

# Projekt 12404 - Släntstabilitet - Beräkning av progressiva skred i lösa leror

## Sammanfattning

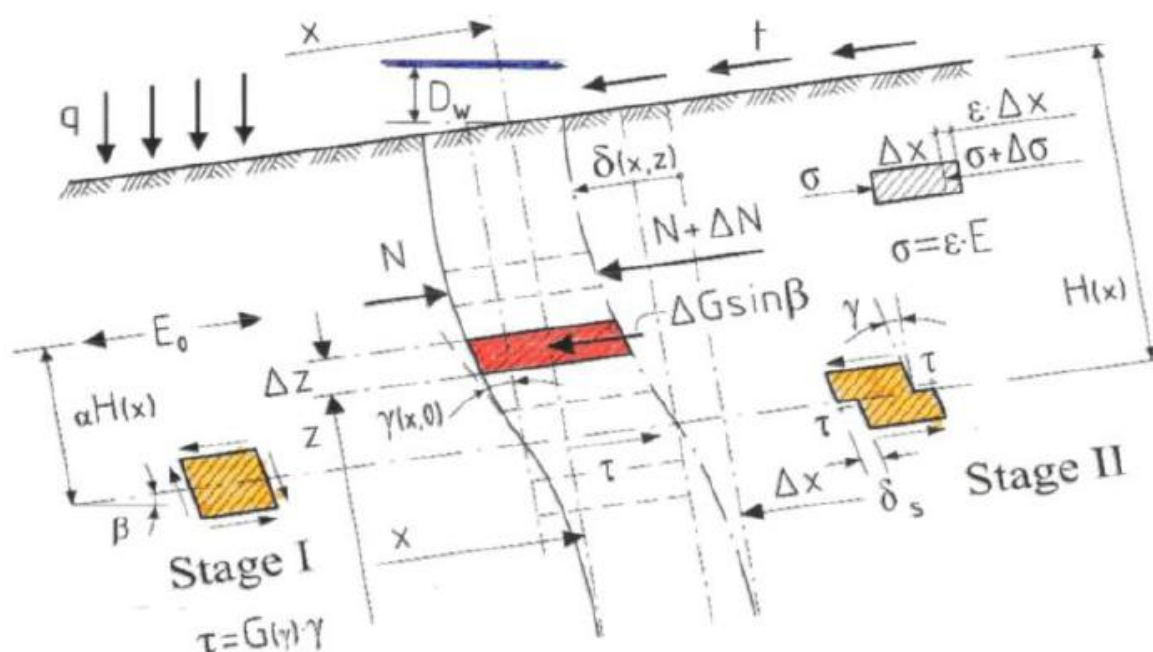
Efter det stora jordskredet i Tuve i Göteborg 1977 började Stig Bernander utveckla en finit differens-metod för släntstabilitet som beaktar deformationsmjuknandet i sensitiva leror. I modellen används som villkor att medeldeformationen orsakad av normalkrafter i varje element hålls kompatibel med deformationen orsakad av skjuvspänningar.

Modellen utvecklades och presenterades på olika internationella konferenser under 1980-talet och i en licentiatavhandling år 2000.

I detta projekt har modellen vidareutvecklats, förfinats och presenterats i en doktorsavhandling, Bernander (2011). Härvid har en Excel-version av tidigare programvara arbetats fram. Vidare förmedlar Stig Bernander sina erfarenheter av släntmodellering med fokus på vad som initierar ett skred och vilka faser en slänt går igenom innan ett skred utlöses.

