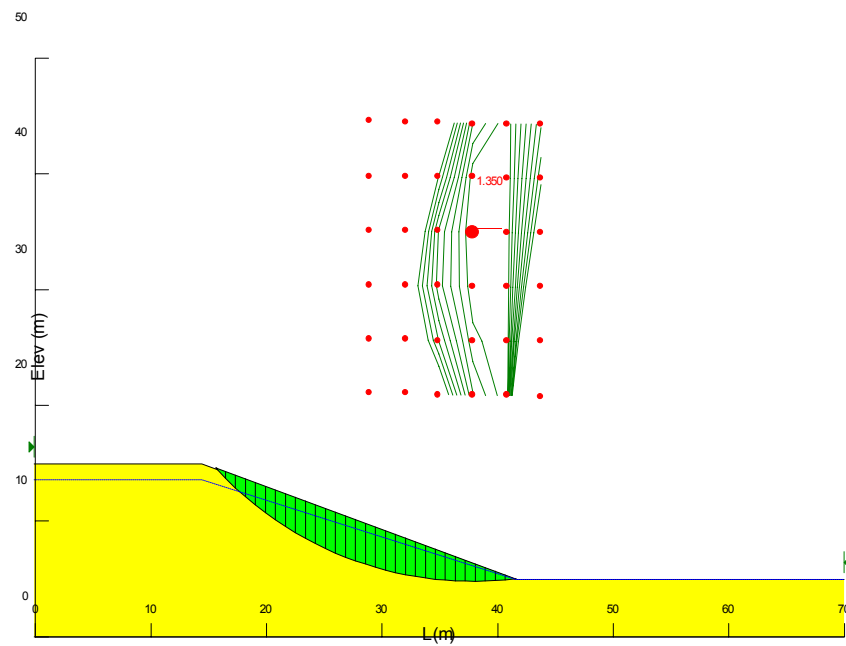


# Klassiska och sannolikhetsbaserade metoder för släntstabilitetsanalys

Daniel Albing

Luleå tekniska universitet  
Civilingenjörsprogrammet  
Väg- och vattenbyggnadsteknik  
Institutionen för Samhällsbyggnad  
Avdelningen för Geoteknik

# Klassiska och sannolikhetsbaserade metoder för släntstabilitetsanalys



Daniel Albing

Institutionen för samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för geoteknik

## **Förord**

Detta examensarbete utgör det avslutande momentet i min civilingenjörsutbildning i väg- och vattenbyggnadsteknik vid Luleå tekniska universitet (LTU).

Arbetet har utförts vid Avdelningen för geoteknik, efter idé från Statens geotekniska institut SGI. Arbetet har omfattat att studera sannolikhetsbaserade och klassiska metoder för släntstabilitetsanalys för att analysera sannolikhetsbaserade metoders tillämplighet som komplement eller alternativ till klassisk analys.

Jag vill tacka alla som varit inblandade och hjälpt till med examensarbetet. Ett speciellt tack vill jag rikta till Bo Westerberg (handledare och examinator, LTU), Hans Mattsson (LTU), Lars Johansson (handledare, SGI), Malin Ekengren och Martin Sundvall.

Luleå den 3 maj 2004



Daniel Albing

## **Sammanfattning**

För bestämning av slänters stabilitet tillämpas traditionellt klassisk analys där säkerhetsfaktorn  $F$  beräknas. Underskattning av jordmaterials hållfasthetsparametrar gör att denna beräkningsmodell kan leda till resultat på den så kallade säkra sidan, det vill säga att det eftersträvas en säkerhetsmarginal mot brott. Detta kan i sin tur exempelvis leda till att eventuella förstärkningsåtgärder blir onödigt kostsamma.

Ett alternativ till det klassiska förfarandet är probabilistisk eller sannolikhetsbaserad analys där istället sannolikheten för brott beräknas. Detta avser sannolikheten att säkerhetsfaktorn är lägre än ett visst kritiskt värde.

Examensarbetets syfte har varit att undersöka probabilistiska analysmetoders tillämplighet inom släntstabilitetsberäkningar som komplement eller alternativ till klassisk analys.

För att erhålla en övergripande kunskap om släntstabilitetsanalys inom såväl det klassiska området som det probabilistiska, har en litteraturstudie inom dessa områden genomförts.

För att studera tillämpligheten hos probabilistisk analys skapades, med datorprogram SLOPE/W, ett antal typslänter med varierande material och geometrier. För dessa genomfördes beräkningar för såväl odränerad som dränerad analys. I SLOPE/W kan slänter analyseras på probabilistisk väg genom så kallad Monte-Carlo simulering där hållfasthetsparametrar tillåts variera inom givna gränser. Sådana simuleringar har genomförts och redovisats i form av framräknad brottsannolikhet för samtliga typslänter.

Jämförelser mellan klassisk och probabilistisk analys har gjorts genom såväl litteraturstudie som beräkning av säkerhetsfaktorer och brottsannolikhet hos typslänter. Detta har lett till en diskussion beträffande tillämpligheten av probabilistisk släntstabilitetsanalys.

Resultaten av detta examensarbete visar att tillämpning av probabilistisk analys som komplement till klassiska beräkningar kan ge stöd för bedömning av släntstabilitetsförhållandena. Genom beräkning av brottsannolikhet skulle i flera fall underskattning av slänters stabilitet kunna minskas och därmed exempelvis kunna leda till lägre kostnader för stabilitetshöjande åtgärder.

## **Abstract**

Traditionally deterministic analysis, calculating safety factor  $F$ , is used for determining slope stability. Underestimating soil strength parameters when using this calculation method may lead to results on the safe side, i.e. a safety margin against failure. This in turn may lead to unwanted expensive actions of reinforcements.

One alternative to the deterministic way of calculation is a so called probabilistic analysis, where instead the probability of a failure is determined. The probability of a failure is defined as the probability of the safety factor being lower than a certain critical value.

The purpose of this master thesis work was to examine the applicability of probabilistic methods as a complement or alternative to deterministic analysis in slope stability calculations.

A study of literature was made in order to obtain knowledge about deterministic as well as probabilistic methods.

In order to study the practical use of probabilistic analysis, a number of slopes were created in different types of material and geometry in a computer program, SLOPE/W. For these slopes stability calculations were carried out with both drained and undrained analysis. SLOPE/W gives the option to make a probabilistic analysis with a so called Monte-Carlo simulation, where the strength parameters are allowed to vary within given limits. This was made obtaining the probability of failure for each of the finite slopes.

Comparisons between deterministic and probabilistic methods were carried out through literature studies as well as through calculations of safety factors and failure probability of the slopes. This has led to a discussion concerning the applicability of probabilistic slope stability analysis.

The results of this thesis work show that using probabilistic analysis, as a complement to deterministic analysis, can be a support for judgement of slope stability conditions. Calculating the failure probability could in some cases lower the underestimation of the stability of slopes, which in turn could, for example, lead to less expensive reinforcements.

---

## Innehållsförteckning

Förord.....	I
Sammanfattning.....	III
Abstract.....	V
Innehållsförteckning.....	VII
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund och problembeskrivning.....	1
1.2 Syfte och mål.....	2
1.3 Avgränsningar.....	2
1.4 Disposition.....	4
2 Litteraturstudie.....	5
2.1 Klassisk släntstabilitetsanalys.....	5
2.1.1 Bedömning av hållfasthetsparametrar.....	6
2.1.2 Beräkningar.....	9
2.2 Probabilistiska metoder.....	20
2.2.1 Skredriskbedömning.....	20
2.2.2 Brottssannolikhet.....	45
2.3 Jämförelse.....	66
3 Simuleringar - förutsättningar.....	69
3.1 Allmänt.....	69
3.2 Val av parametrar.....	71
3.3 Val av geometri.....	74
4 Simuleringar – resultat och analys.....	77
4.1 Klassisk analys (SLOPE/W).....	77
4.2 Probabilistisk analys (SLOPE/W).....	81
4.3 Jämförelse klassisk – probabilistisk analys.....	85
5 Diskussion och slutsatser.....	87
6 Referenser.....	89

### Bilagor

Bilaga 1. Indelning av skredområde i riskzoner

## 1 Inledning

*Syftet med kapitlet är att kortfattat beskriva examensarbetets bakgrund, syfte och avgränsningar samt rapportens struktur.*

### 1.1 Bakgrund och problembeskrivning

Släntstabilitetsanalyser utförs vanligtvis enligt så kallad klassisk teori, där säkerhetsfaktorer beräknas. Ett alternativ till detta är sannolikhetsbaserad eller probabilistisk teori, där till exempel partialsäkerhetsfaktorer belastar styrande parametrar, eller att en så kallad skredriskanalys genomförs för att fastställa risken/sannolikheten att brott uppstår i en slänt samt konsekvenser av ett sådant brott. Dessa metoder används dock endast i undantagsfall. Till exempel föreskriver Vägverket att en sannolikhetsbaserad analysmetod ska användas om en slänt dimensioneras mot annan anläggning eller konstruktion där partialsäkerhetsmetoden applicerats fullt ut.

Användning av klassisk analys kan innebära en underskattning av släntens stabilitet, vilket i slutändan leder till överdimensionering av släntkonstruktioner och därmed onödigt höga kostnader för förstärkning av dessa. Applicering av så kallade probabilistiska metoder, där sannolikheten för brott istället analyseras, skulle kunna leda till att denna underskattning inte blev så stor och att kostnaderna för förstärkning blev lägre. Under årens lopp har det utvecklats en praxis att hantera klassiska metoder som gör att deras negativa effekter minimeras i dagligt arbete.

Användningen av probabilistiska metoder är begränsad dels för att det saknas erfarenhet från dem, dels för att flertalet metoder kräver djupare kunskaper inom det statistiska området. Tidigare har tillgången på kraftfullt datorstöd varit ett problem då denna typ av metoder behandlar stora mängder data.

Det finns således ett behov och nytta av ett utredningsarbete med syfte att undersöka tillämpligheten av sannolikhetsbaserade/probabilistiska metoder för släntstabilitetsanalys.

För att kunna göra en korrekt bedömning av tillämpligheten krävs djupare kunskaper inom området släntstabilitet. Detta innefattar kunskaper inom såväl klassisk som probabilistisk släntstabilitetsteori.

Vad beträffar klassisk teori hämtas information huvudsakligen från Skredkommissionen (1995). Information till den probabilistiska analysen kan hittas i ett flertal artiklar och publikationer, såväl svenska som utländska. I dessa artiklar beskrivs helt olika geografiska områden, med olika

markförhållanden, där probabilistiska metoder tillämpats. Därmed kan tillvägagångssätten skilja sig från fall till fall där olika antaganden och förenklingar gjorts för varje enskild undersökning.

Vidare krävs för sannolikhetsbaserad analys konstruerande av typslänter enkla nog att applicera på de metoder som skall tillämpas. Dessa slänter skall vara tillräckligt enkla att kunna testas, ge entydiga svar och utan användning av alltför avancerade hjälpmedel.

För konstruktion av typslänterna krävs rimliga värden på parametrar för de ingående jordtyperna samt för de använda analysmetoderna och analysverktygen.

För analys av slänterna med olika metoder krävs analysverktyg i form av utvecklade datorprogram. I arbetet tillämpas analysverktyg för både klassisk och probabilistisk släntstabilitetsanalys. Till analysverktygen hör också att ta reda på och förstå deras respektive begränsningar och förenklingar för att kunna bedöma inverkan av dessa faktorer på erhållna resultat.

Slutligen behövs ett lämpligt sätt att jämföra resultat av de olika metoderna med varandra. Resultaten från metoderna går inte att jämföra numeriskt då de beskriver helt olika saker, men det är möjligt att jämföra slutsatserna man kan dra av de olika försöken. Kan exempelvis samma slänt analyserad med två olika metoder betraktas vara stabil i båda fallen?

## **1.2 Syfte och mål**

Syftet med detta examensarbete är att studera och jämföra metod och resultat från såväl klassiska som probabilistiska släntstabilitetsanalyser. Arbetet skall leda till en diskussion om tillämpligheten av probabilistisk släntstabilitetsanalys som ett komplement eller alternativ till klassisk släntstabilitetsanalys.

## **1.3 Avgränsningar**

Begränsningar i studien kan huvudsakligen kopplas till begränsningar och förenklingar i de metoder/programvaror som tillämpas samt förenklingar och antaganden hos de typslänter som konstruerats för analys och jämförelse metoderna emellan.



### ***Analysverktyg***

Studien har begränsats till att inom det probabilistiska området endast beräkna brottsannolikhet med hjälp av de probabilistiska metoder som ingår i SLOPE/W. Detta innebär tillämpning av så kallad Monte-Carlo simulering integrerat i programmet SLOPE/W.

Ursprungstanken var att i arbetet även genomföra beräkningar av brottsannolikhet i programmet MPROSTAB. Detta har ej kunnat utföras på grund av en programvara som ej fungerat.

I den klassiska teorin (SLOPE/W) används Spencers metod som rigorös modell vilket förklaras närmare i avsnitt 2.1.

Tillämpade analysmetoder begränsas till:

- klassisk analys (Spencer i SLOPE/W)
- Monte-Carlosimulering (SLOPE/W).

### ***Typslänter***

Typslänterna konstrueras så enkla som möjligt beträffande geometrisk utformning samt ingående hållfasthetsparametrar. Slänterna analyseras för brant respektive flackt utförande och för odränerat respektive dränerat tillstånd. Då friktionsjord nästan alltid kan betraktas uppträda i dränerad form, analyseras denna jordtyp enbart för detta tillstånd. När det gäller kohesionsjord används så kallad kombinerad analys, där det lägsta värdet på säkerhetsfaktorn  $F$  i fallen dränerat respektive odränerat väljs (tillgänglig som analysmetod i SLOPE/W). De eftersträlvade säkerhetsfaktorerna i klassisk teori sätts till  $F_{c\phi} = 1.35$  för dränerat tillstånd och brant slänt samt  $F_c = 1.5$  för odränerat tillstånd och brant slänt. För de flacka slänterna sätts ett högre värde,  $F = 2.0$ , på säkerhetsfaktorn i alla simuleringar.

Geometrin i de konstruerade typslänterna görs så enkel som möjligt med en rät linje som slänt utan terrasser och med en homogen jordprofil utan torrskorpa avdelad enbart av grundvattenytan.

Representativa hållfasthetsvärden för friktions- respektive kohesionsjord bestäms genom information ur relevant svensk litteratur samt genom samtal med handledare. Dessa parametrar väljs så att de bidrar till att jordmaterialen i typslänterna ska kunna representera typiska friktions- respektive kohesionsjordar.

## **1.4 Disposition**

För att läsaren skall få en klarare uppfattning om såväl rapportens som arbetets uppbyggnad presenteras nedan en disposition. Dispositionen avser i första hand rapportens struktur, men beskriver även det genomförda examensarbetets upplägg. Rapporten behandlar i tur och ordning nedan presenterade delar.

### ***Litteraturstudie***

En övergripande litteraturstudie inom området för probabilistisk släntstabilitet samt klassisk teori krävs för arbetets genomförande. Sökningar görs huvudsakligen i SGI:s bibliotek med hjälp av sökmotorn SGI-line.

Intressanta artiklar inom det probabilistiska området sammanställs och jämförs sinsemellan. Därefter görs en jämförelse mellan probabilistiska och klassiska metoder.

### ***Datorsimuleringar och konstruktion av typslänter***

För analys med datorverktyg konstrueras ett antal typslänter i programvaran SLOPE/W med varierande geometri och ingående parametrar. Såväl konstruktion som analys av slänterna genomförs med SLOPE/W.

### ***Jämförelser***

Jämförelser görs mellan metoder och erhållna resultat. Ger respektive metod ett liknande utfall, det vill säga kan samma slutsatser dras beträffande släntens stabilitet från de olika analyserna? Jämförelser mellan probabilistiska och klassiska metoder görs i såväl litteraturkapitel som i analyskapitel.

### ***Resultat***

Resultaten i form av analyserade typslänter (klassisk och probabilistiskt) samt jämförelser mellan klassiska och probabilistiska metoder i teorin presenteras kortfattat.

### ***Diskussion och slutsatser***

En kortare diskussion förs kring resultaten och eventuella osäkerheter och felkällor. Vidare ges förslag till vidare arbete inom området.

## 2 Litteraturstudie

*Kapitlet är en sammanställning av insamlad litteratur inom såväl det klassiska som det probabilistiska området vad beträffar släntstabilitetsanalys. I kapitlet sammanställs även de övergripande skillnaderna mellan de båda analysstyperna.*

### 2.1 Klassisk släntstabilitetsanalys

I Alén m.fl. (2000) beskrivs den klassiska släntstabilitetsanalysen kortfattat som följer.

Klassisk släntstabilitet utförs med en jämviktsberäkning för en så kallad glidkropp. Här betraktas såväl kraft- som momentjämvikt som kvoten mellan skjuvhållfasthet och skjuvspänning. Av detta framgår att värdet 1.0 på  $F$  motsvarar situationen då slänten är på gränsen till brott. Ett högre värde på  $F$  anger en mer stabil slänt.

Klassiska metoder tillämpar ett antal förenklingar vid analysen. Här följer de viktigaste enligt Alén m.fl. (2000):

- samma mobiliseringsgrad (säkerhetsfaktor mot brott) antas gälla längs med hela glidytan. Om brottskjuvhållfastheten för de olika jordlagren används som indata, innebär detta antagande även att samtliga material samtidigt mobiliserar maximal skjuvhållfasthet
- kraftspelet analyseras enbart inom den glidkropp som vid varje tillfälle betraktas. Ingen beräkning eller kontroll görs utanför denna
- glidkroppen delas in i ett antal lameller och varje sådan analyseras var för sig med kraft- och momentjämvikt
- vid friläggning ersätts omkringliggande lameller av så kallade kopplingskrafter. Hur dessa kopplingskrafter hanteras skiljer sig åt i de olika klassiska analysmetoderna. Gemensamt är dock att någon form av förenkling eller antagande görs. Till exempel frånses vertikala kopplingskrafter (skjuvkrafter) i Bishops förenklade metod (se senare i detta kapitel). Detta medför ett beräkningsresultat på den säkra sidan, dvs. säkerhetsfaktorn  $F$  är större än 1.0
- samtliga parametervärden bestäms i mittpunkten på varje lamells basyta (längs glidytan), och antas vara konstanta längs med hela lamellens bredd.

Informationen om klassisk analys, kapitel 2.1, är vidare uteslutande hämtad ur Skredkommissionen (1995).

Säkerhetsfaktorn definieras som förhållandet mellan skjuvhållfasthetens medelvärde utefter en

tänkt glidyta och motsvarande mobiliserande skjuvspänning

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Den beräknade säkerhetsfaktorn  $F$  beror huvudsakligen enligt Skredkommissionen (1995) av:

- jordart
- hållfasthetsbestämning
- typ av problemställning
- konsekvens av ett eventuellt skred.

Beräkningsmetoder idag baseras på jämförelser mellan pådrivande och mothållande krafter. Detta beskrivs som direkta kraftjämförelser (plana glidytor), som momentjämförelser kring imaginärt rotationscentrum (cirkulärcylindriska glidytor) eller som studium av kraftspelet i jordmassan som helhet där såväl kraft- som momentjämvikt skall uppfyllas (så kallade rigorösa metoder). Rigorösa metoder kan dessutom användas på glidytor med godtycklig form. Plana respektive cirkulärcylindriska glidytor tillämpas med hänsyn till beräkningarnas enkelhet samt att:

- brott långsträckta slänter vilka oftast kan liknas vid glidning utefter ett plan, simuleras i SLOPE/W med en ”oändligt” stor radie på glidytan
- glidytor i kohesionsjordar kan till formen approximeras till cirkelsegment. Denna typ av glidyta används normalt om inte brottmetoden direkt kan inses ej uppfylla denna form. Anledningen är att den md enkelhet kan beskrivas matematiskt och därför ligga som bas för automatiska sökningar.

Rigorösa metoder har utvecklats främst under 50- och 60-talen. Utvecklingen inom datorstödområdet har möjliggjort snabbare beräkningar för att under givna förutsättningar finna den farligaste glidytan. Numeriska metoder (FEM, FDM och BEM) används idag ibland för dimensionering av förstärkningsåtgärder.

### 2.1.1 Bedömning av hållfasthetsparametrar

Hållfasthet hos jord indelas traditionellt i odränerad respektive dränerad skjuvhållfasthet där brotthållfastheten  $\tau_f$  kan skrivas enligt Skredkommissionen (1995) som

$$\tau_f = \tau_{fu} \text{ (eller } c_u \text{)} \quad (2)$$

eller

$$\tau_f = \tau_{fd} = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (3)$$

Ovan nämnda indelningar är grova förenklingar av verkligheten. I teorin kan hållfastheten av all typ av jord enligt Skredkommissionen (1995) beskrivas som

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4)$$

### **Kohesionsjord**

#### *Dränerad analys*

De dränerade hållfasthetsegenskaperna i kohesionsjord kan uppskattas empiriskt med ledning av förkonsolideringstryck eller av odränerad skjuvhållfasthet

$$\tau_{fu} = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (5)$$

där  $\phi'$  för den typ av kohesionsjord som normalt förekommer i Sverige sätts till  $30^\circ$  och  $c' \approx 0.03\sigma'_c$  alternativt  $c' \approx 0.10\tau_{fu}$  (Skredkommissionen, 1995).

Vid stabilitetsberäkningar i överkonsoliderad jord, där den dränerade hållfastheten är helt eller till övervägande delen lägst och relevant för belastningsfallet och där säkerhetsfaktorn är så låg att stabiliseringsåtgärder övervägs, bör de empiriska värdena kompletteras med provning genom direkta skjuvförsök och/eller triaxialförsök.

#### *Odränerad analys*

De odränerade hållfasthetsegenskaperna i finkornig jord bedöms genom resultat från vingförsök, CPT-sondering och dilatometerförsök i fält samt fallkonsförsök, direkta skjuvförsök och triaxialförsök i laboratoriet.

### **Friktionsjord**

#### *Friktionsvinkel*

Hållfastheten i friktionsjord beskrivs enligt Skredkommissionen (1995) som

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' \quad (6)$$

där

$\sigma'$	= $\sigma - u$
$\sigma$	= total normalspänning mot glidytan
$u$	= porvattentryck
$\phi'$	= friktionsvinkel

Hållfastheten i friktionsjord, dvs. friktionsvinkeln, kan bestämmas genom resultat från CPT-sondering eventuellt kombinerat med dilatometerförsök. Friktionsvinkeln utvärderas ur förhållandet mellan spetsstrycket och det effektiva överlagringstrycket. Styrande för sambandet är egentligen det horisontella trycket, och innan en utvärdering utförs bör någon form av uppskattning av jordtryckskoefficienten göras. Detta kan göras med resultat från exempelvis dilatometerförsök.

Vid val av friktionsvinkel måste samverkan med övrig jord beaktas. Vid låga spänningsnivåer kan mycket höga friktionsvinklar erhållas för fast lagrad jord. Brott inträffar då vid väldigt små deformationer och jorden uppträder deformationsmjuknande, dvs. friktionsvinkeln minskar successivt med ökande deformation. Jordlager på större djup har däremot högre spänningsnivåer och därmed lägre friktionsvinklar och högre brottdeformationer vid motsvarande lagringstäthet. De höga friktionsvinklarna i ytliga lager kan därför endast användas för glidytor som i sin helhet går igenom dessa ytliga lager och som innefattar en begränsad jordvolym där deformationerna kan antas vara likartade. Vid större glidytor bör de höga friktionsvinklarna reduceras och vid djupare glidytor bör de reduceras ned mot det lägsta värdet inom den aktuella glidytan (Skredkommissionen, 1995).

### **Portryck**

För bestämning av portrycket och dess variation i en slänt krävs observationer av den fria grundvattenytan. Dessa observationer görs i öppna hål, vattenståndsrör, brunnar m.m. samt uppmätning av vattentryck med portrycksmätare. Dessa placeras på ett sådant sätt att portryckets variation på djupet kan studeras i hela slänten. Med dessa mätningar kan man sedan ta fram en så kallad portrycksprofil. Portrycket bör vidare studeras i olika skikt som kan vara vattenförande samt vid övergång till fast botten.

Som minimikrav i en lerprofil placeras mätare i underliggande friktionsjord dessutom i eventuella dränerande skikt. Vid avsaknad av friktionslager placeras mätaren djupt i lerlagret. Utökade mätningar krävs om det visar sig att dränerad skjuvhållfasthet är dimensionerande.

I silt- och sandprofiler mäts grundvattenytans nivå samt uppskattas kapillär stighöjd och negativa portryck. Vid låg säkerhetsfaktor utökas mätningarna till dess att en klar bild av portrycksfördelningen i slänten erhålles.

I vissa fall krävs observationer under lång tid för att visa naturliga variationer. Extremvärden kan observeras med hjälp av närliggande referensrör (Skredkommissionen, 1995).

### **2.1.2 Beräkningar**

När det klarlagts vilka beräkningsförutsättningar som gäller skall stabiliteten beräknas för de olika lastfall som kan tänkas uppstå (Skredkommissionen, 1995).

Slänten analyseras för alla tänkbara lastkombinationer. Alla permanenta laster beaktas i kombination med sannolik inverkan av variabel last. Därtill betraktas även lastfall i olika situationer som till exempel byggskede, bruksskede samt olyckstillfällen.

Vid stabilitetsberäkningar bör beräkningar för nedanstående fall skiljas på:

- normala och varaktiga belastningsfall, så kallat bruksskede
- mycket kortvariga belastningstillfällen, korttidsberäkningar
- exceptionell belastning, olycks- och katastroftillfällen.

Således delas de olika lastfallen in dels med avseende på belastningarnas möjliga varaktighet (påverkar bedömningen av relevant skjuvhållfasthet), dels med avseende på sannolikheten för att de över huvudtaget skall uppträda (påverkar kravet på erforderlig beräknad säkerhetsfaktor).

En kombinerad analys, där för varje del av glidytan det lägsta alternativet av dränerad och odränerad hållfasthet väljs, ger alltid lägsta säkerhetsfaktor och avsteg kan endast göras för de skikt och de lastfall där det är uppenbart att förhållandena är dränerade eller odränerade. Dragspänningar kan endast påräknas för kohesionsjord i exceptionellt kortvariga belastningsfall (men denna typ av spänningar tas normalt ej med i beräkningar).

Vid överslagsberäkningar med metoder där kombinerad analys inte kan användas, skall både dränerad och odränerad analys utföras.

Aktuella lasttyper för stabilitetsberäkningar är enligt Skredkommissionen (1995):

- släntens egentyngd
- ytlaster
- grundvattennivå och portryck.

