

Intern rapport nr. 1747

Stabilitetsprogrammet JAKOBINE - Bakgrunn

November 1994

Veglaboratoriet

Stabilitetsprogrammet JAKOBINE - Bakgrunn

Sammenheng

Denne rapporten ble presentert ved kurs for Vegvesenets geotekniske saksbehandlere på Leangkollen 15. november 1994.

Rapporten beskriver hovedtrekkene i PC-programmet JAKOBINE og hvordan det ble til. Det foretas sammenligning med andre programmer, forskjeller i betraktningmåter og hva utslag dette kan ha for resultatet.

JAKOBINE er et program som er enkelt å bruke og som muliggjør rask oversikt over parametersensitivitet. Det gir tradisjonelle løsninger for Su-, ADP- aØ-beregninger, og har i tillegg en grei løsning for udrenert brudd på effektivspenningsbasis, her kalt aDØ-metoden. For denne benyttes treaksialresultatene, ikke bare med a og Ø, men også med spenningsstien til brudd, representert av poretrykkparameteren D.

Feilkilder og forenklinger ved stabilitetsberegninger generelt diskuteres. Å tilstrebe en nøyaktighet større enn våre kunnskaper når, er bortkastet. En teori eller et regneprogram har sine begrensninger og kan ikke erstatte et sunt geoteknisk skjønn.

Emneord: *Stabilitetsberegning, geoteknikk, regneark, dimensjonering*

Seksjon: *48 - Bærelag*
Saksbehandler: *Å. Knutson*
Dato: *November 1994*

/BN

Statens vegvesen, Vegdirektoratet
Veglaboratoriet

Postboks 8142 Dep, 0033 Oslo
Telefon: 22 07 39 00 Telefax: 22 07 34 44

Innhold

	side
1. FØR JAKOBINE BLE FØDT	2
2. JAKOB BLIR FØDT	2
3. JAKOBINE BLIR FØDT	3
4. LITT OM SAMMENSATTE GLIDESNITT	3
5. DE FIRE HOVEDTYPENE FOR BRUDDUTVIKLING	3
6. PORETRYKKSUTVIKLING OG UDRENERT BRUDD	7
7. SPENNINGSSITI TIL BRUDD OG D-PARAMETER	8
8. DEFINISJON AV SIKKERHETSFAKTOR/ MATERIALKOEFFISIEN	10
9. PÅLITELIGHET AV STABILITETSBEREGNING	11
10. SKJÆRFASTHET/STREKKFASTHET	12
11. REFERANSESLISTE	14

1. FØR JAKOBINE BLE FØDT:

Jeg kom første gang til Veglaboratoriet en sommerdag i 1955. Kaare Flaate tok meg inn som ferievikar. Han lærte meg stabilitetsberegning og setningsberegning. Det var gøy. Og så ble det geoteknikk som ble faget mitt etterhvert.

Veglab tok i bruk Publikasjon nr.16 fra NGI. Det var grunnbok og bibel. Nilmar Janbu hadde gitt innføring i stabilitetsberegning med sirkulære og sammensatte glideflater, og både for drenerte og udrenerte forhold.

Med tiden kom NGI med ADP-metoden. Spenningsstiene ble også mer sentrale i betraktningen av et brudds utvikling.

Regnestavene ble etterhvert byttet ut med kalkulatorer og smarte computere. Og data-programmer for stabilitetsberegning begynte å komme på moten.

Verden ble mer og mer spennende. Vi begynte å se behovet for å bygge om triaksen vår på Veglab. Vi ville ha mulighet for å kjøre "alle fire hovedtyper spennings-utvikling". Og vi ønsket et verktøy for tilsvarende stabilitets-beregning.

Leif Bjørkå og jeg utviklet diverse små data-programmer for kalkulatorer. Programmet "SPENSTI" tok form. Det skulle behandle hver lamelle som et triaksforsøk, med utgangspunkt i den aktuelle spenningstilstanden i lamellen. Og triaksforsøkene skulle kjøres tilsvarende.

Men vi fant ut at dette ble for abitiøst, komplisert og arbeidskrevende. Vi befant oss nå i slutten av 1980-årene.

2. JAKOB BLIR FØDT:

Vi bestemte oss for å møte problemet på en annen, og mer tradisjonell måte. Hovedsaken var å utvikle et enkelt program som kunne takle de allminnelige stabilitets-oppgavene og gjøre bruk av de tilgjengelige parameterne. Her var:

- * Vanlig Su-analyse
- * Vanlig a ϕ -analyse
- * ADP-analyse
- * aD ϕ -analyse

Den siste gjorde bruk av parameteren D for spenningsstiens utvikling fra konsoliderings-situasjonen frem til brudd.

