Jernbaneverket

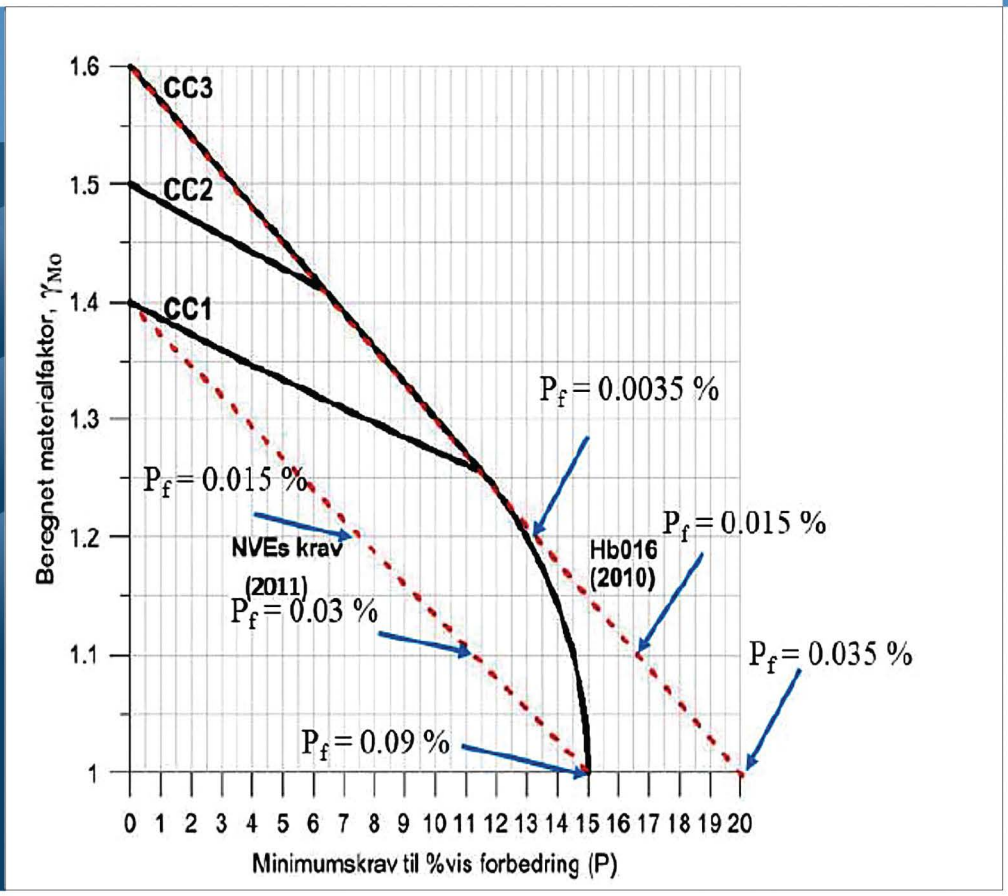
Statens vegvesen

Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire

Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring.

58
2014

R A P P O R T



NIFS
NATURFARE
INFRASTRUKTUR - FLOM - SKRED

Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire

Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring

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

2014

Rapport nr. 58/2014
Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring

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: 978-82-410-1010-1

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. Det er i denne aktiviteten utført sannsynlighetsanalyser for en idealisert naturlig skråning med skjærstyrkeparametere basert på data fra Sund-Bradden, oppdatert forå ta hensyn til indeksdatakorrelasjoner fra NGIs blokkprøvedatabase.

Emneord: sprøbruddmateriale, raviner, Sund-Bradden, strain softening, NGI-ADP soft

NGI Rapport / Report

NIFS N-6.5.2 Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder

A2 Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring

20130275-02-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 NGI.

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 NGI.

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
www.ngi.no

Prosjekt

Prosjekt:	NIFS N-6.5.2 Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder
Dokumenttittel:	A2 Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring
Dokumentnr.:	20130275-02-R
Dato:	12. mai 2014
Rev. nr.:	0

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 sikkerhetsfilosofi og prosedyrer for prosjektering av bygg, anlegg og samferdsel i områder med kvikkleire eller meget sensitiv leire.

Det er i denne aktiviteten utført sannsynlighetsanalyser for en idealisert naturlig skråning med skjærstyrkeparametere basert på data fra Sund-Bradden, oppdatert for å ta hensyn til indeksdatakorrelasjoner fra NGIs blokkprøvedatabase. Den viktigste effekten av blokkprøvekorrelasjonene er imidlertid at forventningsverdien til styrkeprofilet er økt med 21.5 %, som vil redusere beregnet bruddsannsynlighet.

Prosentvis forbedring av materialfaktoren γ_M er oppnådd ved å modellere en motfylling, og en påført last i toppen av skråningen er benyttet som utløsende bruddårsak.

Resultatene fra analysene viser en lineær sammenheng mellom logaritmen av sannsynlighet for brudd og prosentvis forbedring av γ_M. Sammenlignet med dagens krav til områdestabilitet fra NVE og SVV kan man redusere kravet til prosentvis forbedring for skråninger med beregnet høy initiell materialfaktor og eventuelt øke det for lav beregnet initiell materialfaktor, hvis man skal kreve lik sannsynlighet for brudd. Hvorvidt dette resultatet er gyldig for andre tilfeller, som for eksempel elveerosjon, endring i grunnvannstrykk eller redusert udrenert skjærstyrke med tiden, bør undersøkes med nye studier.

I denne aktiviteten er metoden FOSM benyttet, som kun gir et estimat på sannsynlighetstetthetsfunksjonen til γ_M. Mer nøyaktige metoder kan også tas i bruk, men vil være mer arbeidskrevende.

For å forenkle beregningene er det ikke tatt hensyn til sprøbruddoppførsel i kvikkleira, slik som i de andre aktivitetene. Dette er noe man kunne ha sett på i en egen studie. Fordi det ikke er noen definert måte å bestemme materialfaktor på når softening er inkludert bør man i stedet formulere et krav til pålitelighet. Eventuelt kan man også benytte resultatet fra prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" (NGI, 2013a), og øke kravet til materialfaktor og prosentvis forbedring med for eksempel 20 % for å ta hensyn til sprøbruddoppførsel.

Når det gjelder sannsynlighet for brudd ved områdestabilitetsberegninger vil det også være nyttig å utføre en studie av sannsynlighet for potensielle utløsningsmekanismer. Det bør definere hvilke forhold materialfaktoren skal ta hensyn til i prosjektering og som man skal ha tilstrekkelig sikkerhet mot.

Innhold

1 Innledning 6
1.1 Prosentvis forbedring 6
1.2 Sannsynlighet for brudd 7

2 Beregningseksempel, Sund-Bradden 8

3 Beregningsmodell 9
3.1 Analyser i Plaxis 10
3.2 Casestudie 11
3.3 Materialparametere NGI-ADP fra Sund-Bradden 11
3.4 Bayesisk oppdaterte sannsynlighetsfordelinger 13

4 Sannsynlighetsanalyse 17
4.1 Initiell materialfaktor og prosentvis forbedring 17
4.2 First Order Second Moment (FOSM) 17

5 Resultater 17

6 Konklusjoner 20

7 Referanser 21

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

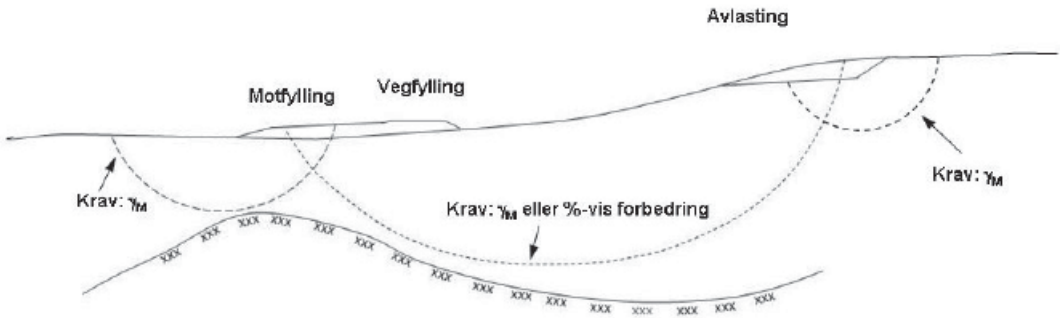
Dette prosjektet er finansiert av NIFS og interne SP1-midler, og er en utvidelse av prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" som var et samarbeidsprosjekt mellom Statens Vegvesen/ Vegdirektoratet (SVV), Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) og NGI (NGI, 2013b). Overordnet mål for prosjektet er å etablere et forbedret grunnlag for valg av sikkerhetsfilosofi og prosedyrer for prosjektering av bygg, anlegg og samferdsel i områder med kvikkleire eller meget sensitiv leire. Dette prosjektet er delt opp i følgende to tilleggsaktiviteter:

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

Denne rapporten gir resultatene fra aktivitet A2: Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring. I denne aktiviteten er samme beregningsmetode benyttet som i aktivitet A4 i forrige prosjekt, "Sannsynlighetsanalyse av vegfylling i svakt hellende skråninger" (NGI, 2013a).