## **Beräkningsmetoder**

### *Allmänt*

Beräkningarna baseras på klassiska metoder, där jorden antas vara ett idealplastiskt material (Skredkommissionen, 1995). Detta antagande medför att brottlasten är oberoende av de deformationer som inträffar före brott och de som inträffar efter att brottillstånd uppnåtts. Därmed kan skjuvhållfastheten mobiliseras fullt ut i släntens alla delar oberoende av vilka deformationer som krävs för att denna samverkan mellan olika partier skall kunna utvecklas.

I praktiken fordras att den lokala stabiliteten för en del av en slänt skall vara mycket låg om ett skred skall initieras. De klassiska beräkningsmetoderna kan användas för bedömning av risken för att ett sådant skred skall inträffa någonstans i en slänt. För en konsekvensanalys (se kapitel 2.2.1) av ett lokalt brott med följdskred och beräkning av vidare skredförlopp krävs andra metoder och beräkningsantaganden.

De klassiska metoderna bygger på antaganden om tvådimensionella fall med en i sidled oändligt utsträckt slänt, med identisk geometri och lastsituation.

Beräkningsmetoderna tillämpas oftast i steg med ökande svårighetsgrad då antalet faktorer liksom behovet av noggrannhet ökar.

Vidare skall beräkningarna helst genomföras med en rigorös (alla villkor för kraft- och momentjämvikt är uppfyllda) metod, farligaste glidyta av godtycklig form, kombinerad analys, anisotrop odränerad skjuvhållfasthet och spänningsberoende friktionsvinkel.

Beräkningsmetoder som klarar allt i ett steg finns ej utan vissa hjälpmedel får tillämpas. Beräkningarna utförs då i flera steg och avbryts om man, med enklare metoder som innebär resultat på den säkra sidan, under beräkningens gång kan konstatera att slänten har en tillfredsställande stabilitet.

I ett tidigt skede, redan under den geotekniska projekteringen, kan det användas överslagsberäkningar för att få en god bild av situationen. Här idealiseras, som en första ansats, geometri, jordlagerförhållanden, porttryck och hållfasthetsegenskaper, vilket gör att man exempelvis kan använda Janbu's direktmetod. Under förutsättning att jordförhållandena är någorlunda homogena och geometrin är relativt enkel, kan man redan här få en god uppfattning om var farligaste cirkulärcylindriska glidyta är lokaliserad samt storleksordningen på säkerhetsfaktorn.



För specialfallet med en utsträckt slänt med liten jordmättighet kan överslagsberäkningar också utföras med helt plana glidytor som löper parallellt med markytan. På grund av glidyttans längd och ringa djup kan man bortse från de relativt sett små krafterna i glidkroppens övre och nedre ändytter. Vidare är överslagsberäkningarna begränsade till helt dränerade och odränerade analyser (Skredkommissionen, 1995).

För senare utredningsskeden då säkerhetsfaktorn konstaterats ej vara tillfredsställande, eller om geometriska förutsättningar och jordförhållanden är mer varierande, används som regel beräkningsprogram med automatiska sökrutiner för att hitta den farligaste glidyttan. De flesta av programmen söker den farligaste cirkulär-cylindriska glidyttan, men en del kan även söka sammansatta glidyttor där en del av glidyttan förutbestäms att gå i ett bestämt skikt (Skredkommissionen, 1995).

### **Överslagsberäkningar**

#### *Cirkulär-cylindriska glidyttor*

En vanlig överslagsberäkning är Janbu's direktmetod, Skredkommissionen (1995), och är en så kallad diagrammetod. Metoden förutsätter cirkulär-cylindriska glidyttor, och är begränsad till relativt enkla geometrier, jordlagerföljder och portrycksförhållanden. Beräkningar ger liknande resultat som program med cirkulär-cylindriska glidyttor och lamellmetoder, men skiljer sig resultatmässigt då den dränerade hållfastheten blir dimensionerande. Metoden är begränsad till helt odränerade eller dränerade analyser.

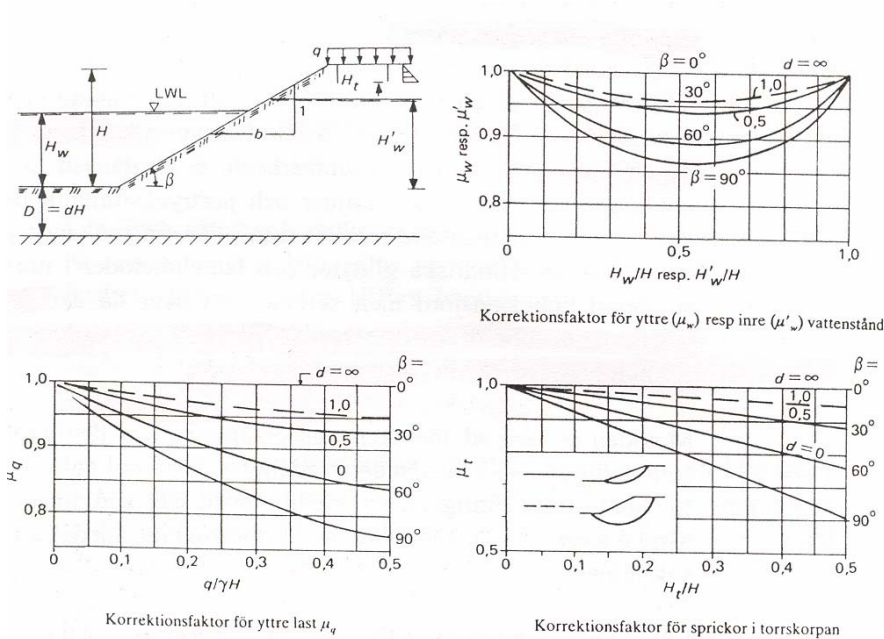
Först beräknas en term för pådrivande tryck

$$p_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_q \mu_w \mu_t} \quad (7)$$

där

- $\gamma$  = jordens tunghet, kN/m<sup>3</sup>
- $H$  = släntens höjd, m
- $q$  = utbredd last, kN/m<sup>2</sup>
- $\gamma_w$  = vattnets tunghet, kN/m<sup>3</sup>
- $H_w$  = vattendjup vid släntfot, m
- $\mu_q$  = korrektionsfaktor för yttre last
- $\mu_w$  = korrektionsfaktor för yttre vattenstånd
- $\mu_t$  = korrektionsfaktor för vattenfylld spricka genom torrskorpan

där respektive korrektionsfaktor hämtas ur figur 2.2.1.

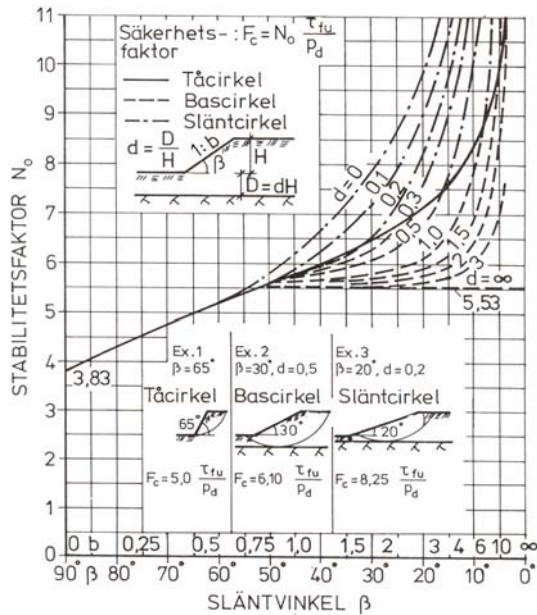


Figur 2.1.1 Korrektionsfaktorer för Janbus direktmetod.

För odränerad analys antas skjuvhållfastheten vara konstant med djupet och lika med  $\tau_{fu}$ . Säkerhetsfaktorn  $F$  för farligaste glidyta beräknas som

$$F_c = N_0 \frac{\tau_{fu}}{P_d} \quad (8)$$

Stabilitetsfaktorn  $N_0$  hämtas ur figur 2.1.2 som visar dess variation med slänthöjd, slänthlutning och djup till fast botten. Ur samma diagram fås den farligaste glidyta typ det vill säga om det är en tå-, bas- eller släntcirkel. Från en annan figur erhålles koordinaterna för cirkelbågens centrum.



Figur 2.1.2 Stabilitetsfaktorns variation med släntvinkel, släntlutning och djup till fast botten.

Eftersom skjuvhållfastheten i verkligheten normalt varierar med djupet är det fördelaktigt att använda dess medelvärde i ekvation 8 vid beräkning av säkerhetsfaktorn.

En verklig slänt behöver förenklas för att passa den i diagrammen använda geometrin. För detta ändamål skall man eftersträva att summorna av de tillagda och borttagna momenten blir ungefär lika stora.

För fallet dränerad analys är bedömningen av säkerhetsfaktorn lite mer komplicerad och diagrammen i Skredkommissionen (1995) är endast avsedda för tåcirklar.

Vid användning av direktmetoden för dränerad analys införs parametrarna

$$p_e = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H'_w}{\mu'_w} \quad (9)$$

och

$$\lambda_{c\phi} = \frac{p_e \tan \phi'}{c'} \quad (10)$$

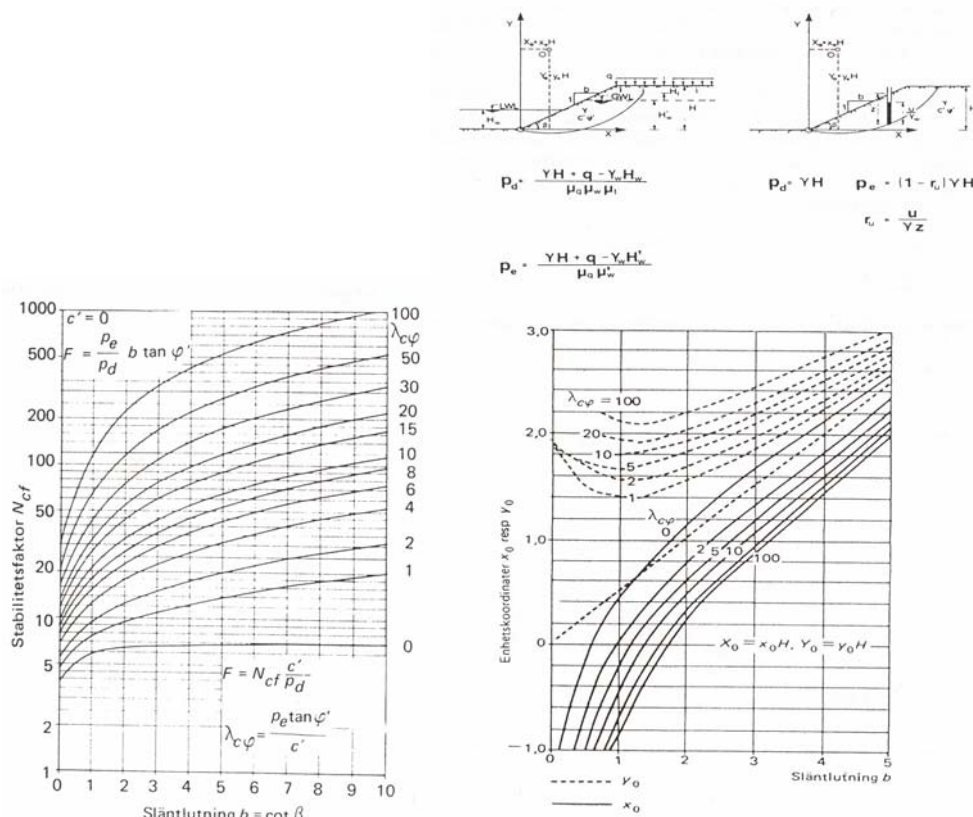
där  $H'_w$  är inre vattenstånd och  $\mu'_w$  är tillhörande korrektionsfaktor. För  $c' > 0$  beräknas säkerhetsfaktorn som

$$F_{c\phi} = N_{cf} \frac{c'}{p_d} \quad (11)$$

men om  $c' = 0$  blir fallet

$$F_{c\phi} = \frac{p_e}{p_d} b \tan \phi' \quad (12)$$

Stabilitetsfaktorn  $N_{cf}$  och koordinaterna för kritiska tåcirkeln hämtas ur diagram i figur 2.1.3.



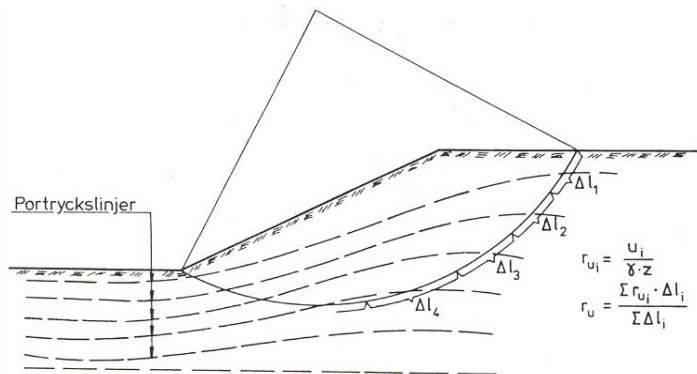
Figur 2.1.3 Diagram för bestämning av stabilitetsfaktorn samt kritiska tåcirkeln.

Den farligaste glidyttans läge är beroende av hur stor del av hållfastheten som utgörs av friktion respektive kohesion. Ju högre friktionsandel desto grundare glidyta. Då  $c' = 0$  går glidyttan i släntens överyta.

Vidare förutsätter diagrammen ett hydrostatiskt portryck. Då detta inte överensstämmer med verkligheten kan man dela in glidyttan, efter det att dess läge bestämts, i ett antal cirkelsegment varpå parametern  $r_u = u / \gamma z$  beräknas för varje segment och ett medelvärde

$$r_u = \frac{\sum r_{ui} \Delta l_i}{\sum \Delta l_i} \quad (13)$$

framräknas genom figur 2.1.4.



Figur 2.1.4 Beräkning av  $r_u$  då portrycksfördelningen är känd.

Sedan kan  $p_e$  beräknas som

$$p_e = (1 - r_u) \gamma H \quad (14)$$

vilken sedan används vid beräkning av  $\lambda_{c\phi}$ .

### Plana glidytor

Då en slänt är väldigt långsträckt i förhållande till jordlagrens mäktighet, uppstår glidytor som löper parallellt med markytan längs fasta botten eller svagare skikt. Är glidytan tillräckligt lång kan man beräkningsmässigt bortse från de krafter som uppträder vid glidykans övre och nedre delar i form av aktivt och passivt jordtryck.

För odränerad analys ges den mobiliserande skjuvspänningen som

$$\tau = \gamma z \sin \beta \cos \beta \quad (15)$$

där  $\beta$  är släntlutningen,  $z$  är djupet under markytan och säkerhetsfaktorn fås genom

$$F_c = \frac{\tau_{fu}}{\tau} = \frac{\tau_{fu}}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (16)$$

Vid dränerad analys är skjuvhållfastheten

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (17)$$

där

$$\sigma' = (\gamma z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \quad (18)$$

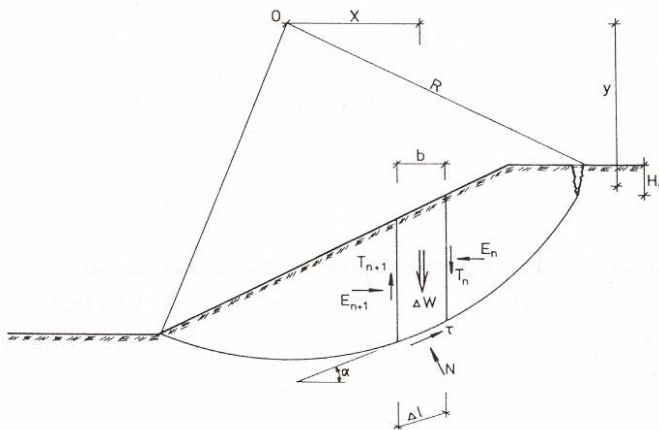
Säkerhetsfaktorn mot dränerat brott blir då

$$F_{c\phi} = \frac{c'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma z - \gamma_w h_w}{\gamma_w} \cdot \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (19)$$

### Lamellmetoder

Ofta går den tänkta glidyta genom flera olika jordlager vilka kan utgöras av både friktions- och kohesionsjord där hållfasthetsparametrarna varierar med djupet både inom de enskilda jordlagren och mellan dem. För att kunna beräkna stabiliteten för en slänt med en sådan glidyta används då så kallade lamellmetoder. För enklare beräkningar antas glidytan vara cirkulär-cylindrisk (Skredkommissionen, 1995).

Den tänkta glidkroppen delas in i ett flertal lameller (se figur 2.1.5) där hållfasthetsegenskaperna antas vara konstanta utefter glidytan i respektive lamell.



Figur 2.1.5 Cirkulär-cylindrisk glidyta för beräkning enligt lamellmetoden.

Därefter studeras jämvikten för varje enskild lamell och för glidkroppen som helhet med följande storheter

$E_n$	= resultant till horisontella jordtrycket mot lamellgränsen $n$ , kN/m
$T_n$	= vertikal tvärkraft i lamellgränsen $n$ , kN/m
$\Delta l$	= båglängd, m
$\Delta W$	= lamellens egenvikt, kN/m
$b$	= lamellens bredd, m
$h$	= lamellens höjd, m
$x$	= hävarm, m
$R$	= cirkelns radie, m
$N$	= normalkraft mot glidytan, kN/m
$u$	= portryck i glidytan, kN/m <sup>2</sup>
$\alpha$	= glidykans lutning mot horisontalplanet, °
$H_t$	= djup för vattenfylld spricka genom torrskorpa, m
$y$	= momentarm, m

Momentjämvikt kring rotationscentrum  $O$  för hela glidkroppen ger enligt Skredkommissionen (1995)

$$F_{c\phi} = \frac{R \sum [c' \Delta l + (\Delta W \cos \alpha - u \Delta l) \tan \phi' + (T_n - T_{n+1}) \cos \alpha - (E_n - E_{n+1}) \sin \alpha \tan \alpha]}{\sum \Delta W x + y \frac{\gamma_w H_t^2}{2}} \quad (20)$$

För skikt med kohesionsjord där odränerad skjuvhållfasthet är dimensionerande byts  $c'$  mot  $\tau_{fu}$  och  $\phi' = 0$ . För beaktande av skjuvhållfasthetsanisotropi modifieras  $\tau_{fu}$  med ledning av glidykans lutning  $\alpha$  i lamellen.

Vid den enklaste formen av lamellberäkningar försummas inverkan av normal- och tvärkrafter i lamellgränserna, med följande uttryck för säkerhetsfaktorn

$$F_{c\phi} = \frac{\sum (c' \Delta l + (\Delta W \cos \alpha - u_e \Delta l) \tan \phi')}{\sum \Delta W \sin \alpha + \frac{y \gamma_w H_t^2}{R \cdot 2}} \quad (21)$$

Denna metod är känd under flera namn: "Hultin-Petterssons metod", "Fellenius metod", "Swedish method" eller "Ordinary method of slices". Förenklingen leder oftast till en underskattning av säkerhetsfaktorn, speciellt vid djupa glidytor där dränerad skjuvhållfasthet utgör en stor del av den dimensionerande hållfastheten.

För att kunna ta hänsyn till krafterna i lamellgränsen studeras den enskilda lamellens jämvikt

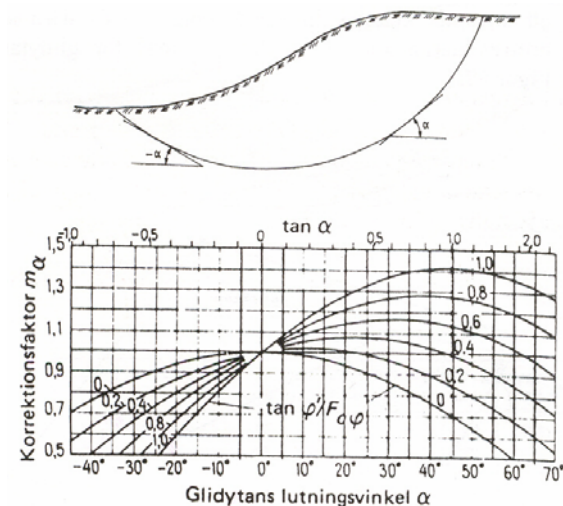
$$F_{c\phi} = \frac{\sum \frac{c'b + (\Delta W - bu_e + T_n - T_{n+1}) \tan \phi'}{\left(1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F_{c\phi}}\right) \cos \alpha}}{\sum \Delta W \sin \alpha + \frac{\gamma \gamma_w H_t^2}{R} \frac{1}{2}} \quad (22)$$

Denna ekvation kallas vanligen "Bishop's rigorous method". Med säkerhetsfaktorn  $F_{c\phi}$  i båda led krävs en iterativ process för att lösa ekvationen. Vid praktiska lösningar nöjer man sig ofta med ett värde som erhålls vid summerande av termen  $T_n - T_{n+1}$ . Här underskattas säkerheten också något, men i lägre grad jämfört med Hultin - Petterssons metod.

För att erhålla "Bishop's simplified method" införs  $p = \Delta W / b$  och  $m_\alpha = \cos \alpha \left(1 + \tan \phi' \tan \alpha / F_{c\phi}\right)$

$$F_{c\phi} = \frac{\sum \frac{(c' + (p - u_e) \tan \phi') b}{m_\alpha}}{\sum pb \sin \alpha + \frac{\gamma \gamma_w H_t^2}{R} \frac{1}{2}} \quad (23)$$

där  $m_\alpha$  tas ur figur 2.1.6 genom itererad handberäkning.



Figur 2.1.6  $m_\alpha$  som funktion av  $\alpha$  och  $\tan \phi' / F_{c\phi}$ .

Vid användning av cirkulär-cylindriska glidytor skall man se till att glidyterna inte blir för branta i de aktiva och passiva zonerna (Skredkommissionen, 1995).



### **Glidytor av godtycklig form**

I de fall där slänten är lång i förhållande till jordmaktigheten ger inte en cirkulärcylindrisk glidyta en bra beskrivning av den farligaste glidytan. Istället kan en sammansatt glidyta visa sig vara den farligaste. Detta kan även inträffa då det i jordprofilen finns svagare skikt eller zoner. För att få en sådan sammansatt glidyta, vilken bättre beskriver den geologiska profilen, används exempelvis Janbu's "generalized procedure of slices".

Detaljerna i denna metod presenteras inte vidare i detta arbete då de typslänter som använts och analyserats är så pass enkla att det inte behövs någon avancerad analysmetod av denna typ.

För mer information om beräkningar av glidytor med godtycklig form hänvisas läsaren till exempelvis Skredkommissionen (1995).

### **Partialsäkerhetsfaktorer**

Istället för en total säkerhetsfaktor kan man, liksom i Nybyggnadsreglerna NR och i konstruktionsreglerna BKR, istället välja att lägga separata säkerhetsfaktorer på de ingående parametrarna last  $\gamma_l$ , hållfasthet  $\gamma_m$ , beräkningsmetod  $\gamma_{Rd}$  och en partialsäkerhetsfaktor beroende på den involverade risken  $\gamma_n$ . För last beroende på jords egenvikt används  $\gamma_f = 1.0$ .

Partialsäkerhetsfaktorn för hållfasthetsegenskaper ges, beroende på jordart, som intervall inom vilka faktorerna väljs med hänsyn till omfattning och noggrannhet i hållfasthetsprovningen och spridning i försöksresultaten. För större glidytor där stabiliteten bestäms av medelvärdet av flera hållfasthetsprovningar kan reduktion av partialsäkerhetsfaktorerna göras med upp till 20 %.

$\gamma_{Rd}$  anger osäkerhet i beräkningsmetod. Detta innebär att man för naturliga slänter lägger en extra partialsäkerhetsfaktor på såväl odränerade som dränerade analyser i lera, då dessa inte helt motsvarar det farligaste beräkningsfallet.

Faktorn  $\gamma_n$  väljs med hänsyn till konsekvensen av ett eventuellt brott:

- säkerhetsklass 2 ( $\gamma_n = 1.1$ ) för bebyggda områden
- säkerhetsklass 1 ( $\gamma_n = 1.0$ ) för naturmark.

Partialsäkerhetsfaktorer i ungefär följande storleksordning är aktuella för naturliga slänter

Bebyggelseområden $\gamma_n \approx 1.1$	Annan mark $\gamma_n \approx 1.0$
Kombinerad analys $\gamma_{Rd} \approx 1.0$	Dränerad och odränerad analys $\gamma_{Rd} \approx 1.1$
Friktionsvinkel $\gamma_m \approx 1.0$	Odränerad skjuvhållfasthet $\tau_{fu}$ $\gamma_m \approx 1.2$

Ökande värden på faktorerna  $\gamma_m$  och  $\gamma_{Rd}$  används vid inledande undersökningar för att inrymma större osäkerheter i beräkningsunderlaget.

Vidare blir faktorn  $\gamma_m$ , jämfört med i NR och i BKR, lägre för odränerad skjuvhållfasthet i naturliga slänter. NR och BKR anger en reduktion av basvärdena med 20 % om ett medelvärde för flera hållfasthetsbestämningar i en större jordvolym används. För naturliga slänter behöver motsvarande reduktion vara minst 25 – 30 %.

## 2.2 Probabilistiska metoder

### 2.2.1 Skredriskbedömning

#### *Allmänt*

Allmänt inom begreppet skredriskbedömning är användning av traditionella stabilitetsberäkningar av säkerhetsfaktorn  $F$  (total- och/eller partialsäkerhetsfaktor), för att sedan göra en statistisk analys av denna. Denna analys utgörs av en bedömning av hur troligt det är att just den aktuella säkerhetsfaktorn beskriver den aktuella släntens tillstånd. I skredriskanalysen vägs ett eventuellt skreds konsekvenser på människan och omgivningen in i bedömningen. Olika verktyg används för bedömning av säkerheten såsom säkerhetsindex  $\beta$ , Monte Carlo simulering och punktskattningsmetoden för att nämna några. I denna del av rapporten presenteras metoder där poängsystem används för att klassificera slänternas tillstånd beträffande materialparametrar, geometri och utförda geotekniska undersökningar. Genom detta kan en uppskattning göras av slänternas farlighet för omgivningen, det vill säga om risk för brott finns.

I Berggren (1991b) tillämpas en metod vilken inbegriper en slänts stabilitet samt de rådande förhållandena i omgivningen som släntgeometri, jordförhållanden, bebyggelse etc. De olika förhållandena poängsätts med så kallade korrigeringsfaktorer vilka multipliceras ihop och

därefter relateras deras produkt till släntens framräknade totalsäkerhetsfaktor  $F$ . Med ledning av detta placeras slänten i en klass A, B, C eller D, där A visar på lägst och D på högst sammanvägning av risk för och konsekvens av ett skred.

