

Effekt av anisotropi på udrenert skjærstyrke i naturlige skråninger

Marit Isachsen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Steinar Nordal, BAT

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



Oppgavens tittel: Effekt av anisotropi på udrenert skjærstyrke i naturlige skråninger	Dato: 9. juni 2012		
	Antall sider (inkl. bilag og vedlegg): 94		
	Masteroppgave	<input checked="" type="checkbox"/>	Prosjektoppgave
Navn: Marit Isachsen			
Faglærer/veileder: Prof. Steinar Nordal			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

<p>Ekstrakt:</p> <p>Anisotropi har stor innvirkning på den udrenerte skjærstyrken i leire. I dag er NGI-ADP modellen implementert i elementmetodeprogrammet Plaxis, men modellen tar kun hensyn til anisotropi på deviatoriske spenninger, og egner seg derfor best under initialt flatt terreng. Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i en forenklet variant av ADP-modellen, presentert av Kristoffer Rabstad i hans hovedoppgave våren 2011. Modellen er kalt ADPXX, og tar også hensyn til anisotropi på initiale skjærspenninger, på horisontale og vertikale plan. ADPXX-modellen viste en større effekt av anisotropi på grunn av initiale skjærspenninger enn forventet, hvilket er bakgrunnen for oppgaven.</p> <p>Materialmodellens egenskaper er analysert i ulike initialtilstander. Det har vist seg at det er vanskelig å gi aktiv og passiv styrke som input som funksjon av initial effektiv vertikal overlaging. Styrketakene må relateres til de effektive initiale hovedspenningene uansett hvilken retning disse måtte ha. Endringer i modellen og i programkoden er utført for bedre tilnærming til reell materialoppførsel ved å justere grad av anisotropi ut fra initialspenningen, på en konsistent måte innen rammen av et Mohr Coulomb (MC) flytekriterium. Dette innebærer at graden av anisotropi varierer gjennom materialet. For enkelhets skyld er det antatt at anisotropi på skjærspenninger gir like stort bidrag som anisotropi på deviatoriske spenninger.</p> <p>Modellens egenskaper er demonstrert gjennom eksempler, både på en naturlig skråning og på to fiktive idealskråninger. Modellen oppfører seg som forventet. I tilfeller der spenningene øker proporsjonalt, som i en vanlig stabilitetsanalyse av en naturlig skråning, vil modellen gi samme resultat som MC. I situasjoner der en ytre last fører til spenningsrotasjon, vil den brukedefinerte modellen gi lavere kapasitet. Forskjellen minker dersom skråningen initialt har lav sikkerhet mot brudd.</p>

Stikkord

1. Anisotropi
2. Udrenert skjærstyrke
3. Plaxis
4.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i faget «TBA4900 Geoteknikk», og er en avsluttende oppgave på masterstudiet «Bygg- og miljøteknikk» ved NTNU.

Oppgaven tar utgangspunkt i brukerdefinert materialmodell som Kristoffer Rabstad implementerte i elementmetodeprogrammet Plaxis sin masteroppgave 2011. Oppgaven dreier seg i stor grad om å forstå materialmodellen og hvordan den vil oppføre seg i ulike situasjoner, samt hvilke konsekvenser endringer i modellen vil føre til.

Dette arbeidet har vært krevende, og mye tid har gått med til å utvikle flere alternative justeringer av likningene i modellen. Justeringene har vært knyttet til sammenhengen mellom inputparametere, udrenert anisotrop styrke og initialspenningene. Etter testing har det kommet frem av de fleste av disse ikke førte frem, eller hadde andre mangler. De ulike variantene av formuleringer som ikke førte frem, er ikke inkludert i denne rapporten, til tross for at mange tester og en rekke simuleringer har vært nødvendige for å oppnå avklaring.

En stor takk rettes til min veileder Prof. Steinar Nordal, som har vært til stor hjelp gjennom hele prosessen med gode idéer og innspill. Han har vært til spesielt god hjelp ved utredning av prinsipp for å vurdere om styrken i den brukerdefinerte ADP modellen var realistisk. Takk også til Prof. Thomas Benz med hjelp med kompilatoren.

Sammendrag

Anisotropi har stor innvirkning på den udrenerte skjærstyrken i leire. I dag er NGI-ADP modellen implementert i elementmetodeprogrammet Plaxis, men modellen tar kun hensyn til anisotropi på deviatoriske spenninger, og egner seg derfor best under initialt flatt terreng. Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i en forenklet variant av ADP-modellen, presentert av Kristoffer Rabstad i hans hovedoppgave våren 2011. Modellen er kalt ADPXX, og tar også hensyn til anisotropi på initiale skjærspenninger, på horisontale og vertikale plan. ADPXX-modellen viste en større effekt av anisotropi på grunn av initiale skjærspenninger enn forventet, hvilket er bakgrunnen for oppgaven.

Materialmodellens egenskaper er analysert i ulike initialtilstander. Det har vist seg at det er vanskelig å gi aktiv og passiv styrke som input som funksjon av initial effektiv vertikal overlagering. Styrketakene må relateres til de effektive initiale hovedspenningene uansett hvilken retning disse måtte ha. Endringer i modellen og i programkoden er utført for bedre tilnærming til reell materialoppførsel ved å justere grad av anisotropi ut fra initialspenningen, på en konsistent måte innen rammen av et Mohr Coulomb (MC) flytekriterium. Dette innebærer at graden av anisotropi varierer gjennom materialet. For enkelhets skyld er det antatt at anisotropi på skjærspenninger gir like stort bidrag som anisotropi på deviatoriske spenninger.

Modellens egenskaper er demonstrert gjennom eksempler, både på en naturlig skråning og på to fiktive idealskråninger. Modellen oppfører seg som forventet. I tilfeller der spenningene øker proporsjonalt, som i en vanlig stabilitetsanalyse av en naturlig skråning, vil modellen gi samme resultat som MC. I situasjoner der en ytre last fører til spenningsrotasjon, vil den brukerdefinerte modellen gi lavere kapasitet. Forskjellen minker dersom skråningen initialt har lav sikkerhet mot brudd.

Summary

Anisotropy might have an essential influence on undrained shear strength of clay. Today, the NGI-ADP model is implemented in the finite element program Plaxis. Owing to the fact that only anisotropy on deviatoric stresses is taken into account in this model, the range of use is mainly under initially flat terrain. This thesis is based on a simplified variant of the ADP-model, presented by Kristoffer Rabstad in his master thesis in the spring of 2011. The model is named ADPXX, and does also include the effect of anisotropy on shear strength, on horizontal and vertical planes. The ADPXX model showed larger effect of anisotropy due to initial shear stress than expected, which is the reason for this thesis.

Material properties of the model are analyzed in different initial conditions. It is shown that it is difficult to state active and passive strength as an input of initial effective vertical overburden. The maximum strength allowed must be related to effective initial principal stresses regardless of the direction these may have. Changes in the model and in the application code is executed for a better approach to real material behavior by adjusting the degree of anisotropy from the initial stresses, in a consistent manner within the Mohr Coulomb (MC) yield criterion. This implies that the degree of anisotropy varies throughout

the material depending on the initial stress. For simplicity it is assumed that anisotropy on deviatoric stresses give equal contributions as anisotropy on shear stresses.

The model characteristic is demonstrated through some examples. Both a natural slope and two fictitious ideal slopes are used for this propose. The model behaves as expected. In cases where the stresses increase proportionally, as in conventional stability analysis, the model will give the same results as if the MC were used. In situations where an external load leads to stress rotation, the user-defined ADPXX model results in lower capacity. The difference decreases if the slope initially has a low safety against failure.

Innhold

Forord

Sammendrag

1	Innledning.....	1
2	Definisjoner.....	3
2.1	Positive spenningsretninger og aksesystem.....	3
3	Teoretisk grunnlag.....	5
3.1	Anisotropi på udrenert skjærstyrke.....	5
3.2	Materialmodeller	9
3.2.1	Isotrop materialmodell: Mohr Coulomb	9
3.2.2	Anisotrope materialmodeller.....	10
3.3	Initialspenninger i skråninger	11
4	Initialspenninger i Kattmarka.....	13
4.1	Input og generell prosjektinformasjon.....	13
4.2	Initialspenninger	14
4.2.1	Tradisjonell metode, gravitasjonslast.....	14
4.2.2	Initialspenninger ved betraktning av geologisk historie.....	15
4.2.3	Simulering av geologisk historie uten grunnvannsenking	16
4.3	Diskusjon og konklusjon	18
5	Effekt av $\eta \cdot \tau_{xy0}$ på udrenert styrke i henhold til ADPXX.....	19
5.1	Inputparametere og beregning	19
5.2	Effekt av $\eta \cdot \tau_{xy}$ på sikkerhetsfaktoren for skråningene	20
6	Kontroll av udrenert styrke.....	23
6.1	Bakgrunn og prinsipp	23
6.2	Kontroll av udrenert styrke.....	24
6.3	Kontroll av initialspenningstilstand i forhold til flytekriteriet.....	26
6.4	Konklusjon.....	27
7	Modifisering av ADPXX-modellen	29
7.1	Prinsipp.....	29
7.2	Vurdering av udrenert styrke	34

7.2.1	Rabstads idealskråning	34
7.2.2	Aktiv, direkte og passiv udrenert styrke for skråningen i Kattmarka	35
7.3	Konklusjon.....	38
8	ADPX1 i forhold til isotrope materialmodeller.....	39
8.1	Stabilitetsanalyser.....	39
8.1.1	Rabstads idealskråning	39
8.1.2	Kattmarkaskråningen	41
8.2	Effekt av spenningsrotasjon.....	41
8.2.1	Idealskråning med 10° helningsvinkel	41
8.2.2	Beregninger og resultater	42
8.2.3	Kattmarka	45
8.3	Aktivering av materialet med ADPX1-modellen i Plaxis-beregninger.....	45
8.4	Konklusjon.....	46
9	Konklusjon og videre arbeid	47
9.1	Oppsummering av utført arbeid.....	47
9.2	Begrensninger i ADPX1 som materialmodell	47
9.3	Forslag til videre arbeid	48

Referanseliste

Bilag

Vedlegg

Figurliste

Figur 2-1: Aksesystem benyttet i rapporten. Figuren til høyre viser positiv spenningsretning.	3
Figur 3-1: Bruk av ulik skjærstyrke i ulike soner langs skjærflaten (10).....	6
Figur 3-2: aktivt og passivt treaksialt skjærforsøk for anisotrop, udrenert leire (9)	6
Figur 3-3: Sammenlikning av resultat fra et direkte skjærforsøk for én normalt konsolidert prøve og én prøve konsolidert for skjærspenninger (11)	7
Figur 3-4: Direkte udrenert styrke som funksjon av konsolidert skjærspenning for kvikkleire (12)	7
Figur 3-5: Aktiv, Passiv og direkte udrenert skjærstyrke plottet mot overkonsolideringsgrad. S er forholdet mellom udrenert skjærstyrke og effektiv vertikal overlaging (14).	8
Figur 3-6: Udrenert styrke som resultat av aktivt og passivt treaksialt skjærforsøk samt direkte skjærforsøk plottet mot plastisitet (14).....	8
Figur 3-7: Mohr Coulomb flytekriterium(9)	9
Figur 3-8: Effektive spenningsstier for udrenert analyse. (a) MC og (b) naturlig oppførsel (15).	10
Figur 3-9: NGI-ADP flytekriterium for plan tøyning ved spenningsdeviator (3).....	10
Figur 3-10: Bruddkriterium i deviatorisk plan (16). Z-retning representerer her det som i denne rapporten blir omtalt som y-retning.	11
Figur 4-1: Geometri Kattmarka.....	13
Figur 4-2: Initialspenninger under flatt terreng i Kattmarka, beregnet med tradisjonell metode	14
Figur 4-3: Plastiske punkt. Røde: Mohr-Coulomb punkt, Hvite: «tension cut-off» punkt	15
Figur 4-4: Spenninger før senking av grunnvann.....	16
Figur 4-5: Initialspenninger under flatt terreng.....	16
Figur 4-6: Initialspenninger i overkant av skråningen	17
Figur 4-7: Plastiske punkt. Røde: Mohr-Coulomb punkt. Hvite: «tension cut-off» punkt	17
Figur 4-8: Initialspenninger i selve skråningen.....	18
Figur 5-1: Sikkerhetsfaktor (ΣM_{weight}) som funksjon av η	20
Figur 6-1: Øvre grense for styrken i henhold til MC-kriteriet	23
Figur 6-2: Prinsipp for kontroll av s_u i ADPXX-modellen.	24
Figur 6-3: Benyttet styrke for 3 ulike punkter langs skjærflaten i Rabstads idealskråning med $\xi=1$ og $\eta=0$	25
Figur 6-4: Punkter der styrken i ADPXX-modellen overskrider øvre grense for realistisk styrke, definert av MC bruddkriterium.	26

Figur 6-5: Situasjon i Kattmarka der initialspenningstilstanden vil ligge utenfor flytekriteriet for lave verdier av η	26
Figur 6-6: Punkter i skråningen der flytekriteriet til ADPXX-modellen ikke inkluderer initialspenningene for $\xi=1$ og $\eta=0$	27
Figur 7-1: Definisjoner på ulike avstander benyttet til å beskrive ADPX1-modellen	29
Figur 7-2: ADPX1-kriteriet for en svakt anisotrop initialspenningstilstand (til høyre). Dersom radiusen i flytekriteriet var som for sterkt anisotrope spenningstilstander, ville situasjonen vært som til venstre, hvilket ville gitt for lav styrke. Derfor vil denne radiusen øke i ADPX1-modellen, slik at kriteriet alltid når ut til MC-kriteriet, som vist til høyre.....	31
Figur 7-3: (a) Prinsipp ADPXX-modellen for $\xi=\eta=1$. (b) Prinsipp ADPX1-modellen.....	32
Figur 7-4: Aktiv, direkte og passiv udrenert skjærstyrke i ADPX1-modellen.....	33
Figur 7-5: Beregnet midlere udrenert styrke i Rabstads idealskråning	34
Figur 7-6: Rabstads idealskråning: (a) benyttet midlere udrenert styrke, (b) beregnet midlere udrenert styrke for utvidet modell.....	35
Figur 7-7: Aktiv udrenert styrke med dybden langs et snitt i nedre del av skråningen i Kattmarka	36
Figur 7-8: Forhold passiv/aktiv styrke og direkte/aktiv styrke langs et snitt i nedre del av skråningen i Kattmarka	36
Figur 7-9: Beregnet aktiv, passiv og direkte udrenert styrke plottet mot tilsvarende styrker anslått av undersøkelsesgruppen etter skredet i Kattmarka.....	37
Figur 7-10: Beregnet udrenert styrke plottet mot resultater fra grunnundersøkelser og ulike trendlinjer (22).....	38
Figur 8-1: Kritisk skjærflate for Rabstads idealskråning for en udrenert analyse med HS-modellen.	40
Figur 8-2: Initialspenninger i området rundt den senere utlagte fyllingen.....	42
Figur 8-3: Hovedspenninger etter utlegging av fylling, ADPX1	43
Figur 8-4: Sammenlikning av andelen av fyllingen som kan legges ut, ved anvendelse av ADPX1 og MC som materialmodeller. Deformasjonen regnes i selve fyllingen.	43
Figur 8-5: Utvalgte punkt langs for nærmere vurdering langs kritisk skjærflate beregnet med ADPX1 som materialmodell.	44
Figur 8-6: Spenningssti i punkt P	44
Figur 8-7: Spenningssti punkt M.....	44
Figur 8-8: Deformasjons-lastkurve for skråningen i Kattmarka ADPX1 og MC som materialmodeller for et punkt i skråningstoppen under lasten.	45

Tabelliste

Tabell 4-1: Generell beregningsinformasjon.....	13
Tabell 4-2: Beregningsparametere for initialspenninger i en skråning i Kattmarka	14
Tabell 5-1: Materialparametere for ADPXX-modellen, Kattmarka	20
Tabell 7-1: Foreslåtte endringer i ADPXX-modellen	34
Tabell 8-1: Materialparametere HS, Rabstads idealskråning.....	39
Tabell 8-2: Oversikt over materialparameterne benyttet i ADPX1-modellen for Rabstads idealskråning	40
Tabell 8-3: Materialparametere	42

Syllbolliste

a	Attraksjon
ADP	Aktiv direkte passiv
ADPX1	Brukerdefinert materialmodell
ADPXX	Brukerdefinert materialmodell
B	Forhold mellom største og minste tillatte styrke i ADPX1
E	Elastisitetsmodul
E_{50}^{ref}	Sekanstivhet for standard drenert treakstest
$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$	Tangentstivhet for ødomertest
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	Pålastning-avlastning stivhet
F	Flytekriterium
K_0	Hviletrykkskoeffisient
MC	Mohr Coulomb
OCR	Overkonsolideringsforhold
P'	Effektiv middelspenning
q	Deviatoriske spenninger
r_i	Dimensjonsløs avstand til initialspenning
r_{max}	Største tillatte dimensjonsløse styrke i ADPX1
r_{min}	Minste tillatte dimensjonsløse styrke i ADPX1
r_s	Avstand fra origo til sentrum av dimensjonsløst flytekriterium til ADPX1
S	Forhold mellom udrenert skjærstyrke og effektiv vertikal overlaging
s_u	Udrenert skjærstyrke
\tilde{s}_u	Dimensjonsløs udrenert styrke
s_u^A	Aktiv udrenert skjærstyrke
s_u^P	Passiv udrenert skjærstyrke
η	Anisotropifaktor for skjærspenninger
κ	Fastningsparameter
v	Tverrkontraksjonstall
ξ	Anisotropifaktor for deviatoriske spenninger
ρ	Densitet
σ'_m	Midlere spenning mellom største og minste hovedspenning
$\sigma_{x,0}$	Initiale horisontalspenninger
σ_{xx}	Horisontalspenning

$\sigma_{y,0}$	Initiale vertikalspenninger
σ_{yy}	Vertikalspenning
τ_0	Deviatoriske initialspenninger
φ	Friksjonsvinkel

1 Innledning

Anisotropi har vist seg å spille en stor rolle for jordens egenskaper, da den udrenerte styrken i jorden vil være høyere dersom jorden er konsolidert for spenninger i samme retninger som etterfølgende belastning. Kunnskap om virkningen av anisotropi på udrenert skjærstyrke har ført til jordmodeller som NGI-ADP, som finnes implementert i elementmetodeprogrammet Plaxis.

I NGI-ADP modellen antas anisotropien å følge vertikalen ved at største hovedspenning initialt er antatt å være vertikal, og modellens bruksområde er derfor hovedsakelig under initialt flatt terreng. I en skråning vil hovedspenningene rotere. Kristoffer Rabstad implementerte derfor en utvidet ADP-modell, omtalt som ADPXX-modellen, i sin masteroppgave. I denne modellen kan hovedspenningene ha en vilkårlig retning. Rabstad viste at økningen i sikkerhetsfaktor kunne være på opptil 30 % dersom full anisotropi ut fra initiale skjærspenninger på horisontale og vertikale plan ble antatt. Flytekriteriet i ADPXX tar utgangspunkt i initialspenningene, og resultatet er derfor avhengig av realistisk beregnede initialspenninger.

I denne rapporten blir initialspenningene i en naturlig skråning i Kattmarka beregnet og vurdert, og brukt som grunnlag for stabilitetsberegninger i utgangspunktet med den opprinnelige ADPXX-modellen. Skråningen er valgt fordi skråningens egenskaper er godt dokumentert, og derfor kan benyttes som sammenlikningsgrunnlag. Hensikten med oppgaven er å dokumentere egenskapene ved modellen, samt å finne ut hvilken effekt hensynet til anisotropi har på den udrenerte styrken. Dette er gjort ved enkle eksempler, både på den naturlige skråningen i Kattmarka og på to idealskråninger.

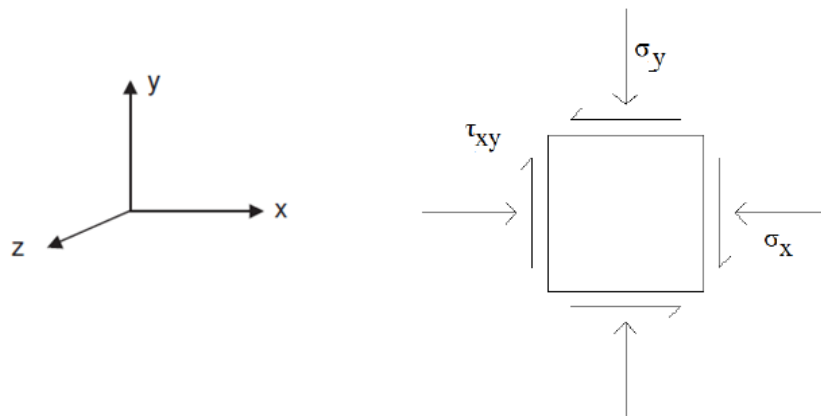
En kort definisjon av aksesystem og positive spenningsretninger er presentert i Kapittel 2. Rapporten fortsetter med et kort litteraturstudie i Kapittel 3, der relevant teori blir presentert. Fokuset ligger på kjennskap om anisotropi på udrenert skjærstyrke, og hvilke faktorer som bidrar til økt effekt av denne. Relevante materialmodeller blir også introdusert. I Kapittel 4 blir deretter initialspenningene i en skråning i Kattmarka beregnet og vurdert. Ulike metoder er benyttet for å finne de mest naturlige spenningene. Gode initialspenninger vil være vesentlig for å få et godt resultat med ADPXX-modellen, da flytekriteriet er sterkt avhengig av disse. Kapittel 5 følger opp med en stabilitetsanalyse med ADPXX-modellen av den samme skråningen i Kattmarka. Resultatet blir vurdert ut fra kjente verdier. På bakgrunn av disse resultatene, presenterer Kapittel 6 et verktøy for å kontrollere om den udrenerte styrken er realistisk. Verktøyet er videre benyttet til å vurdere den udrenerte styrken i idealskråningen som Rabstad benyttet som eksempel, samt i skråningen i Kattmarka. På bakgrunn av disse resultatene, blir enkle endringer i modellen utarbeidet og vurdert i Kapittel 7. Resulterende beregnede materialparametere blir sammenliknet med kjente verdier for å vurdere troverdigheten av modellen. Sikkerhetsanalyser med den modifiserte modellen blir utført i Kapittel 8. Her blir også de grunnleggende egenskapene ved modellen belyst gjennom enkle eksempler. Arbeidet blir til slutt oppsummert og diskutert i Kapittel 9.

2 Definisjoner

2.1 Positive spenningsretninger og aksesystem

I tradisjonell mekanikk har trykkspenninger negativt fortegn og strekkspenninger positivt fortegn. Når det gjelder geoteknikk, er det stort sett snakk om trykkspenninger fordi jord generelt ikke kan ta opp strekkrefter. Derfor er det innen geoteknikk vanlig å omtale trykkspenninger som positive. Elementmetodeprogrammet Plaxis, som er benyttet i dette arbeidet, bruker derimot tradisjonelle kontinuumsmekaniske betegnelser der strekk er positivt (1). I denne rapporten er trykkspenninger betegnet som positive, og resultatene fra Plaxis er omgjort til å passe inn i denne betegnelsen der annet ikke er oppgitt.

Et aksesystem som vist i Figur 2-1 er benyttet, med en z-akse som peker ut av planet. Figuren til venstre viser positive spenningsretninger etter definisjonen benyttet i denne rapporten.



Figur 2-1: Aksesystem benyttet i rapporten. Figuren til høyre viser positiv spenningsretning.

3 Teoretisk grunnlag

Anisotropi på udrenert skjærstyrke har vist seg å spille en stor rolle på udrenert skjærstyrke for mange kapasitet- og stabilitetsproblemer. I dette kapittelet presenteres et kort litteraturstudie om effekten av anisotropi på udrenert skjærstyrke. Aktuelle beregningsmodeller vil også bli belyst.

3.1 Anisotropi på udrenert skjærstyrke

De fleste leirer er anisotrope, det vil si at den har ulike fysiske egenskaper i forskjellige retninger (2). Graden av anisotropi varierer fra leire til leire, men i mange kapasitet- og stabilitetsproblemer vil anisotropi spille en stor rolle, og bør ikke neglisjeres (3). Når jorden konsolideres, vil kornstrukturen tilpasse seg etter forholdene. Dersom materialet fortsettes og belastes i samme retning, vil materialet kunne ha en mye høyere udrenert styrke enn dersom materialet blir belastet i en retning som kornstrukturen ikke er tilpasset. Anisotropi fører dermed til at leiren vil ha høyere styrke dersom den er konsolidert for spenninger i samme retning som den blir belastet (4).

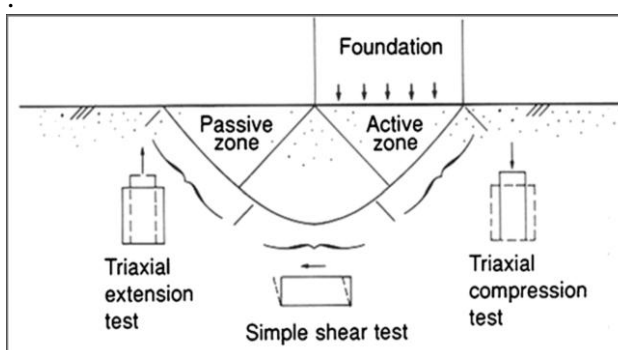
Den anisotrope udrenerte skjærstyrken er et resultat av to hovedfaktorer; kornskjelettes oppbygging og anisotrop spenningstilstand. For normalkonsoliderte leirer kan sistnevnte være dominerende (5). For lagdelte leirer med vekslende lag med leire og silt, antas den strukturbaserte anisotropien å dominere, men innflytelsen fra strukturbasert anisotropi blir sterkt redusert ved påfølgende store plastiske deformasjoner (4). Selv leirer med svært anisotrop struktur, vil oppføre seg isotropt dersom spenningstilstanden er isotrop (6).

Når jordmaterialer går til brudd, vil dette som oftest være et skjærbrudd, og skyldes at materialet blir belastet med for store skjærspenninger i forhold til skjærstyrken. Enkel bæreevneteorier for udrenert styrke under flatt terreng gir en forenklet situasjon som vist i Figur 3-1. Under fundamentet angis en aktiv Rankine-sone der jorden presses ned, og følgelig inntreffer en spenningssituasjon der $\sigma_1 = \sigma_v$ og $\sigma_3 = \sigma_h$. Deretter følger en Prandtl-sone, der spenningene gradvis blir rotert til spenningstilstanden i den passive Rankine-sonen som følger av at jorden blir presset opp. I denne passive Rankine-sonen er $\sigma_1 = \sigma_h$ og $\sigma_3 = \sigma_v$. Jorden under det flate terrenget er i utgangspunktet konsolidert for de samme spenningsretningene, men ettersom den ytre lasten fører til at spenningsretningene roterer, vil jorden bli utsatt for spenninger i en retning den ikke er konsolidert for. Dermed vil den udrenerte skjærstyrken variere langs bruddflaten (7).

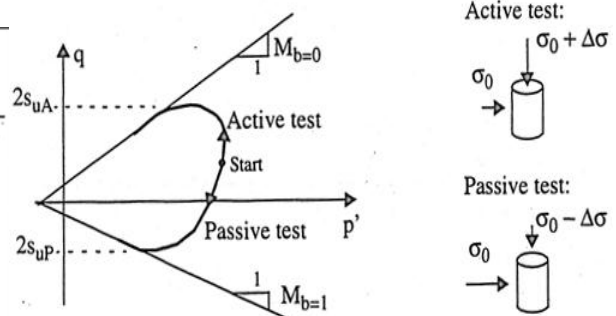
I en skråning vil initialspenningstilstanden være mer komplisert, da skjærspenninger er nødvendige for å opprettholde likevekt, hvilket fører til at hovedspenningene initialt har varierende rotasjon. Alle leirer som er konsolidert for spenninger som ikke er like i alle retninger, vil være spenningsindusert anisotrope. Dersom skråningen blir belastet til brudd, vil spenningene langs bruddflaten rotere på samme måte som under flatt terreng, men ettersom materialet også er konsolidert for skjærspenninger, er det vanskeligere å anslå utbredelsen av

de ulike sonene. I virkeligheten vil det være en glidende overgang mellom aktiv, direkte og passiv udrenert skjærstyrke både for flatt og hellende terreng (8).

Udrenert aktiv og passiv skjærstyrke blir ofte estimert ut ifra henholdsvis et aktivt og et passivt treaksialt skjærforsøk på leirprøver. Førstnevnte utføres ved å øke vertikalspenningen, sistnevnte ved å øke horisontalspenningen eller redusere vertikalspenningen. Spenningen i motsatt retning holdes konstant. Typiske spenningsstier for en anisotrop konsolidert leire er vist i Figur 3-2. Aktiv styrke er ofte rundt tre ganger så stor som passiv styrke, mens den direkte skjærstyrken ligger i mellom (9). Sistnevnte blir ofte anslått gjennom direkte skjærforsøk. Resultatene fra skjærforsøkene er sterkt avhengig av blant annet hvor lenge prøven har vært lagret før forsøket ble utført. Det har vist seg at forsøk utført på prøver som har vært lagret lenge, ofte gir resultater som underestimerer den udrenerte styrken noe (3).