Vi ville ha dette slik at data for løsning av alle disse kunne mates inn og programmet gi tilsvarende sikkerhets-faktor (materialkoeffisient) for såvel drenert som udrenert brudd. Programmet skulle takle lameller av grus og av leire i samme glidesnitt. Og det skulle være lett å sette inn nye data og foreta en sensitivitets-analyse for parameter-endringer.

ESAU fantes på NTH. Broren til Esau heter Jakob. JAKOB og ESAU har samme siktemål. Men der ESAU takler saken numerisk, tar JAKOB et grafisk utgangspunkt for formelutviklingen.

Jeg skal ikke trette leseren med utviklingen av formelgrunnet. Her kan jeg henvise til Håndbok 016 "Geoteknikk i vegbygging", kap.4 og til Intern rapport nr.1647 fra Veglaboratoriet, "JAKOBINE.XLS".

Jeg hadde utarbeidet dette sammen med Bjørkå, og nå ble det slutført sammen med Frode Oset, som programmerte det i FORTRAN, og Leif Sjøgren Eriksen som la dette inn i SINTRAN-systemet. Bjørn Dolva tok seg av triakssiden.

3. JAKOBINE BLIR FØDT:

SINTRAN systemet ble avlegs, og vi ønsket å få JAKOB inn i PC-alderen.

I formelgrunnet for JAKOB hadde jeg lagt inn en for-rutine for approksimativt overslag for initiell sikkerhetsfaktor (materialkoeffisient). Det ble en god del ekstra formler.

Nå viste det seg at iterasjonsprosessen i JAKOB i beregning av sikkerheten var såvidt rask og effektiv, at hele denne for-rutinen var unødvendig. Vi kunne eksempelvis sette $\gamma_m = 1.0$ som utgangsverdi og få samme svar vel så raskt.

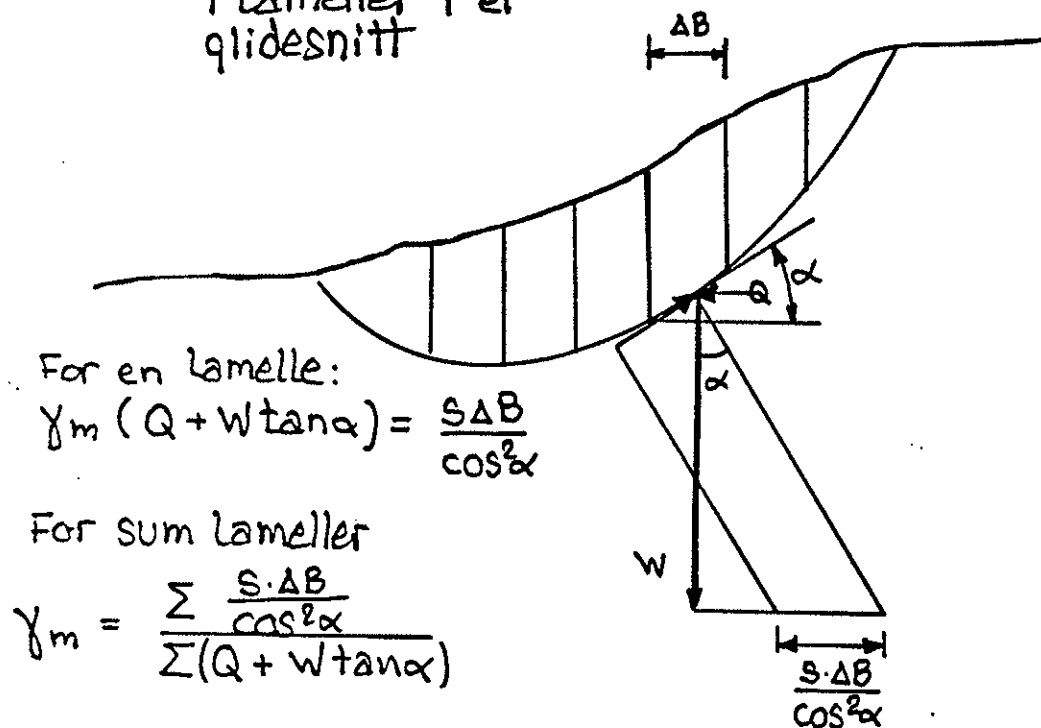
Så sløyfet vi rutinen og gikk rett på iterasjonen. Dette gjorde matematikken mer snerten og elegant. Og så ble, under hendene til J.Holme, JAKOB til JAKOBINE, den snertne, lille damen.