## Finit differensmetod

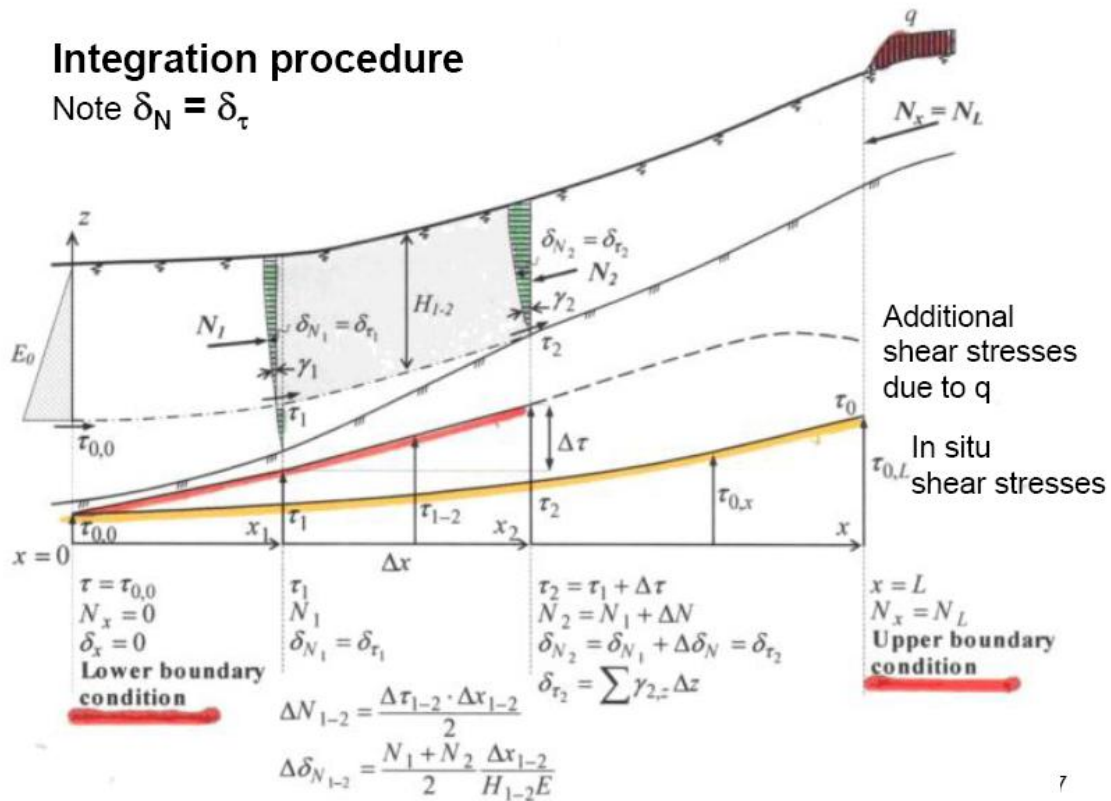
Den finita differensmetod som utarbetats illustreras i figurerna 1-3. I figur 1 visas geometri och laster samt uppdelning i element. Den stegvisa beräkningen illustreras i figur 2. Lerans deformationsmjuknande egenskaper vid ökad deformation illustreras i figur 3.



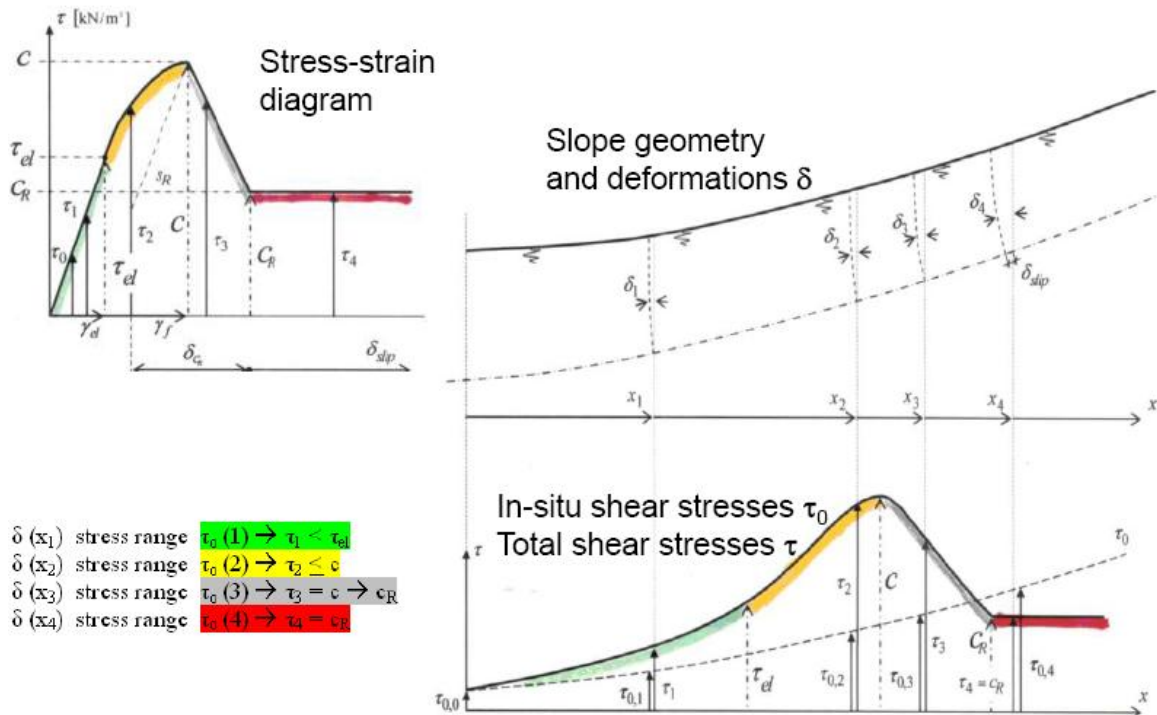
Figur 1. En normalkraft  $\Delta N$  orsakar en deformation  $\Delta \delta_N$ . En samhörande ökning av skjuvkrafterna  $\Delta \tau$  ger deformationer  $\Delta \gamma$  och  $\Delta \delta_\tau$ . Kompatibilitet kräver att  $\sum \Delta \delta_\tau = \sum \Delta \delta_N$ .