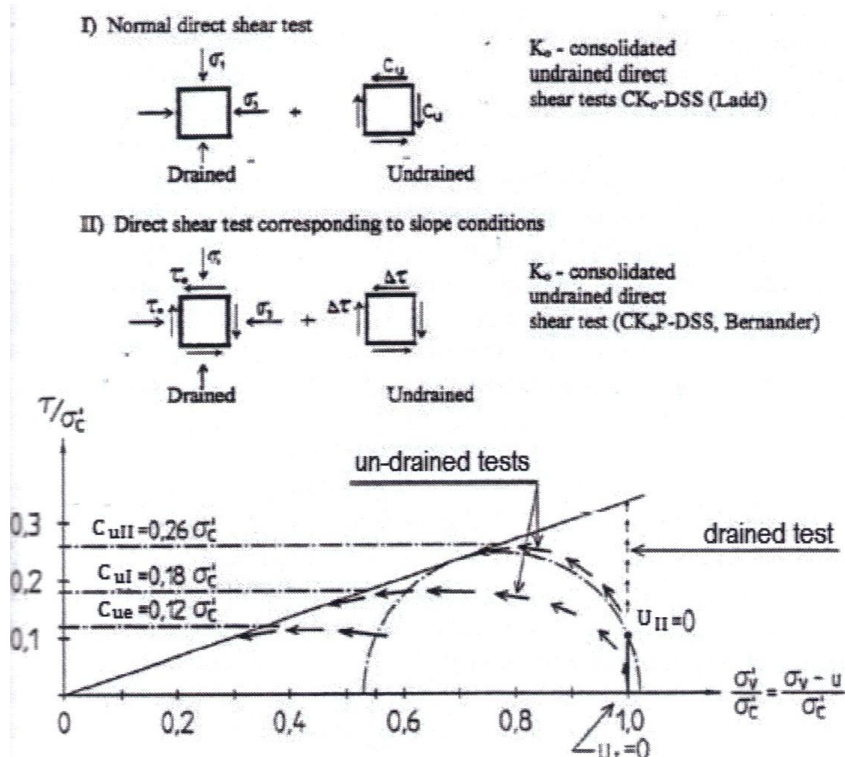


Figur 3-1: Bruk av ulik skjærstyrke i ulike soner langs skjærflaten (10)



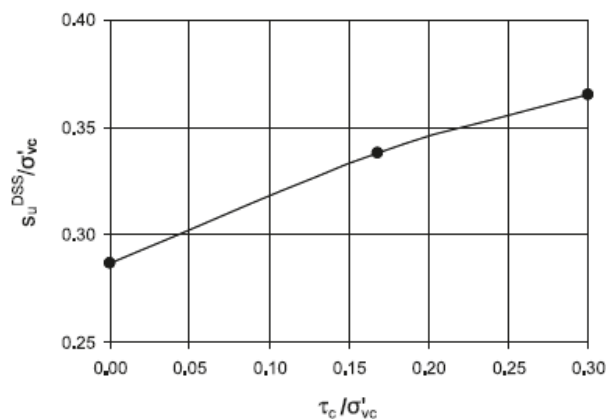
Figur 3-2: aktivt og passivt treaksialt skjærforsøk for anisotrop, udrenert leire (9)

Normalt blir direkte skjærforsøk utført på prøver som først blir konsolidert for vertikal σ_1 og horisontal σ_3 som illustrert i Figur 3-3 punkt I. Dette er en spenningstilstand som tilsvarer forholdende under flatt terreng, men i en skråning vil jorden også være konsolidert for skjærspenninger. Derfor har Bernander også presentert et forsøk der prøven også blir konsolidert for skjærspenninger, som illustrert i Figur 3-3 punkt II (11). Denne prøven hadde i dette tilfellet 44 % høyere udrenert skjærstyrke enn prøven som bare ble konsolidert for normalspenninger (11). Skjærstyrken er ikke bare avhengig av hvilken retning materialet blir belastet, men også av hastigheten lasten blir påført og av progressiv bruddutvikling (8). Det kan bemerkes at den største effektive hovedspenningen er høyere i Figur 3-3 punkt II sammenliknet med punkt I, noe som i en viss grad vil bidra til den store forskjellen som er observert.



Figur 3-3: Sammenlikning av resultat fra et direkte skjærforsøk for én normalt konsolidert prøve og én prøve konsolidert for skjærspenninger (11)

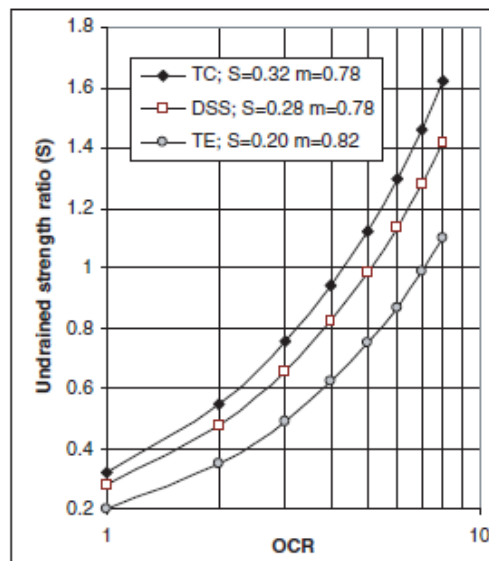
Tilsvarende har Andersen undersøkt variasjonen i den udrenerte skjærstyrken under konsolidering (12). Direkte skjærforsøk ble utført på kvikkleire som var konsolidert for ulike skjærspenninger. Figur 3-4 viser hvordan den direkte udrenerte skjærstyrken økte da prøven ble konsolidert for høyere skjærspenninger. Styrken økte med rundt 30 % når forholdet mellom konsolidert skjærspenning og konsolidert effektiv overlaging økte fra 0 til 0,3. Dersom denne effekten ikke blir tatt hensyn til ved stabilitetsberegninger i skråninger, vil sikkerheten kunne bli kraftig underestimert (12).



Figur 3-4: Direkte udrenert styrke som funksjon av konsolidert skjærspenning for kvikkleire (12)

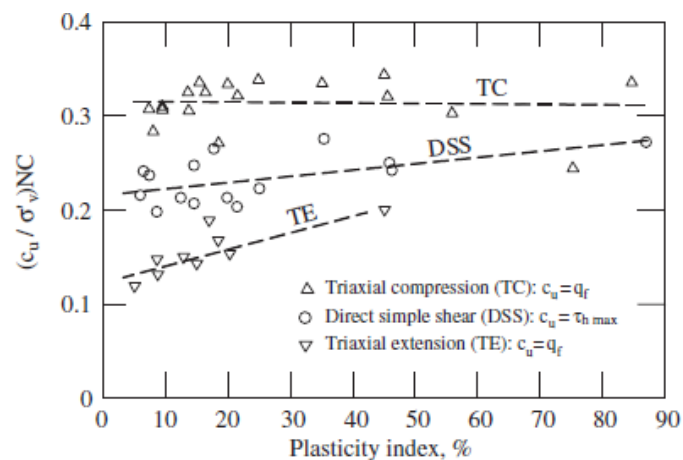
Materialets spenningshistorie vil ha innvirkning på den udrenerte skjærstyrken, da kornstrukturen vil være påvirket av tidligere spennings situasjoner. Figur 3-5 viser at den

udrenerte skjærstyrken øker med grad av overkonsolidering. I forsøket presentert av Jamiolkowski, er denne økningen på over 400 % når overkonsolideringsforholdet OCR øker fra 1 til 8, men er forholdsvis likt for både aktiv, passiv og direkte styrke (13).



Figur 3-5: Aktiv, Passiv og direkte udrenert skjærstyrke plottet mot overkonsolideringsgrad. S er forholdet mellom udrenert skjærstyrke og effektiv vertikal overlaging (14).

Graden av anisotropi minker når plastisiteten i leiren øker, men for magre, sensitive leirer antas anisotropi å spille en stor rolle for materialets egenskaper (10). Figur 3-6 viser forskjellene i udrenert styrke funnet fra aktivt og passivt treaksialt skjærforsøk og fra direkte skjærforsøk, for en normalkonsolidert leire og for ulike plastisitetsindeks. Fra figuren kommer det frem at det for lite plastiske leirer er stor forskjell mellom passiv og aktiv styrke, men forskjellen er betydelig mindre for meget plastiske leirer. For lite plastiske leirer vil utelukkende bruk av aktiv styrke kunne føre til en betydelig overestimering av kapasiteten (13).



Figur 3-6: Udrenert styrke som resultat av aktivt og passivt treaksialt skjærforsøk samt direkte skjærforsøk plottet mot plastisitet (14).

3.2 Materialmodeller

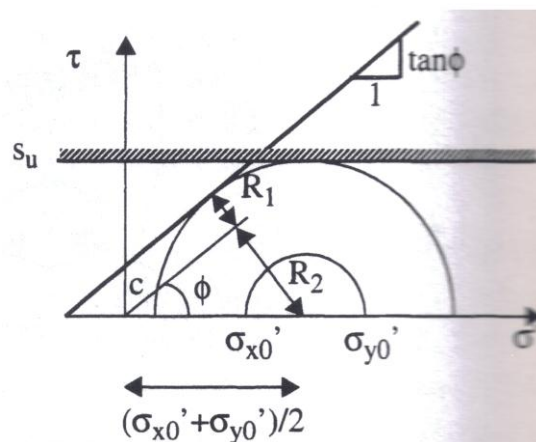
3.2.1 *Isotrop materialmodell: Mohr Coulomb*

Prinsipper fra materialmodellen Mohr Coulomb (MC) vil bli benyttet senere i rapporten, og vesentlige egenskaper ved denne modellen ved udrenert analyse vil derfor bli belyst i dette avsnittet.

Det isotrope MC-kriteriet er illustrert i Figur 3-7. Den innerste sirkelen viser spenningssituasjonen for en gitt initialtilstand. Det antas at kornskjellettet er isotropt elastisk inntil brudd. For udrenerte beregninger vil en lastendring føre til at radiusen i sirkelen endrer størrelse, men senteret lokalisert i $\sigma'_m = 0,5(\sigma'_{x0} + \sigma'_{y0})$ vil forbli konstant. Bakgrunnen for dette, er antagelsen om konstant volum for udrenerte analyser, som fører til at $\Delta\sigma'_x + \Delta\sigma'_y = 0$ i elastiske materialer. Den ytterste sirkelen viser den maksimale spenningstilstanden som det aktuelle punktet kan tåle før det går til brudd, definert vet at spenningssirkelen ikke kan krysse buddtaket. Radiusen i denne sirkelen, $R = R_1 + R_2$, er da gitt ved Likning 3-1, og definerer materialets s_u (9).

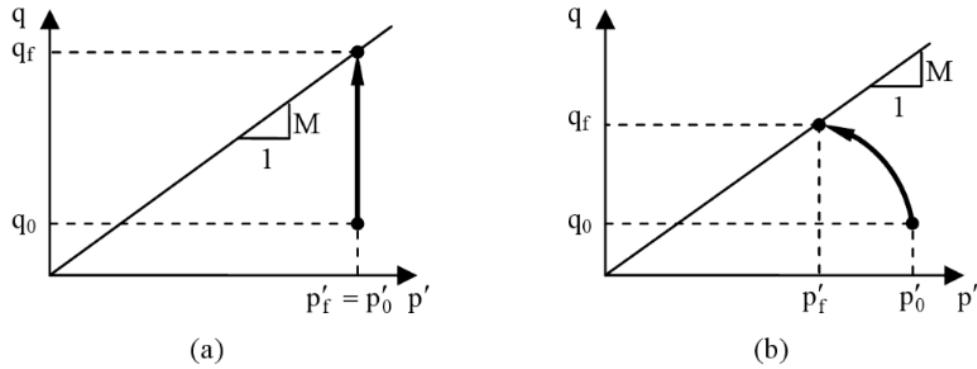
$$R \leq \frac{1}{2} \left[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a) \right] \sin \phi$$

Likning 3-1



Figur 3-7: Mohr Coulomb flytekriterium(9)

Figur 3-8 (b) viser den effektive spenningsstien for en anisotrop konsolidert leire, slik den er forventet å oppføre seg. I virkeligheten vil også skjærspenninger på udrenert materiale førte til en liten volumendring på grunn av dilatans. Figur 3-8 (a) viser hvordan det isotrope spenningskriteriet MC benyttes til teoretisk beregning av spenningsstien, ut ifra at vannet regnes inkompressibelt og ingen volumendring er tillatt. Nøytral dilatans er antatt. Det kommer frem hvordan MC fører til overestimering av kapasiteten i leiren for de fleste normalkonsoliderte leirer (15).

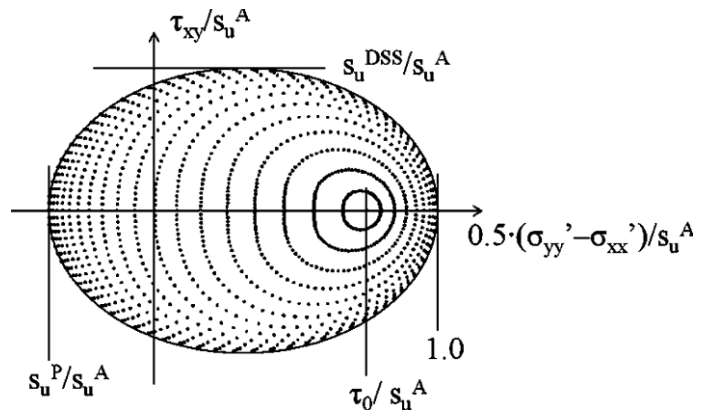


Figur 3-8: Effektive spenningsstier for udrenert analyse. (a) MC og (b) naturlig oppførsel (15).

3.2.2 Anisotrope materialmodeller

NGI-ADP modellen er tenkt benyttet i beregninger hvor udrenert leire blir belastet, og hvor anisotropi vil spille en stor rolle for jordens egenskaper. Modellen tar hensyn til jordens anisotropi ved å gradvis gå over fra å benytte aktiv styrke til å benytte passiv styrke, avhengig av spenningsrotasjonen i jorden. Brukeren må selv gi input som udrenert skjærstyrke og anisotrope flytetøyninger. Bruken av anisotrope jordparametere vil gjøre det lettere for brukeren å benytte seg direkte av testresultatene fra labforsøk. Modellen er forsøkt laget brukervennlig for praktisk ingeniørbruk og tar derfor ikke hensyn til faktorer som skjærindusert poretrykk og oppførsel under syklisk pålasting (3).

Modellen tar utgangspunkt i det isotrope Tresca-kriteriet kombinert med en modifisert von Mises plastisk potensialfunksjon for å avrunde de spisse hjørnene i Tresca-kriteriet, da disse kan skape numeriske problemer. Kriteriet blir anisotrop ved å åpne for bruk av skjærstyrke målt ved aktivt treksforsøk for vertikale spenninger og skjærstyrke målt ved passivt treksforsøk for horisontale spenninger.



Figur 3-9: NGI-ADP flytekriterium for plan tøyning ved spenningsdeviator (3).

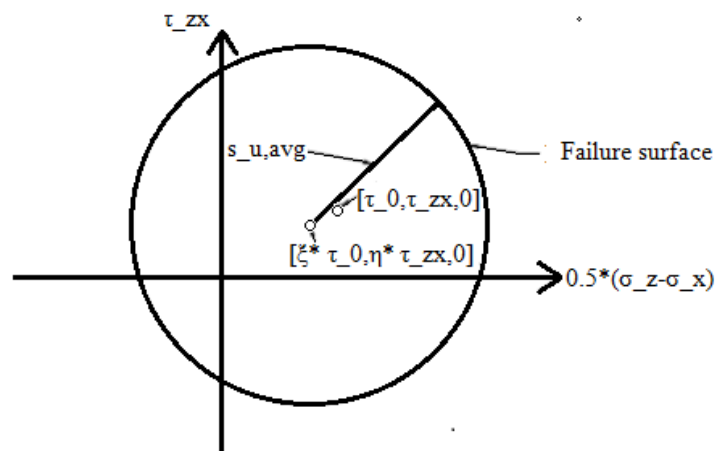
Også en spenningssti-avhengig fastningsparameter blir tilført. Flytekriteriet kan dermed uttrykkes som i Likning 3-2 for plan tøyningstilstand. Ved brudd er fastningsparameteren $\kappa=1$. Flytekriteriet er illustrert i Figur 3-9.

$$F = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{yy} - \sigma_{xx}}{2} - (1 - \kappa)\tau_0 - \kappa \frac{s_u^A - s_u^P}{2}\right)^2 + \left(\tau_{xy} \frac{s_u^A + s_u^P}{2s_u^{DSS}}\right)^2} - \kappa \frac{s_u^A + s_u^P}{2} = 0 \quad \text{Likning 3-2}$$

Som beskrevet i Avsnitt 3.1, vil hovedspenningene rotere langs en kritisk skjærflate i en stabilitetsanalyse. I NGI-ADP modellen antas anisotropien å følge vertikalen ved at største hovedspenning initialt er antatt å være vertikal. Dette er ikke tilfellet for en naturlig skråning, og som tidligere nevnt har blant annet Andersen og Bernander vist at anisotropi på

skjærspenninger spiller en vesentlig rolle for materialets kapasitet. Derfor har Rabstad presentert en utvidet ADP modell, ADPXX, i sin masteroppgave fra NTNU 2011, hvor største hovedspenning kan stå i en vilkårlig retning. De initialt konsoliderte spenningene bestemmer dermed den udrenerte skjærstyrken. Det er også tilført to faktorer, ξ og η , for å justere graden av anisotropi henholdsvis for deviatoriske spenninger og skjærspenninger, slik at modellen kan brukes på et stort spekter av leirer. ξ bør settes til 1 for de fleste situasjoner, mens η vil variere mellom 0 og 1. Flytekriteriet er illustrert i deviatorisk plan i Figur 3-10, og parameterne ξ og η vil flytte sentrum av flytekriteriet henholdsvis i horisontal og vertikal retning. Modellen bruker gjennomsnittlig udrenert skjærstyrke, \bar{s}_u , som inputparameter, og aktiv og passiv udrenert skjærstyrke blir beregnet etter henholdsvis $s_u^A = |\xi \cdot \tau_0 + \bar{s}_u|$ og $s_u^P = |\xi \cdot \tau_0 - \bar{s}_u|$, hvilket kan bety at aktiv skjærstyrke ikke nødvendigvis er større en passiv skjærstyrke. Likning 3-3 uttrykker flytekriteriet benyttet i ADPXX-modellen. $\tau_0 = \frac{\sigma_{y,0} - \sigma_{x,0}}{2}$ og $\tau_{xy,0}$ uttrykker her initiale spenninger (16). Dersom $\xi=1$ og $\eta=0$ vil bruddkriteriet i modellen grovt sett tilsvare den ytterste flyteflaten i NGI-ADP-modellen.

$$F = \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} - \xi \cdot \tau_0\right)^2 + (\tau_{xy} - \eta \cdot \tau_{xy,0})^2} - \kappa \cdot \bar{s}_u = 0 \quad \text{Likning 3-3}$$



Figur 3-10: Bruddkriterium for ADPXX i deviatorisk plan (16). Z-retning representerer her det som i denne rapporten blir omtalt som y-retning.

Før ADPXX-modellen kan benyttes, må initialspenningene beregnes. Disse spenningene er nødvendige inputparametere, og kan ikke beregnes direkte med ADPXX-modellen ettersom modellen kun kan brukes på udrenerte spenningsendringer. I de fleste tilfeller vil «Hardening Soil» (HS) modellen egne seg best til dette formålet (16).

3.3 Initialspenninger i skråninger

Initialspenninger er de spenningene som opptrer i materialet før det blir utsatt for de påkjenningene som skal betraktes. Initialspenningene er dermed de opprinnelige spenningene i materialet, gjerne forårsaket av sedimentering eller andre geologiske prosesser over lang tid. Størrelse og retning på initialspenningene er dermed avhengig av materialets geologiske

forhistorie, inklusive konsekvenser av eroderte eller utraste lag i overlageringen (17). Når dette simuleres med elastisitetsteori, benyttes tverrkontraksjonstallet ν , som gir den elastiske sammenhengen mellom tøyningene i ulike retninger. Denne parameteren er ofte er mye større for pålasting enn for avlasting. Dermed vil også K_0 ha lavere verdier for avlasting enn pålasting. Også andre faktorer, som konsolideringsgrad, vil påvirke de initiale spenningene (9). Forholdet mellom horisontal- og vertikalspenningene i er komplisert og kan vanskelig måles in situ.

Gjennom flere tusen år har løsmassene i Norge blitt utsatt for store spenningsforandringer som resultat av blant annet erosjon og forandringer i grunnvannstand som følge av landheving. Marine leirer ble avsatt i havet etter siste istid og er i liten grad direkte belastet av isen, men andre jordarter kan være sterkt overkonsoliderte som følge av at de ble belastet med store mengder is under istidene (18). For å kunne bestemme størrelse og retninger på dagens spenninger i jorden, er derfor god kunnskap om områdets geologiske historie avgjørende. Ved hjelp av denne informasjonen kombinert med nye grunnundersøkelser kan initialspenningene anslås gjennom numerisk simulering av geologisk utvikling (19).

4 Initialspenninger i Kattmarka

Ettersom ADPXX-modellen, presentert av Rabstad i 2011, har et flytekriterium som avhenger av initialspenningene, er det viktig å ha en realistisk spenningsfordeling som utgangspunkt. Derfor er flere ulike metoder benyttet for å finne initialspenningene i Kattmarka numerisk. Skråningen i Kattmarka er høyt påkjent og har lav sikkerhet mot utrasing. Dette gjør beregninger av initialspenningene spesielt krevende. Bakgrunnsinformasjon som er benyttet i beregningene er vedlagt i Bilag A. I dette kapittelet vil først generell prosjektinformasjon og inputparametere til den opprinnelige ADPXX-modellen, som implementert i Plaxis, bli presentert. Deretter vil endringer i modell eller beregningsmetode med tilhørende resultater legges frem og vurderes fortløpende. Kun endringer som har hatt innvirkning på sluttresultatet vil bli fremlagt og vurdert.

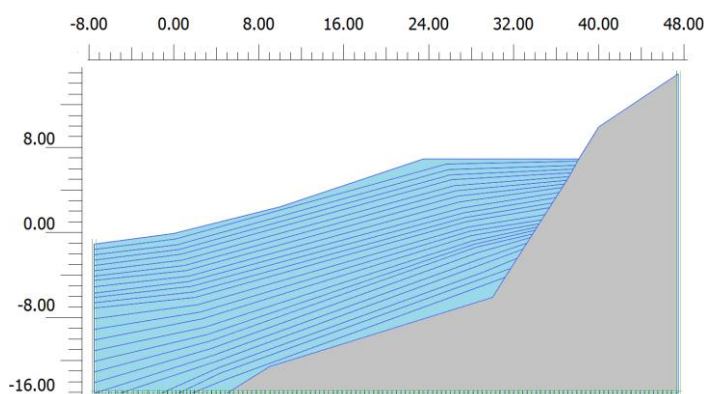
4.1 Input og generell prosjektinformasjon

Generell programinformasjon som gjelder samtlige beregninger i denne rapporten, er presentert i Tabell 4-1 nedenfor.

Tabell 4-1: Generell beregningsinformasjon

Software	Plaxis 2011
Elementtype	Triangulære element med 15 noder
Modelltype	Plan tøyning

Høydeprofilen er hentet fra topografiske kart fra Statens Kartverk, og kontrollert ved sammenlikning med profilene benyttet av undersøkelsesgruppen, se Bilag A for nærmere informasjon (20, 21). Fjellnivå er tatt fra beregningsprofilene til undersøkelsesgruppen. Input-geometri er gitt gjengitt i Figur 4-1.



Figur 4-1: Geometri Kattmarka

Geometrilinjene, som er nødvendige for å gi tilstrekkelig nøyaktig input i ADPXX-modellen, gjør at elementnettet får en strukturert struktur.

MC er benyttet som materialmodell for beregning av initialspenningene i jorden, selv om mer avanserte modeller trolig vil gi en jevnere spenningsfordeling. Dette er fordi MC er en enkel

modell som er lettere å forstå, og dermed er det mulig å gjøre fornuftige justeringer i beregningsmetoden for at resultatene skal tilnærmes virkeligheten. Benyttede materialparametere for jorden er gjengitt i Tabell 4-2, og er utredet på bakgrunn av informasjonen presentert i Bilag A. Fjellet er modellert med Mohr-Coulomb som ikke-porøst media. Høye stivheter er benyttet.

Tabell 4-2: Beregningsparametere for initialspenninger i en skråning i Kattmarka

Parameter	Verdi
φ [°]	26,6
E [kPa]	5000
c'_{ref} [kPa]	5
γ [kN/m ³]	19
ν [-]	0,33
Dreneringstilstand	Drenert

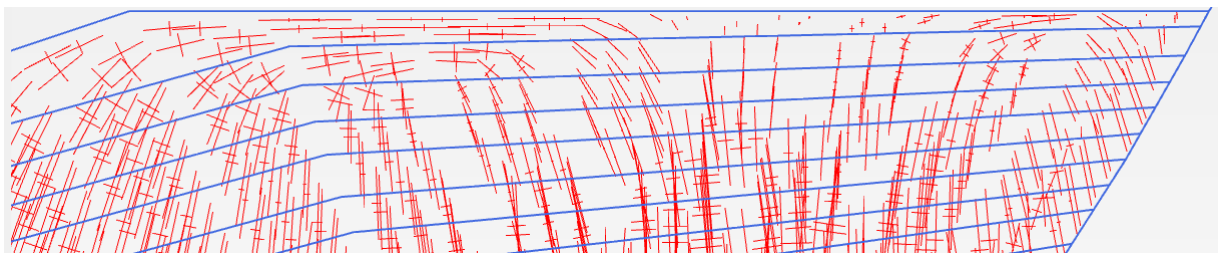
4.2 Initialspenninger

Følgende avsnitt vil fokusere på spenningsfordelingen i overkant av skråningen, da spenningene lenger nede i skråningen skiller lite for de ulike metodene benyttet. Skråningen kan ha store 3D effekter, disse er neglisjert og 2D tilstandene er sammenliknet med hverandre.

4.2.1 Tradisjonell metode, gravitasjonslast

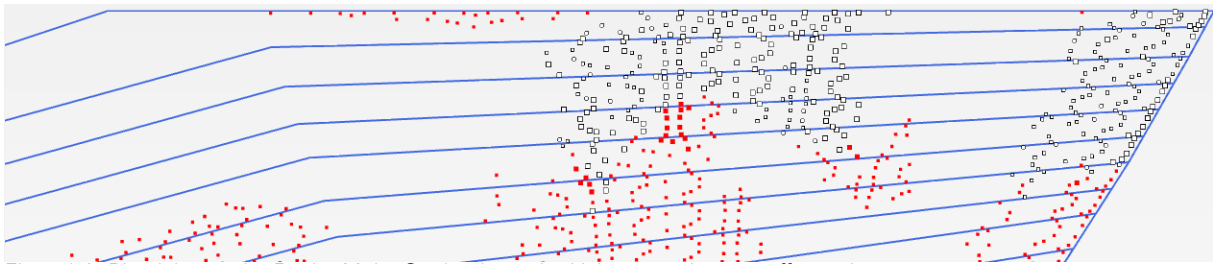
Initialspenningene ble først funnet ved å benytte gravitasjonslastfunksjonen (gravity loading) i Plaxis. Dette er i følge Plaxis-manualen den mest egnede måten å beregne initialspenninger for problemer med ikke-horisontale overflate i Plaxis. Prinsippet er at skråningen gradvis blir tilført sin egen tyngde ved hjelp av gravitasjonskrefter (1).

Figur 4-2 viser et utsnitt av hovedspenningene i øvre del av skråningen under flatt terreng. Spenningsfordelingen er ujevn, spesielt gjelder dette horisontalspenningene. Lengst inn mot fjellet er horisontalspenningene svært lave, men bygger seg opp før de i midten av området med flatt terreng viser $\sigma_h \approx 0$. Videre ut mot skråningstoppen øker horisontalspenningen igjen. Dette fører til at i området nærmest skråningstoppen, er største hovedspenning horisontal, noe som strider mot tidligere presentert teori som sier at under flatt terreng i overkant av en skråning, vil $\sigma_1 = \sigma_v$ og $\sigma_3 = \sigma_h$.



Figur 4-2: Initialspenninger under flatt terreng i Kattmarka, beregnet med tradisjonell metode

Spenningstilstanden nærmest fjellet skyldes at leiren beregningsmessig blir presset ned av sin egen tyngde, mens fjellet er modellert helt stivt. Etersom elementene på hver side av fjellgrensen deler noder, vil jordelementene nærmest fjellet henge igjen langs fjellet. Dette vil til en viss grad gjenspeile virkeligheten, da det er naturlig å anta en viss friksjon mellom fjellet og jorden. Den naturlige friksjonen vil virke langs fjelloverflaten, men nodene sitter fast slik at de også forhindrer deformasjon i andre retninger. Dette fører til unaturlige strekkspenninger i overgangen fra fjell til leire, spesielt i øvre del der deformasjonene er størst. Dette kommer frem i Figur 4-3, som viser punkter som lokalt har nådd brudd for skjær (røde punkter) og strekk (hvite punkter), gitt at materialet ikke kan ta opp noen strekkspenninger. Det andre området som er utsatt for strekk, får sine strekkspenninger på bakgrunn av at materialet vil synke sammen ned mot skråningen.



Figur 4-3: Plastiske punkter. Røde: Mohr-Coulomb punkt, Hvite: «tension cut-off» punkt

Metoden ved å bruke gravitasjonslast er en enkel og rask metode å finne initialspenningene på. Resultatet er derimot ikke alltid like godt, da det er en stor påkjenning for skråningen å bli påført hele tyngden på en gang, og det er kjent at ikke hele skråningen ble avsatt på denne måten. I sin masteroppgave i 2010 viste Mehli at å simulere skråningens geologiske historie gjennom lagvis aktivering av profilet vil gi en jevnere initialspenningstilstand (19). Derfor er initialspenningene funnet på bakgrunn av en simulering av geologisk historie presentert i Avsnitt 4.2.2.

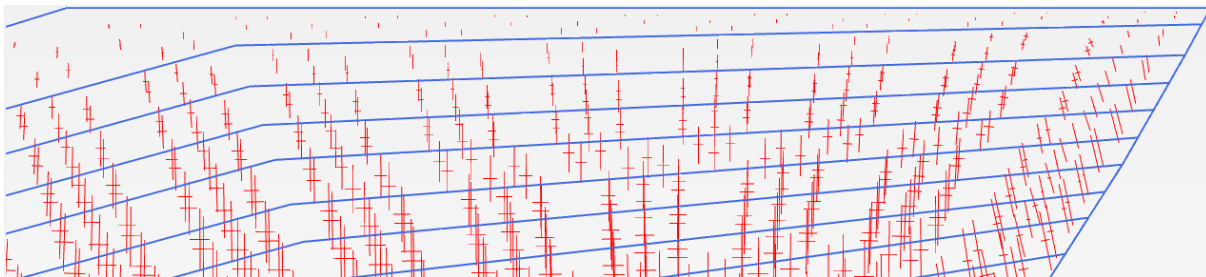
4.2.2 Initialspenninger ved betraktning av geologisk historie

Skråningens geologiske historie er presentert i Bilag A. Skråningen består av dype havavsetninger. Disse ble simulert ved å legge ut materialet lagvis. Det ble benyttet identiske jordparametere for alle lagene. I begynnelsen av sedimenteringsprosessen antas grunnvannet å ha vært cirka 120 meter over dagens nivå. Selve grunnvannstanden har ikke innvirkning på effektivspenningene så lenge hele skråningen er under vann. Heller ikke trykket som oppstår på 120 meters dyp antas å ha hatt videre effekt. Grunnvannet er derfor satt horisontalt til litt over terrengnivå i sedimenteringsprosessen, og senkes til overflaten når skråningen oppnår dagenes geometri. Deformasjoner blir deretter nullstilt.

