

# Omrøringsenergi i sensitive leirer

**Siri Ulvestad**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, BAT

Medveileder: Vikas Thakur, Statens vegvesen

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





Oppgavens tittel: Omrøringsenergi i sensitive leirer	Dato: 10.06.2013		
	Antall sider (inkl. bilag): 68		
	Masteroppgave	x	Prosjektoppgave
Navn: Siri Ulvestad			
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Vikas Thakur, Statens vegvesen			

<p>Ekstrakt:</p> <p>I denne oppgaven har det blitt samlet inn data fra tidligere skred gått i kvikke og sensitive leirer, og det har blitt gjort en litteraturstudie av skredmekanismer og ulike metoder for å vurdere retrogresjon av kvikkeireskred. Den tilegnete informasjonen har blitt benyttet til å analysere kvikkeirers retrogressive oppførsel i skredhendelser, og til videre fordypning i kvikkeirers omrøringsenergi.</p> <p>Omrøringsenergi har blitt studert ved å benytte empiriske og analytiske formler fra tidligere studier, ved å studere og videre analysere tidligere gjennomførte laboratorieforsøk, og ved å utvikle og gjennomføre nye laboratorieforsøk. Omrøringsenergi i leire med data gjengitt fra tidligere gjennomførte storskala skjærforsøk i felt har også blitt studert. Oppgaven bekrefter funn gjort i tidligere studier, hva gjelder retrogresjonsdistanser og terskelverdier for utvikling av retrogressive kvikkeireskred. Men det er også funnet noen begrensninger ved modellene. Denne oppgaven foreslår at <math>C_{uv} &lt; 1 \text{ kPa}</math> og <math>N_c &gt; 4</math> angir terskelverdier for utvikling av retrogressive skred, mens <math>\frac{L}{H} &lt; 15</math> kan gi et godt estimat av retrogresjonsdistansen for mindre skred.</p> <p>Videre foreslår oppgaven at omrøringsenergi er en egnet parameter til bruk ved vurdering av kvikkeireskred. Dette begrunnes med at omrøringsenergi i leire korrelerer med både leiras sensitivitet, plastisitet og omrørt skjærstyrke. I tillegg antydes det i oppgaven at tidligere studier kan ha underestimert kvikkeirers omrøringsenergi.</p>
---

Stikkord:

1. Omrøringsenergi
2. Kvikkeire
3. Retrogresjon
4. Skred



## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport, faggruppe geoteknikk, i samarbeid med Statens vegvesen. Oppgaven er skrevet i faget «TBA4900 Geoteknikk», og er avsluttende for masterstudiet «Bygg- og miljøteknikk» ved NTNU.

Det har vært spennende og lærerikt å jobbe med denne oppgaven, selv om det til tider har vært krevende å oppdrive informasjon, få tak i leire til laboratorieforsøk og å få organisert bygging av apparat til gjennomføring av laboratorieforsøk.

Deler av oppgaven benytter seg av data som ble samlet inn av Daniel Gebremedhin Nigussie, i forbindelse med sommerjobb i Statens vegvesen sommeren 2012. Disse dataene har blitt gjennomgått og oppdatert, men er i stor grad beholdt i sin opprinnelige form.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder ved Statens vegvesen, Vikas Thakur, for å stille mye informasjon og mange artikler til disposisjon i utarbeidelsen av denne oppgaven. Han har også kommet med gode idéer og innspill gjennom hele prosessen, noe som har vært til stor hjelp.

Jeg vil også takke min veileder ved NTNU, Arnfinn Emdal, for hjelp med å få tak i leire til laboratorieforsøkene. Frank Stæhli og Per Asbjørn Østensen må takkes for hjelp til bygging av apparatet brukt i laboratorieforsøkene.



## Sammendrag – Norsk

I denne oppgaven har det blitt samlet inn data fra tidligere skred gått i kvikke og sensitive leirer, og det har blitt gjort en litteraturstudie av skredmekanismer og ulike metoder for å vurdere retrogresjon av kvikkeireskred. Den tilegnete informasjonen har blitt benyttet til å analysere kvikkeirers retrogressive oppførsel i skredhendelser, og til videre fordypning i kvikkeirers omrøringsenergi.

Omrøringsenergi har blitt studert ved å benytte empiriske og analytiske formler fra tidligere studier, ved å studere og videre analysere tidligere gjennomførte laboratorieforsøk, og ved å utvikle og gjennomføre nye laboratorieforsøk. Omrøringsenergi i leire med data gjengitt fra tidligere gjennomførte storskala skjærforsøk i felt har også blitt studert.

Oppgaven bekrefter funn gjort i tidligere studier, hva gjelder retrogresjonsdistanser og terskelverdier for utvikling av retrogressive kvikkeireskred. Men det er også funnet noen begrensninger ved modellene. Denne oppgaven foreslår at  $C_{ur} < 1 \text{ kPa}$  og  $N_c > 4$  angir terskelverdier for utvikling av retrogressive skred, mens  $\frac{L}{H} < 15$  kan gi et godt estimat av retrogresjonsdistansen for mindre skred.

Videre foreslår oppgaven at omrøringsenergi er en egnet parameter til bruk ved vurdering av kvikkeireskred. Dette begrunnes med at omrøringsenergi i leire korrelerer med både leiras sensitivitet, plastisitet og omrørt skjærstyrke. I tillegg antydes det i oppgaven at tidligere studier kan ha underestimert kvikkeirers omrøringsenergi.

## Summary – English

This paper studies data collected from previously occurred landslides in Norwegian quick-clays and sensitive clays. In addition, a literature study on landslide mechanisms and various methods of assessing retrogression of landslides in quick-clays has been done. Further, this information has been used to analyse quick-clays' behavior in retrogressive landslides and to study remoulding energy.

Remoulding energy has been studied by using previously found empirical and analytical formulas, by studying and analysing previously conducted laboratory tests, and by developing and conducting new laboratory tests for quantifying remoulding energy. Furthermore, remoulding energy has been studied from data provided by formerly conducted large-scale in-situ shearbox tests.

This paper confirms findings in earlier studies with respect to retrogression distances and threshold values for development of retrogressive slides in quick-clays. However, some limitations to earlier models have also been found. This paper suggests that  $C_{ur} < 1 \text{ kPa}$  and  $N_c > 4$  are threshold values for development of retrogressive slides, and that  $\frac{L}{H} < 15$  gives a good estimate for the retrogression distance of smaller slides.

In addition, this paper suggests that remoulding energy is a suitable parameter for considerations regarding landslides in quick-clays. This is due to the findings of correlations between remoulding energy and clays remoulding strength, sensitivity and plasticity. This paper further indicates that there might have been an underestimation of clays' remoulding energy in previous studies.



## Innholdsfortegnelse

Forord .....	i
Sammendrag – Norsk .....	iii
Summary – English .....	iv
Tabeller.....	3
Formler .....	3
Figurer .....	4
Symboler.....	5
1. Innledning.....	6
1.1 Motivasjon .....	6
1.2 Oppgavens oppbygning .....	7
2. Kvikkleire .....	8
2.1 Dannelse .....	8
2.2 Definisjon av kvikkleire .....	8
3. Generell geoteknikk og geoteknisk beskrivelse av skredbevegelse.....	9
3.1 Jordegenskaper.....	9
3.1.1 Skjærstyrke.....	9
3.1.2 Sensitivitet.....	10
3.1.3 Plastisitetsindeks.....	10
3.1.4 Flyteindeks .....	10
3.1.5 Konsolidering .....	10
3.2 Skredtyper .....	11
3.3 Definisjon av skredets geometri .....	13
4. Utbredelse av kvikkleireskred .....	14
4.1 Retrogresjonsdistanse og skråningshøyde (L/H).....	14
4.2 Stabilitetsnummer .....	14
4.3 Omrørt skjærstyrke, sensitivitet, flytegrense og flyteindeks .....	15
4.4 Kvikkhet (Quickness).....	16
4.5 Kriterier for retrogressiv skredutvikling .....	16
5. Dagens praksis i Norge .....	18
6. Studie av norske kvikkleireskred .....	19
6.1 Kommentarer til benyttede data.....	21

6.2 Omrørt skjærstyrke.....	21
6.3 Skråningshøyde.....	22
6.4 Stabilitetsnummer .....	22
6.5 Tykkelse av kvikkleirelag.....	23
7. Omrøringsenergi .....	24
7.1 Energibetraktning i skred.....	24
7.2 Laboratorieforsøk av Tavernas et al. (1983).....	24
7.3 Analytisk studie av omrøringsenergi .....	27
7.4 Laboratorieforsøk utført av Rasmussen (2012).....	28
7.5 Nytt utført laboratorieforsøk.....	29
7.5.1 Beskrivelse av laboratorieforsøk.....	30
7.5.2 Resultater fra laboratorieforsøk .....	31
7.6 Omrøringsenergi i feltforsøk .....	33
7.7 Analyse og diskusjon av resultater .....	36
7.7.1 Sammenlikning av formler og korrelasjoner .....	36
7.7.2 Vurdering av omrøringsenergi fra laboratorieforsøk .....	39
7.7.3 Vurdering av omrøringsenergi i feltforsøk.....	42
8. Konklusjon og videre arbeid.....	44
8.1 Konklusjon .....	44
8.2 Forslag til videre arbeid .....	44
Referanser .....	45
Vedlegg.....	49

## Tabeller

Tabell 1 Utdrag av oppdatert skredkatalog .....	20
Tabell 2 Resultater fra forsøk utført av Tavernas et al. ....	26
Tabell 3 Materialeegenskaper for leira benyttet i Rasmussens forsøk.....	29
Tabell 4 Omrøringsenergi og omrøringsgrad fra Rasmussens forsøk.....	29
Tabell 5 Materialeegenskaper i leira benyttet i utført laboratorieforsøk .....	31
Tabell 6 Resultater fra utført laboratorieforsøk .....	33
Tabell 7 Materialeegenskaper til leira fra feltundersøkelsene .....	35
Tabell 8 Beregnete resultater fra feltforsøk.....	36
Tabell 9 Sammenlikning av resultater fra feltforsøk og Leroueils formel.....	43

## Formler

Formel 1 Energibalanse .....	24
Formel 2 Omrøringsgrad .....	25
Formel 3 Energi ved maksimal styrke .....	25
Formel 4 Normalisert energi per volumenhet .....	25
Formel 5 Normalisert potensiell energi .....	26
Formel 6 Leroueils empiriske formel for 75 % omrøringsenergi .....	26
Formel 7 Thakur et al. /16/ analytisk formel for omrøringsenergi.....	28
Formel 8 Thakur et al. /16/ forenklet analytisk formel for omrøringsenergi .....	28
Formel 9 Leroueils empiriske formel for omrøringsenergi .....	41
Formel 10 Foreslått formel for ekstruderingsenergi .....	42

## Figurer

Figur 1 Enkelt rotasjonsskred /2/ .....	11
Figur 2 Initialskred og retrogressivt flyte skred /2/ .....	11
Figur 3 Flakskred /2/.....	12
Figur 4 Spredningsskred /11/ .....	12
Figur 5 Skredgropas geometri .....	13
Figur 6 Retrogresjonsdistanse i relasjon til stabilitetsnummer. ....	15
Figur 7 Faregradsklasser.....	18
Figur 8 Omrørt skjærstyrke og retrogresjon .....	21
Figur 9 Skråningshøyde og retrogresjon .....	22
Figur 10 Stabilitetsnummer og retrogresjon.....	23
Figur 11 Tykkelse på kvikkleirelag og retrogresjon .....	23
Figur 12 Omrøringsenergi fra Tavernas et al. laboratorieforsøk og Leroueils formel .....	27
Figur 13 Idealisert spenning-tøyningsforløp i leire .....	27
Figur 14 Omrøringsenergi og sensitivitet med data fra Rasmussen /17/ .....	29
Figur 15 Ekstruderingsapparat .....	30
Figur 16 Resultater fra omrøringsforsøk på leire fra Tiller 1.....	32
Figur 17 Resultater fra omrøringsforsøk på leire fra Kvenildsmarka .....	32
Figur 18 Resultater fra omrøringsforsøk på leire fra Tiller 2.....	32
Figur 19 Ekstrudert leire som likner kvernet kjøttdeig .....	33
Figur 20 Detaljtegning av skjærapparatet.....	34
Figur 21 Spenning-tøyningsdiagram fra storskala skjærforsøk i Tønsberg.....	35
Figur 22 Spenning-tøyningsdiagram fra storskala skjærforsøk i Lierstranda.....	36
Figur 23 Plastisitetsindeks og omrøringsenergi .....	37
Figur 24 Omrørt skjærstyrke og omrøringsenergi .....	38
Figur 25 Sensitivitet og omrøringsenergi .....	38
Figur 26 Ekstruderingsenergi og sensitivitet .....	39
Figur 27 Ekstruderingsenergi og plastisitet.....	40
Figur 28 Ekstruderingsenergi og omrørt skjærstyrke.....	40
Figur 29 Sammenlikning av målt ekstruderingsenergi og beregnet omrøringsenergi etter Leroueils formel.....	41
Figur 30 Funnet sammenheng mellom ekstruderingsenergi og $c_u * I_p$ .....	42

## Symboler

$C_u$  – Uforstyrret skjærstyrke

$C_{ur}$  – Omrørt skjærstyrke

$C_{ux}$  – Målt skjærstyrke etter utførte omrøringsforsøk

$\gamma$  – Densitet

$\gamma_r$  – Skjærtøyning ved gjenværende skjærstyrke

$\gamma_i$  – Skjærtøyning ved maksimal skjærstyrke

$S_t$  - Sensitivitet

$I_p$  - Plastisitetsindeks

$I_L$  - Flyteindeks

$w$  – Naturlig vanninnhold

$w_L$  - Flytegrense

$w_p$  - Platisitetsgrense

$\sigma_p'$  - Forkonsolideringsspenning

$H$  – Høyde av bakre skred kant

$L$  – Retrogresjonsdistanse

$N_c$  - Stabilitetsnummer

$Q$  - Quickness

$RE$  - Omrøringsenergi

$RE_{75\%}$  - Omrøringsenergi ved 75% omrøringsgrad

$G$  - Skjærmodul

$S$  - Oppmykningsmodul

$OCR$  - Forkonsolideringsforhold

$E_p$  – Potensiell energi

$E_f$  - Friksjonsenergi

$E_k$  – Kinetiskenergi

$W_{Np}$  – Normalisert potensiell energi

$W_p$  – Potensiell energi ved skredhendelse

$W_{LS}$  – Energi ved maksimal styrke

## 1. Innledning

Skred er et problem i store deler av verden, og fører årlig til tap av menneskeliv og store økonomiske verdier. De økonomiske tapene oppstår når skred ødelegger eiendommer, bygninger, ledningsnett, veier og toglinjer, eller fører til forstyrrelser i landbruk og industri.

Kvikkleireskred har ført til de største naturkatastrofene i Norges historie /11/. I forhold til andre skredtyper kan kvikkleireskred være spesielt ødeleggende, da små skred raskt kan utvikle seg til å bli veldig store. Det er ikke uvanlig at et kvikkleireskred har blitt opptil 1000 ganger større enn initialskredet.

De siste 20 – 30 årene har de fleste større kvikkleireskred blitt utløst av menneskelig aktivitet, noe som tyder på at forståelsen for kvikkleireskred har vært mangelfull. Dette, i tillegg til samfunnets stadig økende krav til sikkerhet, gjør det ønskelig å forstå kvikkleireskreds mekanismer og utstrekning bedre.

Det har vist seg å være vanskelig å forholde seg til kvikkleireskred på én bestemt måte, da skredets utvikling blir påvirket av flere faktorer. Disse faktorene er blant annet geologien og topografien i skredområdet, jordmaterialets egenskaper, tykkelse og lagdeling i jorda, og skredmekanismers kompleksitet.

Det er imidlertid gjort flere studier for å finne metoder å tilnærme seg problemet på. Stabilitet av naturlige kvikkleireskråninger har blitt studert med pragmatiske tilnærminger, som involverer flere logiske forenklinger. Kvikkleireskred har også blitt studert ved å fokusere på noen utvalgte aspekter ved problemet, hvorav én er basert på omrøringsenergi.

Oppgaven er basert på tidligere studier fra Tavernas et al. /7/, Thakur et al. /16/ og Thakur og Degago /19/, som foreslår at omrøringsenergi i sensitive leirer kan brukes til å øke forståelsen for utbredelse av skred i kvikkleireområder.

Videre baserer oppgaven seg på data fra tidligere skred i kvikke og sensitive leirer, innsamlet av Daniel Gebremedhin Nigussie. Dataene har i forbindelse med denne oppgaven blitt gjennomgått på nytt, oppdatert og analysert.

Denne masteroppgaven er del av et nasjonalt forskningsprosjekt, kalt «Naturfare, infrastruktur, flom og skred (NIFS)». Prosjektet er en felles satsing mellom Jernbaneverket, Norges vassdrags- og energidirektorat og Statens vegvesen.

### 1.1 Motivasjon

Motivasjonen for denne oppgaven er å studere og å finne:

- Hvilke og hvordan ulike jordparametere påvirker utviklingen av kvikkleireskred ved å studere litteratur og innsamlet data fra tidligere skred i kvikke og sensitive leirer.
- Om omrøringsenergi kan benyttes som en samlende parameter for flere materialeegenskaper i jorda.
- En enkel måte å måle omrøringsenergi i laboratoriet.

## 1.2 Oppgavens oppbygning

Denne oppgaven består av tre deler. Kapittel 1 til 5 gir en generell introduksjon til kvikkleireskred, skredmekanismer og ulike materialegenskaper, og presenterer funn fra tidligere studier.

I kapittel 6 blir innsamlet data fra tidligere kvikkleireskred presentert og analysert med hensyn på retrogresjon av kvikkleireskred. Kapittel 7 tar for seg omrøringsenergi i leirer ved å presentere og analysere tidligere skredhendelser, tidligere felt- og laboratorieforsøk og laboratorieforsøk gjennomført i forbindelse med denne oppgaven.

## 2. Kvikkleire

### 2.1 Dannelse

Kvikkleire finnes i områder der landheving har ført til at leire, tidligere avsatt i havet, i dag befinner seg på land. Slike områder er i dag utbredt i Canada, nordøstlige USA, vest-Sverige og Norge.

Da Norge under siste istid (Weichsel) var dekket av is, førte fremstøt fra breene til at løsmasser og forvitret fjell ble skjøvet mot kysten. Under avsmeltingen trakk breene seg tilbake og løsmasser ble avsatt i havet. Isens tyngde førte til at landet den gang lå mer enn 100 m lavere enn i dag, og etter hvert som landet hevet seg, kom marine leirlag over havoverflaten. Disse leirlagene betegnes i dag marine avsetninger, og det er kun i marine avsetninger at det finnes kvikkleire.

