene

Maksimal utløpslengde i modellen er 2,81m og 1620m i naturen. Modellforsøkene og dimensjonerende skred i Nakkefonna opererer dermed i en målestokk 1:274 (da tas det hensyn til 30 m rom med masseflytting i front av øvre kjeglerad).

Forskjellen i effekten mellom 60K og 45K er veldig liten i den andre raden. Det er derfor store besparelser i kostnadene ved å bygge 45K i den andre raden. Effekten av ulike høyder må også ses i forhold til kostnadene. Her er det en effekt på mellom 5 – 10% å hente.

Det er prosjektert med 8m høye kjegler i første rad. 4m fundament og 4m kjegle, der 1m er beregnet til setning. Det vil si et 7m høyt tiltak. I modellhøyde blir dette 2,6cm høye tiltak. I rad 2 er det prosjektert med 7m tiltak, 3m fundament og 4m kjegle. Dette vil si en modellhøyde på ca 2,2cm i rad 2. Vollen er prosjektert med minimum 6m høyde. Det vil si en modellhøyde på minimum 2cm. Disse høydene er litt lavere enn det som er brukt i modellforsøkene med hensyn til akkurat dette tilfellet. Effekten fra forsøkene vil derfor sannsynligvis være i overkant av det som kan bli tilfellet i naturen.

Ved å anta at energilinjene for sikringen av Nakkefonna ligger parallelt med energitap i dimensjonerende skred i renna kan falltapet av energi finnes langs utløpet når utløpslengde er kjent. Dette er illustrert i figur 10.11 for Nakkefonna. Utløpslengdene i modellforsøkene er overført til naturen i målestokk 1:274. 60K2 på fundament 1,45m nede i renna har en effekt på 43%, som gir et tap av energihøyde på 48m. Det er totalt en energihøyde på 112m mellom renne og modellskred uten tiltak ved profil 1,45m. 45K2 på fundament 1,8m nede i renna har en effekt på 30%. Dette gir et falltap på 26m. 45V3 plassert 2,45m nede i renna har en effekt på 52%. Dette gir et energitap på 13m. Når 60K2-145 og 45K2, begge på fundament, plasseres sammen yter de en effekt på 68%. Dette betyr energitap på 43% ved første rad og 25% tap ved passering av den andre raden. Dette gir henholdsvis 48m og 9,5m falltap. Denne kombinasjonen vil ved disse antagelsene gi en utløpslengde til høyspentlinja. Vollen vil derfor ikke være i funksjon. Sikring av kun vollen vil derimot føre til at skredet går over vegen. Sikring ved bruk av kun 45K2 på fundament vil gi et utløp til vegen. Utover disse beregningene er det viktig å ta hensyn til at det i naturen gjerne ligger snømasser som delvis eller helt dekker tiltakene. Samtidig er overføring av resultater fra modell til natur bestemt av modellover.



Figur 10.11 Energitap ved sikring av Nakkefonna

Kastelengde- og høyde, fartsprofil, energilinje og effekt er for modellforsøkene i Nakkefonna presentert i kapittel 8. Her viser resultatene at energilinja for sikringen har en større helning enn energilinjen for UT. Det vil gi et bilde av en større effekt enn det som er tilfelle i naturen. Forsøk med ulik tetthet på kjejlerekkene viser at effekten er den samme ved bruk av tette og mellomrom på 1cm. Ved bruk av rom på 2cm gikk effekten ned med 5%. I Nakkefonna er det bestemt å bruke mellomrom på 1,5cm, dvs. 4m, som gir vedlikeholdsmaskiner og maskiner under bygging arbeidsrom. Effekten sammenlignet med helt tette kjejlerekker må derfor regnes for å være litt lavere med 1,5cm mellomrom.

