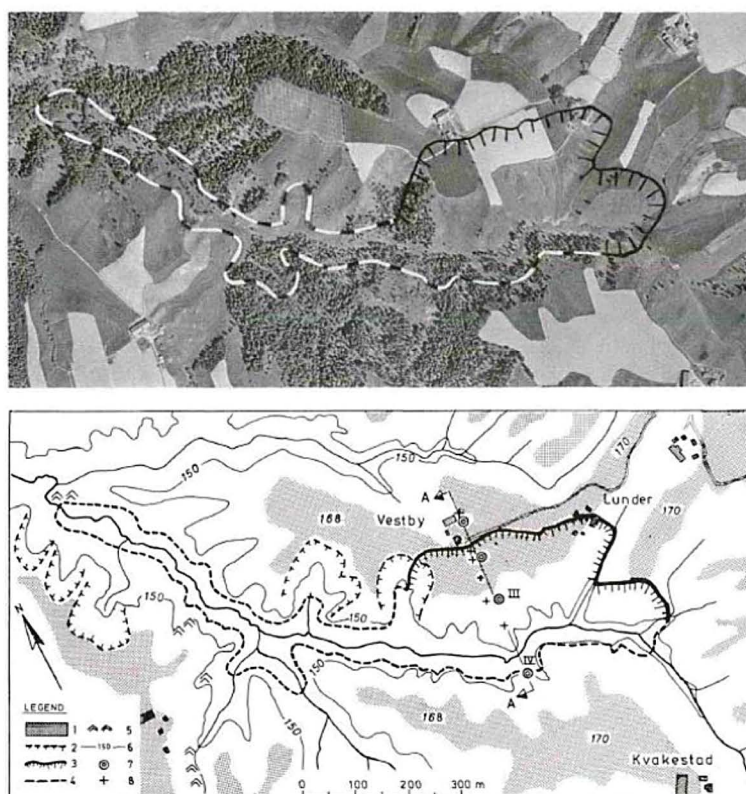


# Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner

57  
2014

R  
A  
P  
P  
O  
R  
T



Figur 3.1 *Fotografi av Båstad-området før skredet, og plantegning av samme område med skredområdet indikert (Gregersen og Løken, 1979)*

Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire

# Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner

**Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og  
Jernbaneverket**

**2014**

**Rapport nr. 57/2014**

Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner

**Utgitt av:** Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket

**Utarbeidet av:**

Petter Fornes, Hans Petter Jostad v/NGI

**Dato:** 03.09.2013

Opplag: P.O.D.

**ISBN:** 978-82-410-1009-5

**Sammendrag:**

Dette prosjektet er finansiert av NIFS og interne SP1-midler, og er en utvidelse av prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" som var et samarbeidsprosjekt mellom Statens Vegvesen/ Vegdirektoratet (SVV), Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) og NGI. Overordnet mål for prosjektet er å etablere et forbedret grunnlag for valg av sikkerhetsfaktorer og prosedyrer for prosjektering av bygg, anlegg og samferdsel i områder med kvikkleire eller meget sensitiv leire. Denne rapporten gir resultatene fra aktivitet A1 Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner, og kvantifiserer med elementanalyser effekten av softening (sprøbrudd) for ravinedalen ved Båstad hvor det gikk et kvikkleireskred i 1974.

**Emneord:** sprøbruddmateriale, raviner, båstadskredet, strain softening, NGI-ADP soft



# Rapport / Report

## **NIFS N-6.5.2 Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder**

### **A1 Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner**

20130275-01-R  
12. mai 2014  
Rev. nr.: 0

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGL.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGL.



## Prosjekt

Prosjekt: NIFS N-6.5.2 Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder  
Dokumenttittel: A1 Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner  
Dokumentnr.: 20130275-01-R  
Dato: 12. mai 2014  
Rev. nr.: 0

Hovedkontor:  
Pb. 3930 Ullevål Stadion  
0806 Oslo

Avd Trondheim:  
Pb. 1230 Sluppen  
7462 Trondheim

T 22 02 30 00  
F 22 23 04 48

Kontonr 5096 05 01281  
Org. nr 958 254 318 MVA

[ngi@ngi.no](mailto:ngi@ngi.no)  
[www.ngi.no](http://www.ngi.no)

## Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: NIFS  
Kontaktperson: Vikas Thakur  
Kontraktreferanse: NIFS N-6.5.2

## For NGI

Prosjektleder: Petter Fornes  
Utarbeidet av: Petter Fornes  
Kontrollert av: Hans Petter Jostad

## Sammendrag

Dette prosjektet er finansiert av NIFS og interne SP1-midler, og er en utvidelse av prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" som var et samarbeidsprosjekt mellom Statens Vegvesen/Vegdirektoratet (SVV), Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) og NGI. Overordnet mål for prosjektet er å etablere et forbedret grunnlag for valg av sikkerhetsfaktorer og prosedyrer for prosjektering av bygg, anlegg og samferdsel i områder med kvikkleire eller meget sensitiv leire.

Denne rapporten gir resultatene fra aktivitet A1 Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner, og kvantifiserer med elementanalyser effekten av softening (sprøbrudd) for ravinedalen ved Båstad hvor det gikk et kvikkleireskred i 1974. I denne aktiviteten er samme beregningsmetode fulgt som i rapport 3 i prosjekt 20092128, Sensitivitetsstudie av vegfylling i svakt hellende skråninger.

# Sammendrag (forts.)



Dokumentnr.: 20130275-01-R  
Dato: 2014-05-12  
Rev. nr.: 0  
Side: 4

Analysene er gjort med elementmetodeprogrammet Plaxis og materialmodellen NGI-ADPSOft. Effekten av softening er funnet ved å beregne kapasiteten (maks avlastning i bunnen av skråningen) med softeningoppførsel, og deretter med perfekt plastisk oppførsel og samme last, redusere maksimal udrenert skjærstyrke med  $c/\phi$ -reduksjon. Denne reduksjon er her kalt softeningfaktor  $F_{\text{softening}}$ , og kan benyttes til å øke nødvendig materialfaktor  $\gamma_m$  for å ta hensyn til effekten av softening eller sprøbrudd i konvensjonelle grenselikevektsanalyser basert på et perfekt plastisk materiale uten softening.

For å ta hensyn til prøveforstyrrelse er skjærstyrkeprofilen økt i forhold til styrken fra labforsøk. Dette er også nødvendig for å ha initiell sikkerhetsfaktor  $> 1$  for skråningen. Det er valgt å øke aktiv styrke med 40 % (passiv og DSS noe mindre), og med perfekt plastisk oppførsel er da initiell sikkerhetsfaktor 1.038 for den kritiske skjærflaten.

Med beste estimat for sprøhetsparametere blir softeningfaktoren  $F_{\text{softening}} = 1.02$  for Båstad-skredet.

I rapport A3 (NGI, 2012) var gjennomsnittlig verdi av  $F_{\text{softening}} = 1.09$ , og kun 2.5 % av analysene fra Monte Carlo-simuleringen var høyere enn 1.20. Det var imidlertid for en aktivt mobilisert uendelig lang slakk skråning, som antas å være blant tilfellene som kan ha høyest softeningfaktor.

Basert på tilbakeregningen av Båstad-skredet antas det at for raviner som har lav initiell sikkerhetsfaktor bør materialfaktor  $\gamma_m$  økes med 0-5 % for å ta hensyn til sprøbruddoppførsel i forenklete perfekt plastiske analyser.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Metode</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Skredet ved Båstad, 1974</b>	<b>8</b>
	3.1 Tverrprofil	8
	3.2 Materialdata	10
<b>4</b>	<b>Beregningsmodell</b>	<b>11</b>
	4.1 Analyser i Plaxis	11
	4.2 Materialparametere NGI-ADPSOft	12
	4.3 Sensitivitetsstudier	18
<b>5</b>	<b>Resultater</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Konklusjoner</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>Referanser</b>	<b>21</b>

## Kontroll- og referanseside



## 1 Innledning

Dette prosjektet er finansiert av NIFS og interne SP1-midler, og er en utvidelse av prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" som var et samarbeidsprosjekt mellom Statens Vegvesen/Vegdirektoratet (SVV), Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) og NGI. Overordnet mål for prosjektet er å etablere et forbedret grunnlag for valg av sikkerhetsfaktorer og prosedyrer for prosjektering av bygg, anlegg og samferdsel i områder med kvikkleire eller meget sensitiv leire.

Dette prosjektet (denne utvidelsen) er delt opp i følgende to aktiviteter:

1. Effekt av progressivt brudd (softening) ved utbygging i ravineområder med sensitiv leire
2. Sannsynlighetsanalyser og numerisk studie av brudd i skråninger ved prosentvis forbedring

Denne rapporten gir resultatene fra aktivitet A1 Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner. I denne aktiviteten er samme beregningsmetode benyttet som i rapport 3 i prosjekt 20092128, Sensitivitetsstudie av vegfylling i svakt hellende skråninger (NGI, 2012).

