

KANDIDATARBETE 2015:03

Analysering av GeoSlope och LimitState

- en jämförelse av beräkningsmetoderna Limit Equilibrium och
Discontinuity Limit Optimization

Kandidatarbete i Geologi och Geoteknik

SAMANTHA AVRAMOVIC

EMMA BENTSTRÖM

Institutionen för Geologi och Geoteknik
Avdelning för Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

Analysering av GeoSlope och LimitState

Kandidatarbete i Geoteknik
EMMA BENTSTRÖM
SAMANTHA AVRAMOVIC

© EMMA BENSTRÖM, SAMANTHA AVRAMOVIC, 2015

Kandidatarbete 2015:03
Institutionen för Geologi och Geoteknik
Avdelningen för Geoteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Chalmers Reproservice
Göteborg, Sverige 2015

Abstract

This report analyzes and compares the two software *GeoSlope:SLOPE/W(2004)* and *LimitState:Geo version 3.1* used in geotechnical investigations of soil stability. The two programs are based on different methods of calculation. LimitState is the first program that calculates slope stability with discontinuity layout optimization and has been on the market since 2007. There exists an interest to compare LimitState with GeoSlope which has existed since 1977 and uses limit equilibrium analysis to solve geotechnical mechanisms. The purpose of the report is that by allowing the same slope scenarios run in each program a comparison of the two programs can be performed based on the generated results. The discussion addresses the differences between the programs resulting safety factors, sliding surfaces, and how the parameters water table and external loads affected the results and how can these differences can be interpreted. Limit State has in most cases returned non-conservative results, with safety factor higher than those returned by GeoSlope. In simple slope scenarios LimitState and GeoSlope identifies similar critical sliding surfaces but when more complex cases are analyzed, differences occur.

Further analysis are required in order to get a picture of how differences in the results may affect the market using these two softwares.

Sammandrag

I denna rapport analyserar och jämförs de två programvarorna GeoSlope SLOPE/W och LimitState:Geo som används vid geotekniska undersökningar av jordstabilitet. De två programmen baseras på olika beräkningsmetoder där GeoSlope använder sig utav *Limit Equilibrium* och LimitState bygger på *Discontinuity layout optimization*.

LimitState är det första programmet som beräknar släntstabilitet med hjälp av *Discontinuity Layout Optimization* och har funnits på marknaden sedan 2007. Det finns därför ett intresse av att jämföra LimitState med GeoSlope som funnits sedan 1977 och bygger på *Limit Equilibrium*-metoder. Syftet med rapporten är att genom att låta samma släntfall köras i respektive program kunna se hur programmens resulterande säkerhetsfaktor och dess kritiska glidyta förhåller sig till varandra. För att få en förståelse för hur en slänt kan gå till brott och vilka faktorer som kan påverka det kommer rapportens första del att behandla grundläggande kunskap kring jordmekanik och släntstabilitet. Rapporten inleds med en beskrivning av yttre faktorer som kan orsaka släntras. Därefter redovisas inre faktorer så som bland annat jordhållfasthet, spänningar och deformationsegenskaper. Teorin bakom respektive programs beräkningsmetod, samt några av programmens funktioner, presenteras för att ge en helhetsbild över hur de två programmen är uppbyggda.

Rapportens resultatdel består av tre olika typfall som undersökts i GeoSlope och LimitState. Dessa typfall består av både kohesions-och friktionsmaterial som valts till lera och sand.

Diskussionen tar upp skillnaderna mellan programmens resulterande säkerhetsfaktorer, glidytor samt hur parametrarna grundvattenyta och yttre last påverkat resultaten och på vilket sätt kan dessa skillnader tolkas. Limitstate har i de flesta fall fått ett ickekonservativt resultat vilket innebär att programmet genererat en högre säkerhetsfaktor i jämförelse med GeoSlope. I enkla typfall identifierar LimitState och GeoSlope liknande kritiska glidytor men då mer komplexa fall analyseras kan skillnader uppstå.

Ytterligare analyser krävs för att kunna få en bild över hur skillnader i resultaten kan påverka marknadens användning av dessa två programvaror.

Innehållsförteckning

Inledning	1
Syfte	1
Uppgift	1
Avgränsningar	2
Metod	3
1 Släntstabilitet.....	5
1.1 Yttre faktorer som påverkar en slänts stabilitet.....	5
1.1.1 Naturliga slänter i Sverige med risk för skred.....	6
1.2 Inre faktorer som påverkar en slänts stabilitet	6
1.2.1 Jordhållfasthet	7
1.2.1.1 Jordarternas uppbyggnad	7
1.2.1.2 Hållfasthet i friktionsjord.....	7
1.2.1.3 Hållfasthet i kohesionsjord	8
1.2.1.4 Dränerad och odränerad skjuvhållfasthet.....	8
1.2.2. Porvatten	9
1.2.3 Spänningar i jord	9
1.2.4 Deformationsegenskaper	10
1.3 Säkerhetsfaktorn F.....	11
2 Programvaran GeoSlope SLOPE/W.....	12
2.1 Limit equilibrium	12
2.1.1 General Limit Equilibrium (GLE)	14
2.2 Säkerhetsfaktor i GeoSlope SLOPE/W	15
3 Programvaran LimitState:GEO 3.1	17
3.1 Discontinuity layout optimization	17
3.2 Säkerhetsfaktorn i LimitState.	18
3.2.1 Factor Load(s) analys	19
3.2.2 Factor Strength(s) analys	19
3.2.3 Tillräcklighetsfaktorns känslighet och noggrannhet	19
3.3 Materialmodeller i DLO	20
4 Generell beskrivning av typfall	20
4.1 Lerslänt.....	22
4.1.1 Dränerad analys av lerslänt.....	22
4.1.2 Odränerad analys av lerslänt.....	23
4.1.3 Odränerad analys av lerslänt med yttre last	24
4.1.4 Odränerad analys av lerslänt med yttre last och grundvatten	25

4.2 Slänt med lera och sand	26
4.2.1 Dränerad analys av ler- och sandslänt.....	26
4.2.2 Odränerad analys av ler- och sandslänt.....	27
4.2.3 Odränerad analys av ler- och sandslänt med yttre last	28
4.2.4 Odränerad analys av ler-och sandslänt med yttre last och grundvatten	29
4.3 Slänt med flera lager sand och lera.	30
4.3.1 Slänt med flera lager lera och två lager sand	30
4.3.2 Slänt med flera lager lera och ett lager sand	31
5. Diskussion.....	32
6. Slutsats	34
Källor	35