Fördelen med detta förfarande är att inte, likt klassisk analys med beräkning av en totalsäkerhetsfaktor  $F$ , enbart ta hänsyn till geometri, grundvattenförhållanden och jordlagrens egenskaper utan även andra påverkande faktorer som:

- risk för erosion (liten, medel eller stor)
- bebyggelse
- jordens överkonsolideringsgrad, OCR
- val av metod för beräkning av  $F$
- geotekniska undersökningens omfattning
- noggrannhet vid bestämning av släntgeometri
- jordens homogenitet
- jordens sensitivitet
- förutsättning för höga portryck (liten, medel eller stor)
- tidigare inträffade skred i området (inga, 1-2 eller >2).

Traditionellt vid stabilitetsanalys betraktas en slänt ur ett tvådimensionellt perspektiv, det vill säga slänten beskrivs i längd och höjd efter en teoretiskt ansatt 1 m bred remsa. Att denna betraktelse kan göras beror på att det normalt antas råda plant töjningstillstånd. Uppskattning av en potentiell skredyta är en ansats att tillföra ett tredimensionellt betraktelsesätt på slänten.

### ***Begreppet skredrisk***

Berggren (1991b) beskriver skredrisk som följer. I Varnes (1984) föreslås att följande punkter bör användas för vägning av risk och konsekvens för ett skred:

- naturlig risk,  $H$  – sannolikheten för ett potentiellt skred under en specifik tidsperiod inom ett avgränsat markområde
- sårbarhet,  $V$  – sårbarheten hos de olika hotade objekten (människor, byggnader, anläggningar etc.) om ett skred inträffar. Sårbarheten uttrycks i en skala från 0 (ingen skadegörelse vid skred) till 1 (total förlust vid skred)
- specifik risk,  $R_s$  – den förväntade skadegörelsen orsakad av ett specifikt skred, det vill säga produkten  $H \times V$
- element utsatta för risk,  $E$  – befolkning, egendom, anläggningar etc. som är i farozonen inom ett givet markområde
- total risk,  $R_t$  det förväntade antalet förspillda människoliv, skadade personer, egendomsskador, ekonomiska skador etc. utgör produkten  $R_s \times E$ .

Dessa punkter summeras i ett uttryck för total risk för skred som

$$R_t = E \times R_s = E \times (H \times V) \quad (24)$$

I Berggren (1990) beskrivs detta lite enklare. Enligt definition av UNESCO, Varnes (1980), beskrivs risknivån för en slänt som produkten av sannolikheten för inträffande av ett skred och konsekvenserna (förlust av liv, egendom samt skador på omgivande miljö). Den totala risken uttrycks som:

$$\text{Risk} = \text{sannolikheten att ett skred ska inträffa} \times \text{konsekvensen av ett eventuellt skred} \quad (25)$$

Utredningsarbetet för en sådan riskbedömning sker i tre steg A, B och C:

- A: bedömning av möjligheten till att ett skred uppstår
- B: bedömning av hotade ”värden” som människoliv, egendom och omgivande miljö
- C: kombinerade resultatet av A och B.

Metoden ger möjlighet till att göra prioriteringar av typen: Hur ska vi gå till väga för att stabilisera slänten? Vilket val ger den bästa effekten?

Enligt Berggren m.fl. (1991a) beskrivs riskbegreppet likt punktlistan ovan på tre olika sätt där det tredje är en kombination av de två övriga:

- sannolikheten för en oönskad händelse
- konsekvensen av en oönskad händelse
- produkten av de två första punkterna.

Berggren m.fl. (1991a) anser att det tredje sättet är att föredra med en modifikation. Man anser att ytterligare en faktor bör kopplas till bedömningen, en faktor som tar hänsyn till skredförloppets utbredningshastighet. Detta medför en möjlighet att ingripa under ett händelseförlopp (till exempel ett skred) eller att hinna undan när det väl har startat.

I rapporten diskuteras bland annat vilka krav på säkerheten som ska ställas likt totalsäkerhetsfaktorn  $F$ : s 1.5. Detta är svårt då metodiken inte är väl beprövad. Dock kan jämförelse med andra sannolikheter göras, t.ex. sannolikheten för att omkomma i trafiken etc. Räddningsverket (Rosenberg, 1989) använder en så kallad riskmatris där riskobjekt klassificeras med hänsyn till sannolikhet och konsekvens. Dock beaktas inte utbredningshastigheten här likt i Berggren m.fl. (1991a)

Alén m.fl. (2000) föreslår också en sammanvägning av sannolikheten för att något ska inträffa (icke önskad händelse) och konsekvensen av att detta inträffar. Kortfattat anges detta som tidigare:

$$\text{Risk} = (\text{Förväntad skada}) = \text{Sannolikhet} \times \text{konsekvens} \quad (26)$$

Rapporten presenterar analyser av skredriskberäkningar gjorda i Göta älvdal. En traditionell stabilitetsanalys har varit utgångspunkt, och en komplettering har gjorts med en sannolikhetsbaserad analys. Tre olika metoder har tillämpats för att beskriva skredsannolikheten:

- enkel analys
- utökad analys
- utförlig analys.

Analysresultatet har strukturerats genom en indelning i fyra stabilitetsklasser (försumbar, någon, viss respektive påtaglig) och fyra konsekvensklasser (lindriga, stora, mycket stora respektive katastrofala). Med dessa indelningar har en riskmatris utformats med stabilitetsklasserna längs y-axeln och konsekvensklasserna längs x-axeln. Här kan sedan en riskklass definieras med ett så kallat talpar. Dessa förs sedan över på kartor för att illustrera utsträckningen.

Begreppet skredriskanalys innebär klassificering av potentiella skredbenägna områden. Man gör en sammanvägd bedömning av sannolikheten för skred och konsekvenserna av detta, vilket resulterar i en sorts kostnadsuppskattning av konsekvenserna (risk uttryckt i kronor). Detta görs för att man ska kunna ta ställning till om var i ett område det är viktigast att utföra förstärkningshöjande insatser.

En del av denna skredrisk innebär beräkning av brottsannolikhet, det vill säga en uppskattning av hur stor sannolikheten är att en slänt går i brott. Detta innebär en beräkning av sannolikheten för att säkerhetsfaktorn  $F$  är mindre än kritiskt värde,  $F < 1.0$ .

### ***Syn på riskvärdering***

Berggren (1990) talar om att en riskberäkning med statistiska metoder innefattar en så kallad sannolikhetsutsaga. Här anges sannolikheten för att ett skred ska inträffa. Detta anges i sin tur med en viss trovärdighet. Den totala sannolikheten för ett skred innebär således även att man ger utsagan en sannolikhet.

För införande av statistiska modeller behövs angivna krav på önskad säkerhet. Problemet är hur man ska välja denna säkerhet. Det finns för få och för dåligt undersökta skred för ett bra underlag. Räddningsverket (Rosenberg, 1989) föreslår en riskmatris med givna anvisningar för

prioriteringar. Denna matris ger möjlighet till en samlad bedömning av enskilda riskobjekt genom att klassificera dem. Som tidigare nämnts beaktas i riskmatrisen inte skredets utbredningshastighet. Inplacering av en risk sker med hänsyn till sannolikhet och konsekvens. Genom uppskattning av hur vanligt förekommande en skadehändelse är, kan sannolikheten kopplas till någon av fem följande klasser i en stigande skala.

Klass		Frekvens
1.	Liten sannolikhet	Mindre än 1 gång per 1000 år.
2.		1 gång per 100-1000 år
3.	Sannolik	1 gång per 10-100 år
4.		1 gång per 1-10 år
5.	Mycket sannolik	Mer än 1 gång per år

Man klassificerar konsekvenser för människors liv och hälsa samt miljö och egendom på samma sätt som skadefrekvens, där klass 1 står för de lindrigaste konsekvenserna och klass 5 för de allvarligaste.

Olika analysredskap finns angivna så som checklistor, grovanalys i översiktlig stabilitetskartering samt de så kallade trädmodellerna (felträdsanalys och händelseträdanalys). De senare bygger på en systematisk uppställning av inbördes beroende händelser vilka presenteras grafiskt liknande en trädstruktur. Trädmodellerna baseras på att sannolikheten för olika delhändelser ska inträffa givet att en bashändelse har inträffat. Att beräkna sannolikheten för ett stort antal olika händelsekedjor är enligt Ross (1989) inte möjligt med en rimlig arbetsinsats, och därför bör riskanalysen koncentreras till ett begränsat antal kedjor vilka kan ge upphov till stora konsekvenser.

### **Rankningsmetoder**

Berggren (1982) har utformat en rankningsmetod för lerslänter, där risken för skred bedöms. Sannolikheten för att ett skred skall inträffa inom ett visst område sammanvägs med konsekvenserna av det eventuella skredet. Släntens riskindex anges grafiskt som ett diagram med en korrektionsfaktor  $k$  på x-axeln och säkerhetsfaktorn  $F$  på y-axeln. Den undersökta släntens riskindex anges som en punkt i diagrammet. Ju högre riskindex desto farligare slänt.

### *$\beta$ -metoden*

I Berggren (1990) beskrivs  $\beta$ -metoden kortfattat. I nybyggnadsreglerna (BSF 1988:18) används den så kallade partialkoefficientmetoden för bedömning av konstruktioners säkerhet. Svårighet föreligger dock att välja rätt värde på partialkoefficienterna. Ett alternativ finns då i den så kallade  $\beta$ -metoden som är en sannolikhetsbaserad metod. Med metoden beräknas ett

säkerhetsindex  $\beta$  som beskriver konstruktionens tillförlitlighet. Ju högre index desto säkrare slänt. Brottvillkor formuleras matematiskt och ingående parametrar beskrivs som normalfördelade stokastiska variabler. Släntens bärförmåga och belastningen på jorden ges ett medelvärde och en standardavvikelse vilket medför ett brottvillkor. Detta brottvillkor kan illustreras med en fördelningskurva (Gaussfördelning). Generellt gäller att ju längre ifrån origo denna klockkurva ligger desto säkrare är slänten. Säkerhetsindexet anger hur långt ifrån origo som medelvärdet ligger, uttryckt i antal standardavvikelser. Nybyggnadsreglerna anger följande tre klasser för indexvärdet:

$\beta$ -värde	Säkerhetsklass	Beskrivning
3.71	1 (låg)	Tillräcklig vid risk för ringa personskada
4.26	2 (normal)	Tillräcklig vid risk för någon personskada
4.75	3 (hög)	Tillräcklig vid risk för stor personskada

Det finns dock en del problem med att beskriva storheterna i  $\beta$ -metoden om:

- fördelningstyp inte är känd
- storheterna ej sinsemellan är stokastiskt oberoende
- mängden storheter är för stor för att metoden ska bli praktiskt tillämpbar
- valda  $\beta$ -värden antas gälla i ett och samma homogena jordlager vilket inte är bra vid förekomst av flera jordlager, dessutom är jord som material till naturen inte homogent.

För beräkning av  $\beta$ -värden beskriver Bengtsson m.fl. (1989) en metod baserad på ranking av ingående variabler. Utöver rankingen behöver variablernas variationskoefficient kännas till samt att erfarenhet erfordras om den variansreduktion som krävs. Beträffande varians och variansreduktion hänvisas till Stille (1979) samt Bengtsson m.fl. (1989).

Vidare diskuteras säkerhetsfaktorn som säkerhetsbegrepp. Det påpekas att det oftast görs en översiktlig undersökning som leder till en beräknad säkerhetsfaktor. Denna översiktliga säkerhetsfaktor kan inte helt enkelt värderas med resultat från detaljundersökningar och diskuteras därför på ett subjektivt och känslomässigt sätt.

Konsekvenserna som tillgrips efter beräkning av säkerhetsfaktorn är starkt beroende av expertens värderingar. Enklare vore att faktorn kunde jämföras med ett uppställt krav. Problemet är dock att säkerhetsfaktorn bara är en av flera inverkande faktorer som beskriver en slänts stabilitetsförhållanden. Därför föreslås i Berggren (1990) stabilitetshöjande åtgärder så att säkerhetsfaktorn till exempel höjs med 10 %.

### Monte-Carlo metoden

I Berggren (1990) beskrivs Monte-Carlo metoden. Släntstabilitetsberäkningar baseras på ett flertal ingående parametrar, vilka kan betraktas som stokastiska variabler (oberoende slumpmässiga variabler), vars respektive fördelningsfunktion kan beskrivas med statistiska metoder.

Att utföra statistisk analys med många inblandade variabler är svårt både teoretiskt och praktiskt utan hjälp av datorkraft och program. Ingångsparametrarna till analysen erhålls från omfattande fältundersökningar. Sådana undersökningar är mycket kostsamma och därför begränsas den tillgängliga kvaliteten och kvantiteten på ingångsparametrarna av ekonomiska skäl.

För att kringgå dessa problem och samtidigt undersöka hur olika variablers stokastiska variation påverkar säkerhetsfaktorn kan simulering enligt Monte Carlo-metoden användas (Bosscher, 1988). Här möjliggörs införande av slumpmässigt genererade ingångsparametrar. Ingående parametrar baseras på begränsade mätningar av skjuvhållfasthetsvärden, jordlagergränser, grundvattennivåer etc. Dessa simuleras genom slumpmässiga kombinationer från respektive fördelningsfunktion. Vid simulering av 25 stycken eller flera sådana kombinationer kan, enligt Bosscher (1988), ett tillförlitligt värde på skredsannolikheten erhållas. Sannolikheten beräknas som andelen kombinationer som ger  $F \leq 1.0$ .

Metoden är särskilt användbar för ingenjörsmässiga bedömningar då begränsade data finns tillgängliga. Försök vid Lake Michigan i USA visar, enligt Berggren (1990), dock att säkerhetsfaktorerna varierar olika starkt när ingångsparametrarnas variation simuleras, samt att andelen erhållna  $F \leq 1.0$  varierar avsevärt mellan de analyserade slänterna. Därmed varierar även den uppskattade skredsannolikheten och följande bedömningsregel antogs:

Andel  $F \leq 1.0$  av totalt antal simuleringar

> 0.6	hög	instabil
0.3 – 0.6	medium	marginellt instabil
< 0.3	låg	stabil



### **Riskklassning/beräkning**

Berggren (1991b) har kommit fram till att nedan uppräknade förhållanden är av betydelse och bör koncentreras på.

#### A SANNOLIKHET FÖR SKRED

Grundvattenförhållanden:

- avrinningsområdets area uppströms den potentiella skredplatsen
- områden med grundvattenutströmning
- vertikal portrycksfördelning
- samband mellan nederbörds mängd och nederbördsintensitet.

Förändrade förhållanden:

- exploateringar och grundvattennivåförändringar i släntens närhet.

Metod vid stabilitetsberäkning:

Vilka säkerhetsfaktorer kan godkännas när de olika beräkningsmetoderna används:

- $c'$  - analys
- $\phi$  - analys
- $c'\phi$  - analys
- kombinerad analys.

#### B KONSEKVENSER AV SKRED

##### *Möjlighet till förvarning*

Om möjlighet till förvarning finns kan i gynnsamma fall människoliv och vissa andra värden räddas:

- omfattar ett beräknat initialscred några viktiga objekt som därmed räddningslöst hotas vid skred?
- mätningar av släntrörelser
- skredvarningssystem.

*Hotade objekt (primära)*

- de olika objektens avstånd till ett potentiellt initialskred, d.v.s hur hotade är objekten?
- objektens sårbarhet vid ett skred (Hur många dör eller skadas? Hur mycket förstörs?)
- antalet hotade objekt
- beräkning av olyckskostnad. Värdet av människoliv står över allt annat
- ekonomiska skador.

*Hotade objekt (sekundära)*

Skador som uppstår på grund av skredet men på annan plats än själva skredområdet:

- svallvågor som förorsakar dödsfall och ödeläggelse på motsatta stränder eller hotar flodtrafik
- förluster och skador p.g.a. avbrutna kommunikationsleder, kraftledningar och gasledningar
- explosioner och bränder
- förhindrad vattenkraftproduktion
- annat förhindrat företagande, förlorade förvärvskällor etc.

C SAMMANVÄGT RISKTAGANDE

*Viktning*

De olika komponenterna som beskriver sannolikheten för skred respektive konsekvenserna av ett skred skall viktas med de s.k. korrektionsfaktorerna enligt Berggren (1982). Dessa måste gås igenom och vid behov kompletteras.

*Accepterat risktagande*

Samordning så att risktagandet vid lerslänter likställs med annat samhälleligt risktagande. (exempelvis bränder i bostadshus, skolor, industrier, ställverk etc.)

Berggren (1990) talar om uppskattning av sannolikheten för inträffande av ett skred. För exakt sannolikhet krävs ett komplett undersökningsprogram för slänten. Den så kallade säkerhetsfaktorn  $F$  är det enda praktiska måttet på en slänts stabilitet. Riskutvärderingsmetoden baseras på att man utgår ifrån att det är troligast att skred sker i slänter med låg säkerhetsfaktor. På grund av flera orsaker (variationer i material, geometri, portryck etc.) behöver inte två olika slänter med samma lägsta säkerhetsfaktor löpa samma risk att brista. Sannolikheten för skred behöver inte vara lika.

För att minimera problemet att säkerhetsfaktorer beräknade med olika metoder är mer eller mindre tillförlitliga innehåller metoden klassificering av de utförda stabilitetsutredningarna. De faktorer som klassificeras är:

- släntens geometri
- störningar (erosion, kemisk påverkan och mänsklig påverkan)
- laster på underytan
- skjuvhållfasthet
- mothållande krafter och konstruktioner
- andra kännetecken
- kombinationer av data
- beräkningar.

Klassificeringen baseras på:

- kvaliteten på stabilitetsutredningen
- omfattningen av stabilitetsutredningen
- variationer i naturliga grundläggningen, undergrunden.

Klassificeringen utförs med hjälp av formulär enligt Berggren (1990) vilket genererar en summa av poäng som bedömer stabilitetsutredningens resultat.

#### *Bedömning av ett skreds konsekvenser*

Denna bedömning baseras på:

- riskzon-indelning
- hotade objekt
- bedömning av risk för varje specifikt objekt.

Riskzon-indelning innebär att man delar in ett område i två så kallade skredriskzoner samt övrigt område. Indelningen görs enligt nedan:

- zon 1, område där beräknade säkerhetsfaktorn är lägre än 1.5
- zon 2, där säkerhetsfaktorn är större än 1.5, området i slänten ovanför underytan (linje dragen från slänttån till zon 2: s översta del) som lutar i genomsnitt minst 1:10 ( $5.71^\circ$ ). För förtydligande se bilaga 1
- övrigt område, fasta ytor som till exempel berggrund där någon risk för skred ej föreligger, och området under en s.k. underytan.

Zon 1 är den primära riskzonen där initialscredet sker och där alla objekt kan betraktas som förlorade, då det ej kommer någon varning om att skredet kommer att utlösas.

Zon 2 är den sekundära riskzonen där det kan ske sekundära skred som följd av initialscredet. Om området består av lera beror utlösandet av ett sekundärt skred av lerans sensitivitet.

Undersökningar i Skandinavien och Nordamerika visar att lerslänter med en medellutning på mindre än 1:10 ej börjar glida. Få slänter har dock prövats enligt denna metod och det finns svårigheter med att veta fördelningen av säkerhetsfaktorer över området samt att avgöra var gränsen mellan zon 1 och 2 (där  $F = 1.5$ ) går.

Berggren m.fl. (1991a) ger nedanstående förslag till bedömning och utförande vid beräkning av skredrisknivån för lerslänter.

Skredrisknivån avser som tidigare nämnts produkten av sannolikheten för skred och förlustvärdet av liv, miljö och egendom:

$$\text{Risknivå} = \text{sannolikheten för skred} \times \text{förlustvärde} \quad (27)$$

Metoden ger en möjlighet till inbördes ”ranking” (prioritering) mellan olika slänter. I utredningsarbetet delas metoden upp i tre moment:

- sannolikhetsbedömning, där möjligheten av att ett skred ska inträffa bedöms
- konsekvensbedömning, där man beräknar uppskattade förlustvärden av människoliv, miljö och egendom vid ett eventuellt skred
- sammanvägning, där resultaten från 1 och 2 sammanvägs.

I Berggren m.fl. (1991a) visas hur resultaten från stabilitetsutredningen kombineras med konsekvensbedömningen, så att en sammanvägd skredrisknivå erhålles. I analysen klassas följande faktorer:

- släntgeometri
- belastning på markytan
- störningar
- skjuvhållfasthet
- övriga egenskaper
- mothållande laster och konstruktioner
- sammanställning av data
- beräkningar.

## Kapitel 2 Litteraturstudie

Den inbördes värderingen av dessa faktorerets betydelse för lerslätten ställs i normalfallet upp enligt tabell 2.2.1.

Tabell 2.2.1 Olika faktorerets betydelse för en slänts skredrisk

Faktor	Betydelse				
	Mycket liten	Liten	Medel	Stor	Mycket stor
Geometri - markyta - bottenlager			X		X
Ostörd hållfasthet					X
Störningskänslighet			X		
Urlakning	X				
Övriga jordegenskaper		X			
Portryck					X
Silt- och sandskikt				X	
Markrörelser - allmänt - små jordutfall - erosion			X	X X	
Historik		X			
Skogsbestånd	X				

Vidare utförs Berggren m.fl. (1991a) en klassning baserad på:

- undersökningens omfattning
- undersökningens kvalitet
- underlagets variation

där slätten erhåller olika poängtal med maximala poängsumman 100 poäng.

### Konsekvensbedömning

Bedömning av konsekvenser baseras på:

- avgränsning i så kallade riskzoner
- inventering av riskobjekt
- värdering av skredriskkonsekvenserna.

Avgränsningen sker i tre olika riskzoner samt övrig ”skredfri” mark:

- *zon A*, där säkerhetsfaktorn beräknas var mindre än 1.5, samt det område nedanför släntfoten som kan skadas av utglidande jordmassor
- *zon B*, område där säkerhetsfaktorn beräknas bli högre än 1.5 men befinner sig ovanför lutningslinjen 1:10 räknat från släntfoten (eller vattenlinjen)
- *zon C*, område som riskerar att bli utsatt för svallvågor på motsatta stranden av eventuellt mellanliggande sjö eller vattendrag. Om området är mera låglänt än zon A antas det få samma bredd som zon A. Om detta ej är fallet begränsas zon C av den marknivålinje som överrensstämmer med högsta marknivå inom zon A
- *övrig mark*, flackare terräng med en lutning mindre än 1:10 och fastmark.

Konsekvensvärderingen för hotad befolkning och hotad egendom genomförs i Berggren m.fl. (1991a). För mer detaljerad läsning angående konsekvensvärdering med blanketter hänvisas läsaren till Berggren m.fl. (1991a). För en eventuellt hotad miljö eller hotade kulturobjekt bör en särskild utredning utföras.

Värdet av människoliv skall alltid sättas i första hand även om materiella skador till mycket höga värden befaras. Därför måste antalet människor inom riskzonerna påverka värderingen i första hand. Hänsyn tas också till vistelsetiden för olika kategorier av människor inom området.

Inom zon A förväntas alla hotade värden bli förlorade utan förvarning. Inom zon B och C antas en begränsad andel av alla hotade värden gå förlorade. Detta skall avspegla att ett initialscred antas beröra hela zon A, medan bakåtgripande följdskred med olika grad av förvarning eller svallvågor antas beröra en begränsad del av zon B och C.

Hur stora delar av de hotade objekten inom zon B som antas bli berörda av dessa följdskred beror på sensitivitetsförhållandena samt grundvattenströmning i slänten. Motsvarande andelar i zon C antas bero av förhållandet mellan volym utglidna jordmassor och mellanliggande vattenmassor samt avståndet över vattenområdet och vattendjupet.

Enligt Mitchell (1978) och Lebuis m.fl. (1983) inträffar endast mindre skred utan följdskred vid låga och medelhöga sensitivitetvärden ( $S_t < 15$ ). Vid högre värden ( $15 < S_t < 50$ ) utvecklas följdskred som griper högst 100 m in i slänten. I fallet med s.k. kvicklera ( $S_t > 50$ ) förlorar leran sin hållfasthet i sådan grad att den omvandlas till ett flytande tillstånd. Skredet griper mer än 100 m in i slänten. Sannolikheten för sådan skredutveckling (så kallad retrograd) är störst vid uppåtriktad grundvattenströmning och minst vid nedåtriktad.

Allra sist görs en sammanställning och en prioritering i. I denna sammanställs beräknad säkerhetsfaktor och resultaten från riskvärdering samt från särskild utredning för natur och

miljökonsekvenser. Denna sammanställningstabla är avsedd som underlag för bedömning av släntens sammanvägda prioritet vid jämförelse mellan olika riskslänter.

Alén m.fl. (2000) beskriver skredriskbedömning efter analys av området kring Göta älvdalen enligt följande.

Ekvationen för risk

$$\text{Risk} = \text{sannolikhet} \times \text{konsekvens} \quad (28)$$

är till synes enkel men det finns ett antal svårigheter.

### 1. Att uttrycka olika konsekvenser med samma måttenhet

Konsekvenserna av ett skred kan vara av vitt skilda natur, exempelvis:

- antal omkomna
- antal skadade personer
- skador på egendom
- belastning på miljön
- ökade transportkostnader och restider efter ett skred.

Det existerar fler konsekvenser vilka inte är en direkt följd av ett skred till exempel förstärkningskostnader.

### 2. Att beräkna små, absoluta sannolikheter

Om man ska jämföra ett alternativ med små men dock odiskutabla konsekvenser, dvs. en sannolikhet  $p \approx 100\%$ , med ett alternativ med stora, men osannolika konsekvenser, dvs. små sannolikheter, t ex  $p = 10^{-4} - 10^{-6}\%$ . För att jämföra riskerna enligt ekvation 28 krävs att små sannolikheter kan beräknas med stor precision.

### 3. Att jämföra mycket olika konsekvenser

Även om svårigheterna ovan bemästras är det inte självklart att risker med samma nominella utfall enligt ekvation 1-1 skall bedömas lika. Vanligt är att mycket stora konsekvenser bedöms som oacceptabla även om sannolikheten är liten.

Behandlade konsekvenser av skred har begränsats till fysiska skador (person, egendom och miljö). Skredsannolikheter bestäms inom ett område genom kvantitativ bedömning inom ett antal

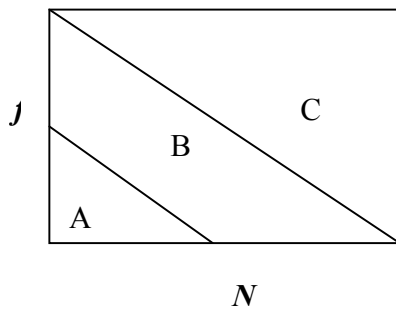
typsektioner och kvalitativ för mellanliggande delar. Liten sannolikhet för skred innebär att de beräknade sannolikheterna faller inom ett begränsat intervall. De beräknade sannolikheterna har betraktats som ett relativt mått, ej absolut.