Beregnet kapasitet (maksimal avlastning i bunnen) for ravedalen ved Båstad, hvor det gikk et skred i 1974, er funnet med sprøbruddoppførsel inkludert. Deretter er softeningfaktoren  $F_{\text{softening}}$  funnet, som maksimal udrenert styrke må reduseres med for å oppnå samme kapasitet. Sensitiviteten til denne faktoren er også studert.

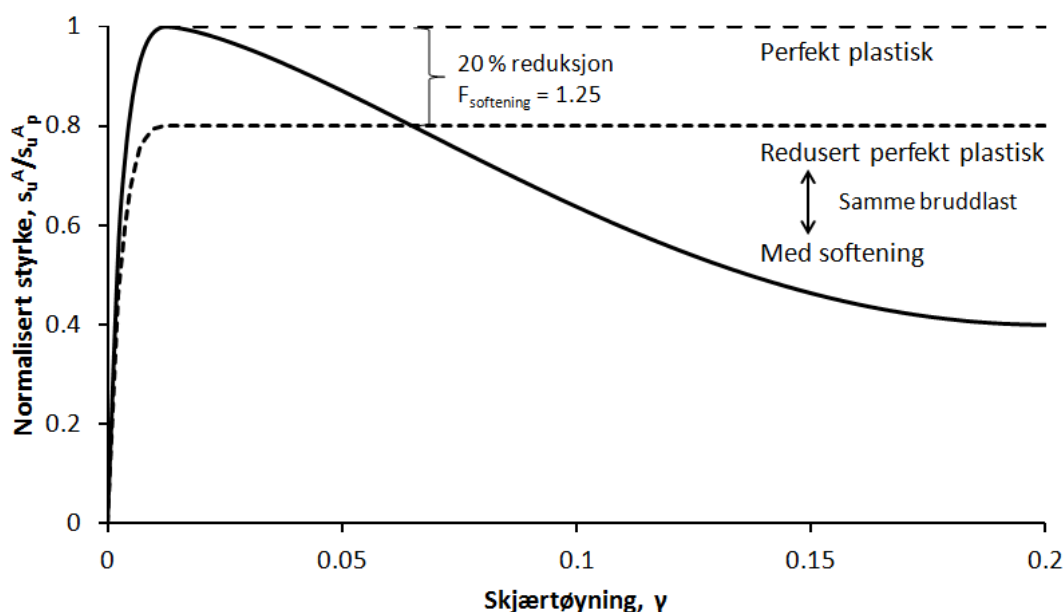
Resultatene gir dermed et grunnlag for å vurdere hvor mye kapasiteten overestimeres dersom man bestemmer kapasiteten ved hjelp av klassiske likevektsanalyser basert på et perfekt plastisk materiale uten softening. Denne overestimeringen kan dermed benyttes til å finne en forenklet metode for å ta hensyn til sprøbruddoppførselen til sensitive og kvikke leirer.

## 2 Metode

Ved bruk av perfekt plastisk materialoppførsel for sensitive leirer kan udrenerte maksimale skjærstyrker reduseres med en softeningfaktor  $F_{\text{softening}}$  for å ta hensyn til softeningoppførsel. Faktoren  $100\% \cdot (1 - 1/F_{\text{softening}})$  gir dermed prosentvis reduksjon i udrenerte styrker for å oppnå lik beregnet kapasitet med perfekt plastisk bruddoppførsel som for en analyse med softeningoppførsel inkludert. Samme fremgangsmåte som i prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" er benyttet for å bestemme faktoren,  $F_{\text{softening}}$ :

1. Kjøre en elementanalyse med softening til global bruddlast (maks last).
2. Laste opp til samme bruddlast i en analyse uten softening
3. Benytte  $c/\phi$ -reduksjon i analysen uten softening for å finne redusert udrenert skjærstyrke  $s_u/F$  som gir brudd under den gitte lasten.

Softeningfaktoren  $F_{\text{softening}}$  er i dette tilfelle beregnet sikkerhetsfaktor  $F$ .

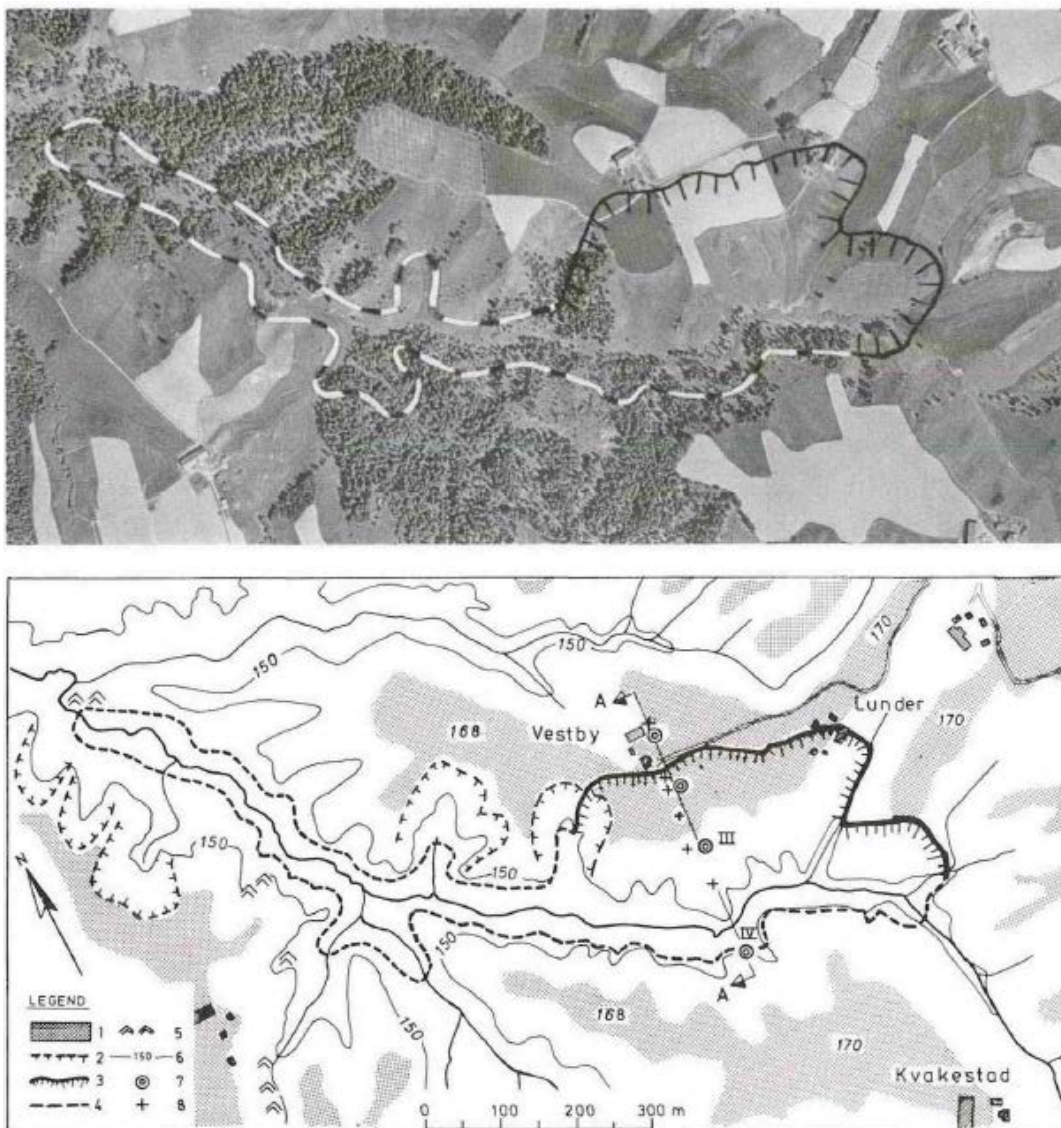


Figur 2.1 Softeningkurve og perfekt plastisk materialkurve (stiplet linje) som gir samme bruddlast for et gitt kapasitetsproblem

Figur 2.1 viser eksempel på de idealiserte materialkurvene som er benyttet i analysen. Materialet med softening bestemmer kapasiteten, det vil si global bruddlast for dimensjoneringsproblemet. For å få tilsvarende bruddlast med et perfekt plastisk materiale, må styrken reduseres. Hvor mye den må reduseres med for å få samme bruddlast bestemmer softeningfaktoren  $F_{\text{softening}}$ .

