

LICENTIATE THESIS

Progressive Landslides in Long Natural Slopes

*Formation, potential extension and configuration
of finished slides in strain-softening soils*



STIG BERNANDER

Department of Civil and Mining Engineering
Division of Structural Engineering
Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering

CONTENTS :

Preface and Acknowledgements	I-II
Table of contents	III-V
Foreword	VII
Scope <i>Key phrases</i>	VIII
Summary in Swedish – Sammanfattning	VIV-XIII
Notations	XIV-XVI
1. Introduction – historical background	1- 4
2. On the applicability of ideal-plastic failure analysis (I-PFA) to strain-softening clays	5 - 14
2.1 <i>General</i>	
2.2 <i>Prerequisite conditions for the validity of ideal-plastic failure analysis (I-PFA) in engineering practice</i>	
2.3 <i>Accuracy of basic assumptions with regard to application of I-PFA .</i>	
2.4 <i>Relationship between the features of a finished slide and the mechanisms acting during the slide</i>	
2.5 <i>Conclusions – Progressive or brittle slope failures</i>	
2.51 Implications of progressive failure analysis (Pr FA) for design philosophy	
3. Exemplification – different phases of downward progressive failures in natural slopes	15 - 25
3.1 <i>General</i>	
3.2 <i>Different types of progressive failures</i>	
3.3 <i>Stability conditions in slopes susceptible to downward progressive failure</i>	
3.31 Different stages in the development of a progressive slide - limiting criteria	
3.32 Synopsis	
3.33 Safety factors - <i>new formulations</i>	
3.34 Slope failure in sensitive soils – a problem analogous to ‘buckling’	
3.4 <i>Conclusions</i>	

4.	An analytical FDM-model for downward progressive slides- theory	26 - 42
4.1	<i>General</i>	
4.2	<i>Soil model - derivation of formulae</i>	
4.21	Basic assumptions – drainage conditions	
4.22	Basic assumptions in the analytical model	
4.23	Basic differential equations	
4.3	<i>Calculations – method of procedure</i>	
4.4	<i>Exemplification of the numerical procedure for a calculation step involving one slope element of length Δx</i>	
4.5	<i>Objectives and overall procedures for performing stability investigations as per section 4</i>	
4.6	<i>Conclusions from Chapter 4.</i>	
5.	Case records	43 - 80
5.1	<i>The landslide at Tuve, (1977), Sweden</i>	
5.11	Dynamic effects in a progressive landslide like that at Tuve	
5.2	<i>The landslide at Surte, (1951), Sweden</i>	
5.3	<i>The landslide at Bekkelaget, (1953), Norway</i>	
5.4	<i>The landslide at Rollsbo, (1967), Sweden</i>	
5.5	<i>The ground movement at Rävекärr, (1971), Sweden</i>	
5.6	<i>The landslide at Tre-styckevattnet, (1990), Sweden</i>	
5.7	<i>Conclusions from 'Case records'</i>	
5.8	<i>Table 5:8.1 List of landslides due to progressive failure mechanisms</i>	
6.	Factors conducive to brittleness of slope failures	81 - 87
6.1	<i>Brittleness due to inherent properties of the soil</i>	
6.11	Sensitive soft clays	
6.12	Sensitivity due to low plasticity	
6.13	Brittleness related to over-consolidation	
6.14	Brittleness related to states of stress	
6.15	Slide development as a function of brittleness index	
6.2	<i>Brittleness due to slope morphology - 'geometric brittleness'</i>	
6.3	<i>Brittleness related to distribution and location of applied incremental loading</i>	
6.4	<i>Brittleness related to the timing of applied incremental loading</i>	
6.5	<i>Brittleness related to hydrological conditions</i>	
7.	Agents prone to triggering progressive slope failure	88 - 89
7.1	<i>General</i>	
7.2	<i>Failure initiation by natural causes</i>	
7.3	<i>Failure initiation by man-made intervention</i>	

8.	Principles and procedure for investigating potential landslides in slopes related to progressive failure mechanisms	90 - 94
8.1	<i>General</i>	
8.2	<i>Investigation procedure – history of a slope</i>	
8.20	Critical length	
8.21	In situ condition - assessment of in situ k_0 - values	
8.22	Disturbance condition - assessment of the critical load susceptible of initiating brittle failure	
8.23	Global failure condition – assessment of the possibility of a second state of equilibrium subsequent to progressive failure	
8.24	Final comments	
9.	Summary	95 - 98
10.	References	99 - 105

Appendix I:	Exemplification of calculation procedure	I.1 – I.17
--------------------	---	------------

	<i>General comments</i>	
I.1	<i>Calculation of local stability - N_{cr}, L_{cr} and associated stresses and deformations</i>	
I.11	Slope data	
I.12	Constitutive shear deformation relationships	
I.13	Calculation of critical initial load (N_{cr})	
I.2	<i>Calculation of redistribution of earth pressures subsequent to progressive failure</i>	