Inledning

Stabilitetsanalys av slänter spelar en betydelsefull roll vid konstruktionen av transportmöjligheter (såsom motorvägar, järnvägar, flygplatser, kanaler), utveckling av naturresurser (såsom dagbrott, avfallshantering och jorddammar) liksom många andra mänskliga aktiviteter. Släntstabilitet studeras ur två olika synvinklar, nämligen den geologiska och ingenjörsmässiga synvinkeln. Geologer anser rörelsefenomen som en naturlig process och studerar dess ursprung, kurser och resulterande ytegenskaper. Ingenjörer undersöker säkerheten av slänter som bygger på jordmekanik och utvecklar metoder för tillförlitlig bedömning av stabiliteten i slänter, såväl som de kontrollerande och korrigerande åtgärderna som behövs (Huang, 2014).

Slänters stabilitet har sedan 50-talet beräknats fram för hand med hjälp av olika metoder så som Janbus-, Bishop-, Morgenstern-Price, Spencers metod etc. Idag används istället datorer för att på ett mer effektivt sätt få fram släntstabiliteten. Det ledande programmet på dagens marknad är GeoSlope SLOPE/W. Med hjälp av *Limit Equilibrium*-analys beräknar programmet fram släntstabiliteten hos jord- och stenslänter. Ett annat relativt nytt program på marknaden är LimitState:Geo. Det är det första program som använder sig utav *Discontinuity Layout Optimization*-analys för beräkning av släntstabilitet.

I denna rapport jämförs de två programmen GeoSlope och LimitState med varandra för att se vilka likheter och olikheter som finns mellan dem.

Rapportens första kapitel handlar om yttre och inre faktorer som påverkar släntstabilitet. I det andra och tredje kapitlet beskrivs hur analysmetoderna *Limit Equilibrium* och *Discontinuity Layout Optimization* fungerar samt hur GeoSlope och LimitState går tillväga vid beräkning av säkerheten hos en slänt. För att kunna se skillnader mellan de två olika programmen kommer tre typfall studeras i respektive program. Dessa tas upp i rapportens fjärde kapitel ”*Generell beskrivning av typfall*” och därefter följer en diskussion samt slutsats kring ämnet.

Syfte

Syftet med rapporten är att undersöka hur programmen SLOPE/W och LimitState:Geo skiljer sig från varandra samt vilka fördelar och nackdelar programmen har. Rapportern ska ge en klarhet i hur dessa skillnader syns i, samt hur *Limit Equilibrium* och *Discontinuity Layout Optimization* påverkar, det beräknade resultatet av en slänts stabilitet.

Uppgift

Eftersom GeoSlope är ett väletablerat program på marknaden som använder sig utav *Limit Equilibrium*-analys och Limitstate är ett förhållandevis nytt program samt det enda program på marknaden som bygger på *Discontinuity Layout Optimization* så är det av intresse att jämföra GeoSlope SLOPE/W med LimitState. Genom att låta samma typfall köras i respektive program kan en jämförelse mellan programmets uppbyggnad göras. Uppgiften med rapporten är därför att med hjälp av tre typfall jämföra programmen och se om det uppstår någon skillnad i de resultat som respektive programmen får fram. Vilka typfall som kommer att analyseras hänvisas i metod samt under avsnitt 4 *Generell beskrivning av typfall*. I fall att det uppstår skillnader sker en diskussion kring varför dessa uppstått, vad det kan bero på och hur man kan tolka resultaten. För att kunna föra denna diskussion är en deluppgift att ta reda på programmets uppbyggnad och funktioner, vilka metoder de baseras på samt deras för- och nackdelar.

Avgränsningar

GeoSlope bygger på *Limit Equilibrium* som består utav flera olika metoder för beräkning av släntstabilitet. Vissa av dessa metoder tar enbart hänsyn till kraftjämvikt eller momentjämvikt medan andra tar hänsyn till både. Detta innebär att en säkerhetsfaktor kan fås fram för respektive *Limit Equilibrium*-metod och att det uppstår en viss skillnad mellan dem. En avgränsning i GeoSlope görs därför till *Limit Equilibrium*-metoden ”*General Limit Equilibrium*” och dess säkerhetsfaktor. Den kritiska glidytan i GeoSlope kan fås fram med hjälp av flera olika funktioner. I rapporten används enbart funktionen *Auto-Locate* då det tillåter programmet att självt väljer vart den kritiska glidytns läge kan tänkas befinnas.

LimitState bestämmer säkerhetsfaktorn med hjälp av kritiska diskontinuitetslinjer som förbinder noder till varandra och på så sätt skapar en kritisk glidyta. Ju tätare dessa noder sitter, alltså ju högre noddensiteten är, desto mer precis blir den beräknade säkerhetsfaktorn. Antalet noder varierar i programmet mellan 250 till 2000 noder men kan efter önskemål även sättas utanför dessa gränser. I LimitState kommer noddensiteten avgränsas till 500 noder, det vill säga nodinställningen *medium*, då valet av mindre antal noder kan ge för grova resultat. En ökning från 500 noder till 1000 noder ger ytterst små skillnader i säkerhetsfaktorn, för denna rapport obetydliga, och resulterar i att programvaran tar flera minuter på sig för att få fram resultat.

För en fullständig användning av programvaran LimitState:Geo version 3.1 krävs en licens vilken vi saknar och programmet används därmed i det akademiska läget.

De jordmaterial som användas i typfallen begränsas till kohesions- och friktionsmaterial. Av kohesionsmaterial tas endast lera med i typfallen och av friktionsmaterial sand. Alla material som används följer Mohr-Coulombs brottvillkor.

Då den yttre lasten kan variera mellan korttids- och permanent last avgränsas den yttre lasten i rapportens typfall till att alltid vara permanenta. Vissa typfall analyseras med grundvattenytta och då avgränsas porvattentryck till hydrostatiskt.

De beräknade säkerhetsfaktorerna från programmen jämförs sinsemellan. En differens görs mellan GeoSlopes säkerhetsfaktor, F , och LimitStates tillräcklighetsfaktor FS , vid *Factor strength*-analys, och FL , vid *Factor Load*-analys. Vid en factor load analys kan hänsyn tas till den yttre lasten, självlasterna samt bådadera. När hänsyn tas till enbart den yttre lasten är definitionen för tillräcklighetsfaktorn inte densamma som för GeoSlopes säkerhetsfaktor. Av denna anledning blir det orimligt att jämföra dessa och detta görs därför inte i rapporten.