## Integration procedure

Note  $\delta_N = \delta_\tau$



Figur 2. Integrationsförfarande. Den ursprungliga skjuvspänningsfördelningen åskådliggörs av skjuvspänningar  $\tau_0$ . En yttre last  $q$  påförs upptill i slänten och ger upphov till en ökning av skjuvspänningarna med  $\Delta\tau$  och en ökning av normalkrafterna med  $\Delta N$ . Deformationerna i ett element  $\delta$  av dels skjuvspänningar och av dels normalkrafter beräknas och sätt lika.



Figur 3. Lerans deformationsegenskaper med töjningsmjukande vid ökande deformationer.

## Olika faser i utvecklingen av progressiva skred

Möjligheten att beakta tidsfaktorn vid analys av skred innebär att skredrisken inte – såsom vid traditionell plastisk brottbildning – kan baseras på en entydig brottsituation av statisk karaktär. Man måste istället skilja på olika faser hos progressiva skred. I denna rapport sker uppdelningen i sex faser enligt följande.

**Fas 1** - Rådande *tillstånd in situ*;

**Fas 2** - *Störningsfasen*, d v s det skede som kännetecknar den lasteffekt som utlöser skredet

**Fas 3** - Ett (i princip) *dynamiskt övergångsskede* då krafter p g a bristande jämvikt i släntens övre del överförs till stabilare mark längre ner i slutningen;

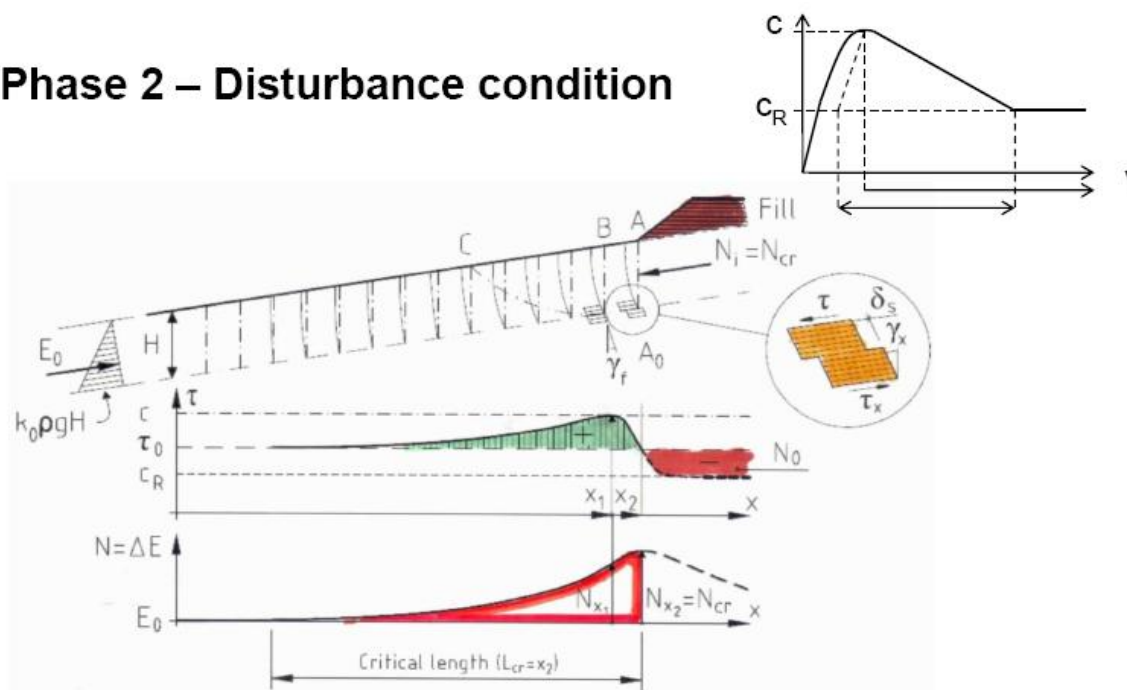
**Fas 4** - Ett *övergående* (eller i vissa fall *bestående*) *nytt jämviktstillstånd* med därtill hörande kraftspel;