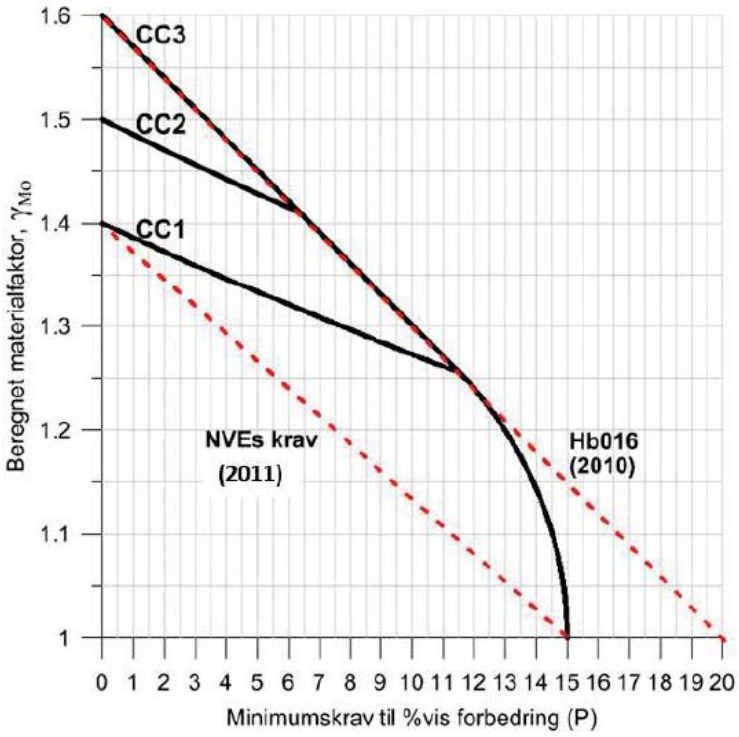
1.1 Prosentvis forbedring

En naturlig kvikkleireskråningen trenger ikke nødvendigvis være en del av en lokal bruddmode utløst i forbindelse med en vegutbygging, men kan likevel ha stor konsekvens for sikkerheten hvis et større kvikkleireskred utløses. For områdestabilitet er en prosentvis forbedring av initiell materialfaktor γ_{M0} et alternativ til absolutt materialfaktor γ_M, se Figur 1.1. Ved prosentvis forbedring vil det derfor kunne være tilstrekkelig med en lavere materialfaktor. For en naturlig skråning representerer dette uansett en reell forbedring av sikkerhetsnivået.



Figur 1.1 Illustrasjon av prosentvis forbedring og krav til γ_M (Statens vegvesen, 2010)

SVV og NVE har i eksisterende regelverk for områdestabilitet forskjellige krav til prosentvis forbedring avhengig av initiell materialfaktor γ_{M0}. Figur 1.2 viser et forslag til nye krav (Statens vegvesen, 2012), og er en kombinasjon av de gamle kravene til SVV og NVE.



Figur 1.2 Forslag til minimumskrav til prosentvis forbedring for sprøbruddmaterialer (Statens vegvesen, 2012)

1.2 Sannsynlighet for brudd

En naturlig skråning har ved dagens situasjon $\gamma_{M0} \geq 1.0$ i og med at den står der i dag. Ved uendret last, geometri, spenningssituasjon og skjærstyrke er dermed sannsynlighet for brudd $P_f = 0$. For et tiltak som gir en viss prosentvis forbedring av skråningen (alle glideflater får enten en forbedring eller ingen endring) vil sannsynlighet for brudd fremdeles være 0, såfremt styrkeegenskapene ikke endres av tiltaket eller med økt tid. I en sannsynlighetsbetraktning er det derfor kun aktuelt å se på sannsynlighet for brudd ved en forandring av dagens situasjon, som potensielt kan utløse et kvikkleireskred.

For en naturlig kvikkleireskråning er det flere forhold som kan utløse et skred og som kravet til materialfaktor for områdestabilitet skal ta hensyn til. For eksempel:

- Reduksjon i styrke (for eksempel på grunn av utvasking av salter eller økt poretrykk ved økt nedbør)
- Avlastning i bunnen av skråningen (for eksempel på grunn av elveerosjon eller gravearbeider)
- Refordeling av spenninger på grunn av pågående krypdeformasjoner
- Ekstra belastning i toppen av skråningen (for eksempel på grunn av deponering av masser)

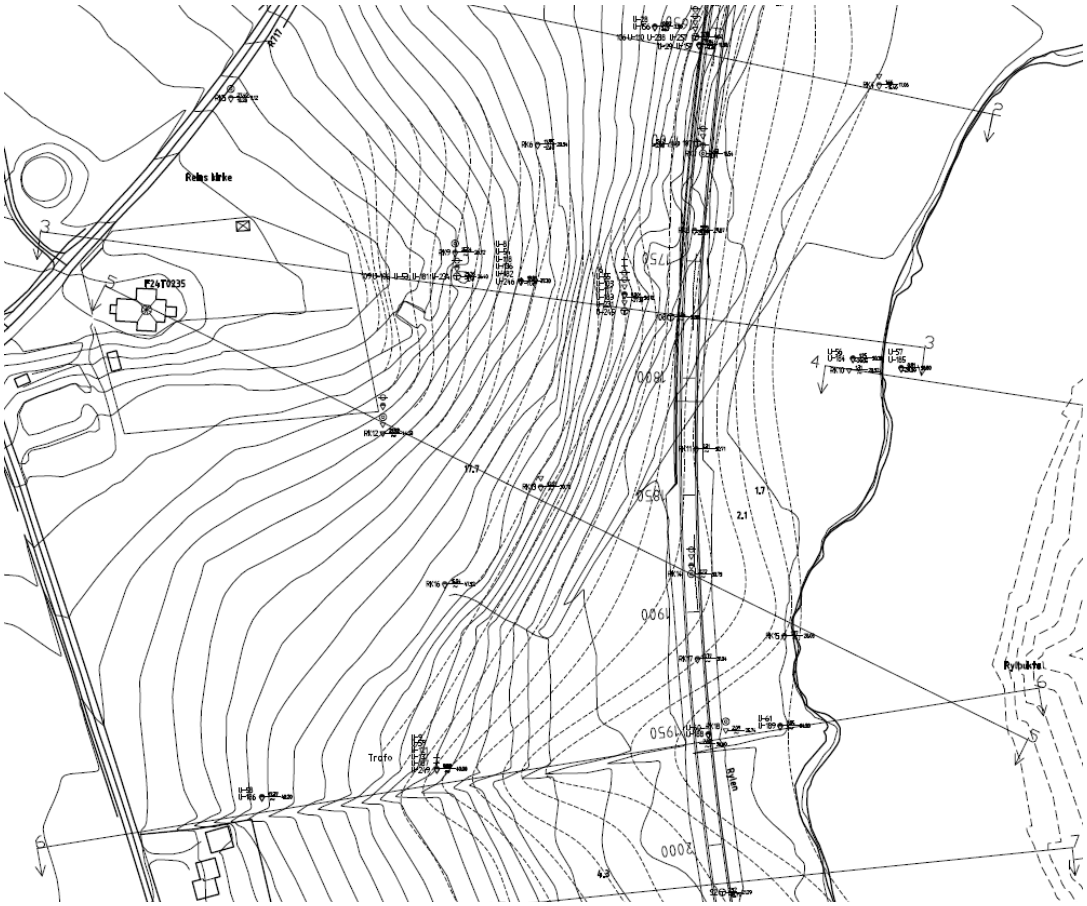
2 Beregningseksempel, Sund-Bradden

Det er valgt å basere beregningstilfellet i sannsynlighetsanalysen på prosjektet Sund-Bradden i Rissa (NGI 2009b), se Figur 2.1. Som grunnlag for materialparametere er det benyttet materialdata fra området ved Rein Kirke, slik som i sannsynlighetsanalysen i aktivitet A4 i forrige prosjekt (NGI,2013a).