I tabell 10.2 vises en sammenstilling over resultat fra forsøk og teori for kastelengde av masse over tiltak. Kastelengden ved delforsøkene i Nakkefonna viser at 60K2 på fundament 1,45m nede i renna gir en kastelengde på 0,35m og en kastehøyde på 0,2m. Likning [ 9.3 ] og [ 9.4 ] med  $v_0$  justert til 1,8m/s viser en kastelengde på 0,32m og kastehøyde på 0,15m. 45K2 på fundament alene ved 1,8m gir en kastelengde på omtrent 0,3m og høyde på 0,1m fra video. Dette stemmer også med teorien, når  $v_0$  justert til 1,5m/s. Kombinasjonen med 60K2 og 45K2 på fundament gir en kastelengde over rad 2 på omtrent 0,1m.

Kastelengde i natur ved bruk av likning [ 9.3 ] og [ 9.4 ] ved 60K plassert i profil 1250 viser en kastelengde på 90m og høyde på kast på 50m. Det er da antatt en  $v_0$  på 30m/s. Bruk av 45K ved profil 1340 gir en kastelengde på 76m og høyde på 40m. Dette forutsetter en  $v_0$  på 25m/s. Farten som er antatt er ikke fart i front av tiltakene, men farten som massene kastes over tiltakene med. Massen vil foreta en retningsendring som reduserer farten i massen ved sammenstøtet. Ut fra disse resultatene og forutsetningene vil det være riktig å sette av 90m mellom rad 1 og rad 2 i Nakkefonna og 80m mellom rad 2 og høyspentlinjen. Sammenstillingen mellom modell og teori viser at modellforsøkene ligger generelt med litt høyere verdi enn teorien.

**Tabell 10.2 Sammenlikning av kastelengder over kjebler, forsøk og teori**

Type	vinkel og høyde	plassering [m]/ fart, $v_0$ [m/s]	kastelengde [m]	kastehøyde [m]
modell (video)	60K2+30F1	1,45	0,35	0,2
	45K2+30F1	1,8	0,3	0,1
	60K2+45K2+30F1	1,8	0,1	-
modell (teori)	60K2+30F1	1,45/1,8	0,32	0,15
	45K2+30F1	1,8/1,5	0,3	0,1
	60K2+45K2+30F1	1,8/1,0	0,11	-
natur (M=1:274)	60K2+30F1	1250	<b>96</b>	55
	45K2+30F1	1340	<b>83</b>	27
natur (teori)	60K2+30F1	1250	<b>90</b>	50
	45K2+30F1	1340/25	<b>76</b>	35

## 11 Konklusjon

Tradisjonelt i Norge er det vanlig å sikre veger mot snøskred med bremsekjegler, fangvoller og ledevoller. Bakgrunnen for hvordan dette gjøres er lite vurdert i litteraturen, og det har derfor vært nødvendig å øke bakgrunnsstoffet for å vite om bruk av terrengtiltak er samfunnsøkonomisk.

Det er utført to tidligere modellforsøk som grundig og systematisk har vurdert effekten av å sikre mot snøskred med terrengtiltak. Forsøkene er uavhengige, men bygger på de samme forutsetningene, og har konkludert med de samme trendene. Modellforsøket som er presentert i denne rapporten er en videreføring av dette, men med litt andre forutsetninger. Dette gjelder i hovedsak utforming av konstruksjonen. Alle modellforsøkene har tatt for seg en grundig analyse av bremsekjegler, mens dette modellforsøket også vektlegger effekten av voller.