Ettersom de marine avsetningene har blitt avsatt under havet, har de opprinnelig et høyt saltinnhold (3,5%), der flakliknende leirpartikler i en «korthusstruktur» er bundet sammen av saltholdig vann i porene. Vannstrømmer har derimot ført til, og fører fortsatt til, at saltet blir vasket ut av leira. Denne utvaskingen gjør at bindemiddelet i leira forsvinner, og leira blir stående igjen med en åpen og ustabil kornstruktur. Har saltinnholdet i leira blitt lavere enn 1 %, har leira blitt kvikk.

### 2.2 Definisjon av kvikkleire

I dag defineres kvikkleire i Norge etter leiras sensitivitet og omrørte skjærstyrke. Omrørt skjærstyrke,  $C_{ur}$ , er leiras skjærstyrke etter at den er fullstendig omrørt /2/, mens sensitivitet,  $S_t$ , er forholdet mellom uforstyrret skjærstyrke og omrørt skjærstyrke. Er den omrørte skjærstyrken lavere enn 0,5 kPa og sensitiviteten større enn 30, betegnes leira som kvikkleire.



### 3. Generell geoteknikk og geoteknisk beskrivelse av skredbevegelse

#### 3.1 Jordegenskaper

##### 3.1.1 Skjærstyrke

Skjærstyrken er den maksimale skjærspenning en jordart tåler før den går til brudd /5/.

Skjærstyrken i et granulært materiale avhenger av de opptredende normalspenningene, kohesjonen og friksjonsvinkelen. Friksjonsvinkelen angir maksimal vinkel før partiklene/kornene i materialet begynner å skli fra hverandre, mens kohesjonen kan sees på som en initiell bindekrift mellom partiklene i materialet, og avhenger av partiklenes tiltrekningskraft. Normalspenningen i jorda er avhengig av overlagingen (dybden), jordas tyngdetetthet og poretrykket.

For leirer skiller man mellom uforstyrret og omrørt skjærstyrke. Den uforstyrrede skjærstyrken,  $C_u$ , er skjærstyrken i leira, så lenge den er uforstyrret. Omrørt skjærstyrke,  $C_{ur}$ , er leiras nye skjærstyrke etter at den har blitt omrørt.

Jordas skjærstyrke kan måles i felten eller i laboratoriet. I felten kan trykksondering brukes til å bestemme uforstyrret skjærstyrke, mens vingeboring kan brukes til å bestemme både uforstyrret skjærstyrke, omrørt skjærstyrke i leire og leirig silt.

Vingeboring utføres ved at et bor med en vinge-liknende ende presses ned i grunnen og dreies med en bestemt hastighet. Det maksimale torsjonsmomentet som må til for å dreie vingen registreres, og det registrerte torsjonsmomentet kan omregnes til skjærstyrke i jordmaterialet.

Ved trykksondering presses en sylindrisk sonde med konisk spiss ned i grunnen med en konstant penetrasjonshastighet. Under nedpressingen blir både spissmotstanden og sidefriksjonen mot den sylindriske delen målt /12/.

I laboratoriet kan konusforsøk, treaksialforsøk eller enaksialt trykkforsøk benyttes for å finne jordas uforstyrrede skjærstyrke. Konusforsøk kan også benyttes til å finne leiras omrørte skjærstyrke.

I et treaksialforsøk bygges vanligvis en prøve, fra en 54 mm prøvesylinder med høyde mellom 90 og 100 mm, inn i en gummimembran og settes i en trykkcelle. Deretter konsolideres prøven til en bestemt spenning- og deformasjonstilstand, før prøven videre belastes eller avlastes til brudd. Under forsøket kan celletrykket, poretrykket i prøven, vertikal tilleggsbelastning og vertikal deformasjon av prøven registreres.

Et enaksialt trykkforsøk kan utføres på fastere kohesjonsmateriale, og det benyttes vanligvis sylindriske prøver fra en 54 mm prøvesylinder med høyde på ca. 100 mm. Under forsøket påføres prøven en økende vertikalspenning og prøven trykkes sammen til brudd oppstår. Det blir kontinuerlig registrert vertikalspenning (evt. kraft) og vertikaldeformasjon. Skjærspenning blir beregnet som vertikalspenningen dividert med to, og den uforstyrrede skjærstyrken er den maksimale skjærspenningen som ble oppnådd.

I et konusforsøk slippes en konus med standardisert utforming og vekt (avhengig av materialet) ned i en leirprøve. Konusens synk inn i prøven registreres, og ut ifra erfaringsdata kan skjærstyrken bestemmes. For å bestemme den omrørte skjærstyrken, omrøres leirprøven i en liten skål, før man igjen slipper konusen ned i prøven og registrerer innsynkingen /10/.

### 3.1.2 Sensitivitet

Sensitivitet,  $S_t$ , er forholdet mellom den uforstyrrede og omrørte skjærstyrken i leira målt ved samme vanninnhold. Leiras sensitivitet forteller dermed hvor mye av jordas styrke som går tapt når den blir omrørt /3/.

### 3.1.3 Plastisitetsindeks

Plastisitetsindeksen,  $I_p$ , er forskjellen mellom flytegrense og plastisitetsgrense. Jordas flytegrense,  $w_L$ , uttrykker vanninnhold [%] i materialet i det materialet går fra en plastisk til en flytende tilstand. Plastisitetsgrensen,  $w_p$ , er laveste vanninnhold [%] i et omrørt materialet hvor materialet fortsatt oppfører seg plastisk /5/.

Flytegrensen og plastisitetsgrensen bestemmes ved laboratorieforsøk. Flytegrensen (støtflytegrense) kan finnes ved bruk av Casagrandes flytegrenseapparat. Apparatet fungerer ved at man påfører en skål med leire 25 slag. Dette gjøres ved hjelp av en sveiv som beveger skålen opp og ned. Leiren i skålen har på forhånd blitt delt i to av en fure på 12,5 mm. Om furen er tilfredsstillende lukket etter 25 slag, antas leira å være ved sin flytegrense. Leira veies i denne tilstanden, før den tørkes.

Plastisitetsgrensen bestemmes ved utrulling av jordprøver. Utrullingen skjer etter en bestemt fremgangsmåte, og vanninnholdet i prøven bestemmes når prøven ikke lenger kan rulles ut til en bestemt tykkelse (diameter), men smuldrer opp.

### 3.1.4 Flyteindeks

Flyteindeks,  $I_L$ , er forskjellen mellom det naturlige vanninnholdet i materialet og plastisitetsgrensen uttrykt i prosent av plastisitetsindeksen /6/.

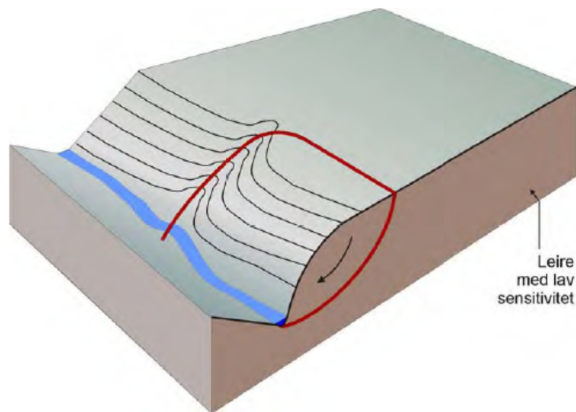
Det naturlige vanninnholdet bestemmes i laboratoriet ved at jordprøven blir veid før og etter tørking. Vektdifferansen mellom opprinnelig prøve og den tørkede prøven tilsvarer prøvens vanninnhold, og vanninnholdet oppgis som masseprosent av den tørkede prøvens masse /10/.

### 3.1.5 Konsolidering

Jorda kan enten være normalkonsolidert eller overkonsolidert. En normalkonsolidert leire opplever i dag dens største vertikale belastning, mens en overkonsolidert leire har vært utsatt for større belastning tidligere. En overkonsolidert leire vil dermed ha en høyere skjærstyrke enn en normalkonsolidert leire. Det er vanlig å benytte forkonsolideringsforholdet, OCR, for å beskrive jordas konsolideringstilstand. Forkonsolideringsforholdet er forholdet mellom høyeste opplevde spenning og dagens spenning. En normalkonsolidert leire vil derfor ha OCR lik 1.

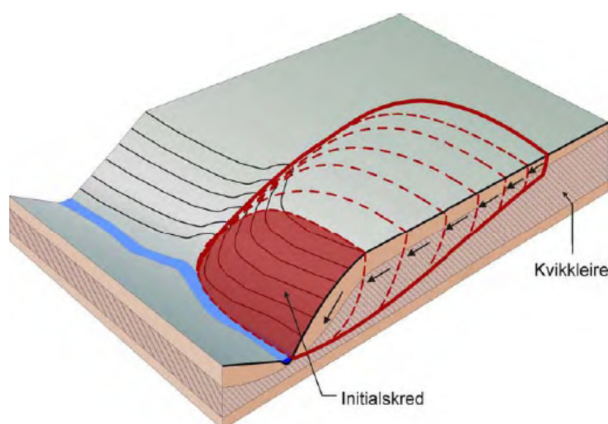
### 3.2 Skredtyper

Det kan skilles mellom fire ulike typer kvikkleireskred avhengig av morfologi og mekanismene i skredet. Det er ikke uvanlig at store skred er en kombinasjon av flere ulike skredtyper /3/. Enkelt rotasjonsskred er skred med sirkulære glideflater, og inntreffer ved homogene grunnforhold /4/. Bakkanten av skredet befinner seg ofte i skråningen eller rett bak skråningstoppen. Slike skred er ofte initialscred, og oppstår ikke nødvendigvis i kvikkleire.



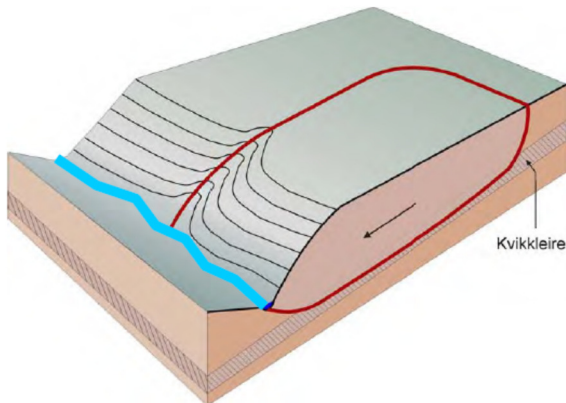
Figur 1 Enkelt rotasjonsskred /2/

En annen skredtype er retrogressive flyteskred, også bare kalt flyteskred. Retrogressive flyteskred er skred som utvikler seg i bakkant av et mindre initialscred, og vil grave seg bakover til skredkanten blir stabil eller møter en barriere i grunnen i form av berg eller et ikke-sensitivt jordlag. Denne bakovergripende utvikling skjer som regel med rotasjon i bruddflaten, og utviklingen kan gå svært raskt dersom det er kvikkleire i skråningen. Dette er det mest sannsynlige skredforløpet om den utløsende årsaken er lokal eller av mindre utbredelse /4/.



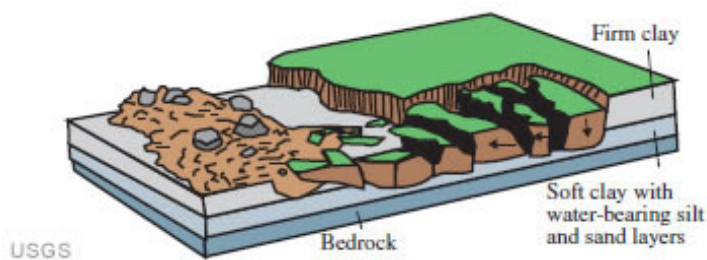
Figur 2 Initialscred og retrogressivt flyte skred /2/

En tredje skredtype er flakskred. Her vil store områder skli ut som et sammenhengende flak. Flakskred kan inntreffe der grunnforholdene består av et bløtt sensitivt topplag over faste masser. For at en flakliknende utglidning skal kunne oppstå må det sensitive topplaget være kontinuerlig over et større område, og det kreves ofte et stort terrenginngrep for utløsning /4/. En slik utløsning kan både være fra et initialskred, hvor bruddutviklingen vil gå mot bevegelsesretningen, eller utløses av en økt belastning eller forskyvning i skråningstoppen /3/.



Figur 3 Flakskred /2/

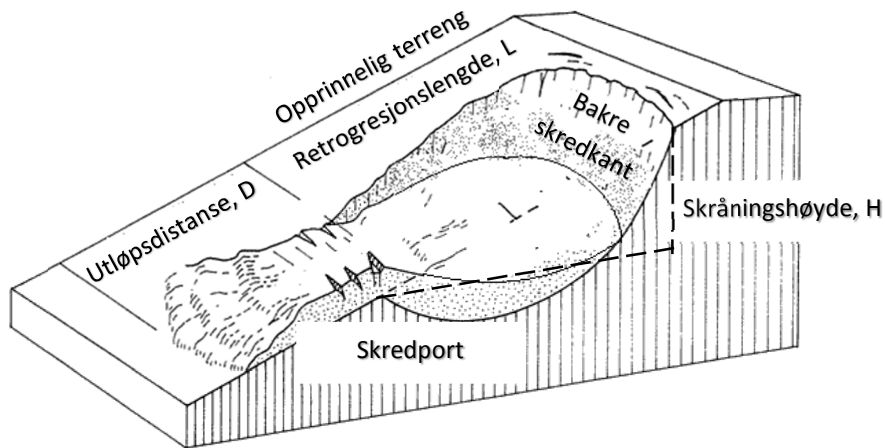
Den siste skredtypen er spredningsskred. Ved denne typen skred er terrenget ofte flatt, og det er en kvikkleiresone under et fastere lag som blir omrørt. Dette fører til vertikal innsynking og sidelengs spredning /3/. Spredningsskred forekommer sjeldent i Norge, men er en vanlig skredtype i Canada.



Figur 4 Spredningsskred /11/

### 3.3 Definisjon av skredets geometri

I dette studiet er utløpsdistanse, retrogresjonsdistanse og skråningshøyde definert som vist i figur 5. Dette er en vanlig måte å definere skredstørrelser på, og er i overensstemmelse med andre studier som det blir referert til.



Figur 5 Skredgropas geometri

## 4. Utbredelse av kvikkleireskred

Det er utallige faktorer som vil påvirke faren for kvikkleireskred og kvikkleireskredets utbredelse. Disse faktorene er:

- (1) Topografiske forhold som terrenghøydeforskjell, skråningshelning og avgrensning i terrenget som raviner og større daler.
- (2) Geologiske og geotekniske forhold som tykkelse av kvikkleirelag, utbredelse av kvikkleirelag, tykkelse på tørrskorpe, dybde til kvikkleirelag, poretrykk, og dybde til fjell eller faste lag.
- (3) Kvikkleirelagets egenskaper, som sensitivitet, omrørt skjærstyrke, uforstyrret skjærstyrke, flyteindeks, plastisitetsindeks og tyngdetetthet.

I de følgende delkapitlene gis en nærmere beskrivelse av tidligere studier av kvikkleireskreds utvikling.

### 4.1 Retrogresjonsdistanse og skråningshøyde (L/H).

I 1979 gjorde Aas /1/ en tilbakeberegning av flere kjente kvikkleireskred, og kom fram til at forholdet mellom retrogresjonsdistanse, L, og skråningshøyde, H, varierer mellom 7 og 14.

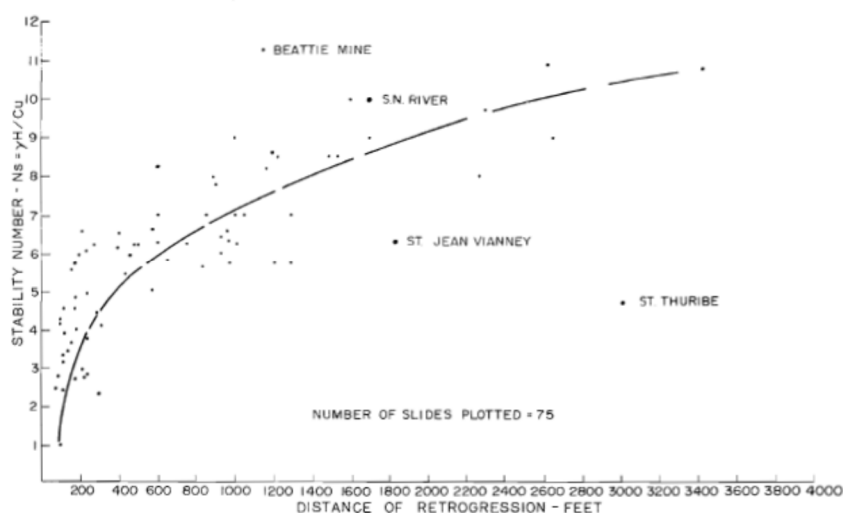
I 1983 viste Odd Gregersen med enkle teoretiske betraktninger at et flakskred maksimalt vil strekke seg med en avstand på 13 x skråningshøyden innover fra skråningsfoten ( $L/H=13$ ) /1/.

Disse to studiene har lagt grunnlaget for dagens praksis ved kartlegging av kvikkleiresoner i Norge, hvor det i retningslinjene for kvikkleirekartlegging er satt som et kriterium at et skred maksimalt vil få en lengde på 15 x skråningshøyden.

I 2012 ble det imidlertid gjort en ny sammenstilling av 37 norske kvikkleireskred /4/. Sammenstillingen viste at flere norske kvikkleireskred har  $L/H > 15$ . Det oppfordres derfor til forsiktighet ved bruk av kriteriet for vurdering av retrogresjon i kvikkleireskred.

### 4.2 Stabilitetsnummer

Ved et skred kan stabiliteten av bakre skredkant kvantifiseres ved bruk av parameteren stabilitetsnummer. Stabilitetsnummeret,  $N_c$ , er definert som  $\frac{\gamma H}{c_u}$ . I 1974 gjorde Mitchell & Markell en studie av 41 detaljert beskrevne kvikkleireskred i øst-Canada /14/. De tok utgangspunkt i at bakre skredkant, etter et initialskred, må være ustabil for at et skred skal kunne utvikle seg retrogressivt. De fant at stabilitetsnummer var en styrende parameter for kvikkleireskreds totale retrogresjonsdistanse (se figur 6), og fastslo videre at  $N_c > 6$  var nødvendig for at en retrogressiv bruddutvikling kunne oppstå.



Figur 6 Retrogresjonsdistanse i relasjon til stabilitetsnummer. Mitchell & Markell 1974.

Tavernas et al. /7/ fant derimot at  $N_c$  måtte være større eller lik fire for at et skred skulle kunne fortsette å utvikle seg retrogressivt. Det ble, i motsetning til Mitchell & Markells funn, presisert at dette kun var en terskelverdi for at videre skredutvikling kunne skje, og at skredkantens stabilitetsnummer ikke kunne korreleres med endelig retrogresjonsdistanse.

