

## Klatrehøgder av skred på krumma leievoll

581200-36

15 januar 2002

**Oppdragsgiver: Norges Geotekniske Institutt**

Kontaktperson: Karstein Lied  
Kontraktreferanse: SIP-6

### For Norges Geotekniske Institutt

Prosjektleder: Karstein Lied

Rapport utarbeidet av: Arne Moe

Kontrollert av: Karstein Lied

Arbeid også utført av:

## Samandrag

I krumma skredkanalar vil sentrifugalkrefter lyfta skredmassen opp langs kanalveggen i yttersving. Dette hender avdi sentrifugalkreftene roterer den frie overflata med ein vinkel  $\theta$  (definert i Formel 1, s. 6). Klatrehøgda aukar dramatisk når sentrifugalvinkelen nærmar seg hellingsvinkelen til den ytre vollveggen. Avgjerande storleikar er snøggleiken til skredmassen, kanalkrumminga i to plan, og helningsvinkelen i den ytre vollveggen. Det er utleidd formlar for vertikal klatrehøgde på vollsida. Desse formlane er implementerte i eit rekneark, der brukaren bestemmer kanalgeometrien, snøggleiken og mengda av strøymande masse. Innverknaden av kvar designparameter er presenterte grafisk i avsnitt 3.3.

## Innhald

1	INNLEIING .....	4
2	DYNAMIKK.....	5
2.1	Sentrifugalvinkelen $\theta$ .....	5
3	GEOMETRI – KLATREHØGDA PÅ VOLLEN.....	6
3.1	Trekanta tverrsnitt.....	7
3.2	Firkanta tverrsnitt.....	8
3.3	Innverknad av dei ulike design-parametrane.....	11
4	KONKLUSJON .....	14

## Kontroll- og referanseside

## 1 INNLEIING

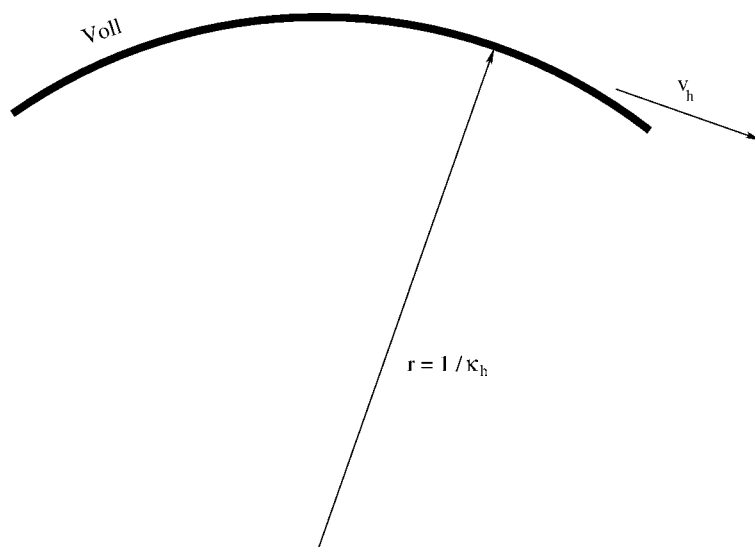
Masse som strøymer i ein krumma bane, er utsette for sentrifugalkrefter. Sentrifugalkrefter som skuldast ein krumma leievoll, vil lyfta skredmassen opp langs vollsida. Denne *klatrehøgda* er dimensjonerande for vollen, og den er avhengig av geometrien til kanalen, snøgleiken og materialeegenskapane til – og volumfluksen av – den strøymande massen. Sidan ei fullverdig utrekning av klatrehøgda føreset ein fullstendig, tredimensjonal dynamisk simuleringsmodell, er det naudsynt å forenkla problemstillinga. Forenklinga går ut på å anta stasjonær strøyming i eit ideelt fluid, dvs at snøgleiken er lik over heile tverrsnittet. Utrekninga av klatrehøgda på vollsida blir då eit fluidstatisk problem, og materialeegenskapane til den strøymande massen har ingen innverknad. Den frie overflata vil vera orientert normalt til massekreftene, som består av gravitasjonskrefter og sentrifugalkrefter.