Metod

För att kunna förstå vad programmen baseras på är det viktigt att ha en grundförståelse för jordmekanik och släntstabilitet. Utöver denna grundförståelse behövs en mer ingående insikt av *Limit Equilibrium*- och *Discontinuity Layout Optimization*-metoden som programmen GeoSlope och LimitState använder sig utav. Rapportens första tre kapitel går därför igenom dessa delar och ger en förståelse för metodernas teoretiska skillnader.

För att i praktiken kunna jämföra programmens skillnader måste samma typfall köras i respektive program. I rapporten tas tre typfall upp varav det första enbart består av lera, det andra av både lera och sand och det tredje med flera lager av olika leror och sand. Respektive material följer Mohr-Coulombs brottvillkor. Med hjälp av resultat kring dessa typfall i utförs en analys kring säkerhetsfaktorerna och de kritiska glidytorerna som fåtts fram i respektive program.

I SLOPE/W utförs släntberäkningen med *Auto-Locate*-metoden och säkerhetsfaktorn beräknas enligt *General Limit Equilibrium*.

Både en *Factor Strength*- och *Factor Load*-analys utförs i LimitState då de definieras på olika sätt och därmed även genererar olika säkerhetsfaktorer. I de fall då en yttre lastpåverkan finns på slänten utförs tre Factor Load-analyser, där hänsyn tas till den yttre lasten, självlasten och bådadera.

1 Släntstabilitet

Problem i samband med brott av naturliga och mänskligt skapade slänter utgör ofta stora utmaningar för geotekniker. En ohämmad lutande markyta kan på grund av gravitationskraften vara benägen till glidning. Om jordens resulterande skjuvspänningar längs den potentiella kritiska glidyten överstiger skjuvhållfastheten i marken kan ett brott uppstå (Huang, 2014). Det finns två sorters brott, glidytebrott och zonbrott. Den förstnämnda innebär att jorden är i ett elastiskt tillstånd och går i brott längs en smal linje där glidning sker. Zonbrott innebär att många brottytor uppstår och att hela jordvolymen befinner sig i ett brottillstånd. Glidning sker här längs med alla brottytor. När de två brotten sker samtidigt kallas det ett kombinerat brott och problemet benämns släntstabilitet (Sällfors, 2013).

1.1 Yttre faktorer som påverkar en slänts stabilitet

Stabilitetsförhållandena i en slänt styrs av släntens höjd, lutning och jordlagrens hållfastegenskaper och tyngd. Även grundvattennivå och portryck samt yttre faktorer påverkar. Erosion, jordbävningar och vattennivån i ett eventuellt vattendrag nedanför slänten bidrar också till skred och brott. (Rapport 3:95, Skredkommissionen, 1995)

Erosion

Vatten och vind eroderar kontinuerligt både naturliga och konstgjorda slänter. Erosion ändrar en slänts geometri och resulterar slutligen i ett ras eller brott. Även floder med deras vattenströmning ökar erosionen vid flodbäddsslänten. (Rapport 3:95, Skredkommissionen, 1995)

Nederbörd

Långa regnperioder mjukar upp och eroderar jorden samt ökar dess vattenhalt. Vatten som tränger in i existerande sprickor kan försvaga underliggande jordlager vilket i sin tur kan leda till brott. (Sällfors, 2013)

Grundvatten

Höjning av grundvattennivå leder till att vattentryck i jordens porer höjs, det uppstår så kallat höjt portryck. På grund av det förhöjda porvattentrycket får en slänt försämrad stabilitet (www.swedgeo.se).

Jordbävningar

Jordbävningar medför dynamiska rörelser av marken och skjuvkrafter som reducerar de befintliga skjuvkrafterna som finns i jorden. Likvifikation av jorden kan uppstå som konsekvens av en ökning i portrycket i odränerad, grovkornig jord (såsom sand). På grund av vibrationer förlorar jorden då tillfälligt sin hållfasthet vilket medför att jorden går från en fast till flytande form (Budhu, 2000). Detta kan medföra förödande konsekvenser där hus och konstruktioner sjunker ner i marken.

Geologiska egenskaper

Många brott uppstår på grund av oidentifierade geologiska egenskaper. Ett tunt lager silt under ett tjockt lager lera kan vara svårt att upptäcka och kan leda till skred. Lutande jordmassor är benägna att glida längs ett svagt lager, så kallat translation (Sällfors, 2013)

Yttre laster

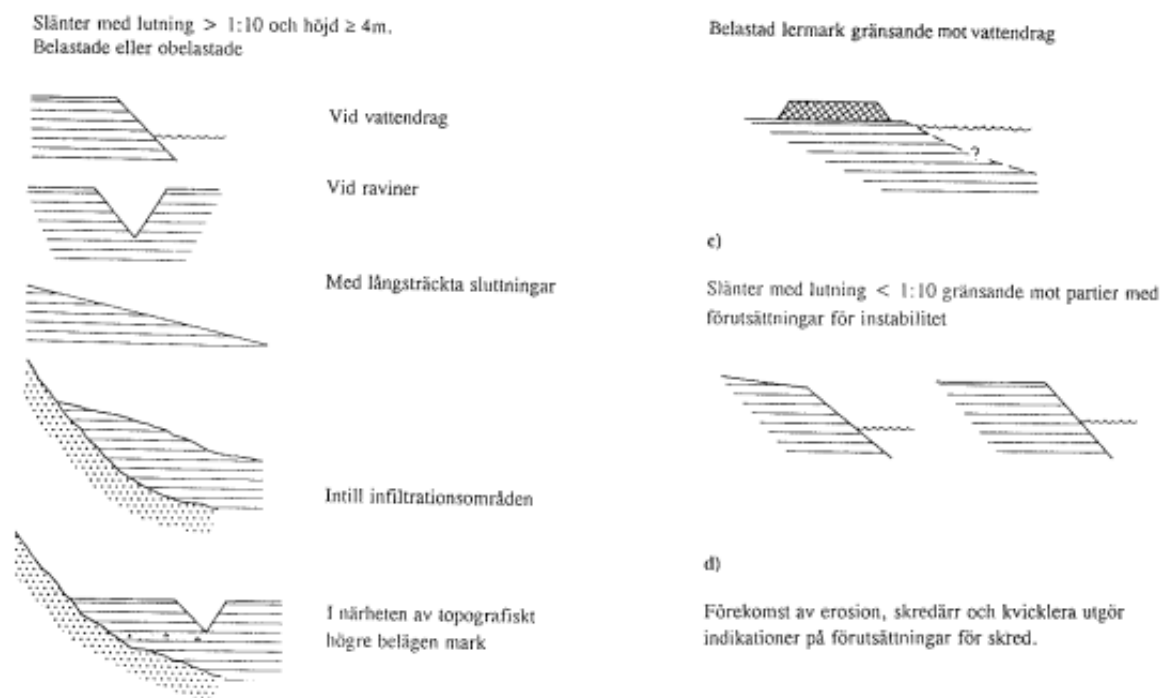
Laster som placerats på toppen av en slänt förstärker den pådrivande kraften och kan, om lasten blir för stor, leda till brott. Om en yttre last däremot placeras vid foten av slänten så ökar släntstabiliteten.