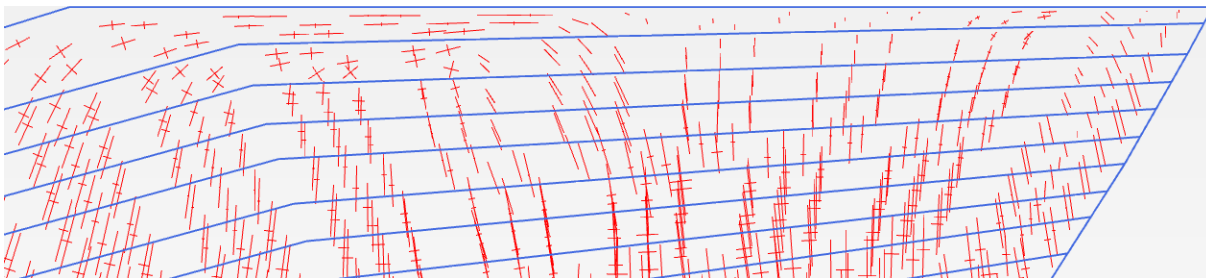
Som beskrevet i Bilag A, er leiren i området lagdelt, og helningen på disse lagene varierer fra 5° i øvre lag til 40° i dypere lag, målt i forhold til horisontalnivå. Denne helningen indikerer hvordan skråningen ble sedimentert. Det er ikke tatt fullt hensyn til dette ved modelleringen, der hele laget ligger i omtrent samme dybde grunnet senere modellering med ADPXX-modellen som krever at hele laget ligger i samme dybde under overflaten for dette tilfellet. Årsaken til dette, er at for å tilpasse den udrenerte styrken etter profilet anslått av

undersøkelsesgruppen, må hvert lag modelleres med konstant udrenert styrke da ADPXX-modellen ikke kan ta inn denne typen styrkeprofil direkte.

Hovedspenningene har tilnærmet lik orientering for begge metodene. Dette gjelder alle lag, også i overgangen mot fjell. En sammenlikning av Figur 4-4 og Figur 4-5 gir et innblikk i utviklingen av spenningene i skråningen. Den førstnevnte figuren viser initialspenningene rett etter at siste lag er sedimentert, og den andre figuren viser spenningene etter at havnivået og dermed grunnvannstanden i nedre del av skråningen er senket til å følge terrengoverflaten. Figurene viser at grunnvannssenkingen på grunn av de tilhørende setningene har stor effekt på spenningsorienteringen, til tross for at det kun er i selve skråningen at grunnvannsnivået er endret. Spenningsfordelingen beregnet i overkant av skråningen, er også jevnere før grunnvannet blir senket.



Figur 4-4: Spenninger før senking av grunnvann



Figur 4-5: Initialspenninger under flatt terreng

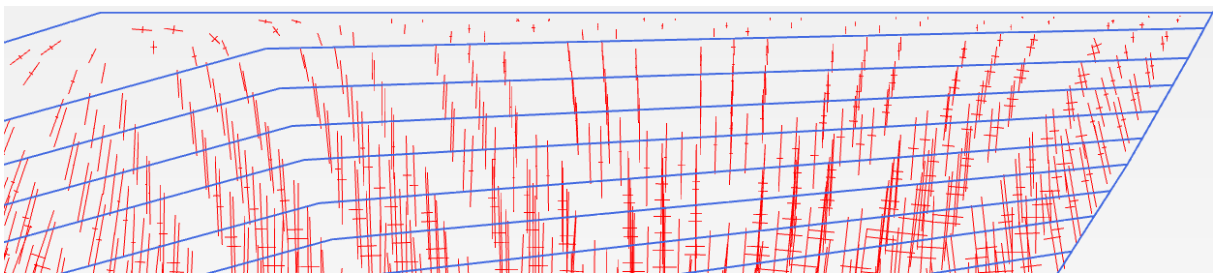
Det er hovedsakelig to årsaker til dette. For det første vil vannet i foten av skråningen ha en stabiliserende effekt som vil forsvinne når grunnvannet senkes. Videre øker effektivspenningene, og materialet vil sette seg. Dermed vil hele skråningen bevege seg mot venstre og synke litt sammen, og også oversiden av skråningen vil bli påvirket. I tillegg påvirkes resultatet av materialmodellen selv. MC er en enkel materialmodell som innebærer forenklinger i relasjon til beregningene. Modellen tar for eksempel ikke hensyn til krep, som i virkeligheten vil ha en utjevne effekt på spenningsfordelingen i skråningen. Dessuten er modellen ikke veldig godt egnet til å behandle avlastningsproblematikk, da denne beregnes rent elastisk. Derfor kan det faktisk være mer hensiktsmessig å ikke gå veien om en høy vannstand som så senkes, ved bruk av MC som materialmodell.

4.2.3 Simulering av geologisk historie uten grunnvannsenking

For å unngå problemer knyttet til avlastning ved bruk av MC, er beregningene også utført uten å senke grunnvannet til slutt, men isteden la grunnvannet følge det øverste pålagte laget til en hver tid. Dette krever imidlertid små endringer i helningen på lagene for å unngå brudd underveis i sedimenteringsprosessen, da de dypeste lagene ikke vil klare å stå med

opprinnelig helning uten støtteeffekten fra vannet. Disse endringene er minimale, og rammer bare de dypeste lagene.

Som vist i Figur 4-6, gir denne metoden en mye jevnere spenningsfordeling i overkant av skråningen enn de tidligere presenterte metodene, men det øverste laget gir fremdeles en del unaturlige spenningsrotasjoner, spesielt nærmest skråningen der største hovedspenning er vertikal. Spenningene langs fjelloverflaten har en naturlig rotasjon, da det er naturlig å anta en viss friksjon mot fjellet. Fra Figur 4-7 kommer det også frem at problematikken med strekkspenninger langs fjellet er unngått. Området med strekkspenninger under flatt terreng er redusert noe fra tidligere beregninger. Disse spenningene kommer som før av at skråningen synker sammen under sedimenteringsprosessen, og mest i selve skråningen. Det er fremdeles et stort område i øvre lag under flatt terreng, der horisontalspenningen er tilnærmet null.

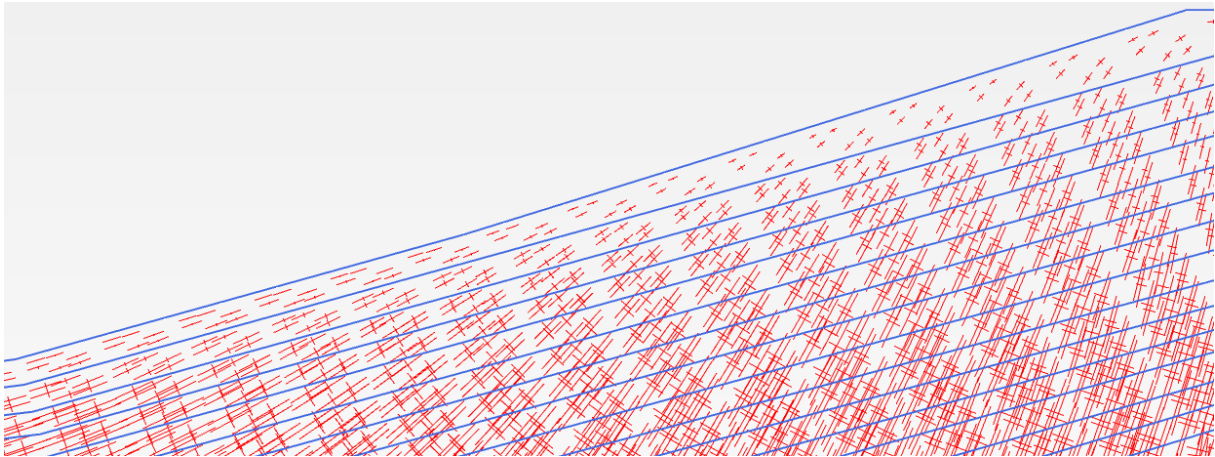


Figur 4-6: Initialspenninger i overkant av skråningen



Figur 4-7: Plastiske punkt. Røde: Mohr-Coulomb punkt. Hvite: «tension cut-off» punkt

Spenningsene under selve skråningen, er vist i Figur 4-8. Spenningsene roterer jevnt fra en tilstand der $\sigma_v = \sigma_1$ og $\sigma_h = \sigma_3$ i toppen av skråningen, til $\sigma_v = \sigma_3$ og $\sigma_h = \sigma_1$ rett utenfor figuren i foten av skråningen. Det er forventet at spenningsene skal rotere, men det er vanskelig å vurdere om rotasjonsvinkelen samsvarer med de som opptrer naturlig.



Figur 4-8: Initialspenninger i selve skråningen

4.3 Diskusjon og konklusjon

Av de utprøvde metodene for å finne initialspenningene, har simulering av geologisk historie uten avlastning vist seg å gi best resultat for den aktuelle skråningen. Dette er mye på grunn av begrensningene i den valgte materialmodellen Mohr-Coulomb, og for andre materialmodeller ville muligens andre metoder gitt et vel så godt resultat.

5 Effekt av $\eta \cdot \tau_{xy0}$ på udrenert styrke i henhold til ADPXX

I sin masteroppgave benyttet Rabstad ADPXX-modellen han hadde implementert, til å regne på en idealskråning. Skråningen ble antatt fullt anisotrop på deviatoriske spenninger. Hensikten var å finne ut hvor mye høyere sikkerhetsfaktor som kunne forventes dersom skråningen også ble beregnet med anisotropi på skjærspenningene, fremfor at skjærspenningene ble regnet isotropt. Resultatet ble en økning av sikkerhetsfaktoren på ca 30 % ved full effekt av anisotropi. Rabstad påpekte imidlertid at ikke alle verdier av η ville være realistisk for skråningen, og anslo at η trolig ville ligge mellom 0,3 og 0,5 for idealskråningen, altså mellom 6,8 % og 15,1 % økning av sikkerhetsfaktoren (16). I dette kapittelet vil resultatene fra en tilsvarende analyse på den naturlige skråningen i Kattmarka bli presentert og diskutert. Hensikten er å finne ut hvor stor økning i sikkerhetsfaktoren som kan forventes for en naturlig skråning dersom det blir tatt hensyn til anisotropi på skjærspenningene. Sikkerhetsfaktoren for Kattmarka er tidligere grundig analysert som følge av raset i 2009, og danner grunnlag for sammenlikning.

5.1 Inputparametere og beregning

For sikkerhetsanalysene, er ADPXX-modellen benyttet for jorden. Fjellet er modellert med MC som under initialspenningsanalysene. Materialparameterne benyttet i ADPXX-modellen er gjengitt i Tabell 5-1 nedenfor. Med utgangspunkt i initialspenningene funnet i Avsnitt 4.2.3, er ADPXX-modellen benyttet til å beregne sikkerheten i skråningen. For å tilpasse styrken etter styrkeprofilen benyttet av undersøkelsesgruppen, se Bilag A, er hvert lag modellert med konstant styrke. Denne er beregnet ut ifra det nevnte styrkeprofilen for den gjennomsnittlige dybden i laget, da det i ADPXX modellen ikke er mulig å definere dette styrkeprofilen direkte. Modellen er som vist i Kapittel 4 modellert med 25 lag, da færre lag enn dette fører til at bruddflaten vil legge seg i grensen mellom to lag fordi forskjellen i den udrenerte styrken mellom lagene blir stor.

Ved bruk av ADPXX-modellen er det viktig å passe på følgende programmeringstekniske detaljer for at modellen skal fungere:

- Varigheten av fasen før materialmodellen aktiveres er satt til én dag
- Buelengdekontrollen (arc length) skal være avslått

Årsaken til dette, er at ADPXX-rutinen er programmert til å hente inn initialspenningene fra den foregående fasen kun hvis tiden i foregående fase er satt til å vare eksakt én dag.

Buelengdekontrollen vil innebære en tilnærming, og kan ende opp med et antall dager som varierer fra 1 på et sent desimal, og følgelig blir ikke initialspenningene lagret.

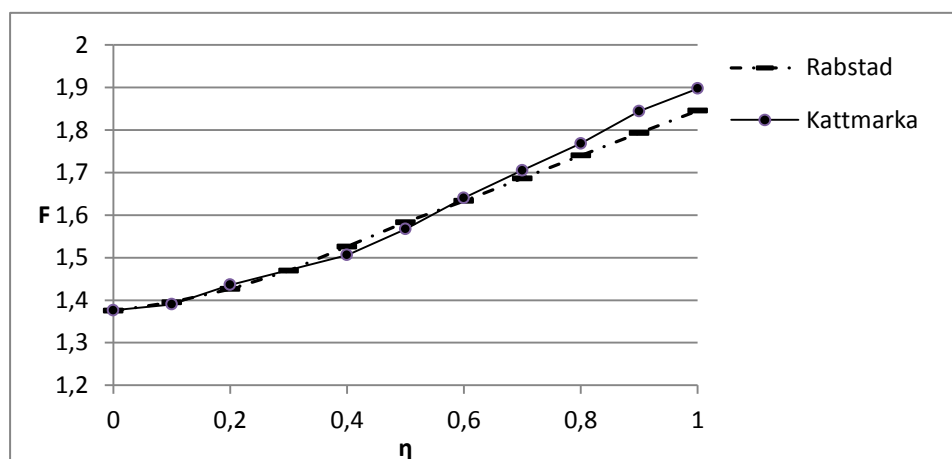
På tilsvarende måte som i Rabstads masteroppgave er ξ satt til 1 mens η varierer fra 0 til 1. På grunn av at alle lagene er modellert med forskjellig udrenert styrke, fører dette til at 275 materialer må defineres, hvilket krever mye arbeid.

Tabell 5-1: Materialparametere for ADPXX-modellen, Kattmarka

Parameter	Grunnlag	Verdi
G [kPa]	$G = \frac{E'}{2(1+\nu')}$	1800
ν [-]	Udrenert	0,495
\bar{s}_u [kPa]	$\bar{s}_u = \frac{1}{2} s_u^A \left(\frac{s_u^A}{s_u^A} + \frac{s_u^P}{s_u^A} \right)$	$0,7 \cdot s_u^A$
$\bar{s}_{u,\min}$ [kPa]	$s_u^A = 15 + 2z$	Variierende, konstant for hvert lag.
$\frac{\bar{s}_u}{ \sigma'_{yy} }$ [-]		-
γ [kN/m ³]		19
ξ		1
η		varierende

5.2 Effekt av $\eta \cdot \tau_{xy}$ på sikkerhetsfaktoren for skråningene

Resultatet fra Kattmarka er plottet sammen med resultater fra idealskråningen i Figur 5-1. For begge skråningene øker sikkerhetsfaktoren med rundt 30 % når η øker fra 0 til 1. Ved lave verdier av η har de to tilfellene tilnærmet lik utvikling, men for høye verdier av η har kurven en noe brattere stigning for Kattmarkaskråningen.



Figur 5-1: Sikkerhetsfaktor (Σ Mweight) som funksjon av η

For å kunne vurdere økningen av sikkerheten, er det viktig å bestemme η nøyaktig, da kurvene viser at en liten variasjon i η vil gi stor forskjell i sikkerhet. Som påpekt i Bilag A, er det kjent at skråningen i Kattmarka har en lav sikkerhet. Resultatene fra beregningene i dette

avsnittet viser derimot at selv med å regne skjærspenningene isotrope, vil skråningen ha en udrenert sikkerhet på $F=1,38$. Dersom også skjærspenningene blir regnet å bidra maksimalt til en økt anisotrop styrke, vil sikkerhetsfaktoren for skråningen bli $F=1,90$. Til sammenlikning utførte undersøkelsesgruppen en udrenert sikkerhetsanalyse etter skredet i Kattmarka, og konkluderte med at skråningen hadde en sikkerhetsfaktor på $F=1.04-1.19$. Analysene var da gjennomført med en annen brukerdefinert ADP-modell. På bakgrunn av dette er det grunn til å tro at η er lav for dette tilfellet, til tross for at leiren er lite til middels plastisk. Også lave verdier for η gir sikkerhetsfaktor noe over forventet. At den udrenerte styrken i ADPXX modellen er konstant innad i hvert lag, kan ha påvirket resultatet noe, men ikke vesentlig.

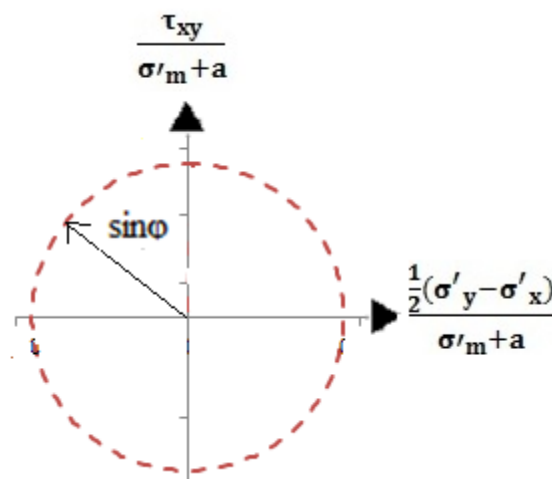
6 Kontroll av udrenert styrke

I Kapittel 4 ble initialspenningene vurdert i forhold til hva som var forventet rotasjon og størrelse. De ble funnet at særlig i de øvre lagene i en skråning, kan simuleringer resultere i lite sannsynlige spenningssituasjoner. Etersom flytekriteriet i ADPXX-modellen er avhengig av initialspenningene, vil de øvre lagene dermed få en urealistisk styrke, noe som resulterer i høye sikkerhetsfaktorer som beskrevet i Kapittel 5. Det er vanskelig å se ut ifra spenningene om den udrenerte styrken vil være realistisk, og problemet kan også gjelde for dypere lag. Forfatteren har derfor utviklet et verktøy i Excel for å vurdere styrken. Prinsippet bak dette verktøyet er utredet i samråd med veileder, og presentert i dette kapittelet. Verktøyet er deretter benyttet for å undersøke om styrken benyttet i ADPXX-modellen er realistisk for Rabstads idealskråning.

6.1 Bakgrunn og prinsipp

Som påpekt i teorien og illustrert i Figur 3-8, vil MC i mange tilfeller overestimere den udrenerte styrken. På bakgrunn av dette, er MC benyttet som en øvre grense for hvor stor styrke som maksimalt kan forventes.

Overført til aksesystemet benyttet i ADPXX-modellen, avgrensner MC-kriteriet et sirkulært område med sentrum i origo, og med radius R som definert i Likning 3-1. Denne størrelsen vil være forskjellig for hvert punkt i modellen, ettersom initialspenningene varierer. Ved å skalere modellen med skaleringsfaktoren $2/((\sigma'_{y0}+a)+(\sigma'_{x0}+a))$, vil MC kriteriet avgrense en sirkel med radius lik $\sin\phi$ for alle punkter, se Figur 6-1. Det antas at MC med gitt attraksjon og friksjon begrenser den udrenerte styrken, slik at flytekriteriet til ADPXX-modellen må ligge innenfor det avgrensede området.

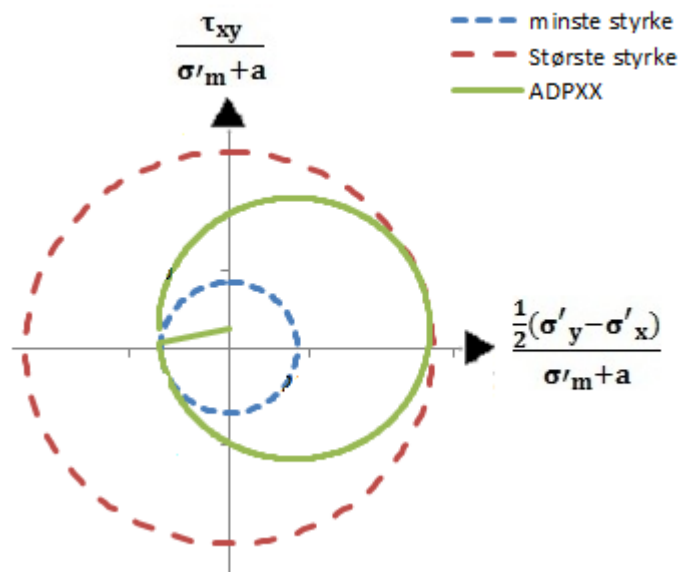


Figur 6-1: Øvre grense for styrken i henhold til MC-kriteriet

En faktor som bør tas hensyn til, er at dersom materialet er belastet i en retning, vil det normalt ikke tåle like mye dersom det blir avlastet for så å bli lastet i en annen retning. Dette er blant annet knyttet til at materialet har dannet en struktur tilpasset de spenningene

materialet er konsolidert for. Derfor er passiv styrke som regel lavere enn aktiv styrke. En initialtilstand som er nære brudd, vil ha lite å gå på i samme retning som den allerede er lastet, men mye å gå på i motsatt retning. Likevel vil styrken i motsatt retning være lavere. Aktiv styrke kan eksempelvis være rundt 3 ganger så stor som passiv styrke (9).

Dette danner grunnlag for å kunne kontrollere styrken i ADPXX-modellen. MC-kriteriet danner en ytre grense for hva som tillates. En indre grense ivaretar materialets styrke dersom belastningen er påført i motsatt retning, og er satt til 1/3 av største tillatte styrke. Dermed må ADPXX-kriteriet ligge mellom disse sirklene definert av Likning 6-1 og Likning 6-2, se Figur 6-2.



Figur 6-2: Prinsipp for kontroll av s_u i ADPXX-modellen.

$$\left(\frac{\frac{1}{2}(\sigma'_y - \sigma'_x)}{\frac{1}{2}[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a)]} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{\frac{1}{2}[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a)]} \right)^2 - \sin^2 \varphi = 0 \quad \text{Likning 6-1}$$

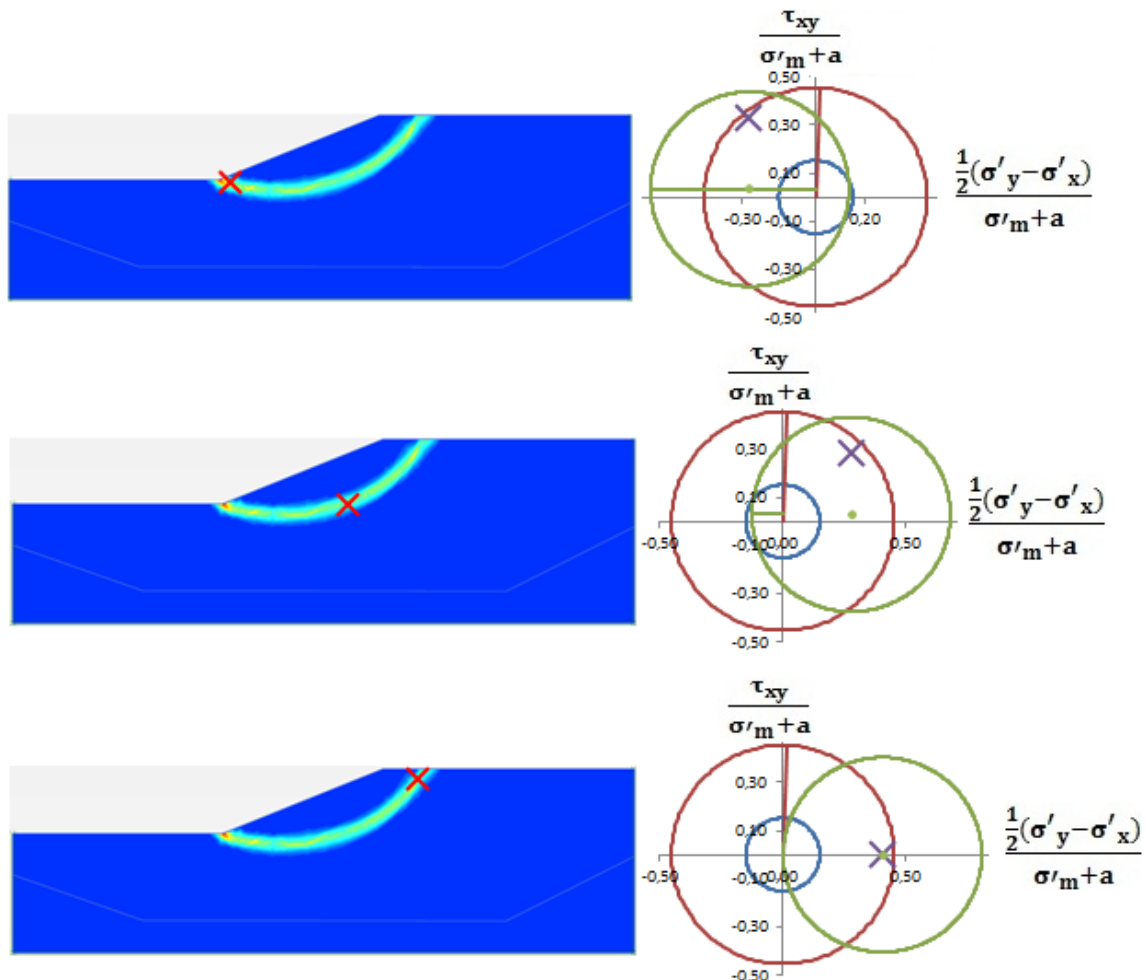
$$\left(\frac{\frac{1}{2}(\sigma'_y - \sigma'_x)}{\frac{1}{2}[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a)]} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{\frac{1}{2}[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a)]} \right)^2 - \left(\frac{1}{3}\right)^2 \sin^2 \varphi = 0 \quad \text{Likning 6-2}$$

6.2 Kontroll av udrenert styrke

Figur 6-3 viser diagrammer for tre ulike punkter langs skjærflaten av Rabstads idealskråning når $\xi=1$ og $\eta=0$. For denne situasjonen fikk Rabstad en sikkerhetsfaktor på 1,375. Til venstre i figuren er plasseringen av det aktuelle punktet avmerket. Høyre del av figuren viser selve kontrollen, som forklart i Avsnitt 6.1. Den grønne sirkelen viser flytekriteriet i ADPXX-modellen, den røde sirkelen avgrensner største tillatte styrke og den blå sirkelen angir minimumsstyrken. At initialspenningen, avmerket med et kryss, ligger ut mot kanten av

sirkelen som angir maksimal styrke, betyr at skråningen er nære brudd allerede i initial tilstand. En lav sikkerhetsfaktor er derfor forventet.

Av figuren kommer det frem at for alle 3 punktene vil deler av det elastiske området i ADPXX-modellen ligge utenfor antatt realistisk område, det vil si at en urealistisk høy styrke blir benyttet. Figuren viser situasjonen når $\xi=1$ og $\eta=0$. Ved å øke η , vil den grønne styrkesirkelen flytte seg vertikalt i retning av initialspenningen. Dette vil for samtlige punkter føre til at en større del av ADPXX-flytekriteriet vil ligge utenfor største lovlig styrke.

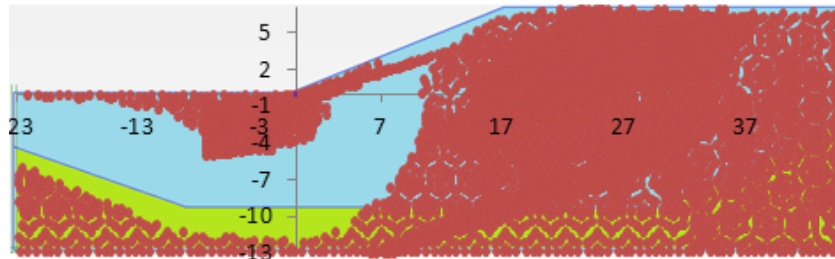


Figur 6-3: Benyttet styrke for 3 ulike punkter langs skjærflaten i Rabstads idealskråning med $\xi=1$ og $\eta=0$

I det nederste eksempelet i Figur 6-3, inkluderer ikke flytekriteriet minimumstyrken. Dersom materialet her blir avlastet slik at $\sigma'_y = \sigma'_x$, vil dette punktet gå til brudd. Det aktuelle punktet ligger grunt i skråningen, og initialspenningene er små. Det skal derfor lite til før denne avlastingen blir en realitet, og det er lite sannsynlig at materialet ikke skal tåle å bli avlastet til en nøytral spenningstilstand.

I Figur 6-4 er alle punkter som vil overskride den største antatt realistiske styrken avmerket for situasjonen $\xi=1$ og $\eta=0$. Problemet med urealistisk høy styrke vil ikke bare oppstå langs den kritiske skjærflaten, men vil være et problem over store deler av skråningen.

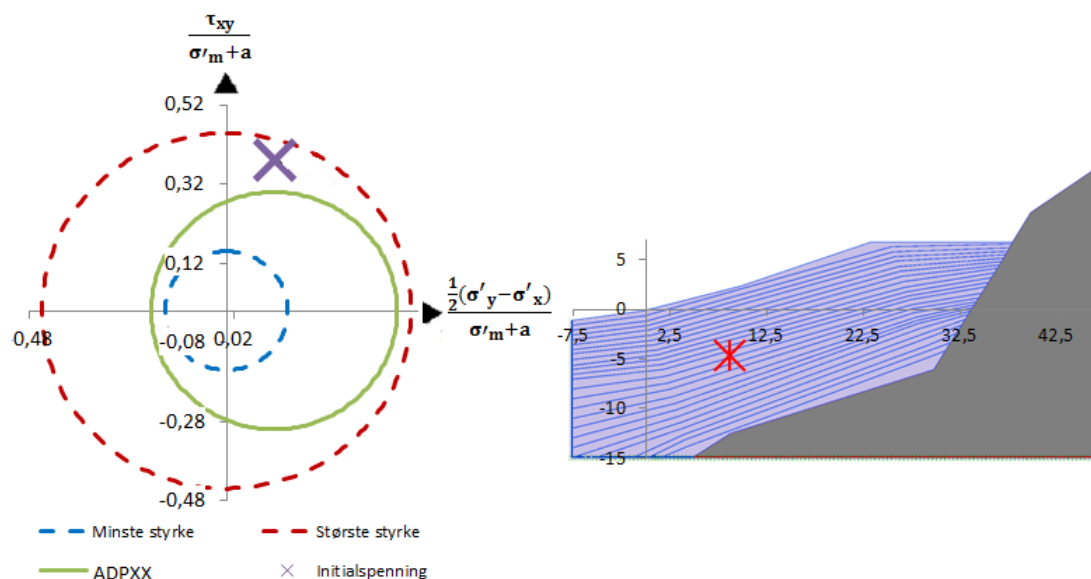
Rabstad konkluderte med at η fra 0,3 til 0,5 ville være realistisk for denne skråningen. Resultatene fra dette kapittelet viser at dette ikke er realistisk så lenge $\xi=1$. Når $\xi=1$ vil selv $\eta=0$ kunne gi for høy sikkerhetsfaktor basert på de tidligere presenterte antagelsene. Prinsippene i ADPXX-modellen fører til at en feilaktig høy styrke blir benyttet. Kun veldig lave verdier av ξ og η vil gi styrke innen forventet område, da punktene ligger nære brudd allerede i initial tilstand.