4. LITT OM SAMMENSATTE GLIDESNITT:

I riktig gamle dager regnet vi som oftest, for ikke å si alltid, med "sirkulær-sylindriske" glidesnitt. Vi regnet momenter om dreiningssentret av drivende krefter og stabiliserende krefter.

I sammensatte glidesnitt ser vi prinsippielt på likevekten mellom horisontalkrefter som driver og som stabiliserer.

Fig.1 Horisontalkrefter
i lameller i et
glidesnitt



I fig.1 ser vi en lamelle med såpeglatt glideflate. Skal en horisontalkraft holde den på plass, må den være

$$H1 = W * \tan \alpha \quad \text{lign.1}$$

Men dersom det er en skjærstyrke s langs glideflaten, blir samlet skjærkraft $s * \Delta B / \cos \alpha$. Og det tilsvarer en stabiliserende horisontalkraft :

$$H2 = s * \Delta B / \cos^2 \alpha \quad \text{lign.2}$$

Og er det et glidesnitt med lameller, summer vi sammen for alle horisontalkomponenter og får:

$$\gamma_m \sum (Q + W \tan \alpha) = f_0 \sum \frac{s * \Delta B}{\cos^2 \alpha} \quad \text{lign.3}$$

Der f_0 er en faktor som tar vare på friksjonsarbeid mellom lamellene etc. Janbu har gitt oss et diagram for enkel bestemmelse av denne.

Dette er formelen vi bruker for sammensatte glidesnitt. Janbu har også vist at for drenerte brudd er s i lign.3:

$$s = \frac{\sum (a + p_0') \tan \theta}{\sum \left(1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \theta}{\gamma_m} \right)} \quad \text{lign.4}$$

Dette er det tradisjonelle formelgrunnlaget vårt for stabilitetsberegning, og det er det vi har brukt i JAKOBINE også. Derfor vil JAKOBINE gi samme resultater for S_u -analyser, for ADP-analyser og for a_0 -analyser som dem vi vil få tradisjonelt.

Det "nye" med JAKOBINE ligger egentlig på aD_0 -analysen. Og grunnlaget for det skal vi se litt på nå.

5. DE FIRE HOVEDTYPENE FOR BRUDDUTVIKLING:

I fig.2 ser vi en Mohr sirkel for initielle spenninger tegnet inn i et MIT-diagram. Styrketaket her er lokus for toppunktet i bruddsiklene. Det danner vinkelen ϑ med horisontalaksen, slik at

$$\tan \vartheta = \sin \theta \quad \text{lign.5}$$

Vertikalaksen viser største skjærspenning. Og horisontalaksen halve summen av de to effektive hovedspenningene. I praksis vil det si: Vertikalaksen viser radiene i sirklene, og horisontalaksen viser sentret i sirklene.

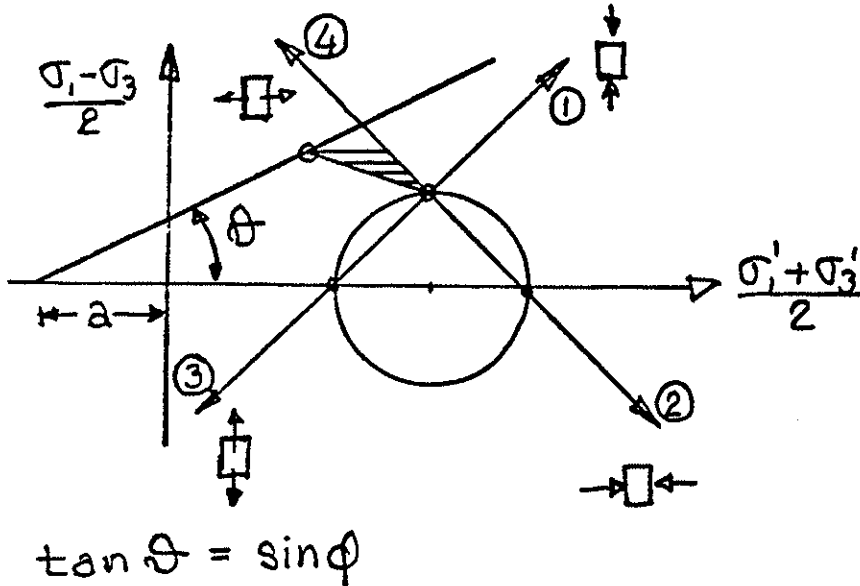


Fig. 2. De fire hovedtypene for bruddutvikling.