### 3 Skredet ved Båstad, 1974

Kvikkleireskredet ved Båstad i 1974 er valgt som beregningstilfelle for å studere effekten av progressiv bruddutvikling i raviner. Skredet ble sannsynligvis utløst av planeringsarbeider nede i skråningen, i kombinasjon med stor nedbør og lav initiell sikkerhetsfaktor (Gregersen og Løken, 1979). Ravinedalen og skredområdet er vist på Figur 3.1.

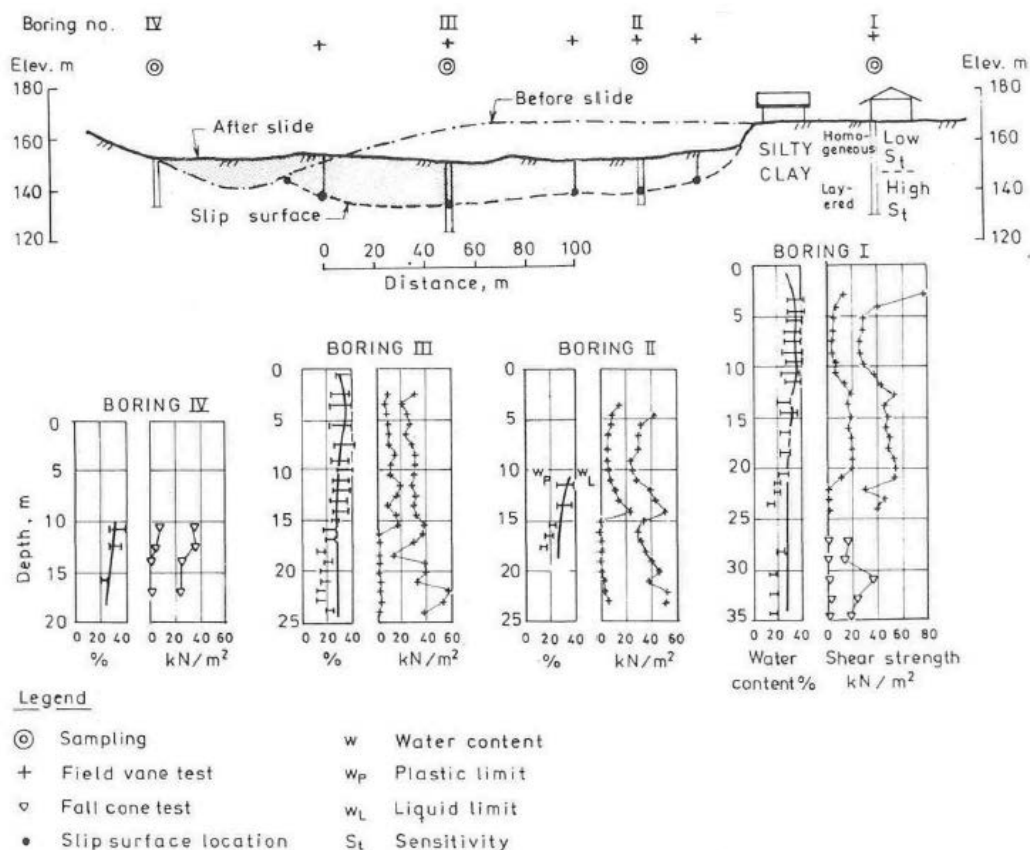


Figur 3.1 Fotografi av Båstad-området før skredet, og plantegning av samme område med skredområdet indikert (Gregersen og Løken, 1979)

#### 3.1 Tverrprofil

Langs profil A-A er det tatt flere prøveserier og vingeboringer er utført, se Figur 3.2. Opprinnelig terreng i toppen av ravinen er ved +167 m, og heller jevnt ned mot +140 m ved elva i bunnen av dalen. Skråningen er omtrent 100 m lang. Det er et

tørreskorpelag på 3-4 m tykkelse og det er påvist fjell ved 45 m dybde. Ved omtrent 15-20 m dybde blir leiren meget sensitiv.



Figur 3.2 Tverrprofil A-A gjennom skredområdet (Gregersen og Løken, 1979)

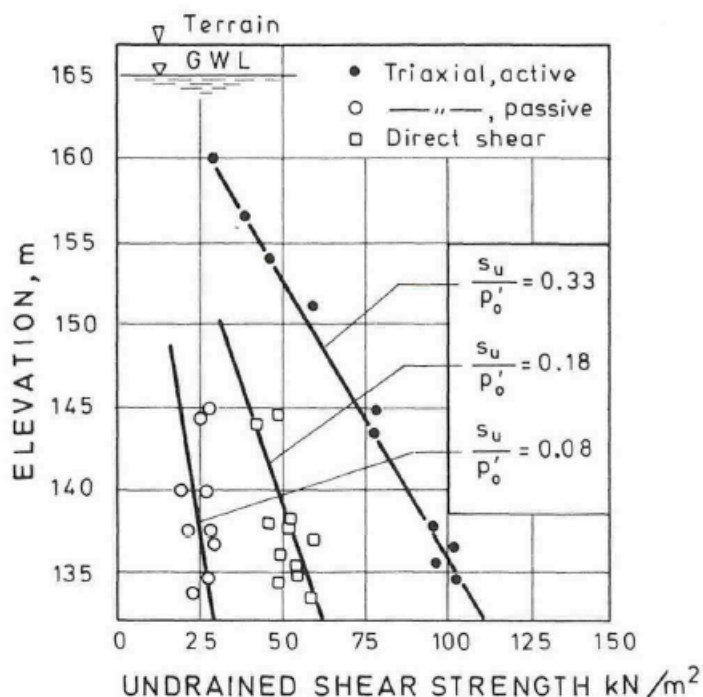
Blant annet skredet ved Båstad er tilbakeregnet av Karlsrud et al. i 1984. Beregningsmodellen er vist på Figur 3.3 og kritisk skjærflate hadde udrenert sikkerhetsfaktor på 0.95.



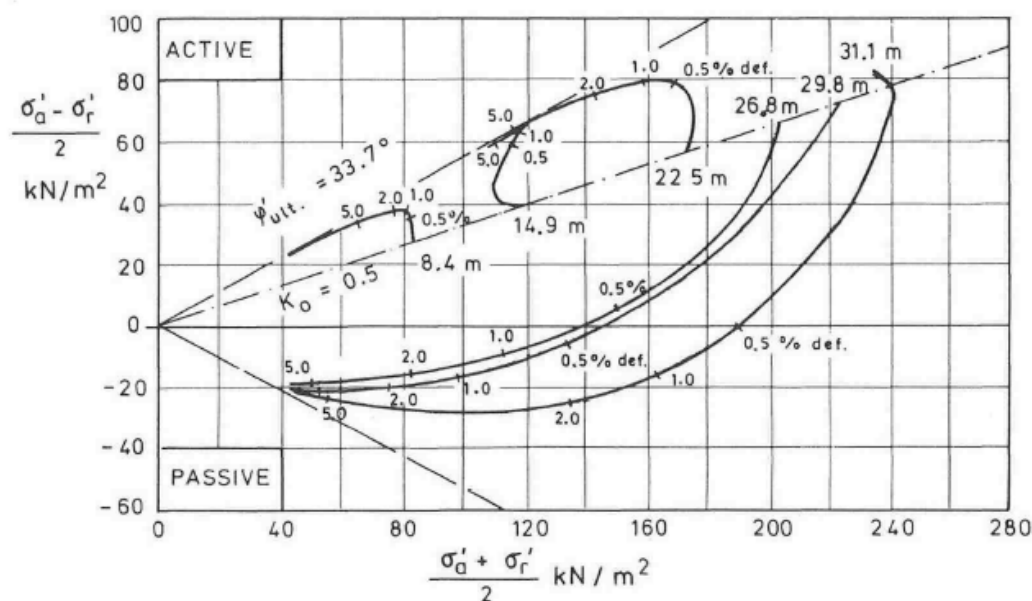
Figur 3.3 Beregningsmodell, Karlsrud et al., 1984

### 3.2 Materialdata

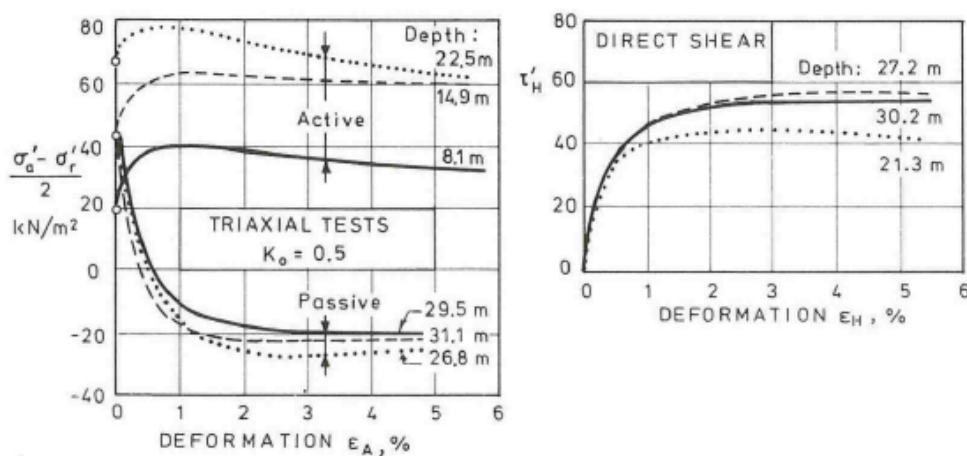
Det er utført både aktive og passive udrenerte triaksforsøk, samt DSS-forsøk på prøver tatt med 54 mm prøvetaker ved Båstad, se Figur 3.4, Figur 3.5 og Figur 3.6.