Summary in Swedish:

Progressiva skred i långsträckta naturliga slänter

Orsaker, förlopp och utbredning hos skred i deformationsmjuknande jordar

Allmänt

Utbredningen och den slutliga topografin hos ett flertal i Skandinavien inträffade skred kan inte förklaras med utgångspunkt från den inom geotekniken alltjämt allmänt tillämpade jämviktsmetoden baserad på ideal-plastiska egenskaper hos jordmaterialet i brottstadiet. Enligt författarens till denna rapport uppfattning föreligger i många fall uppenbara brister i överensstämmelsen mellan, å ena sidan resultaten från analys av inträffade skred och, å den andra vad som verkligen ägt rum under skredförloppen. Detta förhållande synes utgöra en fruktbar grogrund för förklaringsmodeller av skilda slag. Exempelvis gav Tuveskredet upphov till ett tiotal olika förklaringar bland intresserade geotekniker till detta skreds uppkomst och slutliga utbredning.

Vid konventionell skredanalys (i rapporten benämnd I-PFA = Ideal-plastic failure analysis) bortser man, som det kan förefalla, för enkelhets skull från såväl deformationerna inom den potentiella glidkroppen som från de relativa deformationerna mellan densamma och under brottytan liggande fastare material. Detta innebär att man i praktiken tillskriver jordmaterialet obegränsat ideal-plastiska egenskaper, något som beträffande lösare leror sällan gäller i verkligheten.

Ett viktigt tema i föreliggande rapport är att bristande överensstämmelse mellan teori och praktik på detta område av geotekniken just härrör från det faktum, att *många jordarter är utpräglad deformations-mjuknande* inom ramen för de skjuvdeformationer och de förskjutningar i förhållande till underlaget som kan förekomma i den blivande brottzonen vid begynnande skred. Detta gäller i synnerhet vid utsträckta flaxskred i sensitiva jordar.

Analys under hänsynstagande till relevanta deformationer

I rapporten ställes möjligheten av progressiv brottbildning i fokus, något som motiveras av ett antal inträffade skred med, enligt författarens mening, uppenbara indikationer på att spröda brottmekanismer varit för handen. En numerisk beräkningsmetod baserad på finita differenser (FDM) tillämpas vid analysen av deformationsmjuknandets inverkan på släntstabiliteten.

Förfarandet liknar konventionell analys i så motto att den presumtiva glidytans sträckning antages vara känd. Icke desto mindre avviker den föreslagna analysmetodiken från gängse metoder i flera betydelsefulla avseenden enligt nedan:

- Under det att man vid gängse beräkningsmetoder (I-PFA) begränsar sig till att studera jämvikten hos den tänkta glidkroppen i sin *helhet*, tillämpas jämvikt villkoret vid analys av progressiv brottbildning (Pr FA) på *vart och ett* av de vertikala element i vilka glidkroppen indelats.
- Vidare tas hänsyn till deformationerna inom och utom den presumtiva glidkroppen. Härvid tillses att de axiella deformationerna i släntriktningen p g a ändringar i jordtrycksfördelningen är förenliga med skjuvdeformationerna i de vertikala elementen i varje sektion. Härigenom kan skjuvspänningsfördelningen av t.ex. lokala tilläggslaster bestämmas, ävensom på vilken

längd skjuvhållfastheten i brottzonen kan mobiliseras i släntriktningen för upptagande av denna last. Eftersom FDM - analysen är två-dimensionell kan den begynnande brottzonen modelleras i sin helhet och ej endast som ett diskret 'skjuv-band' eller glidyta.

- Jordens egenskaper vid skjuvning definieras medelst ett fullständigt spännings - deformationssamband och ej endast med enstaka värden på skjuvhållfastheten såsom vid gängse beräkningsmetoder. De konstitutiva sambanden indelas i två skilda stadier (stadium I och II), vilket på så sätt simulerar förhållandena före respektive efter utbildandet av en diskret glidyta. De konstitutiva sambanden kan varieras och anpassas alltefter de i slänten rådande förhållandena.
- Genom att relatera nämnda spännings/deformations-egenskaper till olika tidshorisonter för påförandet av tilläggslaster eller till tidsförhållandena vid andra skredutlösande orsaker, kan hänsyn till tidsfaktorn införas i analysen.
- Olika typer av lastfördelning samt specifika förhållanden i släntens och fasta bottenens morfologi som ökar benägenheten för progressiv brottbildning, kan beaktas.
- Ehuru brottzonens höjdläge i varje enskild beräkning antages vara given, så erhålles skredets slutliga utbredning i släntriktningen och passivzonens längd som resultat av beräkningarna.

Konsekvenser av hänsynstagande till deformationerna vid skredanalys enligt föreslagen FDM- metod.