**Fas 5** - *Dynamiskt sammanbrott* om passivt Rankine motstånd överskrids i det nya jämviktssläget. Denna fas utgör det som vanligen uppfattas som det egentliga skredet;

**Fas 6** - *Slutligt jämviktstillstånd*.

De olika faserna illustreras i figurerna 4 – 8.

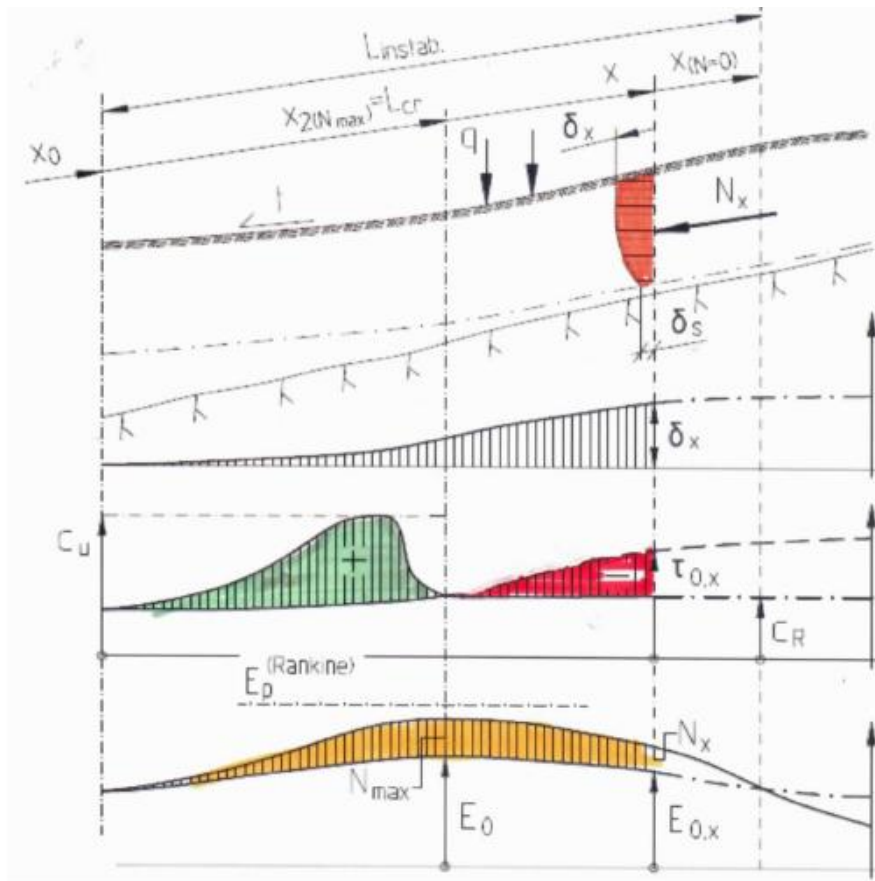
### Phase 2 – Disturbance condition



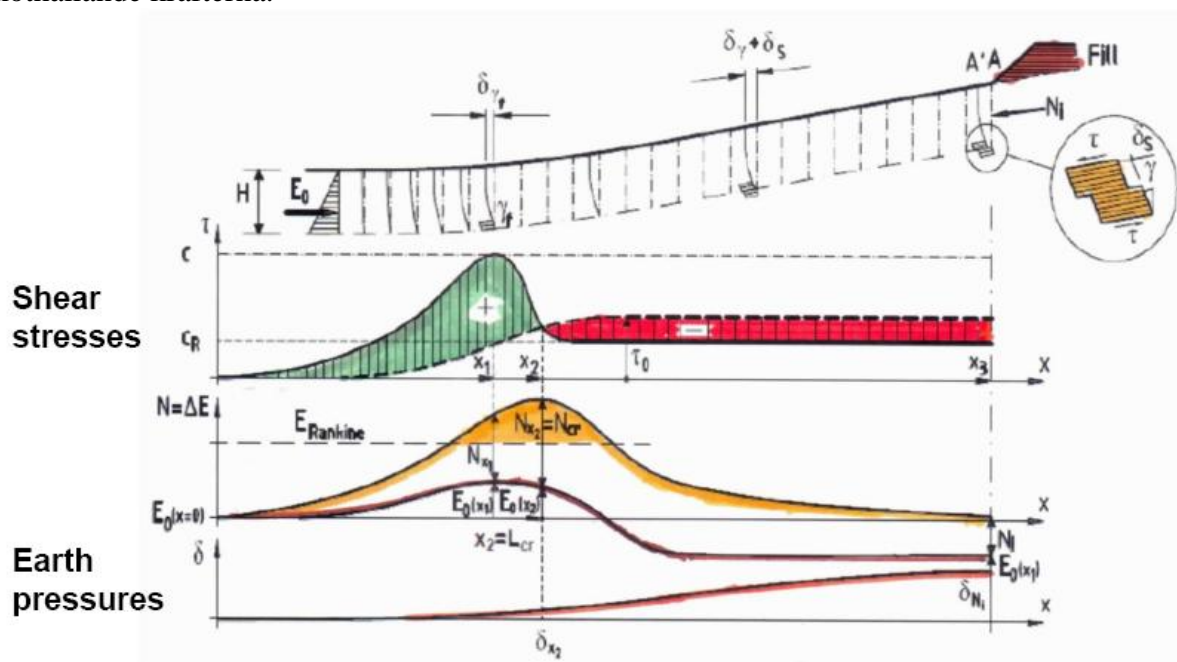