Figur 3.4 Udrenert skjærstyrke med dybde (Gregersen og Løken, 1979)



Figur 3.5 Spenningsstier for aktive og passive udrenerte triaksforsøk (Gregersen og Løken, 1979)



Figur 3.6 Skjærspenning mot tøyning for udrenerte triaks- og DSS-forsøk (Gregersen og Løken, 1979)

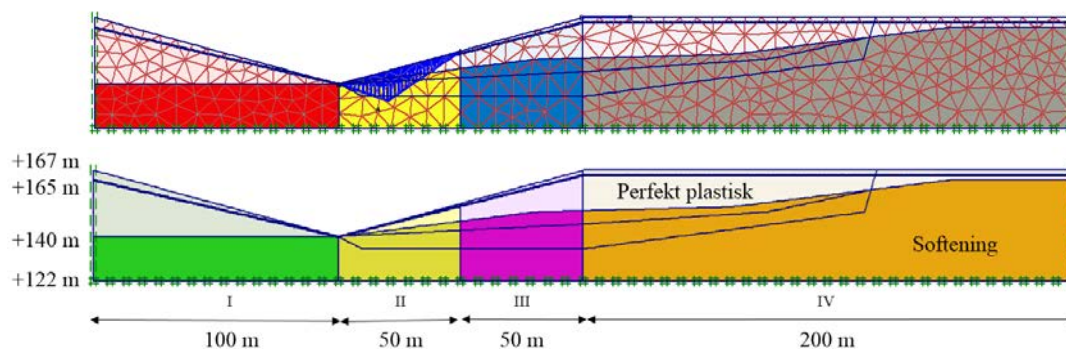
Materialoppførselen etter maksimal udrenert styrke vises på Figur 3.6. Ikke alle de passive triaksforsøkene og DSS-forsøkene viser sprøbruddoppførsel. Fordi forsøkene er gjort på 54 mm prøver er det rimelig å anta stor grad av prøveforstyrrelse, hvilket kan bety at sprøheten underestimeres.

## 4 Beregningsmodell

### 4.1 Analyser i Plaxis

Elementmetodeprogrammet Plaxis 2D ([www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl)) er benyttet som analyseverktøy med den brukerdefinerte materialmodellen NGI-ADPSOFT (Grimstad og Jostad, 2010; Jostad og Grimstad, 2011).

Plaxis-modellen av tverrprofil A-A er vist på Figur 4.1. Skråningen er delt i to lag hvor det øvre er perfekt plastisk og det nedre inkluderer softening. Begge lagene har ellers samme skjærstyrkeprofil. Grunnvannstand er satt til 2 m dybde ved flatt terreng og avtar lineært i skråningen ned til 0 m dybde ved tåa. Det er benyttet 712 15-noders elementer. Profilet er delt opp i fire soner I-IV med forskjellige materialsett for å ta hensyn til endring i skjærstyrkeprofil langs tverrsnittet.



Figur 4.1 Plaxis-modell, profil A-A, Båstad

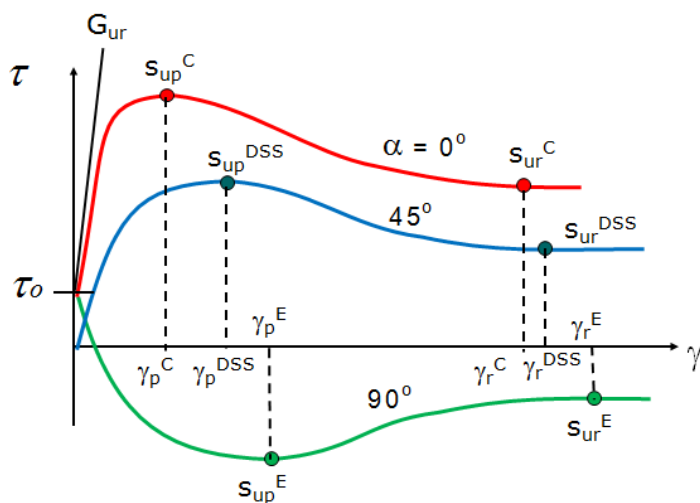
For å utløse skredet (brudd) er en last med trekantfordeling påført som avlastning i nedre halvdel av skråningen, med maks punkt 20 m opp fra tåa. Det er et uvisst hvordan planeringsarbeidet som trolig utløste skredet ved Båstad ble utført i 1974, så dette er antatt som en tilnærming.

For å generere initialspenninger er  $K_0$ -prosedyren i Plaxis først brukt. Deretter, i første beregningsfase brukes det materiale med lav skjærstivhet  $G_{ur}/s_u^A = 100$  uten å gjøre noen endringer, for å oppnå en likevektstilstand som tar hensyn til hellende terreng. I andre beregningsfase gjøres det heller ingen endringer, bortsett fra å bytte til nytt materiale som brukes i resten av analysen, med  $G_{ur}/s_u^A = 500$ . I tredje fase påføres så avlastningen som en enhetslast. Avlastningen blir deretter økt inkrementelt til brudd i fjerde fase.

Etterpå gjentas analysen med samme parametersett, men nå uten softening. I denne analysen lastes det opp til bruddlasten fra analysen med softening. Deretter gjøres en  $c/\phi$ -reduksjon hvor man finner en redusert udrenert skjærstyrke som gir brudd. Dette gir faktoren  $F_{softening}$  som beskriver hvor mye maksimal udrenert skjærstyrke må reduseres med i analysen uten softening for å gå til brudd ved den gitte lasten.

#### 4.2 Materialparametere NGI-ADPSoft

Den brukerdefinerte materialmodellen NGI-ADPSoft, ferdigstilt i aktivitet A1 i prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" (NGI, 2011), er benyttet til å modellere oppførselen til leiren i denne aktiviteten. Modellen beskriver hele skjærspennings-tøyningskurven, inkludert softeningoppførselen etter maksimal udrenert skjærstyrke. Modellen er totalspenningsbasert og gir forskjellig oppførsel avhengig av deformasjonsretningen. De viktigste parameterne for modellen er vist på Figur 4.2. Parameterne bestemmes ved hjelp av udrenerte skjærforsøk, aktive (CAUC), passive (CAUE) og direkte skjær (DSS).



Figur 4.2 Modellparametere til NGI-ADPSOft

Basert på de antatt minst forstyrrede prøvene er parameterne i Tabell 4.2 valgt som beste estimat for den sensitive leira. Styrkeparameterne er oppjustert for å oppnå initiell sikkerhetsfaktor  $> 1$  for skråningen ved å ta hensyn til prøveforstyrrelse.



Tabell 4.1 Modellparametere for NGI-ADPSoft

Parameter	Enhet	I	II	III	IV
$\gamma_{unsat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20	20	20	20
$\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20	20	20	20
$k_x$	[m/s]	0	0	0	0
$k_y$	[m/s]	0	0	0	0
$K_0$	[-]	1.0	1.0	0.8	0.6
$G_{ur}/s_u^A$	[-]	500	500	500	500
$s_{u\ ref}^A$	[kPa]	28	28	28	28
$s_{u\ inc}^A$	[kPa]	4.62	4.62	4.62	4.62
$x_{ref}$	[m]	-100	0	0	0
$y_{ref}$	[m]	163	148	148	163
$\Delta y_{ref}/\Delta x$	[-]	-0.15	0.15	0.15	0
$s_u^{DSS}/s_u^A$	[-]	0.45	0.45	0.45	0.45
$s_u^P/s_u^A$	[-]	0.19	0.19	0.19	0.19
$\tau_0/s_u^A$	[-]	0.0	0.0	0.2	0.4
$s_{u\ r}^A/s_u^A$	[-]	0.01	0.01	0.01	0.01
$s_{u\ r}^{DSS}/s_u^A$	[-]	0.01	0.01	0.01	0.01
$s_{u\ r}^P/s_u^A$	[-]	0.01	0.01	0.01	0.01
$\gamma_p^C$	[%]	1	1	1	1
$\gamma_p^{DSS}$	[%]	3	3	3	3
$\gamma_p^E$	[%]	4	4	4	4
$\gamma_r^C$	[%]	30	30	30	30
$\gamma_r^{DSS}$	[%]	30	30	30	30
$\gamma_r^E$	[%]	30	30	30	30
$c_1$	[-]	1	1	1	1
$c_2$	[-]	0	0	0	0
$\nu$	[-]	0.495	0.495	0.495	0.495
$\nu_u$	[-]	0.495	0.495	0.495	0.495
$\alpha$	[-]	2	2	2	2
$l_{int}$	[m]	0.1	0.1	0.1	0.1
$1-l^*/l_{int}$	[-]	0	0	0	0
<i>Int.Type</i>	[-]	1	1	1	1
<i>GS-pl/tot</i>	[-]	0	0	0	0