Dette er måten NGI benytter. På NTH plottes minste effektive hovedspenning langs horisontalaksen. Det har vært mye diskusjon om hva som er lurest. Det er omtrent like viktig som om en står opp med venstrebeinet eller høyrebeinet først. Det kommer an på hvordan senga står mot veggen.

NGI har i åresvis benyttet MIT-plottet for spenningssti i vurdering av stabilitetsberegninger. Det gir en symmetri som jeg har funnet nyttig for betraktningene her. Se fig.2:

Type 1: Et vanlig triaks-forsøk, der vi trykker prøven sammen aksielt, mens vi holder konstant celletrykk, vil, for drenerte forhold, gi en spenningssti som stiger 1:1 mot høyre.

Type 2: Et triaksforsøk der vi holder aksialtrykket konstant men øker celletrykket, vil for drenerte brudd, gi 1:1 ned mot høyre.

Type 3: Når aksialtrykket avtar, men celletrykket er konstant, går stien 1:1 ned mot venstre.

Type 4: Når celletrykket avtar og aksialtrykket er konstant, går stien 1:1 opp mot venstre.

Dette gjelder altså for drenerte forhold. Men der poretrykk bygger seg opp som reaksjon på spenningsendringene, kaller vi det udrenert. Og bruddet skjer da udrenert. Skjærfastheten er udrenert. Og det er ikke bare med vingebor, konus og enaksialt trykkforsøk vi måler udrenert skjærstyrke. Det gjør vi overalt hvor bruddutviklingen ikke er drenert.

6. PORETRYKKSUTVIKLING OG UDRENERT BRUDD:

Spenningsstien ved udrenert bruddutvikling avviker fra den drenerte spenningsstien så mye som poretrykket tilsier. På fig.2 ser vi også en rettlinjjet spenningssti frem til udrenert brudd.

Vi bruker D som retningsparameter for udrenert spenningssti. Og vi setter

$$\tan \beta = -2D \quad \text{lign.5.}$$

der β er vinkelen mellom vertikalen og spenningsstien. Dette er vist i fig.3. Figuren viser også hvordan det er et geometrisk forhold mellom initielle spenninger, skjærflategeometri, og styrkeparametrene $aD\phi$, som legges til grunn for beregningsformlene.

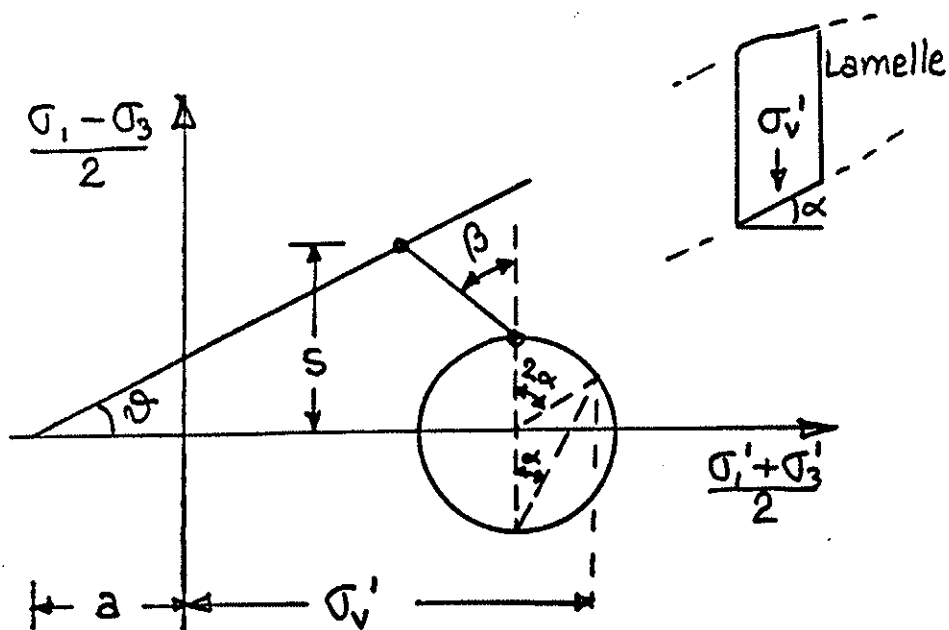
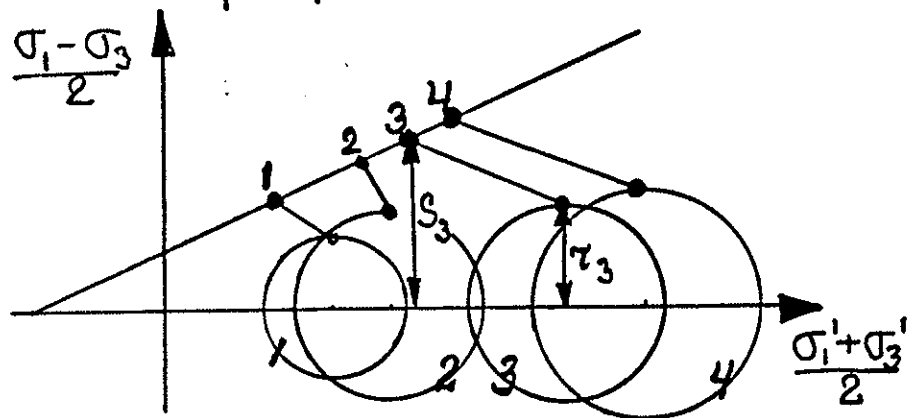