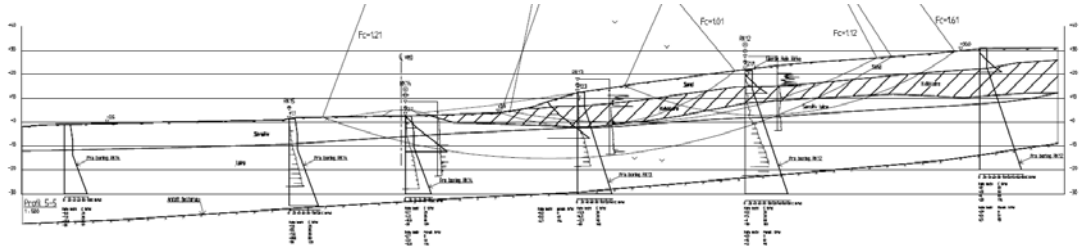
Figur 2.1 Sund-Bradden, Rissa. Vegstrekningen er vist med svart sirkel

På vegstrekningen Sund-Bradden finnes det kvikkleire, og utfordringen i prosjektet er områdestabilitet og krav til prosentvis forbedring av materialfaktor (NGI 2009c). Figur 2.2 viser området ved Rein Kirke, og hvilke tverrsnitt som er beregnet med grenselikevektsmetoden. Tverrsnitt 5-5 er vist på Figur 2.3.

Karakteristiske verdier for noen indeksparametere i området ved Rein Kirke er for eksempel OCR = 1.8, vanninnhold w = 30 % og romvekt γ = 19.7 kN/m^3 (NGI, 2009a).



Figur 2.2 Plantegning, Rein Kirke (NGI, 2009c)



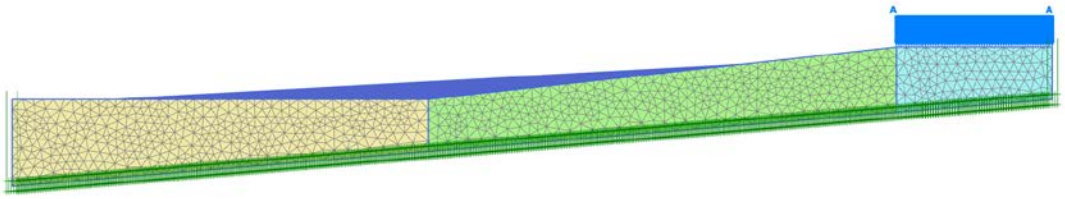
Figur 2.3 Tverrprofil 5-5 (NGI, 2009c)

3 Beregningsmodell

I denne aktiviteten er det valgt å benytte en idealisert beregningsmodell av profil 5-5, vist på Figur 2.3. Som tiltak for å forbedre initiell materialfaktor er en motfylling i tåa av skråningen valgt. For et veiprosjekt i nærheten av en kvikkleireskråning er uforutsett deponering av masser i toppen av skråningen en mulig hendelse som kan inntreffe en gang i løpet av veiens levetid, og som man (kanskje) bør ha tilstrekkelig mot. Men først og fremst, en slik hendelse er enkel å modellere, og er derfor valgt som utløsende årsak til brudd i sannsynlighetsanalysen.

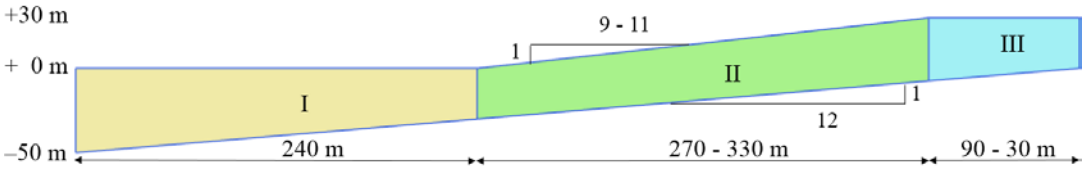
3.1 Analyser i Plaxis

Elementmetodeprogrammet Plaxis 2D (www.plaxis.nl) er benyttet som analyseverktøy, og en idealisert Plaxis-modell av tverrprofil 5-5 er vist på Figur 3.1. Det er benyttet 2952 15-noders elementer. Modellen er delt inn i tre soner I-III for å ha et kontinuerlig styrkeprofil som starter likt i terreng i hele modellen.



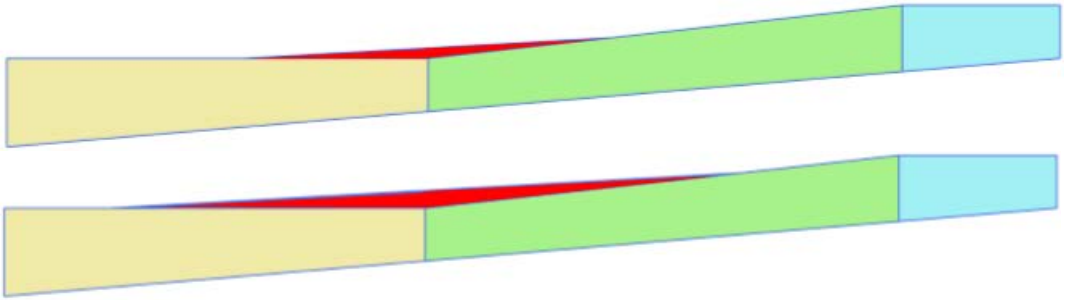
Figur 3.1 Elementmodell og randbetingelser

Den idealiserte modellen av profil 5-5 har fjelloverflate med helning 1:12, se Figur 3.2. Tåa av skråningen er ved kote +0 m, og toppen av skråningen er ved +30 m. Dybde til fjell ved tåa er 30 m. For initiell materialfaktor γ_{M0} = 1.01 (basert på udrenert skjærstyrke) var helningen av skråningen 1:9, og ved endring av helningen i beregningsmodellen ble toppen av skråningen flyttet mot høyre.



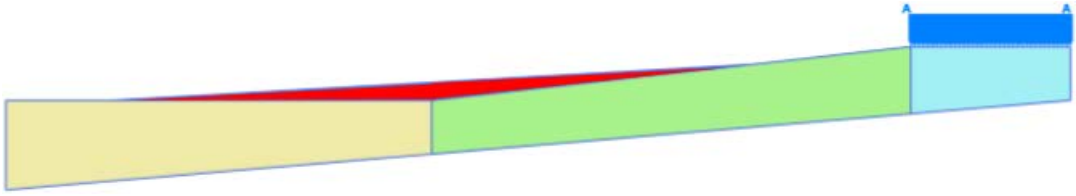
Figur 3.2 Idealisert Plaxis-modell av tverrprofil 5-5, Rein Kirke, Sund-Bradden

For å øke initiell materialfaktor γ_{M0} ble en motfylling påført i bunnen av skråningen. Forskjellige høyder fra 0 til 10 m ved tåa ble benyttet for å oppnå forskjellig prosentvis forbedring. Motfyllingen er definert ved ha like lang avstand horisontalt til venstre og høyre side fra tåa. Denne idealiserte motfyllingen representerer et tiltak som gjøres i prosjektering for å oppfylle kravene til prosentvis forbedring av materialfaktoren.



Figur 3.3 Eksempler på forskjellige høyder av motfylling

Motfyllingen representerer en forbedring av tilstanden i skråningen, og ideelt blir materialfaktoren høyere for alle potensielle glideflater enn initielt. Sannsynlighet for brudd er derfor fortsatt lik null så lenge man ikke har en forverret situasjon. For å innføre en mulighet for brudd er det derfor påført en jevnt fordelt last i toppen av skråningen (deponering av masser). Materialfaktor for skråningen er deretter funnet med c/ϕ-reduksjon.



Figur 3.4 Påført last i toppen av skråningen, henholdsvis 10, 20 og 30 kPa.