Leroueil et al. /8/ fant at muligheten for videre skredutvikling etter et initialskred var avhengig av både stabilitetsnummeret og plastisitetsindeksen. Det ble foreslått at kravet for videre skredutvikling for leirer med plastisitetsindeks rundt 10 var  $N_c > 4$ , mens kravet for leirer med plastisitetsindeks rundt 40 var  $N_c > 8$ .

#### 4.3 Omrørt skjærstyrke, sensitivitet, flytegrense og flyteindeks

En studie av Lebuis et al. /9/ viste at skred med store retrogresjonsdistanser kun kan oppstå i leirer hvor den omrørte skjærstyrken,  $c_{ur}$ , er mindre enn 1 kPa, gitt en flyteindeksen større enn 1,2.

At den omrørte skjærstyrken må være mindre enn 1 kPa gir et minimumskrav for utviklingen av store retrogressive skred, men kravet er ikke tilstrekkelig for å indentifisere retrogresjonsfaren, da også flere andre områder oppfylte kravet uten at et retrogressivt skred utviklet seg.

Det samme kravet kan også uttrykkes ved bruk av leiras sensitivitet,  $S_t$ . Mitchell og Huston fant en korrelasjon mellom flyteindeks og sensitivitet, som gir en sensitivitet på  $\sim 30$  ved  $I_L = 1,2$ . Kravet blir da at stor retrogresjon kun kan skje ved  $S_t > 30$  /3/.

Tavernas et al. /7/ vurderte dataene fra Lebuis et. als /9/ studie, og fant at retrogressiv bruddutvikling også var avhengig av leiras flytegrense. Et tilleggskrav om at leiras flytegrense må være lavere enn 40% for at store retrogresjon skal oppstå, ble derfor foreslått /7/.

#### 4.4 Kvikkhet (Quickness)

Thakur og Degago /15/ foreslo en ny parameter, «kvikkhet», for å kvantifisere flytepotensialet i sensitive leirer. Kvikkheten til en leire kan finnes ved laboratorieforsøk. De fant at  $Q = 15\%$  gir en nedre terskelverdi for om store retrogressive skred kan utvikle seg. Det ble også vist at  $Q = 15\%$  korresponderte til  $c_{ur} = 1$  kPa, og terskelverdien er dermed i overenstemmelse med tidligere studier av omrørt skjærstyrke og retrogresjon.

#### 4.5 Kriterier for retrogressiv skredutvikling

I overenstemmelse med de overnevnte parameterne presenteres her fire kriterier som er avgjørende for utvikling av retrogressive skred.

##### 1. Det må gå et initialskred

Uten at et initialskred blir utløst vil det heller ikke være fare for utvikling av et retrogressivt skred. For at et skred skal bli utløst trengs en endring i dagens forhold. En slik endring, eller utløsende årsak, kan enten være naturlig eller den kan være menneskeskapt. Naturlige årsaker kan være erosjon, økt poretrykk på grunn av mye nedbør eller jordskjelv. Menneskeskapte årsaker kan være utgraving i skråningsbunn, pålastning av skråningstopp, fjerning av vegetasjon, sprenging eller andre rystelser, eller endring av hydrologi ved utbygging.

Skråningen må også ha en geometri som gjør at den kan bli ustabil. I Norge vurderes en skråning som potensielt farlig dersom den er brattere enn 1:15 og terrenghøydeforskjellen er på 10 meter eller mer.

##### 2. Bakre skredkant må være ustabil

Etter at et initialskred har gått må bakre skredkant være ustabil for at skred skal fortsette å utvikle seg retrogressivt. Her vil stabilitetsnummeret være avgjørende.

##### 3. Leira må kunne bli omrørt

Leiras omrøringsenergi vil være avgjørende for om den tilførte energien til leira er stor nok til å omrøre leira så den blir flytende. Dersom leira ikke blir flytende, vil ikke skredet utvikle seg videre.

Tavernas et al. /7/ foreslår at omrøringsgraden av kvikkeleira må være større enn 70% for retrogressiv bruddutvikling.

##### 4. Leira må kunne flyte ut av skredgropa om den blir omrørt

For å kunne flyte ut av skredgropa må kvikkeleira ha en veldig lav omrørt skjærstyrke. Lebus et al. /9/ fant at kravet var  $C_{ur} < 1$  kPa og  $I_L > 1,2$ .



En annen måte å vurdere flytepotensialet i sensitive leirer er kvikkhet, som ble foreslått av Thakur og Degago /15/.

## 5. Dagens praksis i Norge

For å forhindre store ulykker ved kvikkleireskred har det siden 1980 pågått et kartleggingsarbeid av kvikkleiresoner i Norge. For å anslå størrelsen på kvikkleiresonene, og om det i det hele tatt er mulig at et skred blir utløst, benyttes det topografiske kriterier. De samme kriteriene som benyttes i kartleggingsarbeidet, skal benyttes ved all generell utbygging i områder hvor det har blitt påvist kvikkleire.

De topografiske kriteriene er:

1. Jevnt hellende terreng brattere enn 1:15 vurderes
2. Terreng høydeforskjeller på 10 m eller mer vurderes
3. Skred vil maksimalt få en lengde tilsvarende  $15 \times H$

Det presiseres at det likevel vil kunne gå skred ved mindre kritiske topografiske forhold, og at det derfor ved lokale prosjekter burde vurderes å benytte mer konservative kriterier.

I tillegg til å bestemme størrelsen av en kvikkleiresone, vurderes også faren for et eventuelt kvikkleireskred. Dette er en såkalt faregradsvurdering av kvikkleireskred, og det er angitt kriterier for topografiske forhold, geologiske/geotekniske forhold og terrengendringer.

Av topografiske og geotekniske forhold er det antatt at en skråningshøyde større enn 30 m, med et forkonsolideringsforhold mellom 1 og 1,2, poretrykk over 30 kPa, tykkelse av kvikkleirelag større enn  $H/2$  og sensitivitet over 100 vil gi høyeste faregradsklasse. Det er viktig å påpeke at faregradsklassene kun sier noe om sannsynligheten for skred, og at det også kan gå skred i områder med lav faregrad. For flere detaljer se figur 7, som er hentet fra artikkelen «Metode for kartlegging og klassifisering av faresoner, kvikkleire» /1/.

Faktorer	Vekt tall	Faregrad, score				
		3	2	1	0	
Tidligere skredaktivitet	1	Høy	Noe	Lav	Ingen	
Skråningshøyde, meter	2	>30	20 – 30	15 – 20	<15	
Tidligere/nåværende terrengnivå (OCR)	2	1,0-1,2	1,2-1,5	1,5-2,0	>2,0	
Poretrykk	Overtrykk, kPa:	3	> + 30	10 – 30	0 – 10	Hydrostatisk
	Undertrykk, kPa:	-3	> - 50	-(20 – 50)	-(0 – 20)	
Kvikkleiremektighet	2	>H/2	H/2-H/4	<H/4	Tynt lag	
Sensitivitet	1	>100	30-100	20-30	<20	
Erosjon	3	Aktiv/glidn.	Noe	Lite	Ingen	
Inngrep:	forverring	3	Stor	Noe	Liten	Ingen
	forbedring	-3	Stor	Noe	Liten	
Sum		51	34	16	0	
% av maksimal poengsum		100 %	67 %	33 %	0 %	

Figur 7 Faregradsklasser. Klassene tilsvare; 1: lav, 2: middels og 3: høy



Skred	Type	Retrogresjon L [m]	H	Volume [m <sup>3</sup> ]	C <sub>ui</sub> [kPa]	C <sub>ur</sub> [kPa]	Sensitivity S <sub>t</sub> [-]	Plastisitets- indeks I <sub>p</sub> [%]	Kilde
Hyggen	R/F	73,00	10,00		15,00				/4/ /26/
Ilsvika	R		25,00	2,5E+06	31,80				/26/
Kattmarka	R	300,00	20,00	4,0E+05	25,00	0,40	63,00	8,00	/4/ /42/
Kokstad	R	267,00	37,00	4,0E+05					/43/
Lade	R	40,00	5,00	5,0E+03	11,00	0,31	35,00		/4/ /44/
Langørjan	R			1,1E+07					/4/
Leirfossen	?			7,5E+07					/45/
Leistad	F	250,00	12,00		17,00	0,15	110,00	6,00	/4/
Lersbakken	F	65,00		7,5E+04	23,00		50,00		/46/
Lillebukt,Stjernøy 1	R								/26/
Lillebukt,Stjernøy 2	R								/26/
Lodalen,Oslo	ER	40,00	10,00	1,0E+04	50,00	17,00	3,00	17,10	/47/
Lund	R			4,6E+06					/4/
Lyngen	R	153,00	23,00	2,5E+05	15,00	0,30	52,00		/48/ /49/
Nedremule, Byneset	R								/51/
Nidelva	R								/20/
Olderdalen	R	1600,00	80,00	2,5E+07	29,15	0,42	69,32		/4/
Orkdalsfjorden	R			2,5E+07					/26/
Othilienborg	R	1686,30	124,00	7,0E+07	24,50	0,30	82,60		/4/
Rissa	R/F	1350,00	26,00	5,5E+06	25,00	0,25	100,00	5,00	/52/
Røesgrenda	R			1,0E+05			70,00	8,00	/53/
Rørdal	?			3,3E+06					/4/
Sandnessjøen	R		15,00	7,5E+04					/26/
Selnes	R	116,00	10,00	1,4E+05	20,00	0,20	100,00	5,00	/54/
Sjetnemarka	R	1000,00		3,0E+06	22,84	0,27	85,60		/4/
Skjelstadmarka	R	600,00	15,00	2,0E+06	66,00	0,83	80,00		/55/
Stavset	R			8,0E+05					/4/
Stokke	R								/56/
Tiller	R			5,5E+06	19,00	0,20	90,00	4,00	/4/
Ullensaker	R	250,00	5,00	2,0E+05	17,00	0,40	42,00	6,70	/57/
Verdal	R	2000,00	40,00	5,5E+07	60,00	0,20	300,00	5,00	/58/
Vibstad	R	250,00	9,00	1,0E+06	40,00	5,00	8,00	17,00	/59/

Tabell 1 Utdrag av oppdatert skredkatalog. F=Flakskred, R=Retrogressivt flyteskred, S=Spredning

## 6.1 Kommentarer til benyttede data

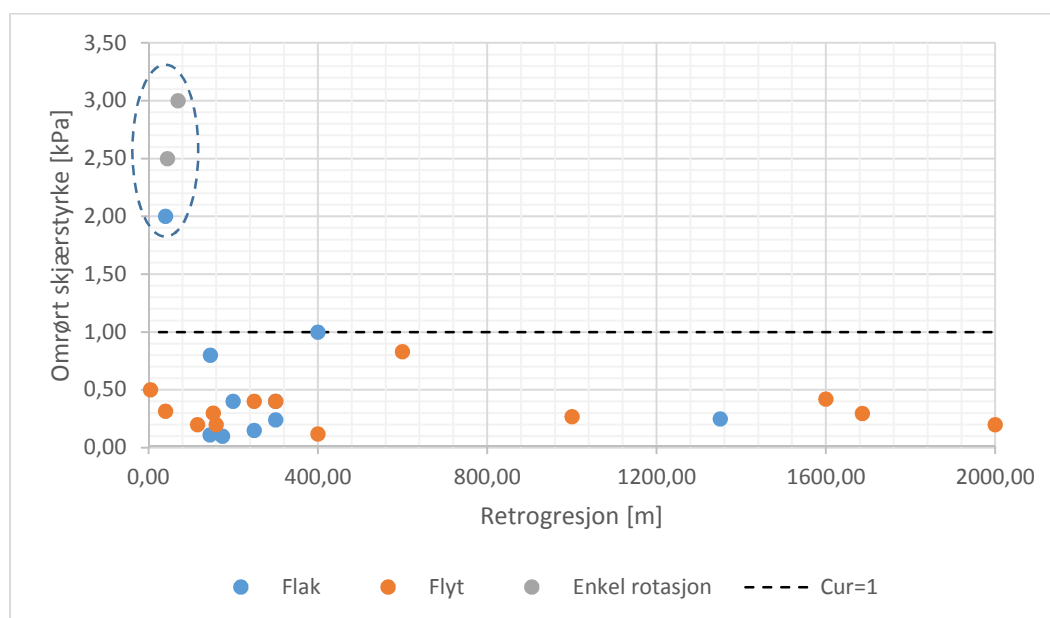
Skredene i skreddatabasen har blitt definert som flyteskred, enkle rotasjonsskred eller flakskred. Det er likevel viktig å påpeke at kvikkleireskred ofte er en blanding av ulike skredmekanismer, og flere av skredene er derfor en blanding av flyt-, flak- og spredningsskred.

Skreddatabasen er ikke komplett, da det er ulik mengde informasjon som er tilgjengelig fra de ulike skredhendelsene. Det vil derfor variere hvor mange skredhendelser som kan tas med i betraktning, når de ulike jordparameterne skal vurderes. Der det manglet opplysninger om leiras tyngdetetthet, er  $\gamma = 20$  kPa antatt. Dette for å fortsatt kunne benytte andre innsamlede data ved utregning av stabilitetstall og omrøringsenergi.

De fleste oppgitte verdiene for skjærstyrke er målt ved konusforsøk. Konusforsøk har en tendens til å undervurdere jordas skjærstyrke, og noen verdier kan derfor avvike fra virkeligheten. I tillegg kommer de innsamlede dataene fra kilder med varierende detaljering hva gjelder nøyaktige beskrivelser og gjennomførte felt- og laboratorieforsøk.

Alle registrerte skred vil ha en oppgitt retrogresjonsdistanse uavhengig om det har vært retrogresjon eller om skred har begrenset seg til et initialskred. Grunnen til dette er at det ved definisjon av skredgropas geometri ble valgt å måle retrogresjonsdistansen fra skråningsfoten. Dermed inngår initialskredets lengde i den definerte retrogresjonsdistansen.

## 6.2 Omrørt skjærstyrke

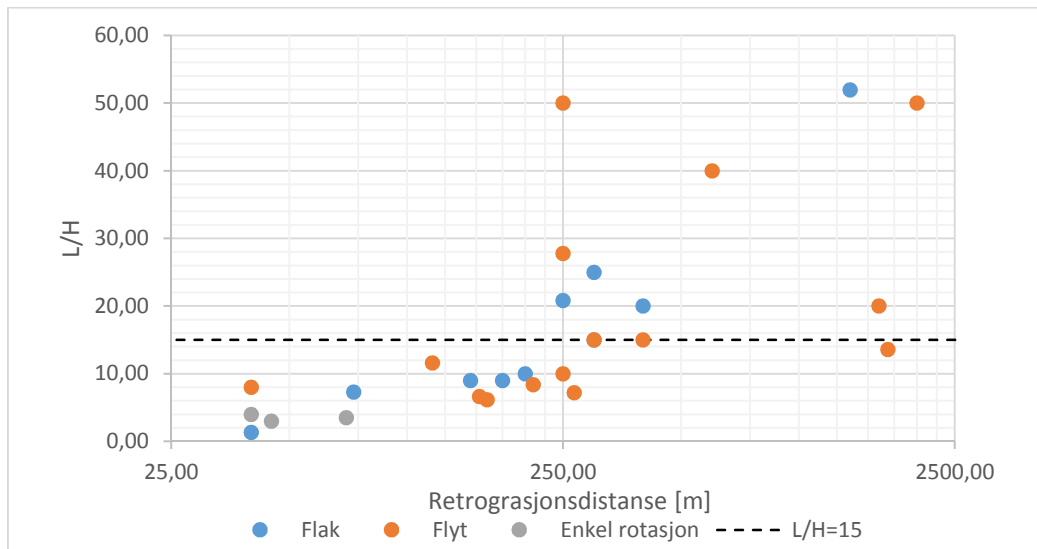


Figur 8 Omrørt skjærstyrke og retrogresjon

En sammenlikning av kvikkleireskredenes retrogresjon og omrørt skjærstyrke viser at retrogressive skred kun har utviklet seg der den omrørte skjærstyrken er mindre enn 1.

Dette er i overenstemmelse med tidligere studier gjort av blant annet Thakur & Degago /19/. Tre unntak er ringet inn i figur 8. Disse skredene er sannsynligvis store initialskred, og har ikke utviklet seg retrogressivt (se kommentar i kapittel 6.1).

### 6.3 Skråningshøyde

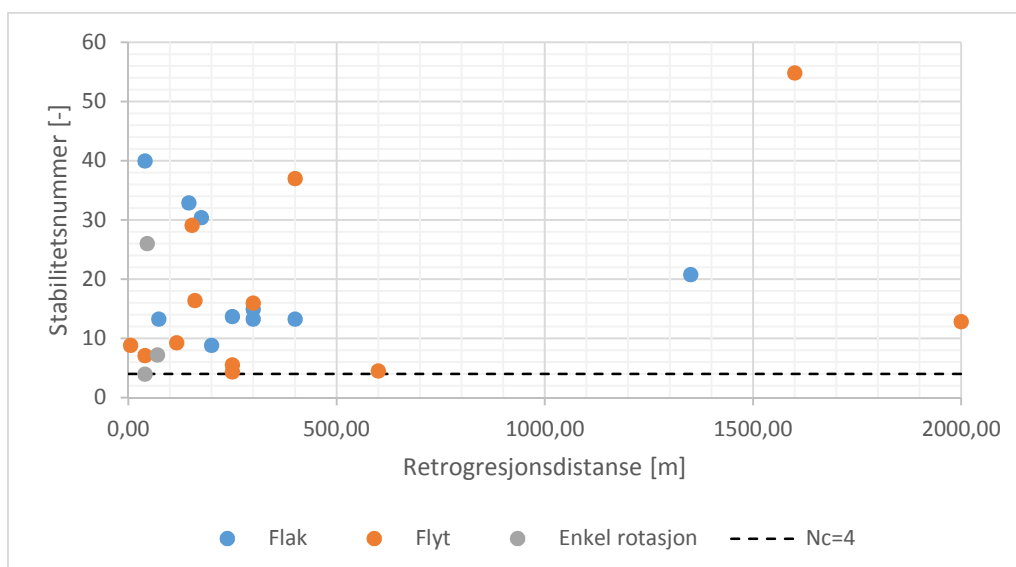


Figur 9 Skråningshøyde og retrogresjon

Dagens praksis som baserer seg på at et skred maksimalt vil ha en retrogresjon som tilsvarer 15 ganger skråningshøydens, ser ut til å være et godt estimat for skred med retrogresjonsdistanser mindre enn 250 m (se figur 9). Ved svært store skred viser det seg derimot å være flere avvik fra kriteriet  $L/H \leq 15$ .