Fig. 3 Sammenheng mellom parametre i en $a-D-\phi$ -analyse.

Fig.4 viser hvordan hver lamelle har sin initielle Mohr-sirkel, og sin individuelle spenningssti til brudd. Vi antar alltid under stabilitetsberegninger at mobiliseringsgraden av skjærstyrken, eller med andre ord materialkoeffisienten \ sikkerhetsfaktoren, er lik for alle lamellene i glidesnittet. Det er på dette stadiet iterasjonsprosessen kommer inn i udrenerte aDø-beregninger.

Fig.4. Spennings-stier for fire lameller.



$$\gamma_m = \frac{S}{\tau} = \text{felles for lamellene}$$

7. SPENNINGSTI TIL BRUDD OG "D-PARAMETER":

Spenningsstien til brudd, er hittil fremstilt som rettlinjert. Det er den sjelden i praksis. Under tolkningen av triaksresultatene trekker vi en gjennomsnittlig rettlinjje, og på en slik måte at vi ikke er dristige eller uforsiktige. Dette er nærmere forklart i håndbok 016. kap.2. og i intern rapport nr.1261 fra Veglaboratoriet.

Det beste hadde jo vært om vi kunne ha lagt inn spenningsstien som den er i triaksforsøket, eller en hvilken som helst spenningssti vi måtte velge. Data-messig skulle det ikke være noe i veien for dette, men det ville komplisere programmet utover det vi tok mål av oss til å prestere.

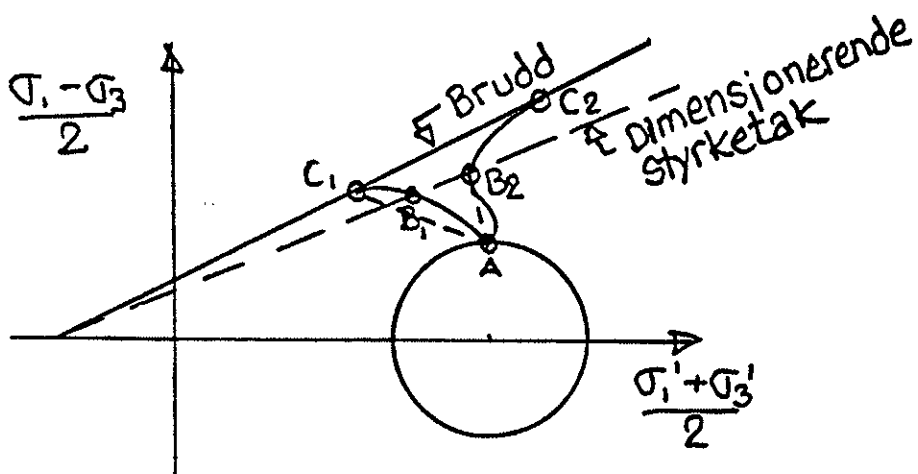


Fig. 5 viser to spennings-stier og to tolkninger:

Sti nr. 1 tilnærmes ved rettlinjen A-C₁

Sti nr. 2 tilnærmes ved rettlinjen A-B₂

Dette gir konservative, ikke dristige, verdier.

Uttrykkene dillatans og kontraktans er normalt brukt om selve bruddutviklingen. Det vil si i området helt ute ved styrketaket. Her har vi tillatt oss å bruke uttrykkene for spenningsstiens vandring fra initialtilstanden, hele veien mot brudd.

Et kontraktant materiale blir da et med høy poretrykkutvikling, der spenningsstien går ut mot venstre og skjærstyrken ved brudd blir relativt liten.

Et dillatant materiale blir da ett med liten eller negativ poretrykkutvikling, slik at spenningsstien skjærer mot høyre og skjærstyrken blir relativt stor.