## 2 DYNAMIKK.

### 2.1 Sentrifugalvinkelen $\theta$

Utrekninga av sentrifugalvinkelen  $\theta$  involverer fylgjande parametarar:

- $g$  gravitasjon
- $v$  snøgleiken til massen
- $v_h$  snøgleiken sin horisontalkomponent
- $\phi$  hellinga til terrenget
- $\kappa_h$  krumminga til banen sin projeksjon i horisontalplanet
- $\kappa_v$  krumminga til banen sin projeksjon i vertikalplanet
- $\theta$  sentrifugalvinkelen, hellingvinkelen til den frie overflata i tverrsnittet



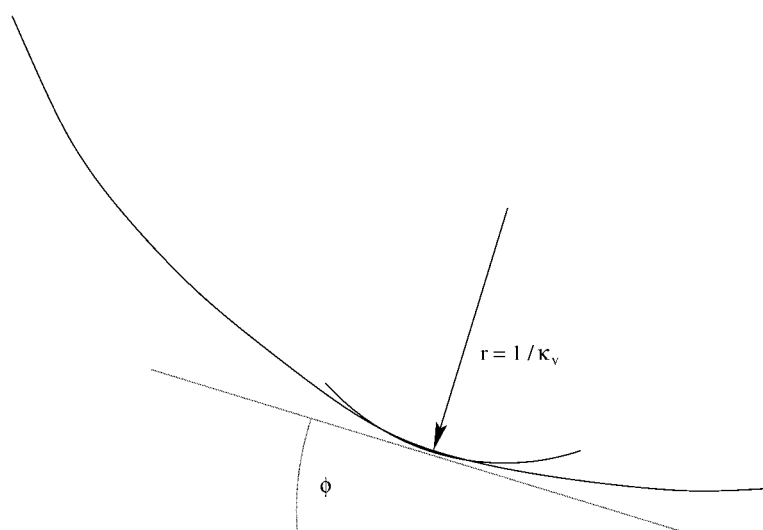
*Figur 1: Vollen sett ovanfrå; horisontalprojeksjonen. Krummingsradien  $r$  er den ein tek direkte frå kartet,  $v_h$  er horisontalkomponenten av snøgleiken langs vollen.*

$$\theta = \arctan \frac{\kappa_h v_h^2}{g \cos \phi + \kappa_v v^2}, \quad v_h = v \cos \phi$$

eller

$$\theta = \arctan \frac{\kappa_h v^2 \cos \phi}{g} \quad \text{dersom terrenget ikkje er konkavt / konvekst.}$$

Formel 1: Sentrifugalvinkelen



**Figur 2:** Skredterrenget sett frå sida; vertikalprojeksjon. Konkavt terreng ( $r > 0$ ) gir sentrifugalkrefter mot bakken og mindre klatrehøgde. Konvekst terreng gir sentrifugalkrefter ut frå bakken.

### 3 GEOMETRI – KLATREHØGDA PÅ VOLLEN

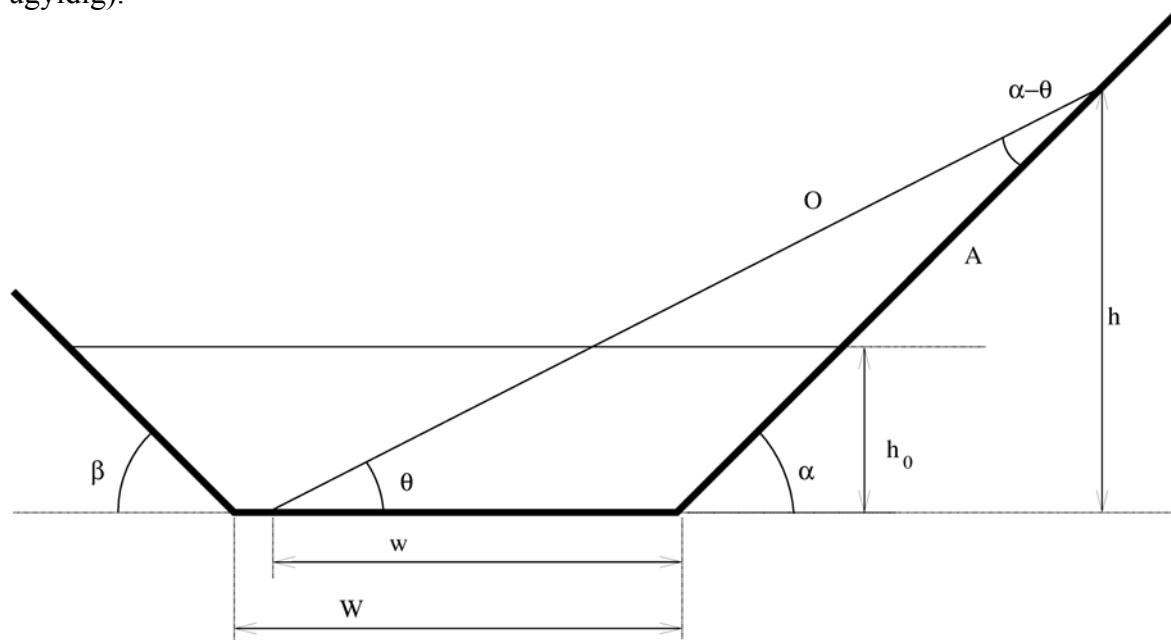
Utgangspunktet for dei geometriske utrekningane er at tverrsnittsarealet av den strøymande massen er konstant; at mediet er inkompressibelt. Dette arealet, kalla  $k$ , er enten kjent, eller det kan reknast ut som

$$k = \frac{h_0}{2} \left( 2W + h_0 \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan \alpha \tan \beta} \right)$$