#### 4.2.1 Styrkeparametere

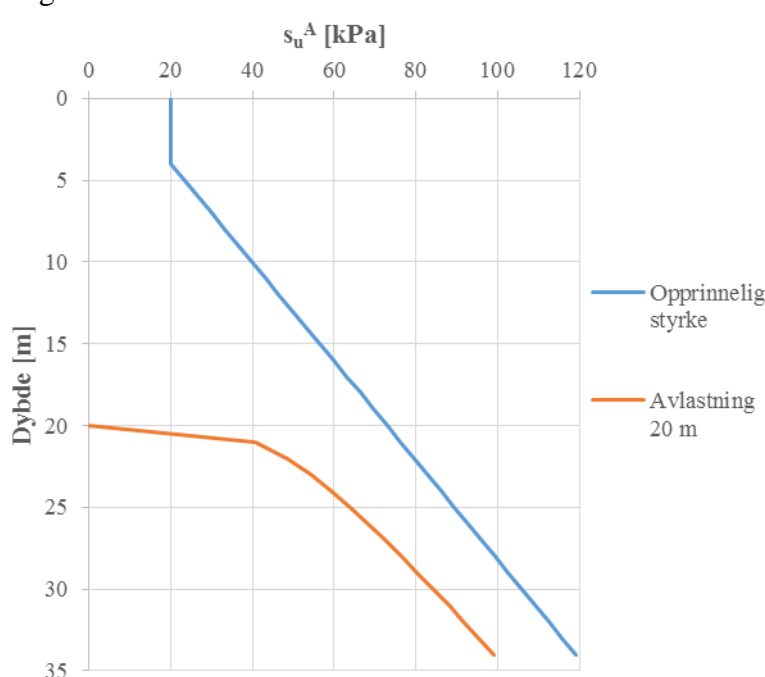
Styrkeparametere er basert på Figur 3.4. Fra figuren er  $s_u^A/p_0' = 0.33$ ,  $s_u^A/p_0' = 0.18$  og  $s_u^A/p_0' = 0.08$ . Romvekt  $\gamma$  antas å være 20 kN/m<sup>3</sup> (Gregersen og Løken, 1979).

I NGI-ADPSoft er referansestyrken  $s_{u\ ref}^A$  aktiv udrenert skjærstyrke ved en dybde  $y_{ref}$ . Over  $y_{ref}$  er styrken lik  $s_{u\ ref}^A$  og under øker styrken lineært med  $s_{u\ inc}^A$  med dybden, hvor  $s_{u\ inc}^A$  er økningen i udrenert, aktiv skjærstyrke per meter.

$$s_{u,inc}^A = \Delta p_0' \cdot s_u^A/p_0' = \gamma' \cdot s_u^A/p_0' = (\gamma - 10 \text{ kN/m}^3) \cdot s_u^A/p_0'$$

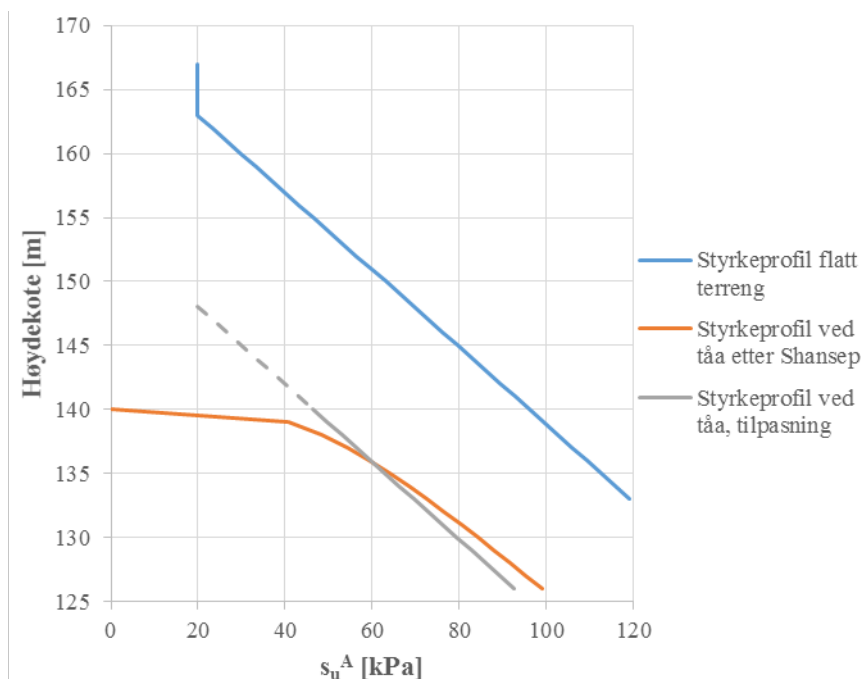
Det er antatt konstant styrke i tørrskorpa ned til 4 m dybde ved flatt terreng. Fra Figur 3.4 er  $s_u^A = 20 \text{ kPa}$  ved +163 m, og følgende er  $y_{ref} = 163 \text{ m}$  og  $s_{u,ref}^A = 20 \text{ kPa}$  antatt.

For å ta hensyn til økt styrke på grunn av avlastet terreng er det gjort en Shansep-betraktning. På grunn av erosjonen som har gravd ut ravedalen er det antatt 20 m avlastning fra opprinnelig terreng ved tåa av skråningen, i henhold til Karlsrud et al. (1984) på Figur 3.3. Styrkeprofil ved tåa med Shansep etter 20 m avlastning er vist på Figur 4.3.



Figur 4.3 Styrkereduksjon etter 20 m avlastning med Shansep-betraktning

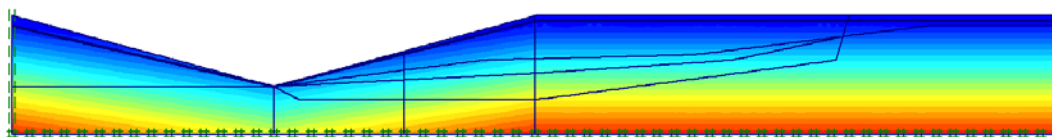
For å ha kontinuerlig styrke med dybden i hele tverrprofilet er Shansep-profilet tilpasset med samme styrkeparametere som for flatt terreng. Ved å bruke  $y_{ref} = 148 \text{ m}$  ved tåa får man en god tilpasning til Shansep-profilet, se Figur 4.4. Mellom tåa og toppen av skråningen er det interpolert lineært ved å endre  $y_{ref}$  gradvis med parameteren  $\Delta y_{ref}/\Delta x = 0.15$ . 0-punkt for x-aksen er i tåa.



Figur 4.4 Styrkeprofil ved tåa og ved toppen av skråningen

Med styrkeprofilene vist på Figur 3.4 er ikke skråningen stabil initielt. For å ta hensyn til prøveforstyrrelse er derfor styrkeprofilene oppjustert. Ifølge Karlsrud og Hernandez-Martinez (2013) vil man for høykvalitets blokkprøver måle 10-50 % høyere aktiv udrenert styrke enn for 54 mm prøver. For DSS og passiv styrke er effekten av prøveforstyrrelse mindre, og man vil henholdsvis måle 5-20 % og 0-10 % høyere styrker.

I beregningene er det antatt 40 % høyere aktiv udrenert styrke enn på Figur 3.4, og tilsvarende 16.25 % høyere DSS-styrke og 7.5 % høyere passiv styrke. Det gir dermed  $s_{u,ref}^A = 28$  kPa og  $s_{u,inc}^A = 4.62$  kPa/m, og anisotropiforholdene  $s_u^{DSS}/s_u^A = 0.45$  og  $s_u^P/s_u^A = 0.19$ . Konturer av  $s_u^A$  er vist på Figur 4.5.