Snabb sänkning av vattennivån

Vattennivån i ett vattendrag vid en slänt fungerar som en stabiliserande motvikt mot slänten. Om en yttre vattennivå minskar avsevärt på en kort tid leder det till att det laterala trycket från vattnet som verkar på slänten försvinner. Om porvattentrycket har inte tillräckligt lång tid för utjämning kan slänten gå i brott i ett odränerat tillstånd (Budhu, 2000)

1.1.1 Naturliga slänter i Sverige med risk för skred

De orörda slänterna i Sverige med förutsättningar för skred består vanligtvis av lerområden med lutningar $>1:10$ där för höga portryck och skjuvspänningar i leran ibland kan uppstå. Även relativt branta slänter i silt och sandområden utgör förutsättningar för skred i Sverige. Figur 1 visar flera av dessa släntförhållanden som kan leda till brott. När skred i slänter med en lutning $<1:10$ är det nästan alltid så att skredet sker vid samband med en byggnadsverksamhet eller att ett ingrepp gjorts i slänten, så som skred vid vägbankar eller pålning. (Rapport 3:95, Skredkommissionen, 1995)



Figur 1. Markförhållanden med förutsättningar för skred. (Skredkommissionen,)

1.2 Inre faktorer som påverkar en slänts stabilitet

I geotekniken urskiljs deformationsegenskaper och hållfasthetsegenskaper som är relaterade till varandra. Valet av skjuvhållfasthet är kanske det viktigaste, men också det svåraste momentet i en stabilitetsanalys. Resultaten kan påverkas från såväl fält som laboratorieförsök men även av materialens deformationsegenskaper. Många material uppvisar dessutom anisotropi, och det är då inte självklart vilket eller vilka värden på hållfastheten som bör användas. Porvattentryck kan i sin tur påverka släntstabilitetsanalysen då det är känt att porvattentrycket varierar med årstiderna och stor omsorg måste ägnas åt just valet av dimensionerande portryck (Sällfors, 1985).

1.2.1 Jordhållfasthet

Jords hållfasthet är beroende av bl.a. kornstorlek och kornfördelning, sedimentationsmiljö, och belastningstid. Även andra faktorer som spänningstillståndet vid brott samt dräneringsförhållanden påverkar jords hållfasthet (Hansbo, 1975).

1.2.1.1 Jordarternas uppbyggnad

Jord är ett trefasmaterial uppbyggt av fast fas, flytande fas och gasfas. Fast fas består huvudsakligen av mineral- och lerpartiklar som tillsammans bildar ett kornskelett och bär de laster som påförs på jorden. Hålrutorna mellan kornen och kornskelett dvs. porerna, är fyllda med porvatten, porgas eller bådadera. Vilka egenskaper en jord har och hur de påverkar dess hållfasthet beror på förhållandet mellan korn, porvatten och gas.

Kornstorleksklassificering är en nödvändig åtgärd för bedömning av en jordart och är av stor betydelse då den påverkar hållfasthet, deformationsegenskaper, kapillaritet, permeabilitet osv. Beroende på kornstorleken kan en jordart delas upp i bland annat friktionsjord och kohesionsjord. (Larsson, 2008).

1.2.1.2 Hållfasthet i friktionsjord

I friktionsjord såsom grus- och sandjordar byggs hållfastheten i huvudsak upp av friktionskrafter mellan jordkornen. Kontaktytor i grovkorniga jordarter är mycket små och flyttning i kontaktytorna kan inträffa redan vid mycket små effektivspänningar vilket i sin tur leder till att förstöring av kontaktytorna sker till dess att jämviktstillstånd uppstår.

Skjuvhållfastheten τ_f är proportionell mot friktionskrafterna mellan de enskilda kornen och mot kontaktrycket (effektivtrycket) mellan kornen. Den beräknas med följande ekvation:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi' \quad \text{ekv 1.0}$$

där

τ_f = skjuvhållfastheten

c = kohesion; för friktionsjord c = 0

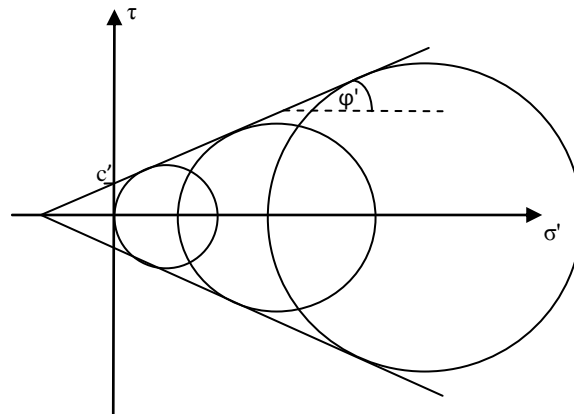
σ' = effektivtrycket vinkelrätt mot brottytan

ϕ' = inre friktionsvinkel, se tabell 1.0 (Hansbo, 1975)

Tabell 1. Inre friktionsvinkeln hos olika jordarter.