**Formel 2:** Areal av trapesforma tverrsnitt.  $h_0$ ,  $W$ ,  $\alpha$  og  $\beta$  er illustrerte i Figur 3.

### 3.1 Trekanta tverrsnitt

Tverrsnittet vil ta ei trekanta form, som illustrert i **Figur 3**, viss krumminga og snøgleiken er tilstrekkeleg store. Viss  $\beta=0^\circ$  blir massetverrsnittet ogso trekanta, uavhengig av snøgleik og banekrumming ( $\beta=0^\circ$  gjer **Formel 2** ugyldig).



**Figur 3:** Tverrsnitt av skredkanalen, trekanta massetverrsnitt.

Trekanten har sidene A, O og w, med respektive motstående vinklar  $\theta$ ,  $\alpha$  og  $\alpha - \theta$ . Ein kan då nytta fylgjande geometriske samanhengar til å finna klatrehøgda h:

$$1) \frac{A}{O} = \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \quad (\text{sinussetninga})$$

$$2) k = \frac{1}{2} AO \sin(\alpha - \theta) \Leftrightarrow AO = \frac{2k}{\sin(\alpha - \theta)}$$

$$3) h = A \sin \alpha$$

$$4) \text{ Multipliserer 1) og 2): } \frac{A}{O} AO = A^2 = \frac{2k \sin \theta}{\sin \alpha \sin(\alpha - \theta)}$$

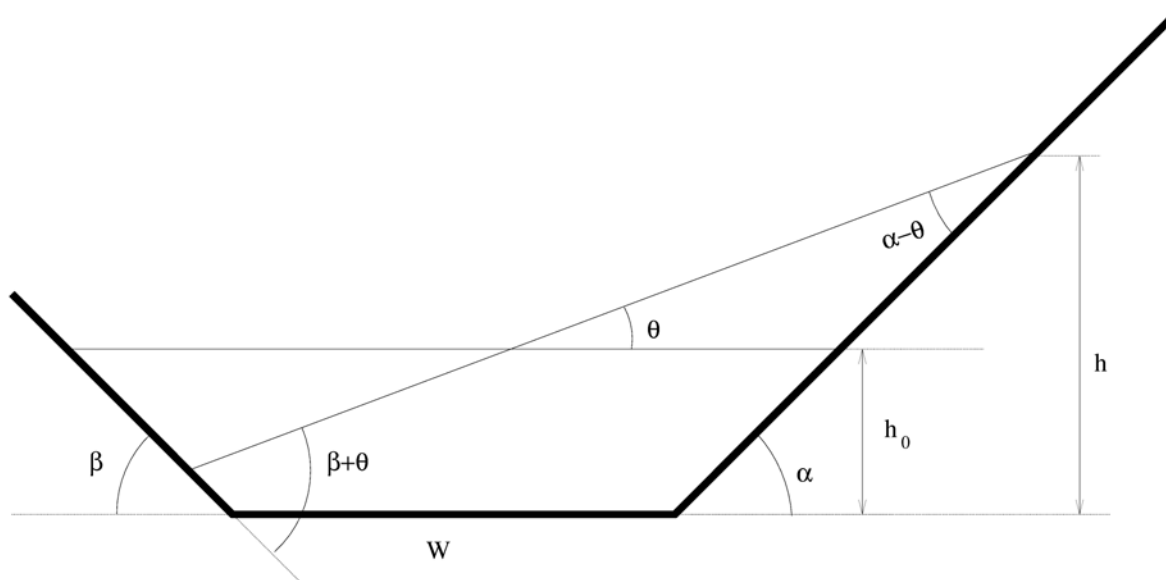
$$5) \text{ Set 3) inn i 4): } h^2 = A^2 \sin^2 \alpha = \frac{2k \sin \alpha \sin \theta}{\sin(\alpha - \theta)}$$

$$\Rightarrow h = \sqrt{\frac{2k \sin \alpha \sin \theta}{\sin(\alpha - \theta)}}$$