Figur 4.5 Konturer av  $s_u^A$ , fra 20 til 220 kPa

#### 4.2.2 Stivhetsparametere

Ifølge Mayne og Kulhawy (1982) er  $K_0$  mellom 0.5 og 0.7 for en leire med overkonsolideringsgrad  $OCR < 2$ . I sone IV i profilet hvor terrenget er flatt er derfor  $K_0 = 0.6$  antatt. Nede i skråningen i den passive sonen vil horisontalspenningene gradvis øke i forhold til vertikalspenningene, og derfor er  $K_0 = 1$  antatt for sone I og II, og  $K_0 = 0.8$  for sone III.

Initiell skjærspenning  $\tau_0/s_u^A = 0, 0.2$  og  $0.4$  er benyttet for henholdsvis sone I og II, sone III og IV. Dette tilsvarer  $\tau_0/s_u^A = [\sigma'_{v0}/s_u^A] \cdot (1 - K_0)/2$  for  $s_u^A/\sigma'_{v0} = 0.5$ , som er tilnærmet riktig.

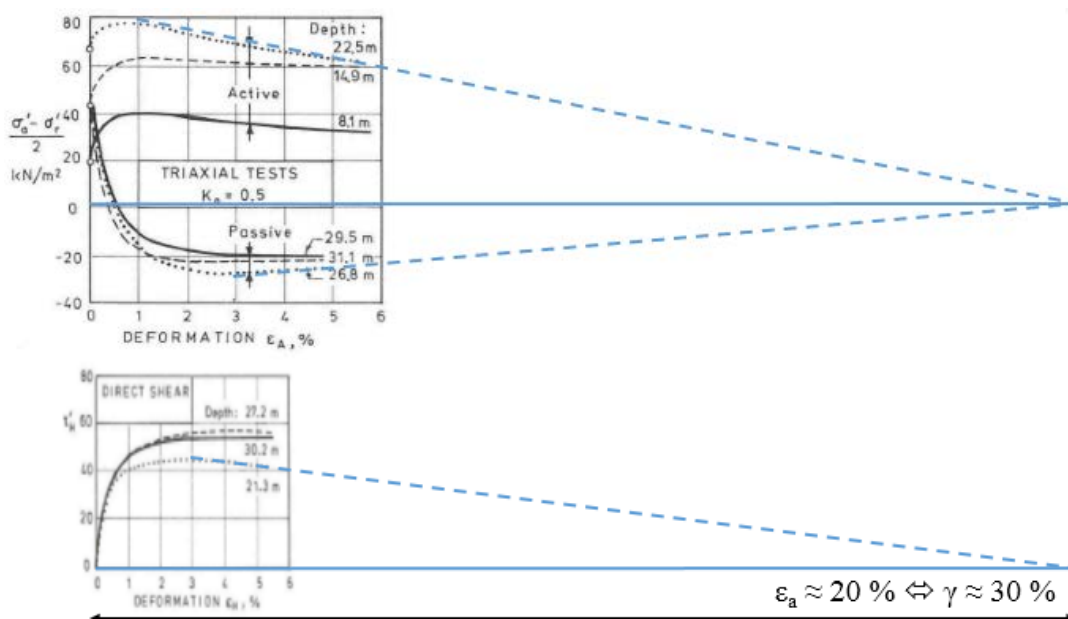
Det er vanskelig å vurdere normalisert initiell skjærstivhet  $G_{ur}/s_u^A$  ut ifra triaksforsøkene fra Gregersen og Løken, 1979. Basert på A3 og A4 i forrige prosjekt (NGI, 2012;2013) ble derfor  $G_{ur}/s_u^A$  antatt å være lik 500. I den første beregningsfasen hvor initialspenningene beregnes benyttes et materiale med  $G_{ur}/s_u^A = 100$  (ellers likt) for å ta hensyn til lavere stivhet i drenert tilstand.

Skjørtøyning ved maks skjærstyrke er estimert fra Figur 3.6. Forsøkene med lavest verdi er antatt å være minst prøveforstyrret, og derfor er  $\gamma_p^C = 1\%$ ,  $\gamma_p^{DSS} = 3\%$  og  $\gamma_p^E = 4\%$  antatt.

#### 4.2.3 Softeningparametere

Det er antatt null softening i det mindre sensitive øvre leirelaget. Dette er oppnådd ved å sette residualstyrken lik maksstyrken og ved å bruke en meget stor residualtøyning.

For det sensitive nedre leirelaget er softeningkurven fra labforsøkene tilpasset med lineær reduksjon av styrken ned mot en residualskjærstyrke som er tilnærmet lik null,  $s_u^A/s_u^A = s_u^{DSS}/s_u^A = s_u^P/s_u^A = 0.01$ . Lineært softeningforløp i NGI-ADPSOft er valgt med parameterne  $c_1 = 1$  og  $c_2 = 0$ . Figur 4.6 viser at residualtøyning  $\gamma_r^C = \gamma_r^C = \gamma_r^C = 30\%$  gir en god tilnærming for de antatt minst prøveforstyrrede forsøkene, de som viser softeningoppførsel.



Figur 4.6 Bestemmelse av residualtøyning  $\gamma_r$

Den interne lengden  $l_{int}$  styrer skjærbåndtykkelsen, og er antatt å være 0.1 m. Parameteren  $1-l^*/l_{int}$  kan brukes til å redusere skjærbåndtykkelsen ytterligere, men er her satt lik 0.

#### 4.2.4 Andre parametere

Tverrkontraksjonstallene  $v$  og  $v_u$  er satt lik 0.495 for udrenert tilstand. Permeabilitetene  $k_x$  og  $k_y$  er satt lik 0. Parameterne  $\alpha$ , Int.Type, GS-pl/tot er interne kontrollparametere. Benyttede verdier er oppgitt i Tabell 4.2.

### 4.3 Sensitivitetsstudier

For å undersøke usikkerheten i softeningfaktoren ble et sensitivitetsstudium utført. Effekt av styrkekalibrering, stivhet, sprøhet og utbredelse av kvikkeiresonen ble vurdert.

#### 4.3.1 Effekt av styrkekalibrering

For å se effekten av styrkekalibreringen, som tar hensyn til prøveforstyrrelse, ble aktiv styrke med dybde økt med 38 %, 40 % og 45 %. Passiv og DSS-styrke ble økt tilsvarende i henhold til Karlsrud og Hernandez-Martinez (2013), henholdsvis med 7 %, 7.5 % og 8.8 %, og med 15.5 %, 16.3 % og 18.1 %.

#### 4.3.2 Effekt av lav stivhet for initialspenninger

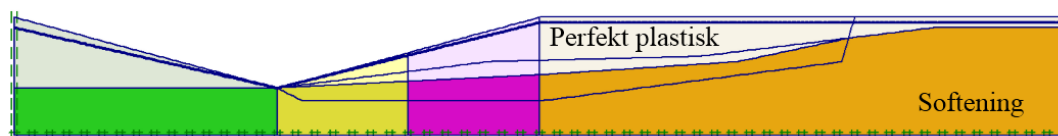
En analyse ble utført uten å redusere stivheten i beregningsfasen hvor initialspenninger ble funnet.

#### 4.3.3 Effekt av sprøhet

For å studere effekten av sprøhet er det gjort analyser hvor residualtøyningen er redusert fra 30 % til 22 %, og hvor skjærbåndtykkelsen er redusert fra 0.10 m til 0.07 m ved å bruke parameteren  $1-l^*/l_{int} = 0.3$ . I tillegg er en analyse utført med et forfinet elementnett med 1716 elementer og  $l_{int} = 1.0$  m.

#### 4.3.4 Effekt av kvikkeireutbredelse/tykkelse

For å se hvor mye utbredelsen av kvikkeiresonen betyr for softeningfaktoren ble en analyse utført hvor mengden materiale med softeningoppførsel ble redusert, se Figur 4.4. Under toppen av skrånningen er tykkelsen av kvikkeirelaget redusert med 5 m. En analyse hvor softeningoppførsel ble inkludert i hele profilet er også utført.



Figur 4.7 Mindre utbredelse av kvikkeire

## 5 Resultater

Med materialparameterne gitt i Tabell 4.1 er bruddlasten 33.6 kPa med softeningoppførsel. Med perfekt plastisk oppførsel og samme last er softeningfaktoren  $F_{\text{softening}} = 1.02$  funnet med  $c/\phi$ -analyse. Til sammenligning er initiell sikkerhetsfaktor med perfekt plastisk oppførsel 1.038 og bruddlast 48.8 kPa.

Resultatene fra sensitivitetsstudiene er presentert i Tabell 5.1 til Tabell 5.4.