Lagrings- täthet	Jordart						
	Silt	Sand	Grus	Sand- morän	Grus- morän	Maka- dam	Spräng- sten
Löst Lagrad	26°	28°	30°	42°	38°	30°	40°
Fast Lagrad	33°	35°	37°	45°	45°	38°	45°

Figur 2 visar Mohr-Coulombs brottvillkor, som säger att brott inträffar när den största av de Mohrska spänningscirkelarna tangerar den s.k. brottgränslinjen, lutande vinkeln ϕ' mot σ' -axeln, annars om Mohrs spänningscirkel för största och minsta huvudspänning inte når upp till gränslinjen råder stabil jämvikt (Hansbo, 1975).



Figur 2. Mohr-Coulombs brottvillkor.

1.2.1.3 Hållfasthet i kohesionsjord

I kohesionsjord såsom lerjord byggs hållfastheten upp inte bara av friktionskrafter utan även av kohesionskrafter mellan lerpartiklarna. Leror har aggregatstruktur och på grund av det ringa avståndet mellan partiklarna har vattnet i aggregaten mycket hög viskositet vilket bidrar till dess stelhet. Vid kraftiga deformationsökningar kommer länkar mellan lermineralen, som är lerskelettets svagaste delar, att starkt deformeras, medan aggregaten blir opåverkade (Hansbo, 1975).

Hållfastheten hos en lera sänks vid kraftig omrörning som medför att bindningskrafterna mellan lerpartiklarna minskar till minimum. Vid upphörning av omrörningen sker ofta, dock endast till viss grad, en snabb hållfasthetsåtervinning (tixotropi). Förhållandet mellan hållfastheten i ostört tillstånd och den i omrört tillstånd kallas sensitivitet (Hansbo, 1975). Sensitiviteten har stor betydelse för bedömning av bl.a. skredrisker (Larsson, 2008)

Skjuvhållfastheten för kohesionsjord beräknas enligt ekv 1.0.

1.2.1.4 Dränerad och odränerad skjuvhållfasthet

En slänts stabilitet analyseras oftast i två fall, ett odränerat och ett dränerat fall. Om skjuvdeformationen till brott sker långsamt så att portrycksförändringar hinner utjämnas uppstår ett dränerat brott. Den dränerade skjuvhållfastheten är dimensionerande i friktionsjord och för långtidsstabiliteten hos slänter i kohesionsjord. Parametrar som påverkar den dränerade skjuvhållfastheten är effektivspänning σ' samt jordens inre friktionsvinkel ϕ' och kohesion c' , se ekv. 1.0 (Rapport Varia 560:1, 2005).

När den dränerade skjuvhållfastheten skall användas i stabilitetsanalysen ska även portrycket bestämmas. Eftersom portrycket varierar med årstiderna skall hänsyn tas till det högsta portryck som kan förväntas inträffa under den aktuella släntens dimensioneringstid (Sällfors, 1985).

När skjuvdeformationen till brott sker så hastigt att vatten inte hinner avgå uppstår ett odränerat brott. Den odränerade skjuvhållfastheten är dimensionerande för korttidsstabiliteten hos slänter i kohesionsjord och uttrycks som en konstant oberoende av rådande effektivspänningar (Rapport Varia 560:1, 2005).

1.2.2. Porvatten

Porvattnets sammansättning beror på under vilka geologiska förutsättningar jorden har bildats, kemiska processer som följt till dessa förutsättningar samt vattenströmningar i jorden (Larsson, 2008). Porvatten utövar ett tryck på kornen som påverkar jordens egenskaper. En ökning av porvattentrycket i jordlagret kan resultera i en förändring av spänningarna i jorden som leder till instabilitet av en slänt (Rapport Varia 560:1, 2005).

Porvattentrycket kan antingen vara hydrostatiskt eller hydrodynamiskt. Att portrycket är hydrostatiskt innebär det att det inte sker någon grundvattenströmning i horisontalled alltså att om ett silrör sätts ned i jorden stiger vattnet i röret till samma nivå som grundvattenytan (Hansbo, 1975). Hydrostatiskt porvattentrycket u , kan beräknas med ekv. 1.1

$$u = g \cdot \rho_w \cdot z \text{ alternativt } u = \Upsilon_w \cdot z \quad \text{ekv. 1.1}$$

där

g = tyngdacceleration

ρ_w = vattnets densitet

z = lagers tjocklek

Υ_w = skrymdensitet för vatten (Sällfors, 2013)

Hydrodynamiskt portryck q , karakteriseras med att det pågår strömning. Strömningsriktningen bestäms av om portryckets ökning med djupet är mindre, så kallad nedåtriktad strömning, eller större, så kallad uppåtriktad strömning (Hansbo, 1975). Hydrodynamiskt tillstånd kan uppstå på grund av pumpning, dränering eller infiltration och beräknas med ekv. 1.2.

$$q = k \cdot A \cdot i \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{ekv.1.2}$$

där

k = jordens permeabilitet (m/s)

A = tvärsnittsarean (m^2)

$i = \Delta h / \Delta l$, hydraulisk gradient

Formeln förenklas till:

$$v = k \cdot i \quad [\text{m/s}] \quad \text{ekv.1.3}$$

där

v = strömningshastighet (m/s) (Sällfors, 2013)

1.2.3 Spänningar i jord

Spänningarna ökar kraftigt med djupet och blir beroende av bl.a. överliggande jordlagers skrymdensitet och grundvattennivån. Huvudspänningar i jorden där markyta är horisontell är både vertikala och horisontella enligt figur 3. Vertikala spänningar, σ_1 , är oftast de största spänningarna och som är allra viktigast medan de horisontella spänningar, σ_2 och σ_3 , är lika stora.