Formel 3: Høgda til eit trekanta massetverrsnitt

### 3.2 Firkanta tverrsnitt

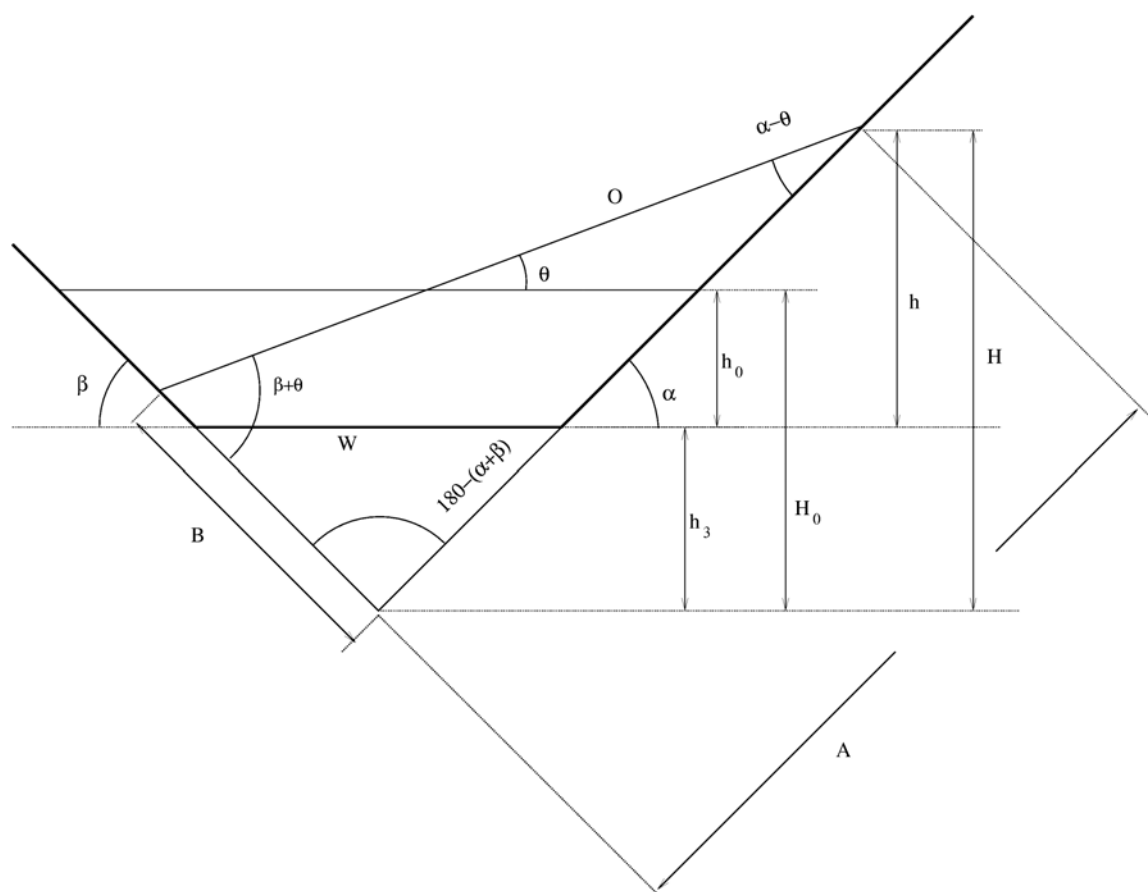
Når tilhøva er slik at massen dekkar botnen i skredkanalen, blir tverrsnittet firkanta. Figur 4 illustrerer denne tilstanden.



*Figur 4: Tverrsnitt av skredkanalen, firkanta massetverrsnitt.*

Klatrehøgda kjem fram ved eit tilsvarende resonnement som for det trekanta tverrsnittet. Berekningsgeometrien blir som på Figur 5; den aktuelle firkanten er ein del av ein trekant med sider A, B og O, og respektive motstående vinklar  $\beta + \theta$ ,  $\alpha - \theta$  og  $180^\circ - (\alpha + \beta)$ . Arealet av firkanten er framleis  $k$ , areala av den vesle og den store trekanten er høvesvis  $k_3$  og  $K = k + k_3$ .





Figur 5: Geometrien nytta i utrekninga.

Av figuren ser me at:

$$\frac{h_3}{\tan \alpha} + \frac{h_3}{\tan \beta} = W \Leftrightarrow h_3 = \frac{W \tan \alpha \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad \text{og} \quad k_3 = \frac{Wh_3}{2} = \frac{W^2 \tan \alpha \tan \beta}{2(\tan \alpha + \tan \beta)}$$

Arealet  $K$  av den store trekanten er gitt ved:

$$\begin{aligned}
 K &= k + k_3 = h_0 W + \frac{h_0^2 (\tan \alpha + \tan \beta)}{2 \tan \alpha \tan \beta} + \frac{W^2 \tan \alpha \tan \beta}{2(\tan \alpha + \tan \beta)} \\
 &= h_0 W + \frac{h_0^2 (\tan \alpha + \tan \beta)^2 + (W \tan \alpha \tan \beta)^2}{2 \tan \alpha \tan \beta (\tan \alpha + \tan \beta)}
 \end{aligned}$$