### 6.4 Stabilitetsnummer

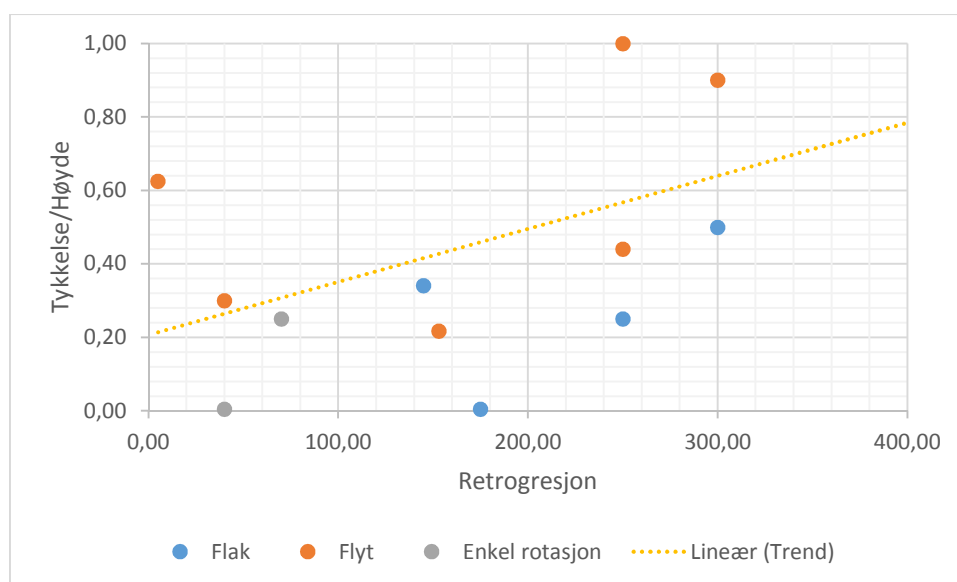
De beregnede stabilitetsnumrene for norske kvikkleireskred bekrefter en tidligere studie av Tavernas et al. /7/ som viser at  $NC > 4$  setter en nedre terskelverdi for om skred kan utvikle seg retrogressivt (se figur 10). I studien til Mitchell & Markell /14/ blir det også antydnet at høyere stabilitetsnummer vil føre til en større retrogresjonsdistanse. Resultatene fra denne studien viser derimot ingen tydelig sammenheng mellom stabilitetsnummer og retrogresjonsdistanse.



Figur 10 Stabilitetsnummer og retrogresjon

### 6.5 Tykkelse av kvikkleirelag

27 % av skredene i denne studien har gått i områder som ville hatt faregrad 0 eller 1 (lav faregrad) ved vurdering av tykkelsen på kvikkleirelaget. Mye tyder dermed på at tykkelsen på kvikkleirelaget vanligvis ikke vil være den avgjørende faktoren for om et kvikkleireskred vil utvikle seg. Likevel gir figur 11 en indikasjon på at jo større del av skråningen som består av kvikkleire, jo lengre kan skredets retrogresjon bli. Dette er forventet ut ifra logiske betraktninger.



Figur 11 Tykkelse på kvikkleirelag og retrogresjon

## 7. Omrøringsenergi

Omrøringsenergi er definert som den tøyingsenergien som er nødvendig for at et materiale skal bli helt omrørt.

Målet med å benytte omrøringsenergi til vurdering av potensiell skredfare, er å kun måtte forholde seg til én parameter. Tavernas et al. /7/ foreslår at muligheten for retrogresjon burde vurderes ved en sammenlikning mellom den nødvendige energien som trengs for å omrøre en leire (omrøringsenergi) og tilgjengelig energi (potensiell energi) i skredhendelsen.

### 7.1 Energibetraktning i skred

Hvordan et skred utvikler seg etter at en skråning har gått til brudd, er avhengig av hvordan den tilgjengelige energien (skråningens potensielle energi) fordeler seg på de ulike energikomponentene.

Idet en skråning går til brudd, frigjøres skråningens potensielle energi. Deler av den potensielle energien vil gå over til friksjonsenergi, mens resten av energien vil bli brukt til enten å bryte opp og omrøre leira, eller til å bevege leirmassene.

Energien som er nødvendig for å bryte opp og omrøre leira kalles omrøringsenergi ( $RE$ ), mens energien som går med til bevegelse av leirmassene er den kinetiske energien ( $E_K$ ). Skråningen vil dermed få en energibalanse beskrevet ved formel (1) /60/.

$$\Delta E_P - \Delta E_F - \Delta RE - \Delta E_K = 0$$

*Formel 1 Energibalanse*

Formel (1) viser at jo mindre energi som trengs for å bryte opp og omrøre leira, jo mer energi er tilgjengelig for å bevege leirmassene, og jo større utstrekning kan skredet få. Det er også naturlig å anta at masser som lett blir omrørt, og dermed oppnår en lav skjærstyrke, lettere flyter ut av skredgropen og etterlater seg høyere skredkanter. Dette vil igjen øke muligheten for videre retrogresjon. Omrøringsenergi kan derfor spille en viktig rolle i skredutviklingen.

### 7.2 Laboratorieforsøk av Tavernas et al. (1983)

Tavernas et al. /7/ studerer omrøringsenergien til en rekke sensitive leirer fra Quebec i Canada. Målet for studien er å knytte resultater fra laboratorieforsøk med observerte retrogressive kvikkleireskred.

Forsøkene som ble gjennomført på laboratoriet skulle best mulig gjenspeile de prosessene i kvikkleireskred som fører til at potensiellenergi overføres til leirmassen, og gjør at leirmassen blir omrørt. De viktigste av prosessene som fører til energioverføring i kvikkleireskred er:

- (1) Skjæring



- (2) Tøyning av leirmassene i en sone eller langs en bruddflate på grunn av forskyvning, sammenpressing og ekstrudering av relativt intakte leirblokker.
- (3) Fallende leirblokker som treffer bunnen av skredgropen.
- (4) Innvirkning på leirblokker fra annen jord eller fallende objekter.

For å simulere disse prosessene ble det gjennomført fire ulike tester i laboratoriet: leirprøver ble utsatt for fritt fall mot en hardoverflate, fallende objekter ble sluppet på intakte leirprøver, leirprøver ble ekstrudert gjennom en smal åpning og det ble gjennomført skjærforsøk på leirprøver.

Etter alle forsøkene ble skjærstyrken på den forstyrrede leira målt, men ettersom ingen av forsøkene hadde ført til fullstendig omrøring av leirprøvene, ble det definert en omrøringsgrad for å kunne sammenligne resultatene. Omrøringsgraden ble definert med referanse til den uforstyrrede skjærstyrken i leira og leiras skjærstyrke ved fullstendig omrøring.

$$I_r = \frac{c_u - c_{ux}}{c_u - c_{ur}} * 100$$

*Formel 2 Omrøringsgrad*

$c_u$  og  $c_{ur}$  er henholdsvis uforstyrret og omrørt skjærstyrke fra konusforsøk, mens  $c_{ux}$  er skjærstyrken til den delvise omrørte leira etter gjennomført forsøk.

Resultatene fra laboratorieforsøkene ble sammenstilt i diagrammer hvor omrøringsgraden ble plottet mot den normaliserte energien per volumenhet. Den normaliserte energien per volumenhet baserer seg på den tilførte energien i hvert forsøk, med referanse til volumet av leireprøven, og energien som må til for å oppnå initialbrudd i leiren. Grunnen til at den tilførte energien per volumenhet ble normalisert med referanse til energien som må til for å oppnå initialbrudd, er at omrøring av leire ikke starter før en initial maksstyrke overgås.

Tavernas et al. /7/ fant at energien, når den maksimale styrken i kvikkleire blir overgått, kan uttrykkes:

$$W_{LS} = 0,013\sigma'_p$$

*Formel 3 Energi ved maksimal styrke*

Hvor  $\sigma'_p$  er forkonsolideringsspenningen.

Den normaliserte energien per volumenhet,  $W_N$ , kan dermed uttrykkes som:

$$W_N = \frac{\text{Energi per volumenhet}}{0,013 * \sigma'_p}$$

*Formel 4 Normalisert energi per volumenhet*

For å beregne den potensielle energien i de studerte skredhendelsene, altså hvor mye energi som hadde vært tilgjengelig for omrøring av leiren i skredene, ble en enkel geometrisk betraktning benyttet. Den potensielle energien ble i likhet med energien fra laboratorieforsøkene normalisert med hensyn til energien ved leiras maksimale styrke. Den normaliserte potensielle energien ved et kvikkleireskred ble utledet til å være:

$$W_{Np} = 40 * \frac{\gamma H}{\sigma'_p}$$

*Formel 5 Normalisert potensiell energi*

$W_{Np}$  ble beregnet for alle skredhendelsene, og sammenliknet med  $W_N$  fra laboratorieforsøkene. Dette ga oppnådd omrøringsgrad i skredene. Resultatene viste seg å stemme godt overens med skredenes oppførsel. Et eksempel er et skred som kun hadde nok  $W_{Np}$  til å oppnå en omrøringsgrad på 35 %. Dette skredet stoppet etter initialscredet og utviklet seg ikke retrogressivt. For et annet skred, med  $W_{Np}$  nok til å oppnå en omrøringsgrad på 90%, ble det observert stor retrogresjon og en veldig flytende leirmasse.

Forsøkene viser dermed at omrøringsenergi kan relateres til skredets mulighet for retrogresjon, og som en konklusjon foreslås det at det kreves en  $I_R > 70\%$  for at et skred skal utvikle seg retrogressivt.

Tavernas fant at hver enkelt leire hadde ulik omrøringsenergi. Men Leroueil et al. (1996) /8/, som studerte dataene fra Tavernas et al. videre, fant at omrøringsenergien økte med høyere uforstyrret skjærstyrke og plastisitetsindeks. Dataene er presentert i tabell 2 og figur 12.

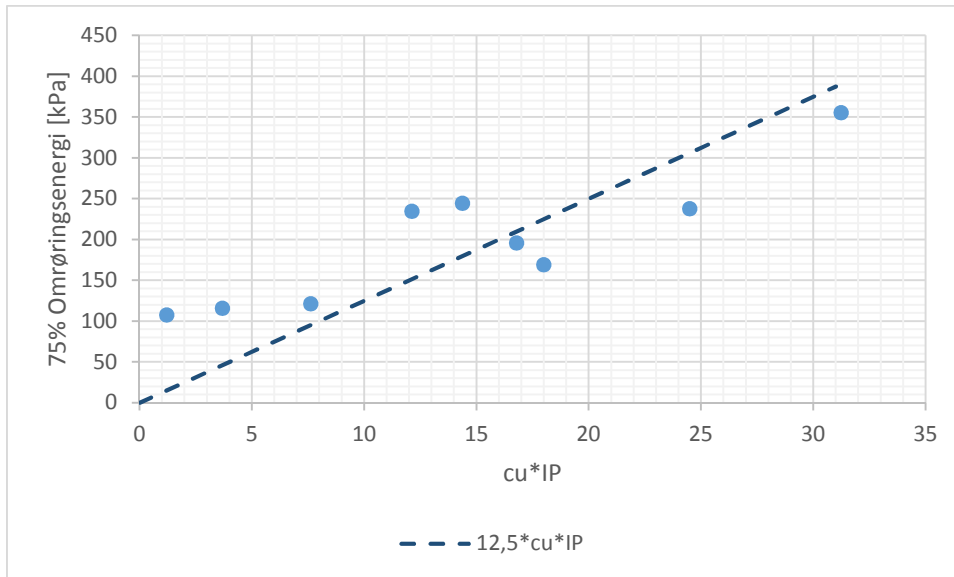
Det ble foreslått en formel som gir nødvendig energi for å oppnå en omrøringsgrad på 75 % /8/:

$$RE_{75\%} = 12,5 * C_u * I_p$$

*Formel 6 Leroueils empiriske formel for 75 % omrøringsenergi*

Prøve	Omrøringsenergi [kPa]	$c_{ui} * I_p$ [kPa]	$I_p$ [%]	$c_{ur}$ [kPa]	$S_t$ [-]
Saint Truibe 12m	107,6923	1,2048	5	0,07	600
Saint tribune 6m	115,7895	3,6948	20	0,4	137
Saint Albant 6.6 m	121,4575	7,6305	19	0,2	105
Sain Jean Vally 30 m	234,8178	12,1285	13	1,2	260
Sain Leone 4.8 m	244,5344	14,3775	46	1,1	27
Louiseville 6 m	195,9514	16,7871	46	1,3	30
Saint Leon 9.3 m	169,2308	17,992	42	2,1	24
Saint Hillari 5.6 m	238,0567	24,498	35	0,8	44
Moscouche 9 m	355,4656	31,245	30	1,3	105

*Tabell 2 Resultater fra forsøk utført av Tavernas et al.*

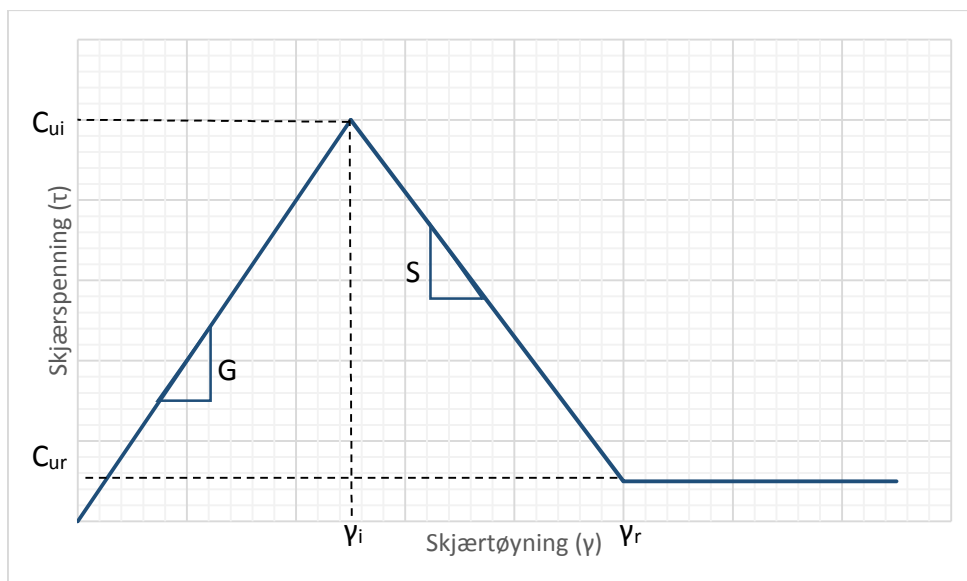


Figur 12 Omrøringsenergi fra Tavernas et al. laboratorieforsøk og Lerouells formel

### 7.3 Analytisk studie av omrøringsenergi

I en studie gjort av Thakur et al. /16/ ble det foreslått en analytisk ligning for omrøringsenergi. Ligningen baserer seg på en leire som oppfører seg lineært-elastisk ved herding og har et lineær spenning-tøyningsforløp ved oppmykning.

Figur 7 viser en slik idealisert leire, hvor  $G$  er definert som skjærmodulen,  $\gamma$  som skjærtøyningen,  $C_u$  som skjærstyrken og  $S$  som oppmykningsmodulen. Subskriptene «i» og «r» betegner henholdsvis maksverdi og gjenværende verdi. I denne figuren vil omrøringsenergien være arealet under grafen.



Figur 13 Idealisert spenning-tøyningsforløp i leire

Thakur et al. /16/ foreslo at omrøringsenergien, RE, kan beregnes ut ifra følgende formler:

$$RE = C_{ur} * \gamma_r - \frac{C_{ur}^2}{2G} + \frac{1}{2} * [(S_t - 1) * C_{ur}]^2 * \left[ \frac{1}{G} + \frac{1}{S} \right]$$

*Formel 7 Thakur et al. /16/ analytisk formel for omrøringsenergi*

Siden bidraget fra andre ledd i formel (7) er neglisjerbar og  $S_t - 1 \approx S_t$ , kan formel (7) bli forenklet:

$$RE = C_{ur} * \gamma_r + \frac{1}{2} * (S_t * C_{ur})^2 * \left( \frac{1}{G} + \frac{1}{S} \right)$$

*Formel 8 Thakur et al. /16/ forenklet analytisk formel for omrøringsenergi*

Formelen viser at omrøringsenergi er direkte relatert til omrørt skjærstyrke, sensitivitet og den gjenværende skjærtøyningen,  $\gamma_r$ , etter omrøring. G ble antatt å være lik  $150c_u$ , mens  $\gamma_i$  og  $\gamma_r$  ble satt til henholdsvis 0,005 og 3.

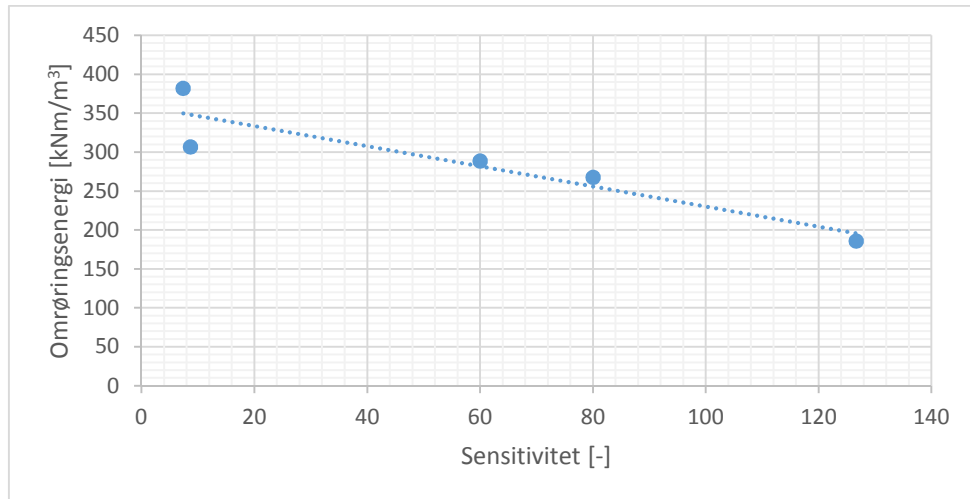
#### 7.4 Laboratorieforsøk utført av Rasmussen (2012)

Rasmussen /17/ gjennomførte, i mangel på standardiserte laboratoriemetoder, sin egen test på omrøringsenergi i sensitive leirer fra Ottawa, Canada. Målet med studien var å finne en metode som både omrørte leiren og målte energien som ble brukt for omrøring. Den målte omrøringsenergien skulle gi en bedre forståelse av leiras sensitivitet.

Det ble bygget et apparat som besto av en stålsylinder med en perforert plastplate i den ene enden og en akrylkloss i den andre enden. Akrylklossen ble brukt til å skyve leirprøven gjennom apparatet. Stålsylinderen ble koblet til en hydraulisk presse, som med en konstant hastighet skjøv leirprøven gjennom den perforerte plastplaten, mens benyttet kraft og tid ble registrert. Leiras omrørte skjærstyrke ble deretter målt ved konusforsøk.