Figur 6-4: Punkter der styrken i ADPXX-modellen overskrider øvre grense for realistisk styrke, definert av MC bruddkriterium.

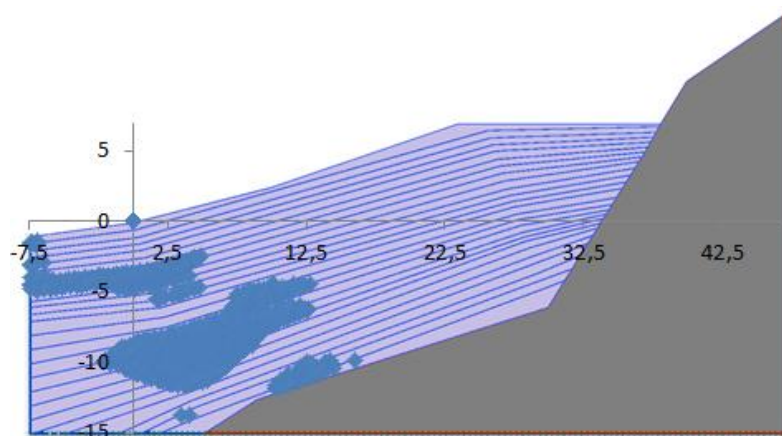
6.3 Kontroll av initialspenningstilstand i forhold til flytekriteriet

En tilsvarende analyse for Kattmarkaskråningen fremhever ytterligere et problem med den opprinnelige ADPXX-modellen. Høye initiale skjærspenninger kan føre til at enkelte punkter ligger utenfor flytekriteriet dersom η er lav, se Figur 6-5. I Bilag F er en tilsvarende analyse utført på en justert versjon av modellen. Denne modellen vil utdypes senere i rapporten, men resultatene fra analysene viser at en uheldig kombinasjon av parametere kan resultere i en initial spenningstilstand som ligger på utsiden av flytekriteriet. Dette er selvsagt umulig, men dersom algoritmen ikke sjekker dette, vil spenningene kunne økte fritt uten å gå til brudd ettersom de aldri vil krysse flaten som tilsvare flytekriteriet. Problemstillingen gjelder gjerne punkter med lav sikkerhet initialt, og den beregnede stabiliteten blir derfor feilaktig høy.



Figur 6-5: Situasjon i Kattmarka der initialspenningstilstanden vil ligge utenfor flytekriteriet for lave verdier av η

Punkter i skråningen hvor dette vil være et aktuelt problem for situasjonen der $\eta=0$ og $\xi=1$, er avmerket i Figur 6-6. Det kan være noen usikkerheter i modellen, da den udrenerte styrken er anslått på bakgrunn av middeldybde innad i laget, og er konstant for hvert lag. Figuren gir likevel en god indikasjon på hvor den aktuelle problemstillingen vil være aktuell. Videre viser eksempelet at det er lett å miste oversikten over hvordan ulike antagelser, formuleringer og algoritmer virker.



Figur 6-6: Punkter i skråningen der flytekriteriet til ADPXX-modellen ikke inkluderer initialspenningene for $\xi=1$ og $\eta=0$.

I sin masteroppgave poengterer Rabstad gjentatte ganger at ADPXX-modellen kan være vanskelig å innføre som materialmodell. For at modellen skal innføres og initialspenningene lagres, må ofte den numeriske kontrollparameteren «tolerert avvik» økes mye fra standard innstillinger. At enkelte punkter har initial spenningstilstand som ligger utenfor flytekriteriet, kan ha bidratt til dette.

6.4 Konklusjon

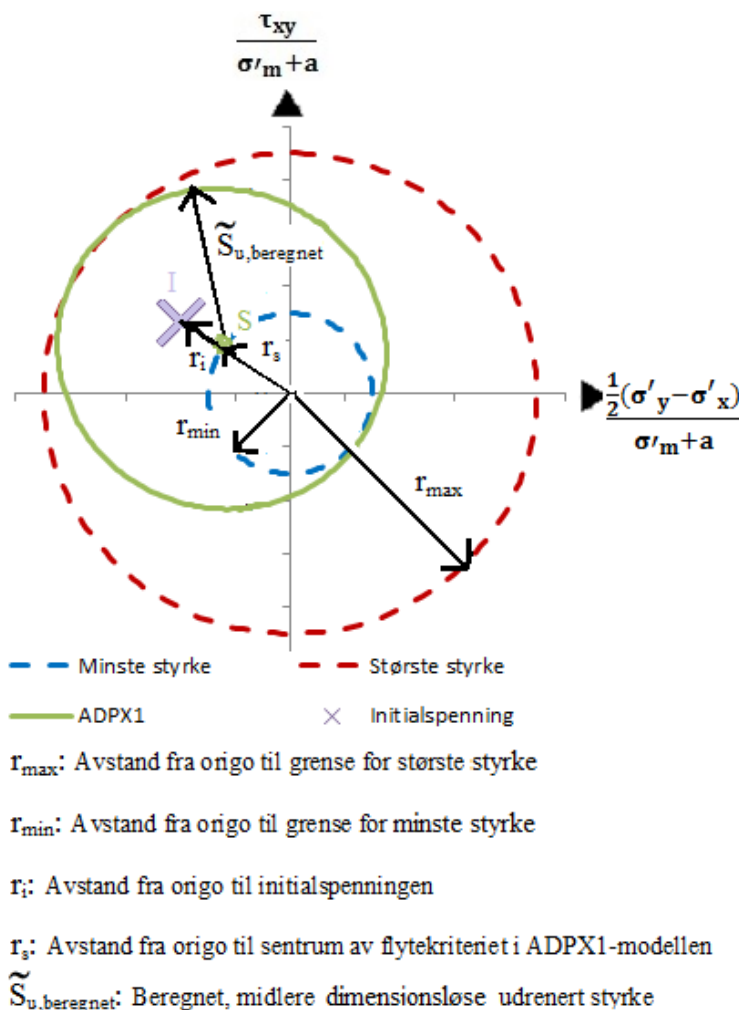
Basert på antagelsene om at styrken ikke kan overskride MC-kriteriet, vil ADPXX-modellen gi urealistisk høy styrke for store deler av skråningene, særlig der skråningen i utgangspunktet antas å ha dårlig sikkerhet initialt. Det er tidligere konkludert med at kun lave verdier av η vil kunne gi realistisk resultat dersom $\xi=1$, men resultatene i dette kapittelet viser at for lave verdier av η vil det kunne oppstå situasjoner der initialspenningstilstanden ikke er innenfor flaten definert av flytekriteriet.

7 Modifisering av ADPXX-modellen

I Kapittel 5 ble det vist at ADPXX-modellen ga sikkerhetsfaktorer over det som kan anses å være realistisk. Deler av årsaken viste seg å være en svakhet i modellen, da modellen kunne gi urealistisk høy styrke, samt at initialspenningstilstanden kunne ligge utenfor flytekriteriet. I dette kapitlet er det foreslått og vurdert flere endringer i modellen som vil holde styrken til et realistisk nivå.

7.1 Prinsipp

De samme prinsippene som ble presentert i Avsnitt 6.1 ligger til grunn; flytekriteriet må kunne nå en maksimalstyrke gitt av bruddkriteriet i MC-modellen for spenninger lastet i samme retning som initialspenningen, og må inkludere en minimumsspenning for spenninger i motsatt retning. For enkelhets skyld er $\xi=\eta$ benyttet. Det vil si at anisotropi på skjærspenninger vil ha en like stor innvirkning på den udrenerte skjærstyrken som det anisotropi på deviatoriske spenninger har.



Figur 7-1: Definisjoner på ulike avstander benyttet til å beskrive ADPX1-modellen

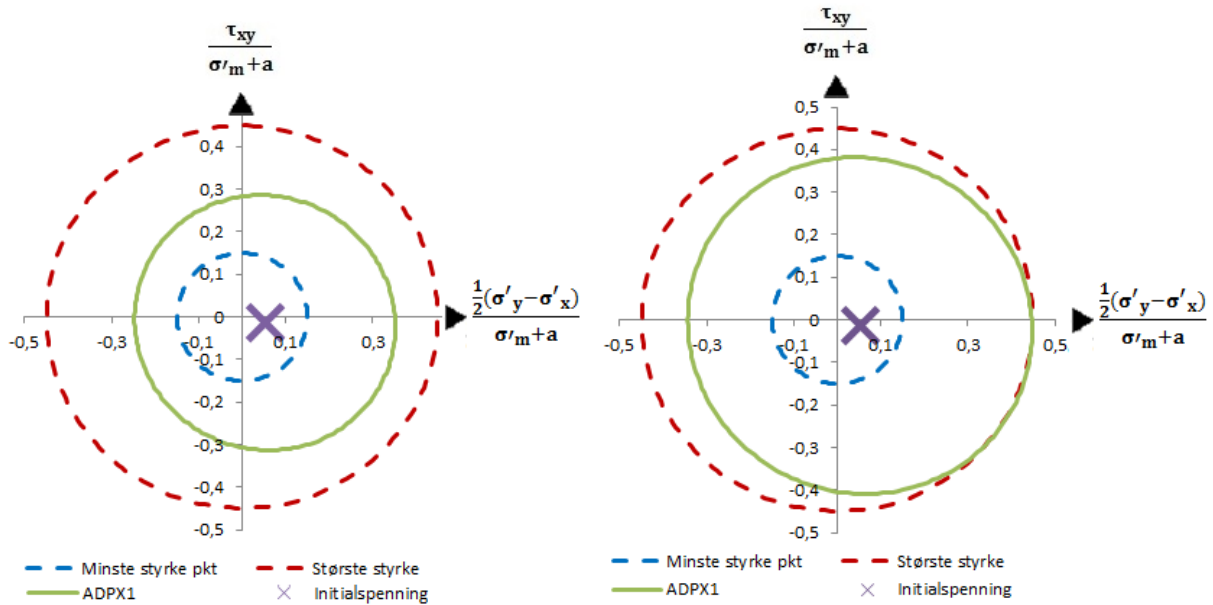
Figur 7-1 illustrerer prinsippene i den modifiserte modellen, og definerer størrelser som vil bli benyttet til å beskrive den modifiserte modellen. Modellen er heretter kalt ADPX1 for å kunne skille mellom modellen før og etter endringene, til tross for at det i utgangspunktet er den samme modellen. Figuren definerer også størrelser som vil bli benyttet for å utlede likningene som beskriver kriteriet. Flytekriteriet for en gitt initialtilstand er i figuren tegnet i det dimensjonsløse $0,5 * (\sigma'_y - \sigma'_x) / (\sigma'_m + a) - \tau_{xy} / (\sigma'_m + a)$ -planet, der σ'_m er midlere spenning av σ'_x og σ'_y . For at flytekriteriet, illustrert med en grønn, heltrukket sirkel, alltid skal kunne nå en maksimal styrke i samme retning som initialspenningen, og også skal inkludere en minimumstyrke, må både radiusen og posisjonen av senteret til sirkelen være gitt.

Modellen tar utgangspunkt i at for tilstrekkelig anisotrope initialspenninger, vil flytekriteriet akkurat inkludere den passive styrken, definert ved r_{\min} . I retning av initialspenningen, skal også sirkelen nå ut til den aktive styrken, r_{\max} . Ut ifra disse betingelsene vil sentrum av sirkelen være lokalisert i en avstand $r_s = r_{s,\max} = 0,5(r_{\max} - r_{\min})$ fra origo, langs en linje som går fra origo og gjennom initialspenningen. Sirkelsenteret vil ikke kunne ligge lenger fra origo enn denne avstanden.

Sirkelsenteret kan heller ikke være posisjonert lenger unna origo enn initialspenningen. Dette ville gitt en innvirkning av anisotropi som overgår spenningene punktet er konsolidert for. For lite anisotrope spenninger, vil r_s begrenses av r_i , og vil dermed være mindre enn $r_{s,\max}$.

For alle initialspenningstilstander, skal flytekriteriet kunne nå opp til r_{\max} i retning av initialspenningstilstanden. Dersom $r_s < r_{s,\max}$, vil $\tilde{s}_{u,\text{beregnet}}$ måtte være høyere for å fortsatt nå ut til r_{\max} . Dette vil samtidig føre til spenninger som ligger utenfor r_{\min} i motsatt retning vil kunne ligge innenfor kriteriet, se Figur 7-2. Dette gir mening, fordi punktet kun er konsolidert for lite anisotrope spenninger, og derfor vil tåle tilnærmet like mye i alle retninger. For en helt isotropt konsolidert initialspenning, vil sirkelen ha sentrum i origo, og $\tilde{s}_{u,\text{beregnet}} = r_{\max}$, altså likt MC-kriteriet. $\tilde{s}_{u,\text{beregnet}}$ er dermed som gitt i Likning 7-1, hvor $B = r_{\max}/r_{\min}$.

$$\tilde{s}_{u,\text{beregnet}} = \text{MAKS} \left\{ \begin{array}{l} r_{\max} - r_i = \sin \varphi - r_i \\ \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2} = \frac{r_{\max}}{2} \left(1 + \frac{1}{B} \right) = \frac{\sin \varphi}{2} \left(1 + \frac{1}{B} \right) \end{array} \right\} \quad \text{Likning 7-1}$$

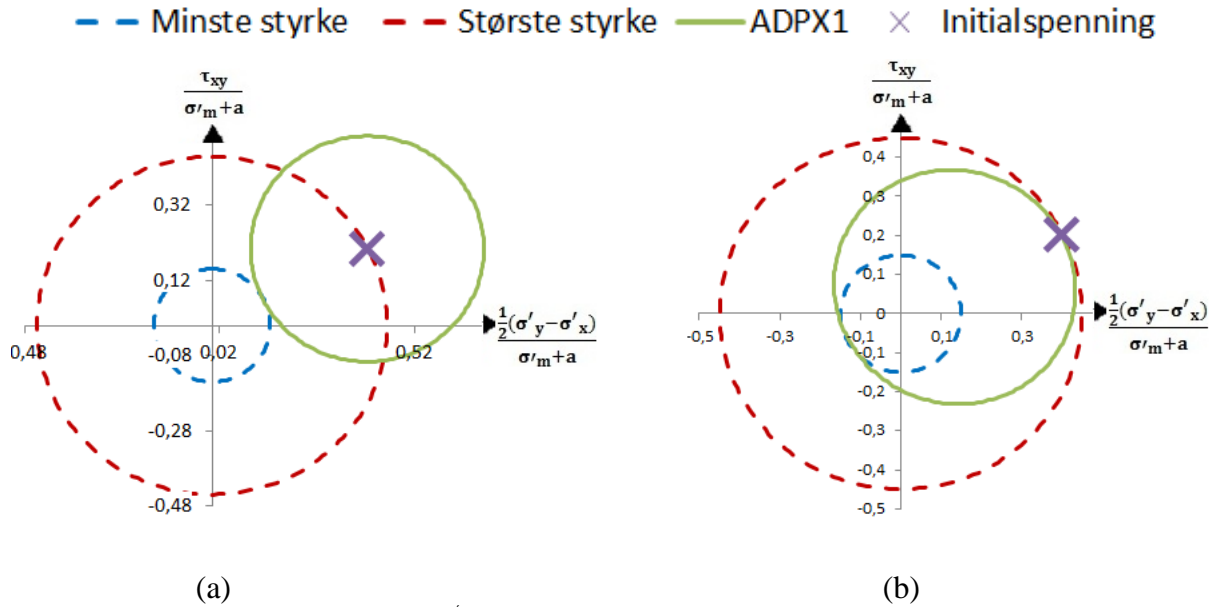


Figur 7-2: ADPX1-kriteriet for en svakt anisotrop initialspenningstilstand (til høyre). Dersom radiusen i flytekriteriet var som for sterkt anisotrope spenningstilstander, ville situasjonen vært som til venstre, hvilket ville gitt for lav styrke. Derfor vil denne radiusen øke i ADPX1-modellen, slik at kriteriet alltid når ut til MC-kriteriet, som vist til høyre.

Parameteren ξ benyttes i ADPX1 som anisotropifaktor på samme måte som i ADPXX-modellen. Ved å sette $\xi=\eta$, vil dermed $r_s = \xi \cdot r_i$. Ettersom r_s er gitt for en initialspenningstilstand, vil ξ også være bestemt ut ifra denne spenningstilstanden, og må beregnes for hvert enkelt punkt i modellen etter Likning 7-2. Dette utgjør en stor forskjell fra ADPXX-modellen, der ξ er en inputparameter og er konstant innad i materialet.

$$\xi = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{r_{\max} - \tilde{s}_{u,\text{beregnet}}}{r_i} = \frac{\sin \varphi - \tilde{s}_{u,\text{beregnet}}}{r_i} \leq 1 & \text{for } r_i \neq 0 \\ 0 & \text{for } r_i = 0 \end{array} \right\} \quad \text{Likning 7-2}$$

Figur 7-3 (a) viser flytekriteriet til ADPXX-modellen for en gitt initialspenningstilstand og $\xi=\eta=1$, mens Figur 7-3 (b) viser flytekriteriet til ADPX1-modellen for den samme initialspenningstilstanden. Her kommer det godt frem hvordan ADPX1-modellen kontrollerer styrken til å ligge innenfor MC-kriteriet, mens ADPXX-kriteriet i større grad er sentrert om initialspenningen.



Figur 7-3: (a) Prinsipp ADPXX-modellen for $\xi=\eta=1$. (b) Prinsipp ADPX1-modellen.

For å kunne utføre endringene i programkoden som blir benyttet i Plaxis, er samtlige likninger skalert opp til det opprinnelige $0,5(\sigma'_y - \sigma'_x) - \tau_{xy}$ -planet ved å multiplisere med faktoren $(\sigma'_m + a)$. Dermed blir flytekriteriet sendt ut som før, gitt av Likning 7-3, men hvor $\xi=\eta$ og \bar{s}_u er beregnede verdier fremfor inputverdier gitt i henholdsvis Likning 7-4 og Likning 7-5

$$F = \sqrt{\left(\frac{\sigma'_y - \sigma'_x}{2} - \xi \cdot \frac{\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}}{2}\right)^2 + (\tau_{xy} - \eta \cdot \tau_{xy,0})^2} - \bar{s}_u = 0 \quad \text{Likning 7-3}$$

$$\xi = \eta = \frac{\frac{1}{4} \sin \varphi \left(1 - \frac{1}{B}\right) [(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a)]}{\sqrt{\left(\frac{\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}}{2}\right)^2 + \tau_{xy,0}^2}} \leq 1 \quad \text{Likning 7-4}$$

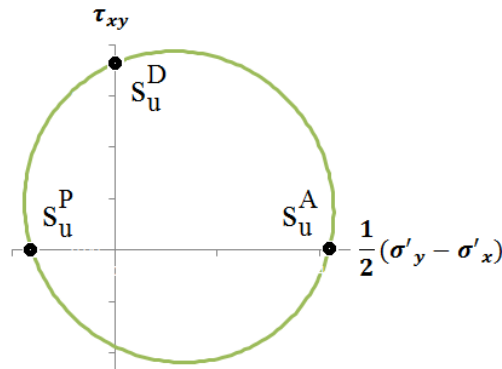
$$\bar{s}_u = s_{u, \text{beregnet}} = \text{MAKS} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \sin \varphi [(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a)] - \sqrt{\left(\frac{\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}}{2}\right)^2 + \tau_{xy,0}^2} \\ \frac{\sin \varphi}{4} \left(1 + \frac{1}{B}\right) [(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a)] \end{array} \right\} \quad \text{Likning 7-5}$$

\bar{s}_u blir dermed beregnet ut ifra initialspenningene samt de effektive styrkeparameterne φ og a , og angir styrken mellom kornene i kornskjelettet. Modellen regner stivhet og styrke med effektive egenskaper. Materialmodellen er likevel en ren udrenert materialmodell.

For situasjoner der de kartesiske spenningene øker proporsjonalt, vil modellen gi samme resultat som MC. Dersom en ytre påkjenning blir påført i form av lokal last, grunnvanssenking, utgraving eller liknende, vil spenningene rotere i forhold til

initialtilstanden. I slike tilfeller vil effekten av anisotropi få en vesentlig rolle, og modellen vil dermed gi lavere kapasitet enn tilsvarende beregninger med MC.

Aktiv, passiv og direkte udrenert skjærstyrke i ADPX1-modellen er vist i Figur 7-4. Uttrykkene er gitt i Likning 7-6-Likning 7-8, og angir flytekriteriets skjæringspunkter med aksene.



Figur 7-4: Aktiv, direkte og passiv udrenert skjærstyrke i ADPX1-modellen.

$$s_u^A = \xi \frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}) + \sqrt{\bar{s}_u^2 - (\xi \tau_{xy0})^2} \quad \text{Likning 7-6}$$

$$s_u^P = \xi \frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}) - \sqrt{\bar{s}_u^2 - (\xi \tau_{xy0})^2} \quad \text{Likning 7-7}$$

$$s_u^D = \sqrt{\bar{s}_u^2 - \left(\xi \frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}) \right)^2} + \xi \tau_{xy0} \quad \text{Likning 7-8}$$

Endringene i modellen er oppsummert i Tabell 7-1 og ført inn i Fortrankoden. De delene av koden som har blitt endret er lagt ved i Bilag H. Enkle beregninger er gjennomført for å bekrefte at modellen virker, men de er ikke presentert i denne rapporten. Oversikt over resulterende tilstandsparametere som kan vises som output i Plaxis er vist i Bilag G.

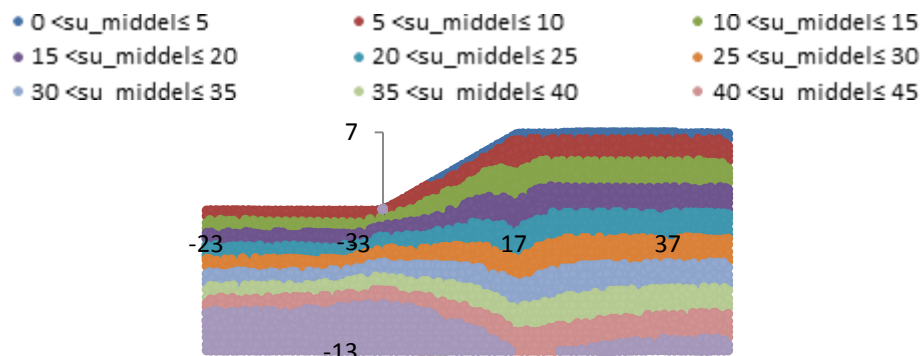
Tabell 7-1: Foreslåtte endringer i ADPXX-modellen

ADPXX	ADPX1
ξ og η er inputparametere og er konstant innad i materialet. ξ og η varierer mellom 0 og 1. ξ er som regel lik 1.	$\xi = \eta$ blir regnet ut for hvert enkelt punkt i modellen, og er bestemt slik at styrken alltid inkluderer en minimumstyrke og ikke overgår en maksimumstyrke.
s_u er en inputparameter, og kan være konstant gjennom hele laget, eller øke lineært med initiale effektive vertikalspenninger.	s_u blir beregnet for hvert enkelt punkt i modellen, og er bestemt slik at styrken alltid inkluderer en minimumstyrke og ikke overgår en maksimumstyrke.
Effektiv attraksjon og friksjonsvinkel behøves ikke i ADPXX-modellen, men for å finne initialspenningene ved hjelp av MC- eller HS-modellen.	Effektiv attraksjon og friksjonsvinkel er inputparameter for å beregne udrenert styrke i ADPXX-modellen.

7.2 Vurdering av udrenert styrke

7.2.1 Rabstads idealskråning

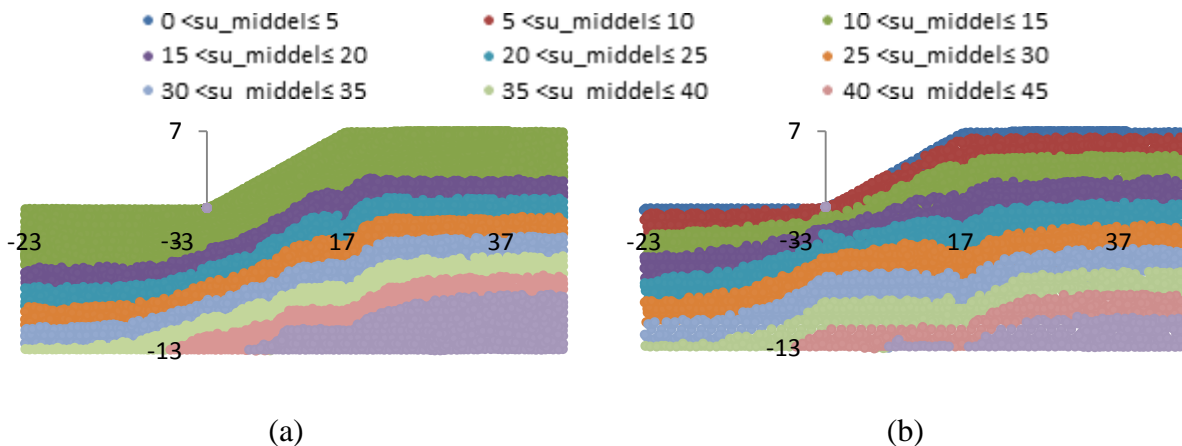
En av de største konsekvensene med modifikasjonen av modellen, er at den udrenerte styrken ikke lenger blir betegnet som en input, men blir beregnet ut ifra initialspenningene. Den beregnede udrenerte styrken bør likevel kunne relateres til målt styrke. Rabstad brukte en udrenert styrke på $\bar{s}_u = \text{Maks}(15; 0, 28 \cdot \sigma'_{y0})$ for sin idealskråning, mens den beregnede styrken, $\bar{s}_{u, \text{beregnet}}$, er beregnet ut i fra det modifiserte kriteriet bestemt av Likning 7-5. En faktor $B=3$ er benyttet. Begge uttrykkene er avhengig initiale effektive vertikalspenninger, men $\bar{s}_{u, \text{beregnet}}$ er også avhengig av den initiale effektive horisontalspenningen i punktet. $\bar{s}_{u, \text{beregnet}}$ er vist i Figur 7-5.



Figur 7-5: Beregnet midlere udrenert styrke i Rabstads idealskråning

Figur 7-5 (b) viser at den beregnede styrken øker raskere med dybden under flatt terreng nedenfor skråningen enn under flatt terreng ovenfor skråningen. Dette er ikke naturlig, og skyldes at randen kommer litt for nære skråningen, og området nedenfor skråningen blir utsatt for trykkspenninger som har innvirkning på $\bar{s}_{u, \text{beregnet}}$. Derfor er initialspenningene også

funnet etter å ha utvidet modellen til venstre, slik at modellen strekker seg til $x=-50$ meter. $\overline{s_{u,beregnet}}$ for denne situasjonen er vist i Figur 7-6 (b), men bare det originale området er plottet. Som vist øker dermed $\overline{s_{u,beregnet}}$ med dybden i tilnærmet samme takt både ovenfor og nedenfor skråningen.



Figur 7-6: Rabstads idealskråning: (a) benyttet midlere udrenert styrke, (b) beregnet midlere udrenert styrke for utvidet modell

Figur 7-6 viser at det er relativt god sammenheng mellom $\overline{s_u}$ og $\overline{s_{u,beregnet}}$. Hovedforskjellen er at Rabstad har valgt å bruke 15 kPa som en minimumsstyrke, mens $\overline{s_{u,beregnet}}$ kan være lavere enn dette. Dersom denne minimumsstyrken er ønsket, kan grunne lag regnes med en høy attraksjon høy attraksjon. Under selve skråningen varierer $\overline{s_{u,beregnet}}$ noe fra $\overline{s_u}$ grunnet at førstnevnte også tar hensyn til horisontale effektive spenninger. Forskjellene er ikke store.

7.2.2 Aktiv, direkte og passiv udrenert styrke for skråningen i Kattmarka

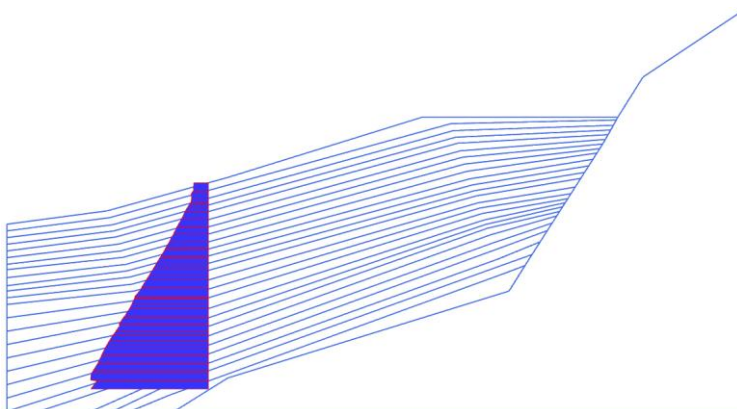
Den aktive, passive og direkte udrenerte skjærstyrken i henhold til Figur 7-4 er vurdert for skråningen i Kattmarka. Materialparameterne benyttet er som ved beregning av initialspenningene, og gitt i Tabell 4-2. I tillegg er $B=3$ benyttet for beregningene.

Oversikt over beregnet s_u^A , er vist i Bilag B. Det samme er forholdene s_u^P / s_u^A og s_u^D / s_u^A . Som det kommer frem av figurene, varierer de nevnte forholdene i skråningen, men er tilnærmet konstante under det flate partiet i overkant av skråningen. Her er $s_u^P / s_u^A = 0,34$ og $s_u^D / s_u^A = 0,55$, med unntak av i øvre lag der $\xi=1$.

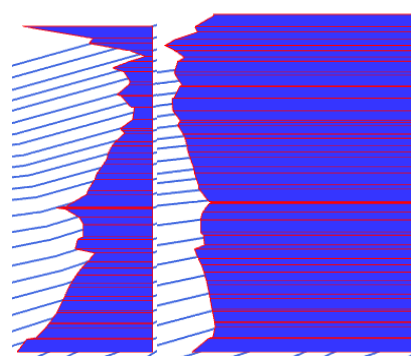
For å kunne vurdere om dette er realistiske verdier, er den beregnede udrenerte styrken sammenliknet med prøveresultatene fra Kattmarka. Prøvene er tatt fra et punkt i fjæra, men ettersom resultatene i beregningene er forstyrret av randen i nedre del, er et profil som vist i Figur 7-7 benyttet til sammenlikningen. Figuren viser hvordan s_u^A har en konstant verdi på 5,5 kPa de første 1,2 meterne, for så å øke tilnærmet lineært med dybden. Fra figuren kan s_u^A

anslås til å være $s_u^A \approx 5,5 + 3,1 \cdot d$. Undersøkellesgruppen etter skredet i Kattmarka anslo til sammenlikning $s_u^A = 15 + 2 \cdot d$, hvilket gir en høyere udrenert styrke gjennom nesten hele profilet enn det som er beregnet, se Figur 7-10. I figuren er også den udrenerte aktive styrken plottet for $B=2$. En reduksjon i faktoren B gir som vist en økt styrke, men det vil også føre til mindre effekt av anisotropi, da den minste styrken som må inkluderes (blå, stiplet linje i Figur 7-1) vil bli større. Den beregnede styrken er generelt lavere enn hva resultatene fra grunnundersøkelsene tilsier i grunne lag, men passer noe bedre med dybden.