Skredrisken redovisas i en riskmatris. Skredsannolikheten beskrivs i fyra olika klasser på y-axeln, medan konsekvensen beskrivs på x-axeln, även den i fyra klasser. Bedömning av acceptabla risker finns gjorda i de sammanfattade slutsatserna.

Tabell 2.2.2 Riskmatris 1

Sannolikhet				
<b>4 Påtaglig</b>	Påtaglig sannolikhet för lindriga skador	Påtaglig sannolikhet för stora skador	Påtaglig sannolikhet för mycket stora skador	Påtaglig sannolikhet för katastrofala skador
<b>3 Viss</b>	Viss sannolikhet för lindriga skador	Viss sannolikhet för stora skador	Viss sannolikhet för mycket stora skador	Viss sannolikhet för katastrofala skador
<b>2 Någon</b>	Någon sannolikhet för lindriga skador	Någon sannolikhet för stora skador	Någon sannolikhet för mycket stora skador	Någon sannolikhet för katastrofala skador
<b>1 Försumbar</b>	Försumbar sannolikhet lindriga för skador	Försumbar sannolikhet för stora skador	Försumbar sannolikhet för mycket stora skador	Försumbar sannolikhet för katastrofala skador
<b>Konsekvenser</b>	<b>1 Lindriga</b>	<b>2 Stora</b>	<b>3 Mycket stora</b>	<b>4 Katastrofala</b>

Den totala risken betecknas som ett talpar bestående av risk och sannolikhet ur riskmatrisen. Risker anges normalt med en  $fN$ -kurva där  $f$  anger frekvensen/sannolikheten för att en oönskad händelse ska inträffa, och visas på den vertikala axeln.  $N$  anger på den horisontella axeln konsekvenserna av att denna händelse inträffar med ett generellt antalsmått. Detta kan vara kronor, antal döda, antal skadade etc. Det totala riskområdet (området i matrisen) delas upp i områden med olika innebörd. Det illustreras med figur 1, som ska ha skalor:  $1.0E-05$  till  $1.0E-01$  på vertikalaxeln och  $1.0E+06$  till  $1.0E+09$  på horisontalaxeln. I figuren under kan t ex område A betecknas som acceptabel risk, område C som oacceptabel risk medan område B är möjligen acceptabelt (detta bedöms från fall till fall).



Figur 2.2.1 Exempel på  $fN$ -kurva

Med ovanstående information kan risk beräknas på två sätt:

- enligt ekvation 28 och frekvenserna i  $fN$ -kurvan vilket ger i tabellform riskmatris 2
- som summan av stabilitetsklassen och konsekvensklassen och ger riskmatris 3.



Tabell 2.2.3 Riskmatris 2

$10^{-1}$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
$10^{-2}$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
$10^{-3}$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$10^{-4}$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
	$10^6$	$10 \times 10^6$	$100 \times 10^6$	$1000 \times 10^6$

Tabell 2.2.4 Riskmatris 3

4	4+1=5	4+2=6	4+3=7	4+4=8
3	3+1=4	3+2=5	3+3=6	3+4=7
2	2+1=3	2+2=4	2+3=5	2+4=6
1	1+1=2	1+2=3	1+3=4	1+4=5
	1	2	3	4

Vid en jämförelse emellan matriserna ger att potensen på risken i riskmatris 2 är lika med ”risksumman” i riskmatris 3. Riskbegreppet,  $risk = sannolikhet \times konsekvens$ , motsvarar summering av klasser om dessa klasser väljs logaritmiskt Alén m.fl. (2000). Detta samband innebär en möjlighet att fördjupa en kvalitativ riskbestämning med riskmatris och översiktlig analys till en kvantitativ analys utan att behöva ändra redovisningsmetod.

För att bedöma osäkerheter vid skredriskbedömning bör följande faktorer beaktas:

- *belastningar*, som utgörs av jordens egentyngd samt yttre laster (byggnader, vägar, trafik etc.). Egentyngden är oftast dominerande för naturliga slänter. Osäkerheten är normalt större för andra laster än för egentyngden, varför bedömningen av dessa laster får ökad betydelse vid beräkning av skredsannolikhet. Det är viktigt att förutom lastens storlek ta hänsyn till dess varaktighet då detta påverkar mekaniken i ett skred och därmed kopplas till beräkningsmodellen. Det bör observeras att laster kan vara såväl pådrivande som mothållande
- *släntgeometri*, osäkerheten är normalt liten för enkla slänter under kända förhållanden. Naturliga slänters geometri i tre dimensioner är dock inte alltid enkelt att beskriva i två dimensioner. Om dessutom analysen baseras på ett ofullständigt kartunderlag blir osäkerheten betydande. Osäkerhet i bottenpografi i vattendrag kan ha stor betydelse
- *hållfasthet*, osäkerheter av detta slag är välkända för geotekniker, och ses av tradition som dominerande
- *portryck*, variationer kan vara en utlösande faktor för skred, sett såväl på kort sikt som på lång i form av årsvariationer. Vid vattendrag är portrycket ofta kopplat till vattenståndet i vattendraget
- *beräkningsmodell*, i ett internationellt perspektiv existerar ingen generellt accepterad beräkningsmodell för släntstabilitet. Detta beror på att de geologiska förutsättningarna varierar stort världen över. Variationen har dock även betydelse i ett nationellt perspektiv. Traditionellt behandlas modellosäkerhet genom att använda en beräkningsmodell på

”säkra sidan”. Ett alternativ är att införa en modellfaktor i form av en slumpvariabel. Under förutsättning att man kan bedöma modellosäkerheten och på detta sätt beskriva variabeln.

För att bestämma skredrisk för aktuellt område har metodik innehållande följande delar använts:

- inventering
- beräkningsförutsättningar
- stabilitetsberäkningar
- konsekvenser av skred.

För att inventera inför stabilitetsberäkningar behövs information om:

- markytans och fasta bottens höjd- och sidoläge
- jordlagrens uppbyggnad och hållfasthetsegenskaper
- portryck i lerlager och skikt samt grundtryck i bottenlager
- belastningar på markytan (utfyllnad, byggnader, trafik etc.)
- vattenstånd i ev. vattendrag.

Dessa erhålls genom geotekniska fältundersökningar.

Det kan vara av betydelse att undersöka områdets geologiska historia och eventuella tidigare skred. Vidare bör man ta hjälp av tidigare gjorda geotekniska undersökningar. Komplettering med flygbilder är ett annat verktyg.

Under begreppet beräkningsförutsättningar ingår data beträffande:

- ostörd provtagning (kolvprovtagning) med redovisade laboratorieresultat
- hållfasthetsvärden med vingförsök
- resultat från portrycksmätningar
- torrskorpa och skiktangivelser
- totaldjup till fast botten utvärderat från sektioner med sonderingar
- tidigare utförda geotekniska utredningar
- sektioner där stabilitetsberäkningar tidigare gjorts
- sonderingspunkter vars läge kan bestämmas i x- och y-koordinater
- höjdbestämda sonderingskoordinater.

I fallet med Göta älvdal har stabilitetsberäkningar utförts på konventionellt sätt med klassisk metod, såväl odränerad som kombinerad analys. Hållfasthetsanisotropi har ej tagits hänsyn till. Använda program är SLOPE/W och SSTAB.

För att få underlag till indelning i stabilitetsklasser beräknas säkerhetsfaktorerna som funktion av glidyornas startpunkt i de olika sektionerna. Vidare utförs statistiskt baserade analyser.

I en korrekt konsekvensanalys ur en riskanalys beskrivs olika scenarier systematiskt i till exempel ett händelsetråd. De olika händelserna ges sannolikheter och kostnader, varpå man slutligen kan uttrycka konsekvensen av ett skred som en total kostnad. Detta kan dock vara svårt och motstånd finns till att värdera till exempel människoliv. Därför har man i Göta älvdal-fallet valt att redovisa konsekvenser verbalt, en första förenklad gren av ett händelsetråd. Här har man delat in konsekvenserna i fyra konsekvensklasser, vilka inte stämmer överens med dem som idag används av räddningsverket.

- konsekvensklass 1: lindriga skador
- konsekvensklass 2: stora skador
- konsekvensklass 3: mycket stora skador
- konsekvensklass 4: katastrofala skador.

### ***Metoder för beräkning av skredsannolikhet***

Tre metoder med olika komplexitet har utvecklats och använts för att beskriva skredsannolikheten:

- enkel analys: odränerad analys + statistisk analys
- utökad analys: odränerad analys + statistisk analys
- utförlig analys: odränerad analys + kombinerad analys + statistisk analys.

Samtliga metoder innebär en statistisk analys med det allmänna uttrycket:

$$F = \frac{N \times c}{P_d} \quad (29)$$

$N$  är ett stabilitetsstal,  $c$  är medelvärdet av skjuvhållfastheten längs en tänkt glidyta och  $P_d$  pådrivande tryck.

Var och en av de tre analystyperna enkel, utökad samt utförlig beskrivs mer ingående i närmast kommande avsnitt om skredsannolikhet.

### Skredsannolikhet

Säkerhetsmarginalen  $M$  är allmänt definierad som skillnaden mellan mothållande och pådrivande storheter ( $M > 0$  är säkert,  $M < 0$  är brott). Uttrycket är dock ej entydigt exempelvis kan säkerhetsmarginalen vara skillnaden mellan skjuvhållfasthet och skjuvspänning,  $M = c - \tau$ . Brott sannolikhet bestäms ofta genom att använda ett ställföreträdande sannolikhetsmått, ett så kallat säkerhetsindex  $\beta$  definierat som kvoten mellan medelvärdet och standardavvikelsen för säkerhetsmarginalen  $M$  enligt ekvation 30.

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (30)$$

Detta bygger på att  $M$  är normalfördelad. Om  $F$  är normalfördelad så är  $M = F - 1$ , och om  $F$  är lognormalfördelad så är  $M = \ln(F)$ . Traditionellt säkerhetsmått är dimensionslös säkerhetsmarginal (Alén, 1998a)

$$m = \frac{c - \tau}{c} = 1 - \frac{1}{F} \approx \ln(F) \quad (31)$$

Beräkningar av  $\beta$  kräver lämpligen en formulering med konstant nämnare

$$m = \frac{c - \tau}{\mu_c} \approx \ln(F) \quad (32)$$

Normalfördelningsantagande ger

$$\beta = \frac{F - 1}{V_F \times F} \quad (33)$$

där  $V_F$  är en variationskoefficient. Vidare ger antagandet om lognormalfördelning

$$\beta \approx \frac{\ln(F)}{V_F} \quad (34)$$

Ekvationerna för beräkning av  $\beta$  bygger på antagandet att det traditionellt beräknade värdet på  $F$  kan betraktas som ett medelvärde  $\mu_F$ . Detta är praktiska tillämpningar förutsatt att indata är valda som medelvärden, dvs. inte på den säkra sidan. Sista ekvationen är en förenkling av en mer generell formulering. Noggrannheten hos  $V_F$  är mindre än 25 %.

Mellan  $\beta$  och brottsannolikheten  $p_f$  råder sambandet

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (35)$$

Här är  $\Phi(-\beta)$  den standardiserade normalfördelningen (medelvärde  $\mu = 0$  och standardavvikelsen  $\sigma = 1$ ). I fallet med Älvdalen har man redovisat skredsannolikheten istället för säkerhetsindex. Sannolikheten för skred, mätt i absoluta tal, är starkt beroende av antagandet om fördelningstyp för säkerhetsfaktorn (se ekvation 33, 34 och 35). Därför kan man välja att ange skredsannolikheten uttryckt i relativa tal,  $100p$ ,  $p$ ,  $p/1000$ , så att val av fördelningstyp inte skall slå igenom för starkt.

### *Odränerad analys*

Odränerad analys har av tradition använts i Sverige för beräkning av naturliga lerslänTERS stabilitet. Denna typ av analys beskriver en situation där då brottet med efterföljande jordrörelser sker under volymkonstans, det vill säga ingen konsolidering antas ske under brottförloppet. Analyser i efterhand har visat att denna metod ibland inte är tillräcklig som förklaring av en otillräcklig stabilitet enligt Alén m.fl. (2000). Därför rekommenderas idag kombinerad analys som komplement till odränerad analys för en slänt med varierande dräneringsförhållanden.

### *Kombinerad analys*

Det lägsta värdet av den odränerade och den dränerade skjuvhållfastheten beräknas för olika delar av den tänkta glidytan. Analysmetoden beskriver en situation mellan de två extremfallen att ingen konsolidering sker under skredförloppet (odränerad analys) och att fullständig konsolidering sker under skredförloppet (dränerad analys). Kombinerad analys bör endast användas för slänter och situationer där ett partiellt dränerat brott är tänkbart, annars finns risk för konservativ analys.

Då skillnaderna i permeabilitet mellan de olika jordtyperna är stora uppkommer det olika dräneringsgrader i en jordprofil med lager av kohesionsjord, mellanjord och friktionsjord. Därför är det motiverat med en form av kombinerad analys med dränerad hållfasthet i friktionsmaterialen och odränerad hållfasthet i den finkorniga jorden samt partiellt dränerad hållfasthet i mellanjordslager.

### Statistisk analys

Vid statistisk analys är frågeställningen om det är odränerad analys eller kombinerad analys som är dimensionerande. Ett uttryck för den andel  $\xi$  av glidytan som styrs av dränerad hållfasthet är

$$\xi = 2 \times \left( 1 - \frac{F_{komb}}{F_c} \right) \quad (36)$$

Traditionellt gäller antagandet att osäkerheten domineras av osäkerhet i skjuvhållfastheten. Detta ger då

$$F_{komb} \approx \frac{V_{komb} \times (F_c - 1)}{V_c} + 1 \quad (37)$$

då  $\beta_c = \beta_{komb}$ .

### Enkel analys

Vid enkel analys ansätts variationskoefficienten  $V_F$  (osäkerheten av  $F$ ) direkt. Säkerhetsindex  $\beta$  beräknas då genom ekvation 33 eller 34. Vidare kan skredsannolikheten beräknas med ekvation 35. Variationskoefficienten kan hämtas ifrån en känslighetsanalys av olika parametrar. En vanlig geoteknisk ansats är att om osäkerheten ligger i skjuvhållfastheten erhålles

$$V_F = V_c \text{ då } F_c = \frac{N_c \times c_u}{P_d}, \text{ det vill säga en konstant} \times c_u. \quad (38)$$

Inverkan av spridningen hos de olika parametrarna kan bedömas med en s.k. känslighetsanalys. Variationen  $\Delta F / \Delta X_i$  beräknas med ett traditionellt stabilitetsberäkningsprogram, där  $X_i$  är någon av storheterna:

- jordens tunghet,  $\gamma$
- yttre last,  $q$
- odränerad skjuvhållfasthet,  $c_u$  eller  $\tau_{fu}$
- parametrar för dränerad skjuvhållfasthet,  $c'$  eller  $\varphi'$
- porttryck,  $u$ .

Utökad analys

I en utökad analys undersöks inverkan av samtidig variation av olika parametrar. Analysen är begränsad till odränerad analys. Metoden bygger på en säkerhetsfaktor som är lognormalfördelad, vilket innebär att det för den allmänna modellen  $F_c = N_c \times c_u / P_d$  kan formuleras en säkerhetsmarginal

$$M = \ln(F_c) = \ln(N_c) + \ln(c_u) - \ln(P_d) \quad (39)$$

vilken är en summa av normalfördelade variabler med säkerhetsindex

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \approx \frac{\ln(\mu_{F_c})}{V_F} = \frac{\ln(\mu_{N_c}) + \ln(\mu_{c_u}) - \ln(\mu_{P_d})}{\sqrt{V_N^2 + V_{c_u}^2 + V_{P_d}^2}} \quad (40)$$

Täljare och nämnare kan i princip beräknas oberoende av varandra. Storleken på täljaren bestäms med traditionell stabilitetsberäkning. Mest troliga värden på indata antas motsvaras av medelvärden. Stabilitetsfaktorn  $N_c$  är relativt konstant för slänter med liknande geometri, dock kan storleken på stabilitetsfaktorn påverkas avsevärt.

Variationskoefficienten  $c_u$  utvärderas från fält- och laboratorieundersökningar. För beräkning av säkerhetsindex  $\beta$  och skredsannolikheten krävs en utvärdering av variationen av pådrivande tryck  $V_{P_d}$ , och det utförs enligt nedan.

Idealiserad slänt med verkande yttre vattentryck har säkerhetsfaktorn

$$F_c = \frac{N_c c_u}{P_d} = \frac{N_c c_u}{\gamma H - \gamma_w H_w} \quad (41)$$

där  $H$  och  $H_w$  anger slänthöjd respektive vattendjup samt  $\gamma$  och  $\gamma_w$  är tunghet för jord respektive vatten. Det pådrivande trycket  $V_{P_d}$  är obalanserat vertikalt tryck. För en allmän slänt kan ekvation 41 skrivas som

$$F_c = \frac{N_c c_u}{\gamma H_{ekv.} - \gamma_w H_{w,ekv.}} = \frac{N_c c_u}{P_{d,ekv.}} \quad (42)$$

där  $H_{ekv.}$  är en ekvivalent slänthöjd med hänsyn till inverkan av yttre last och en icke linjär geometri på den aktiva sidan medan  $H_{w,ekv.}$  är ett ekvivalent vattendjup för motsvarande inverkan av yttre last och geometri på den passiva sidan.  $P_{d,ekv.}$  är ett ekvivalent pådrivande tryck.

För en odränerad analys beskrivs säkerhetsfaktorn som

$$F_c = \frac{M_{c_u}}{(M_\gamma + \Delta M_q) - (M_w + \Delta M_p)} \quad (43)$$

där  $\Delta M_q$  är inverkan av yttre last och en icke linjär slänt på passivsidan. Vid jämförelse av ekvation 42 och 43 kan  $P_{d,ekv}$  beräknas approximativt. Om kvoten  $M_\gamma/H$  antas konstant, kan  $H_{ekv}$  beräknas som

$$H_{ekv} = \frac{M_\gamma + \Delta M_q}{M_\gamma} \cdot H \quad (44)$$

För att beräkna  $H_{w,ekv}$  görs ansatsen att  $M_w/M_\gamma \approx H_w^2/H^2$  vilket medför

$$\frac{M_w + \Delta M_p}{M_\gamma} = \frac{(H_w + \Delta H_w)^2}{H^2} \quad (45)$$

eller

$$H_{w,ekv} = \sqrt{\frac{M_w + \Delta M_p}{M_\gamma}} \cdot H \quad (46)$$

där  $H_{w,ekv} = H_w + \Delta H_w$

$\Delta M_q$  och  $\Delta M_p$  kalibreras mot resultatet av en traditionell stabilitetsberäkning. Variationskoefficienterna för  $H$  och  $H_w$  antas förbli oförändrade, dvs.  $V_{H,ekv} = V_H$  resp.  $V_{H_w,ekv} = V_{H_w}$ . Då kan variationskoefficienten  $V_{P_d}$  beräknas som

$$V_{P_d} = \frac{\sigma_{P_d}}{\mu_{P_d}} \quad (47)$$

där standardavvikelsen  $\sigma_{P_d}$  bestäms approximativt som

$$\sigma_{P_d} = \sqrt{\sigma_{\gamma H_{ekv}}^2 + \sigma_{\gamma_w H_{w,ekv}}^2} \approx \sqrt{\gamma^2 \cdot H_{ekv}^2 \cdot (V_\gamma^2 + V_{H_{ekv}}^2) + \gamma_w^2 \cdot H_{w,ekv}^2 \cdot V_{H_{w,ekv}}^2} \quad (48)$$

medan  $\mu_{P_d}$  fås från nämnaren i ekvation 42.

Metoderna enkel och utökad analys kan båda användas vid traditionell stabilitetsberäkning för att uppskatta medelvärdet av  $F$ , kompletterad med en statistisk bearbetning för uppskattning av



spridningen. För utförandet av analysen krävs inte några speciella program. Den traditionella stabilitetsanalysen utförs med något på marknaden vanligt förekommande program (till exempel SLOPE/W). Den statistiska analysen utförs med ett kalkylblad, lämpligen excel.

### Utförlig analys

De två beräkningsmetoderna enkel och utökad analys lämpar sig för praktiskt bruk och är begränsade till odränerade förhållanden. Då kombinerad analys blir dimensionerande finns en analysmetod utvecklad för beräkning av skredsannolikheten som omfattar både odränerad och kombinerad analys, en så kallad utförlig analys.

I kombinerad analys är bestämningen av den genomsnittliga skjuvhållfastheten längs en tänkt glidyta ett av huvudresultaten av analysen. Storleken av skjuvhållfastheten kan ej ses som en indatavariabel utan som en funktion av skjuvhållfasthetsparametrarna:

- odränerad skjuvhållfasthet,  $c_u$
- kohesionsintercept,  $c'$
- inre friktionsvinkel,  $\phi'$  jämte effektivspänningar  $\sigma'$ .

Detta förhindrar möjligheten att separera beräkningen av medelvärde och spridning, som kan göras i den enkla och den utökade analysen. Den utökade analysen är en statistisk analys integrerad med den traditionella analysen. Den är i det här fallet baserad på Bishops förenklade metod (lamellmetod för cirkulärcylindriska glidytor, där man bortser från vertikala kopplingskrafter mellan lamellerna).

Den kombinerade skjuvhållfastheten för en enskild lamell bestäms som

$$c_{komb} = \left[ \frac{c' + (\gamma \cdot h_{lamell} - u) \cdot \tan(\phi)}{1 + \frac{\tan(\phi') \cdot \tan(\alpha)}{F}} ; c_u \right] \quad (49)$$

För att slippa den iterativa beräkning som Bishops metod kräver, kan skjuvhållfastheten definieras som skjuvspänningen vid brott, det vill säga för  $F = 1.0$ . Nedan följer arbetsgången vid utförlig analys:

1. beräknar om en icke linjär slänt till en ekvivalent linjär slänt med samma tyngd och pådrivande moment
2. det horisontella läget för rotationscentrum för den farligaste glidytan bestäms

3. pådrivande moment bestäms för glidytor med olika vertikala rotationscentrum samt med varierande utsträckning från släntfoten. Det pådrivande momentet kan beräknas analytiskt med "vätskeanalogin", oberoende av lamellindelningen. I det pådrivande momentet inräknas inverkan av yttre vatten
4. medelvärde av odränerad och dränerad skjuvhållfasthet beräknas genom integrering för samma glidytor som under punkt 3
5. mothållande moment beräknas för aktuella glidytor
6. säkerhetsfaktorn  $F$  beräknas som  $F = M_R/M_S$  för odränerad och kombinerad analys
7. stabilitetstalet  $N$  bestäms ur likheten

$$F = \frac{N \cdot c}{\gamma \cdot H} = \frac{M_R}{M_S} = \frac{m_R \cdot c \cdot H^2}{m_S \cdot \gamma \cdot H^3} \quad (50)$$

som

$$N = \frac{m_R}{m_S} \quad (51)$$

där  $m_R$  och  $m_S$  är dimensionslösa storheter som beskriver inverkan av slänters geometriska form på motstånd respektive last (Alén, 1998b)

8. säkerhetsindex  $\beta$  bestäms ur generella formeln

$$F = \frac{N \cdot c}{\gamma \cdot H} \quad (52)$$

där effekter av yttre last, vatten och icke linjär slänt är inarbetad i storleken av stabilitetstalet  $N$  enligt ovan. Säkerhetsindex beräknas som

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \approx \frac{\ln(\mu_F)}{V_F} \approx \frac{\ln(\mu_N) + \ln(\mu_c) - \ln(\mu_\gamma) - \ln(\mu_H)}{\sqrt{V_N^2 + V_c^2 + V_\gamma^2 + V_H^2}} \quad (53)$$

och skredsannolikheten beräknas enligt ekvation 35 som  $p_f = \Phi(-\beta)$ .

Variationskoefficienterna för tyngd  $\gamma$  och höjd  $H$  ansätts som indata medan  $V_N$  och  $V_c$  bestäms ur beräkning av  $\Delta N$  och  $\Delta c$  för rimliga variationer på indata.

Portrycket är ofta avgörande för resultatet men har dock inte satts som slumpvariabel. Det har istället betraktats som en "huvudlast" och därmed givits ett konservativt värde. Förfarandet bör alltså ses som en beräkning på säkra sidan.

### **Sammanfattning**

Skredriskavsnittet behandlar ett antal snarlika metoder för bedömning av risken för ett skred inom ett större geografiskt område (skredsystem/flera slänter), där det vägs in såväl rent geotekniska förutsättningar (brottsannolikhet) som konsekvenserna av ett skred (påverkan på omgivningen, människor etc.) ur ett mer ekonomiskt perspektiv.

Syftet är att kunna avgöra var sannolikheten för skred är som störst och var konsekvenserna blir allvarligast, för att sedan kunna ta ställning till var åtgärder eventuellt bör sättas in samt vilka åtgärder som lämpligen kan utföras. Motivet till skredriskbedömning är sålunda i första hand av ekonomisk karaktär, snarare än rent geotekniskt.

Berggren m.fl. (1991a) presenterar en metod där framför allt lerslänTERS geotekniska egenskaper, historik, geotekniska undersökningar etc. poängsätts efter omfattning, kvalitet och betydelse för att uppskatta en brottsannolikhet. Därtill uppskattas även konsekvenserna av ett skred enligt ett liknande poängsystem. Den totala risken (ekonomiska) kan sedan beräknas som

*risk = sannolikhet × konsekvens.*

Hur de olika parametrarnas betydelse bestäms varierar något mellan de olika referenserna i detta kapitel, men definitionen på total risk är i stort sett densamma. Slänterna klassificeras med avseende på bland annat materialparametrar och konsekvenser.

Beräkning av sannolikheten för brott tillämpas i huvudsak på två olika sätt. I  $\beta$ -metoden beräknas ett så kallat riskindex för att kunna klassificera olika slänTER efter skredrisk. Monte-Carlo metoden räknar med slumpvalsgenererade värden på ingående parametrar. Båda varianterna utgår ifrån den klassiskt beräknade säkerhetsfaktorn  $F$ .

### **2.2.2 Brottsannolikhet**

#### **Allmänt**

Litteraturen har anskaffats genom sökning i SGI:s bibliotek via dess sökmotor SGI-line. Den befintliga litteraturen består till större delen av artiklar presenterade i diverse geotekniska skrifter och konferenshandlingar. Majoriteten av dessa är av förklarliga skäl utländska, men några svenska referenser har dock hittats. De flesta skrifter beskriver utförande, tillvägagångssätt och resultat av olika typer av försök med sannolikhetsbaserad släntstabilitetsanalys som grund.