3.2 Casestudie

For å ha flere punkter i et diagram som på Figur 1.2, med prosentvis forbedring avhengig av initiell materialfaktor $\gamma_{M0,}$ er det benyttet tre modeller med ulik skråningshelning og dermed ulik γ_{M0}. Tre forskjellige skråningshelninger er vurdert, 1:9, 1:10 og 1:11. Disse hadde henholdsvis γ_{M0} = 1.01, 1.10 og 1.18 med et "forsiktig valgt" karakteristisk udrenert skjærstyrkeprofil, se seksjon 3.3.

I denne analysen er det deponering av masser i toppen av skråningen som utløser brudd. For å ha flere beregningstilfeller er det valgt tre forskjellige jevnt fordelte laster; 10, 20 og 30 kPa. Disse tilsvarer et ca. 0.5, 1.0 og 1.5 m tykt lag med løsmasser.

For hver beregningsmodell med forskjellig skråningshelning og belastning er det gjort c/ϕ-reduksjon for seks forskjellige motfyllingshøyder fra 0 til 10 m ved tåa. Sannsynlighet for brudd estimert med FOSM (se seksjon 4.2) er dermed beregnet for tre tilfeller av belastning og tre skråningshelninger (totalt 9 caser), hver med seks forskjellige motfyllingshøyder.

3.3 Materialparametere NGI-ADP fra Sund-Bradden

Materialmodellen NGI-ADP (Grimstad et al., 2010) er benyttet i Plaxis-analysene. Denne elasto-plastiske modellen er implementert som standardmodell i Plaxis uten mulighet for "softening"-oppførsel. Softening er inkludert i forrige prosjekt og i aktivitet A1 av dette prosjektet, men i dette studiet er det derimot valgt å ikke inkludere sprøbruddoppførsel. Dette er fordi det er hensiktsmessig å kunne utføre c/ϕ-reduksjon i forbindelse med prosentvis forbedring av materialfaktoren. En brukerdefinert versjon av modellen som gjør det mulig å utføre c/ϕ-reduksjon ved reduksjon av "peak" udrenert skjærstyrke er derfor benyttet.

I en kapasitetsanalyse med perfekt plastisk bruddoppførsel er det kun styrkeparameterne som betyr noe for kapasiteten eller materialfaktoren. For ADP-modellen er dette parameterne for aktiv, DSS og passiv udrenert skjærstyrke (s_u^A,

s_u^{DSS} og s_u^{P}). Styrkeprofilet bestemmes av forskjellige inputparametere. Referansestyrken $s_u^{A}{}_{ref}$ er aktiv udrenert skjærstyrke ved en dybde y_{ref}. Over y_{ref} er styrken lik $s_u^{A}{}_{ref}$ og under øker styrken lineært med $s_u^{A}{}_{inc}$ per meter.

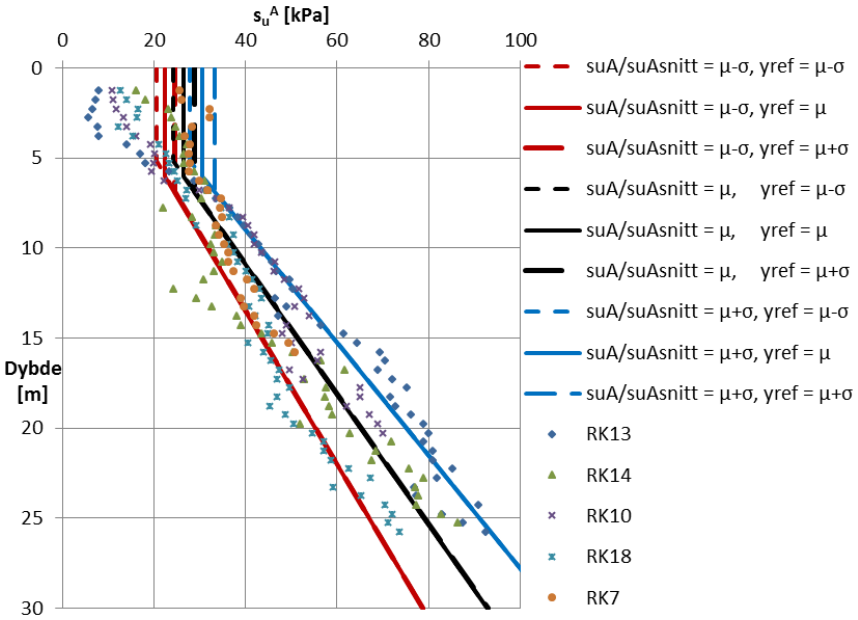
Inputverdier for materialparameterne er i dette studiet utledet fra tre uavhengige variabler: $s_u^{A}/s_u^{A}{}_{snitt}$, s_u^{DSS}/s_u^{A} og s_u^{P}/s_u^{A}. For hver variabel i Tabell 3.1 er lognormal sannsynlighetsfordeling antatt, og forventningsverdi E[y] og varians Var[y] er estimert ut ifra grunnundersøkelser utført i området ved Rein Kirke (NGI, 2013a).

Tabell 3.1 Variabler med sannsynlighetsfordelinger

Variabel	E[y]	Var[y]	Fordeling
s_u^{A} / $s_u^{A}{}_{snitt}$	1.0	0.153^2	Lognormal
s_u^{DSS} / s_u^{A}	0.67	0.0089^2	Lognormal
s_u^{P} / s_u^{A}	0.33	0.0118^2	Lognormal

Variabelen $s_u^{A}/s_u^{A}{}_{snitt}$ er forholdet mellom aktiv skjærstyrke fra sannsynlighetsfordelingen og gjennomsnittlig skjærstyrke $s_u^{A}{}_{snitt}$ i enhver dybde. Gjennomsnittlig aktiv skjærstyrke er basert på fem CPTU-forsøk, og standardavviket er beregnet med statistisk metode, se Figur 3.5. Det sorte styrkeprofilet er det som gir minst avvik fra gjennomsnittlig styrke fra CPTU-forsøkene, og tilsvarer forventningsverdi E[y] = 1.0. Det gjennomsnittlige skjærstyrkeprofilet har konstant styrke $s_u^{A}{}_{ref,snitt}$ = 26.5 kPa ned til dybde y_{ref} = 6 m. Styrken øker deretter med $s_u^{A}{}_{inc,snitt}$ = 2.77 kPa/m dybde.

Anisotropiforholdene s_u^{DSS}/s_u^{A} og s_u^{P}/s_u^{A} er basert på et begrenset antall triaksforsøk fra Sund-Bradden. Standardavvikene er estimert med en forenklet metode (Snedecor og Cochran, 1964). På grunn av få forsøk, som alle har verdi tett på middelverdien, er standardavvikene meget små.



Figur 3.5 Skjærstyrkeprofil med $s_u^{A}/s_u^{A}{}_{snitt}$ og y_{ref} lik $\mu \pm 1 \cdot \sigma$, og s_u^{A} fra CPTU

3.4 Bayesisk oppdaterte sannsynlighetsfordelinger

For å redusere usikkerhetene i variablene er det tatt hensyn til korrelasjoner med indeksparametere ved å benytte Bayesisk oppdatering av sannsynlighetsfordelingene (Ching et al. 2010). Benyttede korrelasjoner er etablert fra NGIs blokkprøvedatabase (Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013), og karakteristiske verdier for indeksparametere er basert på data fra Sund-Bradden (se seksjon 2). For to normalfordelinger med henholdsvis middelverdi μ_1 og μ_2, og standardavvik σ_1 og σ_2, kan man bruke Bayesisk oppdatering for å estimere en kombinert middelverdi $\mu_{updated}$ og standardavvik $\sigma_{updated}$:

$$\mu_{updated} = \left(\mu_1/\sigma_1^2 + \mu_2/\sigma_2^2\right)\Big/\left(1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2\right)$$
$$\sigma^2_{updated} = \left(\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2\right)\Big/\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2\right)$$