Resultatene skisserer trender for hvordan kjegler og voller bør plasseres og utformes for å gi best mulig effekt. For å komme frem til dette er analysering av energitap i massen vektlagt. Den totale mengden energi er summen av kinetisk og potensiell energi. Andelen av kinetisk og potensiell energi vil variere sterkt av størrelsen på farten i massen. Hastighetshøyden kan derfor brukes som et mål på hvor stor andel bevegelsesenergi som er i massen. Helningen på en energilinje forteller hvor fort hastighetshøyden synker. Dette er et uttrykk for hvor fort massen bremses ned og stoppes. Balansen mellom uttak av energi som skyldes tørrfriksjon og hastighetsbetinget friksjon viser at dette har et tilnærmet konstant forhold, ved at energilinjene ligger parallelle. Dette gir at effekten av bremsetiltak kan finnes der det er energitap. Summen av alle energitapet langs skredløpet er lik den totale hastighetshøyden. Ved sikring mot skred med kjegler er hvert enkelt energitap i massen en funksjon av det generelle tapet mellom masse og terreng, samt plassering, høyde, vinkel og tetthet av kjeglene. Det samme gjelder for vollene, bortsett fra at tettheten er konstant lik 1. Dette er vist i følgende likning [ 3.7 ],

$$h_t = \frac{f \cdot L}{d} \cdot \frac{v_0^2}{2g} + k_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} + k_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + k_3 \cdot \frac{v_3^2}{2g} + \dots$$

Her er tapskoeffisientene,  $k_i$  et mål på effekten av hver rad med tiltak for å bremse snømassene.

De generelle trendene det er kommet frem til i forsøket er skissert i punktene under.

### Kjegler:

- i. Effekten av kjegler øker med plassering av kjeglerrekker så høyt som mulig i skredutløpet
- ii. Kjegler er mer effektive enn voll når de plasseres langt oppe i skredutløpet.
- iii. Effekten av kjegler øker med økt tetthet på kjeglerad, inntil en verdi på 0,7 -0,8. Økt tetthet utover dette fører til at effekten synker. Dette forutsetter plassering høyt oppe i utløpet.
- iv. Effekten av kjegler øker med økende vinkel på sidene. Jo strammere geometri i front, jo bedre effekt har de.
- v. Effekten av økt helning på tiltak øker mest for kjegler som er plassert høyt oppe i utløpet
- vi. Plassering av kjegler i rekke gir den beste spredningseffekten, der spredningen er størst jo lengre oppe i utløpet kjeglene plasseres
- vii. Plassering av kjegler i rekke sammenlignet med plassering av kjegler i plogform gir tilnærmet samme effekt. Rekken med kjegler sprer derimot massen bedre og vil derfor gi de beste forutsetningene for rad 2.
- viii. Effekten av kjegler med  $B = 2H$  gir generelt litt bedre effekt sammenlignet med  $B = H$ . Forskjellen er i størrelsesorden 3% for rekker med 2cm høyde. Forskjellen er større når kjeglene plasseres i plogform. En enkel kjegle i front for å spre massen har liten effekt. Brateng (2004) og Hákonardóttir (2004) mener høyden på hinderet bør være omtrent den samme som bredden,  $H/B=1$
- ix. Flere rader med kjegler øker den totale effekten. Dette avhenger av kastelengden. Den optimale plasseringen er plassering av rad 2 der massene lander etter kast over rad1. Det vil i modellforsøket si en plassering ved 1,8m. Jo høyere kjegler og brattere vinkel, jo bedre er effekten.

- x. Kastelengden avtar når tiltak plasseres lengre nedover i utløpet.
- xi. Når høyden og vinkelen på kjeplene øker, øker også vinkelen som massene kastes over tiltakene med.
- xii. Kastelengde over kjepler stemmer med den teoretiske kasteformelen.
- xiii. Kjepler øker effektiviteten med økende høyde, og spesielt når dette kombineres med økende vinkel på sidene, dvs mot 60°. Brateng (2004) og Hákonardóttir (2004) sier at effekten øker med økende høyde, men kun inntil en viss høyde, utover denne høyden er ikke gevinsten stor i form av høyere effektivitet. Hákonardóttir sier optimal høyde på kjeplene kan være inntil høyden er omtrent dobbel så stor som tykkelsen på strømmen. Dette kan skyldes at kanalisert renne ikke utnytter spredningseffekten.
- xiv. Effekten av å plassere kjepler med bratt sidehelning på et fundament med lavere sidehelning gir litt økt effekt, men ikke like mye øknings som om supplerende høyde av kjepler ble bygd i samme stramme sidehelning som øvrig del av kjeplen.
- xv. Effekten av 60K3, plassert 1,37m oppe i renne med 11° helning gir en effekt på 47%. Dette er den største effekten som er tatt ut av en kjeplerekke i dette modellforsøket.