Här följer väsentliga utdrag ur dessa referenser som i slutet sammanställts för en övergripande bild av sannolikhetsbaserad släntstabilitetsanalys.

***Probabilistic theory and kinematical element method***

*P. Gussmann, H. Ochmann (1985)*

Jords mekaniska uppförande beträffande densitet, permeabilitet, vatteninnehåll, deformationsförhållanden och styrka fördelas i tid och rymd i jordstrukturen relativt slumpmässigt.

Resultatet av en probabilistisk analys ger sannolikheten för att ett skred ska ske samt de ingående parametrarnas betydelse. Säkerheten återspeglas i resultatet och inkluderar alla möjliga kombinationer av materialparametrar och laster. Detta är i traditionell analys bara möjligt genom så kallad parametervariation.

Resultaten av en probabilistisk analys är sannolikheten för brott  $p_f$  därtill ges en fingervisning om hur viktiga parametrarna  $\alpha_i$  och de så kallade basvariablerna  $\tilde{x}_i$ , är.

I denna rapport återfinns inte någon klar definition av brottsannolikheten  $p_f$ . Enbart resultat av i rapporten tillämpad beräkningsmodell presenteras.

***Probabilistic analysis of stability of earth slopes***

*E. O. F. Calle (1985)*

Utvärdering av sannolikheten för att ett skred inträffar omfattar två steg. Det första går ut på att bestämma sannolikheten av att det existerar en zon med så pass låg säkerhetsfaktor att ett skred kan inträffa. Det andra steget är att avgöra sannolikheten att ett skred i en sådan zon inträffar.

Utveckling av sannolikhetsbaserade metoder har under 70-talet gjorts av bl.a. WU & Kraft (1970) och Alonso(1976). Kärnan i dessa analyser är att naturlig variation av skjuvhållfasthet hos jorden och osäkerhet beträffande begränsad provtagning samt defekter i tester leder till osäkerhet beträffande beräkning av säkerhetsfaktor.

Metoden enligt Calle (1985) baseras på Vanmarcke's metod att slumpmässigt modellera variation av jords skjuvhållfasthet inom jordlager. Här används även en brottmodell av typ finit bredd. Det innebär att bredden av slänten är lika med den förväntade zon där säkerhetsfaktorn  $F$  är lägre än 1.0, en så kallad potentiell skredzon.

Den tillämpade brottmodellen är av typen cirkulär cylindrisk brottyta, som verkar över en finit bredd  $l$ . Jämviktsanalys av pådrivande moment och mothållande moment visar på brott då

$$\int_l M_r + 2M_e < \int_l M_0 \quad (54)$$

där  $M_r$  motsvarar mothållande moment från mobiliserande skjuvkrafter längs en potentiell glidyta,  $M_e$  avser tillskottet vid ändytorna och  $M_0$  är det lokala pådrivande momentet. Vidare anges modifierade formler vid händelse av att vidden över- eller understiger  $l$ .

Säkerhetsfaktorn  $F$  i en brottmodell, inkluderat effekter av momenttillskott i ändsektionerna uttrycks som

$$F_l = F + \frac{2M_e}{l \cdot M_0} \quad (55)$$

där  $F$  är den konventionella säkerhetsfaktorn. Sannolikheten att brott uppstår uttrycks som

$$P(f) = P(F_l < 1) = P(F_l < 1 \cap F < 1) = P(F_l < 1 | F < 1)P(F < 1) \quad (56)$$

där  $P()$  avser sannolikheten för att en händelse skall inträffa,  $f$  är händelsen brott,  $F < 1.0$  är händelsen att säkerhetsfaktorn är lägre än 1.0 (ej momentjämvikt) någonstans utmed släntaxeln och  $F_l < 1$  avser händelsen att säkerhetsfaktorn i brottmodellen med vidden  $l$  är lägre än 1.0 (ej momentjämvikt).

### ***Probabilistic slope stability analysis using a micro computer***

*M. S. Rosenbaum & J. Jarvis (1985)*

Analysen använder sig av Janbus lamellmetod, med geologiska indata i form av Hoek-Browns kriterium för hållfasthet hos stenblock/berg. Monte-Carlo simulering tillåter att resultaten presenteras som sannolikheten att säkerhetsfaktorn  $F$  för slänten hamnar under kritisk nivå, det vill säga  $p(F < 1.0)$ .

Geologiska material har en naturlig variation i sina egenskaper och sin fördelning. Sådan variation kan inte tas hänsyn till i konventionella släntstabilitetsanalyser. Ett alternativt angreppssätt till detta är att använda sig av så kallad sannolikhetsbaserad analys istället (till exempel Piteau & Martin, 1977 eller Moss & Steffen, 1978). Metoden grundar sig på samma typ av brott som vid klassiska metoder, men tar istället hänsyn till en slumpmässig fördelning av ingående parametrar. Detta medför att sannolikhetsbaserade säkerhetsfaktorer kan beräknas, samt med vilken sannolikhet säkerhetsfaktorer under kritisk nivå förekommer.

För att erhålla värden på de ingående materialparametrarna används metoder där de tilldelas en standardavvikelse för att efterlikna den naturliga variationen som normalt förekommer. Variationen kan sedan läggas in i analysen vid användande av så kallad Monte-Carlo simulering. Varje variabel varierar slumpmässigt inom ramarna för de observerade värdena. Fördelningen av de erhållna säkerhetsfaktorer kan plottas för att åskådliggöra sannolikheten att värdet på säkerhetsfaktorn hamnar under kritisk nivå.

***Probabilistic slope stability analysis for practice***

*H. El-Hamry, N. R. Morgenstern & D. M. Cruden (2002)*

Analysen är hämtad från försök gjorda i området James Bay dykes, Kanada. Resultaten jämförs med de ifrån stabilitetsanalys utförda enligt FOSM (First Order Second Moment).

Konventionella släntberäkningar baserade på säkerhetsfaktorer ger ingen tydlig information om osäkerhet. En tillämpning med så kallat spreadsheet har utvecklats för probabilistisk släntstabilitet. Metoden baseras på Monte-Carlo simulering. Analysen tar hänsyn till variation av indata inom ett jordlager (spatial variation), den statistiska osäkerheten på grund av begränsade data och benägenheten hos de använda empiriska faktorerna och förhållandena.

Släntstabilitetsanalys genomsyras av osäkerhetsbegreppet. Geologiska avvikelser, naturlig variation av jordens egenskaper inom ett jordlager, brist på representativa data, förändrade miljöförhållanden, oväntade brottmekanismer, förenklingar och approximationer tillämpade i geotekniska modeller, mänskliga misstag i konstruktionen är alla exempel på faktorer som verkar till osäkerhet.

Konventionella metoder bygger på konservativa metoder och värden. Erfarenhet har visat att konservativa konstruktioner inte alltid är säkra mot brott.

”Probabilistic slope stability analysis (PSSA)” introducerades på 70-talet (se Alonso, 1976, Tang Yucemen & Ang, 1976 eller Harr, 1977). Motsträvigheten till att använda probabilistisk analys kan sammanfattas till fyra faktorer:

- ingenjörers kunskaper om statistik och sannolikhetsteori är begränsade
- det finns en missuppfattning om att probabilistiska analyser kräver mycket mer data, tid och ansträngning än konventionella analyser
- få publicerade studier visar verktygen, fördelarna och utbytet av metoderna
- acceptabla sannolikheter av otillräcklighet (eller brottsannolikhet) är dåligt definierade samt att en koppling mellan klassisk uppskattning och probabilistisk uppskattning är obefintlig.

Dessa frågor behandlas i detalj i El-Hamry (2001).

Statistisk analys av data omfattar två steg, datagranskning och statistisk slutsats. Användning av histogram är ett vanligt sätt att försäkra sig om att data kommer från samma jordtyp, spänningsförhållanden, testmetoder, spänningshistoria etc. Trender utvärderas med regressionsteknik.

Platsundersökningars omfattning styrs vanligen av ekonomin vilken begränsar antalet utförda test. Då trendfunktioner uppskattas från tillgängliga observationer är detta en osäkerhet, känd som statistisk osäkerhet.

Jords sammansättning och egenskaper varierar från en plats till en annan, även inom homogena lager. Variationen kan härledas av faktorer som variationer i mineralsammansättning, villkor under deponering, spänningshistoria samt fysikaliska och mekaniska upplösnings/söndrings – processer.

### *Probabilistiska analysmetoder*

De flesta metoder faller in under två kategorier: approximativa (FOSM och punktskattningsmetoden) och Monte-Carlo simulering. Approximativa modeller nyttjar förenklade antaganden vilka ofta begränsar deras användning till speciella problem. Till exempel används ibland enkla modeller som "Ordinary method of slices" (Tang Yucemen & Ang 1976, Vanmarcke 1980 etc.). I andra fall antas enbart friktionslösa jordar.

Få studier med Monte-Carlo simulering har jämförts med approximativa metoder. Monte-Carlo simulering har tills nyligen ansetts vara oekonomiskt då man ansett att det är tidskrävande samt att det krävs datorkraft för beräkningarna.

Begränsningarna och komplexiteten hos probabilistiska metoder kombinerat med dåliga kunskaper av statistisk och probabilistisk teori hos ingenjörer har påtagligen hämmat användandet av probabilistisk släntstabilitetsanalys.

### *Slutsatser*

Utan att ta ordentlig hänsyn till osäkerheten hos säkerhetsfaktorn  $F$ , kan en felaktig bild av säkerheten hos en slänt ges.  $F$  kan sålunda ej ses som ett tillräckligt mått på säkerhet. Probabilistisk analys ska samla "alla" osäkerheter i designprocessen (konstruktion av slänt).

Analysen tar hänsyn till att materialegenskaperna varierar inom jordlager och inte enbart med djupet, statistisk osäkerhet pga. begränsade indata samt använda empiriska faktorer och korrelationers påverkan.

Att enbart jämföra säkerhetsfaktorn mellan två helt olika konstruktioner är otillräckligt då de tillhörande källorna och nivåerna av osäkerhet inte tas i beaktning. Genom att kombinera den mest troliga säkerhetsfaktorn och osäkerheten i dess värde, kan sannolikheten för osäkerhetsgrad tillsammans med säkerhetsindex  $\beta$  ge en bättre grund för en jämförelse.

Att bortse ifrån variation av materialparametrar inom jordlager, och att anta att alla faktorer är oberoende av varandra (som i förenklade analyser) kan överskatta sannolikheten för osäkerhetsgrad.

***Spatial probabilistic modelling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach***

*G. Zhou, T. Esaki, Y. Mitani, M. Xie, J. Mori (2003)*

I artikeln kombineras geografiska informationssystem (GIS), släntstabilitetsmodell för oändligt utbredd slänt och Monte Carlo simulering applicerat på ett skredområde i södra Japan (Sasebo). En så kallad DEM (digital elevationsmodell) har skapats för att studera området. Släntvinkel och släntläge härstammande från DEM diskuteras och analyseras. Genom tidigare nämnd integration beräknas en fördelningskarta över brottsannolikheten för hög- resp. lågvatten.

Japan är ofta drabbat av jordskred och har därav ett stort intresse i att kunna förutse sådana samt att lokalisera och motverka potentiella skredområden. Många släntstabilitetsmetoder har utvecklats genom åren. Forskningen på området har lett till en indelning av områden med varierande släntstabilitet. på grund av svårigheter att producera data från material där egenskaperna varierar även inom plan (spatial variability), samt osäkerheter hos de ingående parametrarna (elevation, släntvinkel, etc.).

I en sådan indelning finns två metoder:

- statistiska metoder (probabilistiska)
- deterministiska metoder.

Statistiska metoder (exempelvis multivariat statistisk analys eller principiell del-/elementanalys) beskriver förhållandet mellan förekomsten av ett skred och relaterade faktorer (djup, hållfasthet, släntlutning, vegetation, etc.) och skapar ett integrerat utvärderingsindex från en modell och förutsäger sedan risken för ett skred i ett angränsande område.



Deterministiska metoder analyserar mekanisk jämvikt av ett potentiellt skredblock (cirkulärt eller plant) och beräknar sedan en säkerhetsfaktor.

De statistiska metoderna har oftast ingen mekanisk mening och deterministiska vilka balanserar krafter (pådrivande och mothållande) lämpar sig bäst för enskilda slänter.

Att använda deterministiska metoder kan ibland vara svårt, ibland omöjligt, på grund av svårigheter att skaffa, testa och behandla stora mängder data, identifiering glidytor samt övervakning porvattentryck.

Analysen i denna rapport går till som följer:

1. skapa en digital elevationsmodell (DEM)
2. beräkna släntlutningens läge för hela området
3. analysera flödesnätverkets spridning och bestäm "the base distribution of colluvium" genom elevationsinterpolation av ett så kallat flödesnätverk
4. beräkna sannolikheten för brott genom att kombinera GIS, teori med oändligt utbredd slänt samt Monte Carlo simulering.

Att bestämma "the colluvium base distribution" enbart genom data från borrhål är väldigt svårt, då antalet borrhål som skulle behövas skulle bli väldigt kostsamt.

#### *Bestämning av sannolikheten för brott*

Baserat på jordskred av Hokusho-typ kan "the colluvium slope" modelleras som en infinit slänt. Då kan säkerhetsfaktorn  $F$  beräknas som:

$$F = \frac{C' + (\gamma - m \times \gamma_w)Z \times \cos 2\beta \times \tan \phi'}{\gamma \times Z \times \sin \beta \times \cos \beta} \quad (57)$$

Från den erhållna tjockleksfördelningen av "the colluvium" och fördelningen av släntlutningarna kan beräkningar utföras med ekvation 57 för samtliga grider inom området med hjälp av GIS macro language som exempelvis Avenue (Arcview), och en fördelningskarta över säkerhetsfaktorer erhålles. Observera att osäkerheter för parametrarna  $\phi'$  och  $c'$  bör beaktas. För att behandla osäkerheter hos ingående parametrar samt att ta fram "spatial slope failure probability map" används Monte Carlo simulering.

### *Monte Carlo simulering*

Monte Carlo simulering är en metod som används för att simulera probabilistiska fenomen/beteenden genom att beräkna fördelningen av en variabel och representera den med en matematisk modell. Metoden följer nedanstående steg:

1. generera en probabilistisk fördelning av variablerna  $\phi'$  och  $c'$  med Monte Carlo simulering
2. beräkna släntens säkerhetsfaktor för en grid med de probabilistiska variablerna  $\phi'$  och  $C'$ . Efter  $N$  beräkningar kan den probabilistiska fördelningskurvan erhållas. Genom att integrera fördelningskurvan för  $F$  från  $-\infty$  till 1, fås sannolikheten för brott hos varje använd cell i beräkningarna. Enligt Heuvelink (1993) bör värdet på  $N$  ligga mellan 50 och 2000
3. repetera beräkningarna för alla grider så att en brottsannolikhetskarta kan skapas.

Från tidigare forskning och experiment har  $c'$  och  $\phi'$  funnits vara normalfördelade.

### ***Application of a probabilistic approach in slope stability analysis***

*Alén. C (1996)*

De vanligaste formuleringarna av säkerhetskonceptet är deterministiska. Det innebär att det är svårt att behandla osäkerheter och avvikelser i indata eller beräkningsmodellen/modellerna. Det är sålunda önskvärt med en metod som kan behandla sannolikheten/risken för ett skred. Detta har under senare tid utvecklats. I Aléns rapport behandlas två sådana probabilistiska analyser.

Det första fallet är en generell analys av en övergripande rapport av södra området av Göta älv. Syftet var att ge data för utveckling av infrastruktur i älvdalen. Arbetet resulterade i en klassificering av det studerade området i olika riskklasser, baserade på såväl sannolikheten för som konsekvenserna av ett skred. Probabilistiska analyser har gjorts som komplement till traditionella analyser i olika typsektioner. Resultaten har använts för att fastställa gränser för olika riskklasser.

### *Släntstabilitetsanalys*

Traditionellt beskrivs en slänts stabilitet med en global säkerhetsfaktor  $F$ . Vid användning av detta koncept även vid probabilistiskt synsätt beskrivs sannolikheten för brott som sannolikheten att  $F$  är mindre än 1,  $p(F < 1)$ .

Det är ofta svårt att fastställa exakt vilken faktor som orsakat ett skred. Därför är analysen indelad i två extremfall:

- odränerad analys – ingen konsolidering
- dränerad analys – fullständig konsolidering.

Odränerad kan ses som korttidsfall och dränerad som långtidsfall. Återstudier av skred visar ofta på ett odränerat brott, trots avsaknad av bevis för en omedelbart föregående utlösande faktor. I sådana fall är det troligt att ett dränerat brott, i någon del av slänten, har utlöst resten av slänten. För att beskriva denna mera komplexa situation används:

- kombinerad analys – blandad konsolidering.

De tre ovan nämnda analyserna ger tre olika sannolikheter att beräkna:

$$\begin{aligned} p(F_{cu} < 1) \\ p(F_{c',\phi} < 1) \\ p(F_{comb} < 1) \end{aligned} \tag{58}$$

För att minimera beräkningsarbetet är det bra att fastställa vilken/vilka analyser som styr sannolikheten för ett brott.  $F_{comb}$  är per definition mindre än eller lika med de två övriga säkerhetsfaktorerna. De dränerade parametrarna har normalt en mindre variation än odränerad skjuvhållfasthet. Det betyder att dränerat brott endast kan vara styrande i de fall där brott i kombinerad situation utgår som fysikaliskt otroligt.

Den del av glidyten  $\alpha$  som styrs av dränerade parametrar kan approximativt beräknas som

$$\alpha \approx 2 \left( 1 - \frac{F_{comb}}{F_{c_u}} \right) \tag{59}$$

Sambandet mellan  $F_{comb}$  och  $F_{c_u}$  kan uttryckas som

$$F_{comb} \approx \frac{V_{comb}}{V_{c_u}} (F_{c_u} - 1) + 1 \tag{60}$$

där  $V_{comb}$  och  $V_{c_u}$  är variationskoefficienter för säkerhetsfaktorn för respektive analys. Säkerhetsfaktorn för odränerad analys med cirkulär glidyta uttrycks som

$$F = \frac{N_0(\beta, d)\overline{c_u}}{\gamma H} \quad (61)$$

där  $N_0(\beta, d)$  är bärförmågefaktorn som beror av släntens lutning och glidyntans läge (djup),  $\overline{c_u}$  är medelvärdet av skjuvhållfastheten längs glidyntan,  $\gamma$  är jordens tunghet och  $H$  är slänthöjden. Om det finns ett yttre vattentryck vid slänthöjden, ändras nämnaren i ekvation 61 till

$$P_d = \gamma H - \gamma_w H_w \quad (62)$$

där  $\gamma_w$  är vattnets tunghet och  $H_w$  är vattendjupet. För dränerad analys och tåcirklar finns en liknande formulering. Om faktorerna i ekvation 61 behandlas som oberoende, lognormala, slumpmässiga variabler fås  $\ln(F)$  som en summa av gaussvariabler

$$\ln(F) = \ln(N) + \ln(c_u) - \ln(P_d) \quad (63)$$

Med  $N(\mu, \sigma)$  som en normalfördelning av gaussvariabler med medelvärde  $\mu$  och standardavvikelsen  $\sigma$  fås

$$\ln(F) = N\left(\mu_{\ln(N_0)} + \mu_{\ln(c_u)} - \mu_{\ln(P_d)}, \sqrt{\sigma_{\ln(N_0)}^2 + \sigma_{\ln(c_u)}^2 - \sigma_{\ln(P_d)}^2}\right) \quad (64)$$

Om variationskoefficienterna för högerledet är små, mindre än 25 %, blir uttrycket för  $\ln(F)$  enkelt

$$\ln(F) \approx N\left(\ln(\mu_{N_0}) + \ln(\mu_{c_u}) - \ln(\mu_{P_d}), \sqrt{V_{N_0}^2 + V_{c_u}^2 + V_{P_d}^2}\right) \quad (65)$$

$V$  anger koefficienten för respektive slumpmässig variabel. Sannolikheten för att slänten skall gå i brott kan då enkelt beräknas som

$$p(\ln(F) < 1) \equiv p(F < 1) \quad (66)$$

vilket betyder att  $\ln(F)$  kan användas som säkerhetsmarginal.

Direktmetoden, beskriven som ekvation 61, ger goda resultat för homogena slänter med enkel geometri. I denna rapport avsågs de probabilistiska analyserna vara ett komplement till ett större antal traditionella analyser. Resultaten av de senare användes för kalibrering av direktmetoden med modifierad direktmetod

$$F = \frac{N_0(\beta, d)\overline{c_u}}{\gamma H_{eq} - \gamma_w H_{w,eq}} \quad (67)$$

Effekter av externa laster och icke linjär slängtgeometri på aktiva sidan, behandlas i  $H_{eq}$  medan  $H_{w,eq}$  användes för liknande effekter på passiva sidan.

I stabilitetsanalys är det medelvärde av skjuvhållfastheten som styr konstruktionen. Om skjuvhållfastheten behandlas som ett stort antal oberoende, lika slumpmässiga variabler, kan variansen reduceras med en faktor  $1/n$ , där  $n$  är antalet variabler. Antalet variabler kan karaktäriseras med ett varierande avstånd utmed glidytan. Detta ger följande reduktion av standardavvikelsen

$$\sigma_{c_{u,red}} \approx \sqrt{\frac{f}{s}} \cdot \sigma_{c_u} \quad (68)$$

där  $f$  är ett typiskt varierande avstånd och  $s$  är glidykans längd.

Variationerna beror mestadels av mätfel. Reduktion av osäkerheter hos jorden (egenskaper) utförs i testmetoder och styrs även med antalet tester. Osäkerheter hos indata anges i Alén (1996) som konstanta variationskoefficienter.

Fältundersökningar för arbetet enligt Alén (1996) visar att en konstant standardavvikelse hos skjuvhållfastheten som ett mer korrekt antagande. Detta verkar även för andra variabler (ekvation 4) vara ett realistiskt antagande. Beträffande osäkerhet hos vattennivån, är den uppenbarligen oberoende av slänthöjden.

### *Södra Göta älv*

Resultatet från södra Göta älv presenteras i form av ett så kallat säkerhetsindex,  $\beta$ , som funktion av olika glidytors förlängning från älven. Definitionen av säkerhetsindex är

$$\beta = \phi^{-1}(p) \quad (69)$$

där  $\phi^{-1}$  är inversen av den standardiserade gaussfördelningen. Med

$$\begin{aligned} p &= p(\ln(F) < 0) \\ \ln(F) &= N(m, s) \end{aligned} \quad (70)$$

ger enligt ekvation 63

$$\beta = \frac{\mu}{\sigma} \quad (71)$$

Probabilistiska analyser har gjorts för de slänter som analyserats traditionellt. En jämförelse mellan resultat från traditionella beräkningar och probabilistiska, resulterade i att man kunde dela in områdets olika slänter i fyra olika riskklasser enligt tabell 2.2.5.

Tabell 2.2.5 Riskklassindelning av slänter

Stabilitetsklass	4	3	2	1
$F_{cu}$	1.0-1.2	1.2-1.5	1.5-2.5	>2.5
Sannolikhet för brott	uppenbar	trolig	någon	försumbar

### Partilleområdet

Samma principer användes vid området kring Partille som vid den probabilistiska analysen enligt avsnittet släntstabilitetsanalys ovan. Säkerhetsmarginalen,  $\ln(F)$ , beräknas enligt ekvation 65. Här användes dock probabilistisk och deterministisk analys i samverkan till skillnad från det tidigare försöket där probabilistisk analys användes som ett komplement till den traditionella analysen.

Odränerad analys styrde stabiliteten med ett undantag (se nedan). Detta innebär att stabiliteten ska beräknas med en simpel analytisk metod. Säkerhetsfaktorn beräknas med formeln

$$F = \frac{N \cdot \bar{c}_u}{\gamma \cdot H} = \frac{M_R}{M_S} = \frac{m_R \cdot \bar{c}_c \cdot H^2}{m_S \cdot \gamma \cdot H^2} \quad (72)$$

där  $M_R$  är mothållande moment och  $M_S$  är pådrivande moment, medan  $m_R$  och  $m_S$  är dimensionslösa egenskaper definierade av ekvationen. Övriga parametrar är samma som i ekvation 61. Ekvation 72 ger

$$N = \frac{m_R}{m_S} \quad (73)$$

Man kan bevisa att rotationspunkten hos en styrande glidyta är placerad över mitten av en linjär slänt, så länge det inte finns någon horisontell variation av skjuvhållfastheten. För icke-linjära slänter beräknas positionen för glidytaens centrum med samma antagande enligt

$$x = \frac{B}{2} - \frac{Q}{\gamma \cdot H} \quad (74)$$

Här är  $x$  det horisontella avståndet från släntfoten,  $B$  är horisontella längden av slänten,  $Q$  är tyngden av slänten ovanför en rät linje från släntfoten till släntkrönet,  $\gamma$  är den genomsnittliga tungheten för samma del och  $H$  är slänthöjden. I  $Q$  skall alla yttre laster samt last av vatten inkluderas.

Som tidigare nämnts styrdes inte stabiliteten i en sektion av skjuvhållfastheten. Även om gränsjämviktsmetoder är bra metoder är de svåra att använda i probabilistiska analyser. Li & Lumb (1987b) har presenterat en analytisk och differentierbar formulering av Morgenstern & Price's metod. Li (1992) Har utökat denna till att användas för andra jämviktsmetoder.

Vanliga beräkningsprogram kan vara krångliga. Även om man har bra kunskaper om beräkningsmetoder är det svårt att kontrollera alla detaljer. Detta har inneburit att i detta tämligen lilla projekt har Li:s metod varit för tids- och tankekrävande att använda. Istället har den probabilistiskt kombinerade analysen gjorts med punktskattningsmetoden PEM (Point Estimate Method) enligt Harr (1987).

Punktskattningsmetoden innebär att en traditionell deterministisk analys upprepas ett begränsat antal gånger. För varje slumpmässig variabel betraktas ett par värden. Detta ger totalt  $2^N$  kombinationer, där  $N$  är antalet slumpmässiga variabler. Fördelen med metoden, i denna version, är att ingen förbättring av det deterministiska lösningsschemat behövs. En nackdel är att det är svårt att få en bra överblick av noggrannheten. Trots denna svårighet används metoden på grund av sin enkelhet.

#### ***Application of Methods of Probabilistic Characterization of Soil Properties***

*Loren R. Anderson, M. ASCE; Kevan D. Sharp, A.M. ASCE; David S. Bowles, M. ASCE; Ronald V. Canfeld (1984)*

Här används en modell baserad på osäkerhetsfaktorer hos släntstabilitetsanalys och dess tillämpning som verktyg att bedöma pålitligheten hos existerande bankar. Det diskuteras även dess användning som verktyg vid konstruktion. En jämförelse görs med konventionella undersökningsmetoder samt med en metod att erhålla de probabilistiska hållfasthetsparametrarna för jord.