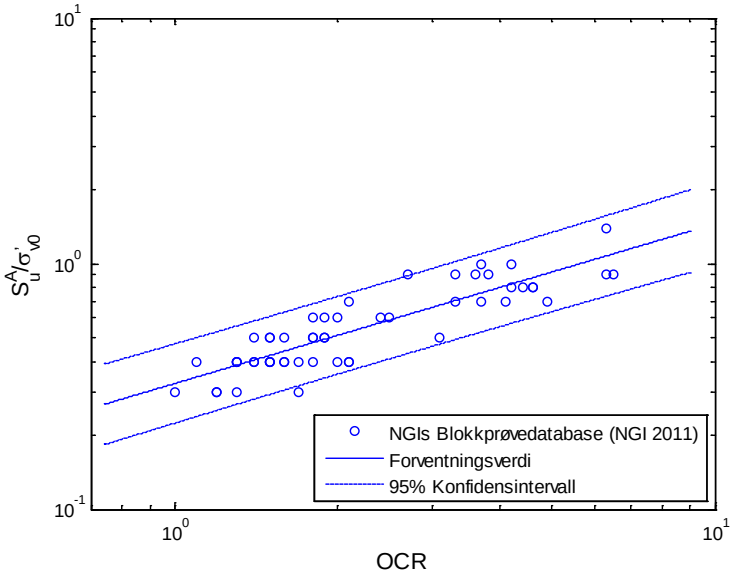
For en normalfordelt variabel y er E[y] = μ og Var[y] = σ^2. Hvis en variabel y derimot er lognormalfordelt, er ln(y) normalfordelt med middelverdi μ og standardavvik σ. Forventningsverdi E[y] og varians Var[y] til en lognormalfordelt variabel y kan beregnes fra μ og σ, og motsatt:

$$E[y] = e^{\mu+0.5\sigma^2}$$
$$Var[y] = \left(e^{\sigma^2} - 1\right)e^{2\mu+\sigma^2}$$

og

$$\mu = \ln\left(E[y]\right) - 0.5\ln\left(1 + \frac{Var[y]}{E[y]^2}\right)$$
$$\sigma^2 = \ln\left(1 + \frac{Var[y]}{E[y]^2}\right)$$

Korrelasjon mellom s_u^A/σ'_{v0} og OCR er basert på SHANSEP-konseptet (Ladd et al., 1977). Fra blokkprøvedatabasen er det etablert et diagram med s_u^A/σ'_{v0} mot OCR (NGI, 2011), vist på Figur 3.6.



Figur 3.6 Korrelasjon mellom s_u^A/σ'_{v0} og OCR fra blokkprøvedatabasen, med middelverdi og 95 % konfidensintervall

Basert på data i diagrammet er en "minste kvadrat"-metode brukt for å finne følgende korrelasjon mellom s_u^A/σ'_{v0} og OCR:

$\ln\left(s_u^A/\sigma'_{v0}\right) = 0.65\ln(OCR) - 1.126 + \varepsilon_{s_u^A/\sigma'_{v0}}$, hvor $\varepsilon_{s_u^A/\sigma'_{v0}}$ er modellavviket og har et standardavvik som er funnet å være omtrent lik 0.193.

For å bestemme sannsynlighetsfordeling avhengig av OCR antas $y = \ln(s_u^A/\sigma'_{v0})$ å være normalfordelt. Basert på denne korrelasjonen og karakteristisk verdi fra Sund-Bradden OCR = 1.8 er forventet middelverdi og standardavvik:

$$E[y] = E\left[\ln\left(s_u^A/\sigma'_{v0}\right)\middle|\ln(OCR)\right] = 0.65\ln(OCR) - 1.126 = -0.744$$
$$Var[y] = Var\left[\ln\left(s_u^A/\sigma'_{v0}\right)\middle|\ln(OCR)\right] = Var\left[\varepsilon_{s_u^A/\sigma'_{v0}}\right] = 0.193^2$$

For å kunne oppdatere fordelingene fra CPTU og OCR-korrelasjon må s_u^A/σ'_{v0} utledes fra variabelen $s_u^A/s_u^A{}_{snitt}$:

$s_u^A/\sigma'_{v0} = \frac{s_u^A{}_{inc,snitt}}{\gamma'} \cdot s_u^A/s_u^A{}_{snitt}$, hvor $s_u^A{}_{inc,snitt}$ = 2.77 kPa/m og γ' = 9.7 kN/m^3.

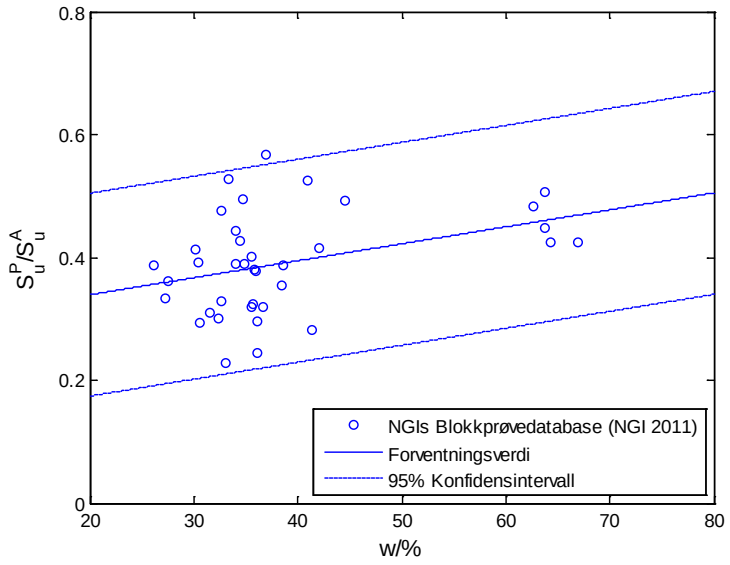
Fra Tabell 3.1 blir forventningsverdien og variansen for lognormalfordelte s_u^A/σ'_{v0}:

$$E\left[s_u^A/\sigma'_{v0}\right] = \frac{s_u^A{}_{inc,snitt}}{\gamma'} \cdot E\left[s_u^A/s_u^A{}_{kar}\right] = 0.2856$$
$$Var\left[s_u^A/\sigma'_{v0}\right] = \left(\frac{s_u^A{}_{inc,snitt}}{\gamma'}\right)^2 \cdot Var\left[s_u^A/s_u^A{}_{snitt}\right] = 0.0436^2$$

For normalfordelte $\ln(s_u^A/\sigma'_{v0})$ blir middelverdien $\mu = -1.2648$ og standardavviket $\sigma = 0.1519$. De to normalfordelingene for $\ln(s_u^A/\sigma'_{v0})$ basert på CPTU-data og OCR-korrelasjon er deretter kombinert med Bayesisk oppdatering som gir $\mu_{updated} = -1.066$ og $\sigma_{updated} = 0.119$. For lognormalfordelte $y = s_u^A/\sigma'_{v0}$ tilsvarer dette E[y] = 0.347 og Var[y] = 0.0416^2, eller for $y = s_u^A/s_u^A{}_{kar}$ er E[y] = 1.215 og Var[y] = 0.146^2. Inputparameterne til NGI-ADP-modellen er utledet videre fra disse variablene.

For anisotropiforholdene er det benyttet korrelasjon med vanninnhold w. Fra blokkprøvedatabasen er det etablert et diagram med s_u^P/s_u^A mot vanninnhold w (NGI, 2011), vist på Figur 3.7. Basert på data i diagrammet er en "minste kvadrat"-metode brukt for å finne følgende korrelasjon mellom s_u^P/s_u^A og w:

$s_u^P/s_u^A = 0.0028w + 0.284 + \varepsilon_{s_u^P/s_u^A}$, hvor $\varepsilon_{s_u^P/s_u^A}$ er modellavviket og har et standardavvik som er funnet å være omtrent lik 0.0826.