#### Fangvoller:

- i. Effekten av voller øker med økt plassering nedover i skredløpet
- ii. Voller er mer effektive enn kjepler når de plasseres langt nede i skredutløpet
- iii. Effekten av voller øker med økt høyde
- iv. Effekten av voller øker med økt vinkel på vollveggen
- v. For å stoppe et skred fullstendig må høyden på tiltaket være like høy som hastighetshøyden i skredet.
- vi. Stigningen av effekt er større per høydeøkning for voller enn for kjepler, og stigningen av effekt er større per høydeøkning med økende vinkel på kjeplen.

#### Ledevoller:

- i. Effekten øker med økende høyde på vollen
- ii. Effekten øker med økende vinkel på vollveggen
- iii. Rette voller er mer effektive enn buede voller
- iv. Buede voller får en reell vinkel i treffpunkt med skredet som er mye mindre enn vinkel på vollen om skredet skulle treffe normalt på vollen
- v. Massene blir kanalisert av voller med liten avbøyningsvinkel, slik at maksimalt utløp øker utover dimensjonerende utløpslengde for skred uten tiltak. 15° avbøyningsvinkel fører til at all massen ledes langs vollaksen. Vinkel utover dette fører masse over voll
- vi. Utløpslengden til masse over voll holder seg konstant selv om avbøyningsvinkelen øker
- vii. Spredning av masse er størst når vollen plasseres langt oppe i utløpet
- viii. Utløpslengden øker med økende plassering av voll nedover i utløpet.
- ix. Klatrehøyden av masse langs vollakse holder seg tilnærmet konstant når voll plasseres 1,8m nede i renna. Plassering høyere opp gir et toppunkt langs aksene.
- x. For buede voller er det spesielt tydelig at bevegelsen av masse som ledes og går over vollen kan deles etter i rom og tid. Dette kan deles i 3 faser der masse langs voll starter først, deretter kastes en "stikker" med masse over voll med stor fart, og til slutt går de tunge og trege massene over voll. Dette er tydelig en del av kjernen i skredet. Tidsforløpet er minimalt, men observerbart.

Det går frem at effekten av kjepler øker med økt høyde og økt vinkel på sidene, plassering høyt oppe i utløpet og tetthet mellom 0,7 – 0,8. Effekten øker med økende antall rader kjepler inntil så fremt ikke massen kastes over. Voller har økende effekt når de plasseres langt nede i renna, økende høyde og brattere vinkel. De buede og rette ledevollene viser de samme trendene, men rette voller er mer effektive. Kombinasjon av kjepler høyt oppe og voll langt nede gir ut fra dette den beste løsningen og største effekten. Ut fra sammenligning med Brateng (2004) og Hákonardóttir (2004) tyder det på at spredning av masse har stor betydning for effekten av kjepler, i tillegg til at kanaliseringen av masse i tidligere modellforsøk muligens har gjemt trender som har kommet frem her. Dette gjelder spesielt forholdet med at effekten til kjepler bare økte inntil en viss høyde. Dette er ikke tilfelle i disse

forsøkene.

Ut fra de trendene som er skissert i disse forsøkene vil det være mulig å estimere ytterligere resultat. På den måten kan en komme frem til en metode for å beregne effekten av alle mulige kombinasjoner av terrengtiltak. Dette betyr at estimerte effekter som fungerer som k-faktorer kan brukes for dimensjonering av sikring i naturen. Dette er potensielt i videre arbeid med å finne effekten terrengtiltak yter på skredmassene.