### Triggering failure condition in Phase 2

$$\text{The safety factor } F_s^I = N_{cr} / N_{load} \geq 1$$

Figur 4. Fas 2 – Störningsfasen med säkerhetsfaktor mot skred.



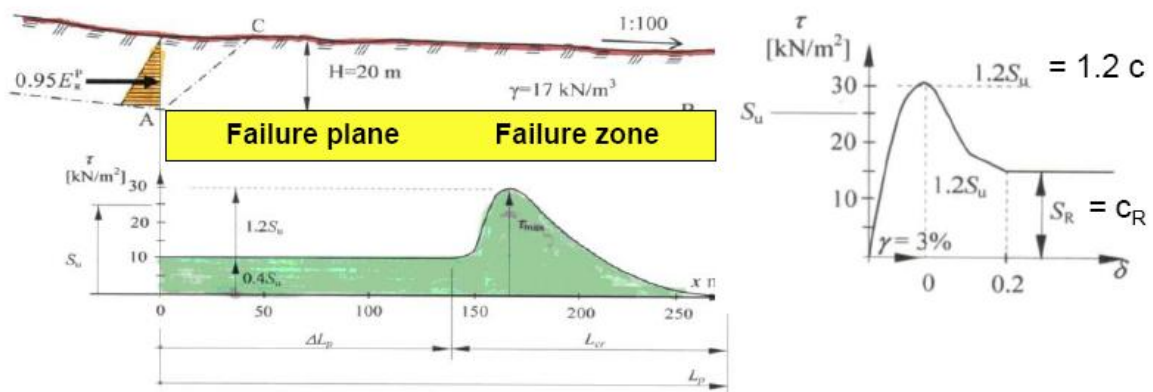
Figur 5. Fas 3. Den första dynamiska fasen. Den pådrivande kraften  $N$  är större än de motållande krafterna.