Leirprøvene ble tilslutt omrørt videre for hånd, og det ble funnet at endringen av den omrørte skjærstyrken ved ekstra omrøring var liten. I tillegg viste det seg at leiras vanninnhold heller ikke endret seg mye ved denne testmetoden. Det ble dermed konkludert med at den benyttede testmetoden var en nyttig måte å måle omrøringsenergi på.

Rasmussen /17/ viste, med data fra det gjennomførte laboratorieforsøket, at leiras omrøringsenergi synker med økende sensitivitet (figur 14). Det ble presisert at det var et begrenset antall resultater, og at den målte sensitiviteten var svært variabel.



Figur 14 Omrøringsenergi og sensitivitet med data fra Rasmussen /17/

Prøve	$C_u$ [kPa]	$C_{ur}$ [kPa]	St [-]	$w_c$ [%]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$W_L$ [%]	$P_L$ [%]	$I_p$ [%]	$I_L$ [-]
SHL 3	48	0,2	240	53	16,3	34	19	15	2,3
SHL 4 -1	26	1,0	26	58,8	16	55	22	33	1,1
SHL 4 -2	24	0,3	80	58,8	16	55	22	33	1,1
SHL 5	38	0,3	127	82	15,6	64	24	40	1,5
SHL 7	31	2,7	11	62	16,3	56	24	32	1,2

Tabell 3 Materialelegenskaper for leira benyttet i Rasmussens forsøk

Dataene fra Rasmussens /17/ forsøk har i denne oppgaven blitt videre analysert (se tabell 4) for å kunne sammenliknes med laboratorieforsøk utført i forbindelse med oppgaven.

Prøve	$C_u$ [kPa]	$C_{ur}$ [kPa]	$C_{ux}$ [kPa]	Omrøringsgrad	Omrøringsenergi [kNm/m <sup>3</sup> ]
SHL 3	48	0,2	0,8	99 %	289
SHL 4 -1	26	1,0	3,0	92 %	307
SHL 4 -2	24	0,3	0,3	100 %	268
SHL 5	38	0,3	0,3	100 %	186
SHL 7	31	2,7	4,2	95 %	382

Tabell 4 Omrøringsenergi og omrøringsgrad fra Rasmussens forsøk

### 7.5 Nytt utført laboratorieforsøk

Det har tidligere blitt gjennomført svært få forsøk hvor energien som trengs for å omrøre leire har blitt målt og kvantifisert. Det er tidligere gjennomført to forsøk, på kanadisk leire, som er beskrevet i kapittel 7.2 og 7.4. Liknende forsøk på norske leirer har derimot aldri blitt beskrevet. Målet med forsøket var derfor å utvikle et apparat som på en enkel måte kunne

måle energien som ble tilført leira for å omrøre den, og benytte apparatet til å måle omrøringsenergi i norsk kvikkleire.

#### 7.5.1 Beskrivelse av laboratorieforsøk

Apparatet ble bygget for å kunne ekstrudere leirprøver hentet fra 54 mm prøvesylindere, og besto av fire hoveddeler:

- (1) En stålplate med diameter 54 mm, perforert med 13 hull á 7,5 mm diameter.
- (2) En stålsylinder med diameter 54 mm, for innbygging av leirprøven og føring av stampelet.
- (3) Et stempel som var koblet til en hydraulisk presse. Den hydrauliske pressen ble styrt fra en pc, og det kunne angis en konstant hastighet som stampelet skulle skyves frem med. Kraften i stampelet som opprettholdt den konstante hastigheten, ble registrert sammen med forskyvningen.
- (4) En skål ble satt under den perforerte platen for å samle opp det omrørte materialet.



Figur 15 Bilde til venstre viser apparatet i sin helhet, mens bildene til høyre viser stålsylinderen (øverst) og den perforerte platen (nederst). Bokstavene på bildet angir (1) Stålplaten (2) Stålsylinderen (3) Stempelet (4) Skålen for oppsamling av omrørt leire

I forkant av forsøkene ble alle komponenter smurt med olje for å minske friksjonen i apparatet, og dermed unngå en overestimert av den benyttede kraften. Deretter ble leirprøven plassert på den perforerte stålplaten, før den ble omsluttet av stålsylinderen. De

benyttede leirprøvenes høyde varierte fra 1,8 cm – 5,0 cm. Stempelet ble så ført ned gjennom stålrøret til leirprøvens overflate. I selve forsøket ble stempelet presset ned i leirprøven med en konstant hastighet på 1 mm/s, mens den tilkoblede pcen registrerte kraften og forskyvningen av stempelet. Stempelet ble ved de ulike forsøkene stoppet mellom 2 og 10 millimeter før det traff stållaten.

Tilsutt ble det gjennomført konusforsøk på den oppsamlete ekstruderte leira for å finne skjærstyrken.

På alle leirer som ble benyttet ble det også gjennomført forsøk for å finne udrenert skjærstyrke, omrørt skjærstyrke, densitet, naturlig vanninnhold, plastisitetsgrense og flytegrense.

Det ble benyttet leire fra tre forskjellige prøvesylindere hvorav to var fra Tiller og én fra Kveildsmarka. Det var kun nok leire til ett omrøringsforsøk på leira fra Kveildsmarka, mens det på prøvesylinder 1 og 2 fra Tiller ble utført henholdsvis tre og fire omrøringsforsøk.

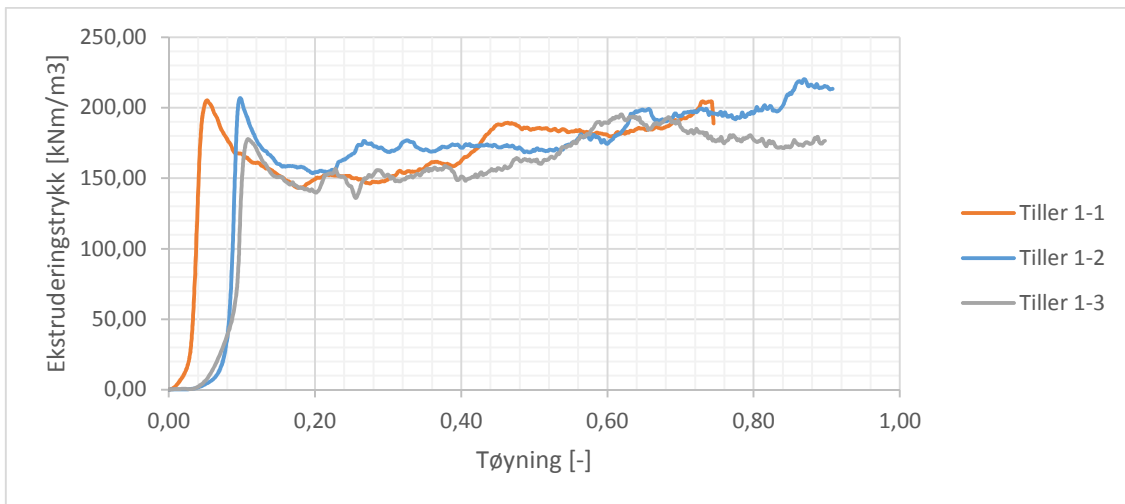
#### 7.5.2 Resultater fra laboratorieforsøk

Tabell 5 viser egenskapene til leira som ble brukt i forsøket.

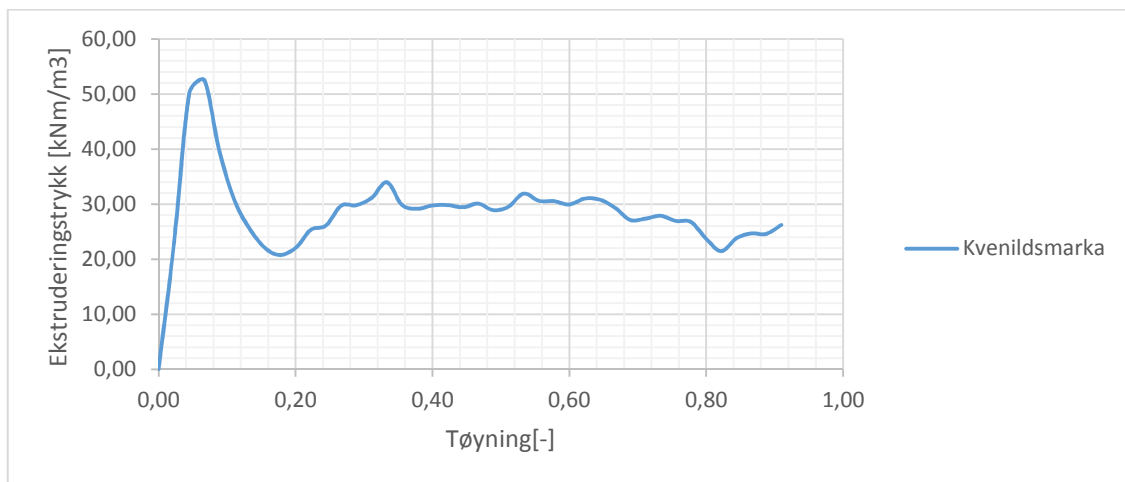
Sylinder	Dybde [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_u$ [kPa]	$C_{ur}$ [kPa]	St [-]	W [%]	$W_L$ [%]	$W_P$ [%]	$I_P$ [%]
Tiller 1	14,0 - 14,8	19,5	40	0,1	400	35	25	18	7
Tiller 2	12,0 - 12,8	19,8	36	0,1	360	38	28	22	6
Kveildsmarka	10,0 - 10,8	18,9	21,1	0,1	211	34,7	22,3	19,5	2,8

Tabell 5 Materialeegenskaper i leira benyttet i utført laboratorieforsøk

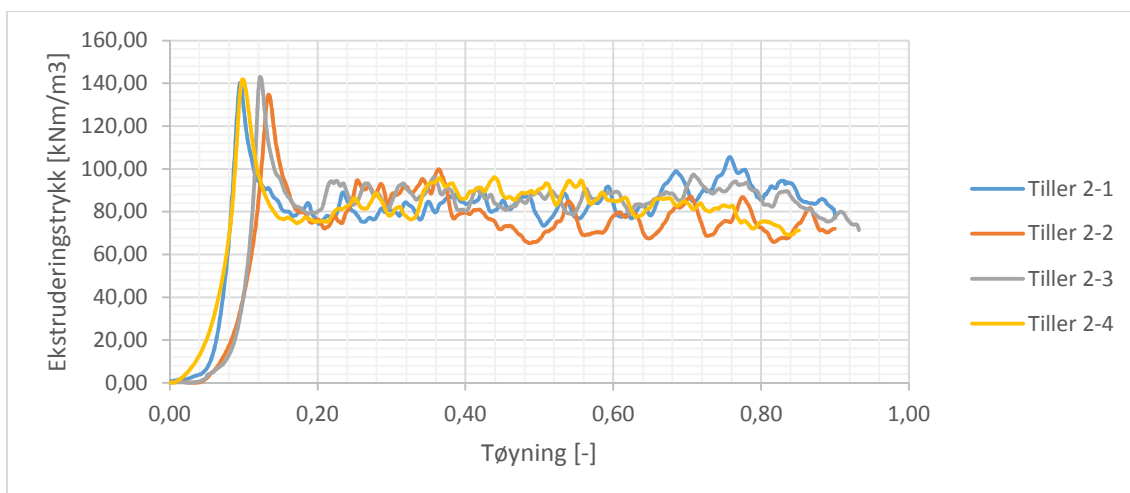
Med flere forsøk på leire fra samme sylinder ble det mulig å vurdere nøyaktigheten ved målingene. Ekstruderingskraften ble normalisert på de ulike leirprøvenes volum for lettere å kunne sammenlikne resultatene. Det viste seg å være relativt liten forskjell i resultatene fra målingene på leire fra samme sylinder, noe som indikerer at apparatet fungerte som planlagt. I målingene på leirprøver fra sylinder 1 på Tiller ble det registrert en økning i benyttet kraft mot slutten av ekstruderingen. Dette kan skyldes at prøvene fra denne sylinderen inneholdt enkelte skjellrester og grus. Målingene er presentert i figur 16, 17 og 18.



Figur 16 Resultater fra omrøringsforsøk på leire fra Tiller 1



Figur 17 Resultater fra omrøringsforsøk på leire fra Kvenildsmarka



Figur 18 Resultater fra omrøringsforsøk på leire fra Tiller 2



Hvor stor omrøringsgrad som ble oppnådd i de ulike forsøkene varierte fra 93,3 % - 100 %. Figur 19 viser bilde av den ekstruderte leira når den kom ut som noe som liknet kvernet kjøttdeig. Noen leirer kom også ut som en tykflytende suppe. For nærmere beskrivelser og beregnet ekstruderingsenergi vises det til tabell 6.

Prøve	Ekstruderingsenergi [kNm/m <sup>3</sup> ]	C <sub>ux</sub> [kPa]	Omrøringsgrad [%]	Merknad
Tiller 1-1	121,9	1,5	96,5 %	Kvernet kjøttdeig.
Tiller 1-2	149,4	0,29	99,5 %	Flytende. Noe grus/skjellrester i prøven.
Tiller 1-3	135,0	0,1	100,0 %	Flytende. Noe grus/skjellrester i prøven.
Tiller 2-1	71,5	0,78	98,1 %	Kvernet kjøttdeig
Tiller 2-2	64,1	0,9	97,8 %	Kvernet kjøttdeig
Tiller 2-3	73,1	0,9	97,8 %	Kvernet kjøttdeig
Tiller 2-4	67,1	0,5	98,9 %	Delvis flytende, delvis kvernet kjøttdeig.
Kvenildsmarka	26,2	1,5	93,3 %	Kvernet kjøttdeig

Tabell 6 Resultater fra utført laboratorieforsøk



Figur 19 Ekstrudert leire som likner kvernet kjøttdeig

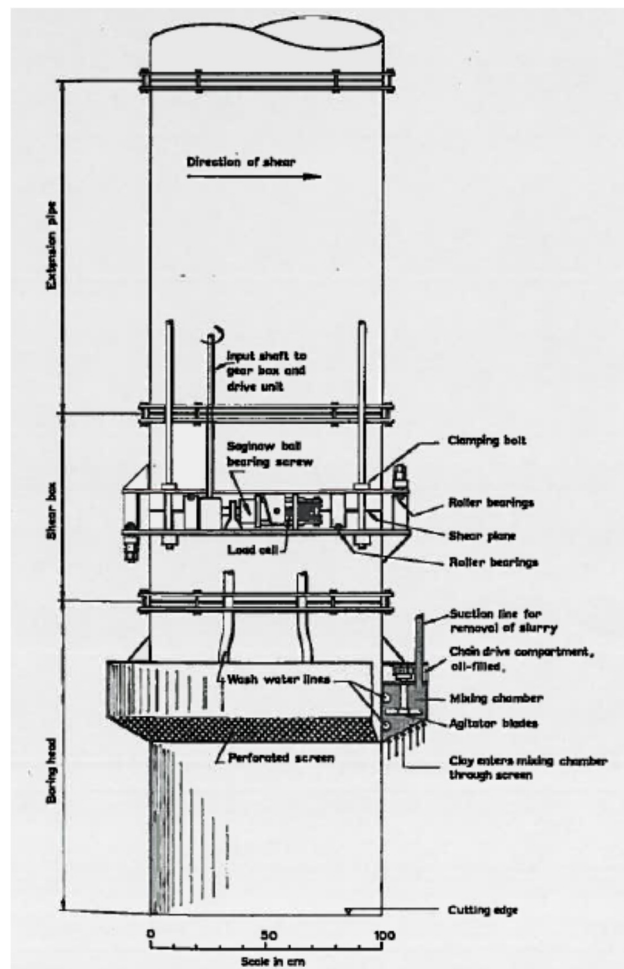
### 7.6 Omrøringsenergi i feltforsøk

Det ble i 1967 utført to storskala direkte skjærforsøk på kvikkleire i Tønsberg og Lierstranda i regi av NGI. Hovedformålet med forsøkene var å sammenlikne de oppnådde resultatene med skjærstyrkedata fra vingeboringer med ulike vingestørrelser, og å finne leiras anisotropi.

Apparatet er beskrevet og resultatene fra det direkte skjærforsøket er oppsummert av E. Dibiagio & G. Aas /18/.

Kort fortalt består apparat av tre hoveddeler: et borhode, en skjærboks og en serie forlengelsesrør. Apparatet fungerer som en slags gigantisk prøvesylinder, som blir boret ned i bakken og kutter ut en sylindrisk kjerne av uforstyrret leire med diameter 1 meter. Videre er apparatet konstruert slik at øvre del kan forskyves horisontalt i forhold til nedre del, og dermed skjære leirkjernen inni. Skjæringen vil skje langs et tynt skjærplan på 1 mm, som åpnes opp når apparatet er på plass i bakken. 1 mm ble antatt tynt nok til at leire ikke vil flyte ut.

Figur 20 viser en detaljtegning av skjærapparatet, mens tabell 7 viser materialegenskapene til leira i henholdsvis Tønsberg og Lierstranda.