Resultatene fra forsøkene er brukt direkte til sikring av Nakkefonna. Her er det et stort område å jobbe på. Den prosjekterte løsningen i kapittel 10 vil kunne stoppe skredet ved høyspentmasten, 140 m før vegen hvis alle forhold er optimale. Overføringen av resultat fra modell til natur er gjort ved bruk av Froudetallet og sammenligning av energilinje. Effekten ved hvert tiltak som gir tap i energilinen er tatt ut fra modellforsøkene.

## 12 Litteraturliste

**Aamodt T. (1980):** *Kompendium fag 34557 Hydraulikk grunnkurs*, Institutt for vassbygging, seksjon for Hydro-teknikk, Universitetet i Trondheim, Norges Tekniske Høgskole, Trondheim.

**Bakkehøi mfl. (2003):** *Avalanche run-out on counter-slopes*. Arne Moe, Sigris Wieshofer, Steinar Bakkehøi og Ulrik Domaas. *Surveys in Geophysics* 24:617-631, 2003

**Barbolini M. og Cappabianca F. (2002):** *SATSIE PROJECT Avalanche studies and modell validation in europe*, [http://www.leeds.ac.uk/satsie/docs/erosdep\\_report.pdf](http://www.leeds.ac.uk/satsie/docs/erosdep_report.pdf) (sist besøkt 21.01.05)

**Brateng, Linda Elisabeth (2004):** *Utforming av kjegler og voller som sikring mot snøskred*, Prosjektoppgave 2004, Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU.

**Crowe, Elger og Robertson (2001):** *Engineering Fluid Mechanics, 7.utg.* Clayton T. Crowe, Donald F. Elger og John A. Roberson. ISBN 0-471-38482-8, United States of America.

**Chu T., Hill G., McClung D.M., Ngu R og Sherkat R., 1994:** *Experiments on granular flows to predict avalanche runup*. *Can. Geotech. J.*, Vol. 32, side 285 – 295, Canada.

**Domaas, Ulrik (1980):** *Utløpsdistanse for snøskred – beregninger ved bruk av teoretiske modeller og modeller basert på terrengparametere*. Hovedoppgave i geomorfologi våren 1980, Geografisk institutt ved Universitetet i Oslo.

**Garmin (2003):** *MapSource, version 5.4*, programvare med kartdata.

**Hammersland, Norem, Hustad (2000):** *Evaluation of measures for snow avalanche protection of roads*. Snow engineering, recent advances and developments, Hjorth-Hansen, Holand, Løset og Norem, 2000. Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5809-148-1

**Hákonardóttir K.M. (2004):** *The interaction between snow avalanches and dams*, PhD ved University of Bristol. Kristin Martha Hákonardóttir, School of Mathematics, mars 2004.

**Jóhannesson og Hákonardóttir (2003):** *Remarks on the design of avalanche braking mounds based on experiments in 3, 6, 9 and 34 m long chutes*. Teknisk rapport nr 03024, The Icelandic Meteorological Office. <http://www.vedur.is/~tj/greinar/03024.pdf>. Sist besøkt 13.11.2004

**Lied, K og Harbitz, C (1996):** *Computational models for dense snow avalanche motion*, Rapport fra Norske geotekniske institutt, NGI, Rapport nr 581250-03

**Lied, K og Kristensen, K (2003):** *Snøskred, håndbok om snøskred*. Karstein Lied og Krister Kristensen. Norges Geotekniske Institutt, NGI og Vett & Viten, Oslo 2003. ISBN 82-412-0571-6

**Lied, K, Moe, A., Kristensen, K. og Issler, D.:** *Ryggfonn. Full scale avalanche test site and the effect of the catching dam*. NGI, Oslo, Norge.