Høgda  $H$  av den store trekanten finn ein deretter på same vis som Formel 3 kom fram:

$$A^2 = \frac{2K \sin(\beta + \theta)}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta)) \sin(\alpha - \theta)}, \quad H^2 = A^2 \sin^2 \alpha$$

$$\Rightarrow H = \sin \alpha \sqrt{\frac{2K \sin(\beta + \theta)}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta)) \sin(\alpha - \theta)}}, \quad h = H - h_3$$

$$\Rightarrow h = \sin \alpha \sqrt{\frac{2K \sin(\beta + \theta)}{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \theta)} - \frac{W \tan \alpha \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta}}$$

*Formel 4: Høgda av eit firkanta kanaltverrsnitt*

$$\Rightarrow h = \sin \alpha \sqrt{\frac{2 \left( h_0 W + \frac{h_0^2 (\tan \alpha + \tan \beta)^2 + (W \tan \alpha \tan \beta)^2}{2 \tan \alpha \tan \beta (\tan \alpha + \tan \beta)} \right) \sin(\beta + \theta)}{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \theta)} - \frac{W \tan \alpha \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta}}$$

*Formel 5: Høgda av eit firkanta kanaltverrsnitt, uttrykt ved  $h_0$ ,  $W$ ,  $\alpha$  og  $\beta$*

$$\Rightarrow h = \sin \alpha \sqrt{\frac{2 \left( h_0 W + \frac{h_0^2 (\tan \alpha + \tan \beta)^2 + (W \tan \alpha \tan \beta)^2}{2 \tan \alpha \tan \beta (\tan \alpha + \tan \beta)} \right)}{\sin(\alpha + \beta)}} \sqrt{\frac{\sin \left( \beta + \arctan \frac{\kappa_h v_h^2}{g \cos \phi + \kappa_v v^2} \right)}{\sin \left( \alpha - \arctan \frac{\kappa_h v_h^2}{g \cos \phi + \kappa_v v^2} \right)}}$$

*Formel 6: Fullstendig uttrykk for klatrehøgda på krumma leievoll.*

Innverknaden av dei ulike parametrane er synte i diagramma nedanfor (Graf 1- Graf 5).

Med forenklingane  $\alpha = \beta = 45^\circ$  og  $\kappa_v = 0$ , reduserast Formel 6 til:

$$h = \sqrt{\frac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin(\alpha - \theta)}} \sqrt{4h_0W + 4h_0^2 + W^2} - \frac{W}{2} = \sqrt{\frac{\sin\left(\alpha + \arctan\frac{\kappa_h v^2 \cos\phi}{g}\right)}{\sin\left(\alpha - \arctan\frac{\kappa_h v^2 \cos\phi}{g}\right)}} \sqrt{4h_0W + 4h_0^2 + W^2}$$

### 3.3 Innverknad av dei ulike design-parametrane

Formel 6 er implementert i eit rekneark ([berekninga.xls](#)), (ligg på 581200\Rap\krumvoll\berekninga.xls) der alle parametrane kan endrast av brukaren. Nedanfor er nokre diagram der eg har variert snøggleiken, damgeometrien, terrenggeometrien og den nominelle flytehøgda  $h_0$ . Som standardverdiar har eg nytta:

- Snøggleik  $v = 20\text{m/s}$  og  $30\text{m/s}$
- Nominell flytehøgda  $h_0 = 2\text{m}$
- Vollvinklar  $\alpha = \beta = 45^\circ$
- Horisontalkrumming  $\kappa_h = 1/r = 1/200\text{m}$
- Terrenghelling  $\phi = 10^\circ$
- Terrengkrumming  $\kappa_v = 1/r = 1/9999\text{m}$
- Kanalbreidd  $W = 20\text{m}$