Figur 3.7 *Korrelasjon mellom s_u^P/s_u^A og w fra NGIs blokkprøvedatabase, med middelverdi og 95 % konfidensintervall*

For å bestemme sannsynlighetsfordeling avhengig av w antas $y = s_u^P/s_u^A$ å være lognormalfordelt. Forventningsverdi og varians for $y = s_u^P/s_u^A$ basert på denne korrelasjonen med karakteristisk verdi fra Sund-Bradden (w = 30 %) er:

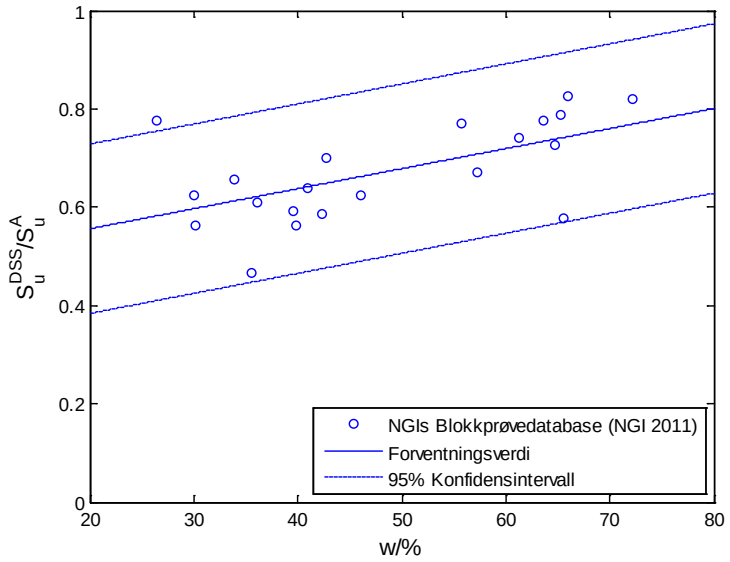
$$E[y] = E\left[s_u^P / s_u^A \middle| w\right] = 0.0028w + 0.284 = 0.368$$

$$Var[y] = Var\left[s_u^P / s_u^A \middle| w\right] = Var\left[\varepsilon_{s_u^P/s_u^A}\right] = 0.0826^2$$

Datagrunnlaget fra Sund-Bradden er begrenset og standardavviket i Tabell 3.1 er meget lite. Det er derfor valgt å ikke oppdatere sannsynlighetsfordelingen, men heller bruke forventningsverdi E[y] = 0.33 fra Tabell 3.1 og varians Var[y] = 0.0826^2 fra korrelasjonen med vanninnhold. Det gir middelverdi μ = –1.139 og standardavvik σ = 0.247 for normalfordelte ln(y) = $\ln(s_u^P/s_u^A)$.

Fra blokkprøvedatabasen er det etablert et diagram med s_u^{DSS}/s_u^A mot vanninnhold w (NGI, 2011), vist på Figur 3.8. Basert på data i diagrammet er en "minste kvadrat"-metode brukt for å finne følgende korrelasjon mellom s_u^{DSS}/s_u^A og w:

$s_u^{DSS} / s_u^A = 0.0041w + 0.4744 + \varepsilon_{s_u^{DSS}/s_u^A}$, hvor $\varepsilon_{s_u^{DSS}/s_u^A}$ er modellavviket og har et standardavvik som er funnet å være omtrent lik 0.0862.



Figur 3.8 *Korrelasjon mellom s_u^{DSS}/s_u^A og w fra blokkprøvedatabasen, med middelverdi og 95 % konfidensintervall*

For å bestemme sannsynlighetsfordeling avhengig av w antas $y = s_u^{DSS}/s_u^A$ å være lognormalfordelt. Forventningsverdi og varians for $y = s_u^{DSS}/s_u^A$ basert på denne korrelasjonen med karakteristisk verdi fra Sund-Bradden (w = 30 %) er:

$$E[y] = E\left[s_u^{DSS}/s_u^A \middle| w\right] = 0.0041w + 0.4744 = 0.5974$$

$$Var[y] = Var\left[s_u^{DSS}/s_u^A \middle| w\right] = Var(\varepsilon_{s_u^P/s_u^A}) = 0.0862^2$$

Datagrunnlaget fra Sund-Bradden er begrenset og standardavviket i Tabell 3.1 er meget lite. Det er derfor valgt å ikke oppdatere sannsynlighetsfordelingen, men heller bruke forventningsverdi E[y] = 0.67 fra Tabell 3.1 og varians Var[y] = 0.0862^2 fra korrelasjonen med vanninnhold. Det gir middelverdi $\mu = -0.409$ og standardavvik $\sigma = 0.128$ for normalfordelte $\ln(y) = \ln(s_u^{DSS}/s_u^A)$.

Tabell 3.2 viser forventningsverdi E[y] og varians Var[y] for de oppdaterte sannsynlighetsfordelingene. Tabellen viser at det faktisk er innført større usikkerhet i anisotropiforholdene. Usikkerheten i styrkeprofilet er derimot noe redusert. Den viktigste effekten av blokkprøvekorrelasjonene er imidlertid at forventningsverdien til styrkeprofilet er økt med 21.5 %, som vil redusere beregnet bruddsannsynlighet.

Tabell 3.2 *Oppdaterte sannsynlighetsfordelinger*

Variabel	Opprinnelig		Oppdatert		Fordeling
	E[y]	Var[y]	E[y]	Var[y]	
$s_u^A / s_u^A{}_{snitt}$	1.0	0.153^2	1.215	0.146^2	Lognormal
s_u^{DSS} / s_u^A	0.67	0.0089^2	0.67	0.0826^2	Lognormal
s_u^P / s_u^A	0.33	0.0118^2	0.33	0.0862^2	Lognormal

4 Sannsynlighetsanalyse

4.1 Initiell materialfaktor og prosentvis forbedring

Som utgangspunkt for sannsynlighetsanalysen er det først gjort en deterministisk analyse med beregningsmodellen for å finne initiell materialfaktor γ_{M0} og så prosentvis forbedring ved forskjellig høyder av motfyllingen.

Fordi bestemmelsen av materialfaktor er ment å skulle være som i prosjekteringssituasjon er parametere basert kun på data fra Sund-Bradden. Derfor er et "forsiktig valgt" karakteristisk aktivt skjærstyrkeprofil benyttet med middelverdi minus ett standardavvik for den uavhengige variabelen $s_u^A/s_u^A{}_{snitt}$ i Tabell 3.1. Dette tilsvarer det røde skjærstyrkeprofilet i Figur 3.5. For anisotropiforholdene er derimot middelverdiene i Tabell 3.1 benyttet. Disse styrkeparameterne er benyttet for å beregne γ_{M0} og prosentvis forbedring etter utlegging av motfylling.

4.2 First Order Second Moment (FOSM)

For å beregne sannsynlighet for brudd etter at belastningen er påført i toppen av skråningen er First Order Second Moment (FOSM) benyttet. FOSM er en metode for å beregne sannsynlighet for brudd, ved å anta sannsynlighetstetthetsfordelingen og å estimere standardavvik og middelverdi for en grensetilstandsfunksjon. Metoden er beskrevet i NIFS-rapport nr. 73/2012 (SINTEF, 2012). Metoden er ikke veldig nøyaktig for lav bruddsannsynlighet. En metode som for eksempel Monte Carlo-simulering krever derimot veldig mange flere analyser, er mer tidkrevende.

I sannsynlighetsanalysen benyttes mest mulig realistiske sannsynlighetsfordelinger. For å redusere usikkerhetene i det begrensede datagrunnlaget fra Sund-Bradden er det valgt å bruke sannsynlighetsfordelingene i Tabell 3.2 som er oppdatert med blokkprøvekorrelasjoner.

FOSM er utført ved å gjøre en serie deterministiske analyser hvor én og én variabel varieres om gangen. I analysene er materialfaktor γ_M funnet med c/ϕ-reduksjon i Plaxis. Ut ifra variasjonen estimeres middelverdi og standardavvik for lognormalfordelt γ_M. Ved å definere brudd som $\gamma_M < 1.0$, er sannsynlighet for brudd beregnet som $P_f = P(\gamma_M<1)$.

5 Resultater

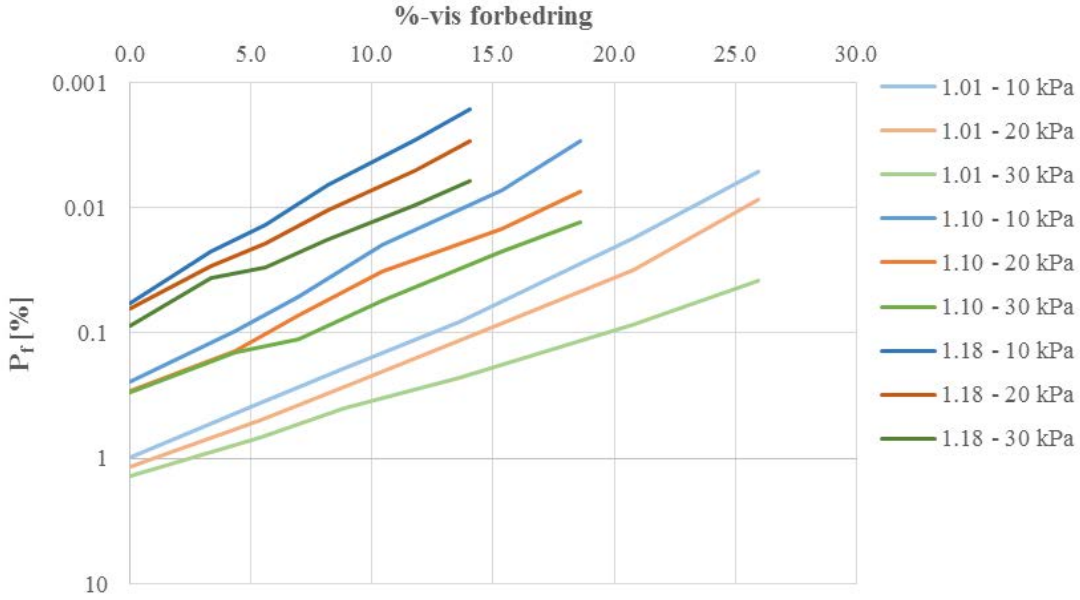
For hver kombinasjon av tre skråningshelninger, tre lasttilfeller og seks motfyllingshøyder er en FOSM-analyse utført som vist på Figur 5.1. Figuren viser resultatet fra analysen med skråningshelning 1:11 (hvor initiell materialfaktor γ_{M0} = 1.18), uten motfylling og med 30 kPa påført last i toppen av skråningen.