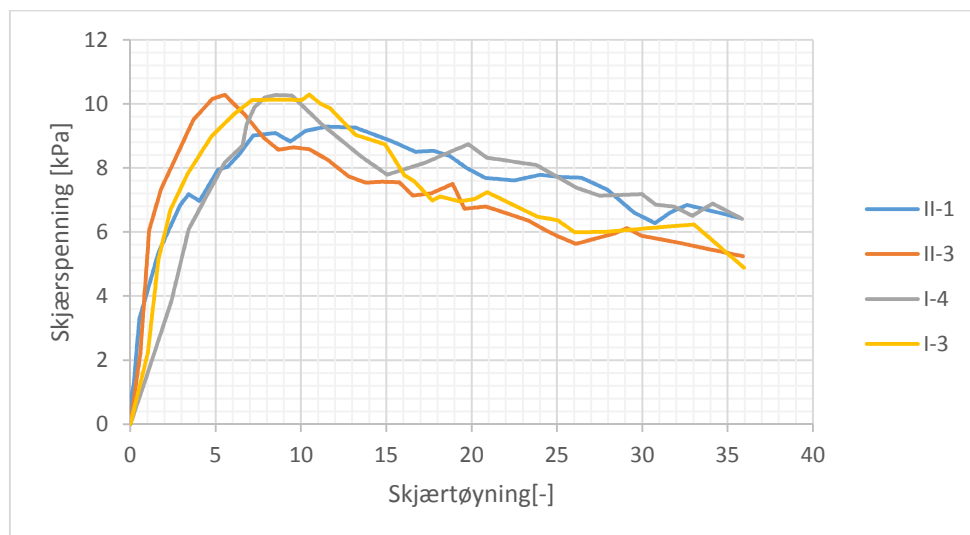


Figur 20 Detaljtegning av skjærapparatet

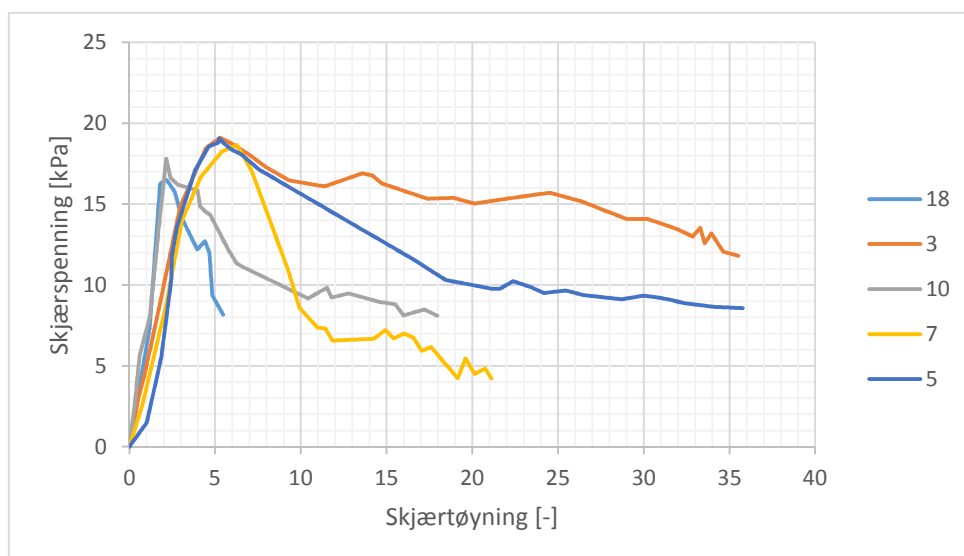
Prøve	Gj. Dybde [m]	C <sub>u</sub> fra vingebor [kPa]	C <sub>ur</sub> fra vingebor [kPa]	C <sub>u</sub> fra direkte skjærttest [kPa]	St [-]	w [%]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	w <sub>L</sub> [%]	w <sub>p</sub> [%]	I <sub>p</sub> [%]	I <sub>L</sub> [-]
II-1	2,5	11,09	0,32	8,73	35	60	16,6	41	25	16	35
II-3	5,5	12,26	0,41	10,59	30	53	17,2	37	22	15	31
I-4	4	11,58	0,29	10,99	40	52	17,6	39	22	17	30
I-3	3,5	10,30	0,37	11,18	28	53	17,2	39	24	15	29
5	5	7,55	0,15	16,78	50	33	19	25	19	6	14
7	6	7,46	0,15	16,76	50	35	18,8	26	19	7	16
10	7,5	8,73	0,17	16,28	52	35	18,8	25	19	6	16
3	4	5,98	0,15	17,46	40	30	19,4	25	19	6	11
18	11,4	11,28	0,17	15,50	67	32	18,9	27	18	9	14

Tabell 7 Materialeegenskaper til leira fra feltundersøkelsene

Under hele forsøket ble total skjærkraft og horisontal forskyvning registrert. Disse dataene er i denne oppgaven benyttet til å beregne leiras omrøringsenergi. Ved å trekke målt friksjonskraft fra den totale skjærkraften, og ved å benytte skjærboksens tversnittareal, er den tilførte skjærspenningen funnet. Skjærtøyningen er beregnet ut ifra den målte forskyvning av et skjærplan med tykkelse 1 mm. Resultatene er gjengitt i figur 21 og 22, og i tabell 8.



Figur 21 Spennings-tøyningsdiagram fra storskala skjærforsøk i Tønsberg



Figur 22 Spenning-tøyningsdiagram fra storskala skjærforsøk i Lierstranda

Prøve	$C_{ux}$ [kPa]	Omrøringsenergi målt [kPa]	Omrøringsgrad	Merknad
II-1	7,5	205,9	15 %	
II-3	8,0	186,0	26 %	
I-4	8,7	202,7	21 %	
I-3	7,0	194,8	39 %	
5	9,5	342,0	44 %	
7	4,7	156,1	72 %	Leire rant ut pga. omrøring
10	8,7	154,9	47 %	Leire rant ut til tross for at skjærforsøket ble stoppet da leirkjernen begynte å bevege seg vertikalt.
3	12,9	461,5	27 %	
18	9,4	49,4	40 %	Leire rant ut til tross for at skjærforsøket ble stoppet da leirkjernen begynte å bevege seg vertikalt.

Tabell 8 Beregnete resultater fra feltforsøk

## 7.7 Analyse og diskusjon av resultater

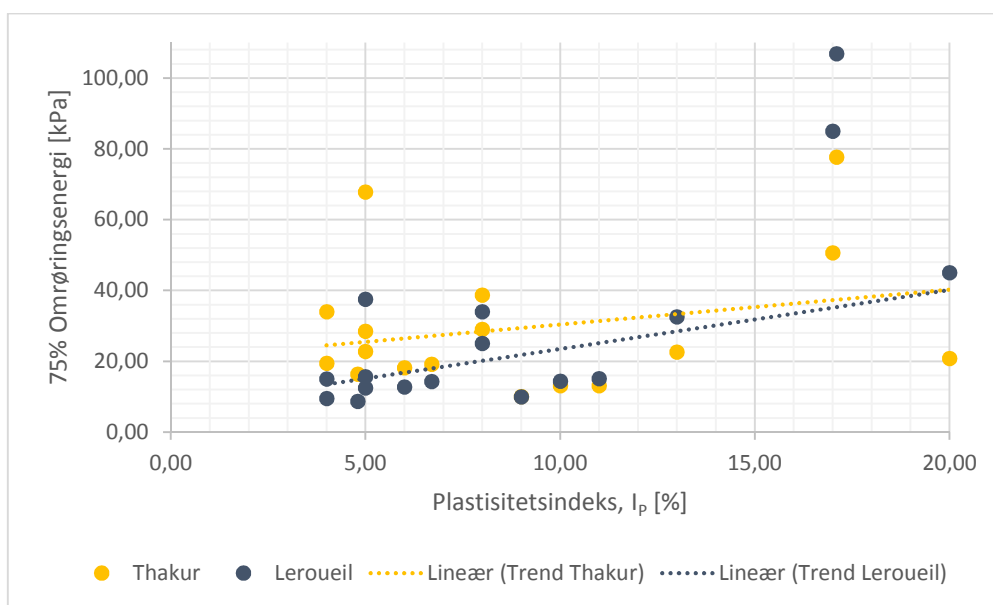
### 7.7.1 Sammenlikning av formler og korrelasjoner

I figur 23, 24 og 25 er omrøringsenergien til leira i skredene fra skred databasen beregnet ved bruk av både Leroueils empiriske formel (6) og Thakurs analytiske formel (7).

Thakurs og Leroueils formler stemmer relativt godt overens, selv om Thakurs formel generelt gir en høyere omrøringsenergi enn Leroueils formel. Begge formlene viser samme trend for korrelasjonen mellom omrøringsenergi og henholdsvis plastisitetsindeks, omrørt skjærstyrke og sensitivitet.

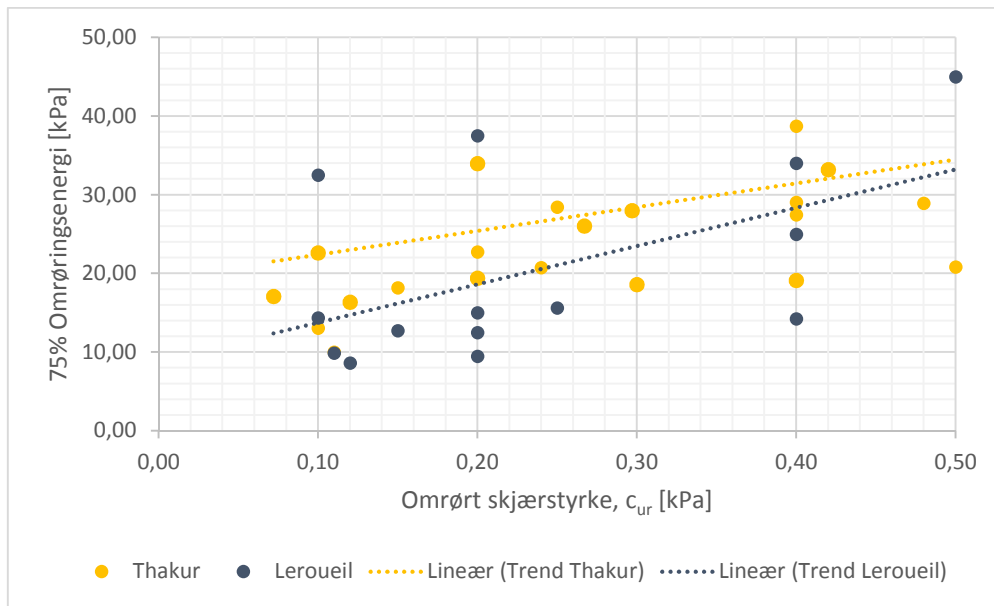
Det gir mest mening å se på trenden i resultatene, da flere feilkilder kan føre til avvik i enkeltresultater. Dataene som er samlet i skreddatabasen baserer seg på gjengivelser av skredhendelser med varierende kvalitet. Det er særlig store forskjeller i antall gjennomførte felt- og laboratorieundersøkelser og detaljering i beskrivelsene av materialeegenskaper. Videre er de fleste innsamlede skjærstyrkedataene funnet ved konusforsøk. Erfaringsmessig undervurderer konusforsøk materialets uforstyrrede skjærstyrke. Det ville derfor vært bedre med skjærstyrkedata funnet ved treksforsøk.

Om leiras uforstyrrede skjærstyrke er undervurdert, kan dette være en grunn til at Leroueils formel generelt gir lavere omrøringsenergi enn Thakurs formel. Grunnen til dette er at Leroueils formel i stor grad er basert på leiras uforstyrrede skjærstyrke, mens Thakurs formel er basert på omrørt skjærstyrke, sensitivitet og tøyning. Sensitivitet er dog avhengig av leiras uforstyrrede skjærstyrke, men dette vil i mindre grad prege endelig beregnet omrøringsenergi.



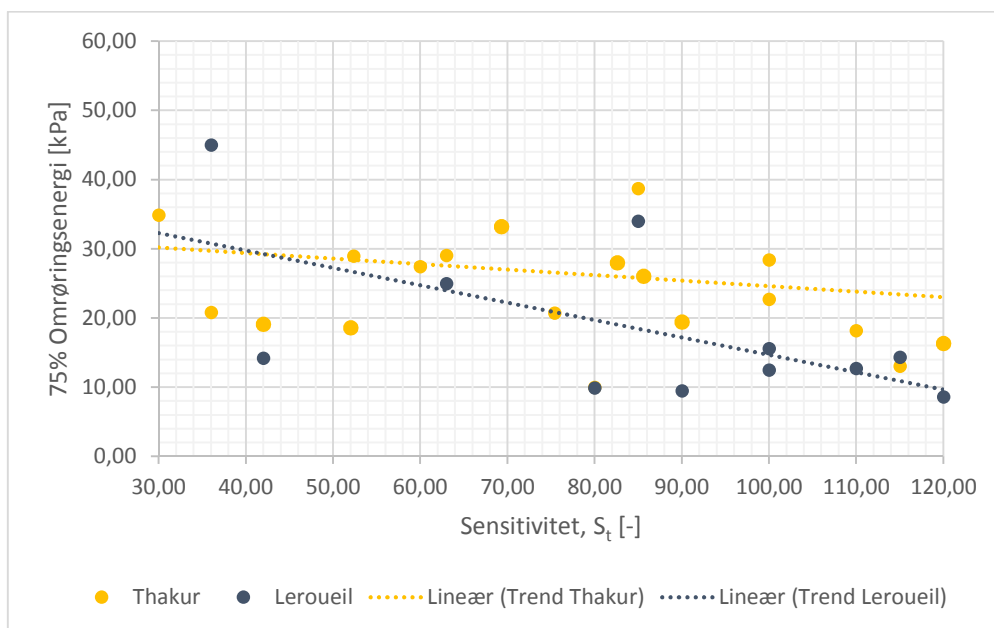
Figur 23 Plastisitetsindeks og omrøringsenergi

Figur 23 viser at en leire med høy plastisitetsindeks krever en høyere omrøringsenergi.



Figur 24 Omrørt skjærstyrke og omrøringsenergi

Figur 24 viser at en leire med høy omrørt skjærstyrke vil kreve en høyere omrøringsenergi enn en leire med lavere omrørt skjærstyrke.



Figur 25 Sensitivitet og omrøringsenergi

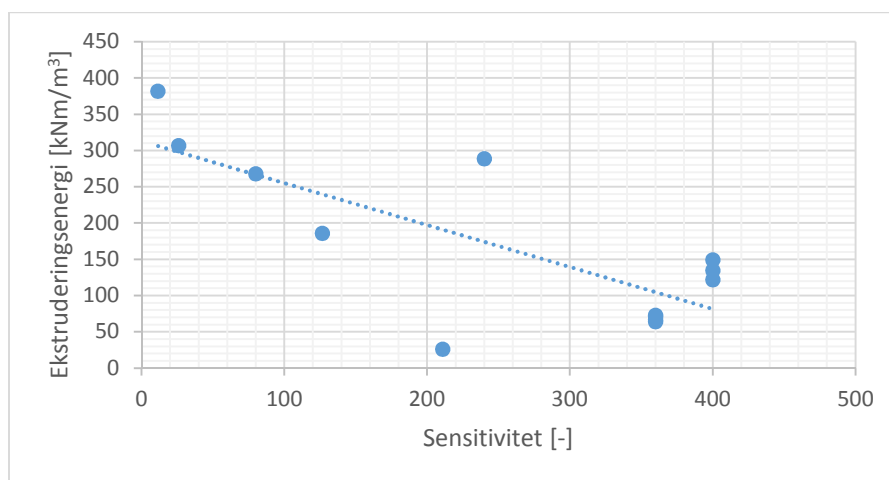
Figur 25 viser at jo høyere leiras sensitivitet er, desto mindre omrøringsenergi er nødvendig.

### 7.7.2 Vurdering av omrøringsenergi fra laborieforsøk

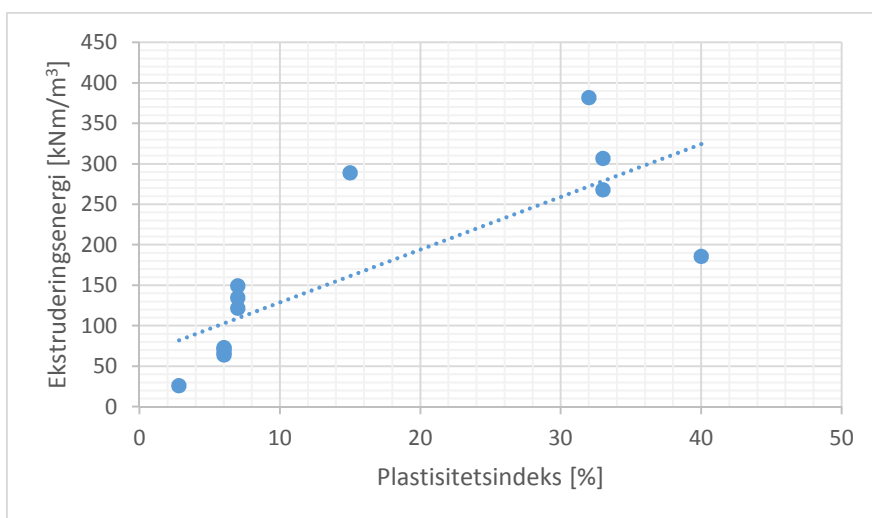
Både i laborieforsøket utført i forbindelse med denne oppgaven og i forsøket utført av Rasmussen /17/ ble leira forsøkt omrørt ved ekstrudering. Ekstruderingen førte i alle forsøkene til en omrøringsgrad høyere enn 92 %. Dette antyder at energien funnet i forsøkene kan representere leiras omrøringsenergi på en god måte. Det må likevel presiseres at den beregnede energien er energien benyttet for å ekstrudere leira, og at det ikke er gjort noe forsøk på å ta hensyn til sann tøyning eller at leirprøvene er presset ut gjennom et mindre areal. I forsøket gjennomført i forbindelse med denne oppgaven, er forholdet mellom leirprøvens tverrsnittareal og arealet av hullene i den perforerte platen 4. I Rasmussens forsøk var arealforholdet 8,5. For nøyaktighetens skyld vil derfor den målte energien bli betegnet ekstruderingsenergi, men den vil representere omrøringsenergiens egenskaper.

Arealforholdet i de to ulike ekstruderingsforsøkene var heller ikke likt, men de oppnådde resultatene stemte meget godt overens med forventningene.

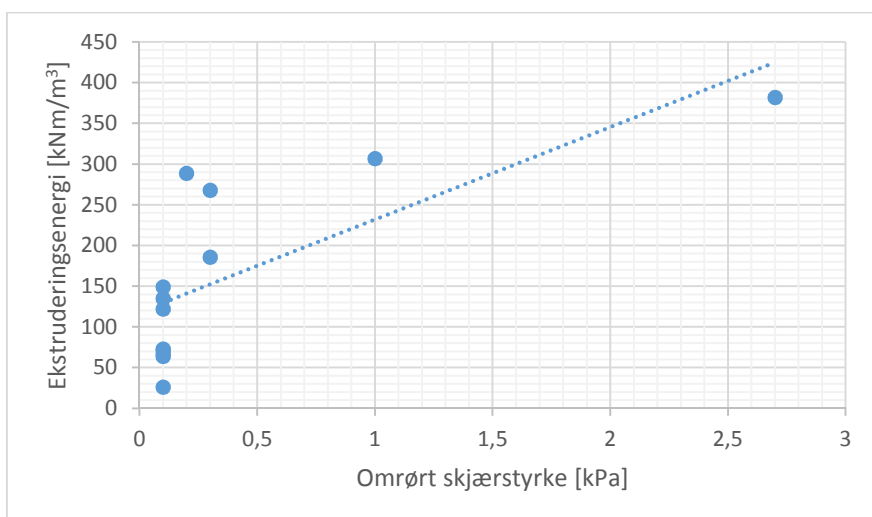
Laborieforsøkene bekrefter korrelasjon mellom omrøringsenergi og henholdsvis sensitivitet, plastisitetsindeks og omrørt skjærstyrke (se figur 26, 27 og 28), som også ble funnet ved beregning av omrøringsenergien til leira i skredene fra skredetabasen.