Ved sterkt "kontraktante" materialer i denne rammen, kan altså et udrenert brudd være farligere enn et drenert brudd. Kvikkleirer er typiske for dette forholdet.

B. DEFINISJON AV SIKKERHETSFAKTOR \ MATERIALKOEFFISIENT:

For udrønerete brudd er tradisjonell definisjon av sikkerhetsfaktor:

$$FoS = \text{skjærstyrke} / \text{skjærpåkjenning} = \frac{s}{\tau} \quad \text{lign.6}$$

For drenerte brudd ved α_0 -beregninger er det vanlig å sette

$$FoS = \tan \alpha_0 / \tan \alpha \quad \text{lign.7}$$

der α er mobilisert del av α_0 .

Forskjellen på disse definisjonene fremgår av fig.6. Der ser vi at beregnet sikkerhet etter tangens-forholdet ville føre til en overvurdering av sikkerheten ved et "kontraktant" og undervurdering ved et "dilatant" materiale.

Dette er det tatt vare på i JAKOBINE, slik at definisjonen av sikkerhet \ materialkoeffisient er sortert etter hva slag analyse vi foretar. (Kfr.016 s.115)

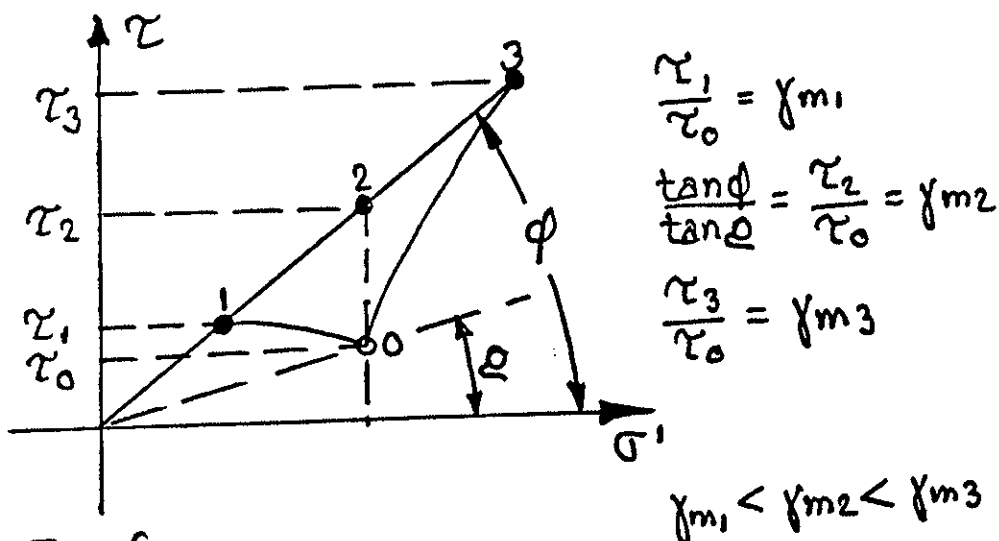


Fig. 6

Sikkerhetsfaktor/materialkoeffisient er avhengig av definisjon.

9. PÅLITELIGHET AV STABILITETSBEREGNING:

JAKOBINE gjør ikke krav på å fremstille fullkommenheten av stabilitetsberegning. Det er approksimasjoner her som kan kritiseres.

Men å oppnå større treffsikkerhet enn våre kunnskaper når, er alltid bortkastet. Jeg vil gjerne nevne noen punkter her:

* Toaksialt \ treaksialt:

Normalt regner vi glidesnitt som om de var uendelig lange, målt innover fra "papirplanet". Det gjør vi blant annet fordi det blir så fryktelig vanskelig ellers. Og så glemmer vi kanskje at dette kan ha vesentlig betydning.

* Ikke samme mobilisering av skjærstyrke:

Vi regner, som før sagt, med at alle lameller når brudd samtidig, eller at alle materialer er så snille at de beholder skjærstyrken fullt intakt i påvente av at nabo-materialer skal nå sin bruddstyrke, så de kan legge seg i sølan sammen.

Men vi vet jo at det er galt. En kvikkleire når brudd ved relativt liten deformasjon. Og så mister den nesten all skjærstyrken sin.

Oppå kvikkleiren har vi kanskje lagt en sprengtsteinsfylling. Fyllinga har nesten ikke rukket å mobilisere skjærmotstand før kvikkleira går vest. Slikt er lett å glemme bort når en putter inn skjærstyrken i beregningene. Det virker som om vi tror at kvikkleira kan henge seg fast i steinfyllinga, og glemmer at så snart kvikkleira ryker, så raser fyllinga ned i søla.