Finit=1.18										
Case	**Init-30**									
Variable	Distribution	E(x)	St.Dev.	DX	E(x)+DX	E(x)-DX	F+	F-	dF/dX|E(x)	(dF/dX|E(x))^2*St.dev^2
suA/σ_{v0}'	Lognorm	0.347	0.042	0.00416	0.351	0.343	1.6856	1.6445	4.9443881	0.04223025
suDSS/suA	Lognorm	0.670	0.086	0.00862	0.67862	0.66138	1.6829	1.6489	1.9721578	0.0289
suP/suA	Lognorm	0.330	0.083	0.00826	0.338	0.32174	1.666	1.6654	0.0363196	9E-06
									Sum	0.07113925
	1	>F	0.0885	%		σ	0.1591		St.Dev.F	0.266719422
			1130.3			μ	0.4975		E(F)	1.66555

Figur 5.1 FOSM, skråningshelning 1:11, uten motfylling og 30 kPa belastning

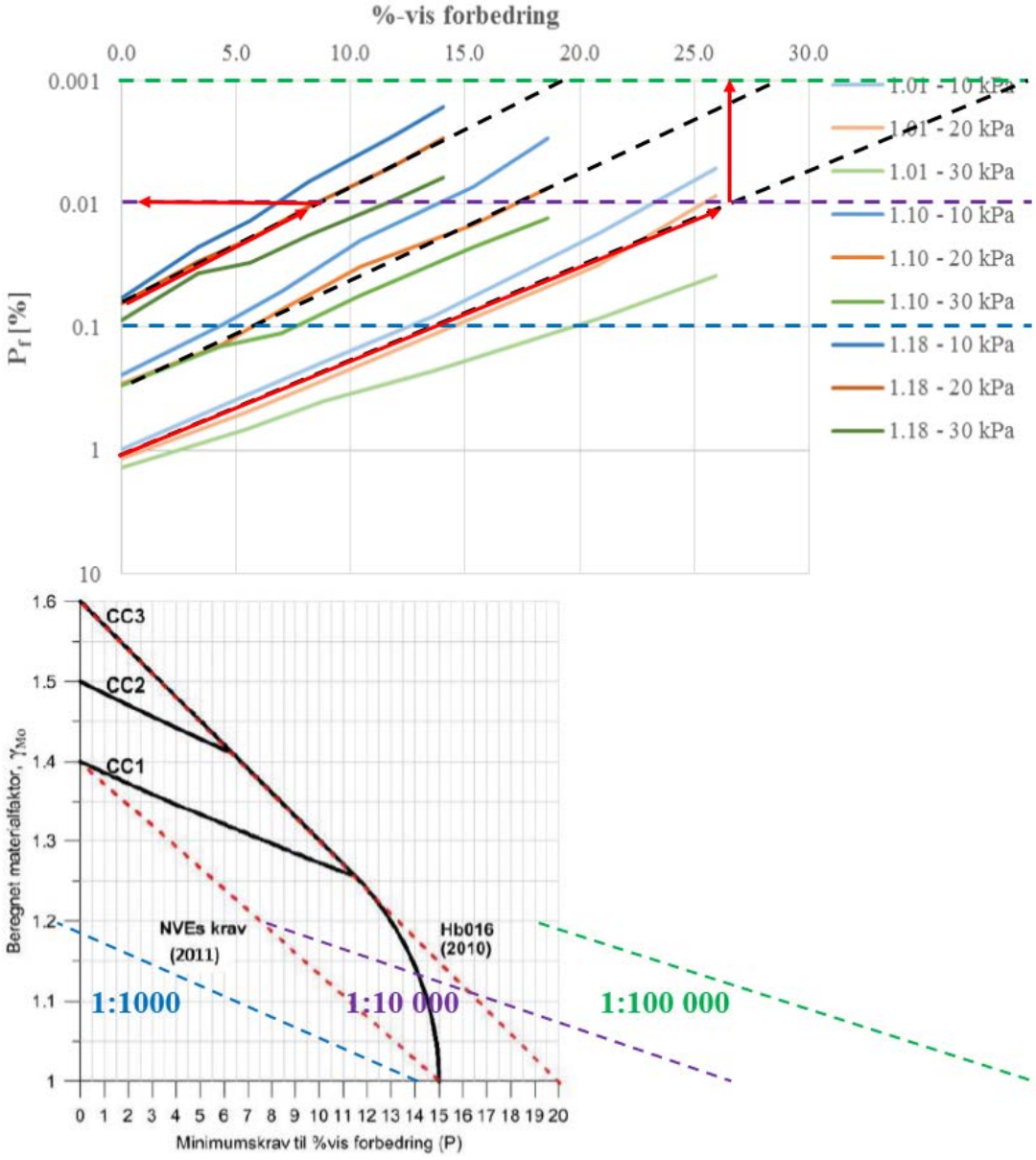
Middelverdien er benyttet for de tre uavhengige variablene, og én og én variabel er så økt og redusert med standardavvik/10, i til sammen seks deterministisk beregninger. De resulterende materialfaktorene fra c/ϕ-reduksjon er benyttet til å estimere forventningsverdi og varians for en lognormalfordelt materialfaktor γ_M. Denne fordelingen er brukt til å beregne sannsynligheten for brudd $P_f = P(\gamma_M<1)$. For tilfellet på Figur 5.1 er estimert forventningsverdi $E[\gamma_M] = 1.67$ og varians $Var[\gamma_M] = 0.267^2$, som med en lognormalfordeling gir bruddsannsynlighet $P_f = P(\gamma_M<1) = 0.0885$ % (som tilsvarer 1:1130).

Resultatene fra alle FOSM-analysene er sammenstilt i Figur 5.2, vist som sannsynlighet for brudd P_f mot prosentvis forbedring av materialfaktor γ_M. Det er egne kurver for ulik initiell materialfaktor γ_{M0} og belastning i toppen av skråningen. Figuren viser at det er tilnærmet lineær sammenheng mellom logaritmen av bruddsannsynlighet og prosentvis forbedring for alle tilfellene.