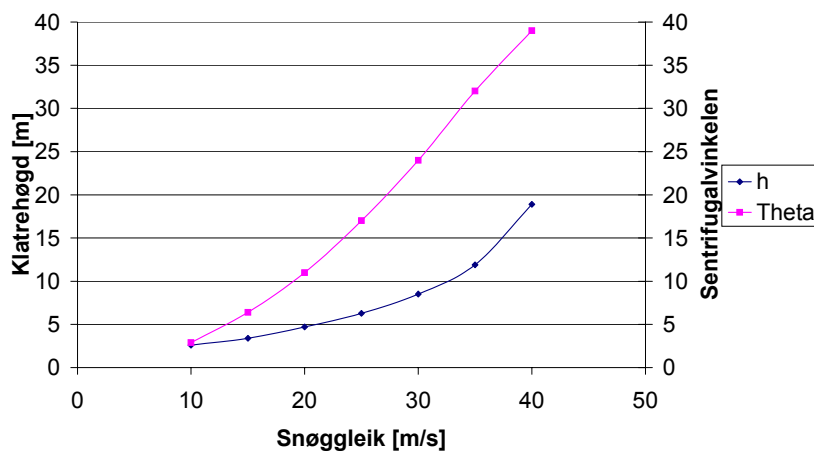
#### 3.3.1 Reknearket

Formlane for klatrehøgda på yttersvingvegg i krumma skredkanalar er implementerte i reknearket "berekninga.xls". Der kan brukaren leggja inn og variera aktuelle parametarar. Brukaren kan enten leggja inn nominell flytehøgda (flytehøgda utan sentrifugaleffektar) og få tverrsnittsarealet av skredmassen utrekna, eller han kan leggja inn tverrsnittsarealet og få utrekna flytehøgda. Dersom bae verdiar blir oppgjevne, blir flytehøgda utrekna på ny, og denne overstyrer oppgitt flytehøgda. Dersom skredmassen berre er avgrensa i yttersving, og det ikkje finst nokon indre vollvegg, oppgir ein veldig stor kanalbreidd (t d 1000m), samt tverrsnittsarealet av den strøymande massen. Ein kan ikkje setja indre vollvinkel,  $\beta$ , lik  $0^\circ$ , då dette gjer formelverket ubrukeleg.

Tverrsnittsarealet av skredmassen, kalla  $k$ , kjem fram som  $k = \frac{\text{volum}/\text{tid}}{\text{snøggleik}}$ .

Reknearket reknar ut vertikal klatrehøgda på vollen, sentrifugalvinkel  $\theta$  og differansen  $\alpha - \theta$ , og det finn ut om tverrsnittet tek trekanta eller firkanta form.

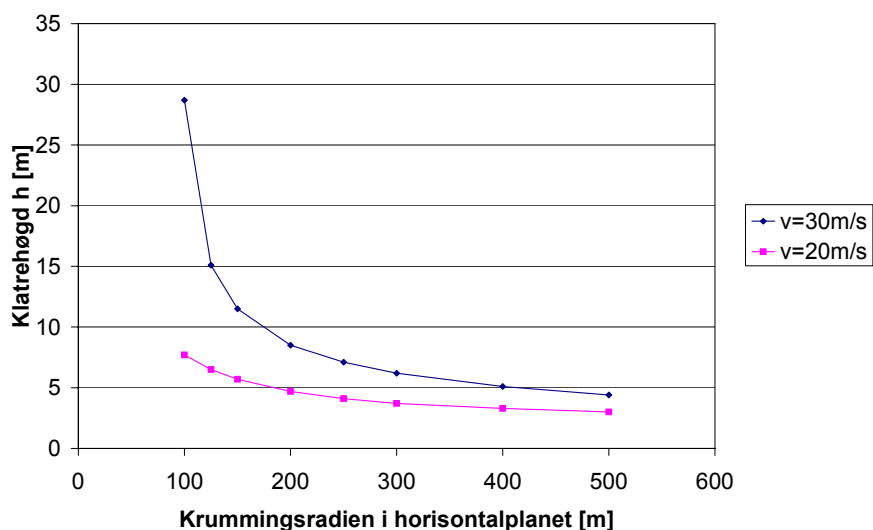
### 3.3.2 Snøggleiken



Graf 1: Snøggleiken sin innverknad på klatrehøgda

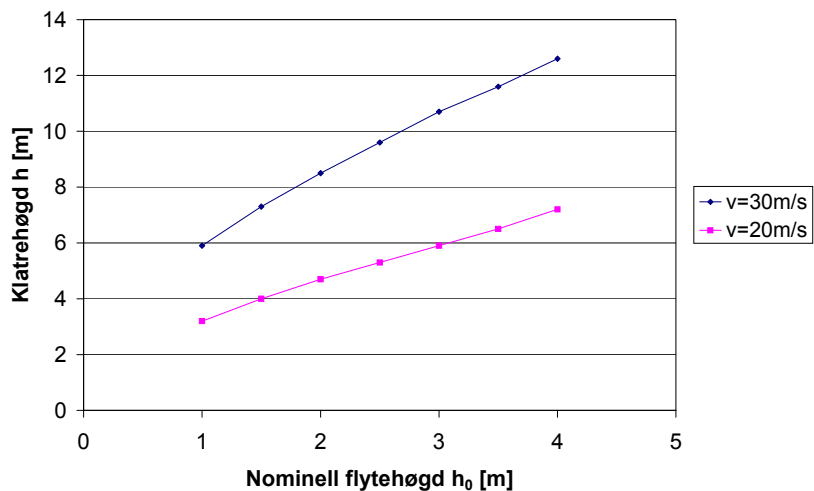
Snøggleiken har, som ein ser av grafen, stor innverknad på klatrehøgda. Sentrifugalvinkelen  $\theta$  aukar med snøggleiken (Formel 1), og ein ser av **Figur 3** og **Figur 4** at høgda må auka når  $\theta \rightarrow \alpha \Leftrightarrow \alpha - \theta \rightarrow 0$ .