Forholdet s_u^P / s_u^A varierer mye i snittet, fra 0 til 0,32. Tendensen er at forholdet øker tilnærmet lineært med dybden gjennom dette snittet, med unntak av i øvre deler. Forholdet s_u^D / s_u^A holder seg mer konstant rundt 0,5 i dette tilfellet. Begge forholdene er vist i Figur 7-8 for det aktuelle snittet. På bakgrunn av treksforsøk og direkte skjærforsøk, anslo undersøkelsesgruppen forholdene $s_u^P / s_u^A = 0,33$ og $s_u^D / s_u^A = 0,69$. Beregningene samsvarer godt med førstnevnte forhold, men gir noe for lave verdier for sistnevnte.

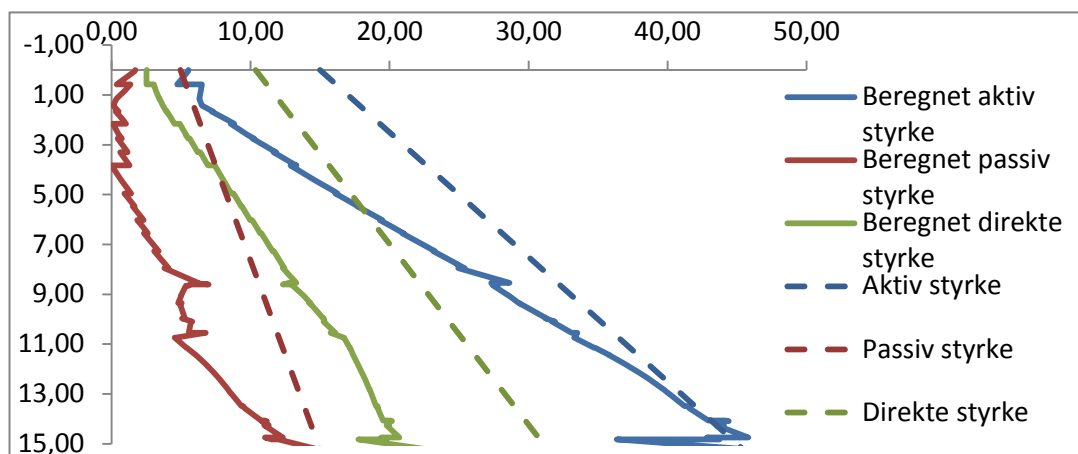


Figur 7-7: Aktiv udrenert styrke med dybden langs et snitt i nedre del av skråningen i Kattmarka



Figur 7-8: Forhold passiv/aktiv styrke og direkte/aktiv styrke langs et snitt i nedre del av skråningen i Kattmarka

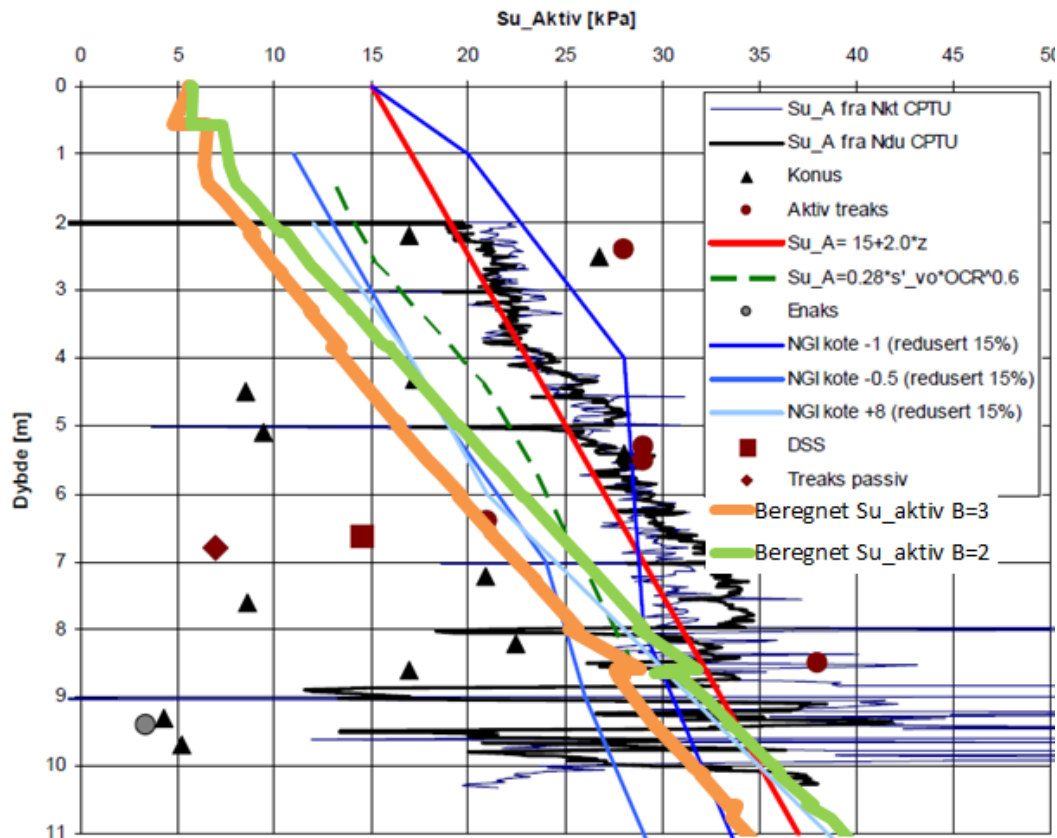
Figur 7-9 viser beregnet aktiv, passiv og direkte styrke, samt tilsvarende styrker etter tilpasningen på bakgrunn av grunnundersøkelsene. Den beregnede aktive udrenerte styrken gjennom snittet vist i Figur 7-7 er også plottet mot verdier fra grunnundersøkelsene i etterkant av skredet, og vist i Figur 7-10.



Figur 7-9: Beregnet aktiv, passiv og direkte udrenert styrke plottet mot tilsvarende styrker anslått av undersøkelsesgruppen etter skredet i Kattmarka.

Dette kan delvis forklares med at aktiv, direkte og passiv udrenert styrke i ADPX1-modellen ikke er definert der den udrenerte styrken er på sitt største, men der flytekriteriet skjærer aksesystemet, se Figur 7-4. Dette er en konservativ definisjon. I tilfeller hvor den initiale skjærspenningen er 0, altså som normalt under flatt terreng, vil sirkelen skjære vannrett akse på sitt «bredeste», s_u^A og s_u^P vil angi største aktiv og passiv udrenert styrke. Dersom den initiale skjærspenningen er stor, vil derimot s_u^A og s_u^P defineres der sirkelen ikke er på sitt «bredeste». Det er derfor forventet at den aktive styrken kan ligge noe under målte verdier, og resultatet i Figur 7-10 er derfor vurdert til å ligge innenfor akseptabelt område. Det kunne likevel vært hensiktsmessig å innføre et tørrskorpelag med høy attraksjon i de øverste lagene for å øke styrken. Grunnundersøkelsene viser en relativt fast tørrskorpe med varierende tykkelse i området.

For en bedre tilnærming til målt udrenert styrke, kan eventuelt parameterne a , ϕ og B justeres slik at de beregnede styrkeprofilene samsvarer med de målte profilene. I så tilfelle, vil styrketaket avgrenset av MC også øke i forhold til hva som er naturlig. Konsekvensene av dette er ikke videre utredet i denne rapporten, og bruk av unaturlig høye styrkeparametere for en bedre tilpassing av det udrenerte styrkeprofilet bør derfor utføres med forsiktighet.



Figur 7-10: Beregnet udrenert styrke plottet mot resultater fra grunnundersøkelser og ulike trendlinjer (22).

Den beregnede udrenerte styrken er veldig avhengig av initialspenningene. I dette tilfellet kommer det særlig godt frem i den passive styrken, som varierer sterkt langs snittet som er tegnet opp, til tross for at materialparametere er uniforme. En jevn og realistisk initial spenningsfordeling er derfor vesentlig for et godt resultat.

7.3 Konklusjon

Det er gjort enkle endringer i den brukerdefinerte ADPXX-modellen på bakgrunn av problemer med at initialspenninger kunne ligge på utsiden av flytekriteriet, samt at modellen i flere tilfeller viste seg å gi urealistisk styrke. Den justerte versjonen av modellen (ADPX1) beregner selv grad av anisotropi på bakgrunn av de initiale spenningene. Effekt av plastisitet, overkonsolidering og andre faktorer som kan ha stor innvirkning på grad av anisotropi kan kun tas hensyn til ved å variere faktoren B. Den udrenerte styrken i ADPX1 blir beregnet ut ifra initialspenninger og effektive materialparametere, og har vist seg å ligge noe lavere enn den udrenerte styrken som kan tolkes fra felt- og labforsøk, særlig grunt i skråningen. Den beregnede styrken kan økes ved å redusere faktoren B, men da vil samtidig innvirkningen av anisotropi avta. Den beregnede udrenerte styrken kan lett bli påvirket av randbetingelser, og bør vurderes før videre beregninger gjennomføres.

8 ADPX1 i forhold til isotrope materialmodeller

Som tidligere beskrevet, skal ADPX1-modellen oppføre seg som MC-modellen i tilfeller hvor lasten blir påført i samme retning som initialspenningen, men gi noe lavere styrke i tilfeller hvor hovedspenningene roteres. Dette kapittelet vil først ta for seg den første situasjonen, ved å benytte ADPX1 til å beregne sikkerheten for skråningen i Kattmarka og Rabstads idealskråning. Deretter vil effekten av spenningsrotasjon demonstreres. Resultatene fra analysene med ADPX1 sammenliknes med tilsvarende resultater fra beregninger med de isotrope materialmodellene som er benyttet for å finne initialspenningene.

8.1 Stabilitetsanalyser

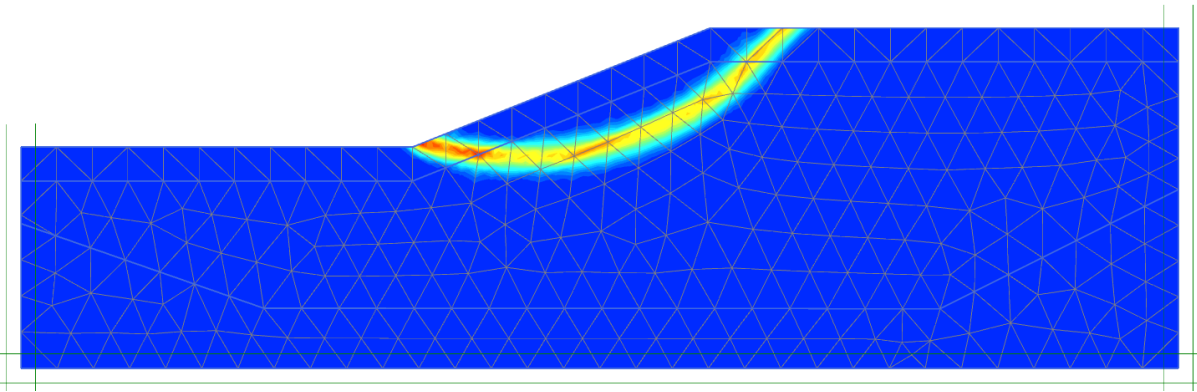
8.1.1 Rabstads idealskråning

For å kunne vurdere stabilitetsanalysene utført med ADPX1-modellen, er først en udrenert analyse med HS-modellen utført. Materialparameterne er de samme som ble benyttet for å finne initialspenningene, og er gjengitt i Tabell 8-1. Analysen er gjennomført som udrenert analyse (A), det vil si at effektive materialparametere er benyttet og at en høy verdi av ν fører til udrenert oppførsel. Forfatteren har under utarbeidingen av rapporten hatt problemer knyttet til at Plaxis har regnet drenert ved bruk av $\Sigma Mweight$, til tross for at udrenert materiale er definert. Sikkerhetsanalysen med HS er derfor utført med c - ϕ -reduksjon fremfor $\Sigma Mweight$. Dette skal ikke påvirke resultatet vesentlig, men vil likevel gi et noe dårligere sammenlikningsgrunnlag enn om $\Sigma Mweight$ ble benyttet også her.

Tabell 8-1: Materialparametere HS, Rabstads idealskråning

Parameter	Verdi
ϕ [°]	27
E_{50}^{ref} [kPa]	1900
E_{oed}^{ref} [kPa]	1900
E_{ur}^{ref} [kPa]	9000
c'_{ref} [kPa]	5
γ [kN/m ³]	20
ν_{ur} [-]	0,2
Dreneringstilstand	Drenert

For både den originale modellen og den utvidede modellen fører analysene til en sikkerhetsfaktor $F = 1,18$ for skjærflaten vist i Figur 8-1.



Figur 8-1: Kritisk skjærflate for Rabstads idealskråning for en udrenert analyse med HS-modellen.

Stabilitetsberegningene med ADPX1-modellen ble gjennomført med materialparameterne gjengitt i Tabell 8-2. Analysene resulterte i en sikkerhetsfaktor $F = 1,10$ for originalgeometrien og $F = 1,14$ for den forlengede modellen. Det vil si at sikkerhetsfaktoren blir tilnærmet lik ved bruk av ADPX1 som ved bruk av HS. Dette er i henhold til forventede resultater, da ADPX1 følger MC- kriteriet i tilfeller hvor materialet blir lastet i samme retning som initialspenningen. Det er tilfellet for samtlige punkter i modellen. HS gir generelt en anelse lavere styrke enn MC-modellen, da spenningsstien i mindre grad gir overestimering av styrken slik som MC gjør (9).

Til sammenlikning beregnet Rabstad sikkerhetsfaktoren til å ligge mellom 1,35 og 1,85 med ADPXX-modellen, men dette med en styrke som ikke kunne være lavere enn 15 kPa. For å lettere kunne sammenlikne resultatene, er denne analysen gjennomført på nytt uten den nevnte minimumstyrken. Dette gir sikkerhetsfaktorer mellom 1,22 og 1,63. Det vil si at selv for $\eta=0$ vil styrken være høyere enn ved beregning med ADPX1, som også samsvarer bedre med resultatene med isotrop materialmodell.

Tabell 8-2: Oversikt over materialparameterne benyttet i ADPX1-modellen for Rabstads idealskråning

Parameter	Verdi
φ [°]	27
G [kPa]	2000
a [kPa]	9,9
γ [kN/m ³]	20
ν [-]	0,495
B [-]	3

Output fra beregningene med ADPX1-modellen er gitt i Bilag C, og stemmer godt overens med hva som ble beregnet i Excel og presentert i Avsnitt 7.2. Det kommer frem at $\xi=\eta$ ligger mellom 0,35 og 0,50 for store deler av skråningen, inkludert området rundt den kritiske skjærflaten. Den forlengede modellen har også områder med høyere verdier for ξ , men dette er hovedsakelig områder som er dypere enn skjærsirkelen. Som tidligere nevnt, påpekte Rabstad at η trolig ligger mellom 0,3 og 0,5 for skråningen på bakgrunn av forsøket utført av Andersen, se Avsnitt 3.1. Resultatene stemmer godt overens med dette, og antyder at å ta

hensyn til anisotropi på skjærspenninger vil øke kapasiteten med rundt 15 %. Derimot er ξ redusert kraftig i forhold til hva Rabstad benyttet i sin masteroppgave, og er sammen med lave verdier for s_u i øvre lag årsaken til at den beregnede sikkerhetsfaktoren er mye lavere enn i tilfellet der ADPXX-modellen er benyttet.

8.1.2 Kattmarkaskråningen

Tilsvarende analyse er også utført på Kattmarkaskråningen. Som nevnt i Avnitt 8.1.1 vil Plaxis 2011 kjøre drenert analyse når Σ Mweight benyttes, til tross for at materialmodellen er udrenert. Flytekriteriet til MC er derfor lagt inn i den brukerdefinerte modellen ved at $\xi=\eta=0$ og $\bar{s}_u = 0,5 \sin \varphi \left[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a) \right]$, og benyttet i beregningene. Dette fører også til at materialmodellene bedre kan sammenliknes, da eventuelle forskjeller i numeriske beregningsmetoder vil utelukkes.

Materialparameterne er som tidligere oppgitt i Kapittel 4. Resultatet viser at ADPX1 gir identisk sikkerhetsfaktor som MC på $F=1,21$. Dette er forventet, da spenningene øker proporsjonalt.

Også for skråningen i Kattmarka, vil $\xi=\eta$ hovedsakelig ligge mellom 0,3 og 0,5 i området hvor den kritiske skjærflaten inntreffer. Unntaket er i det øvre laget, der spenningene vil være tilnærmet isotrope. Dermed vil $\xi=\eta$ ligge opp mot 1,0 i dette området. Fra Figur 5-1, kommer det frem at $\eta=0,4$ gir økning i udrenert skjærstyrke på 9 % dersom deviatoriske spenninger regnes fullt anisotrope.

8.2 Effekt av spenningsrotasjon

8.2.1 Idealskråning med 10° helningsvinkel

En enkel idealskråning med lavere helningsvinkel enn de tidligere analyserte skråningene er modellert. Den relativt lave helningsvinkelen fører til at skråningen vil tåle en belastning som er stor nok til å rotere hovedspenningene vesentlig. Skråningen er samtidig konsolidert for skjærspenninger, slik at effekten av anisotropi på skjærspenninger vil påvirke skråningens kapasitet.

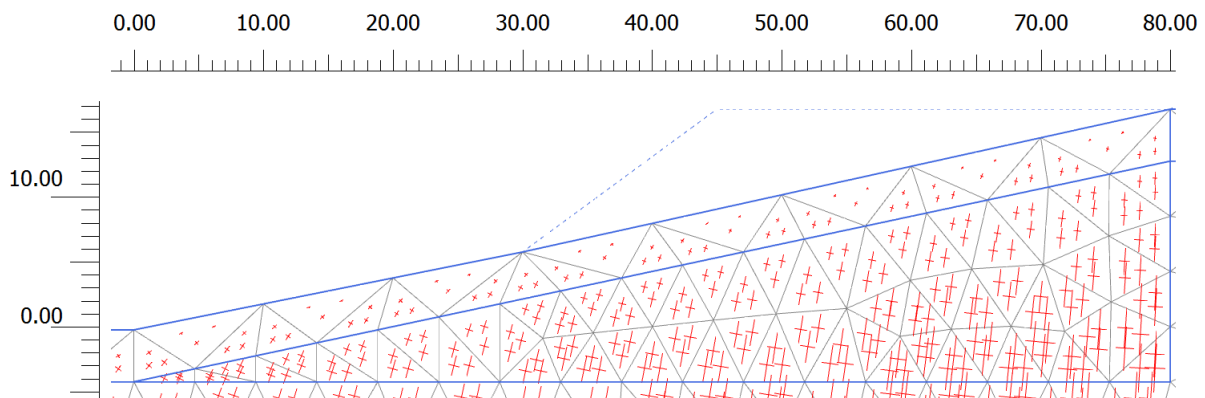
Selve skråningen er 100 meter lang og 17 meter høy, hvilket gir en skråningsvinkel på 10°. Modellen er utvidet 60 meter ovenfor skråningen og 70 meter nedenfor skråningen for å unngå innvirkning fra unaturlige spenninger ved randen. Skråningen er modellert med et tørrskorpelag med mektighet på 4 meter over homogen leire for å unngå et brudd som utelukkende går helt i overflaten. Materialparameterne for den homogene leiren er gitt i Tabell 8-3. Tørrskorpen er modellert med $a = 50$ kPa og ellers de samme parameterne. Grunnvannet er satt til bunn av modellen.

Tabell 8-3: Materialparametere

Leire: MC		Leire: ADPX1		Fylling: MC, drenert	
φ [°]	27	φ [°]	27	φ [°]	40
E' [kPa]	6000	G [kPa]	2250	E' [kPa]	10000
c'_{ref} [kPa]	5	a [kPa]	10	c'_{ref} [kPa]	1
γ [kN/m ³]	20	γ [kN/m ³]	20	γ [kN/m ³]	25
ν [-]	0,33	ν [-]	0,495	ν [-]	0,33
		B	3		

8.2.2 Beregninger og resultater

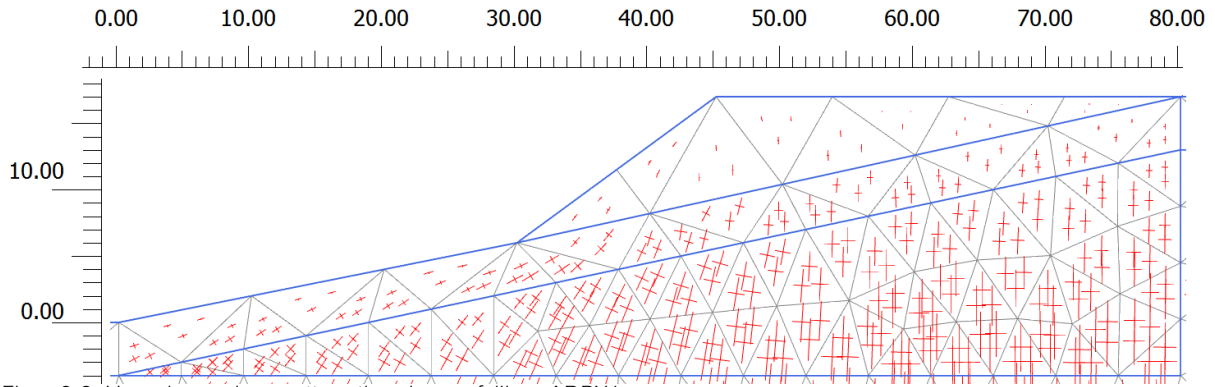
For å finne initialspenningene er en drenert analyse med MC som materialmodell gjennomført. Initialspenningene er beregnet ved hjelp av gravitasjonslast. Initialspenningene i området under der fyllingen vil bli lagt ut, er vist i Figur 8-2. På grunn av relativt lav skråningsvinkel, er spenningene lite rotert. Det vil si at skjærspenningene skråningen er konsolidert for, er små. Utover dette er ikke initialspenningene videre vurdert.



Figur 8-2: Initialspenninger i området rundt den senere utlagte fyllingen

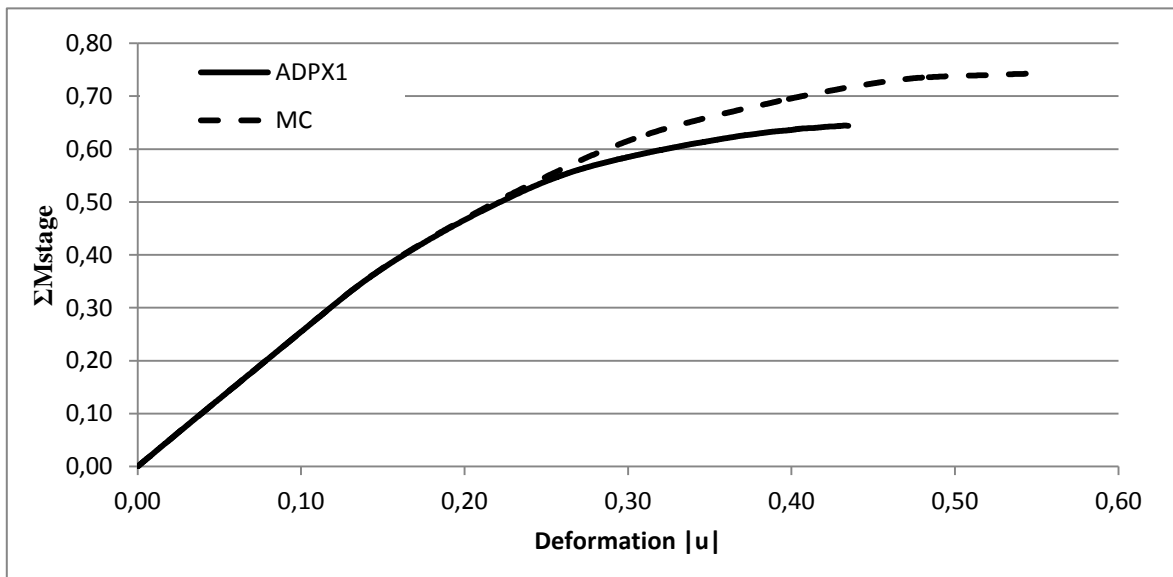
En fylling med geometri som antydnet med stiptet linje i Figur 8-2 blir deretter lagt ut, slik at modellen går til brudd. Dette er utført både med MC og ADPX1 som materialmodell, med hensikt å kunne sammenlikne hvor stor del av fyllingen som kan legges på før bruddet inntreffer. MC-modellen benyttet er, som for skråningen i Kattmarka, en justering av den brukerdefinerte modellen. Hovedspenningene i skråningen etter at fyllingen er lagt ut, beregnet med ADPX1-modellen, er vist i Figur 8-3.

Pålastingen fører til en økt spenningsrotasjon i underkant av fyllingen. Skråningen blir dermed utsatt for spenninger i en annen retning enn det den er konsolidert for. Det er derfor forventet at skråningen vil tåle en mindre andel av fyllingen dersom den blir beregnet med ADPX1-modellen fremfor med MC-modellen.



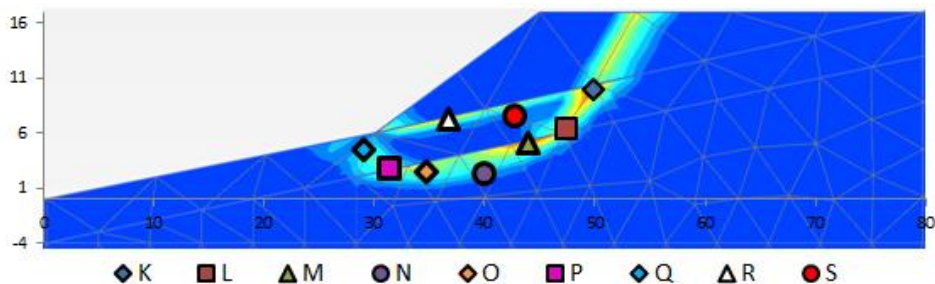
Figur 8-3: Hovedspenninger etter utlegging av fylling, ADPX1

Resultatet fra analysene er plottet i Figur 8-4, og det kommer frem at antagelsen om at bruk av ADPX1-modellen fører til at en mindre del av skråningen kan legges ut, stemmer. I beregningene der MC er benyttet, kan 75 % av fyllingen legges ut før modellen går til brudd. Med ADPX1 kan kun 64 % av fyllingen legges ut, hvilket er rundt 15 % mindre enn ved bruk av MC-modellen.



Figur 8-4: Sammenlikning av andelen av fyllingen som kan legges ut, ved anvendelse av ADPX1 og MC som materialmodeller. Deformasjonen regnes i selve fyllingen.

For å vurdere resultatet, er det valgt å se nærmere på spenningsutviklingen i ni punkt langs den kritiske skjærflaten. Punktene plassering i forhold til den kritiske skjærflaten fra analysen med ADPX1 er vist i Figur 8-5. De samme punktene, men med plassering vist i forhold til den kritiske skjærflaten beregnet med MC, er vist i Bilag D. Beregningene gir relativt like bruddflater for de to materialmodellene. Bruddet kan inntreffe ved at fyllingen sklir oppå tørrskorpelaget nedover skråningen, eller som et dypere brudd mellom tørrskorpen og den underliggende leiren.



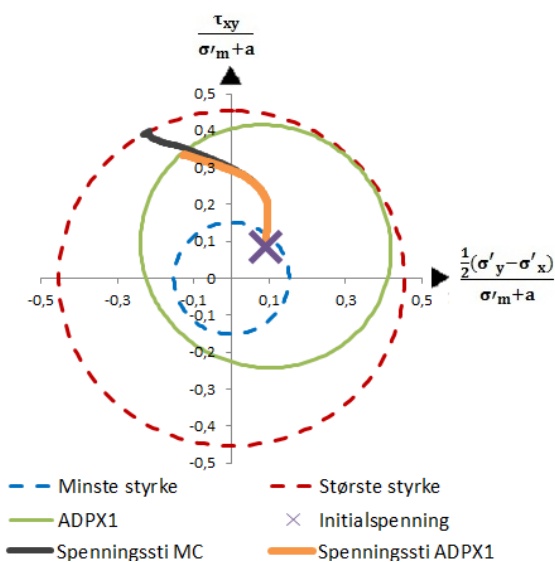
Figur 8-5: Utvalgte punkt langs for nærmere vurdering langs kritisk skjærflate beregnet med ADPX1 som materialmodell.

Spenningsstiene for punktene P og R er vist i henholdsvis Figur 8-6 og Figur 8-7. Spenningsstier i øvrige punkt er gitt i Bilag D.

Punkt P representerer spenningsutviklingen nedenfor fyllingen og ligger plassert akkurat innenfor tørrskorpen. Initialt er spenningen svakt anisotrop, og fører til at det elastiske området for ADPX1-modellen vil dekke mer en 1/3 av aktiv styrke i passiv retning. Til tross for dette gir modellen en vesentlig styrkereduksjon i forhold til MC når spenningstilstanden i punktet endrer seg fra å være svakt aktiv til passiv, som følge av at jorden blir presset opp på grunn av lasten.

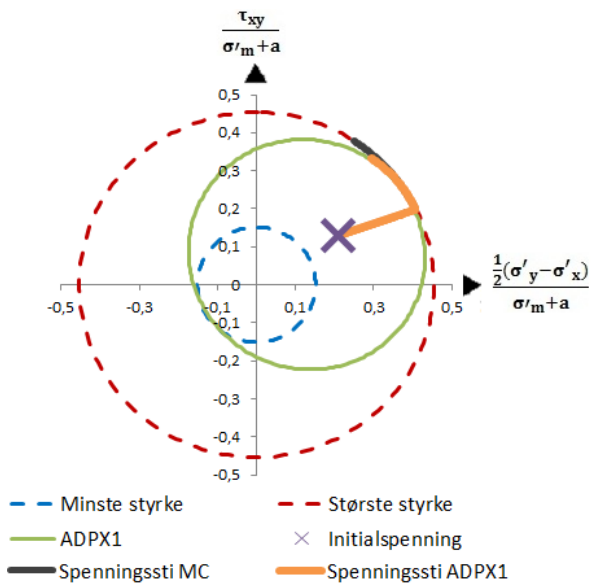
Punkt M ligger plassert høyere opp i skråningen enn punkt P. Til tross for at initialspenningen er klart anisotrop både på deviatoriske spenninger og på skjærspenninger, vil forskjellen mellom MC og ADPX1 være minimal i dette punktet. Spenningene øker proporsjonalt ved påføringen av fyllingen, da punktet er plassert på den delen av skjærflaten som er styrt av aktiv styrke.