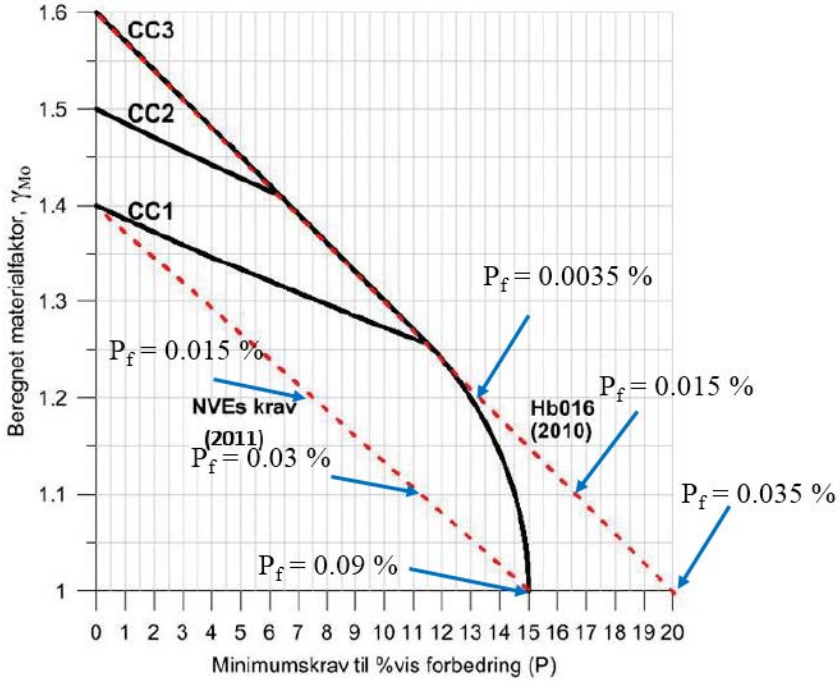
Figur 5.2 Bruddsannsynlighet P_f mot prosentvis forbedring av materialfaktor γ_M fra FOSM-analysene. γ_{M0} = 1.01, 1.10 og 1.18, og fyllingslast lik 10, 20 og 30 kPa

Resultatene i Figur 5.2 kan brukes på forskjellige måter til å formulere krav til prosentvis forbedring. Man kan for eksempel kreve bruddsannsynlighet mindre enn 1:1000, 1:10 000 eller 1:100 000, og så utforme kravet til prosentvis forbedring ut ifra dette, vist på Figur 5.3. Eksempelvis for en skråning med γ_{M0} = 1.01 må materialfaktoren økes med ca. 27 % for å oppnå bruddsannsynlighet P_f = 0.01 %, 1:10 000, ved 20 kPa belasting. For en annen skråning med γ_{M0} = 1.18 er P_f omtrent 0.1 % i utgangspunktet for 20 kPa belasting. Ved ca. 8 % forbedring av materialfaktoren reduseres bruddsannsynligheten til P_f = 0.01 %.



Figur 5.3 Krav til prosentvis forbedring for P_f = 1:1000, 1:10 000 og 1:100 000

Alternativt kan man estimere sannsynlighet for brudd i kravene til NVE og SVV. Dette er vist på Figur 5.4 for tilfellet med 20 kPa belastning.



Figur 5.4 Bruddsannsynlighet for kravene til NVE og SVV

Resultatene fra dette studiet viser at hvis man skal kreve lik sannsynlighet for brudd for skråninger med forskjellig initiell materialfaktor, bør kurven som definerer krav til prosentvis forbedring av materialfaktoren være tilnærmet lineær og ha mindre helning enn dagens krav. Det vil si at ved relativt høy beregnet initiell materialfaktor for områdestabilitet, kan man være mindre strenge (krav til mindre prosentvis forbedring), siden bruddsannsynligheten er lav så lenge man ikke skal gjøre noe tiltak i selve skråningen. For skråninger med lav initiell materialfaktor derimot kan det være nødvendig å øke kravene til prosentvis forbedring.

6 Konklusjoner

Det er i denne aktiviteten utført sannsynlighetsanalyser for en idealisert naturlig skråning med skjærstyrkeparametere basert på data fra Sund-Bradden, oppdatert for å ta hensyn til indeksdatakorrelasjoner fra NGIs blokkprøvedatabase. Den viktigste effekten av blokkprøvekorrelasjonene er imidlertid at forventningsverdien til styrkeprofilet er økt med 21.5 %, som vil redusere beregnet bruddsannsynlighet.

Prosentvis forbedring av materialfaktoren γ_M er oppnådd ved å modellere en motfylling, og en påført last i toppen av skråningen er benyttet som utløsende bruddårsak.

Resultatene fra analysene viser en lineær sammenheng mellom logaritmen av sannsynlighet for brudd og prosentvis forbedring av γ_M. Sammenlignet med dagens krav til områdestabilitet fra NVE og SVV kan man redusere kravet til prosentvis

forbedring for skråninger med beregnet høy initiell materialfaktor og eventuelt øke det for lav beregnet initiell materialfaktor, hvis man skal kreve lik sannsynlighet for brudd. Hvorvidt dette resultatet er gyldig for andre tilfeller, som for eksempel elveerosjon, endring i grunnvannstrykk eller redusert udrenert skjærstyrke med tiden, bør undersøkes med nye studier.

I denne aktiviteten er metoden FOSM benyttet, som kun gir et estimat på sannsynlighetstetthetsfunksjonen til γ_M. Mer nøyaktige metoder kan også tas i bruk, men vil være mer arbeidskrevende.

For å forenkle beregningene er det ikke tatt hensyn til sprøbruddoppførsel i kvikkleira, slik som i de andre aktivitetene. Dette er noe man kunne ha sett på i en egen studie. Fordi det ikke er noen definert måte å bestemme materialfaktor på når softening er inkludert bør man i stedet formulere et krav til pålitelighet. Eventuelt kan man også benytte resultatet fra prosjektet "Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire" (NGI, 2013a), og øke kravet til materialfaktor og prosentvis forbedring med for eksempel 20 % for å ta hensyn til sprøbruddoppførsel.

Når det gjelder sannsynlighet for brudd ved områdestabilitetsberegninger vil det også være nyttig å utføre en studie av sannsynlighet for potensielle utløsningsmekanismer. Det bør definere hvilke forhold materialfaktoren skal ta hensyn til i prosjektering og som man skal ha tilstrekkelig sikkerhet mot.

7 Referanser

Ching, J., Phoon, K. K. og Chen, Y. C. (2010), "Reducing shear strength uncertainties in clays by multivariate correlations." Canadian Geotech. Journal. 47: 16-33

Grimstad, G., Andresen, L. og Jostad, H.P. (2010), “NGI ADP: Anisotropic Shear Strength Model for Clay”. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 36, No. 4, pp. 483-497.

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.

Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. og Poulos, H.G. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics: SOA report.", Proc. 9th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Eng., Tokyo, 2, 421-494

NGI (2009a), ”Rv. 717 parsell Sund-Bradden. Grunnundersøkelse, datarapport” NGI rapport 20091264-00-36-R, 18.08.2009

NGI (2009b), ”Rv. 717 Sund-Bradden. Tolking av grunnundersøkelser, karakteristiske materialparametre”, NGI rapport 20091264-00-38-R, 18.09.2009

NGI (2009c), ”Rv. 717 Sund-Bradden. Stabilitetsberegninger”, NGI rapport 20091264-00-53-R, 09.10.2009

NGI (2011), “Data base for tests on high quality block samples on clay. Summary of compressibility, strength and deformation parameters in relation to index properties”. NGI rapport 20051014-1, 2011.

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

NGI (2013b), ”Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire, Oppsummeringsrapport”, NGI rapport 20092128-00-8-R

Plaxis BV (2009), Plaxis manuals. Plaxis BV. www.plaxis.nl.

SINTEF (2012), "Probabilistiske analyser av grunnundersøkelser i sensitive leirområder", rapportnr. SBF2012 A0310, datert 2012-11-30, NIFS-rapport nr. 73/2012

Snedecor, G.W. og Cochran, W. G. (1964), “Statistical methods.” Univ of Iowa Press, 140 p.

Statens vegvesen (2010), “Håndbok 016 – Geoteknikk i vegbygging”, vegvesen.no, 6. utgave

Statens vegvesen (2012), "Prosentvis forbedring av materialfaktor i sprøbruddmaterialer", notat 2012056523, datert 2012-05-24, NIFS-rapport nr. 74/2012

Kontroll- og referanseside/
Review and reference page

NGI

Dokumentinformasjon/*Document information*		
Dokumenttittel/*Document title* Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring		**Dokumentnr./*Document No.*** 20130275-02-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* Kvikkleire, sikkerhet, naturlig skråning, sannsynlighetsanalyse		

Stedfesting/*Geographical information*	
Land, fylke/*Country, County*	**Havområde/*Offshore area***
Kommune/*Municipality*	**Feltnavn/*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***	**Sign. Prosjektleder/*Project Manager***
	12. mai 2014	Petter Fornes

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

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

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
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

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i Rapportserien i 2014

Nr. 1 Analyse av energibruk i forretningsbygg. Formålsdeling. Trender og drivere

Nr. 2 Det høyspente distribusjonsnettet. 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

Nr. 58 Naturfareprosjektet DP.6 Kvikkleire. Sikkerhet ifm utbygging i kvikkleireområder: Sannsynlighet for brudd med prosentvis forbedring.

Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no