Figur 26 Ekstruderingsenergi og sensitivitet



Figur 27 Ekstruderingsenergi og plastisitet



Figur 28 Ekstruderingsenergi og omrørt skjærstyrke

Til tross for god overenstemmelse med resultatene fra tilbakeberegning av tidligere kvikkleireskred, og den tidligere studie gjort av Thakur & Degago /19/, bør det nevnes at det er flere feilkilder som kan ha påvirket resultatene.

For det første er det et begrenset antall forsøk som er utført. Særlig i forsøkene utført i forbindelse med denne oppgaven er det liten variasjon i materialegenskapene til den benyttede leira. Dette kom særlig tydelig fram ved vurdering av omrørt skjærstyrke, der alle leirprøvene hadde en omrørt skjærstyrke på 0,1.

Videre vil den målte ekstruderingsenergien være avhengig av friksjonen i apparatet. Ettersom to ulike apparater har blitt benyttet, vil det være noe varierende friksjonskraft, selv om friksjonskraften var antatt liten ved begge forsøkene. I tillegg vil ikke friksjonskraften kun



varierte fra apparat til apparat, men også være avhengig av leirprøvenes høyde. Dette kan også gi et lite avvik i resultatene da leirprøver med ulik høyde ble benyttet.

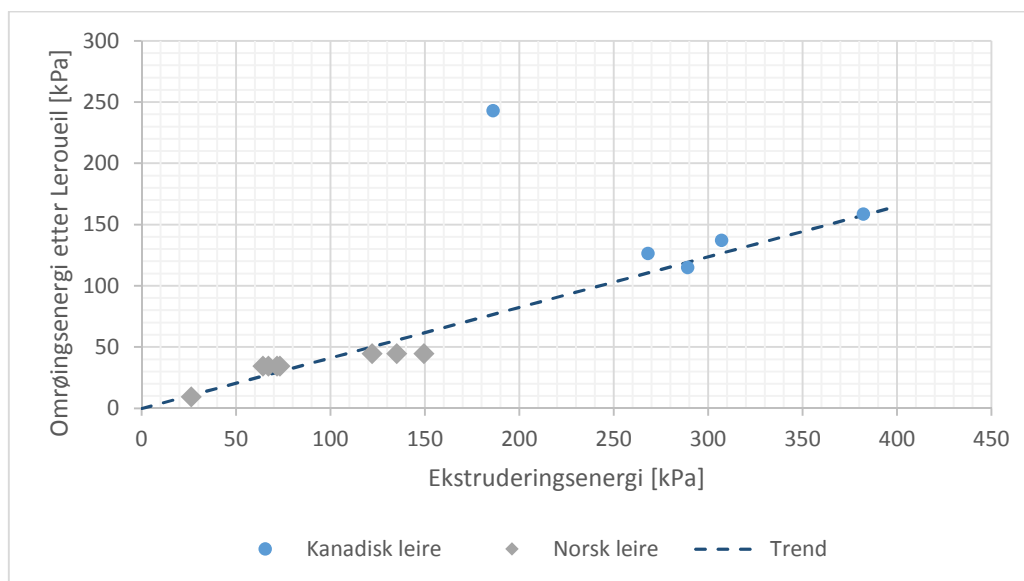
En siste feilkilde stammer fra de standardiserte forsøkene gjennomført for å finne uforstyrret skjærstyrke, omrørt skjærstyrke og plastisitetsindeks i leirprøvene.

En sammenlikning av resultatene fra Rasmussens forsøk /17/ og forsøkene utført i forbindelse med denne oppgaven, viser at kanadiske leirer har mye høyere omrøringsenergi enn norske leirer. Dette var et forventet resultat da det er kjent at kanadisk leire er svært overkonsolidert i forhold til norske leirer, og dermed har høyere skjærstyrke. I tillegg har kanadiske leirer også en generelt høyere plastisitetsindeks enn norske leirer, ettersom vanninnholdet i leira er mye høyere.

Figur 29 viser en sammenlikning mellom ekstruderingsenergien funnet ved laboratorieforsøkene i denne oppgaven og Rasmussens forsøk, og omrøringsenergien i leirene beregnet etter Leroueils empiriske formel (6). Leroueils empiriske formel (6) er her benyttet til å beregne 100 % omrøringsenergi, og er dermed:

$$RE = 16 * c_u * I_p$$

*Formel 9 Leroueils empiriske formel for omrøringsenergi*



*Figur 29 Sammenlikning av målt ekstruderingsenergi og beregnet omrøringsenergi etter Leroueils formel*

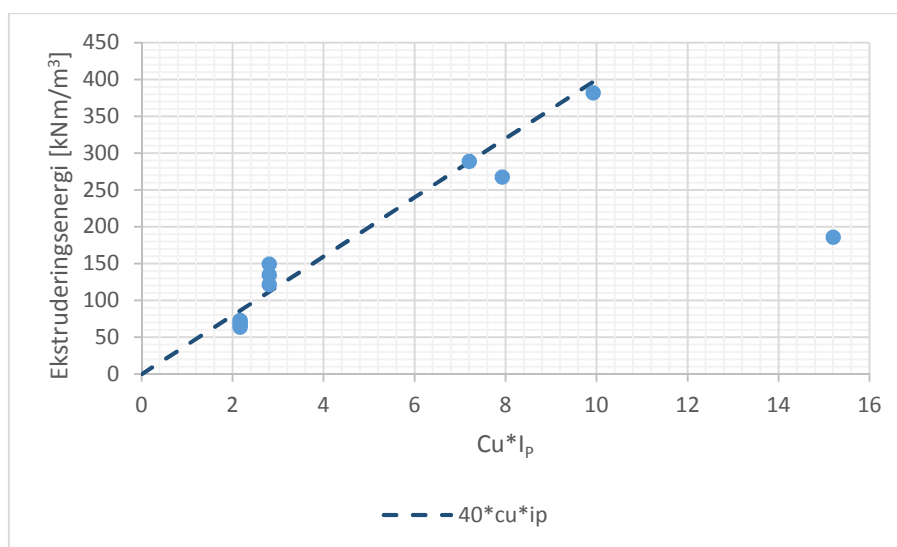
Igjen gir resultatene en indikasjon på at Leroueils formel (9) undervurderer omrøringsenergien i leira. Ekstruderingsforsøkene gir konsekvent ca. 2,4 ganger høyere omrøringsenergi enn Leroueils formel (9).

Det må presiseres at Leroueils formel (9) baserer seg på omrøringsenergi målt i Tavernas et als. utførte skjærforsøk /7/, mens omrøringsenergien fra Rasmussens forsøk /17/ og forsøkene i forbindelse med denne oppgaven er representert ved ekstruderingsenergi.

For estimering av ekstruderingsenergi foreslås formel (10), men det trengs flere forsøk for å verifisere denne.

$$\text{Ekstruderingsenergi} = 40 * c_u * I_p$$

*Formel 10 Foreslått formel for ekstruderingsenergi*



*Figur 30 Funnet sammenheng mellom ekstruderingsenergi og  $c_u * I_p$*

### 7.7.3 Vurdering av omrøringsenergi i feltforsøk

Det var forventet at den målte omrøringsenergien i de utførte storskala skjærforsøkene skulle være lavere enn den beregnede omrøringsenergi fra Leroueils empiriske formel (9), fordi den oppnådde omrøringsgraden i forsøkene var lav (se tabell 8).

Tabell 9 viser den målte omrøringsenergien og beregnet omrøringsenergi etter Leroueils empiriske formel (9). Tabellen viser, i motsetning til forventet resultat, at den målte omrøringsenergien er mye høyere enn den beregnet ved Leroueils empiriske formel (9). I likhet med tidligere vurderinger, ser det ut til at Leroueils empiriske formel (9) underestimerer omrøringsenergien. Noen endelig konklusjon er vanskelig å trekke fra forsøket, da det er flere avvik i resultatene.

Det er ved flere av skjærforsøkene beskrevet at leira ble omrørt og fløt ut, til tross for at registret skjærstyrke i leira lå mellom 4,7 kPa og 9,4 kPa, noe som kun tilsvarer en omrøringsgrad mellom 40 og 72 %. Hva den virkelige omrøringsgraden var, er også vanskelig å beregne da fullstendig omrørt skjærstyrke har blitt beregnet fra oppgitte data for uforstyrret skjærstyrke og sensitivitet. Sensitiviteten varierte i stor grad med dybden, selv ved små avstander. Dette betyr at leirlagets sensitivitet kan ha blitt feilvurdert.

Noen av forsøkene ga en svært spiss kurve i spenning-tøyningsdiagrammet ved lave tøyningsverdier. Dette kan tyde på at skjærstyrken i leira begynte å falle før den virkelige skjærstyrken ble oppnådd /18/. En underestimering av skjærstyrken vil også føre til en underestimering av omrøringsenergi ved bruk av Leroueuils formel (9). Det samme gjelder den målte omrøringsenergien i skjærforsøket, men vil her være av mindre betydning da tøyningen i skjærforsøket er svært høy og vil være mest avgjørende.

<b>Prøve</b>	<b>Omrøringsenergi, målt [kPa]</b>	<b>Omrøringsenergi etter Leroueil [kPa]</b>
II-1	205,9	22,2
II-3	186,0	25,3
I-4	202,7	29,7
I-3	194,8	26,7
5	342,0	16,0
7	156,1	18,7
10	154,9	15,6
3	461,5	16,7
18	49,4	22,2

*Tabell 9 Sammenlikning av resultater fra feltforsøk og Leroueuils formel*

## 8. Konklusjon og videre arbeid

### 8.1 Konklusjon

I denne oppgaven er det presentert flere metoder for å tilnærme seg problemet med retrogresjon av kvikkleireskred, og disse metodene har blitt vurdert ved tilbakeberegning av tidligere kvikkleireskred. Det har vist seg at metodene kan angi terskelverdier for når det kan oppstå retrogresjon i en skredhendelse, og de beregnede terskelverdiene har vist seg å stemme godt overens med tidligere gjennomførte studier. Det er funnet at:

1.  $C_{ur} < 1 \text{ kPa}$  angir en øvre terskelverdi for om retrogresjon kan oppstå.
2.  $\frac{L}{H} < 15$  gir et godt estimat av retrogresjonsdistansen for skred med retrogresjonsdistanser mindre enn 250 m.
3.  $N_c > 4$  gir en nedre terskelverdi for om skred kan utvikle seg retrogressivt.

Videre er parameteren omrøringsenergi studert ved tilbakeberegning av tidligere skredhendelser, laboratorieforsøk, og med data fra feltforsøk. Det indikerer at omrøringsenergi kan være en enkel og god måte å tilnærme seg problemet med utvikling av kvikkleireskred på.

4. En enkel måte å måle omrøringsenergi i leire på er presentert, og det utviklede apparatet har vist seg å gi stabile resultater.
5. Både tilbakeberegning av tidligere kvikkleireskred og laboratorieforsøk indikerer at omrøringsenergi kan korreleres med plastisitetsindeks, omrørt skjærstyrke og sensitivitet, og at omrøringsenergi dermed kan benyttes som en samlende parameter.
6. Undersøkelser av omrøringsenergi fra laboratorieforsøk, feltforsøk og ved benyttelse analytisk formel antyder at Leroueuils empiriske formel underestimerer leiras omrøringsenergi.

### 8.2 Forslag til videre arbeid

For å verifisere resultatene som er gjort i denne oppgaven, anbefales det å gjennomføre flere laboratorieforsøk med ekstrudering av leire. Spesielt nyttig vil det være å undersøke leirer med større variasjon i materialegenskaper, som omrørt skjærstyrke og plastisitet.

Det anbefales også å gjennomføre eller vurdere flere feltforsøk, for å kunne avgjøre om resultater i laboratoriet stemmer overens med virkeligheten i felten.

## Referanser

- /1/ NVE/NGI. *Rapport nr. 20001008-2*. Program for økt sikkerhet mot leirskred. Metode for kartlegging og klassifisering av faresoner, kvikkleire. Revidert 2008
- /2/ NVE Flaum- og skredfare i arealplanar. *Retningslinjer nr. 2/2011*. Vedlegg 1. Veileder: Vurdering av områdestabilitet ved utbygging på kvikkleire og andre jordarter med sprøbruddegenskaper. Revidert 2011.
- /3/ Landslides investigation and mitigation. Special report, 247. A. Keith Turner and Robert L. Schuster. Forlag TRB. 1996. Kap. 24.
- /4/ NGU. *Rapport nr. 2012.040* Utstrekning og utløpsdistanse for kvikkleireskred basert på katalog over skredhendelser i Norge.
- /5/ Statens vegvesen. Håndbok 018, Vedlegg 13 – ordforklaringer. Januar 2011.
- /6/ Melding 2. "Veileder for: Symboler og definisjoner i geoteknikk" (NGF 1982). Revidert 2011
- /7/ Tavernas, F., Flon, P., Leroueil, S. & Lebus, J. (1983). Remolding energy and risk of slide retrogression in sensitive clays. Swedish Geotechnical Institute. Symposium on slopes on soft clay, Linköping. *Rapport nr. 17*, side 423-454.
- /8/ Leroueil, S., Locat, J., Vaunat, J., Picarelli, L., Lee, H. & Faure, R. (1996). Geotechnical characterization of slope movements. Landslides, volume 1, 53-71. Proceedings of the 7th international symposium on landslides, Trondheim. Forlag Balkema, Rotterdam.
- /9/ Lebus, J., Robert, J. M. & Rissmann, P. (1983). Regional mapping of landslides hazard in Québec. Swedish Geotechnical Institute. Symposium on slopes on soft clay, Linköping. *Rapport nr. 17*, 205-262.
- /10/ Statens Vegvesen. Håndbok 014. Laboratorieundersøkelser, normaler. 2005.
- /11/ Astor Furseth, Skredulykker i Norge. Forlaget Tun. 2006.
- /12/ Statens Vegvesen. Håndbok 015. Feltundersøkelser, retningslinjer. 1997.
- /13/ NGI. *Rapport nr. 20001008-71*. Program for økt sikkerhet mot leirskred. Evaluering av risiko for kvikkleireskred Fredrikstad kommune. Vedlegg A: Bygging i kvikkleireområder - Veiledning ved arealplanlegging og byggesaksbehandling. 2006.
- /14/ Mitchell, R. J. & Markell A. R. (1974). Flowslides in sensitive soils. Canadian Geotechnical Journal, 11(1): 11-31, 10.1139/t74-002.
- /15/ Thakur V. & Degago, S. A. (2012). Quickness of sensitive clays. Géotechnique Letters, Volume 2, Issue 3, 87-95.

- /16/ Thakur V., Oset F., Aabøe R., Berg, P. O., Degago S. A., Wiig T., Lyche, E., Haugen, E. E. D., Sæter, M. B. og Robsrud, A. (2012). A critical appraisal of the definition of Brittle clays (Sprøbruddmateriale). Proceedings of the 16<sup>th</sup> Nordic Geotechnical meeting, Copenhagen, 9.-12. Mai 2012. Volume 1, 451-462.
- /17/ Rasmussen, K. K. (2012). An investigation of monotonic and cyclic behaviour of leda clay. University of Western Ontario – Electronic Thesis.
- /18/ Dibiagio E. & Aas G. (1967). The In Situ Undrained Shear Strength Measured on a Horizontal Failure Plane by Large-Scale Direct Shear Test in Quick Clay. Proceedings of the geotechnical conference, Oslo 1967. Volume 1, 19-26.
- /19/ Thakur V. & Degago, S. A. (2013). Disintegration energy of sensitive clays. Géotechnique Letters, Volume 3, Issue 1, 20 –25.
- /20/ Bornhold, B. (2011), Coastal and Ocean Resources Inc., Submarine Failures and Associated Tsunamis, Norway - Literature Review. Report to AMEC.
- /21/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 64-66.
- /22/ Bjerrum L. & Kjærnsli B. 1957. Analysis of the Stability of Some Norwegian Natural Clay Slopes. Géotechnique, Volume 7 (1), 1 –16.
- /23/ Rygg, N. & Oset, F. 1996. The Balsfjord landslide. Landslides, volume 1, 573-577. Proceedings of the 7th international symposium on landslides, Trondheim. Forlag Balkema, Rotterdam.
- /24/ Eide, O. & Bjerrum, L. 1955. The slide at Bekkelaget. Géotechnique 5 (1), 88-100.
- /25/ L'Heureux, J., Hansen, L., Longva, O., Emdal A., Grande, L. O. 2009. Norwegian Journal of Geology, Vol 90, 1-20.
- /26/ Karlsrud, K. 1979. Kurs: «Skredfare og arealplanlegging. Vurdering av faregrad og sikringstiltak». Norske sivilingeniørers forening i samarbeid med NGI.
- /27/ Holmsen, G. 1929. Lerfaldene ved Kokstad, Gretnes og Braa. NGU 132, 22-40.
- /28/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 61-63.
- /29/ SVV (2012) Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire, Datarapport for Kvikkleireskred ved Esp i Byneset i januar 2012. Rapport 34/2012.
- /30/ NVE (2012) Kvikkleireskred ved Esp på Byneset i Trondheim, Rapport 1/2012. Foreløpig versjon datert 9. januar 2012.
- /31/ Gregersen, O. & Løken, T. 1979. The quick-clay slide at Baastad, Norway, 1974. Engineering Geology 14, 183-196.
- /32/ Bjerrum L. & Kjærnsli B. 1957. Analysis of the Stability of Some Norwegian Natural Clay Slopes. Géotechnique, Volume 7 (1), 1 –16.

- /33/ L'Heureux J., Eilertsen, R. S., Hansen L., Sletten, K. 2011. Morfologi og skredkartlegging i Botn ved Rissa, Sør-Trøndelag. NGU rapport 2011.037.
- /34/ Longva, O., Janbu, N., Blikra, L. H., Boe, R. 2003. The 1996 Finneidfjord slide: Seafloor failure and slide dynamics. I: Locat, J. & Mienert, J. (eds). Submarine mass movements and their consequences. Kluwer Academic Publishers, 531-538
- /35/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 7-11.
- /36/ Karlsrud, K. 1983. Analysis of a small slide in sensitive clay in Fredrikstad, Norway. Symposium on Slopes on Soft Clays. Linköping 1982. Statens geotekniska institut, Linköping. Rapport, 17, pp. 175-184.
- /37/ Hutchinson, J.N 1961. A landslide on a thin layer of quick clay at Furre, Central Norway. Geotechnique, Volume 11 (2), 69-94.
- /38/ Holmsen, G. 1929. Lerfaldene ved Kokstad, Gretnes og Braa. NGU 132, 16-22.
- /39/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 26-28.
- /40/ Drury, P. 1968. The Hekseberg landslide, March 1967. NGI Publication, 075, 27-32.
- /41/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 14-25.
- /42/ Nordal, S., Alén, C., Emdal, A., Jendeby, L., Lyche, E., Madshus, C. 2009. Skredet i Kattmarkavegen i Namsos 13. mars 2009. Rapport fra samferdselsdepartementet og NTNU.
- /43/ Holmsen, G. 1929. Lerfaldene ved Kokstad, Gretnes og Braa. NGU 132, 5-15.
- /44/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 29-54.
- /45/ Emdal, A., Nordal, S., Bæverfjord, M. G. 2002. Raset ved Leistad 24. April 2002. Rapport fra NTNU Institutt for bygg- anlegg og transport, faggruppe for geoteknikk for Statens Vegvesen.
- /46/ TRONDHEIM KOMMUNE. R. 770 Skred Lersbakken, datarapport. Trondheim, 1989.
- /47/ Sevaldson, R. A. 1956. The slide in Lodalen, October 6th, 1954. Geotechnique 6 (4), 167-182.
- /48/ Statens vegvesen Troms. Geoteknisk datarapport, RV. 868 Hp. 04 Solhov – Lyngseidet. Rapport nr. Xd-866A. 1994.
- /49/ Multiconsult AS for NVE. Ras Solhov – Geoteknisk vurdering av rasgrup. 2010.
- /50/ Meyerhof, G. G. 1957. Géotechnique, Volume 7 (1), 41 –49.
- /51/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 70-71.
- /52/ Gregersen, O. 1981. The quick clay slide in Rissa, Norway. NGI Publikasjon 135, 1-6.