Tabell 5.1 Sensitivitetsstudie, effekt av styrkekalibrering

Analyse	Bruddlast softening	$F_{\text{softening}}$	Bruddlast perfekt plastisk	$F_{\text{initiell}}$
Beste estimat, 40% økning av $s_u^A$	33.6 kPa	1.020	48.8 kPa	1.038
45% økning av $s_u^A$ (i stedet for 40%)	66.1 kPa	1.014	71.3 kPa	1.063
38% økning av $s_u^A$ (i stedet for 40%)	21.3 kPa	1.023	43.6 kPa	1.033

Ved å øke styrken er skråningen lenger unna bruddsituasjon og effekten av softening går ned. Ved å redusere styrken slik at den så vidt er stabil med softening betyr at softeningfaktoren  $F_{\text{softening}}$  nærmer seg initiell sikkerhetsfaktor med perfekt plastisk oppførsel, siden en veldig liten lastendring i prinsippet er nok til å utløse brudd.

Tabell 5.2 Sensitivitetsstudie, effekt av lav stivhet for initialspenninger

Analyse	Bruddlast softening	$F_{\text{softening}}$	Bruddlast perfekt plastisk	$F_{\text{initiell}}$
Beste estimat, $G_{\text{ur}}/s_u^A = 100$ ved initialtilstand	33.6 kPa	1.020	48.8 kPa	1.038
$G_{\text{ur}}/s_u^A = 500$ ved initialtilstand	37.3 kPa	1.017	48.8 kPa	1.038

Ved å ikke ta hensyn til lavere stivhet for drenert tilstand av skråningen underestimeres softeningfaktoren noe i dette tilfellet.

Tabell 5.3 Sensitivitetsstudie, effekt av sprøhet

Analyse	Bruddlast softening	$F_{\text{softening}}$	Bruddlast perfekt plastisk	$F_{\text{initiell}}$
Beste estimat	33.6 kPa	1.020	48.8 kPa	1.038
Residualtøyning redusert fra 30% til 22%	7.2 kPa	1.035	48.8 kPa	1.038
$1-l^*/l_{\text{int}}$ økt fra 0 til 0.3	6.4 kPa	1.036	48.8 kPa	1.038
$l_{\text{int}}$ økt fra 0.1 m til 1.0 m	40.6 kPa	1.014	48.8 kPa	1.038
$l_{\text{int}} = 1.0$ m og finere elementnett	38.0 kPa	1.015	43.5 kPa	1.039

Ved å øke sprøheten er det mulig å gjøre skråningen ustabil. I et slikt tilfelle nærmer softeningfaktoren seg initiell sikkerhetsfaktor for skråningen siden en liten lastendring er nok til å utløse brudd med softeningoppførsel. Det er en liten effekt av å forfine elementnettet i dette tilfellet.

Tabell 5.4 Sensitivitetsstudie, effekt av kvikkleireutbredelse

Analyse	Bruddlast softening	$F_{\text{softening}}$	Bruddlast perfekt plastisk	$F_{\text{initiell}}$
Beste estimat	33.6 kPa	1.020	48.8 kPa	1.038
5 m mindre materiale med softening	34.8 kPa	1.019	48.8 kPa	1.038
Alt er materiale med softening	31.2 kPa	1.022	48.8 kPa	1.038

Utbredelsen av kvikkleiresonen har noe effekt på softeningfaktoren, men ikke signifikant. Fordi bruddet utløses ved avlastning i bunnen av skråningen er det den passive sonen som mobiliseres først, hvor det er sprøbruddmateriale i alle analysene.

## 6 Konklusjoner

Ut ifra karakteristiske udrenerte skjærstyrker fra labforsøkene er initiell sikkerhetsfaktor  $< 1$ . Det betyr at de udrenerte styrkene må økes for å ta hensyn til prøveforstyrrelse slik at skråningen er stabil før brudd blir utløst. Hvor mye styrkene økes begrenser hvor mye softeningfaktoren potensielt kan være, siden den ikke kan være større enn initiell sikkerhetsfaktor med perfekt plastisk materiale.

I denne analysen er det valgt å øke aktiv styrke med 40 % (passiv og DSS noe mindre), slik at initiell perfekt plastisk sikkerhetsfaktor  $F = 1.038$  for den kritiske skjærflaten. Karlsrud et al. (1984) beregnet  $F = 0.95 - 1.05$ , så dette er antatt å være akseptabelt. Man kunne alternativt ha økt kun passiv og DSS-styrke for å ta hensyn til rotasjon av hovedspenningsretning.

Med beste estimat for sprøhetsparametere blir softeningfaktoren  $F_{\text{softening}} = 1.02$ . Den kan så klart være noe høyere hvis sprøheten er større enn antatt. Hvis korreksjonen av maksimale udrenerte styrker (for prøveforstyrrelse og eventuelt for rotasjon av hovedspenningsretning) skulle vært enda høyere, vil det også kunne gi høyere  $F_{\text{softening}}$  ved at det er mulig å øke sprøheten enda mer og likevel ha en stabil initiell skråning.

I rapport A3 (NGI, 2012) var gjennomsnittlig verdi av  $F_{\text{softening}} = 1.09$ , og kun 2.5 % av analysene fra Monte Carlo-simuleringen var høyere enn 1.20. Det var imidlertid for en aktivt mobilisert uendelig lang slakk skråning, som antas å være blant tilfellene som kan ha høyest softeningfaktor.

Basert på tilbakeregningen av Båstad-skredet antas softeningfaktoren for raviner som har lav initiell sikkerhetsfaktor å kunne være i størrelsesorden 1.00-1.05.

## 7 Referanser

Gregersen, O. og Løken, T. (1979), "The quick-clay slide at Baastad, Norway 1974", Engineering Geology, (14), 2/3, 183-196. NGI-publikasjon 128.

Grimstad, G. og Jostad, H.P. (2010), "Undrained capacity analyses of sensitive clays using the nonlocal strain approach", 9th HSTAM International Congress on Mechanics Vardoulakis mini-symposia, Limassol, Kypros, 12. – 14. juli, 2010.

Jostad, H. P. og Grimstad, G. (2011), "Comparison of distribution functions for the nonlocal strain approach", Proc. 2nd International Symposium on Computational Geomechanics, Cavtat-Dubrovnik, Kroatia.

Karlsrud, K., Aas, G. og Gregersen, O. (1984), "Can we predict landslide hazards in soft sensitive clays? Summary of Norwegian practice and experiences." International Symposium on Landslides, 4. Toronto 1984, proceedings, Vol. 1, pp. 107-130. NGI-publikasjon 158.

Karlsrud, K. og Hernandez-Martinez, F.G. (2013), "Stress-strain-and strength characteristics of clays from high quality block samples", To be published Can. Geot. Journal.

Mayne, P.W. og Kulhawy, F.H. (1982), "K<sub>0</sub>-OCR relationships in soil", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 108 (GT6), 851-872

NGI (2011), "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire, A1 Numerisk metode for beregning av udrenert brudd i sensitive materialer", NGI rapport 20092128-00-4-R

NGI (2012), "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire, A3 Sensitivitetsanalyse ", NGI rapport 20092128-00-6-R

NGI (2013), "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire, A4 Sannsynlighetsanalyse ", NGI rapport 20092128-00-7-R

Plaxis BV (2009), Plaxis manuals. Plaxis BV. [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl).



# Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



Dokumentinformasjon/Document information													
Dokumenttittel/Document title Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner						Dokumentnr./Document No. 20130275-01-R							
Dokumenttype/Type of document Rapport/Report			Distribusjon/Distribution Begrenset/Limited			Dato/Date 12. mai 2014		Rev.nr.&dato/Rev.No.&date 0					
Oppdragsgiver/Client NIFS													
Emneord/Keywords Båstad, ravine, kvikkleire, softening													
Stedfesting/Geographical information													
Land, fylke/Country, County						Havområde/Offshore area							
Kommune/Municipality						Felt navn/Field name							
Sted/Location						Sted/Location							
Kartblad/Map						Felt, blokknr./Field, Block No.							
UTM-koordinater/UTM-coordinates													
Dokumentkontroll/Document control													
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001													
Rev./ Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision					Egen- kontroll/ Self review av/by:		Sidemanns- kontroll/ Colleague review av/by:		Uavhengig kontroll/ Independent review av/by:		Tverrfaglig kontroll/ Inter- disciplinary review av/by:	
0	Originaldokument					PFo	PFo	HPJ	HPJ				
Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release				Dato/Date 12. mai 2014			Sign. Prosjektleder/Project Manager Petter Fornes <i>Petter Fornes</i>						

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen geofagene. Vi utvikler optimale løsninger for samfunnet, og tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg.

Vi arbeider i følgende markeder: olje, gass og energi, bygg, anlegg og samferdsel, naturskade og miljøteknologi. NGI er en privat stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskap i Houston, Texas, USA.

NGI ble utnevnt til "Senter for fremragende forskning" (SFF) i 2002 og leder "International Centre for Geohazards" (ICG).