Vertikala spänningar betecknas också σ_0 och anger den totala spänningen som ett jordelement utsätts för. Den totala huvudspänningen beräknas enligt:

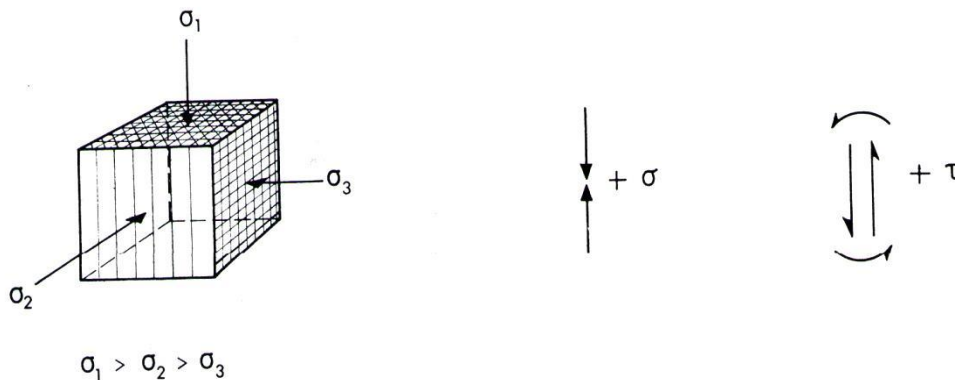
$$\sigma_0 = \sum_{i=1}^N g \cdot \rho_i \cdot z_i \text{ alternativt } \sigma_0 = \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot z_i \quad \text{ekv.1.4}$$

där

g = tyngdacceleration

ρ_i = respektive lagars skrymdensitet

z_i = respektive lagars tjocklek (Larsson, 2008)



Figur 3. Horisontella och vertikala spänningsfördelningar över en jordvolym (Hansbo, 1975).

Den totala huvudspänningen σ_0 kan också uttryckas som summan av (vertikala) effektivspänningen σ'_0 och portrycket u , se ekv.1.5. Effektivspänningen definieras som den del av totalspänningen som bärs av kornskelettet och portrycket definieras som den del av totalspänningen som överförs via porvattnet.

$$\sigma_0 = \sigma'_0 + u \quad \text{ekv.1.5}$$

För bestämning av den vertikala effektivspänningen, σ'_0 , används den horisontella effektivspänningen σ'_{h0} och den bestäms med hjälp av vilojordtryckskoefficienten K_0 , se ekv.1.6.

$$K_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_0} \quad \text{ekv.1.6}$$

Följande värden på vilojordtryckskoefficienten K_0 , antas vara:

- $K_0 = 0,5$ för sand
- $K_0 = 0,6 - 0,8$ för normalkonsoliderad lera
- $K_0 > 1$ för överkonsoliderad lera (Sällfors, 2013)

1.2.4 Deformationsegenskaper

Jordens deformationsegenskaper beror på dess avsättnings- och spänningshistoria samt dess vattenmättnadsgrad, kornstorlek, kornfördelning, kornform, ingående mineral, porvattensammansättning och halt av organiskt material.

Deformationer delas in i två grupper, en som beror av volymändring och en som beror av formändring. Ren volymändring uppstår endast vid jämn tryckökning i alla riktningar medan ren formändring uppstår när jorden är kritiskt belastad, varmed jorden skjuvas utan att ändra volym (Larsson, 2008).

Deformationerna kan vara såväl elastiska som plastiska, som i sin tur kan vara momentana eller tidsbundna. Av den orsaken att de flesta belastningar är statiska för jord, dvs. de påförs en gång och förändras inte nämnvärt, utgör elastiska och plastiska deformationer inte något större problem inom geotekniken (Sällfors, 2013).

1.3 Säkerhetsfaktorn F

För att beskriva stabilitetsförhållanden i slänter används ofta säkerhetsfaktorn, F. Det finns flera olika sätt att formulera säkerhetsfaktorn men den vanligaste formuleringen definieras i förhållande till kraft- eller momentjämvikt där säkerhetsfaktorn antas vara konstant längs glidyten (Budhu, 2000).

Beräkning av säkerhetsfaktorn med hänsyn till kraftjämvikt (se ekv.1.7) tillämpas på plana eller icke-cirkulära glidytor.

$$F_f = \frac{F_r}{F_d} \quad \text{ekv.1.7}$$

där

F_r = summan av motstående krafter

F_d = summan av pådrivande krafter

Det innebär att om pådrivande krafter är större än motstående krafter kommer säkerhetsfaktorn att gå mot noll vilket i sin tur resulterar i ostabilitet hos en slänt.

För rotationsglidytor fås säkerhetsfaktorn generellt fram med hänsyn till momentjämvikt (se ekv.1.8).

$$F_m = \frac{M_r}{M_d} \quad \text{ekv.1.8}$$

där

M_r = summan av motstående moment

M_d = summan av pådrivande moment

Det innebär att om pådrivande moment är större än motstående moment kommer säkerhetsfaktor att gå mot noll vilket leder till brott.

Då säkerhetsfaktorn $F \leq 1$ betraktas slänten som instabil och ett skred eller ras förväntas inträffa. När säkerhetsfaktorn $F > 1$ betraktas slänten som stabil och ju högre faktorn blir desto större är släntstabiliteten.

En godtagbar säkerhetsfaktor bör baseras på en bedömning av den återkommande perioden av kraftiga regn, konsekvensen av släntras, kunskapen om det långsiktiga beteendet av geologiska material och noggrannheten av designmodellen (Cheng, Lau 2007).

2 Programvaran GeoSlope SLOPE/W

GeoSlope är en av de första programvarorna som använts inom geoteknik för beräkning av släntstabilitet. Programvaran har funnits på marknaden sedan 1977 och fram till 1980-talet kunde den användas på stordatorer för kommersiella ändamål. Efter att PC:n (personal computer) introducerades under 1980-talet har koden för GeoSlope omskrivits och anpassat till personatorer. Denna programvara använder *Limit Equilibrium*-metoder och möjliggör mer komplexa analyser såsom komplex stratigrafi, oregelbundet porvattentryck, variation av linjära och icke linjära skjuvhållfasthetsmodeller, koncentrerade laster och strukturell förstärkning. Tack vare GeoSlope kan en bättre förståelse för *Limit Equilibrium*-metoder fås eftersom programmet bland annat visar alla krafter som verkar på en lamell och fördelningen av olika parametrar längs glidyten (SLOPE/W LTD, 2004).