#### ***Probabilistic design of slopes***

*K. S. Li, P. Lumb (1987a)*

#### *Allmänt*

I rapporten diskuteras förbättring av användning av FOSM (First Order Second Moment) inom probabilistisk konstruktion av slänter. Morgenstern & Price's stabilitetsmodell används för formulering av en så kallad formfunktion. Säkerhetsindex  $\beta_{HL}$  definierat av Hasofer & Lind används som säkerhetsmått. Detta index har fördelen att vara invariant, vilket innebär att det inte beror av formatet på formfunktionen.

Säkerhetsfaktorn  $F$  anses inte vara ett helt korrekt mått på en slänts säkerhet. En underskattning av bärförmågan är vanlig. Slänter med samma  $F$  behöver inte alls ligga på samma risknivå på grund av variation i jordens sammansättning. Genom att jordens egenskaper varierar naturligt med jordtyp och läge, tenderar  $F$  att enbart gälla lokalt och man kan inget säkert veta om kringliggande område/områden. En vanlig fråga inom släntstabilitetsanalys är: hur hög måste  $F$  vara för att vara tillräckligt hög. Denna fråga är svår att besvara om man inte känner släntens skredsannolikhet/brottsannolikhet.

I denna artikel behandlas applicering av statistisk modellering av jords egenskaper samt teknik för att beräkna skredrisk.

Sannolikhetsbaserade beräkningar baseras på klassiska stabilitetsberäkningar (lamellmetoder, Bishop's etc.). Säkerhetsindex  $\beta$  används som alternativ riskvärderingsmetod till den vanliga säkerhetsfaktorn  $F$ . Metoderna har begränsningar då användningen av enkla stabilitetsmodeller inte säkert kan beskriva förloppet av komplexa glidytor. Vidare ger säkerhetsindex en variant av definition på riskuppskattning. Detta ger problemet att värden på  $\beta$  från olika format på den så kallade formfunktionen (performance function) inte kan jämföras direkt.

Rapporten använder stabilitetsmodellen enligt Morgenstern och Price (1965) för formulering av formfunktionen och säkerhetsindex definierat genom Hasofer och Lind (1974).

#### *Formfunktion (performance function)*

I ett probabilistiskt synsätt kan ett brott-/säkerhetstillstånd för en slänt beskrivas av en så kallad formfunktion  $G(X)$ , där  $X$  anger vektorn av ingående parametrar. Funktionen är normalt konstruerad på ett sådant sätt att brottillståndet för slänten definieras som  $G(X) < 0$  och ”säkra” sidan definieras av  $G(X) > 0$ . I tidigare studier har  $G(X)$  skapats genom förenklade stabilitetsmodeller så som lamellmetoden och Bishops förenklade metod etc. En rigorös metod har ej använts då en konventionell lösning ej finns som direkt tar hänsyn till inre krafter mellan lameller. I denna artikel används en rigorös stabilitetsmodell av Morgenstern och Price. Den ursprungliga versionen är svår att applicera när det är fråga om probabilistisk analys. Ett enat lösningsschema utvecklat av Li (1987a) används för formulering av Morgenstern och Prices metod. Detta gör att ”performance function” kan definieras explicit utan att behöva ta till iteration för beräkning av inre lamellkrafter. Vidare kan derivata av  $G(X)$  beräknas analytiskt.

#### *Säkerhetsfaktorn $F$*

Trots dess enkelhet har säkerhetsfaktorn flera brister, vilket kan ses med ett enkelt exempel med en kohesiv slänt. Den första bristen är variationen av definitioner på  $F$ . Värdet på  $F$  beror av hur  $F$  definieras. Vanligtvis definieras  $F$  som



$$F = \frac{\bar{c}LR}{W_1d_1 - W_2d_2} \quad (75)$$

Vissa menar att massan av jorden  $W_2$  bidrar till släntens stabilitet, vilket ger följande definition av  $F$

$$F = \frac{\bar{c}LR + W_2d_2}{W_1d_1} \quad (76)$$

Samma resonemang kan uppträda vad gäller portrycket, då även det kan återfinnas i såväl täljare som nämnare beroende på om det anses vara en pådrivande eller mothållande term. Vidare är det enligt Li (1987a) omöjligt att säga hur mycket säkrare en slänt blir när man ökar  $F$ .

#### *First order second moment (FOSM)*

För analyserande av slänters tillförlitlighet kan man använda FOSM. I den aktuella rapporten linjäriseras formfunktionen som approximation av första ordningens Taylorserie, samt att de slumpmässiga parametrarna karakteriseras av deras två första moment (därav namnet). I allmänna probabilistiska analyser är säkerhetsindex

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (77)$$

där  $\mu_G$  och  $\sigma_G$  är medelvärde och standardavvikelse för  $G(X)$ , och används som ett alternativ till  $F$  för mätning av skredrisk. Användandet av  $\beta$  som säkerhetsmått baseras på följande observation:

$$\begin{aligned} P_f &= \Pr(G(X) < 0) \\ &= \Pr\left(\frac{G(X) - \mu_G}{\sigma_G} < -\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \\ &= \Pr(Z < -\beta) \\ &= \int_{-\infty}^{-\beta} \psi(z) dz \\ &= \Psi(-\beta) \end{aligned} \quad (78)$$

där  $Z$  är en standardiserad variabel av  $G(X)$ ;  $\psi(z)$  är ”probability density function (PDF)” av  $Z$  och  $\Psi(z)$  är den kumulativa fördelningsfunktionen (CDF) av  $Z$ . Då  $\psi(z)$  är en ickesjunkande funktion resulterar detta i ett-till-ett-förhållande mellan brottsannolikheten och säkerhetsindex. Alla osäkerheter hos de slumpmässiga variablerna har samlats i ett säkerhetsindex  $\beta$ . Förutsatt

att säkerhetsindex för två liknande slänter är jämnstora, kommer de att ha samma risknivå, trots att variationen av de slumpmässiga variablerna kan vara olika i de två slänterna.

### ***Brottsannolikhet enligt MPROSTAB***

Källa till befintlig information är MPROSTAB (1994), vilken är den programvara som från början var avsedd att användas för beräkning av brottsannolikhet i detta examensarbete. Programmet var som tidigare nämnts ej fungerande, men teorierna bakom programmet är trots detta lika intressanta för arbetet.

### *Introduktion*

Programvaran MPROSTAB är utvecklat i Delft, Holland, och beräknar brottsannolikheter. Programmet är baserat på Bishops lamellmetod, ”random field modeling of spatial variability of soil strength and and pore pressures” samt probabilisk tillförlitlighetsanalys med FOSM och används för att beräkna sannolikheten att totalsäkerhetsfaktorn  $F$  är mindre än 1.0.

Probabilistisk analys, istället för konventionell deterministisk analys, bör användas i de fall då släntstabilitetskrav är uttryckta i acceptabel sannolikhet istället för konventionell säkerhetsfaktor.

Ett typiskt användningsområde för MPROSTAB gäller sensitivitetsanalys. Med hjälp av probabilistisk analys är det möjligt att bestämma det relativa bidraget av osäkra parametrar till osäkerheten hos stabilitetens fördelningskurva (probability performance funktion). Baserat på detta kan det bestämmas om och vilken typ av undersökningsprogram som kan minska osäkerheten beträffande osäkerhet hos stabilitetsbeteende.

Analys i MPROSTAB sker i tre steg:

1. mata in geometriska, fysiska och statistiska data för jordstrukturen. Detta kan göras för maximalt tre olika tidsskeden i släntens ”liv”. De potentiella glidyterna kan definieras antingen som en och en eller med rotationscentrum i en grid. Steget innebär beräkning av säkerhetsfaktor enligt Bishop’s förenklade lamellmetod. Beräkning av säkerhetsindex  $\beta$  för varje specifik glidyta baseras på FOSM-analys
2. baserat på punkt 1 väljs glidytor ut, för vilka omräkning av säkerhetsindex  $\beta$  behövs. Beräkningen görs med iterativ FOSM-analys. Resultatet i detta steg är Hasofer & Linds säkerhetsindex  $\beta$  och tillhörande brottsannolikheter för varje vald glidyta
3. en bestämning om brottsannolikheten under något steg, passerat ett tidigare steg.

Beräkningsmodellen i MPROSTAB är en kraftigt modifierad version av Vanmarckes ”a stochastic field description of soil parameters, Vanmarcke (1977)”. Några grundläggande drag av dessa förändringar behandlas senare.

### *Jordmodell*

Syftet med fält- och laboratorieundersökningar är att skaffa en så god bild som möjligt av mönster i den aktuella jordprofilens egenskapers variation i planet. Generellt ger undersökningar av detta slag tämligen noggranna beskrivningar av globala variationer i jordmodellen, såsom genomsnittliga trender hos variationen av parametrar. Däremot är det svårt att påvisa variation i mindre skala, inom varje enskilt jordlager. Effekter av sådan variation kan enbart påvisas genom statistisk analys.

I MPROSTAB görs följande antaganden/förenklingar beträffande geometri och hållfasthetsegenskaper hos jordprofilen:

- osäkerhet hos geometrin betraktas ej
- enligt tidigare studier av probabilistisk analys (exempelvis Alonso, 1976) har variation av tunghet inom plan/jordlager visat sig vara av ringa betydelse. Med anledning av detta har parametern helt utelämnats i den stokastiska modellen.

### *Modell för skjuvhållfasthetsparametrar*

Mönstret hos variationer inom enskilda jordlager modelleras som en ”svag stationär slumpmässig funktion”. Det betyder att i varje punkt i jordlagret kan värdet på skjuvhållfasthetsparametern betraktas som en slumpmässig variabel. Som fördelningsfunktion väljs i MPROSTAB en av lognormaltyp

$$F(v) = \int_0^v \frac{1}{2\pi\chi\delta} e^{-\frac{1}{\delta^2} \left(\frac{\chi}{m}\right)^2} d\chi \quad v \geq 0 \quad (79)$$

där  $\delta$  och  $m$  är funktionsparametrar. Det förväntade medelvärdet och standardavvikelsen för fördelningen beskrivs som

$$E[v] = m \cdot e^{\frac{1}{2}\delta^2} \quad (80)$$

respektive

$$\sigma[v] = E[v] \sqrt{e^{\delta^2} - 1} \quad (81)$$

En funktion som beskriver variation (autokorrelation) mellan två punkter som funktion av avståndet mellan dem är av modifierad Gausstyp.

$$\rho(\delta x, \delta y, \delta z) = e^{-\frac{\delta x^2 + \delta z^2}{D_h^2}} \left( (1 - \alpha) + \alpha \cdot e^{-\frac{\delta y^2}{D_v^2}} \right) \quad (82)$$

där  $D_h$  och  $D_v$  är autokorrelationsparametrar med typiska värden mellan 25 och 100 m respektive 0.1 och 3.0 m.  $\alpha$  är en variansparameter lika med lokala variansparametrar i jorden.

Fördelningsfunktionen och autokorrelationsfunktionen beskriver den stokastiska modellen helt. Modellen används med både dränerad kohesion och tangens för den inre friktionsvinkeln. Parametrar för sannolikhetsfördelningar som standardavvikelse och medelvärden måste tas fram genom laboratorieförsök eller försök i fält. Vanligtvis är antalet test begränsade varför uppskattningar av parametrar görs på statistisk väg.

Uppskattningen av medelvärde är i sig en osäkerhet vilken bör tas i beaktning i den probabilistiska analysen. Det görs i beräkningen genom att justera variansen i ett lager med en faktor  $(n+1)/n$  vilket modifierar autokorrelationsfunktionen till

$$r(\delta x, \delta y, \delta z) = \frac{n}{n+1} \rho(\delta x, \delta y, \delta z) + \frac{1}{n+1} \quad (83)$$

där  $n$  är antalet gjorda test.

Korrelation kan tas med i beräkningar MPROSTAB.

#### *Stokastisk modell av portrycket*

I programmets beräkningsmodell specificeras portrycket antingen som linjer med piezometriska huvudnivåer för varje jordlager, eller som grad av konsolidering (i procent) eller båda alternativen tillsammans.

I första fallet anges piezometriska linjer vid överkant och underkant på jordlager. Däremellan interpoleras värden fram av programmet.

När det gäller grad av konsolidering är detta kopplat till ovanliggande jordlager. Detta uttrycks som inställning av effektivspänningar i jordlagret orsakade av last från ovanliggande jordlagers tyngd. 100 procent avser full konsolidering, 0 anger odränerat tillstånd.

Uppskattning av för höga portryck baseras ofta på grova gissningar av permeabilitet och dåliga beräkningsmetoder. Därav tillkommer stora osäkerheter. Det antas att dessa osäkerheter vida överskrider lokala variationer av lokala portryck. Stokastiska modellen beaktar osäkerheter beträffande portryck som följer. Då portryck anges i form av medelvärden av piezometriska linjer (p.l.), måste en standardavvikelse för varje jordlager anges i programmet. Här gäller antagandet att portrycken är normalfördelade med medelvärde lika med det interpolerade värdet av p.l. och med en standardavvikelse angiven för det aktuella jordlagret.

### *Brottmekanism, brottsannolikhet*

Brottyp och jämviktsanalys är av typen Bishop, dvs. cirkulär cylindrisk glidyta antas och Bishop's lamellmetod tillämpas, dock i probabilistisk mening.

I konventionell deterministisk analys antas att jordens hållfasthetsparametrar är konstanta i släntens riktning och att slänten är oändligt bred. Konsekvensen av detta blir att inga skjuvkrafter i tvärsnitt kan beaktas i en jämviktsanalys.

I probabilistisk analys däremot antas skjuvhållfastheten kunna variera stokastiskt från ett tvärsnitt till ett annat i släntens riktning. Följaktligen blir säkerhetsfaktorn (enligt Bishop) en stokastisk funktion längs släntriktningen. Antagandet om frånvarande skjuvkrafter i tvärsnittet gäller sålunda inte.

Huruvida brott uppkommer eller inte beror på bidraget till det mothållande momentet, som kommer från skjuvkrafter vid randen av den finita bredden av brottmodellen.

Sannolikheten för uppkommande av ett område där Bishop's säkerhetsfaktor blir mindre än 1.0 kopplas till sannolikheten för en potentiell skredzon. Brottsannolikheten, medtaget bidraget av mothållande moment i beräkningarna, kopplas till sannolikheten för skred i en slänt.

---

*Probabilistisk analys enligt MPROSTAB*

Den probabilistiska analysen består av i huvudsak två steg:

1. FOSM-analys av jämvikt för glidytan enligt Bishops metod. Baserat på indata i form av geometri, jordens hållfasthetsparametrar samt statistiska data för jordens hållfasthetsparametrar och portryck, beräknar programmet statistiska parametrar för Bishop's säkerhetsfaktor. De framräknade parametrarna är förväntat medelvärde, standardavvikelse och autokorrelationsfunktionen utefter släntriktningen
2. för varje vald brottcirkel beräknas sannolikheten för uppkomst av en potentiell skredzon, baserat på steg 1. Sannolikheten för uppkomsten av en potentiell brottzon kan med approximation beräknas som

$$P(F(z) < 1, z \in [0, L]) = \Phi(-\beta_F) + \Phi(\beta_F)(1 - e^{-N_F L}) \quad (84)$$

där

$$\beta_F = \frac{\sigma_F}{\mu_F - 1} \quad (85)$$

är säkerhetsindex, och där

$$N_F = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}\beta_F^2 \sqrt{-r_F''(0)}} \quad (86)$$

där  $r_F''(0)$  avser andraderivatan av autokorrelationsfunktionen för säkerhetsfaktorn vid då tidförskjutningen är 0.

Bredden av en potentiell brottzon,  $l$ , är exponentialfördelad. Förväntade medelvärdet är

$$\mu_l = \frac{\Phi(-\beta_F)}{N_F} \quad (87)$$

Approximationen ovan gäller för små sannolikheter, med andra ord då värden på  $\beta_F$  större än 1.5.

Slutligen beräknas sannolikheten av att en verklig 3-dimensionell brottmodell uppkommer, med finita spridningen lika med  $\mu_l$  som

$$P(F_l < 1) \approx \frac{\Phi(-\beta_l)}{\Phi(-\beta_F)} P(F(z) < 1, z \in [0, L]) \quad (88)$$

där  $F$  avser säkerhetsfaktorn för den aktuella brottmodellen, inkluderat bidragen vid ränderna av mothållande momentet och

$$\beta_l \approx \frac{\mu_F + \frac{\mu_{M_e}}{\mu_l M_0} - 1}{\sqrt{\sigma_F^2 + \frac{\sigma_{M_e}^2}{\sigma_l^2 M_0^2}}} \quad (89)$$

$M_0$  anger det pådrivande momentet orsakat av den motsvarande glidyta.  $\mu_{M_e}$  och  $\sigma_{M_e}$  är det förväntade medelvärdet och standardavvikelsen av randbidraget och det mothållande momentet.

### En posteriorianalys

Man kan betrakta en slänts "livstid" i två steg, konstruktionsfas och långtidsfas. Dessa kan i fortsättningen beskrivas som steg 1 och steg 2. För båda stegen kan brottsannolikheten beräknas i förväg som  $P(f_1)$  och  $P(f_2)$ . Sannolikheterna kan betraktas som tidigare uppskattningar då beräkningar kan utföras innan konstruktion av slänten baserat på statistik från fält- och laboratorieundersökningar. Antag att konstruktion görs och det kan konstateras att konstruktionsfasen, steg 1, "överlevs". Kan denna information leda till en återuppskattning av sannolikheten för brott i ett längre tidsperspektiv (steg 2)? En sådan undersökning anges som en brottsannolikhetsberäkning för en så kallad posteriori.

En sådan analys baseras på teoremet om betingad sannolikhet (flera på varandra följande händelser vilka är beroende av varandra):

$$P(f_2|f_1) = \frac{P(f_2 \cap f_1)}{P(f_1)} \quad (90)$$

där  $f_2|f_1$  avser en händelse  $f_2$  inträffar förutsatt att en annan händelse  $f_1$  inträffar, och  $\cap$  avser två händelser samtidigt. Teoremet om total sannolikhet ger

$$P(f_2) = P(f_2|f_1)P(f_1) + P(f_2|\bar{f}_1)(1 - P(f_1)) \quad (91)$$

där överliggande streck avser att en händelse inte inträffar. Sammanslagning av formlerna ger

$$P(f_2|\bar{f}_1) = \frac{P(f_2 \cap f_1)}{1 - P(f_1)} \quad (92)$$

som anger sannolikheten att brott sker i steg 2, efter att slänten överlevt steg 1. Beräkning av sannolikheten  $P = (f_2 \cap f_1)$  är komplicerad då den beror av korrelation mellan glidytor i steg 1 och 2. I fallet att glidytor inte är korrelerade är händelserna oberoende. Detta resulterar i att uppskattning av brotts sannolikheten i en posteriori är lika med den i steg 1. Med andra ord resulterar inte en vidare undersökning i någon relevant information. Vid fallet att glidytor är fullt korrelerade ger en skillnad mellan sannolikheter i steg 1 och 2, om den är positiv, annars noll.

### **Sammanfattning**

Allmänt för beräkning av brotts sannolikhet är att ingående parametrar betraktas som stokastiska, det vill säga de är slumpmässiga och oberoende. Genom olika beräkningsmetoder och användning av olika statistiska fördelningar beräknas sedan sannolikheten för brott i en slänt som sannolikheten för att säkerhetsfaktorn  $F$  är mindre än 1.0, med andra ord  $p(F < 1.0)$ .

Brotts sannolikhet beräknas huvudsakligen genom två olika metoder:

- $\beta$ -metoden
- Monte-Carlo metoden.

I båda fall beräknas sannolikheten för att den konventionella totalsäkerhetsfaktorn  $F$  är mindre än 1.0,  $p(F < 1.0)$ .

I detta arbete tillämpas enbart Monte-Carlo metoden, då den ingår som valmöjlighet för analysmodell i programmet SLOPE/W.

$\beta$ -metoden beskrivs närmare i kapitel 2.2.1 så kallad utförlig analys enligt Alén m.fl (2000).

### **2.3 Jämförelse**

Den klassiska analysen tillämpar jämviktsberäkningar mellan pådrivande och mothållande krafter och moment. Detta leder till en kvot mellan dessa mothållande och pådrivande moment och krafter, en så kallad säkerhetsfaktor  $F$ . Vid optimalt fall, det vill säga alla osäkerheter



(beträffande materialparametrar, geometri etc.) medtagna, är denna säkerhetsfaktor 1.0 eller högre för att en slänt skall betraktas ha en tillfredsställande stabilitet.

I verkligheten är inte alla osäkerheter kända eller bestämda, främst på grund av i vilken omfattning fältundersökningar har genomförts. Underskattning av jordens hållfasthetsegenskaper kan bland annat leda till beräkningar på den så kallade säkra sidan om jämviktisnivån 1.0, det vill säga att det eftersträvas en säkerhetsmarginal mot brott. Detta medför att säkerhetsfaktorns värde eftersträvas ligga på mellan 1.35 och 1.5 beroende på jordtyp och dräneringsförhållanden. Denna underskattning av jordens hållfasthetsegenskaper kan i sin tur leda till överdimensionering av eventuella förstärkningsåtgärder.

Vid en probabilistisk analys beräknas istället brottsannolikheten. Denna är definierad som sannolikheten att säkerhetsfaktorn  $F$  är mindre än det kritiska värdet 1.0,  $p(F < 1.0)$ . Den probabilistiska analysen är ett komplement till den klassiska.

Genom att analysera vilka säkerhetsfaktorer som, enligt den probabilistiska analysen, är de vanligast förekommande för en viss slänt skulle underskattning av stabiliteten kunna minskas och stabilitetshöjande åtgärder kunna bli billigare.

## 3 Simuleringar - förutsättningar

*Kapitlet beskriver på vilket sätt parametrar och geometri för typslänter har tagits fram, vilka förenklingar och antaganden som gjorts samt hur typslänterna konstruerats.*

### 3.1 Allmänt

Tanken är att konstruera okomplicerade slänter som enkelt kan analyseras med tillgängligt analysverktyg (SLOPE/W) samt att, genom val av representativa materialparametrar för de aktuella jordtyperna, på ett bra sätt få en god verklighetsanknytning i släntstabilitetsanalysen.

För att kunna jämföra utfallet av de olika metoderna konstrueras ett antal typslänter som varieras mellan brant och flackt utförande samt för dränerat respektive odränerat tillstånd. Slänterna konstrueras också i två olika material, kohesionsjord och friktionsjord. Begreppet brant respektive flack representeras av storleken på totalsäkerhetsfaktorerna enligt klassisk släntstabilitetsteori. Storleken på totalsäkerhetsfaktorerna för odränerat respektive dränerat tillstånd har hämtats ur Skredkommissionen (1995) och anges nedan som:

- **brant slänt (låg  $F$ )**, nära de gränser som finns enligt Skredkommissionen (1995), det vill säga runt  $F = 1.5$  för odränerat och någonstans  $F = 1.35$  för dränerat
- **flack slänt (högre  $F$ )**, dock inte flack i bemärkelsen långsträckt, utan fortfarande acceptabel för cirkulär-cylindriska glidytor,  $F$  omkring 2.0.

Att värdet på säkerhetsfaktorerna är större än 1.0 (kritiskt värde) kommer sig av att klassisk släntstabilitetsteori tillämpar totalsäkerhetsbegreppet. För att korrigera mot osäkerheter i metod och ingående parametrar kan partialsäkerhetsfaktorer användas, men detta görs alltså inte inom klassisk släntstabilitetsteori.

#### ***Partialsäkerhetsbegreppet***

Syftet med partialsäkerhetsbegreppet är att på ett strukturerat och systematiskt sätt korrigera en storhets medelvärde (exempelvis säkerhetsfaktorn  $F$ ) för olika typer av osäkerheter. Dessa kan exempelvis vara osäkerheter i den metod som använts för att bestämma mätvärden, spridning i mätvärdesbestämningar etc. Partialsäkerhetsbegreppet används även för att sätta gränser för olika geotekniska klasser och säkerhetsklasser, med syfte att definiera en brottsannolikhet (vilken då varierar mellan de olika klasserna). I partialsäkerhetsmetoden bestäms först ett medelvärde för respektive storhet och sedan väljs partialsäkerheter för osäkerheter. Tanken är att analysen av det dimensionerande mätvärdet ska vara neutral och oberoende av vem som utför bestämningen, till

skillnad från klassiska bestämningar, där varje ingenjör i princip, med eller utan hjälp av handböcker och anvisningar, har sitt sätt att bestämma dimensionerande värden.

Används partialsäkerhetsmetoden skall säkerhetsfaktorn (kritiskt värde) mot brott bli 1.0.

De säkerhetsfaktorer som svarar mot respektive partialsäkerhetskoefficient (och som då speglar en viss brottsannolikhet) har framtagits främst på basis av bärighetsproblematik, plattor som belastas monotont. I vanliga fall används säkerhetsfaktorer mot brott på runt 3.0 för denna typ av geoteknisk konstruktion, framförallt för att begränsa sättnings- och krypningsrörelser i driftskedet. Släntstabilitetsproblem analyseras med säkerhetsfaktorer mellan c: a 1.2 och 1.5 i vanliga fall, beroende på jordart och jordkännedom. Detta gör att det är mycket svårt, för att inte säga omöjligt, att räkna hem en slänt med tillämpning av partialsäkerhetssystemet. Därför beräknas slänter normalt enligt totalsäkerhetsprincipen, och eftersträvar således säkerhetsfaktorer mellan 1.2 och 1.5. Vid analys enligt totalsäkerhetsprincipen ansätts sålunda de karakteristiska värdena direkt i beräkningarna.

### **Förenklingar**

Först och främst görs förenklingen att slänterna är helt homogena beträffande jordtyp. Således kommer typslänterna enbart att bestå av ett enda jordlager vilandes på fast berggrund.

Poervattentrycket har inte någon direkt inverkan i odränerade analyser då detta redan indirekt finns med i bestämning av odränerad skjuvhållfasthet  $\tau_{fu}$ . I dränerad analys har grundvattnet däremot inverkan. Väljs en homogen lerslänt och korttidsanalys (odränerad analys) har inte grundvattennivåer någon betydelse, däremot påverkar yttre vattenytor, genom bidrag till kraft- och momentekvationerna. På grund av detta tillåts, för enkelhetens skull, inte slänten mynna i vattendrag, utan i luft. Skulle slänterna tillåtas mynna ut i vatten blir analysen mer komplicerad, åtminstone den sannolikhetsbaserade, på grund av ytterligare indata med nya osäkerheter att ta hänsyn till.