### 3.3.3 Banekrumming i horisontalplanet

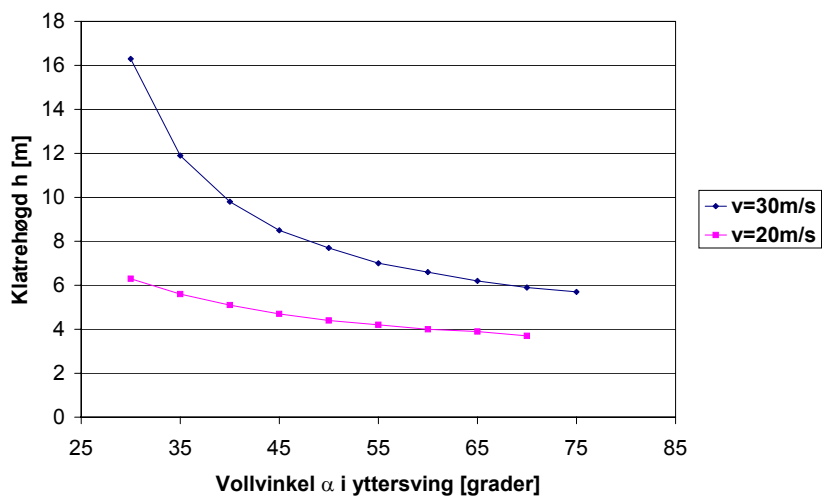


Graf 2: Krummingsradien sin innverknad på klatrehøgda

Krumminga til banen er vesentleg når den er i det kritiske storleiksområdet; dvs at svingen er so skarp (og farten so stor) at  $\theta \rightarrow \alpha$ .

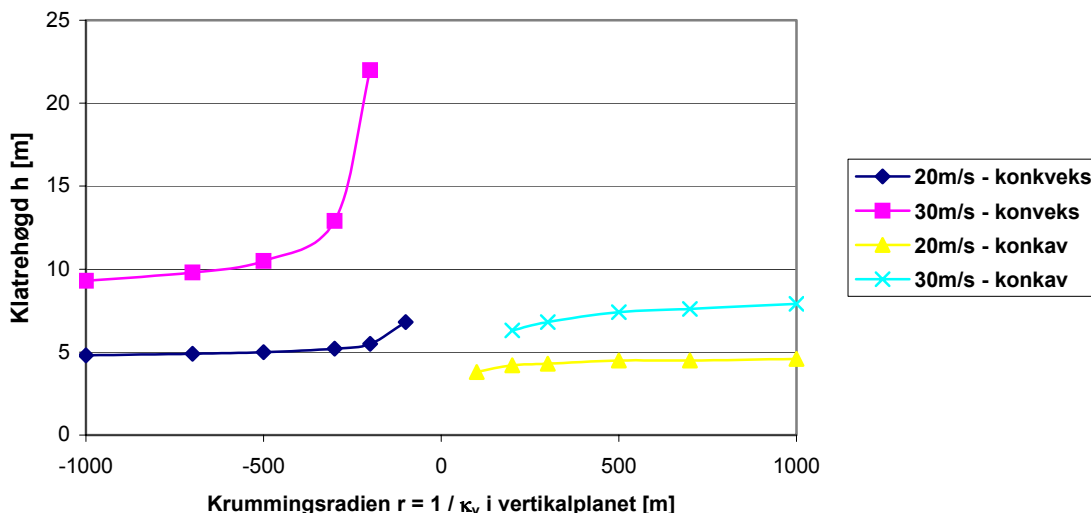
3.3.4 Nominell flytehøgde  $h_0$ 

Graf 3: Nominell flytehøgde aukar klatrehøgda omlag lineært.

3.3.5 Kanargeometrien; vollvinkelen  $\alpha$ 

Graf 4: Vollvinkelen er vesentleg når sentrifugalvinkelen nærmar seg den.