* Antakelsen av hovedspennings-element i triaks.

Vi prater om at triaksprøven er et "hovedspennings-element". Det hadde jo vært kjekt om den var det. Men hovedspenning har vi der skjærpåkjenningen er null. Ved begge ender av triaksprøven ligger det filtere.

Prøven vil gjerne utvide seg, men holdes tilbake av filteret. Da utvikles maksimal skjærspenning der. Ved midten av prøven, mot celletrykket derimot, er det laveste hovedspenning.

Vi har altså et komplisert spenningsbilde i triaksen. Men vi later som det er enkelt, og vi tyder forsøket ved å lure oss selv. Likevel går det vel ikke så verst?

* Antakelsen ved måling av poretrykk i triaks:

Vi later som vi måler poretrykkene ved skjærflaten i et triaksforsøk. Men vi måler poretrykkene ved endefilteret. Nå er jo spenningsforholdene her også i eller nær maksimalt skjær, så kanskje lykken er bedre enn forstanden?

Men vi har ingen garanti for at de målte poretrykkene, som vi så freidig trekker fra de påførte totaltrykkene, hører sammen. Vi har tatt avlesning av begge simultant. Det tar jo i virkeligheten tid for poretrykkene ved skjærflaten å vandre ut til filteret og bli målt. Og når de først kommer dit, er de ikke lenger hva de var.

* Den grunnleggende teorien kan være helsprø:

Vi har i etpar generasjoner feiret "effektivspenningsprinsippet" som en slag kosmisk grunnsannhet. Her kan det se ut til at leirer og stein og ur har nøyaktig samme skjærstyrke egenskaper. De har jo en a og en \emptyset . Vi kan tegne dette opp på papir. Og det ser overbevisende ut.

Men når du tar en kvikkleiresuppe og tømmer salt i den, og den tykner til, da står du overfor noe annet. Noe mystisk, med mineraler, salter, joner, dipolmomenter i vannmolekylene etc. Farvel kjære effektivspenningsprinsipp. det er mer mellom himmel og jord enn de fleste andre steder.

10. SKJÆRFASTHET \ STREKKFASTHET:

Da vi var svært unge lærte Mor oss å vaske hendene. Senere lærte vi Mohr's spennings-sirkler. Og det der husker vi. Sånn til husbruk, kanskje.

Men hva med Mohr's tøyningssirkler? Se på fig.7. På vertikalaksen har vi $\chi/2$ for skjærtøyning. På horisontalaksen har vi ϵ , hovedtøyning, positiv for kompressjon, negativ for tension.

Betrakt et kvadrat. Trykk det sammen aksielt. For et todimensjonalt materiale uten dillatans eller kontraktans, i tradisjonell betydning av disse ordene, vil kvadratet utvide seg sideveis like mye som du trykker det sammen. En kubus vil gå halvparten så mye ut til siden som du trykker den sammen aksielt. Sideutvidelsen er strekktøyning.

Dersom nå materialet går i stykker i strekk, heller enn i skjær, er bruddflaten ved minste hovedspenningsplan. Det vil si: materialet splittes i retning av største hovedspenning.