Samma geometri kan troligen inte användas för odränerat (i kohesionsjord) och dränerat (i friktionsjord) fall när det gäller den branta slänten. Detta beror på att säkerhetsfaktorn troligen kommer att bli lägre i det dränerade fallet. Om resultatet ligger på gränsen till brott i det odränerade fallet kommer troligen inte en slänt med samma geometri att kunna räknas hem med friktionsmaterial och dränerad analys, men detta beror ju naturligtvis också på hållfasthetsparametrarnas storlek. Det kan komma att krävas varianter på den branta slänten för att passa både friktionsjord och kohesionsjord.

För ytterligare förenkling kommer yttre laster att bortses ifrån helt.

Beträffande grundvatten gäller allmänt att en torrskorpa är belägen från markytan till djupet 0.5 – 1.0 m i vanliga postglaciala lerformationer. Del i bildandet av torrskorpan är grundvattenytans läge, därför kan antagandet att gvy i genomsnitt ligger i övergången mellan torrskorpa och underliggande jordlager göras. Själva torrskorpan kommer inte att anges i typslänterna utan frånses från för att förenkla analysen ytterligare.

När det gäller friktionsjordar kan situationen exempelvis vara betydligt mer komplicerad beroende på bl.a. omgivande topografi. Här antas enklast möjliga fall. Normalt sett (genomsnittsmässigt sett) förekommer gvy sällan djupare än 1.0 - 2.0 m under markytan i friktionsjordar, därför ansätts gvy i analyserna till djupet 1.5 m under släntkrön. Därifrån går ytan successivt mot markytan för att slutligen ansluta till markytan vid släntheten, och följer sedan markytans nivå.

Slänterna konstrueras som jämna sluttningar utan terrasser eller förändringar i lutning i själva slänten. Slänten utgörs av en enkel lutande linje mellan två punkter.

Analysen begränsas till enbart cirkulärcylindriska glidytor, vilket är det vanligast förekommande (åtminstone i kohesionsjordar enligt Skredkommissionen, 1995), samt att typslänterna kommer att göras tillräckligt branta för att undvika plant brott (se resonemang i sektion 3.1.3).

### **3.2 Val av parametrar**

Samtliga parametrar för friktionsjord och kohesionsjord har hämtats ur Bergdahl m.fl. (1993) med undantag för värden på kohesion och friktionsvinkel i kohesionsjord (kombinerad analys), vilka diskuterats fram genom diskussion med handledare. I de fall parametrarna i Bergdahl m.fl. (1993) anges som ett intervall beroende på jordens packningsgrad eller lagringstäthet, har uteslutande ett medelvärde valts.

#### ***Friktionsjord***

För en friktionsjord ansätts vanligtvis  $c' = 0$ . I Mohr-Coulombs brottkriterium konstateras att en obelastad friktionsjord har skjuvhållfastheten noll (ty  $\sigma' = 0$ ). Med ökad belastning ökar skjuvhållfastheten då jordkornen pressas närmare varandra och då tillåter att större friktionskrafter kan mobiliseras i kontaktpunkterna mellan kornen.

Tunghet anges med olika värden under respektive över grundvattenytan, då SLOPE/W beräknar effektiva tungheten. Den vattenmättade ansätts normalt till c:a 21-22 kN/m<sup>3</sup>, vilket medför en effektiv tunghet på 11-12 kN/m<sup>3</sup>. Skrymtungheten (ovan vatten, normalt motsvarande torrskorpan), anges normalt som 18 kN/m<sup>3</sup>.

För att välja lämplig storlek på friktionsvinkeln studeras Bergdahl m.fl. (1993), där typvärden på vinklar redovisas efter packningsgrad. I analyserna antas värden motsvarande medelfast packade jordar. Här väljs ett medelvärde av de för sand angivna värdena 35° och 37°, således 36°.

### **Kohesionsjord**

Kohesionsjord kan antas vara helt vattenmättad (förutom torrskorpan, vilken normalt hanteras som friktionsjord i beräkningar). Samma värde på tunghet antas gälla såväl under som över grundvattenytan. Mineraliska kohesionsjordar har en tunghet som vanligtvis varierar i intervallet 17-20 kN/m<sup>3</sup>. Ett lämpligt värde kan vara 18 kN/m<sup>3</sup> om inte annat underlag finnes.

Odränerad skjuvhållfasthet,  $c_u$ , med ett värde på 25 kPa är representativt (Bergdahl m.fl., 1993) och gäller vid överkant jordlager. De flesta lösa leror har värden runt 10 - 15 kPa och en bra bit uppåt. Nere i Skåne (och Halland) har inlandsisen utövat belastning på de flesta leror, och här kan värden på runt 150 - 300 kPa hittas och även högre. Hållfasthetsökningen med djupet brukar vara i storleksordningen 1 till 2.5 kPa/m för lösa leror.

Till dränerad friktionsvinkel på 30 grader ska kopplas en dränerad kohesion  $c'$ . Kohesion beskrivs dränerat som

$$c' \approx 0.03\sigma'_{fu} \quad (93)$$

alternativt

$$c' \approx 0.1\tau_{fu} \quad (94)$$

enligt Skredkommissionen (1995).

I SLOPE/W kan kohesionen anges på samma sätt som odränerad skjuvhållfasthet (det vill säga ett värde som gäller vid jordlagrets överkant med en linjär förändring, i detta fall en ökning, med djupet), alternativt som en faktor som multipliceras med den odränerade skjuvhållfastheten, vanligtvis 0.1 som angivits ovan. Av enkelhet kan kohesionen anges som konstant  $c' = 5$  kPa och friktionsvinkeln  $\phi' = 30^\circ$  för kohesionsjordar vid dränerad analys.

Odränerad skjuvhållfasthet ökar med djupet eftersom den beror av effektivspänningarna vilka ökar med djupet. Sålunda ska antingen en funktion användas för att förse programmet med värden för odränerad skjuvhållfasthet, eller så anges separata värden för olika djup.

I SLOPE/W finns alternativet att välja en jordmodell som ger möjlighet att ange odränerad skjuvhållfasthet vid överkant jordlager och sedan en linjär ökning med djupet, vilket är den

vanliga situationen för jordprofiler i Sverige. Normalt ansätts inte flera jordlager med konstant skjuvhållfasthet i beräkningar, eftersom detta angreppssätt får en negativ inverkan på beräkningsresultatet. Denna negativa inverkan beror på att  $\tau_{fu}$  normalt ökar med djupet, samt att skjuvhållfastheten beror av  $\sigma'$ .

Skjuvhållfastheten i jord för dränerade förhållanden kan beskrivas som

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (95)$$

vilket visar skjuvhållfasthetens förändring med djupet.

Formeln ovan anger skjuvhållfastheten enligt Mohr-Coulomb's brottvillkor. Den kan enbart användas under dränerade förhållanden. Enligt Mohr-Coulomb's teori är odränerad analys identisk med att anta värdet noll på friktionsvinkeln, varvid  $\tau_{fu}$  kan identifieras med  $c'$ , vilken då kallas  $c_u$ . En ytterligare effekt av att sätta friktionsvinkeln till noll är deformation under volymkonstans, vilket är logiskt vid odränerad analys, eftersom inget vatten kan avgå från jorden under deformationsförloppet.

Sammanfattningsvis kan formeln ovan användas för lera under dränerade förhållanden samt för friktionsjord. För kohesionsjord under odränerade förhållanden gäller  $\tau = k + n \cdot z$ , där  $k$  är skjuvhållfastheten vid överkant jordlager,  $n$  är skjuvhållfasthetens ökning med djupet och  $z$  är djupet från överkant jordlager. Ett vanligt antagande är en ökning av skjuvhållfastheten med djupet på 1.0-1.5 kPa/m.

### **Probabilistiska parametrar**

I den probabilistiska analysen i SLOPE/W måste en standardavvikelse anges för varje ingående parameter. Vidare måste det anges vilket antal tester (trials) som programmet skall göra. Då det inte är gjort någon statistisk undersökning för att fastställa/beräkna standardavvikelsen sätts ett antaget värde som skall resultera i en så omfattande analys som möjligt. I Vännman (2002) kan studeras att för en ideal normalfördelning hamnar 99.73 % av alla observationer inom gränsen för +/-3.0 standardavvikelser. För att göra analysen av slänterna riktigt enkel och då det inte existerar några verkliga observationer har för samtliga parametrar valts en standardavvikelse i SLOPE/W med värdet 3.0. Antagandet görs även att parametrarna är normalfördelade.

Antalet beräkningar (slumpmässiga kombinationer av ingående parametrar) som körs av SLOPE/W sätts till 2000 st.

### **Sammanställning**

För att hitta passande värden måste en given lagringstäthet respektive relativ fasthet väljas enligt Bergdahl (1993). En medelväg väljs med medelfast lagringstäthet och medelhög relativ fasthet. Nedan följer en sammanställning av de valda materialparametrarna vilka ingår i analyserna.

#### Friktionsjord

$\phi'$	= 35-37°	väljer 36°	(Bergdahl, 1993)
$c'$	= 0		(allmänt antagande)
$\gamma_m$	= 18-22 kN/m <sup>3</sup>	väljer 21 kN/m <sup>3</sup>	(Bergdahl, 1993)
$\gamma$ (fuktig)	= 16-20 kN/m <sup>3</sup>	väljer 17 kN/m <sup>3</sup>	(Bergdahl, 1993)

#### Kohesionsjord

$\phi'$	= 30°		(Skredkommissionen, 1995)
$\tau_{fu} = c_u$	= 15-25 kPa	väljer 20 kPa	(Bergdahl, 1993)
$\gamma_m$	= 15-19 kN/m <sup>3</sup>	väljer 16 kN/m <sup>3</sup>	(Bergdahl, 1993)
$c' \approx 0.03\sigma'_{fu}$			(Skredkommissionen, 1995)
$c' \approx 0.1\tau_{fu}$	alt. $c' =$ konstant = 5 kPa	väljer 5 kPa	(Skredkommissionen, 1995)

#### Probabilistiska parametrar

$\sigma$	= standardavvikelse	= 3.0	(Vännman, 2002)
n	= antal tester	= 2000	

### **3.3 Val av geometri**

Som tidigare angivits väljs så enkla lösningar på geometrin som möjligt. Inga terrasser eller förändrade lutningar ska finnas, utan slänten konstrueras som en rät linje mellan två punkter. Då materialparametrarna bestämts är det enbart slänternas geometri som, i försöken, styr storleken på säkerhetsfaktorn. Genom att ändra geometrin har lämpliga typslänter provats fram i SLOPE/W.

Ett problem med slänternas geometri är att inte konstruera slänter som är så pass flacka att eventuella brott kan betraktas som plana brott, då det är cirkulärcylindriska brottfigurer som eftersträvas i analyserna.

Det finns ett antal omständigheter som skulle kunna resultera i en plan glidyta. Detta gäller, enligt Skredkommissionen (1995), i första hand för ”mycket långsträckta” slänter (långsträckta i

förhållande till jordens mäktighet). De omständigheter som påverkar uppkomsten av en plan glidyta är då:

- jorden som är indelad i lager med olika jordarter och det bildas en skredyta mellan sådana olika lager
- det finns permeabla lager och ett vattenflöde genom ett sådant lager därmed skulle ge upphov till att överliggande lager ger sig iväg i ett skred. Till detta hör också grundvattenytan som ett möjligt vattenflöde
- tjäle och tjällossning påverkar jorden.

För de aktuella slänterna kan punkt 1 bortses ifrån då jordprofilen i dessa modeller är helt homogen, samt att gränsytan mellan jord och berggrund är horisontell. Sålunda bör en eventuell plan glidyta uppträda på grund av grundvattnet och flödet av sådant samt beroende på vilken jordart och vilka materialparametrar som är aktuella.

Värsta fallet borde vara en långsträckt slänt i friktionsjord med låg friktionsvinkel och ett högt grundvattenflöde.



## 4 Simuleringar – resultat och analys

I avsnittet beskrivs kortfattat vilka analysmetoder och verktyg som utnyttjats, hur dessa verktyg används, vilka antaganden och förenklingar som görs samt vilka resultat de ger. Sist görs en jämförelse mellan respektive analysmetods resultat.

### *Allmänt*

De försök som gjorts på typslänterna för dränerade och odränerade förhållanden är följande:

- klassisk stabilitetsanalys med hjälp av SLOPE/W
- Monte-Carlo simulering, som ingår i SLOPE/W.

### **4.1 Klassisk analys (SLOPE/W)**

#### *Allmänt*

SLOPE/W är ett datorprogram utvecklat för stabilitetsanalys. I programmet används enligt SLOPE/W (1998) jämviktsvillkor för att modellera heterogena jordtyper, komplexa jordlager, komplex geometri hos glidytor samt variabla porvattentryck. Programmet ger också en stor valmöjlighet till analysmodeller så som Morgenstern & Price, Spencer m.fl.

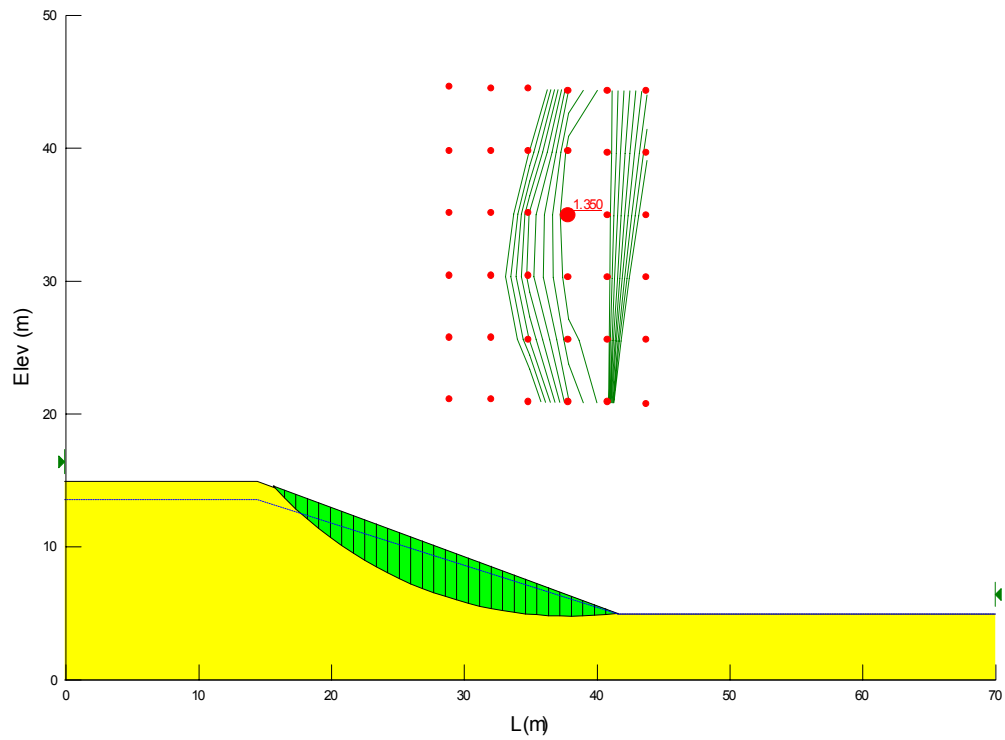
Analyserna kan utföras genom att antingen använda deterministiska eller probabilistiska (se 3.2.2) indata. För en mer total analys kan båda varianterna användas.

Kombinationen av ovanstående modelleringsalternativ ger i SLOPE/W möjligheten att lösa de flesta släntstabilitetsproblem.

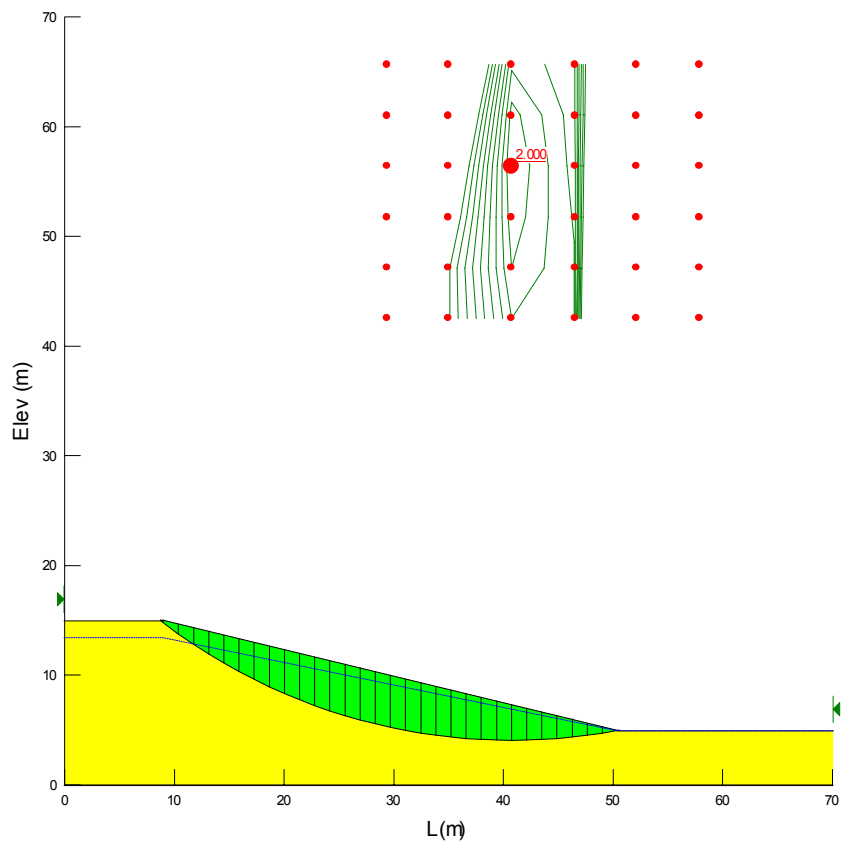
#### **Genomförande och resultat**

Analys av slänterna har gjorts enligt givna förutsättningar i avsnitt 3.1 till 3.3. Som analysmodell har valts den rigorösa metoden Spencer.

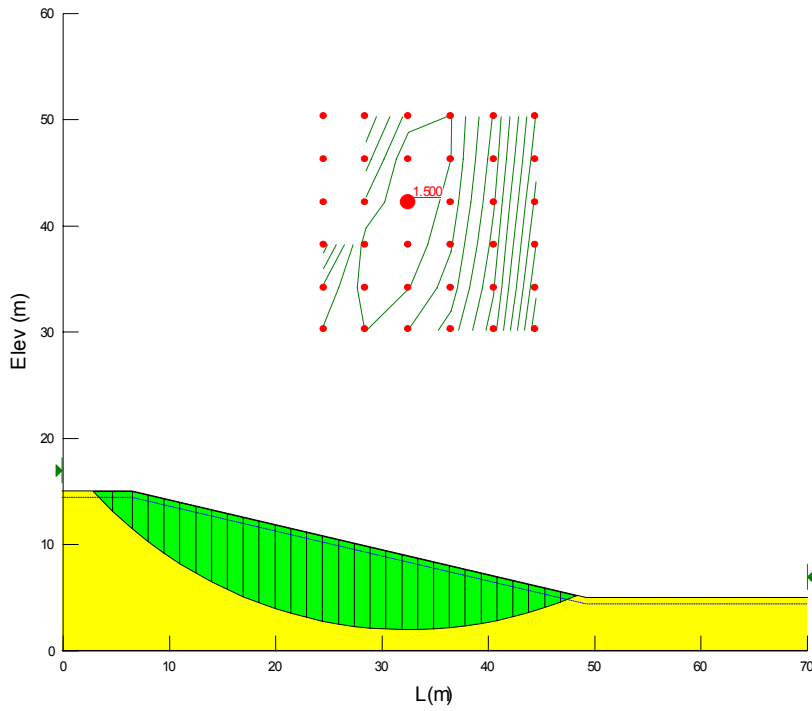
Nedan presenteras typslänterna som figur 4.1 till 4.6 med grafiskt redovisad farligaste glidyta samt tillhörande totalsäkerhetsfaktor.



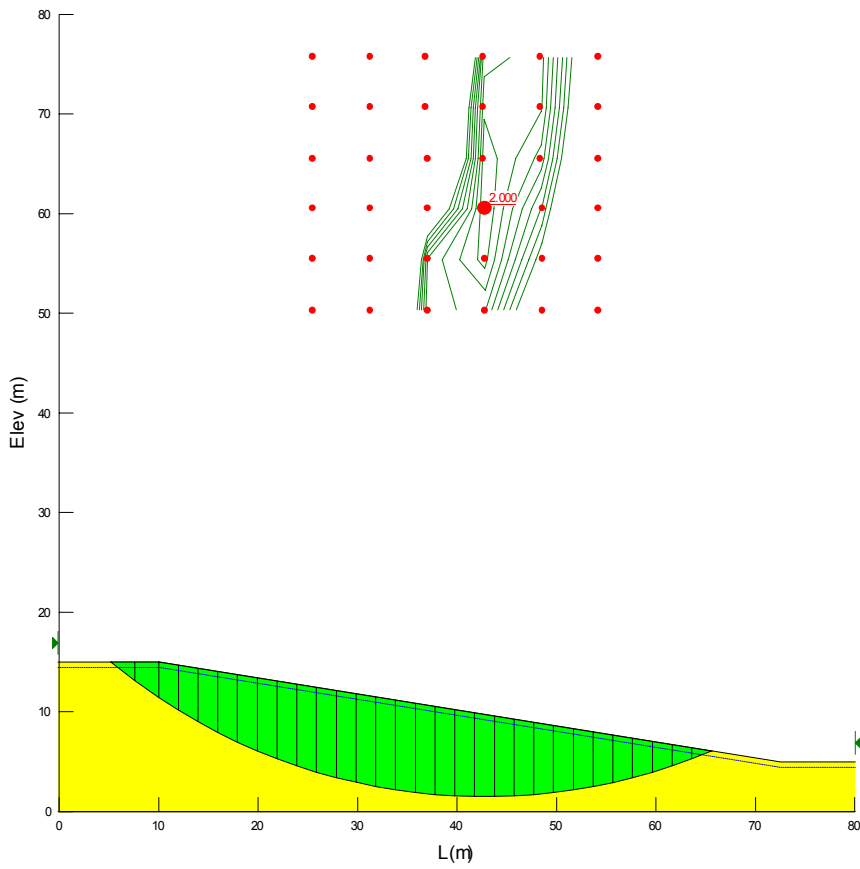
Figur 4.1 Friktionsjord, brant,  $F = 1.35$



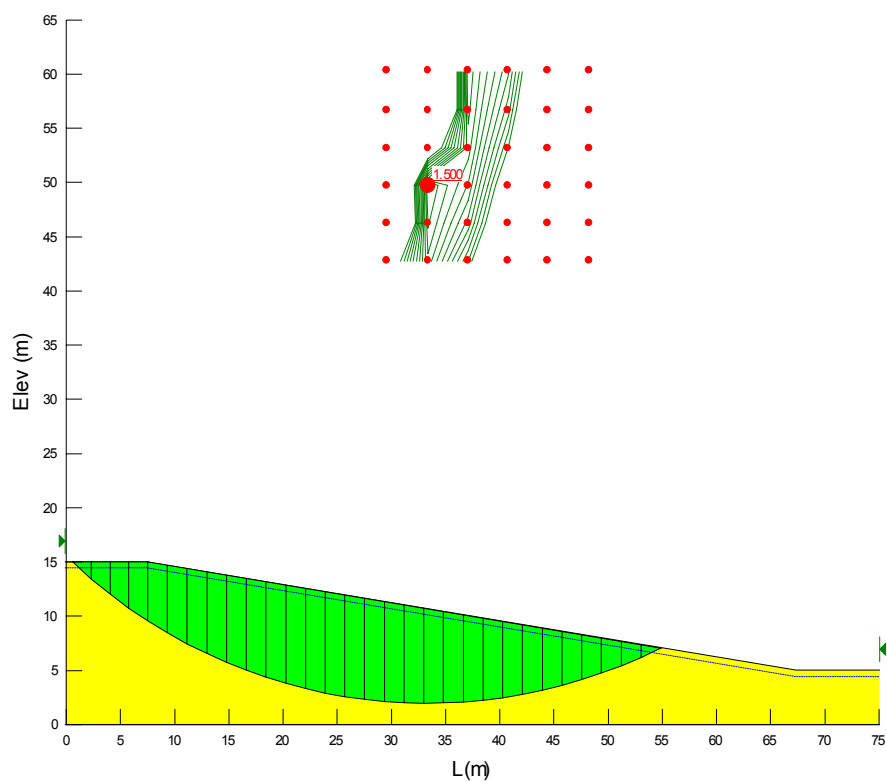
Figur 4.2 Friktionsjord, flack,  $F = 2.0$



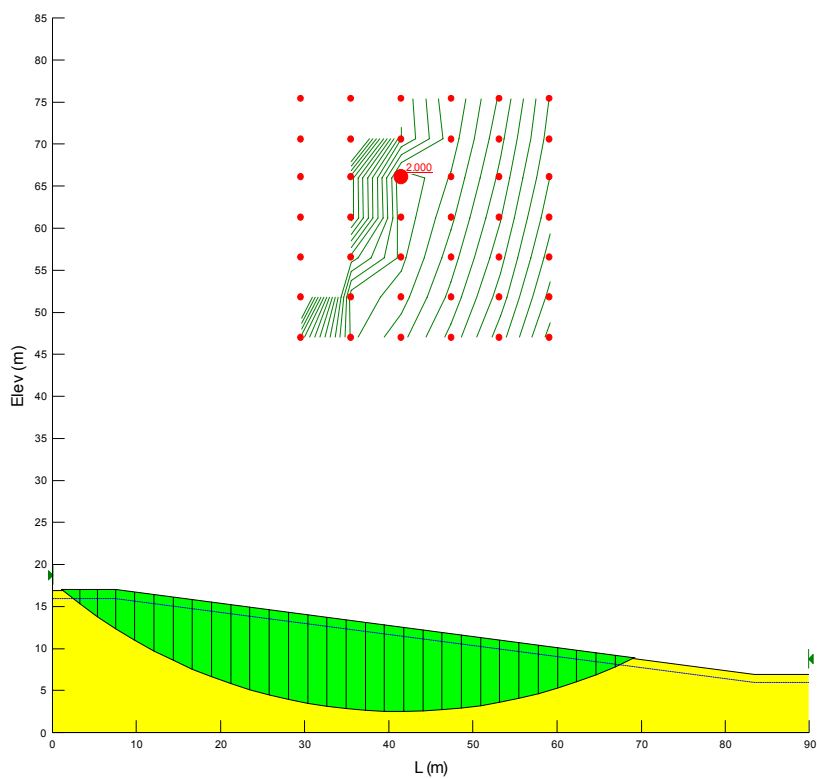
Figur 4.3 Kohesionsjord, kombinerad analys, brant,  $F = 1.5$



Figur 4.4 Kohesionsjord, kombinerad analys, flack,  $F = 2.0$



Figur 4.5 Kohesionsjord, odränerad analys, brant,  $F = 1.5$



Figur 4.6 Kohesionsjord, odränerad analys, flack,  $F = 2.0$

## 4.2 Probabilistisk analys (SLOPE/W)

### Allmänt

Det existerar i släntstabilitetsberäkningar alltid en viss grad av osäkerhet vad gäller indata. För att behandla denna osäkerhet, kan i SLOPE/W utföras så kallad Monte-Carlo simulering (probabilistisk analys). Här anges för varje parameter, enligt SLOPE/W (1998), en standardavvikelse för att definiera sannolikhetsfördelningen (spridningen/variationen) för respektive parameter. Denna standardavvikelse anger för varje parameter dess osäkerhet.