Den föreslagna analysmetoden belyser nödvändigheten av att beakta deformationerna vid skred i långa slänter med deformationsmjuknande jord samt att underlåtenhet därvidlag kan leda till allvarlig felbedömning av, dels risken för lokalt brott i slänten och dels omfattningen hos det totalskred som kan utlösas vid ett dylikt lokalt brott. 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

$$c_R(t, \mathbf{x}) < \tau_0(\mathbf{x}) \quad (\text{Beteckningar enligt 'Notations'})$$

Den omständigheten att skjuvspänningarna p g a en lokal last endast kan mobiliseras på en begränsad sträcka räknat från lastens angreppspunkt, kan i många fall vara av avgörande betydelse. På ett avstånd definierat som L_{cr} (enligt avsnitt 3.3) från en koncentrerad tilläggslast blir nämligen dess inverkan på spänningar, jordtryck och deformationer försumbar, något som utesluter eller reducerar möjligheten av att utnyttja ökande passiva jordtryck längre ner i slänten för stabilisering av denna last i *initieringsskedet*. Man kan uttrycka förhållandet så, att jorden nedanför den sektion som definieras av avståndet L_{cr} från den lokala tilläggslasten, inte 'vet om' eller känner av när brott vid lastens angreppspunkt är förestående. Vid omfördelningen av jordtrycken i samband med progressivt brott kan dock fullt passivt motstånd mobiliseras.

En viktig konsekvens av den begränsade möjligheten att mobilisera passiva jordtryck längre ned i slänten blir, beroende på graden av deformationsmjuknande, att brottmotståndet längs

plan parallella med markytan eller längs med fast botten parallella sedimentplan är *avsevärt* mindre än motståndet baserat på glidytor som utmynnar i slutningen närmare lasten. Det bör noteras härvidlag att detta förhållande gäller även vid höga värden på förhållandet mellan resthållfasthet och odränerad skjuvhållfasthet (c_R/c_u), d v s initialt även under idealplastiska betingelser, eftersom betydande förskjutningar erfordras för att kunna mobilisera passiva jordtryck.

Det förhåller sig med andra ord så att kortare glidytor i sluttande mark, för vilka konventionell ideal-plastisk analys som sådan kunde anses vara giltig, sällan representerar det farligaste sättet för brottbildning. (Bernander, 1981). Skillnaden mellan resultaten från progressiv brottanalys (Pr FA) och konventionell ideal-plastisk brottanalys (I-PFA) är vanligen betydande. Bedömning av skredrisk enligt I-PFA kan följaktligen i många situationer vara mycket på osäkra sidan.

Detta förhållande kullkastar en utbredd föreställning att ideal-plastisk analys - trots eventuellt erkända brister - ändock skulle äga god tillämplighet vid fastställande av s.k. 'initialskred', varmed man i allmänhet avser instabilitet med avseende på någon lokal glidyta.

Nämnda avvikelse mellan utvärdering av initierande brottorsak under hänsynstagande till deformationerna å ena sidan och resultat från konventionella beräkningar å den andra, kan dessutom bli än allvarligare vid dränerad analys. Detta sammanhänger med att höga porvattenövertryck med större sannolikhet utbreder sig längs sedimentskikten än i vinkel mot desamma.

Den föreslagna FDM modellen för framåtgripande progressiv brottbildning medger också hänsynstagande till deformationer under den presumtiva glidytan. Emellertid, som framgår av ovanstående, medför de begränsade möjligheterna att mobilisera passiva tryck längre ner i slutningen att brott i slänter uppvisar en markerad tendens till att följa sedimentlagren och/eller i stort sett lutningen hos fast botten till avsevärt djup under markytan. Vid Tuve skredet synes exempelvis glidytan i huvudsak vara parallell med fast botten ända ned till c:a 35 m:s djup. Beaktande av deformationerna under brottzonen torde därför i många fall ej ha någon större inverkan på resultaten av analysen.

En annan parameter av betydelse i detta sammanhang utgöres av relationen mellan den kritiska längden (L_{cr}) och släntens totala längd (L). Detta förhållande (L_{cr}/L) kan sägas utgöra ett mått på tillämpligheten av konventionell analys i-en aktuell situation, i synnerhet då det är fråga om påförande av lokala tilläggsbelastningar. (Jfr exempelvis skreden vid Surte, Tuve, Bekkelaget och Trestyckeavattnet i kapitel 5, Case Records).

Stabilitetsundersökningar i längre slänter bör med hänsyn härtill regelmässigt inbegripa åtminstone en ungefärlig uppskattning av den kritiska längden med avseende på den aktuella belastningen.