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting in the geosciences. NGI develops optimum solutions for society, and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the oil, gas and energy, building and construction, transportation, natural hazards and environment sectors. NGI is a private foundation with office and laboratory in Oslo, branch office in Trondheim and daughter company in Houston, Texas, USA.

NGI was awarded Centre of Excellence status in 2002 and leads the International Centre for Geohazards (ICG).

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)



Hovedkontor/Main office:  
PO Box 3930 Ullevål Stadion  
NO-0806 Oslo  
Norway

Besøksadresse/Street address:  
Sognsveien 72, NO-0855 Oslo

Avd Trondheim/Trondheim office:  
PO Box 1230 Pirsenteret  
NO-7462 Trondheim  
Norway

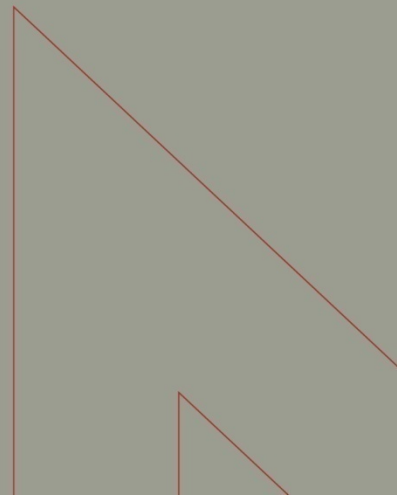
Besøksadresse/Street address:  
Pirsenteret, Havnegata 9, NO-7010 Trondheim

T: (+47) 22 02 30 00  
F: (+47) 22 23 04 48

[ngi@ngi.no](mailto:ngi@ngi.no)  
[www.ngi.no](http://www.ngi.no)

Kontonr 5096 05 01281/IBAN NO26 5096 0501 281  
Org. nr./Company No.: 958 254 318 MVA

BSI EN ISO 9001  
Sertifisert av/Certified by BSI, Reg. No. FS 32989



## Utgitt i Rapportserien i 2014

- Nr. 1 Analyse av energibruk i forretningsbygg. Formålsdeling. Trender og drivere
- Nr. 2 Det høyspente distribusjonsnett. Innsamling av geografiske og tekniske komponentdata
- Nr. 3 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Dimensjonerende korttidsnedbør for Telemark, Sørlandet og Vestlandet: Eirik Førland, Jostein Mamen, Karianne Ødemark, Hanne Heiberg, Steinar Myrabø
- Nr. 4 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 7. Skred og flomsikring. Sikringstiltak mot skred og flom Befaring i Troms og Finnmark høst 2013
- Nr. 5 Kontrollstasjon: NVEs gjennomgang av elsertifikatordningen
- Nr. 6 New version (v.1.1.1) of the seNorge snow model and snow maps for Norway. Tuomo Saloranta
- Nr. 7 EBO Evaluering av modeller for klimajustering av energibruk
- Nr. 8 Erfaringer fra ekstremværet Hilde, november 2013
- Nr. 9 Erfaringer fra ekstremværet Ivar, desember 2013
- Nr. 10 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. 4. kvartal 2013. Ellen Skaansar (red.)
- Nr. 11 Energibruksrapporten 2013
- Nr. 12 Fjernvarmens rolle i energisystemet
- Nr. 13 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer. Delprosjekt. 5.1.5
- Nr. 14 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. En omforent anbefaling for bruk av anisotropifaktorer i prosjektering i norske leirer
- Nr. 15 Tilleggsrapport: Oppsummering av Energimyndighetens og NVEs gjennomgang av elsertifikatordningen
- Nr. 16 Flomberegning for Nesttunvassdraget (056.3Z). Thomas Væringstad
- Nr. 17 Årsrapport for tilsyn
- Nr. 18 Verktøyprosjektet - hydrologi 2010-2013. En oppsummering av aktiviteter og resultater. Erik Holmqvist (red.)
- Nr. 19 Flom og jordskred i Nordland og Trøndelag desember 2013. Elin Langsholt, Erik Holmqvist, Delia Welle Kejo
- Nr. 20 Vindkraft i produksjon i 2013
- Nr. 21 FoU-prosjekt 81072 Pilotstudie: Snøskredfarekartlegging med ATES (Avalanche Terrain Exposure Scale) Klassifisering av snøskredterreng for trygg ferdsel
- Nr. 22 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 3.1. Hvordan beregne ekstremverdier for gitte gjentaksintervaller? Manual for å beregne returverdier av nedbør for ulike gjentaksintervaller (for ikke-statistikker)
- Nr. 23 Flomsonekart Delprosjekt Tuv. Kjartan Orvedal, Julio Pereira
- Nr. 24 Summary of the review of the electricity certificates system by the Swedish Energy Agency and the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)
- Nr. 25 Landsomfattende mark- og grunnvannsnett. Drift og formidling 2011. Jonatan Haga Per Alve Glad
- Nr. 26 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 1 Naturskadestrategi. Sammenligning av risikoakseptkriterier for skred og flom. Utredning for Naturfareprogrammet (NIFS)
- Nr. 27 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Skredfarekartlegging i strandsonen
- Nr. 28 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. "Kvistdammer" i Slovakia. Små terskler laget av stedegent materiale, erfaringer fra studietur for mulig bruk i Norge
- Nr. 29 Reestablishing vegetation on interventions along rivers. A compilation of methods and experiences from the Tana River valley
- Nr. 30 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer
- Nr. 31 Småkraftverk: Tetthet og reproduksjon av ørret på utbygde strekninger med krav om minstevannføring Svein Jakob Saltveit og Henning Pavels
- Nr. 32 Kanalforvaltningen rundt 1814 – del av en fungerende statsadministrasjon for det norske selvstendighetsprosjektet. Grunnlovsjubileet 2014
- Nr. 33 Museumsordningen 10 år
- Nr. 34 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Skredfarekartlegging i strandsonen -videreføring
- Nr. 35 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer Delprosjekt. 5.1.5. Revisjon av rapport 13-2014
- Nr. 36 Kvartalsrapport for kraftmarknaden 1. kvartal 2014. Gudmund Bartnes (red.)

- Nr. 37 Preliminary regionalization and susceptibility analysis for landslide early warning purposes in Norway
- Nr. 38 Driften av kraftsystemet 2013
- Nr. 39 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Effekt av progressivbruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Sensitivitetsanalyse basert på data fra grunnundersøkelser på vegstrekningen Sund-Bradden i Rissa
- Nr. 40 Naturfareprosjektet DP. 6 Kvikkleire. Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Sensitivitetsanalyse-1
- Nr. 41 Bioenergi i Norge
- Nr. 42 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Dimensjonerende korttidsnedbør for Møre og Romsdal, Trøndelag og Nord-Norge. Delprosjekt. 5.1.3
- Nr. 43 Terskelstudier for utløsning av jordskred i Norge. Oppsummering av hydrometeorologiske terskelstudier ved NVE i perioden 2009 til 2013. Søren Boje, Hervé Colleuille og Graziella Devoli
- Nr. 44 Regional varsling av jordskredfare: Analyse av historiske jordskred, flomskred og sørpeskred i Gudbrandsdalen og Ottadalen. Nils Arne K. Walberg, Graziella Devoli
- Nr. 45 Flomsonekart. Delprosjekt Hemsedal. Martin Jespersen, Rengifo Ortega, Julio H. Pereira Sepulveda
- Nr. 46 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Mulighetsstudie om utvikling av en nasjonal blokkprøvedatabase
- Nr. 47 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU
- Nr. 48 En norsk-svensk elsertifikatmarknad. Årsrapport 2013
- Nr. 49 Øvelse Østlandet 2013. Evalueringsrapport
- Nr. 50
- Nr. 51 Forslag til nytt vektsystem i modellen for å fastsette kostnadsnormer i regionalnettene
- Nr. 52 Jord- og sørpeskred i Sør-Norge mai 2013. Monica Sund
- Nr. 53 Årsrapport for utførte sikrings- og miljøtiltak for 2013
- Nr. 54 Naturfareprosjekt DP. 1 Naturskadestrategi Samarbeid og koordinering vedrørende naturfare. En ministudie av Fellesprosjektet E6-Dovrebanen og Follobanen
- Nr. 55 Naturfareprosjektet DP.6 Kvikkleire. Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Numerisk metode for beregning av udrenert brudd i sensitive materialer
- Nr. 56 Naturfareprosjektet DP.6 Kvikkleire. Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Tilbakeregning av Vestfossenskredet
- Nr. 57 Naturfareprosjektet DP.6 Kvikkleire. Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Effekt av progressiv bruddutvikling i raviner.



Norges  
vassdrags- og  
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29  
Postboks 5091 Majorstuen  
0301 Oslo

Telefon: 09575  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