Vidare anges det antal test (beräkning med slumpmässiga kombinationer av parametrar) som önskas att programmet skall genomföra.

Monte Carlo simulering är en metod som i Zhou m.fl. (2003) används för att simulera probabilistiska fenomen/beteenden genom att beräkna fördelningen av en variabel och representera den med en matematisk modell. Metoden följer nedanstående steg:

1. generera en probabilistisk fördelning av variablerna  $\phi'$  och  $c'$  med Monte-Carlo simulering
2. beräkna släntens säkerhetsfaktor för en grid med de probabilistiska variablerna  $\phi'$  och  $c'$ . Efter  $N$  beräkningar kan den probabilistiska fördelningskurvan erhållas. Genom att integrera fördelningskurvan för  $F$  från  $-\infty$  till 1.0, fås sannolikheten för brott hos varje i beräkningarna använd cell. Enligt Heuvelink (1993) bör värdet på  $N$  ligga mellan 50 och 2000
3. repetera beräkningarna för alla grider så att en brottsannolikhetskarta kan skapas.

Från tidigare forskning och experiment har  $c'$  och  $\phi'$  funnits vara normalfördelade.

Även i Berggren (1990) beskrivs Monte-Carlo metoden. Släntstabilitetsberäkningar baseras på ett flertal ingående parametrar, vilka kan betraktas som stokastiska variabler (oberoende slumpmässiga variabler), vars respektive fördelningsfunktioner kan beskrivas med statistiska metoder.

Att utföra statistisk analys med många inblandade variabler är svårt både teoretiskt och praktiskt utan hjälp av datorkraft och program. Ingångsparametrarna till analysen erhålls från omfattande fältundersökningar. Sådana undersökningar är mycket kostsamma och därför begränsas den tillgängliga kvaliteten och kvantiteten på ingångsparametrarna av ekonomiska skäl.

För att kringgå dessa problem och samtidigt ändå genomföra studier av hur olika variablers stokastiska variation påverkar säkerhetsfaktorn finns ett simuleringsprogram enligt Monte-Carlo

metoden (Bosscher, 1988). Här möjliggörs införande av slumpmässigt genererade ingångsparametrar. Ingående parametrar baseras på begränsade mätningar av skjuvhållfasthetsvärden, jordlagergränser, grundvattennivåer etc. Dessa simuleras genom slumpmässiga kombinationer från respektive fördelningsfunktion. Vid simulering av 25 eller flera sådana kombinationer kan, enligt Bosscher (1988), ett tillförlitligt värde på skredsannolikheten erhållas. Sannolikheten beräknas som andelen kombinationer som ger  $F \leq 1.0$ .

Den probabilistiska analysen i SLOPE/W möjliggör beräkning av:

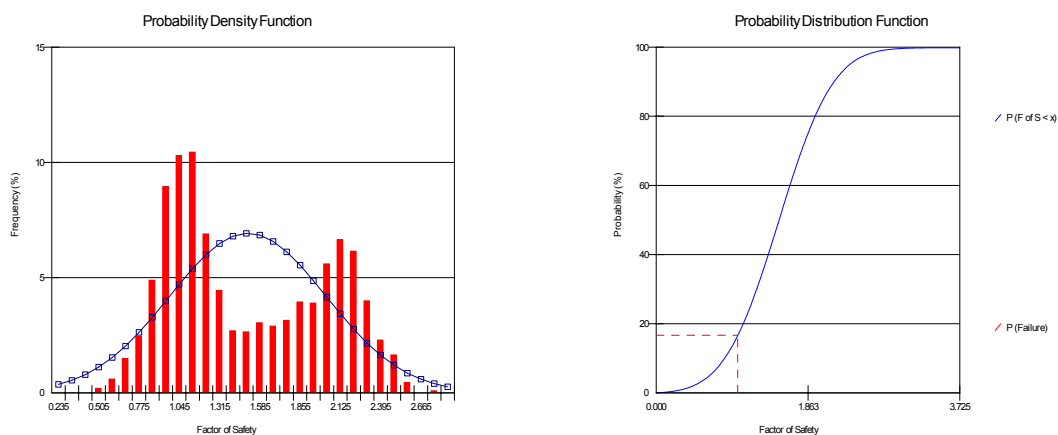
- sannolikhetsfördelningen hos säkerhetsfaktorn,  $F$
- säkerhetsindex,  $\beta$
- brottsannolikhet.

Med brottsannolikhet avses sannolikheten att säkerhetsfaktorn  $F$  är mindre än kritiskt värde. Det ultimata kritiska värdet är 1.0.

Resultaten presenteras i form av en sannolikhetsfördelning och som en normalfördelning av säkerhetsfaktorn  $F$ .

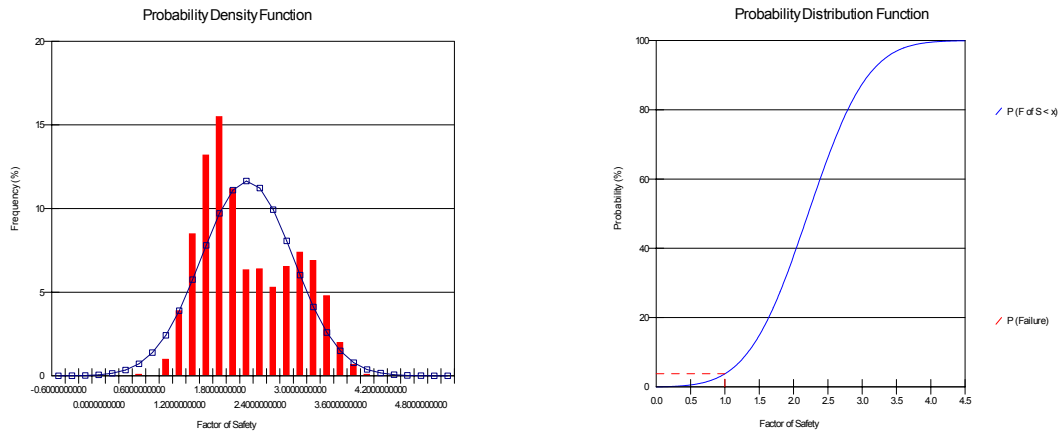
### Genomförande och resultat

Som tidigare angetts sätts standardavvikelsen för samtliga indata till 3.0 och antalet tester till 2000 stycken. Detta ger följande statistiska resultat, i figur 4.7 till 4.12, beträffande sannolikhetsfördelning (säkerhetsfaktorn  $F$  presenterad som normalfördelning) och brottsannolikhet för respektive typslänt.

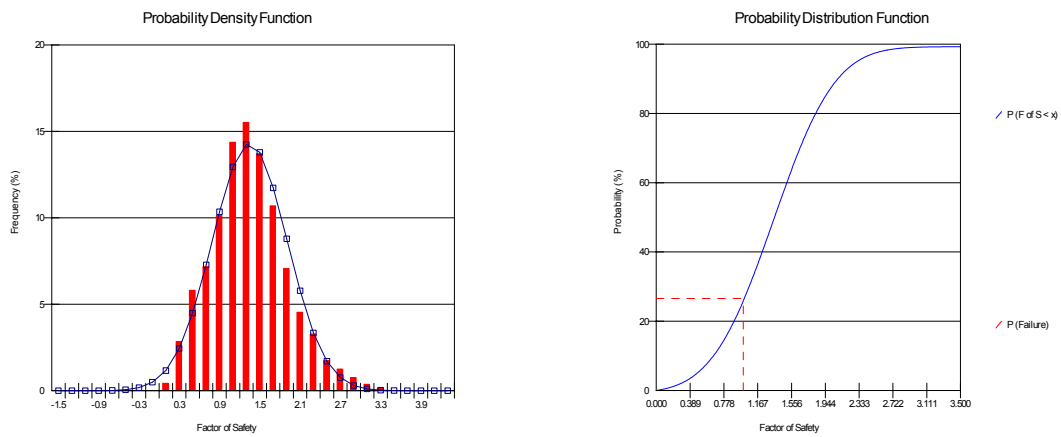


Figur 4.7 Friktionsjord, brant,  $F = 1.35$ , sannolikhetsfördelning, brottsannolikhet

## Kapitel 4 Simuleringar – resultat och analys

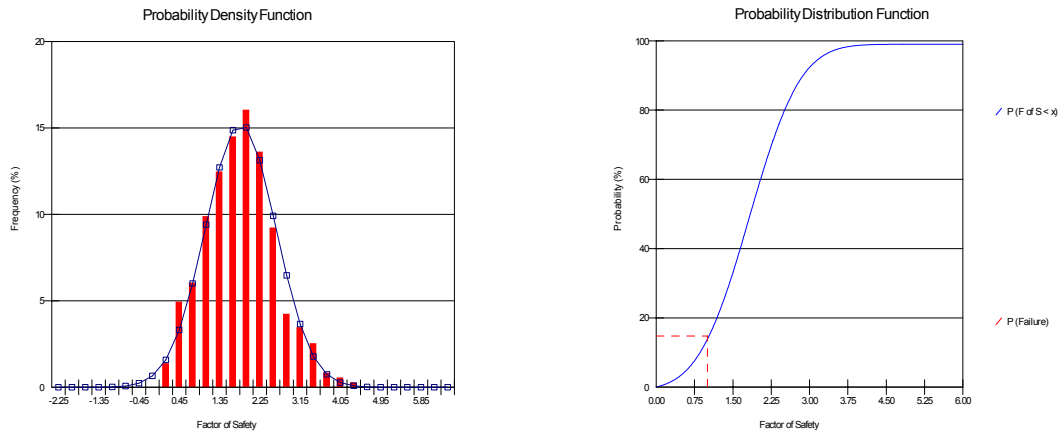


Figur 4.8 Friktionsjord, flack,  $F = 2.0$ , sannolikhetsfördelning, brottsannolikhet

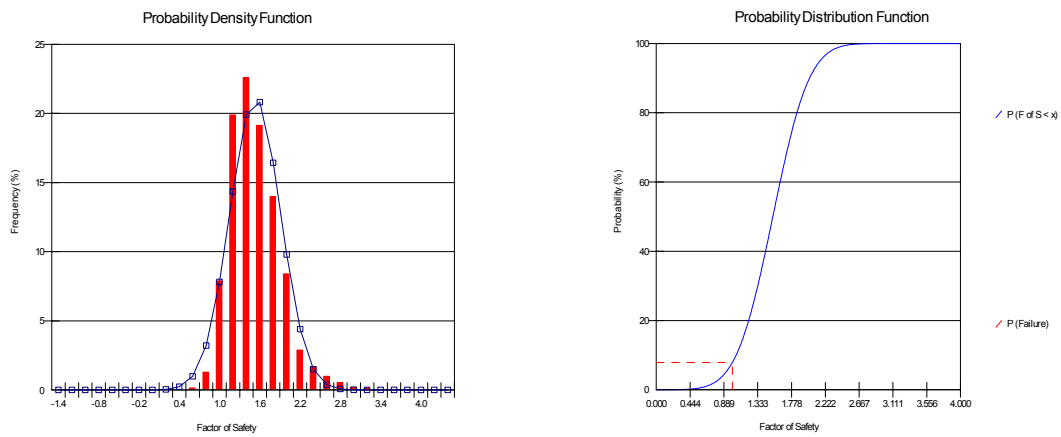


Figur 4.9 Kohesionsjord, kombinerad analys, brant,  $F = 1.5$ , sannolikhetsfördelning, brottsannolikhet

## Kapitel 4 Simuleringar – resultat och analys

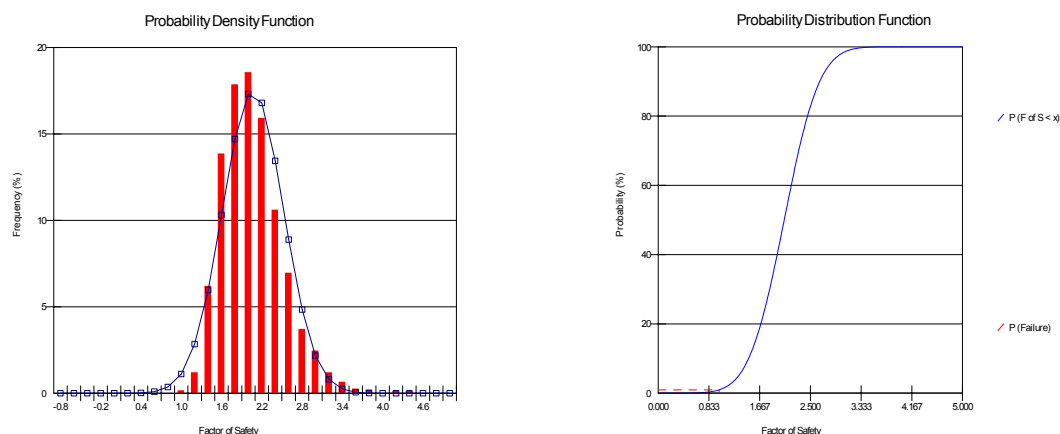


Figur 4.10 Kohesionsjord, kombinerad analys, flack,  $F = 2.0$ , sannolikhetsfördelning, brottsannolikhet



Figur 4.11 Kohesionsjord, odränerad analys, brant,  $F = 1.5$ , sannolikhetsfördelning, brottsannolikhet





Figur 4.12 Kohesionsjord, odränerad analys, flack,  $F = 1.5$ , sannolikhetsfördelning, brottsannolikhet

### 4.3 Jämförelse klassisk – probabilistisk analys

En jämförelse av resultaten från de olika beräkningarna (klassisk respektive Monte-Carlo simulering) innebär ett resonemang huruvida resultaten av de olika analysmetoderna leder till samma slutsatser, exempelvis kan slänten anses ha tillfredsställande stabilitetsförhållanden och i vilken utsträckning? Kan något resultat anses vara mer tillförlitligt än ett annat? Fungerar det bra att applicera metoderna på slänterna, eller medför det problem av något slag?

En genomgående trend hos resultaten är att den probabilistiska analysen visar på en större sannolikhet för brott för de brantare slänterna. Detta är som förväntat, samt ett tecken på att det kan fungera väl att använda probabilistiska metoder som komplement till andra inom släntstabilitetsanalys.

Resultaten av beräkningarna enligt probabilistisk typ visar sannolikhet för brott för samtliga typslänter, även de flacka varianterna, vilka är konstruerade att ligga på den ”säkra” sidan. Detta kommer sig av att materialparametrarna tillåts variera jämfört med den klassiska analysen. Därför kan det existera säkerhetsfaktorer vilka är lägre än det kritiska värdet 1.0.

Försöken visar i övrigt på ”fina” normalfördelningar av säkerhetsfaktorn  $F$  med undantaget för slänterna med friktionsjord. Vad detta kan bero på är ej klart. En möjlig förklaring skulle kunna vara att de ingående parametrarna inte tillhör samma fördelningsfunktion då det snarare ser ut som om det existerar två intervall med toppvärden på frekvensen för säkerhetsfaktorn  $F$  (se figur 4.7 respektive 4.8).

Den i klassisk analys ansatta säkerhetsfaktorn  $F$  är enligt de probabilistiska analyserna i samtliga beräkningsfall ej den vanligast förekommande. Detta gäller i synnerhet för analysen av friktionsjorden (se normalfördelning figur 4.7 och 4.8). Den lägsta framräknade säkerhetsfaktorn behöver inte nödvändigtvis vara den vanligast förekommande. Det kan vara så att det endast finns ett enda extremfall med just denna låga säkerhetsfaktor. I ett sådant fall kan det tänkas att enbart beräkning enligt klassisk analys leder till underskattning av släntens säkerhet.

Resultatet av den probabilistiska analysen visas som sannolikheten att säkerhetsfaktorn är mindre än det kritiska värdet 1.0, det vill säga  $p(F \leq 1.0)$ . I den klassiska analysen har gränsvärdena satts till 1.35, 1.5 och 2.0, på grund av att partialsäkerhetsfaktorer ej har tillämpas. Detta går inte att ändra i SLOPE/W, men det går att läsa av, i graferna (se figur 4.7 till 4.12), den sannolikhet som önskas för respektive säkerhetsfaktor. Definitionen på brottsannolikhet är enligt teorin just  $p(F \leq 1.0)$ .

## 5 Diskussion och slutsatser

Praktiskt sett är sannolikhetsbaserade/probabilistiska analysmetoder ett bra komplement till klassisk stabilitetsanalys med totalsäkerhetsfaktorer, främst för att ej underskatta slänters stabilitet. Sannolikhetsbaserade metoder kan framför allt utnyttjas väl vid tillgängligheten av starkt datorstöd, vilket också har förbättrats avsevärt på senare tid. Kraftfullare datorer möjliggör såväl behandling som generering (slumpmässig) av stora mängder data.

Främst att framhålla beträffande fördelar hos sannolikhetsbaserade analysmetoder är möjligheten till variation av hållfasthetsparametrar inom givna intervall i jordmodellen. Med probabilistiska metoder, exempelvis Monte-Carlo simulering, kan variation av jordmaterials egenskaper även tillåtas ske inom ett jordlager.

Statistisk tillämpning tillåter en analys med förhållandevis få mätvärden, då värden på hållfasthetsparametrar slumpmässigt kan genereras inom ett ”rimligt” intervall. Det är dock viktigt att en korrekt bild skapas av spridningen hos hållfasthetsegenskaperna för det aktuella materialet. Med detta avses kunskap om de olika materialegenskapernas ungefärliga högsta respektive lägsta värden.

I resultaten från de genomförda beräkningarna av slänterna existerar extremvärden hos de framräknade säkerhetsfaktorerna för probabilistisk analys. Vid klassisk analys är det inte säkert att dessa värden identifieras som extremvärden, då det som eftersöks enbart är det lägsta värdet på säkerhetsfaktorn  $F$ . Som ovan nämnts ger den probabilistiska analysen en möjlighet att se om detta lägsta värde är vanligt förekommande eller inte. Vid ett resultat som visar på en låg sannolikhet för en sådan låg säkerhetsfaktor, skulle en probabilistisk analys kunna leda till lägre kostnader för förstärkningsåtgärder.

Tillämpligheten/användbarheten av probabilistisk släntstabilitetsanalys kan betraktas som bra i form av ett komplement till den klassiska analysen. Det skulle emellertid behöva utföras mer omfattande beräkningar av olika slänttyper (geometri, material etc.), för att få en bättre bild av hur sannolikhetsbaserade metoder fungerar vid släntstabilitetsanalyser.

## 6 Referenser

### BÖCKER, ARTIKLAR OCH KONFERENSER

Alén, C. (1996). Application of a probabilistic approach in slope stability analyses, *International symposium on landslides, 7, Trondheim, June 1996*, Proceedings, vol. 2, s 1137-1142.

Alén, C. (1998a). *On probability in geotechnics, Random calculation models exemplified on slope stability analysis on ground-superstructure interaction*, Avhandling Vol 1, Kapitel 4, Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 280 s.

Alén, C. (1998b). *On probability in geotechnics, Appendicies*, Avhandling Vol 2, Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 169 s.

Alén, C., Bengtsson, P-E., Berggren, Bo., Johansson, L., Johansson, Å. (2000). *Skredriskanalys i Göta älvdalen – Metodbeskrivning*, Rapport 58, SGI, Linköping.

Alonso, E. E. (1976). Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays, *Géotechnique*, 26, 453-472.

Anderson, L.R., Sharp, K.D., Bowles, D.S., Canfield, R.V. (1984). Application of methods of probabilistic characterization of soil properties, *Probabilistic characterization of soil properties: Bridge between theory and practice, Atlanta, GA, May 1984*, Proceedings, 90-105.

Bengtsson, P-E., Berggren, B., Olsson, L., Stille, H. (1989). Reliability based partial coefficient – A simplified approach, *International conference on soil mechanics and foundation engineering, 12, Rio de Janeiro, Aug. 1989*, Proceedings, Vol. 3, s 2081-2084.

Bergdahl, U., Ottosson, E., Stigson Malmberg, B. (1993). *Plattgrundläggning*, Handbok, SGI och AB svensk Byggtjänst, Linköping.

Berggren, B. (1982). *PM betr. Stabilitetsberäkningar vid skredriskartering*, SGI Varia, Linköping.

Berggren, B., Fallsvik, J. (1990). *Stability of slopes in clay – a description of a risk evaluation method*, Varia 331, SGI, Linköping.

Berggren, B., Fallsvik, J., Hintze, S., Stille, H. (1991a). *LerslänTERS stabilitetsförhållanden – Riskvärdering och beslutsteori – Förslag till metod för riskvärdering*, Varia 333, SGI, Linköping.

Berggren, B., Fallsvik, J. (1991b). *Riskvärdering av slänters stabilitetsförhållanden*, Varia 334, SGI, Linköping.

Bosscher, P.J., Edil, T.B., Mickelson, D.M. (1988). Evaluation of risks of slope instability along a coastal reach, V, *International Symposium on Landslides, Lausanne*, pp 1119-1125.

Calle, E.O.F. (1985). Probabilistic analysis of stability of earth slopes, *International conference on soil mechanics and foundation engineering, 11, San Francisco, Aug, 1985*, Proceedings, Vol. 2, 1985, s 809-812.

Elfgrén, L., Vikström, L. (1999). *Formelsamling för väg- och vattenbyggare*, Formelsamling, LTU, Luleå.

El-Hamry, H. (2001). *Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice*, Ph.D. thesis, University of Alberta, Edmonton, Alta.

El-Ramly, H., Morgenstern, N.R., Cruden, D.M. (2002). Probabilistic slope stability analysis for practice, *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, vol. 39, no 3, p 665-683.

Gussmann, P., Ochmann, H. (1985). Probabilistic theory and kinematical element method, *International conference on soil mechanics and foundation engineering, 11, San Francisco, Aug, 1985*, Proceedings, Vol. 2, 1985, s 825-829.

Harr, M. E. (1977). *Mechanics of Particulate Media*, 1<sup>st</sup> ed., McGraw-Hill Inc., USA, 543p.

Harr, M. E. (1987). *Reliability-Based design in Civil Engineering*, McGraw-Hill Company, New York.

Hasofer, A. M. and Lind, N. C. (1974). Exact and invariant second moment code format, *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, 100, 111-121.

Heuvelink, D. G. (1993). *Error propagation in quantitative spatial modeling: Application in GIS*, Ph.D. thesis, Utrecht University, The Netherlands.

Lebuis, J., Robert, J-M, Rissman, P. (1983). Regional mapping of landslide hazard in Quebec, *Symposium on Slopes on Soft Clays*, Linköping, Statens Geotekniska Institut, Rapport 17, pp 205-262.

Li, K. S., Lumb, P. (1987a). Probabilistic design of slopes, *Canadian Geotechnical Journal*, 1987, vol. 24, nr 4, s 520-535.

Li, K. S., White, W. (1987b). *A unified solution scheme for the generalized procedure of slices in slope stability analysis*, Research report no. R-21, Department of Civil Engineering, University College, Australian Defence Force Academy, The University of New South Wales, Canberra, Australia.

Li, K. S. (1992). A unified solution scheme for slope stability analysis. *Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, Christchurch, 1:481-486.

Mitchell, R. J. (1978). *Earthflow terrain evaluation in Ontario*, Final report on project Q-53 of the Ontario Joint Transportation and Communication Research Program, Departement of Civil Engineering, Queen's University, RR213, Kingston, Ontario, 29 p.

Morgenstern, N. R. and Price, V. R. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces, *Géotechnique*, 15, 79-93.

Moss, A. S. E. and Steffen, O. K. H. (1978). Geotechnology and probability in open-pit mine planning, *Proc. 11<sup>th</sup> Common, Mining Metall, Congr., Hong Kong, 1978*, 543-50.

MPROSTAB. (1994). *Users manual*, Manual, Delft geotechnics, Netherlands.

Piteau, D. R. and Martin, D. C. (1977). Slope stability analysis an design based on probability techniques at Cassiar mine, *Bull, Canadian Institute of Mining & Metallurgy*, 70, 139-50.

Rosenbaum, M.S., Jarvis, J. (1985). Probabilistic slope stability analysis using a microcomputer, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1985, vol. 18, nr 4, s 353-356.

Ross, B. (1989). Scenarios for repository safety analysis, *Engineering Geology*, 26, p 285-299. Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam.

Räddningsverket. (1989). Rosenberg, T. *Att skydda och rädda liv, egendom och miljö*, Handbok i kommunal riskanalys inom räddningstjänsten, provutgåva, Räddningsverket, Karlstad.

SLOPE/W. (1998). *Getting started guide*, Manual, GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canada.

Skredkommissionen. (1995). *Anvisningar för stabilitetsutredningar*, Rapport 3:95, SGI, Linköping.

Stille, H., Olsson, L. (1979). *Geoteknisk riskbedömning*, etapp 1: Statistiska metoder tillämpade på svensk geoteknik, Byggeforskningen, rapport R174:1980.

Tang, W. H., Yucemen, M. S. and Ang, A. H-S. (1976). Probability based short term design of slopes, *Journ. Canadian Geot. Soc.*, vol 13.

Vanmarcke, E. H. (1977). Probabilistic Modeling of Soil Profiles, *ASCE Journal of Geotech. Eng.*, no 11, 1227-1246.

Vanmarcke, E. H. (1980). Probabilistic stability analysis of earth slopes, *Engineering geology*, 16, 29-50.

Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation, A review of principles and practice, *UNESCO, Paris*, pp 10-11, ISBN 92-3-101895-7.

Vännman, K. (2002). *Matematisk statistik*, Studentlitteratur, Lund.

Wu, T. H. and Kraft, L. M. (1970). Safety analysis of slopes, *Journ. of the Soil Mech. and Found. Eng. Div. Proc. ASCE*, SM2 vol 96.

Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M., Mori, J. (2003). Spatial probabilistic modelling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach, *Engineering Geology*, vol. 68, no 3-4, p 373-386.

#### PERSONLIG KOMMUNIKATION

Johansson, Lars. Statens geotekniska institut. Samtal, fortlöpande under arbetets gång, 2003-2004.

Westerberg, Bo. Luleå tekniska universitet. Samtal, fortlöpande under arbetets gång, 2003-2004.