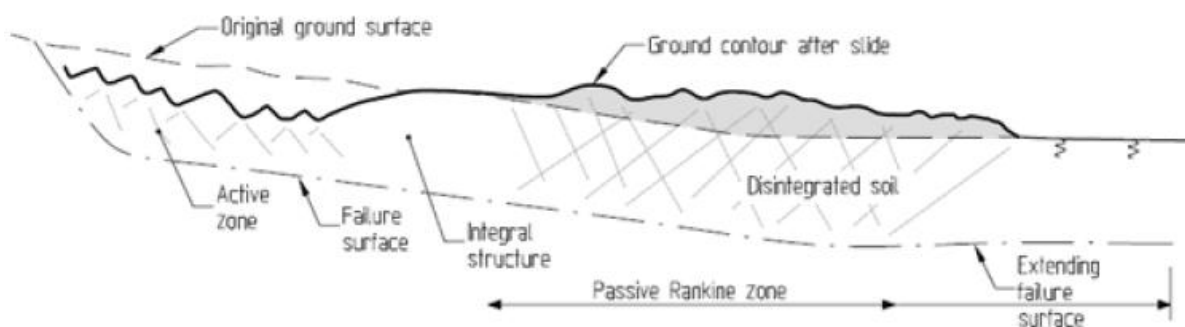
$$F_S^{II} = E_{\text{passive}} / (E_0 + N_x) \geq 1$$

15

Figur 6. Fas 4. Ett globalt jämviktstillstånd kan uppträda och skredet stannar av.



Figur 7. Skredet har stannat av i Fas 4 fastän brottzonen rört sig långt ut på i det närmaste plan mark.



Figur 8. Fas 5. Om jämvikt inte uppnås i Fas 4 utvecklas skredet vidare till ett globalt brott.

De olika faserna karakteriseras sinsemellan av i hög grad varierande tidsförhållanden

- dels i samband med störande inverkan av tillskottslast.
- dels i samband med uppkommande spänningsändringar och vid fortsatt brottbildning.

Varierande geometri, materialegenskaper, dräneringsförhållanden och portrycksutveckling i de olika faserna längs med det område som omfattas av skredrörelsen är också av *avgörande* betydelse för brottutvecklingen.

Dessa betingelser kan således medföra att inverkan av en initialt skredutlösande faktor upphör i ett senare skede av brottutvecklingen – d v s att en begynnande skredrörelse kan avstanna inom vilken som helst av Faserna 2, 3 och 4.

### Brottkriterier vid progressiv brottbildning

Resultaten från den föreslagna analysmetoden understryker nödvändigheten av att beakta deformationerna i jordmassan vid skred i långa slänter med deformationsmjuknande jord. Underlåtenhet härvidlag kan leda till allvarlig felbedömning av risken för *lokalt brott* i slänten och i synnerhet av omfattningen hos det *slutliga* skred som därmed kan utlösas. Analysen möjliggör identifiering av de verkligt kritiska förhållandena i en slänt med hänsyn tagen till lastfördelning, geometri och lokala egenskaper hos jordmaterialet.

Risk för progressivt brott föreligger om jordens resthållfasthet ( $c_R$ ) i någon del av en slänt vid någon tidpunkt kan komma att understiga rådande in situ spänningar d v s

$$c_R(t, \mathbf{x}) < \tau_0(\mathbf{x})$$

### Ändrade kriterier för brottsäkerhet

I samband med den föreslagna metodiken för analys av skred, vid vilken deformationerna beaktas, blir gängse sätt att definiera brottsäkerheten *utan fysikalisk mening* i de fall då resthållfastheten  $c_R < \tau_0$ . Följaktligen måste i dessa sammanhang säkerheten mot brott omformuleras med hänsyn till de villkor som är avgörande för uppkomst och utveckling av progressiv brottbildning. Följande brottvillkor vid koncentrerad tilläggslast föreslås

Med avseende på uppkomst av lokalt brott i del av slänten:  $F_s^I = N_{cr}/N = q_{cr}/q$

Med avseende på uppkomst av omfattande totalt skred  $F_s^{II} = E_p / (E_{0x} + N_{max})$

Om däremot  $c_R > \tau_0$  kan säkerhetsfaktorn formuleras på gängse vis på basis av mobiliserbar medelskjuvhållfasthet. Skjuvspänningsfördelningen i brottstadiet kan därvid beräknas med hjälp av den föreslagna progressiva beräkningsmodellen.