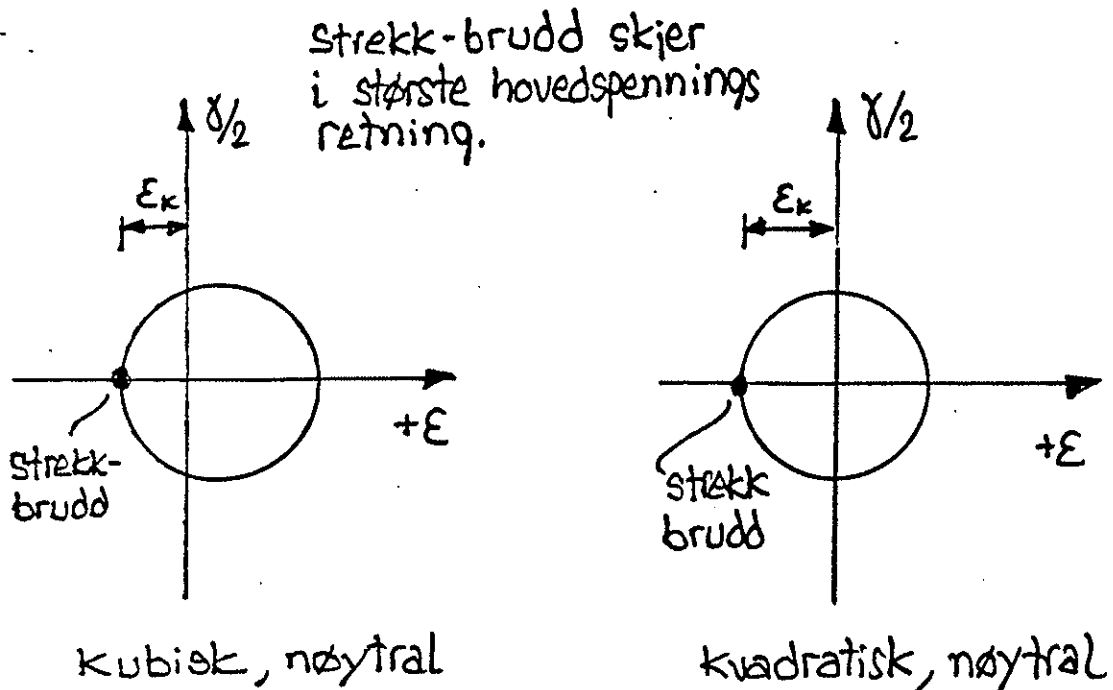


Fig.7. Mohr-sirkler for tøyingsbrudd.

Det er egentlig strekkstyrke det står dårligst til med hos mange jordarter. Og når våre triaksforsøk ryker som de gjør, tyder det ikke nødvendigvis på at de går i skjær, men like gjerne at de går i strekk. Bruddflatene ligger i største hovedspennings retning. Husk at triaksprøven ikke er noe "hovedspenningselement"

Når UFOene begynner å lande her, og vi får diskutere geoteknikk med folk fra Sirius og Pleiadene, kan det hende at de har en helt annen geoteknikk enn vi.

Det er spennende. La oss forberede oss!

REFERANSELISTE

BERRE T., BJERRUM L. (1973) Shear Strength of Normally Consolidated Clays. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8. Moskva 1973. Proceedings b.1.1, s.39-49.

BERRE T. (1976). Bruk av treaksial- og direkte skjærforsøk til løsning av geotekniske problemer. Bidrag til Nordisk Geoteknikermøte, Kjøbenhavn 1975. Norges Geotekniske Institutt. Publikasjon nr.110.

DOLVA B. (1989) Treaksialforsøk - 4 hovedtyper. Cand. Scient-oppgave, Institutt for geologi, Universitetet i Oslo.

FLAATE K. (1965). A Statistical Analysis of Some Methods for Shear Strength Determination in Soil Mechanics.. Meddelelse nr.24. Veglaboratoriet.

INSTITUTT FOR GEOTEKNIKK OG FUNDAMENTERING, NTH. (1979). EEU-kurs: Geotekniske beregningsprinsipper.

JANBU N., BJERRUM L., KJÆRNSLI B. (1956) Vegledning ved løsning av fundamenteringsoppgaver. Norges Geotekniske Institutt. Publikasjon nr.16.

JANBU N. (1970). Grunnlag i geoteknikk. Tapir forlag.

KNUTSON Å. (1986) Spenningsstier, tolkningsnett for treaks. Intern rapport nr.1261. Veglaboratoriet.

KNUTSON Å., BJØRKÅ L., OSET F. (1988). Stabilitetsberegning, spenningsstimetoden. Det 10. Nordiske geoteknikermøte. Oslo.

KNUTSON Å. (1986). SPENSTI-2D. Stabilitetsberegning ved spenningsstianalyse. Intern rapport nr.1260. Veglaboratoriet.

KNUTSON Å., AABØE R., DOLVA B., HOLME J. (1994) JAKOBINE.XLS brukerbeskrivelse. Intern rapport nr.1647. Veglaboratoriet.

OSET F. (1986) Treksialforsøk. Intern rapport nr.1263. Veglaboratoriet.

OSET F., SJØGREN ERIKSEN L., KNUTSON Å. (1989). Program JAKOB for stabilitetsberegning, brukerbeskrivelse. Eksempelsamling i geoteknikk. Intern rapport nr.1414. Veglaboratoriet.

STATENS VEGVESEN, VEGLABORATORIET. (1992) Geoteknikk i vegbygging. Håndbok nr.016.

SVANØ G. (1980) Effective Stress Analysis, Undrained. Program Documentation for "ESAU". Rapport nr. F.80.12. NTH.

AAS G. (1983) Geotekniske dimensjoneringsparametre for stabilitetsberegninger i leire. Eksempler på utvelgelse av karakteristiske skjærstyrkeverdier for aktuelle prosjekter. Rapport 59000-14. Norges Geotekniske Institutt.