Effekten av anisotropi vil således variere langs den kritiske skjærflaten ettersom spenningene roterer. De største utslagene opptrer ikke nødvendigvis i punktene hvor initialspenningene er mest anisotrope.



Punkt P

Figur 8-6: Spenningssti i punkt P



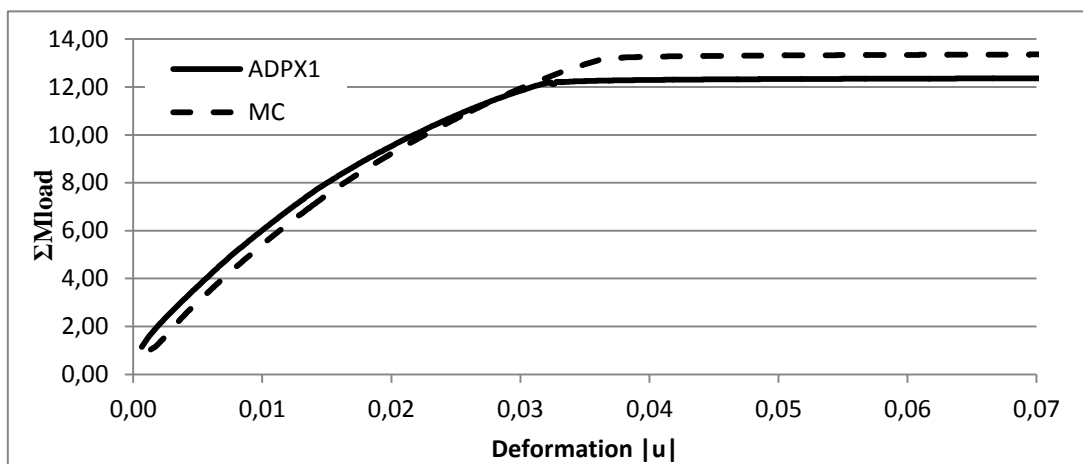
Punkt M

Figur 8-7: Spenningssti punkt M

8.2.3 Kattmarka

Det er utført analyser på Kattmarkaskråningen med samme hensikt. Denne skråningen har mye lavere sikkerhet mot brudd initialt enn det skråningen i foregående kapittel hadde, og vil derfor tåle en mindre belastning. Det er utlagt en last på det flate partiet i overkant av selve skråningen. Lasten er påført direkte på jorden, da en plate vil skape problemer når den blir presset ned mot fjellet. Lasten er satt til 1,0 kPa til å begynne med, og er deretter økt gradvis til skråningen går til brudd. Analysen er utført med både ADPX1 og MC som materialmodell. Lasten fører til en økt spenningsrotasjon i skråningen, og det er derfor forventet at ADPX1-modellen tåler noe mindre last enn MC-modellen.

Figur 8-8 viser deformasjon-lastkurvene for analysene utført med MC og ADPX1-modellen. Som det kommer frem av grafen, kan skråningen bære 7,5 % mindre last dersom den er modellert med ADPX1 fremfor MC. At forskjellen er vesentlig mindre her enn i foregående eksempel, er som forventet. Skråningen i Kattmarka har, som tidligere påpekt, lav sikkerhet initialt. Flere av punktene langs den beregnede bruddflaten er plastiske allerede initialt. Etersom skråningen kun kan bære en liten last, vil spenningsrotasjonen være begrenset. I punkter som er nære brudd initialt, vil også effekten av spenningsrotasjonen være begrenset, da spenningsstien har et begrenset område å utfolde seg på før punktet vil gå til brudd. Dette kommer frem i spenningsstiene, som er vedlagt i Bilag E.



Figur 8-8: Deformasjon-lastkurve for skråningen i Kattmarka ADPX1 og MC som materialmodeller for et punkt i skråningstoppen under lasten.

8.3 Aktivering av materialet med ADPX1-modellen i Plaxis-beregninger

Det er verdt å merke seg, at til tross for at selv om selve beregningsgangen ikke er justert fra tidligere, er modellen mye lettere å innføre i Plaxis. Med det menes at beregningsfasen der materialmodellen blir endret til ADPX1 lar seg gjennomføre uten manuelle endringer av parameteren «tolerert avvik». Dette gjelder samtlige beregninger, og styrker antagelsen gjort i Kapittel 5 om at problemene i stor grad skyldtes at initialspenninger kunne ligge på utsiden av flytekriteriet.

8.4 Konklusjon

Modellen oppfører seg forventet. I vanlig stabilitetsberegning der spenningene i de ulike retningene vokser proporsjonalt, vil modellen gi tilsvarende resultater som MC da effekten av anisotropi ikke spiller inn. Økende grad av spenningsrotasjon vil også gi større effekt av anisotropi, og effekten vil også være større der materialet har stor sikkerhet mot brudd. Bruksområdet til modellen vil dermed være for situasjoner der en ytre påkjenning fører til rotasjon av hovedspenningene i forhold til initial tilstand, det vil si for situasjoner der anisotropi er antatt å spille en vesentlig rolle for jordens kapasitet. Modellene gir $\xi = \eta$ mellom 0,3 og 0,5 i store deler av skråningene.

9 Konklusjon og videre arbeid

9.1 Oppsummering av utført arbeid

Den opprinnelige ADPXX modellen fra 2011 har vist seg å gi urealistisk høy udrenert styrke dersom full effekt av anisotropi på deviatoriske spenninger er antatt. Denne overestimeringen har vist seg å øke dersom også effekt av anisotropi på skjærspenninger blir medregnet. En uheldig kombinasjon av materialparametere kan også føre til en initialspenningstilstand som ikke ligger innenfor flaten definert av flytekriteriet, hvilket skal være umulig.

Endringer i modellen er utført, slik at den udrenerte styrken blir kontrollert gjennom at effekten av anisotropi varierer gjennom modellen, og til en hver tid holder styrken innenfor en øvre grense angitt av Mohr Coulomb (MC) flytekriterium. Aktiv, passiv og direkte udrenert styrke blir beregnet på bakgrunn av effektive materialparametere, og har vist seg å ligge noe under målt udrenert styrke.

I tilfeller der spenningene øker proporsjonalt, vil den endrede modellen gi tilsvarende resultat som ved bruk av MC. Dersom en ytre påkjenning fører til spenningsrotasjon, vil effekten av anisotropi føre til en lavere kapasitet ved bruk av ADPX1-modellen (som er den endrede versjonen av ADPXX) enn ved bruk av MC.

Det er vanskelig å anslå effekten av å ta hensyn til anisotropi på skjærspenninger fremfor å bare ta hensyn til anisotropi på deviatoriske spenninger, grunnet at initialspenningene vil kunne havne utenfor flaten angitt av flytekriteriet dersom $\eta=1$.

9.2 Begrensninger i ADPX1 som materialmodell

Selv om den modifiserte modellen gir bedre kontroll over flytekriteriet, vil den benyttede udrenerte skjærstyrken bli beregnet ut ifra initialspenninger og effektive styrkeparametere. Dette gir liten kontroll over benyttet styrke, og den beregnede styrken samsvarer ikke alltid like godt med styrken funnet fra felt- og laboratorieundersøkelser.

Brukeren har ikke lenger mulighet til å angi i hvilken grad skråningen skal regnes anisotrop uten å også øke den udrenerte styrken ved å endre forholdet mellom maksimum- og minimumsstyrken. Denne effekten blir teoretisk utregnet på bakgrunn av initialspenninger, effektiv attraksjon og friksjon i jordmaterialet. Som påpekt i teorikapittelet, vil grad av anisotropi varierer sterkt med plastisitet og andre faktorer som OCR og liknende. Forenklingen $\xi=\eta$ fører til at anisotropi vil utgjøre en like stor rolle for deviatoriske spenninger som for skjærspenninger.

En fordel med NGI-ADP-modellen, er at brukeren kan benytte seg av resultatene fra grunnundersøkelsene direkte, da både aktiv, passiv og direkte skjærstyrke er inputparametere. Denne fordelten forsvinner med ADPX1-modellen, som bruker effektive styrkeparametere som input. En annen vesentlig forskjell, er at NGI-ADP modellen ikke nødvendigvis gir

sirkulært flytekriterium i deviatorisk plan, men vil formes etter forholdene mellom passiv, aktiv og direkte udrenert skjærstyrke.

9.3 Forslag til videre arbeid

En bedre forståelse på anisotropi på udrenert skjærstyrke bør opparbeides gjennom labforsøk. Resultatene kan benyttes til å gjøre en grundigere vurdering på om det er hensiktsmessig å bruke MC som øvre tak på tolerert styrke, eller om enkelte spenningssituasjoner vil kunne føre til en styrke som overstiger MC. Det er kjent at faktorer som overkonsolidering og plastisitet har stor effekt på skråningens anisotrope egenskaper, og disse faktorene kan følgelig ha innvirkning på hvor mye styrken eventuelt kan overgå MC. Det bør også foretas en vurdering om forenklingen $\xi=\eta$ er hensiktsmessig.

Det bør også gjøres en ny vurdering om hvorvidt den beregnede udrenerte styrken blir for lav i forhold til hva som er målt i felt og lab. Konsekvensene av å øke de effektive styrkeparameterne for en bedre tilpassing av udrenert styrkeprofil bør utredes.

For å lettere kunne kjøre sikkerhetsanalyser med ADPX1-modellen, bør den implementeres implisitt fremfor eksplisitt. Det vil også være en fordel å kunne kjøre en phi-c reduksjon fremfor dagens metode som går ut på å gradvis øke tyngden. Sistnevnte metode øker tyngden i samtlige komponenter i modellen, noe som ikke er ønskelig ved for eksempel en utlegging av fylling eller liknende.

Resultater fra analyser med ADPX1 kan sammenliknes med tilsvarende resultater fra bruk av lamellemetoden basert på grenselikevekt, som blant annet blir benyttet i programvaren GeoSuite. Her er aktiv, direkte og passiv udrenert skjærstyrke vanlige inputparametere for å beregne skråningsstabilitet. Effekten av bruk av ADPX1-modellen bør også undersøkes for flere ulike situasjoner, og sammenliknes med resultater fra labforsøk.

Referanseliste

1. Brinkgreve RBJ, Swolfs WM, Engin E. PLAXIS 2D Reference Manual 2010. Delft, Netherlands 2010.
2. Zdravkovic L, Potts DM, Hight DW. The effect of strength anisotropy on the behaviour of embankments on soft ground. *Geotechnique* 52, No 6, 447-457. 2002.
3. Grimstad G, Adresen L, Jostad HP. NGI-ADP: Anisotropic shear strength model for clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2011.
4. Hicher PY, Wahyudi H, Tessier D. Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay. *Mechanics of cohesive-frictional materials*. 2000;5:341-71.
5. Wang L-Z, Shen K-l, Ye S-H. Undrained Shear Strength of K_0 Consolidated Soft Soils. *International Journal of Geomechanics*. 2008:105-13.
6. Anadarjah A. On influence of fabric anisotropy on the stress-strain behaviour of clays *Computers and Geotechnics*. 2000;1-17.
7. Emdal A, Grande L, Nordal S. *Geoteknikk beregningsmetoder*.
8. Soydemir. Strength anisotropy observed through simple shear test. *Laurits Bjerrum Memorial Volume* 1976.
9. Nordal S. TBA4116 Geotechnical Engineering, Advanced Course. Trondheim: Norwegian University and Technology Geotechnical Division; 2011.
10. Bjerrum L, Atchison GD. Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils. *The Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow*. 1973:111-59.
11. Bernander S. Progressive Landslides in Long Natural Slopes: Formations, Potential Extension and Configuration of Finished Slides in Strain-Softening Soils [Doctoral Thesis]: Luleå university of technology; 2011.
12. Andersen KH. Bearing capacity under cyclic loading - offshore, along the coast, and on land. The 21st Bjerrum Lecture presented in Oslo, 23 November 2007. *Can Geotech J*. 2009;46.
13. Impe WFV, Flores RDV. Discussion on undrained shear strength of soft soils. *Underwater embankment on soft soil: a case history*: Taylor & Francis Group; 2007.
14. Jamiolkowski M. 1985.
15. Puzrin AM, Anonso EE, Pinyol NM. *Geomechanics of Failures*: Springer Science 2010.
16. Rabstad K. Slope Stability in Natural Slopes with Vertical or Principal stress Induced Undrained Shear Strength Anisotropy [Master Thesis]. Trondheim: NTNU; 2011.
17. Berre T. Shear strength of normally consolidated clays. *T U N S for Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1973; Proceedings of the eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering:39-49.
18. Dahl R, Sveian H, Thoresen MK. *Nord-Trøndelag og Fosen: Geologi og landskap: Norges geologiske undersøkelse*; 1997. Available from: http://www.nb.no/utlevering/contentview.jsf?urn=URN:NBN:no-nb_digibok_2008071700050#&struct=DIV120.

19. Mehli M. Numerisk simulering av initialspenningene i to naturlige leirskråninger og innvirkning av initialspenningene på stabiliteten [Masteroppgave]. Trondheim: NTNU; 2010.
20. Nordal S, Alen C, Emdal A, Jendeby L, E. Lyche, Madshus C. Skredet i Kattmarkvegen i Namsos 13. mars 2009. Trondheim: Faggruppe for geoteknikk, 2009 26. juni 2009. Report No.
21. Kartverk S. Norgeskart. [cited 2012]; Available from: www.norgeskart.no.
22. Gylland AS, Alén C. Rapport fra laboratorieundersøkelser, Kattmarkveien hull S5-B. 2009.

Bilag

Bilag A- Bakgrunnsinformasjon om

Bilag B– Kontroll aktiv, passiv og direkte udrenert styrke

Bilag C- Rabstads idealskråning: Output fra analyser med ADPX1-modellen

Bilag D- Output og spenningsstier analyse lasttretningsendringer

Bilag E–Output og spenningsstier analyse lasttretningsendringer som følge av last i skråningen i Kattmarka

Bilag F- Effekt av anisotropi på skjærspenninger på udrenert styrke

Bilag G- Oversikt over tilstandsparametere for output i Plaxis

Bilag H– Fortrankode

Vedlegg

Vedlegg 1 - Oppgavetekst

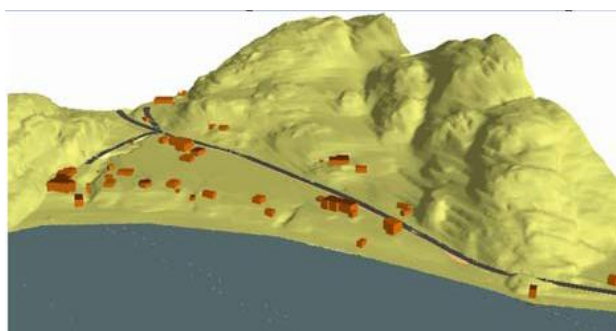
Bilag A - Bakgrunnsinformasjon om skråningen i Kattmarka

Skråningen i Kattmarka er benyttet som grunnlag for analyser av den brukerdefinerte ADP-modellen. God kjennskap til skråningenes egenskaper og historie, vil være vesentlig for et godt resultat, da dette vil ha innvirkning på initialspenningene som igjen spiller en vesentlig rolle i den nevnte modellen. I dette bilaget er derfor bakgrunnsinformasjon om skråningen presentert. Det er lagt vekt på geologisk historie og materialeegenskaper.

Beliggenhet og skredaktivitet

Kattmarka ligger lokalisert nordvest for Namsos sentrum, Nord-Trøndelag. 13. mars 2009 gikk det et skred i forbindelse med en sprengning for veiutvidelse i dette området. Totalt ble flere boliger og mellom 300 000 m³ og 500 000 m³ masser forflyttet i skredet.

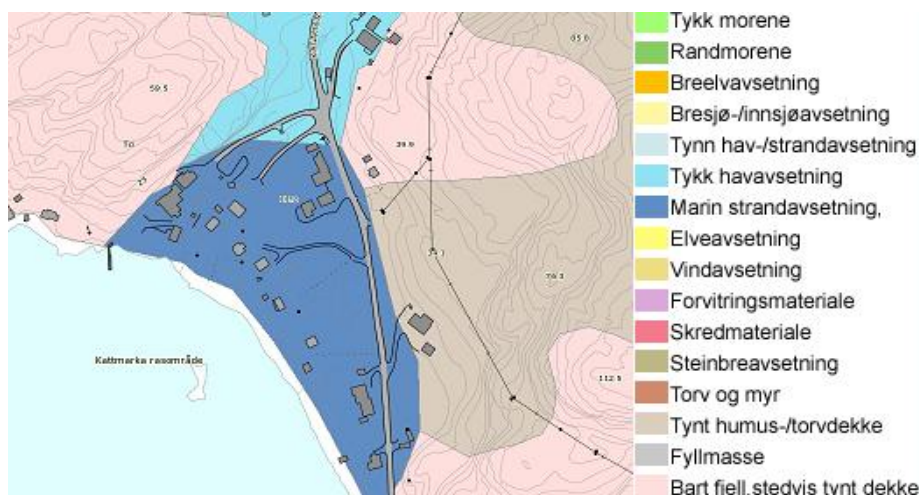
Grunnforholdene var ikke kartlagt før sprengingen, verken med tanke på geologiske eller geotekniske forhold. I etterkant ble det utnevnt en undersøkelsesgruppe, og grunnforholdene ble dermed gjort rede for. Gruppen kom frem til at bløt og sensitiv leire kombinert med en ugunstig fjellhelling gjorde at området hadde svært lav sikkerhet allerede før arbeidet med veiutvidelsen startet (20). I denne oppgaven vil skråningen slik den var før initialskredet bli vurdert.



A-1: Den aktuelle skråningen er og området rundt (20)

Skråningsgeometri og material

Den aktuelle skråningen hadde en helling på ca 3:1, og helte nedover mot sørvest. Skråningen endte i en strandsone ned mot sjøen, og var omkranset av markerte fjellpartier, som vist i Figur A-1 (20). Kvartærgeologiske kart fra NGU, vist i Figur A-2 viser at skråningen bestod av marine havavsetninger, at bakeforliggende områder nord for skråningen bestod av tykke havavsetninger, og områder øst for skråningen bestod av tynt torvdekke direkte på fjell og bart fjell.



A-2: Kvartærgeologisk kart over Kattmarka

Grunnundersøkelser i området tyder på at grunnen i hovedsak bestod av moderat overkonsolidert leire med uregelmessige lag av leirig silt og finsandsjikt. Lagene har generelt en tykkelse på 2 cm – 6 cm. Over leiren antas det å ha ligget lag med tørrskorpeleire med varierende mektighet opp mot 2,5 m. Det er påvist store områder med sensitiv leire, stedvis kvikk. Lagene virker å ha hatt større helning jo dypere de lå, fra 5 % helning i øvre lag til 40 % helning i de dypere lagene. I øvre del av skråningen, i overkant av rasområdet, er leiren mer homogen (20).

Geologisk historie

Løsmassekartet i Figur A-2 viser at skråningen består av marine havavsetninger, det vil si sand, grus og stein som er vasket av bølger i strandsonen.

Helt fra siste istid har landnivået hevet seg relativt i forhold til havnivået. Langs kysten i Nord-Trøndelag ligger «den marine grense» ca 120 m over dagens havnivå, det vil si at i dette området har landet hevet seg ca 120 m i forhold til havet. Med andre ord lå hele den aktuelle skråningen under vann rett etter siste istid (18).

Som tidligere nevnt har jorden en avtagende overkonsolideringsgrad OCR fra 7,3 på 1,5 m dybde til 1,5 ved 9 m dybde. Dette gir et estimert overlagingstrykk på POP = 95 kPa. Det er normalt med en høyere konsolideringsgrad i øvre lag enn i mer dyptgående lag, blant annet fordi spenningene fra lasten sprer seg med dybden, og at dypere lag derfor ikke «merker» lasten så godt (9).

Jordparametere og grunnvannstand

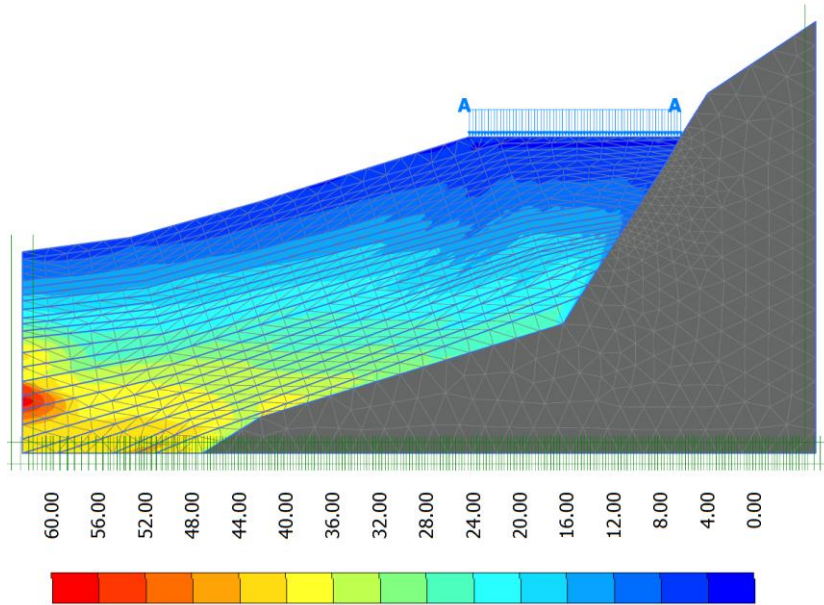
Styrkeparameterne i skråningen ble tolket i forbindelse med granskingen av skredet. Parameterne antas å være fornuftige, blir derfor også benyttet i beregningene i denne oppgaven. Tolkede styrkeparametere er gjengitt i Tab. A-1. Leiren er lite til middels plastisk (20).

Grunnvannet er antatt i terreng, med overtrykk langs fjellet under leiren. Overtrykket er estimert til å være 3 m på kote -12 ved strandkanten og 1 m på kote -5 inne mot fjellet i øst (20).

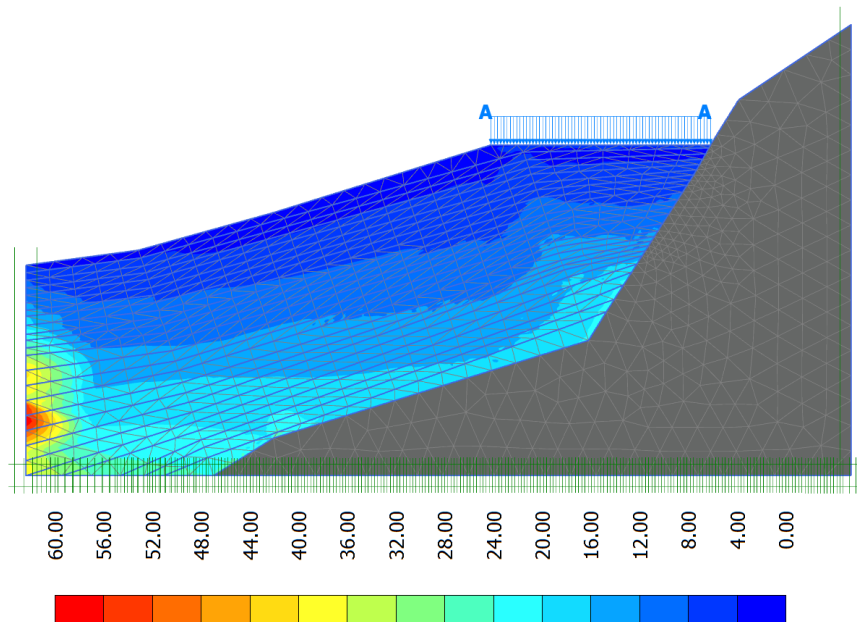
Tab. A-1: Generelle styrkeparametere Kattmarka

Parameter	Verdi	Kommentar
φ [°]	26,57	
s_{uA} [kPa]	$15+2 \cdot z$	
s_{uP} [kPa]	$0,33 \cdot s_{uA}$	
s_{uD} [kPa]	$0,69 \cdot s_{uA}$	
M_{OC} [kPa]	6000	
m_{NC} [-]	25	Varierer fra 22-28
a [kPa]	10	
γ [kN/m ³]	18,4	Varierer fra 18,1-19,3
v [-]		
OCR		Avtar fra 7,3 ved 1,5 m dybde til 1,5 ved 9,5 m dybde

Bilag B – Kontroll aktiv, passiv og direkte udrenert styrke

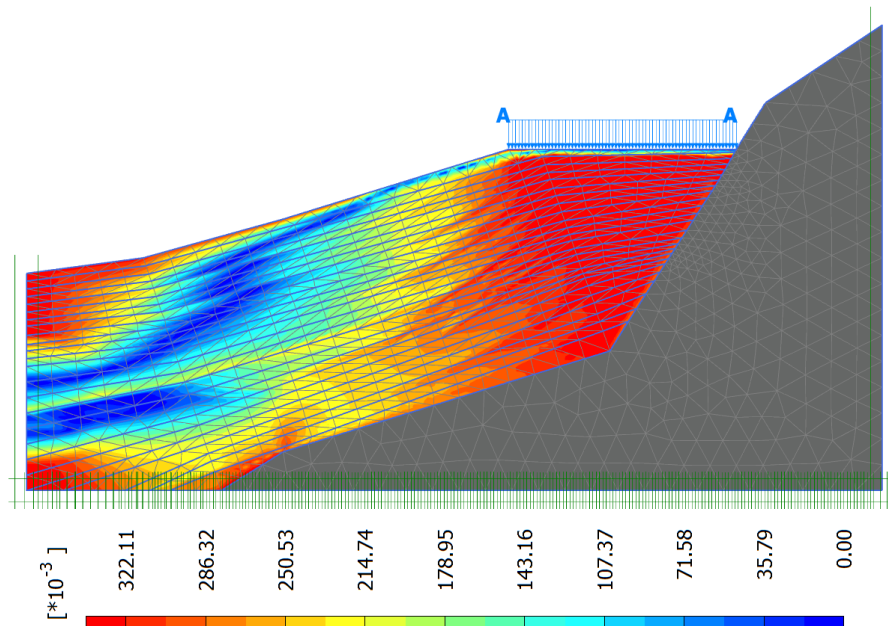


B-1: Su,middel

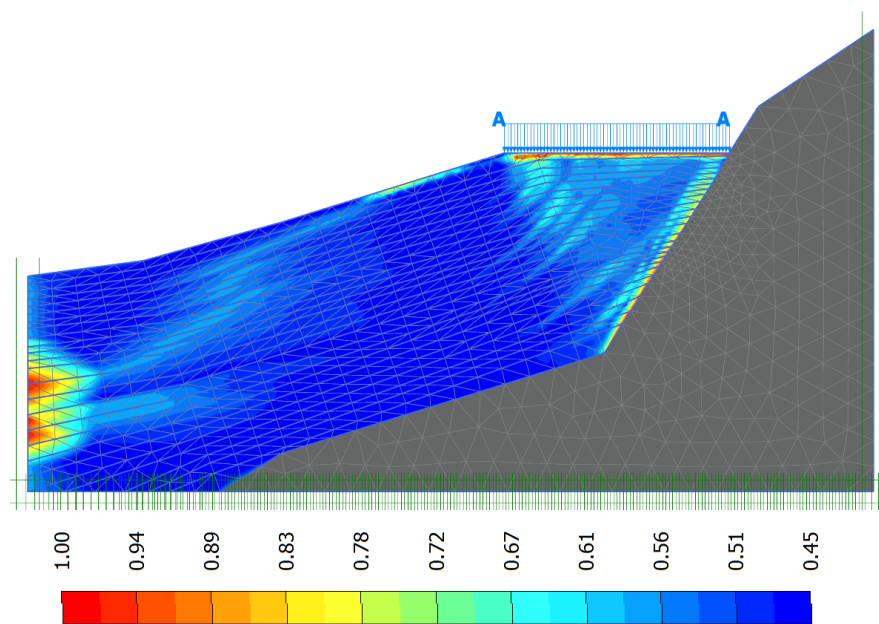


B-2: Su,aktiv

Bilag B– Kontroll aktiv, passiv og direkte udrenert styrke

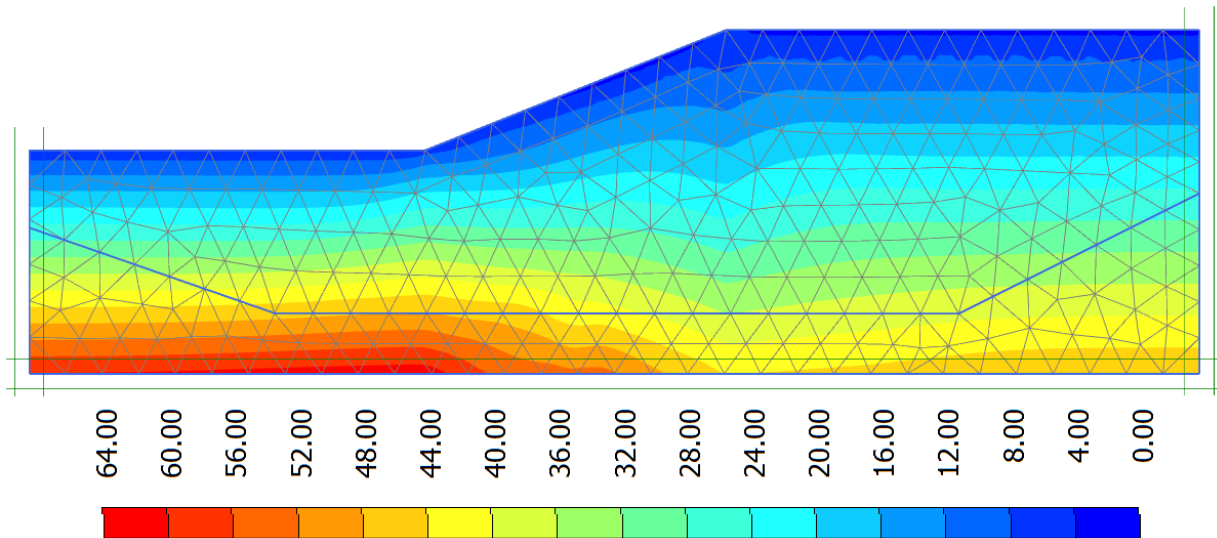


B-3: Forhold mellom aktiv og passiv udrenert skjærstyrke. Varierer mellom 0 og 0,32.