### Skreds utbredning över plan mark

En omdiskuterad och mindre väl utredd frågeställning beträffande vissa skred i lösa leror, har varit deras väldiga utbredning, karakteriserad av att passivzonen ofta sträckt sig hundratals meter bortom släntfoten varvid marken under hävning deformeras plastiskt till stort djup. Vid skreden i Surte och Tuve utgjordes exempelvis ca 50 resp. 60 % av den yta som omfattades av initials kreden av svagt sluttande mark. I Tuve deformerades exempelvis ca 16 hektar mark ned till ca 35 m:s djup i passivzonen varvid hävningen uppgick till ca 5 m.

En detaljerad redovisning av de mekanismer som kan leda till dylik utbredning av skred i visar att:

- a) ... utbredningen över plan mark vid skred i lösa leror klart förutsägs genom den använda analysmetoden (FDM) och att detta fenomen kan förklaras med rent *statiska* belastningsförhållanden - d v s utan beaktande av de dynamiska effekter och tröghetskrafter som kan uppkomma i skredets slutskede, (Fas 5).
- b) .....att brottzon och glidyta tenderar att utbildas hundratals meter bortom släntfoten, redan *innan* eventuellt sammanbrott av passiv-zonen *eventuellt* äger rum.
- c) .....att vid brott i markerat deformationsmjuknande jord sträcker sig brottzon, glidyta och därmed sammanhängande markrörelser ofta långt (d v s 100-tals meter) *bortom gränsen* för synligt passivt markbrott – eller med andra ord långt utanför vad som normalt uppfattas som det egentliga skredområdet.
- d) .....att skredens utbredning över nästan horisontell mark inte med nödvändighet förutsätter förekomst av kvicklera i hela skredområdet. Lerorna under dalbotten, såväl i Surte som i Tuve, uppvisade normal, låg sensitivitet med  $c_u/c_{ur}$  omkring 10 à 15.
- e) .....att brottmodeller baserade på cirkulär-cylindriska glidytor (mynnande i slänten) med stor sannolikhet ej har någon relevans vid analys av skred i långa naturliga lerslänter av den typ som avhandlas i föreliggande dokument. Detta gäller dock inte om djupet till den potentiella brottzonen är ringa.

### Varför tillämpa progressiv brottanalys?

Stabilitetsförhållandena i en naturlig slänt är nära förbundna med dess geologiska och hydrologiska historia. Många lerslänter i Västsverige är uppbyggda av glaciala och postglaciala sediment som rest sig ur det regredierande havet under efteristiden. Allteftersom marken höjt sig över havsytans medelnivå har jordens hållfasthet och jordtrycken i slänten, genom konsolidering och kryprörelser, kommit att successivt anpassa sig till de ökande



påfrestningar, som blivit följden av sjunkande grundvattenytter, klimatologiska variationer, krypdeformationer, kemiska förändringar och urlakning.

Följaktligen är varje naturlig slänt stabil i den meningen att den existerat under årtusenden. Med hänsyn till att slänten under denna tidsrymd med viss marginal förblivit stabil i situationer med extrema porvattenövertryck, bör 'säkerhetsfaktorn' vis à vis skred under normalt rådande betingelser vara större än 1.

Emellertid, den avgörande frågeställningen vid bedömning av risken för skred blir i stället hur stabiliteten kan komma att påverkas av tilläggsbelastningar eller störningskällor, för vilka tidshorisonten mäts i *timmar, dagar, veckor* eller *månader* i stället för *århundraden* respektive *årtusenden*?

Med andra ord, vad blir således följderna om en lokal instabilitet skulle uppkomma på en ovan nämnda störningskälla? Kommer eventuellt lokalt brott endast att resultera i en markspriicka vid släntkrönet eller kan det föranleda ett katastrofalt skred varvid hundratals meter av i och för sig stabil (eller horisontell) mark, undergår våldsamt hävning och förskjutning.

Analysen här erbjuder just strukturmekaniskt logiska förklaringar till varför ett antal katastrofala skred i Skandinavien kunnat utlösas på vad som i sammanhanget bedömts vara obetydliga störningseffekter.

Ifrågavarande slänter har således kunnat förbli stabila under tusentals år sedan marken en gång höjde sig ur det post-glaciala havet.