Faktorer som inverkar på benägenheten till sprödbrott i naturliga slänter

Deformationsanalys enligt kapitel 4 i denna rapport visar klart att även andra förhållanden än jordens sprödhet kan ha stor inverkan på benägenheten till progressiv brottbildning. Till dessa faktorer, som belyses särskilt i kapitlen 6 och 7, kan räknas:

- Markytans, sedimentskiktens och fasta bottenens geometri - 'geometrisk sprödhet'
- Typ och läge av påförd belastning eller störning
- Tidsförhållanden för dito
- Hydrologiska förhållanden och hydrologisk historia

Säkerhetsfaktorer

I samband med den föreslagna skredanalysen vid vilken deformationerna beaktas, blir gängse sätt att definiera brottsäkerheten utan fysikalisk mening. Följaktligen måste i dessa sammanhang säkerheten mot brott omformuleras med hänsyn till de kriterier som är avgörande för uppkomst och utveckling av progressiv brottbildning.

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 höjt sig ur det regredierande havet under efteristiden. Allteftersom marken rest sig över havsytan har jordens hållfasthet och jordtrycken i slänten, genom konsolidering och kryprörelser, kommit att gradvis anpassa sig till de ökande påfrestningar, som blivit följderna av sjunkande grundvattenytor, klimatologiska variationer, kemiska förändringar och urlakning.

Följaktligen är varje naturlig slänt stabil i den meningen att den existerat under årtusenden och med hänsyn till att densamma under denna tidsrymd med åtminstone någon marginal klarat extrema situationer med höga porvattenöverttryck bör 'säkerhetsfaktorn' under normalt rådande betingelser vara större än 1.

Den avgörande frågeställningen för geoteknikerns bedömning av risken för skred blir då hur stabiliteten kommer att påverkas av tilläggsbelastningar eller störningskällor, för vilka tidshorisonten mäts i timmar, dagar, veckor eller månader i stället för århundraden respektive årtusenden?

Och slutligen, vad blir följderna om en lokal instabilitet skulle uppkomma på de ovan nämnda störningskällor? Kommer det lokala brottet bara att resultera i en markspricka vid släntkrönet eller leder det till ett katastrofalt skred varvid hundratals meter av horisontell, eller i och för sig stabil mark, undergår våldsamma hävningar och förskjutningar.

Analys enligt kapitel 4 med beaktande av deformationerna i slänten erbjuder just strukturmekaniskt logiska förklaringar till varför ett antal katastrofala skred i Skandinavien kunnat utlösas på vad man bedömt som förhållandevis små störningseffekter.

Ifrågavarande slänter har förblivit stabila under tusentals år sedan marken en gång höjde sig ur det post-glaciala havet. Ändock har väldiga markförskjutningar och markhävningar med vidsträckt utbredning över svagt sluttande mark ofta inträffat i samband med mindre mänskliga ingrepp av lokal natur.

Progressiv brottanalys visar emellertid att detta är precis vad som kan hända även vid en obetydlig störning av ett ömtåligt parti i en dylik slänt, något som bör vara av stort värde vid kartering av skredrisk.

Som 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. Detta gäller även om jordens konstitutiva egenskaper varierar inom vida gränser inom ramen för vad som kan anses rimligt.

Beräkningar

Ehuru beräkningarna enligt den i kapitel 4 föreslagna metoden för analys av progressiva skred i princip är tämligen enkla, kan de för många geotekniker förfalla komplicerade jämfört med

gängse metoder för bedömning av släntstabilitet. Det gäller exempelvis att välja tillämpliga rimliga konstitutiva samband för den aktuella jordarten, varvid tidsramen för påförande av tilläggslaster, hydrologiska förhållanden, OCR och huvudspänningstillstånd utgör några av de inverkanse betingelserna.

Men vill man verkligen uppnå *pålitliga förutsägelser beträffande risk i avseende på människoliv, samhällsekonomiska konsekvenser och egendom* måste man, enligt författarens mening, *adressera dessa svårigheter*.

Såsom framgår av beräkningsexemplen i kapitel 4 och appendix I medför handberäkningar, ehuru enkla i princip, mycket omfattande beräkningsarbete. Med hjälp av datorkraft blir dock tidsåtgången för beräkningarnas genomförande obetydlig. Sedan man väl definierat och matat in ingående parametrar rör sig den egentliga beräkningstiden om sekunder.

Den extra arbetsinsats, som geoteknikern måste ägna släntstabilitetsundersökningar enligt föreliggande metodik utgöres således till mycket ringa del av ökat beräkningsarbete. Den huvudsakliga *utmaningen* ligger i att kunna utnyttja möjligheterna till att studera hur en slänts stabilitet påverkas av ett antal faktorer, vilkas inverkan '*par definition*' ej kan identifieras medelst konventionella metoder som grundar sig på ideal-plastiska egenskaper hos förkommande jordarter. Denna inverkan måste i stället baseras på jordens deformationsmjuknande egenskaper och släntens geometri.