### 3.3.6 Terrengkrumming



Graf 5: Konvekse skredbaner kan gi store klatrehøgder

Terrengkrumminga, som er vist i Graf 5 har stor innverknad på klatrehøgda, særskilt når krummingsradien vert liten. Det vil som regel vera lite å gjera med denne krumminga i designet av ein leievoll. Dei fleste utløpsområde er imidlertid naturleg konkave, noko som gir reduserte klatrehøgder i høve til utløpsområde med konstant hellingsvinkel.

## 4 KONKLUSJON

Ein viktig storleik i designet av ein krumma leievoll, er  $\alpha-\theta$ . Av **Figur 3** ser ein at ein liten vinkel  $\alpha-\theta$ , gir stor klatrehøgda. Det er derimot viktig å merka seg at føresetnaden om uniformt snøggleiksprofil over heile tverrsnittet blir mindre nøyaktig når  $\alpha-\theta \rightarrow 0$ . Dette er avdi skredmassen då blir spreidd utover eit breiare underlag, og får eit tynnare flytesjikt som er meir utsett for viskøst tap. I (VanDine m.fl 1984), vedlegg G, vert det antyda at utrekna klatrehøgder kan måtta multipliserast med ein faktor so stor som 5. I dei berekningane er ikkje sentrifugaleffektar i vertikallplanet inkluderte, og desse har svært mykje å sei der terrenget er ujevnt (ved hamrar og avsatsar). Modellen som her er presentert tek omsyn til sentrifugalkrefter i vertikallplanet, men er utvikla for stasjonære straumar i nokonlunde jamnt terreng. Den kan truleg likevel nyttast til å gi eit estimat av klatrehøgda, eller i alle høve forutsei at store klatrehøgder kjem til å inntreffa med eit gitt sett av føresetnader. Sidan ein som regel har ein gitt maksimalsnøggleik å forhalda seg til, vert dei to viktigaste designparametrane i volldesignet:

- Vollvinkelen  $\alpha$ , som bør veljast so stor som praktisk mogleg.
- Krummingsradien  $r = 1/\kappa_h$ , som også bør veljast så stor som terrenget tillet.

Kanalbreidda  $W$  er ikkje særleg vesentleg for klatrehøgda. Volumfluksen er gitt på førehand, og effekten av auka kanalbreidd kansellerast om lag av den reduserte flytehøgda. Auka kanalbreidd kan derimot bidra til å redusera snøngleiken, pga auka viskøs friksjon, og soleis redusera klatrehøgda – det er eit hydrodynamisk problem, som blir for omfattande å inkludera kvantitativt i denne analysen.



#### 4.1.1 Litteratur

VanDine D.F., Morgan G.C. & Hungr O (Thurber Consultants Ltd.) (1984).  
*Debris torrent. A review of mitigative measures.* Ministry of Transportation &  
Highways, Victoria, British Columbia. 15-3-32A.



# Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



<b>Oppdragsgiver/Client</b> Norges Geotekniske Institutt	<b>Dokument nr/Document No.</b> 581200-36
<b>Kontraksreferanse/ Contract reference</b> SIP-6	<b>Dato/Date</b> 15 januar 2002
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Klatrehøgder av skred mot krumma leievoll  <b>Prosjektleder/Project Manager</b> Karstein Lied  <b>Utarbeidet av/Prepared by</b> Arne Moe	<b>Distribusjon/Distribution</b>  <input type="checkbox"/> <b>Fri/Unlimited</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Begrenset/Limited</b> <input type="checkbox"/> <b>Ingen/None</b>
<b>Emneord/Keywords</b> Snøskred, sikringstiltak, ledevoll	
<b>Land, fylke/Country, County</b> Norge  <b>Kommune/Municipality</b> Oslo  <b>Sted/Location</b> NGI  <b>Kartblad/Map</b>  <b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>  <b>Felt navn/Field name</b>  <b>Sted/Location</b>  <b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>

Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001							
Kontrollert av/ Reviewed by	Kontrolltype/ Type of review	Dokument/Document		Revisjon 1/Revision 1		Revisjon 2/Revision 2	
		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed		Kontrollert/Reviewed	
		Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.	Dato/Date	Sign.
KL	Helhetsvurdering/ General Evaluation *	16/1-02					
KL	Språk/Style	16/1-02					
KL	Teknisk/Technical - Skjønn/Intelligence - Total/Extensive - Tverrfaglig/ Interdisciplinary	16/1-02					
	Utforming/Layout						
ArM	Slutt/Final	16/1-02					
	Kopiering/Copy quality						

\* Gjennomlesning av hele rapporten og skjønnsmessig vurdering av innhold og presentasjonsform/  
On the basis of an overall evaluation of the report, its technical content and form of presentation

<b>Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release</b>	<b>Dato/Date</b> 16/1-02	<b>Sign.</b>
--	-----------------------------	--------------