Ändock har skred, innebärande markförskjutning och markhävning med vidsträckt utbredning över svagt sluttande mark ofta inträffat i samband med vad som kan uppfattas som mindre mänskliga ingrepp av lokal natur.

Progressiv brottanalys visar emellertid att detta är *just* vad som kan hända, även vid obetydlig störning av ett ömtåligt parti i en dylik slänt. Analysmetoden bör således vara av betydelse vid bland annat kartering av potentiell skredrisk.

Såsom nämnts medför hänsynstagandet till ett jordmaterials deformationsmjuknande i allmänhet betydligt större beräknad risk för skred på koncentrerad last respektive lokala störningsmoment än vid tillämpning av konventionell analys baserad på ideal-plastiska egenskaper hos jorden – och det givetvis i synnerhet om  $c_R$  i något avsnitt kan bli  $< \tau_0$ .

I kritiska fall kan det således vara välbetänkt att utföra s.k. känslighetsanalyser genom att inom ramen för vad som kan anses rimligt på geotekniska grunder variera jordens konstitutiva egenskaper.

## **Beräkningar**

Även om beräkningarna enligt den här redovisade metoden för analys av progressiva skred i princip är tämligen enkla, kan de förefalla komplicerade i jämförelse med gängse metoder för bedömning av släntstabilitet. Det gäller exempelvis att välja tillämpliga konstitutiva samband för den aktuella jordarten, varvid tidsramen för påförande av eventuell tilläggsbelastning, hydrologiska betingelser, dräneringsförhållanden, OCR och huvudspänningstillstånd utgör några av de inverkansefulla kriterierna.

Dock vill man uppnå säkrare *förutsägelser* beträffande skredrisk med hänsyn till människoliv, samhällsekonomiska konsekvenser och egendom måste man enligt författarens mening ta itu med dessa svårigheter.

Handberäkningar – ehuru enkla i princip – medför omfattande beräkningsarbete vid godtycklig slänatgeometri. Med hjälp av datorkraft blir dock tidsåtgången för beräkningarnas

genomförande obetydlig. Sedan man väl definierat och matat in ingående parametrar kan den egentliga beräkningstiden för erforderliga passningsberäkningar mätas i minuter.

Man kan även med en alternativ programvara i Excel lättvindigt analysera *kritisk last* och utbredningen av skred i slänter med konstant lutning och konstant djup till brottzonen. Metoden kan lämpa sig för att snabbt utforska huruvida påtaglig risk för progressiv brottbildning föreligger i – exempelvis – det övre brantare partiet av en slänt. Excel-programmet lämpar sig också väl för undervisning eftersom användaren snabbt kommer till insikt om de komplicerade förhållanden som styr progressiv brottbildning i sensitiv lera.

Ifrågavarande programvara kan emellertid även användas för slänter med godtycklig geometri men blir då avsevärt mer arbetskrävande.

Den extra arbetsinsats som geoteknikern måste ägna släntstabilitetsundersökningar enligt föreliggande metodik behöver dock inte utgöras av i oöverstiglig grad ökat beräkningsarbete. Den huvudsakliga *utmaningen* för geoteknikern består snarare i att kunna utnyttja möjligheterna att studera hur släntstabilitet påverkas av ett antal faktorer, vilkas inverkan per definition inte kan identifieras med de konventionella metoder som grundar sig på obegränsat plastiska egenskaper.

Denna inverkan måste i stället baseras på beaktandet av jordens *deformationer*, *deformationsmjuknande egenskaper*, brottprocessernas *tidsramar* och släntens *geometri*.

## Slutsatser

- Progressiv brottanalys bör tillämpas på slänter med sensitiva leror.
- De skilda faserna av ett skred bör studeras var för sig.
- Tiden en viktig faktor
- Brottzonen och glidyten tenderar att utbreda sig långt nedanför släntens fot.
- Fortsatt forskning behövs om lerors tidsberoende hållfasthetsegenskaper vid ökande deformationer.

## Referens

Bernander, Stig (2011): Progressive Landslides in Long Natural slopes. Formation, Potential Extension and Configuration of Finished Slides in Strain-Softening Soils. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering in cooperation with the Division of Structural Engineering, 2<sup>nd</sup> revised version, 36 + 204 + 7 pp, ISBN 978-91-7439-283-8.