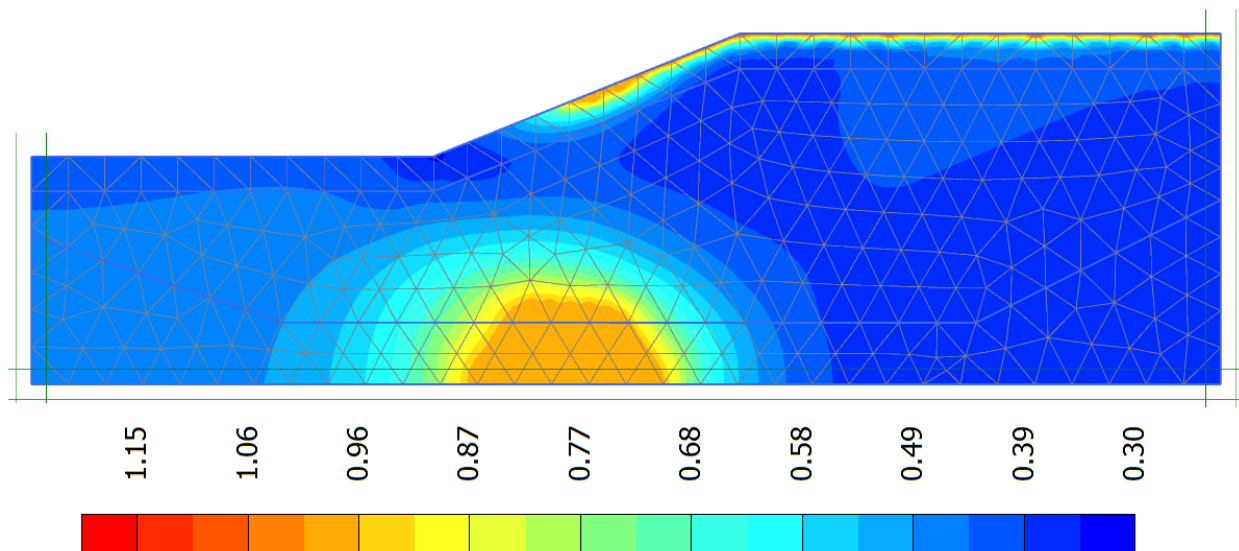


B-4: Forhold mellom aktiv og direkte udrenert skjærstyrke. Ligger i store deler av skråningen rundt 0,5.

Bilag C - Rabstads idealskråning: Output fra analyser med ADPX1-modellen

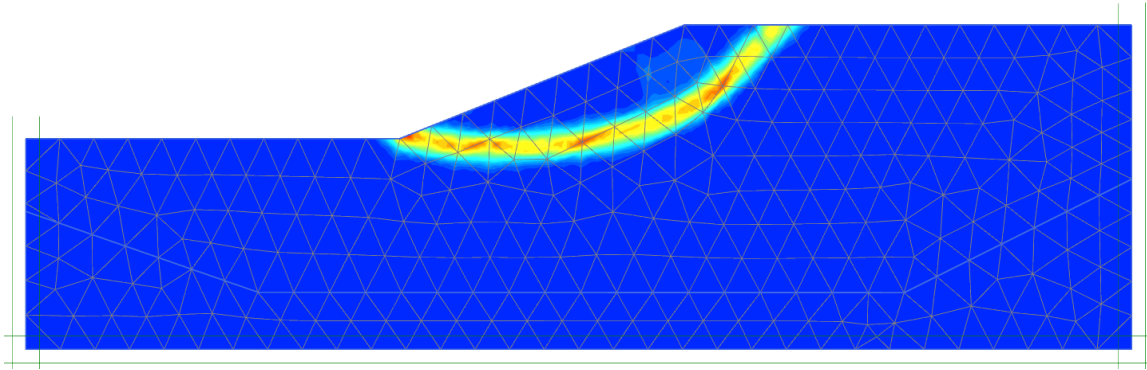


C-1: S_u beregnet numerisk for Rabstads idealskråning

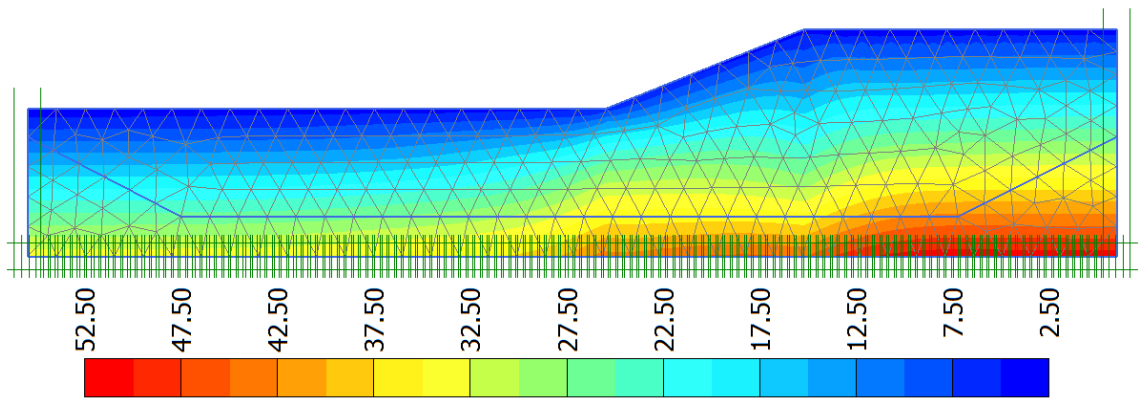


C-2: $\xi=\eta$ beregnet numerisk for Rabstads idealskråning

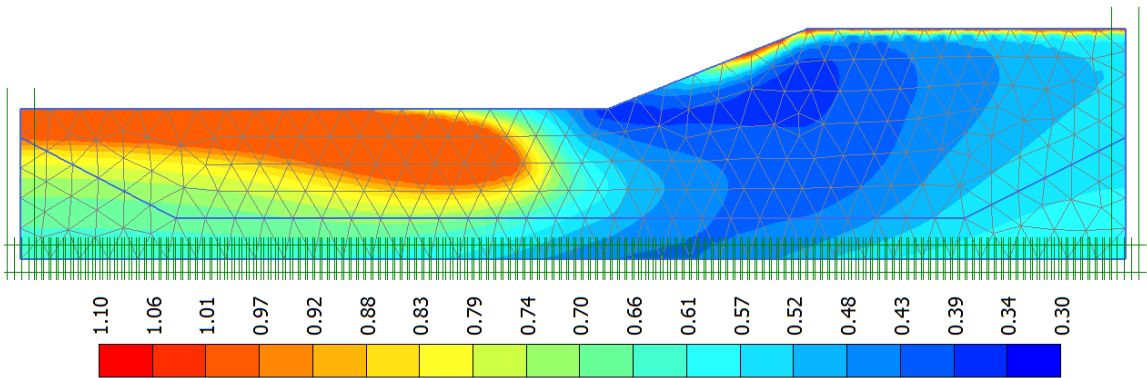
Bilag C- Rabstads idealskråning: Output fra analyser med ADPX1-modellen



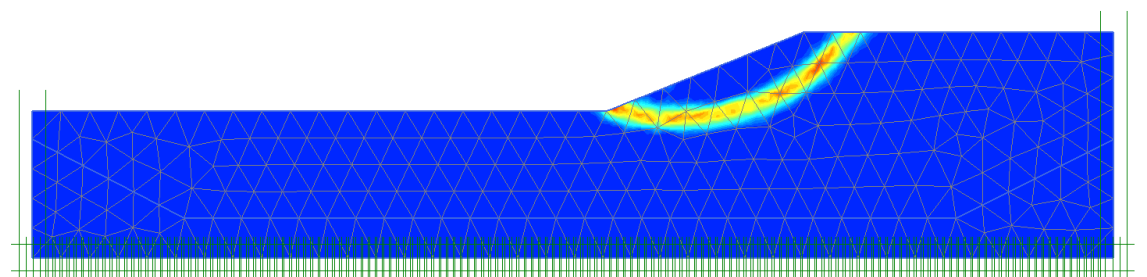
C-3: Su beregnet numerisk for Rabstads idealskråning, forlænget modell



C-4: Su beregnet numerisk for Rabstads idealskråning, forlænget modell

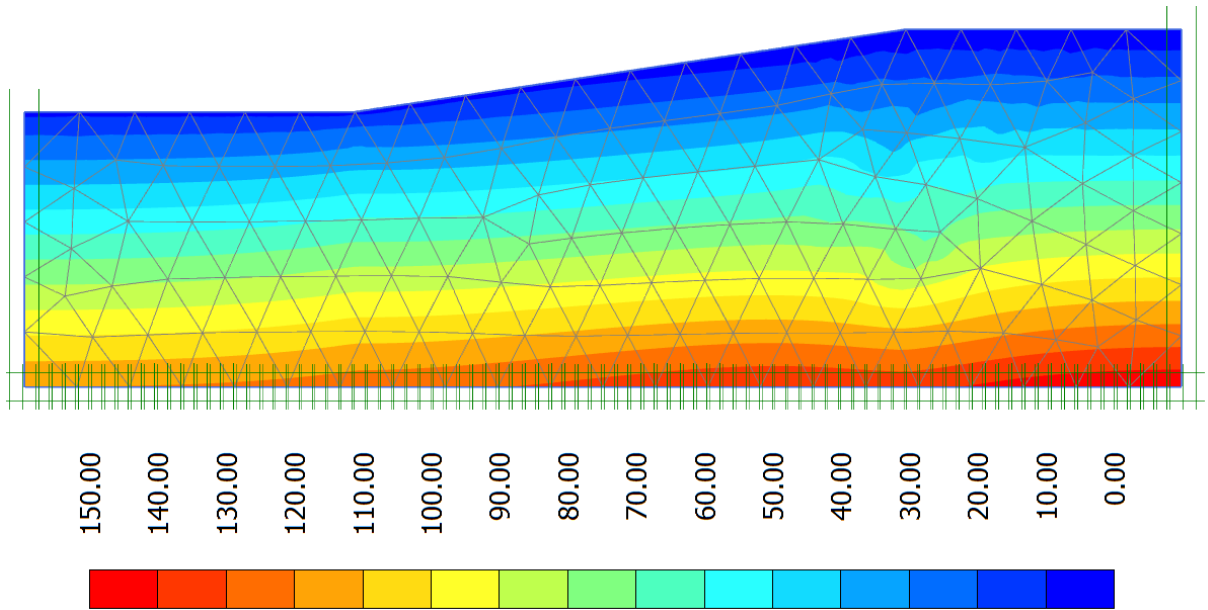


C-5: $\xi=\eta$ beregnet numerisk for Rabstads idealskråning, forlænget modell

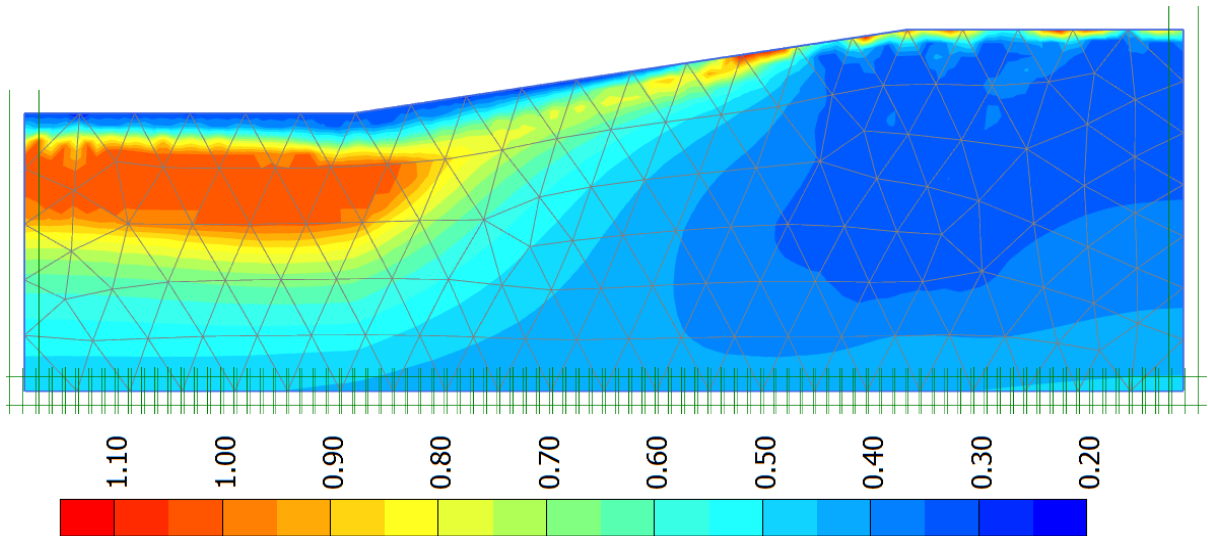


C-6: Kritisk skjærflate Rabstads idealskråning, forlænget modell

Bilag D - Output og spenningsstier analyse lastretningsendringer som følge av fylling

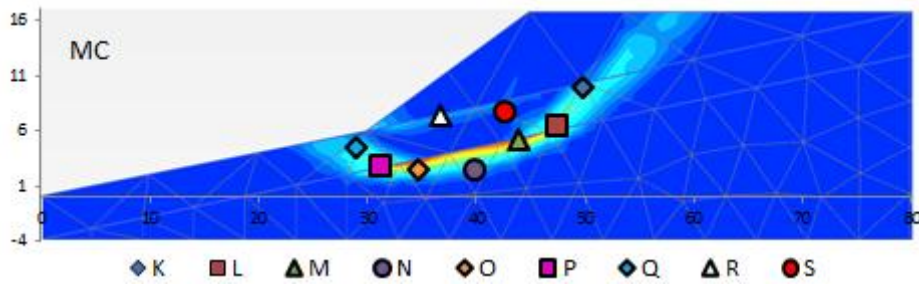


D-1: Beregnet su med ADPX1-modellen

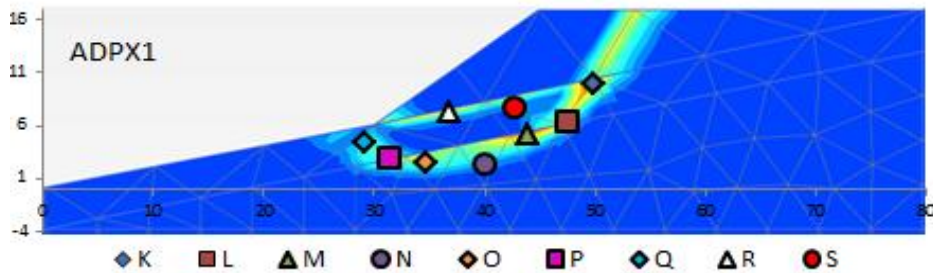


D-2: Beregnet $\xi=\eta$ med ADPX1

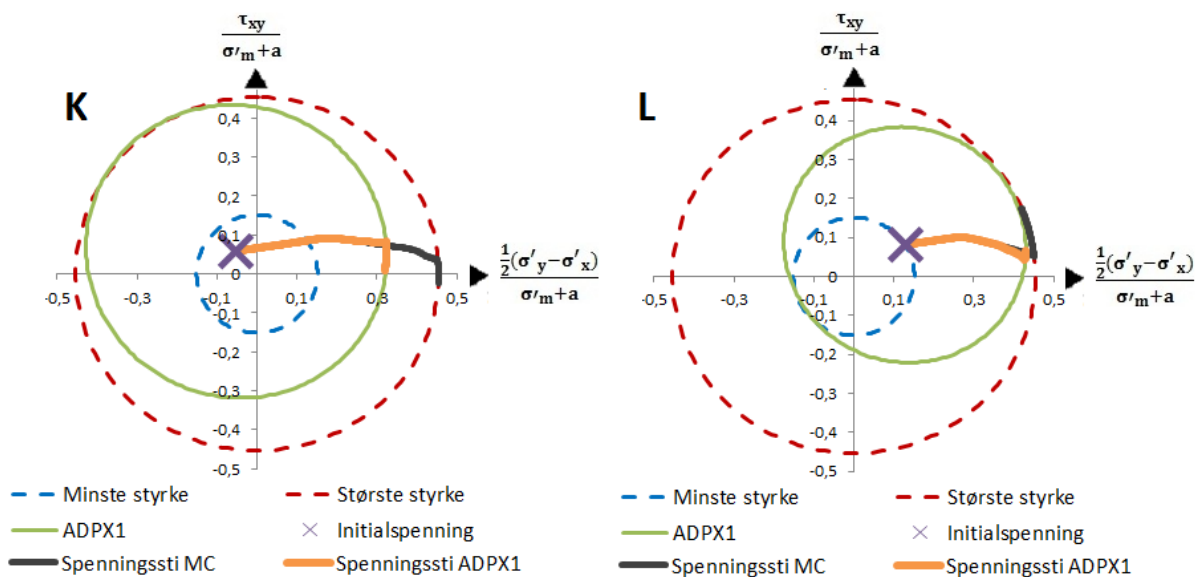
Bilag D- Output og spenningsstier analyse lastretningsendringer som følge av fylling



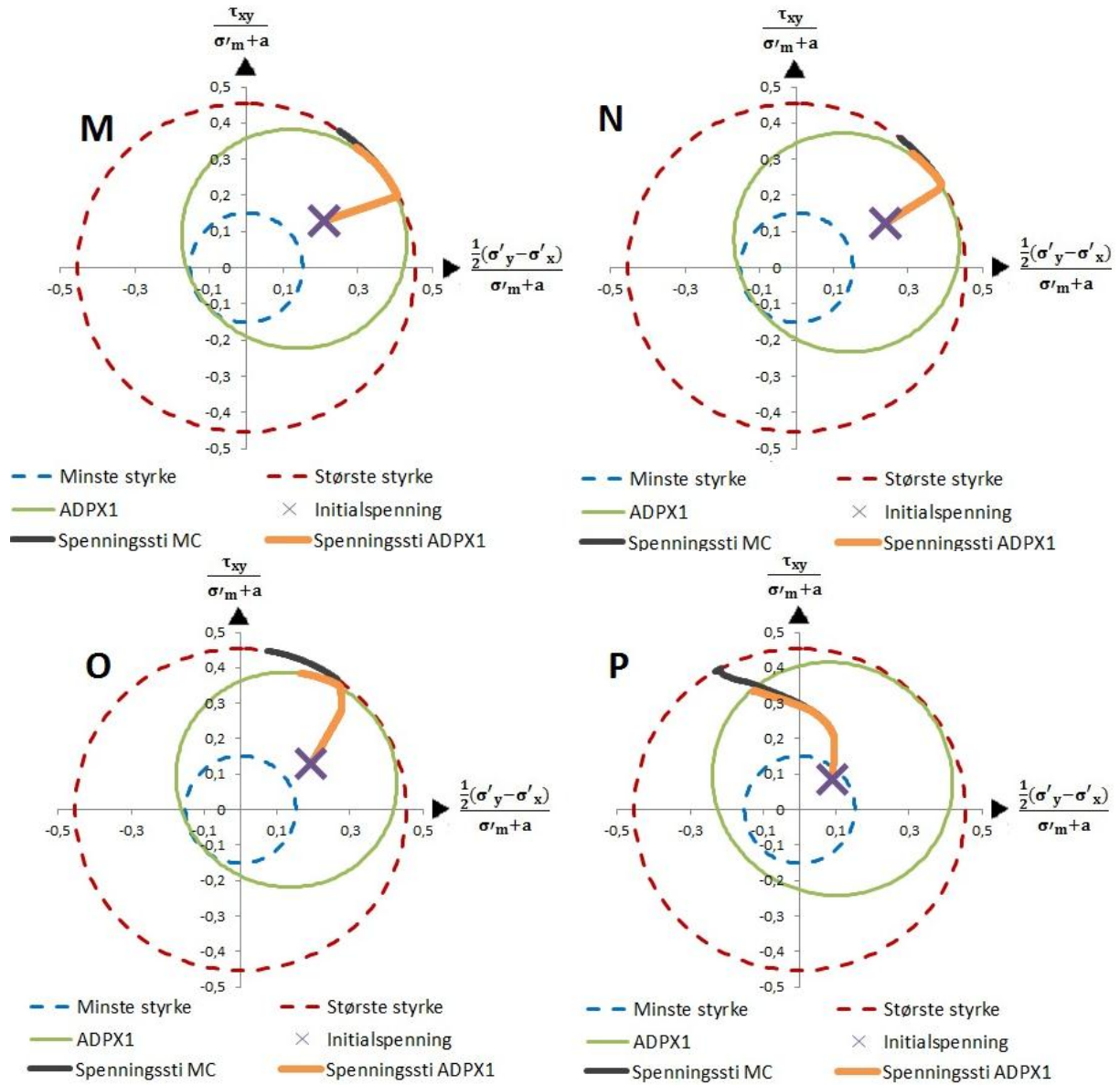
D-3: Kritisk skjærflate med utvalgte punkter langs kritisk bruddflate beregnet med MC



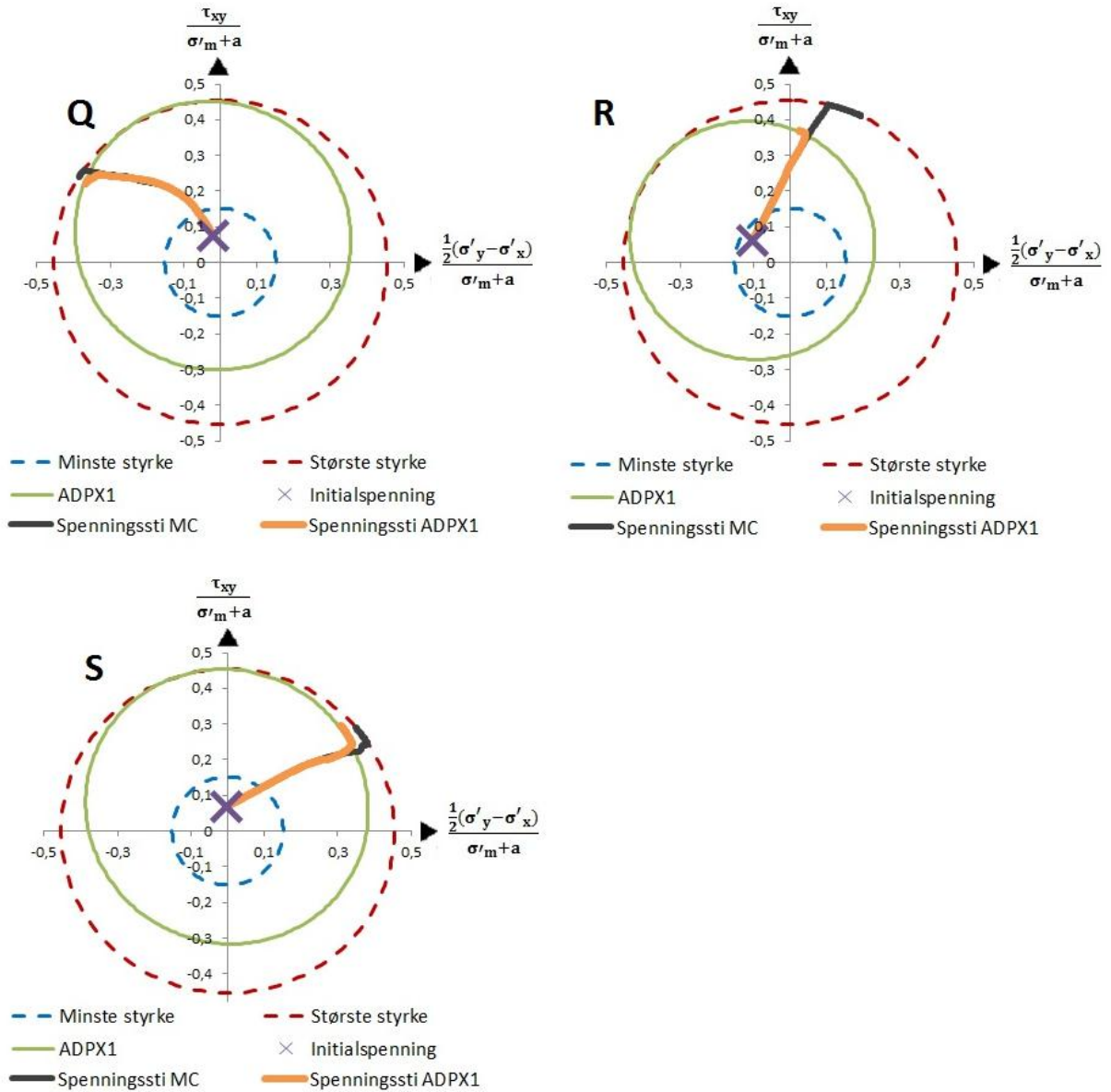
D-4: Kritisk skjærflate med utvalgte punkter langs kritisk bruddflate beregnet med ADPX1



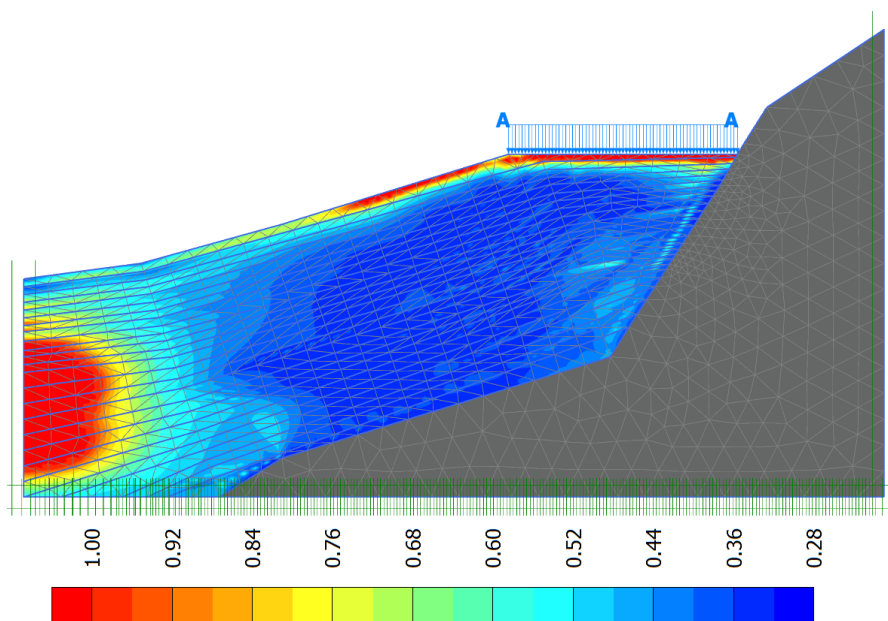
Bilag D- Output og spenningsstier analyse lastretningsendringer som følge av fylling



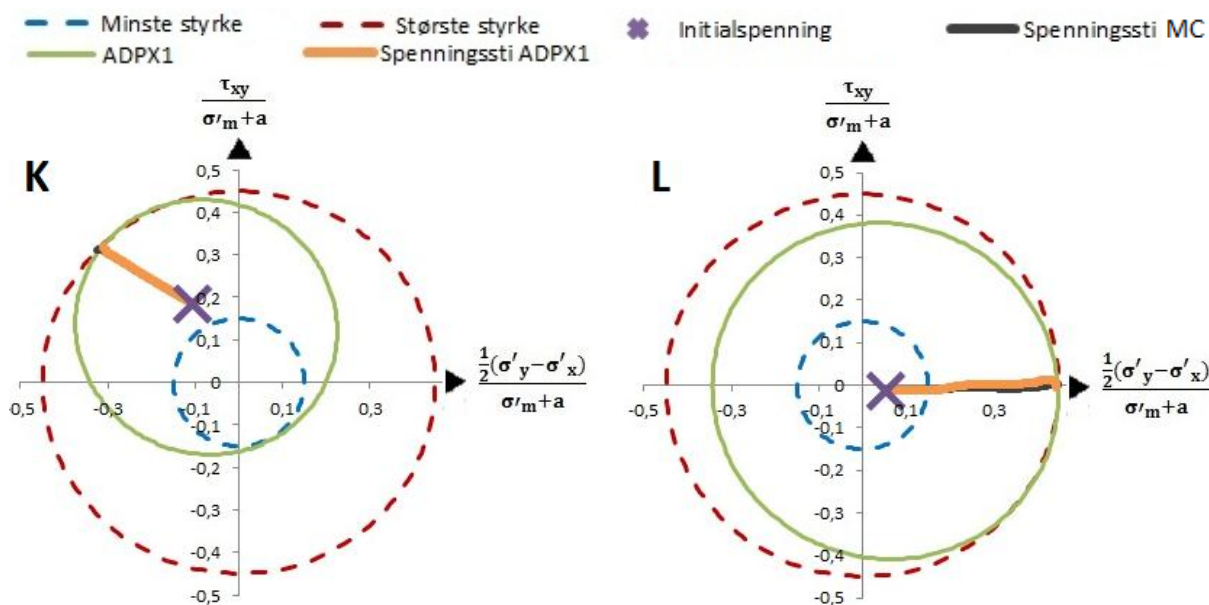
Bilag D- Output og spenningsstier analyse lasttretningsendringer som følge av fylling