**McClung, D og Schaerer, P (1998):** *The avalanche handbook, 4.utg.* David McClung og Peter Schaerer. The Mountaineers, North - America. ISBN 0-89886-364-3

**Norem, Harald (1974):** *Utforming av veger i drivsnømråder*. Dr.grad ved institutt for veg- og jernbanebygging ved Universitetet i Trondheim, Norges Tekniske Høgskole, NTH



**Norem, Harald (1993):** *Snøvern – om snøskred og drivsnø, håndbok 167*. Statens vegvesen, Oslo, 1993. ISBN 82-7207- 327-7

**Norem, 2004:** Personlig meddelt av professor Harald Norem i forbindelse med veiledning av prosjektoppgave, høsten 2004, NTNU

**Norem, 2005:** Personlig meddelt av professor Harald Norem i forbindelse med veiledning av hovedoppgave, våren 2005, NTNU

**Norem, 2005b:** *Beregningsdata for dimensjonering av utløpslengde og hastighet i Nakkefonna*, av professor Harald Norem, våren 2005, NTNU

**Norem H., Irgens F., Schieldrop B. (1987):** *A continuum modell for calculating snow avalanche velocities, Avalanche Formation, Movement and Effects* (Proceedings of the Davos Symposium, September 1986. IAHS Publ. No. 162, 1987

**NVE (1998):** *Vassdragshåndboka, håndbok i forebygningsteknikk og vassdragsmiljø*. E. Sæterbø, L. Syvertsen og E. Tesaker. ISBN 82-519-1290-3, Tapir forlag, Trondheim 1998

**Novak og Cábélka (1981):** *Models in Hydraulic Engineering - Physical Principles and Design Application*, Pitman publishing inc, 1981

**Perla, R og Martinelli, M, (1978):** *Avalanche Handbook*, Agricultural Handbook 489, US Department of Agriculture, Forest Service

**White, Frank M. (1994):** *Fluid Mechanics*, New York : McGraw-Hill, c1994

## Vedlegg A – Beregning av utløpslengde når terrenghelning er kjent

Beregning av utløpslengde når terrenghelning er kjent og  $Fr_{\text{natur}} = Fr_{\text{modell}}$ . Ut fra data samlet ved gjennomføring av modellforsøkene i denne rapporten er det funnet frem til en måte å beregne utløpslengde. Det antas at energilinjene til skredene er parallelle.

Helning på  $14^\circ$  settes som et nullpunkt. Det vil si at utløpslengden til helninger utover dette må legges til eller trekkes fra utløpslengden ved  $14^\circ$  helning, som er 2,83 m.

Likning [ 12.1 ] er likningen til energilinja for modellskred på  $14^\circ$  renne. Utløpslengden ved  $14^\circ$  helning er 2,83 m, mens utløpslengden ved  $11^\circ$  helning er 2,7 m. Hastighetshøyden ved  $X = 2,7$  er 0,0664, vist i likning [ 12.2 ].

$$y = -0,5007X + 1,4183 \quad [ 12.1 ]$$

$$y(2,7) = 0,0664 \quad [ 12.2 ]$$

Det er  $3^\circ$  forskjell mellom de to rennene. Det betyr at energihøyde per grad helning er 0,02213. Hastighetshøyden per lengde er 0,5108, som vist i likning [ 12.3 ].

$$\text{hastighetshøyde}_\text{per}_\text{lengde} = \frac{0,0664}{0,13} = 0,5108 \quad [ 12.3 ]$$

Utløpslengden, X er vist i likning [ 12.4 ] som forholdet mellom hastighetshøyden til gjeldende helning og hastighetshøyden per lengde.

$$\text{utløpslengde, X} = \frac{\text{hastighetshøyde}_\text{pr}_\text{grad} \times \text{ant}_\text{grader}(\text{fra } 14^\circ)}{\text{hastighetshøyde}_\text{pr}_\text{lengde}} \pm 2,83 \quad [ 12.4 ]$$

Dette er forenklet til likning [ 12.5 ]. Her vil for eksempel utløpslengden ved  $20^\circ$  helning være 3,1 m.

$$X = \frac{0,02213 \times \text{ant}_\text{grader}}{0,5108} \pm 2,83 = 0,0433 \times \text{ant}_\text{grader} \pm 2,83 \quad [ 12.5 ]$$