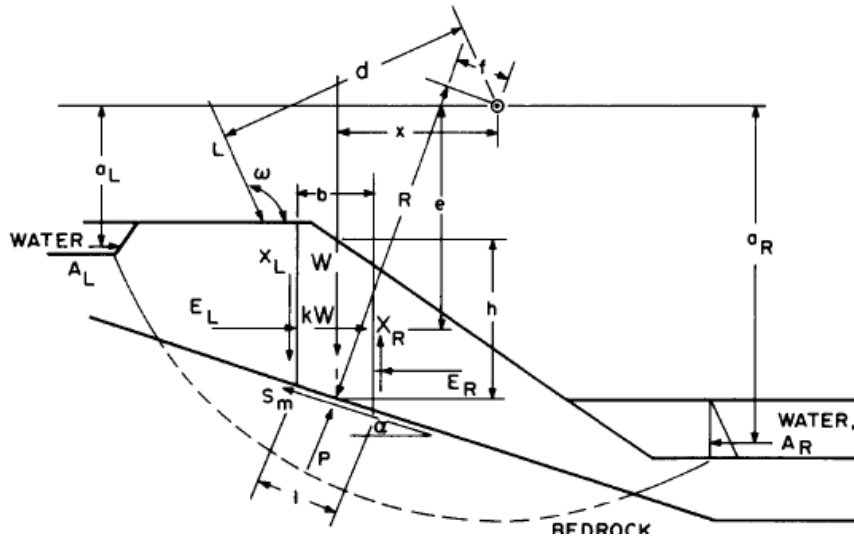
2.1 Limit equilibrium

Metoder för beräkning av släntstabilitet som en glidande massa uppdelat i vertikala lameller började tillämpas i början av 1900-talet. Knut E. Petterson introducerade redan 1916 släntstabilitetsanalys av Stigberg Quay i Göteborg, där han, via observationer, uppskattade att glidyten hade en cirkulär utformning och att beräkningar kunde ske med hjälp av vertikalt uppdelade lameller, se figur 4. En serie av släntras i Sverige motiverade svenskar till att göra ett av de tidigaste försöken att beräkna slänTERS stabilitet genom att använda lamellmetoden och *Limit Equilibrium*. Detta ledde till ett fastställande av "den svenska metoden" utvecklad av W. Fellenius (1927) som tar hänsyn till momentjämvikt. Ett antal efterföljande förbättringar av metoden gjordes av bland annat A.W. Bishop (1955) som utvecklade *Bishop's method* där säkerhetsfaktorn fås fram med hänsyn till momentjämvikt och horisontella krafter som verkar på en lamell. N. Janbu (1973) utvecklade *Janbu's method* som beräknar säkerhetsfaktorn med hjälp av kraftjämvikt. Senare har N.R. Morgenstern och V.E. Price (1965) utvecklat *Morgenstern-Price method* som tar hänsyn till både momentjämvikt och kraftjämvikt. *Spencer's method* utvecklad av E. Spencer (1967) förutsätter en konstant relation mellan storleken på skjuv- och normalkrafter och *Sarma method* är utvecklad för beräkning av säkerhetsfaktor för slänTER som utsätts för seismisk aktivitet (Cheng, Lau 2014). Alla dessa metoder kallas gemensamt för *Limit Equilibrium*-metoder.

Likheter och skillnader mellan dessa metoder har varit oklara, mestadels på grund av bristen på enhetlighet i dess ekvationer, tvetydighet beträffande krafter som verkar på varje lamell samt okända begränsningar i icke cirkulära glidytor. Generellt är skillnaderna i säkerhetsfaktorn mellan metoderna inte betydande förutom för Fellenius metoden vars säkerhetsfaktor kan avvika mer än 60 procent från de andra metoderna. (Fredlund, Krahn, Pufahl, 1981)

Gemensamt för alla dessa *Limit Equilibrium*-metoder är följande:

- Glidyten är uppdelad i ett ändligt antal vertikala lameller.
- Glidyten går till brott som en sammanhängande kropp
- Antaganden görs för vilka krafter som verkar på varje vertikal lamell.
- Säkerhetsfaktorn beräknas ur kraft- och/eller momentjämviktsekvationer (Zhu, Lau, Juang, 2003).



Figur 4. Illustrationen visar alla krafter som måste vara definierade för en allmän analys av slänstabilitet samt de krafter som verkar på en enskild lamell. (Fredlund, Krahn, 1977)

Variabler som tas hänsyn till är:

- W - totala vikten av lamellen med bredden b och höjden h
- P - totala normala kraften på basen av en lamell över längden l
- S_m - Tvärkraften mobiliserad på basen av lamell.
- R - radie eller momentarmen i samband med den mobiliserade skjuvkraften S_m
- f - vinkelrät förskjutning av normalkraften från rotationscentrum
- x - horisontella avståndet från lamell till rotationscentrum
- α - vinkeln mellan tangenten till centrum av basen av varje lamellel och horisontell
- E - horisontella lamellkrafter
- L - index med hänsyn till vänster sida
- R - index med hänsyn till höger sida
- X - vertikala lamellkrafter (interslice)
- k - seismisk koefficient för en dynamisk horisontell kraft
- e - vertikala avståndet från tyngdpunkten av varje lamell till rotationscentrum

Följande variabler definierar last:

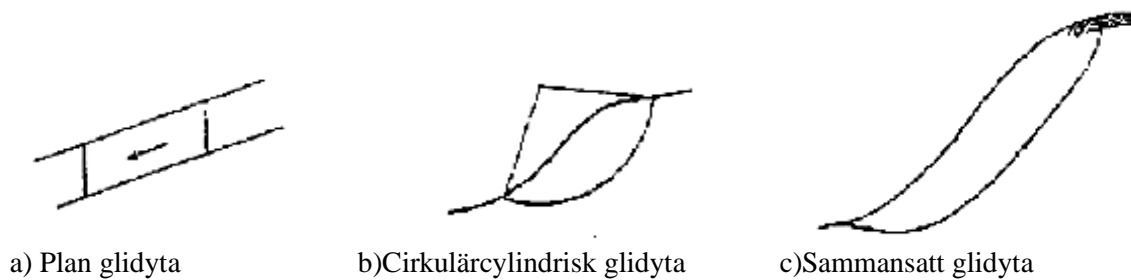
- L - linjelast
- ω - vinkel av lasten från horisontell
- d - vinkelrätt avstånd från linjelast till rotationscentrum

Effekten av partiell nedsänkning av slänten eller spänningssprickor i vatten definieras:

- A - resultanten av vattenkrafter
- a - vinkelrätt avstånd från resultatet av vattenkrafter till rotationscentrum (Fredlund, Krahn, 1977).