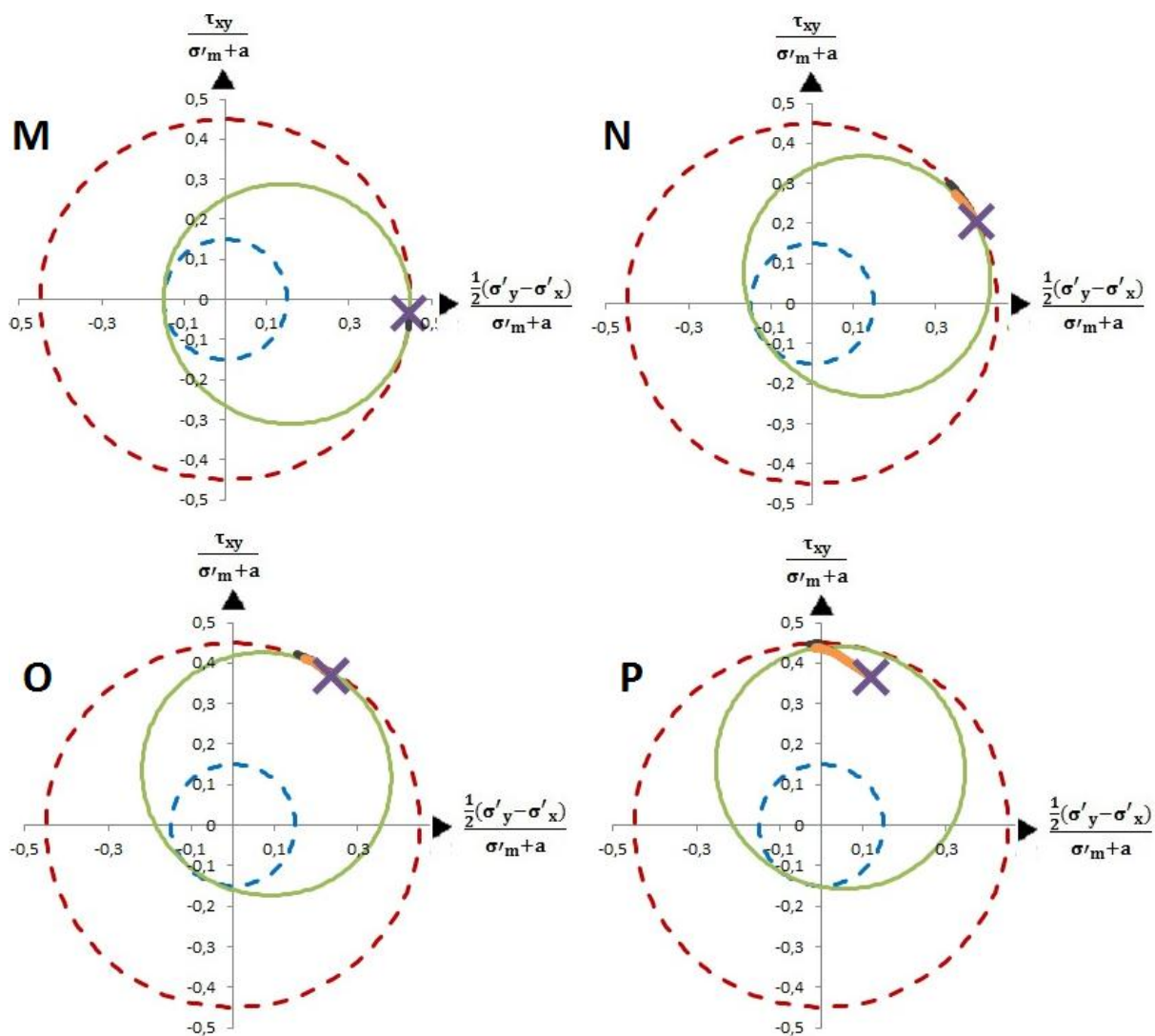
Bilag E –Output og spenningsstier analyse lastretningsendringer som følge av last i skråningen i Kattmarka

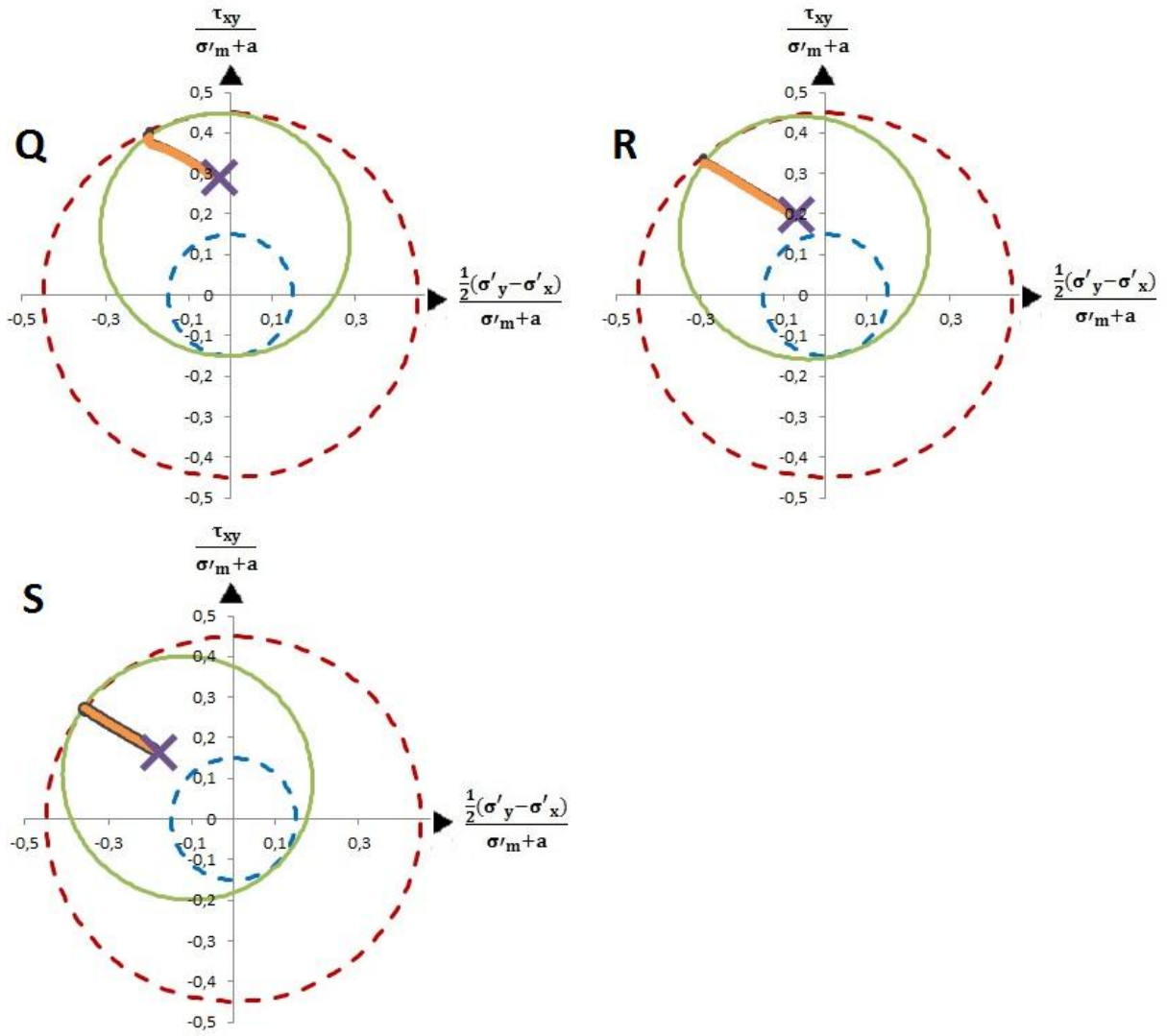


E-1: $\xi=\eta$ for skråningen i Kattmarka



Bilag E–Output og spenningsstier analyse lastretningsendringer som følge av last i skråningen i Kattmarka





Bilag F - Effekt av anisotropi på skjærspenninger på udrenert styrke

I dette bilaget blir effekten av anisotropi på skjærspenninger forsøkt vurdert. For å vurdere denne effekten er en materialmodell med samme prinsipper som ADPX1 men uten hensyn til anisotropi utviklet. Denne modellen er benyttet for å beregne sikkerhetsfaktoren for skråningen i Kattmarka samt Rabstads idealskråning. På bakgrunn av resultatene, er effekten av hensynet anisotropi på udrenert skjærstyrke vurdert.

Modell der $\eta = 0$

Modellen bygger på de samme prinsippene som ADPX1-modellen, med $\eta=0$. Dermed blir ξ og $\bar{s}_{u,beregnet}$ som i henholdsvis Likning F-1 og Likning F-2.

$$\xi = \frac{\frac{1}{2} \sin \varphi \left(1 - \frac{1}{B}\right) \left[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a) \right]}{|\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}|} \leq 1 \quad \text{Likning F-1}$$

$$\bar{s}_{u,beregnet} = \text{MAKS} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \left[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a) \right] \sin \varphi - \left| \frac{1}{2} \xi (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0}) \right| \\ \frac{1}{4} \sin \varphi \left(1 + \frac{1}{B}\right) \left[(\sigma'_{y0} + a) + (\sigma'_{x0} + a) \right] \end{array} \right\} \quad \text{Likning F-2}$$

Resultat

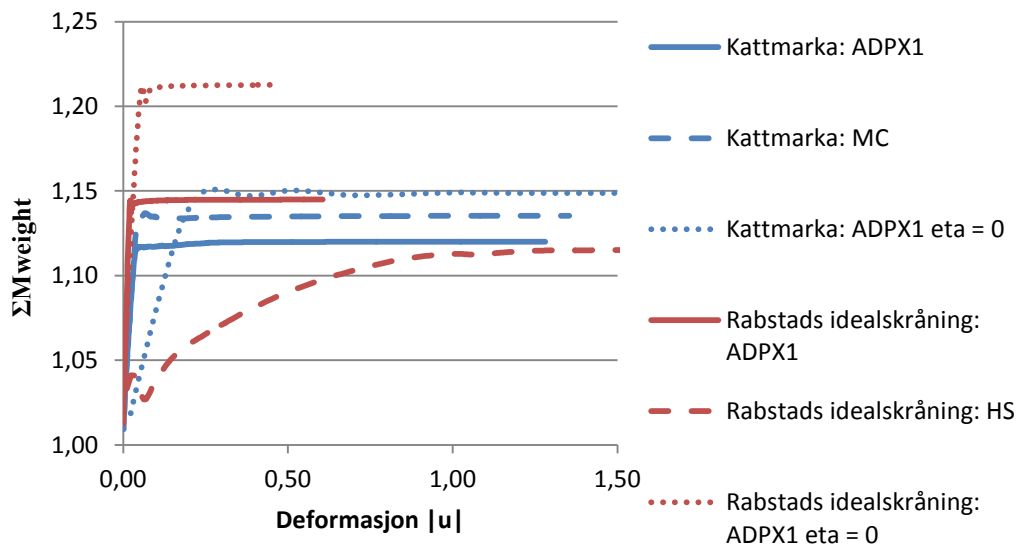
Ved å se på spenningsstiene, kommer det frem samme problem er gjeldene her, som beskrevet i selve oppgaveteksten. I situasjoner der skjærspenningene er høye, vil initialspenningene ligge utenfor flaten avgrenset av flytekriteriet i tilfeller der det ikke blir tatt hensyn til anisotropi på skjærspenninger.

Spenningsstier i et utvalg punkter langs skjærflaten i Kattmarka og deres plassering, er vist i slutten av bilaget. I punkter der initialspenningstilstanden ligger innenfor flytekriteriet, oppfører modellen seg som forventet. Dette er for eksempel tilfellet i Punkt S, der det kommer tydelig frem at hensyn til anisotropi på skjærspenninger vil gi en økt sikkerhet i tilfeller der spenningene har samme retning som initialspenningstilstanden. Punktet ville også hatt en redusert styrke dersom skjærspenningen endret fortegn.

Punkt N viser den umulige tilstanden, der initialspenningen ligger utenfor flytekriteriet. Spenningsstien viser at spenningene i punktet likevel øker. Det ser ut til at kun punkter med initialtilstand på innsiden av flytekriteriet kan gå til brudd, mens spenningene i øvrige punkt vil kunne øke fritt, da de aldri vil krysse flytekriteriet. Dermed vil de punktene som naturlig vil være nære brudd initialt, ikke medregnes, og en unaturlig høy sikkerhet vil beregnes Dette er vist i F-1, som viser resultatene fra stabilitetsberegningene. I begge skråningene, vil sikkerheten være høyere dersom det ikke er tatt hensyn til anisotropi på skjærspenninger. Ved

å se på de opptegnede flytekriteriene i slutten av bilaget, kommer det frem at styrken skal være lik eller høyere ved å ta hensyn til anisotropi på skjærspenninger i alle punkt, dersom materialet blir belastet i samme retning som initialspenningen.

Som det kommer frem i Figur F-1, er konsekvensene av at flytekriteriet ikke inkluderer initialspenningen større for Rabstads idealskråning enn for skråningen i Kattmarka. Dette kommer av at flere punkt i Kattmarkaskråningen har lav sikkerhet mod brudd i initialtilstanden. Selv om enkelte punkt ligger utenfor, og dermed ikke vil gå til brudd, er det nok punkter som ligger akkurat innenfor til at disse raskt vil danne en bruddflate.

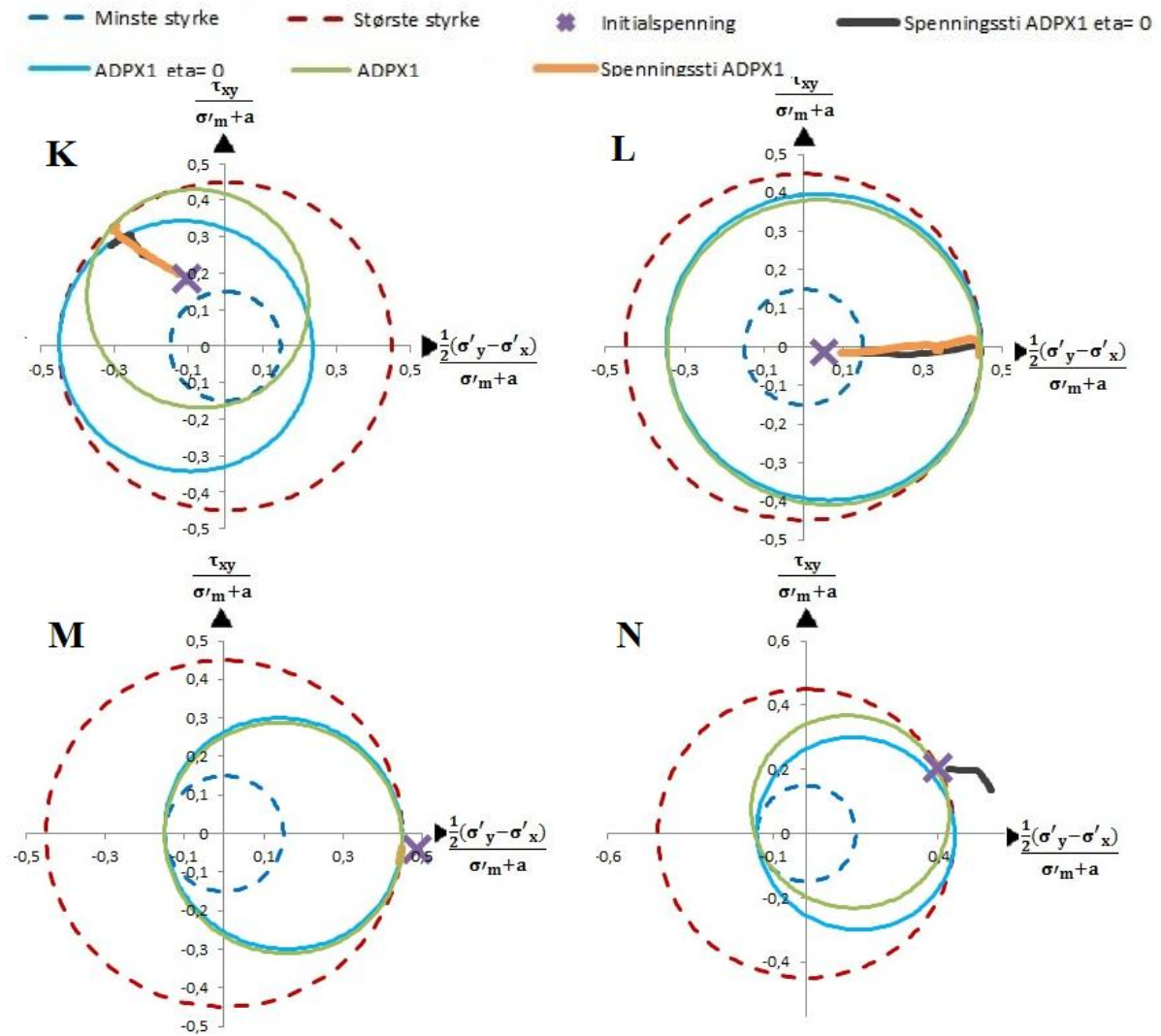


F-1: Konsekvens av et flytekriterium som ikke inkluderer initialspenningstilstanden

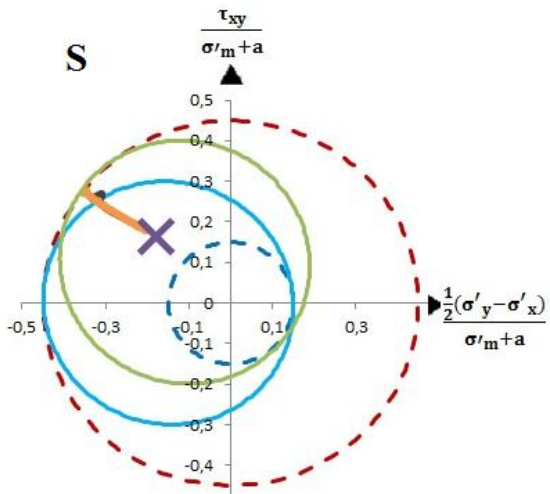
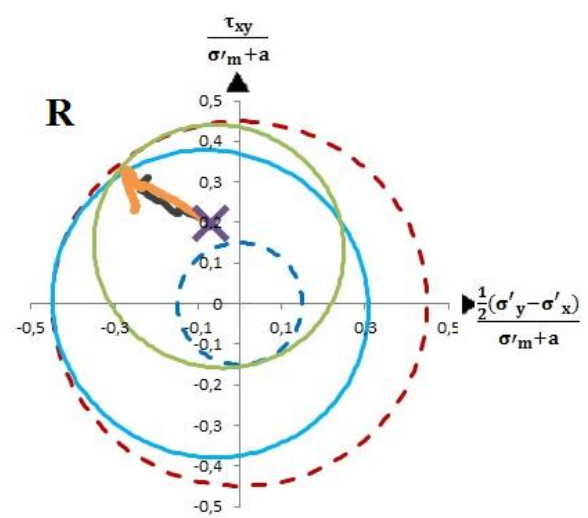
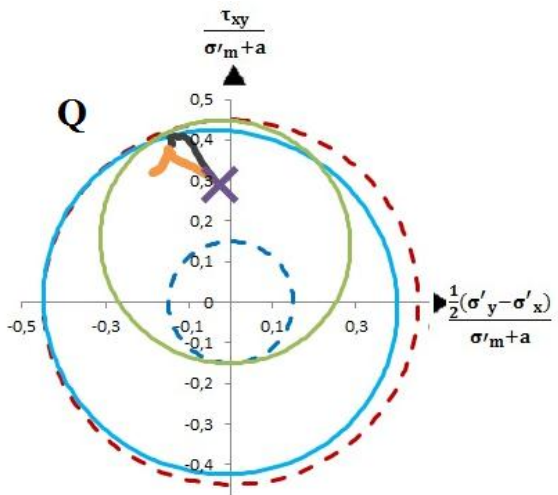
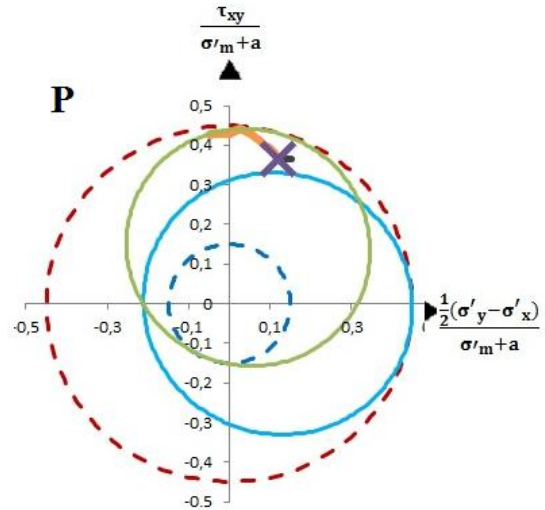
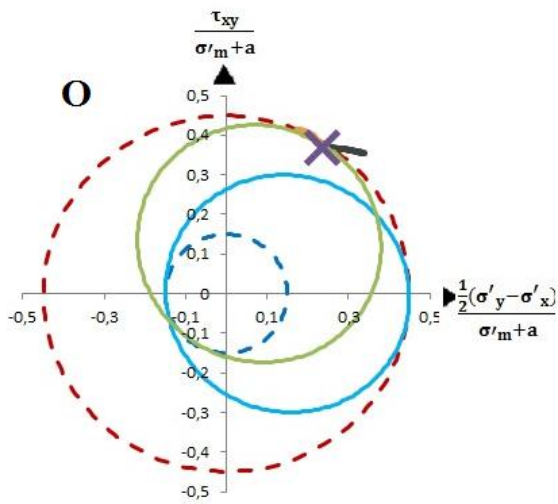
Konklusjon

Resultatene i dette bilagte vil ikke kunne benyttes til å få tall på hvor stor økning i sikkerhetsfaktor som kan forventes ved å ta hensyn til anisotropi på skjærspenninger. Derimot kommer det tydelig frem, at med de gitte forutsetningene for modellen dette hensynet er helt nødvendig for å få et brukbart resultat. I motsatt tilfelle vil initialspenningen havne på utsiden av flytekriteriet, noe som ikke er mulig.

Bilag F- Effekt av anisotropi på skjærspenninger på udrenert styrke



Bilag F- Effekt av anisotropi på skjærspenninger på udrenert styrke



Bilag G - Oversikt over tilstandsparametere for output i Plaxis

Parameternummer	Parameter
State Parameter 1	σ'_x
State Parameter 2	σ'_y
State Parameter 3	τ_{xy}
State Parameter 4	Bekrefter at initialspenningene er lagret. Skal være lik én.
State Parameter 5	$\frac{\tau_{xy0}}{\sigma'_{y0}}$
State Parameter 6	$\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{B}\right) \sin\varphi$
State Parameter 7	$\frac{1}{2} [(\sigma'_{y0+a}) + (\sigma'_{x0+a})]$
State Parameter 8	$s_u = \frac{1}{2} [(\sigma'_{y0+a}) + (\sigma'_{x0+a})] \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{B}\right) \sin\varphi$
State Parameter 9	$\left(\frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0})\right)^2$
State Parameter 10	τ_{xy0}^2
State Parameter 11	$\sqrt{\left(\frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0})\right)^2 + \tau_{xy0}^2}$
State Parameter 12	$\sin\varphi$
State Parameter 13	$\sin\varphi - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{B}\right) \sin\varphi$
State Parameter 14	Hvis $\sqrt{\left(\frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0})\right)^2 + \tau_{xy0}^2} > 0$ så $\frac{\sin\varphi - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{B}\right) \sin\varphi}{\frac{\frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0})^2 + \tau_{xy0}^2}{\frac{1}{2} [(\sigma'_{y0+a}) + (\sigma'_{x0+a})]}}$ Ellers 0
State Parameter 15	$\xi = \eta$
State Parameter 16	$\xi \sqrt{\left(\frac{1}{2} (\sigma'_{y0} - \sigma'_{x0})\right)^2 + \tau_{xy0}^2}$
State Parameter 17	$\overline{s_u}$
State Parameter 20	s_u^A
State Parameter 21	s_u^P
State Parameter 22	s_u^D
State Parameter 23	s_u^P / s_u^A
State Parameter 23	s_u^D / s_u^A

Bilag H – Fortrankode

Kun deler av koden med endringer er vist i dette bilaget. For fullstendig programkode henvises det til Rabstads masteroppgave. Referanse finnes i referanselisten i hoveddelen av denne oppgaven (16)

Usr addG.for:

```

Select Case (iMod)
  Case (1)
    ! ModName = 'ADPXX'
    Select Case (iParam)
      Case (1)
        ParamName = 'G'          ; Units      = 'F/L^2#'
      Case (2)
        ParamName = 'nu'        ; Units      = '-'
      Case (3)
        ParamName = 'phi' ; Units      = '-'
      Case (4)
        ParamName = 'a'; Units      = 'F/L^2#'
      Case (5)
        ParamName = 'B'          ; Units      = '-'
      !Case (6)
        !ParamName = 'eta'        ; Units      = '-'
      Case Default
        ParamName = '???'        ; Units      = '???'
    End Select
  Case Default
    ! model not in DLL
    ParamName = ' N/A '          ; Units      = ' N/A '
End Select

```

Main G.for

Parameters that can be changed if needed

```
!-----
```

```
!      Numbers of StateVariables
      nStatV = 17
```

```

!-----
--
! initial stateV (IDTask 1)
!-----
--

      Init = StVar0(4)

      IF (IDTask .Eq. 1) THEN

          IF (INIT .NE. 1 .AND. Time0 .EQ. 1) THEN
              ! Assume gravity loading takes one day
              CALL MZeroR( StVar , nStatV )
              CALL MZeroR( StVar0, nStatV )
              StVar(1) = Sig0(1)
              StVar0(1) = Sig0(1)
              StVar(2) = Sig0(2)
              StVar0(2) = Sig0(2)
              StVar(3) = Sig0(4)
              StVar0(3) = Sig0(4)
              StVar(4) = 1
              StVar0(4) = 1
              StVar(5) = Sig0(4)/Sig0(2)
              StVar0(5) = Sig0(4)/Sig0(2)
              StVar(6) = ((0.5*sin(Props(3)*pi/180))* (1.+1./Props(5)))
              StVar0(6) = ((0.5*sin(Props(3)*pi/180))* (1.+1./Props(5)))
              StVar(7) = ((-0.5*(StVar(2)+StVar0(1)+2.*(-Props(4))))))
              StVar0(7) = ((-0.5*(StVar0(2)+StVar0(1)+2.*(-Props(4))))))
              StVar(8) = StVar(6)*StVar(7)
              StVar0(8) = StVar0(6)*StVar0(7)
              StVar(9) = ((0.5 * (StVar0(1)-StVar0(2)))**2.)
              StVar0(9) = ((0.5 * (StVar0(1)-StVar0(2)))**2.)
              StVar(10) = ((-StVar0(3))**2.)
              StVar0(10) = ((-StVar0(3))**2.)
              StVar(11) = sqrt(StVar0(10) + StVar0(9))
              StVar0(11) = sqrt(StVar0(10) + StVar0(9))
              StVar(12) = sin(Props(3)*pi/180.)
              StVar0(12) = sin(Props(3)*pi/180.)
              StVar(13) = (StVar0(12) - StVar0(6))
              StVar0(13) = (StVar0(12) - StVar0(6))

              if (StVar(11) .GT. 0.) Then
                  StVar(14) = (StVar0(13)/(StVar0(11)/StVar0(7)))

                  StVar0(14) = (StVar0(13)/(StVar0(11)/StVar0(7)))
              else
                  StVar(14) = (0.)
              end if

              if (StVar0(14) .GE. 0. .AND. StVar(14) .LE. 1.) then
                  StVar(15) = StVar0(14)
              end if
          end if
      end if

```

```

        StVar0(15) = StVar0(14)
    else
        StVar0(15) = (1.)
        StVar(15) = (1.)
    end if
    StVar(16) = StVar0(15) * StVar0(11)
    StVar0(16) = StVar0(15) * StVar0(11)

    if (StVar0(12)*StVar0(7) .GT. StVar0(8)+StVar0(16)) then
        StVar(17) = (StVar(12) * StVar(7)) - StVar(16)
        StVar0(17) = (StVar(12) * StVar(7)) - StVar(16)
    else
        StVar(17) = StVar(8)
        StVar0(17) = StVar(8)
    end if

```

```

    END IF

```

```

END IF

```

```

!-----
--
! calculation start (IDTask 2)
!-----
--
    If (IDTask .Eq. 2) Then
        ipl      = 0
        xG       = Props(1)      ! G
        xNu      = Props(2)      ! nu
        phi      = Props(3)      ! phi
        a        = Props(4)      ! attraction
        B        = Props(5)      ! max/min scaled shear strength
        !eta     = Props(6)

        s_u     = StVar0(17)
        xi      = StVar0(15)
        eta     = xi

        ! Apply anisotropy factors
        xStVar0(1) = xi * StVar0(1)
        xStVar0(2) = xi * StVar0(2)
        xStVar0(3) = eta * StVar0(3)

```


Vedlegg 1

MASTEROPPGAVE

(TBA4900 Geoteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2012

For

Marit Isachsen

Effekt av anisotropi på udrenert skjærstyrke i naturlige skråninger

BAKGRUNN

Kunnskap om virkningen av anisotropi på udrenert skjærstyrke har ført til jordmodeller som NGI-ADP som finnes implementert i elementmetodeprogrammet Plaxis. I denne modellen antas anisotropien å følge vertikalen ved at største hovedspenning initialt er antatt å være vertikal.

I en hovedoppgave utført i 2011 implementerte Kristoffer Rabstad en utvidet ADP-modell (ADPXX) med utgangspunkt i de samme prinsippene som i NGI-ADP, der hovedspenningen initialt kunne ha en vilkårlig retning. Dette innebærer at den midlere styrken i en naturlig skråning i større grad blir dominert av aktiv styrke, og dermed øker også sikkerhetsfaktoren. I et enkelt eksempel viste Rabstad at sikkerhetsfaktoren i en skråning kunne øke med inntil 30 %.

OPPGAVE

Beskrivelse av oppgaven

Det er ønskelig at kandidaten skal sette seg inn i egenskapene ved den brukerdefinerte modellen, ADPXX. En skråning i Kattmaka, samt en eller to enkle idealskråninger skal benyttes for å dokumentere disse. Den opparbeidede kunnskapen skal benyttes til å vurdere om modellen oppfører seg hensiktsmessig. Modellen skal også benyttes til å fremheve effekten av å ta hensyn til anisotropi på initialspenningene, fremfor å regne isotropt.

Målsetting og hensikt

Hensikten med oppgaven er å dokumentere egenskapene ved den brukerdefinerte ADP-modellen (ADPXX), samt å finne ut hvilken effekt hensynet til anisotropi har på den udrenerte skjærstyrken. Det kan være aktuelt å vurdere endringer i modellen og implementere disse.

Deloppgaver og forskningsspørsmål

- Et kort litteraturstudie der temaer som er essensielle for oppgaven, skal presenteres. Hovedfokuset skal være på effekt av anisotropi på udrenert styrke, samt hvilke faktorer som vil påvirke denne effekten.
- Initialspenningene i en naturlig skråning i Kattmarka skal beregnes og vurderes, slik at de i størst mulig grad gjenspeiler reelle spenninger.
- En stabilitetsanalyse for skråningen i Kattmarka skal gjennomføres med den brukerdefinerte materialmodellen. Resultatene skal sammenliknes med kjente verdier for skråningen.
- Modellens egenskaper skal vurderes. Skråningen i Kattmarka og andre enkle eksempler bør benyttes for å få frem vesentlige egenskaper ved modellen. Kandidaten skal vurdere om endringer i modellen vil være hensiktsmessig, og forslag til endringer skal i så tilfelle fremlegges og vurderes. Dersom de eventuelle endringene kan innføres i den originale Fortrankoden uten å ødelegge oppbyggingen av modellen, skal også dette utføres.

Innleveringsfrist:

Arbeidet med oppgaven starter 16. januar 2012

Besvarelsen leveres senest ved registrering i DAIM innen 11. juni 2012 kl 1500.

Faglærer ved instituttet: Prof. Steinar Nordal

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 07.06.2012,