- /53/ Long, M. Some analyses of the Røesgrenda quick clay slides. I: Landslides and Avalanches: ICFL 2005 Norway - Senneset, Flaate & Larsen (eds). Taylor & Francis Group, London. Pp. 233-236.
- /54/ Kenny, T. C. 1968. Slide behaviour and shear resistance of a quick clay determined from a study of the landslide at Selsnes, Norway. NGI Publikasjon 76, 57-64.
- /55/ Janbu, N. The 1963 quick clay slide i Skjelstadmarka, Norway. I: Landslides and Avalanches: ICFL 2005 Norway - Senneset, Flaate & Larsen (eds). Taylor & Francis Group, London. Pp. 195-197.
- /56/ Holmsen, G. & Holmsen, P. 1946: Leirfallene i årene 1940-1945. NGU 167, 55-60.
- /57/ Bjerrum, L. 1955. Stability of natural slopes in quick clay. Geotechnique 5 (1), 101-119.
- /58/ Trak, B & Lacasse, S. 1996. Soils suseptible to flow slides and associated mechanisms. Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway. Balkema, Rotterdam. Volume 1, 497-506.
- /59/ Hutchinson, J. N. 1965. The landslide of February, 1958, at Vibstad in Namdalen. NGI Publikasjon 61, 1-16.
- /60/ Leroueil, S. (2001). Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. Géotechnique 51, No. 3, 197-243.



## Vedlegg



## Vedlegg A

- Innsamlet data fra skred i kvikke og sensitive leirer



Nr.	Date	Landslide	Type	Cause	Topography	Thickness of dry crust/Top soil [m]	Thickness of Quick clay layer [m]	Retrogression Distance L1 [m]	Length of flow L2 [m]	H	Total length, L1+L2 [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]
1	01.07.1940	Aaserumvatnet, Hedrum	Flow									
2	10.11.1634	Bakklandet	Flow		Along shore line	5,0	5,0	70		20,0		
3	1988	Balsfjord	Flake	Erosion	Along shore line			400		20,0		
4	07.10.1953	Bekkelaget	Flake	Blasting, Traffic load & Reduction in shear strength due to pore pressure build up	Unchanneled slope	2,5	5,5	145	20	16,1	165	100000
5	23.04.1888	Brattøra	Flow		Along shore line			210	0	25,0	210	3000000
6	1944	Brøther, Lillestrøm	Flow									
7	01.05.1928	Brå	Flake		Along valley			300	300	12,0	600	500000
8	01.01.2012	Byneset	Retrogressive					400	870	26,7	1270	350000
9	05.12.1974	Båstad	Flake	Erosion	Ravine	4,0	20,0	200	80	20,0	280	1500000
10	06.01.1955	Drammen	Rotational	Fill	Along large river	2,5		45		15,0	45	4000
11	18.07.1625	Duedalen	Flow									500000
12	1997	Fallet, Rissa	Retrogressive/Flake		Along shore line			146	670		816	200000
13	20.06.1996	Finneidfjord	Retrogressive/Flake	Excess Pore Pressure	Along shore line	5,0	10,0	300	1600	20,0	1900	1000000
14	31.08.1940	Finnvika, Vefsenfjorden	Flow		Along shore line							
15	1939	Foldereid	Flow		Along shore line	1,8	7,3					

Nr.	Date	Landslide	Type	Cause	Topography	Thickness of dry crust/Top soil [m]	Thickness of Quick clay layer [m]	Retrogression Distance L1 [m]	Length of flow L2 [m]	H	Total length, L1+L2 [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]
16	09.01.1952	Follafjorden	Flow		Along shore line				2000			
17	17.08.1980	Fredrikstad	Flow	Fill	Along large river	2,5	5,0	5	22	8,0	67	100000
18	14.04.1959	Furre	Retrogressive/Flake	Erosion	Along large river	2,5	0,1	175	117	19,4	292	2750000
19	17.04.1925	Gretnes	Flow		Along shore line	1,0	11,0	250		25,0		400000
20	29.11.1974	Gullaug 1	Retrogression/Flake	Fill	Along shore line			40	325	30,0	365	9000
21	prehistoric	Gullaug 2	Flow		Along shore line							100000
22	1965-78	Gullsmedvika	Flow		Along shore line							3500000
23	24.07.1943	Gunneklevfjord	Flow									
24	prehistoric	Heimstad	Flow									900000
25	20.03.1967	Hekseberg	Flow		Along shore line			160	300	26,0	460	200000
26	19.01.1942	Holund, Grong	Flake	Teleras?	Along sail valley	2,7	2,0			24,0		80000
27	14.04.1942	Hommelvik	Flow		Along shore line			40	450		490	
28	11.10.1940	Hurum	Flow									
29	23.01.1978	Hyggen	Retrogressive/Flake	Fill	Along shore line			73	450	10,0	523	
30	08.10.1950	Ilsvika	Flow		Along shore line					25,0	600	2500000
31	13.03.2009	Kattmarka	Flow	Blasting	Along fjord	2,0	18,0	300	350	20,0	300	400000



Nr.	Date	Landslide	Type	Cause	Topography	Thickness of dry crust/Top soil [m]	Thickness of Quick clay layer [m]	Retrogression Distance L1 [m]	Length of flow L2 [m]	H	Total length, L1+L2 [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]
51	01.06.1967	Sandnessjøen	Flow						1000	15,0	1000	75000
52	18.04.1965	Selnes	Flow	Erosion	Along stream	3,0		116	400	10,0	516	140000
53	prehistoric	Sjetnemarka	Flow					1000				3000000
54	14.09.1962	Skjelstadmarka	Flow		Along stream			600	2200	15,0	2800	2000000
55	prehistoric	Stavset	Flow									800000
56	09.10.1944	Stokke	Retrogressive		Along shore line							
57	07.03.1816	Tiller	Flow									5500000
58	23.12.1953	Ullensaker	Retrogressive		Ravine	5,0	10,0	250	0	5,0		200000
59	19.05.1893	Verdal	Retrogressive			13,0		2000	5000	40,0	9100	55000000
60	22.02.1959	Vibstad	Flow	Erosion	Along large river	7,0		250	250	9,0	500	1000000



Nr	Landslide	Unit weight, $\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$C_{ui}$ [kPa]	$c_{ur}$ along slip surface [kPa]	$S_t$ [-]	$w$ [%]	$w_L$ [%]	$w_P$ [%]	$I_L$ [-]	$I_P$ [%]	OCR	salinity g/l	$C_{ui}$ from triaxial testing [kPa]	$C_{ui}$ from vane boring [kPa]	$C_{ui}$ from konus [kPa]	$C_{ui}$ from Unconfined compression test [kPa]	Remark	Source
1	Aaserumvatnet, Hedrum		20,0	0,1	200,0	62,0	35,0	22,0	3,1	13,0								/21/ /50/
2	Bakklandet	20,0	55,0	3,0	19,0	27,0	27,0	9,0			NC		55,0	34,0		15-50	Ground investigations done in 1955 by NGI and 1986 by NTNU.	/22/ /23/ /24/
3	Balsfjord		30,0	1,0	30,0													
4	Bekkelaget	18,0	8,8	0,1	80,0	39,0	26,0	17,0	2,4	9,0	NC	0,3		8,8			The slide happens in silt and sand layer	/25/ /26/
5	Brattøra	20,0				20,0												/28/
6	Brøther, Lillestrøm					20,0												/27/
7	Brå		18,0	0,2	75,4				2,0									/29/ /30/
8	Byneset		14,4	0,1	120,0	41,0	27,6	22,9	3,9	4,8								
9	Båstad	20,0	45,0	0,4	85,0	30,0	23,0	15,0	1,9	8,0	NC	1,1	45,0	34,0				/31/
10	Drammen	19,1	11,0	2,5	4,0	31,0	30,0	10,0	1,1	11,0	NC			11,0	11,0			/32/
11	Duedalen		15,0	0,1	209,1													/4/
12	Fallet,Rissa		9,5	0,8	11,9													/33/
13	Finneidfjord	18,0	24,0	0,4	60,0	35,0									6,0			/34/
14	Finnvika, Vefsenfjorden																Slide happens in fine sand and silt material	/26/
15	Foldereid	19,0	61,0	0,3	187,0	25,0									12,0			/35/

Nr	Landslide	Unit weight, $\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$C_{ui}$ [kPa]	$c_{ur}$ along slip surface [kPa]	$S_t$ [-]	$w$ [%]	$w_L$ [%]	$w_P$ [%]	$I_L$ [-]	$I_P$ [%]	OCR	salinity g/l	$C_{ui}$ from triaxial testing [kPa]	$C_{ui}$ from vane boring [kPa]	$C_{ui}$ from konus [kPa]	$C_{ui}$ from Unconfined compression test [kPa]	Remark	Source
16	Follafjorden																Shallow sand. Liquefaction failure	/26/
17	Fredrikstad		18,0	0,5	36,0	40,0	40,0	20,0	1,0	20,0			18,0	17,0				/36/
18	Furre	18,0	11,5	0,1	115,0	43,0	32,0	22,0	2,1	10,0	NC	2,0		11,5	11,5			/37/
19	Gretnes					26,8												/38/
20	Gullaug 1		15,0	2,0	7,5									15,0				/26/
21	Gullaug 2																	/4/
22	Gullsmedvika																Mass consisting of coarse silt and fine sand.	/26/
23	Gunneklevfiord																	/39/
24	Heimstad																	/4/
25	Hekseberg	19,0	30,0	0,2	150,0	32,5	27,0	23,0	2,4	4,0			30,0	30,0	30,0		Both quick clay and insensitive clay involved	/40/
26	Holund	20,2	25,0	0,5	52,3	21,1									25,0			/41/
27	Hommelvika																The slide happens in sand. Some clay was found.	/26/
28	Hurum																Further details are lacking.	/72/
29	Hyggen		15,0						0,5					15,0				/4/
30	Ilsvika		31,8														Slide loose sand silt layer	/26/

Nr	Landslide	Unit weight, $\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$C_{ui}$ [kPa]	$c_{ur}$ along slip surface [kPa]	$S_t$ [-]	$w$ [%]	$w_L$ [%]	$w_P$ [%]	$I_L$ [-]	$I_P$ [%]	OCR	salinity g/l	$C_{ui}$ from triaxial testing [kPa]	$C_{ui}$ from vane boring [kPa]	$C_{ui}$ from konus [kPa]	$C_{ui}$ from Unconfined compression test [kPa]	Remark	Source
31	Kattmarka	20,0	25,0	0,4	63,0	45,0	30,0	22,0	2,9	8,0			25,0		18,0			/4/ /42/ /43/
32	Kokstad					24,0												
33	Lade	20,0	14,0	2,1	6,6	22,3			1,0						14,0		Initial slide triggered by bomb raid	/4/ /44/ /4/
34	Langørjan																	/4/ /45/
35	Leirfossen																	/4/ /46/
36	Leistad	19,5	17,0	0,2	110,0	31,0	28,0	22,0	1,5	6,0								/4/ /46/
37	Lersbakken	20,0	23,0		50,0	32,0												/26/
38	Lillebukt,Stje nrøy 1																	/26/
39	Lillebukt,Stje nrøy 2																	/26/
40	Lodalen,Oslo		50,0	17,0	3,0	31,4	35,5	18,4	0,8	17,1	OC	10,0		50,0		50,0		/47/ /4/ /48/ /49/
41	Lund																	/51/
42	Lyngen	19,0	15,0	0,3	52,0	33,0	28,0	17,0	2,1									/20/ /4/
43	Nedremule, Byneset																	/20/ /4/
44	Nidelva																	
45	Olderdalen		29,2	0,4	69,3				3,0									
46	Orkdalsfjorden																Slide in loose sand,silt and siltig clay layer	/26/

Nr	Landslide	Unit weight, $\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$c_{ui}$ [kPa]	$c_{ur}$ along slip surface [kPa]	$S_t$ [-]	$w$ [%]	$w_L$ [%]	$w_P$ [%]	$I_L$ [-]	$I_P$ [%]	OCR	salinity g/l	$c_{ui}$ from triaxial testing [kPa]	$c_{ui}$ from vane boring [kPa]	$c_{ui}$ from konus [kPa]	$c_{ui}$ from Unconfined compression test [kPa]	Remark	Source
47	Othillenborg		24,5	0,3	82,6													/4/
48	Rissa		25,0	0,3	100,0	33,0	23,0	18,0	2,0	5,0			25,0	12,0	12,0			/52/
49	Røesgrenda	21,0			70,0	25,0				8,0							Data comprises slides from many years in the area	/53/
50	Rørdal																Slide in silt, silty clay and sand layer	/4/
51	Sandnessjøen																The longest cross section of the slope profile was considered in this slide	/26/
52	Selnes	18,6	20,0	0,2	100,0	34,0	22,0	17,0	3,4	5,0	OC		20,0	20,0	16,0			/54/
53	Sjetnemarka		22,8	0,3	85,6				2,2									/4/
54	Skjelstadmar ka		66,0	0,8	80,0	32,0	27,0	17,0				0,4			14,0			/55/
55	Stavset																	/4/
56	Stokke																	/56/
57	Tiller	18,5	19,0	0,2	90,0	35,0	24,0	21,0	2,7	4,0								/4/
58	Ullensaker	19,0	17,0	0,4	42,0	32,0	25,7	19,0	1,9	6,7	NC	2,0	17,0	15,0	15,0			/57/
59	Verdal	19,3	60,0	0,2	300,0	27,5	21,5	16,5	2,2	5,0								/58/
60	Vibstad	19,5	40,0	5,0	8,0	24,0	37,0	20,0	0,2	17,0	OC	2,7			40,0			/59/

## Vedlegg B

- Oppgavetekst





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

## Masteroppgave

Vår 2013

Av

Siri Ulvestad

# Omrøringsenergi i sensitive leirer

## Bakgrunn

Naturfarer som flom og skred er et stort problem i de fleste deler av verden, og kan i tillegg til store økonomiske tap, også føre til tap av menneskeliv. Kvikkleireskred kan i forhold til andre skredtyper være spesielt ødeleggende, da små skred raskt kan utvikle seg til å bli veldig store. De siste 20 – 30 årene har de fleste større kvikkleireskred vært utløst av menneskelig aktivitet. Dette tyder på at forståelsen for faren ved kvikkleireskred er mangelfull. Med samfunnets stadig høyere krav til sikkerhet er det også ønskelig å kunne forutse og hindre utviklingen av store skred. Siden alle skred har ulike geologiske situasjoner, det finnes utallige ulike materialer og skredmekanismer er komplekse av natur, har det derimot vist seg å være vanskelig å finne en bestemt måte å forholde seg til kvikkleireskred på. Det er derfor ønskelig å få en enda dypere innsikt i kvikkleire og skredets oppførsel.

Fullstendig forståelse av de mekanismene som er involvert i kvikkleireskred er utfordrende fordi det blant annet krever (1) en forståelse for kvikkleires flytende oppførsel (2) modellering av progressive brudd (3) kunnskap om fysisk tykkelse av den lokale sonen langs skjærbruddflaten (skjærbånd) (4) tilfredsstillende vurderingsverktøy for å studere utløpsdistanse til kvikkleireskredmassene (5) kunnskap om effekten av forstyrrelser ved prøver.

Forskere og praktikere har imidlertid forsøkt å finne en måte å tilnærme seg problemet på. Stabilitet av naturlige kvikkleireskråninger har blitt studert med pragmatisk tilnærminger, som involverer flere logiske forenklinger. Slike problemer har også blitt angrepet ved å

fokusere på noen utvalgte aspekter av problemet, hvorav den ene er basert på omrøringsenergi.

Denne masteroppgaven er en del et nasjonalt forskningsprosjekt kalt: Naturfare, infrastruktur, flom og skred (NIFS). Prosjektet er et felles satsningsområde mellom Jernbaneverket, Norges vassdrags- og energidirektorat og Statens vegvesen. Prosjektperioden er definert som 2012 – 2015.

## Oppgave

Denne oppgaven er basert på studiene fra Tavenas et al. (1983), Thakur et al. (2012) og Thakur og Degago (2013) som foreslår at omrøringsenergi i sensitive leirer kan brukes til å øke forståelsen for utbredelse av skred i kvikkleireområder.

Målet for oppgaven er å studere:


- (1) Hvilke og hvordan ulike jordparametere påvirker utviklingen av kvikkleireskred ved å studere litteratur og innsamlet data fra gamle kvikkleireskred
- (2) Om omrøringsenergi kan benyttes som en samlende parameter for flere materialegenskaper i jorda
- (3) En enkel metode for å måle omrøringsenergi i laboratoriet

Følgende resultater er forventet fra denne oppgaven

- (4) Innsamlet data fra flere skredhendelser skal sammenliknes med funn fra tidligere gjennomførte studier for å finne sammenhenger mellom materialegenskapene i leira og norske kvikkleireskreds oppførsel.
- (5) I tillegg skal begrepet omrøringsenergi belyses nærmere, og det skal vurderes hvordan denne parameteren kan benyttes for å minske kompleksiteten ved vurdering av kvikkleireskred.
- (6) Foreslår en metode for labforsøk, som kan brukes til å måle omrøringsenergi i norske kvikk- og sensitive leirer
- (7) Estimering av omrøringsenergi i sensitive leirer basert på lab- og felldata
- (8) En kritisk gjennomgang av den analytiske metoden foreslått av Thakur et al. (2012) og den empiriske formelen av Leroueil (2001) for å beregne omrøringsenergi.

---

Arnfinn Emdal  
NTNU



---

Vikas Thakur  
Statens vegvesen, Vegdirektoratet