För att veta vilken beräkningsmetod som ska användas är det viktigt att först klarlägga vilken sorts glidyta slänten kan tänkas ha, se figur 5. Glidytor i slänter med en stor utsträckning i lutningsriktningen kan ofta förenklas till en glidning utefter ett plan, det vill säga slänten har en plan glidyta. De glidytor som främst uppstår i kohesionsjord, exempelvis lera, har ofta en form som kan approximeras till ett cirkelsegment, de har alltså en cirkulär cylindrisk glidyta. En sammansatt glidyta är

en cirkulärcylindrisk glidyta med ett mittparti som liknar den plana glidytan. (Sällfors, 2013)



Figur 5. Illustration över de olika typer av glidytor en slänt kan ha. (Skredkommissionen)

Whitman och Bailey (1967) har sammanfattat och grupperat *Limit Equilibrium*-metoder med hänsyn till vilken form en glidyta har. För cirkulära glidytor används Fellenius (1936), Taylor (1949) samt Bishops (1955) metoder medan för icke-cirkulära glidytor beräknas säkerhetsfaktorn med Janbu (1973), Morgenstern-Price (1965) och Spencer (1967) metoder. (Cheng, Lau, 2008)

2.1.1 General Limit Equilibrium (GLE)

General Limit Equilibrium (GLE) är utvecklad av Fredlund och är en allmän formulering av *Limit Equilibrium*-metoderna vilket omfattar alla dessa metoders viktiga delar såsom momentjämvikt och kraftjämvikt.

Lamellens skjuvkrafter beräknas enligt ekv.2.0:

$$X = E \lambda f(x) \quad \text{ekv.2.0}$$

där

$f(x)$ = en funktion

λ = procentdelen av funktionen som används

E = lamellens normalkraft

X = lamellens skjuvkraft

GLE baseras på två ekvationer som används vid beräkning av säkerhetsfaktor. En ekvation (ekv.2.1) som tar hänsyn till kraftjämvikt:

$$F_f = \frac{\sum(c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad \text{ekv.2.1}$$

En ekvation (ekv.2.2) som tar hänsyn till momentjämvikt:

$$F_m = \frac{\sum(c' \beta R + (N - u \beta) R \tan \phi')}{\sum W x - \sum N f \pm \sum D d} \quad \text{ekv.2.2}$$

där:

c' = kohesion

ϕ' = friktionsvinkel

u = porvattentryck

N = normalkraft som verkar på basen av en skiva

W = skivans tyngd

D = koncentrerad punktlast

$\beta, R, x, f, d, \omega$ = geometriska parametrar

α = lutning av lamellbas (SLOPE/W LTD, 2004).

2.2 Säkerhetsfaktor i GeoSlope SLOPE/W

Att bestämma läget på den mest kritiska glidytan med den lägsta säkerhetsfaktorn är av stor betydelse då släntstabilitetsanalyser utförs. Att hitta denna glidyta innebär att ett stort antal glidytor prövas tills den glidytan med lägsta säkerhetsfaktor fås. I GeoSlope finns flera olika sätt att räkna ut säkerhetsfaktorn på. Dessa funktioner är ”*Grid and radius*”, ”*Fully speicified surfaces*”, ”*Block specified surfaces*”, ”*Entry och exit points*”, ”*Optimization*”, och ”*Auto-Locate*” (SLOPE/W LTD, 2004).

Grid and radius

Med funktionen *Grid and Radius* kan cirkulära glidytor bestämmas med hjälp av ett rutnät (*grid*) som innehåller alla cirkelns rotationscentrum. Cirkelradier specificeras med hjälp av funktion *radius* där antingen radien bestäms med hjälp av en punkt, en linje eller flera linjer som bildar en fyrsidig form (SLOPE/W LTD, 2004).

Fully specified slip surface

I denna funktion anges glidytan med en serie av datapunkter. Genom att välja *axis point* anges en axelpunkt kring vilken moment tas. Placering av denna punkt påverkar inte resultaten vid beräkning av säkerhetsfaktor med de metoderna som tar hänsyn till både kraft- och momentjämvikt. Däremot skall hänsyn tas vid placering av axelpunkten när de förenklade metoderna används. Denna funktion är användbart när stora delar av glidykans position är känd från fältmätningar (SLOPE/W LTD, 2004).

Block specified slip surface

funktionen är lämplig att använda vid beräkning av släntstabilitet på en vall med platta sidolutningar som ligger på ett relativt tjockt skikt av mjuk grund. Sådana analyser utförs genom att två rutnät av punkter bestäms på vänster och höger sida av slänten. Rutnätet kan också brytas ner till en linje eller en punkt. Med denna funktion följer en nackdel som uppstår när hörnen längs glidytan är för skarpa (SLOPE/W LTD, 2004).

Entry and exit points

En av svårigheter med *Grid and radius*-funktionen är att det är svårt att visualisera utsträckningen och/eller räckvidden av glidytor. Dessa begränsningar övervinns genom att välja *Entry and exit*-funktionen som är en variation av *Grid and radius*. *Entry och exit points* skall definieras där en glidyta förväntas ta plats, annars kan det leda till orimliga kritiska glidytor och en risk finns att missa den verkliga kritiska glidytan. Funktionen används där glidytor beror på ett svagt materiallager eller ogenomträngligt material som till exempel berggrund (SLOPE/W LTD, 2004).

Optimization

Denna funktion kan tillämpas för att optimera resultatet efter att den kritiska glidytan hittats. Genom att glidytan delas i linjesegment kan den lägsta säkerhetsfaktorn sökas. Av intresse är observationen att det finns en annan glidyta som leder till en lägre säkerhetsfaktor än den som erhålls för en antagen cirkulär glidyta (SLOPE/W LTD, 2004).

Auto-Locate

Auto-Locate-funktionen är i huvudsak en kombination av *Entry and Exit* och *Optimization*, där GeoSlope automatiskt lokaliserar möjliga *Entry and Exit*-punkter för att hitta en preliminär approximativ lösning. När denna metod används genereras 2000 glidytor för att hitta den minsta möjliga glidyta innan *Optimization* tillämpas. Funktionen är ny och har ännu inte använts i stor utsträckning (SLOPE/W LTD, 2004).

Freatisk korrektion

En till parameter som kan påverka säkerhetsfaktor i GeoSlope är piezometrisk linje som definierar porvattentryck av en slänt vid hydrostatiskt tillstånd. Programmet räknar även mer komplexa fall av porvattentryck. Om det finns en starkt lutande vattenyta räknas porvattentrycket med freatisk korrektion.

Freatisk korrektion H_c räknas enligt formel:

$$H_c = H_w \cdot \cos^2(A)$$

där

H_w - är det vertikala avståndet från mittpunkten av skivans bas

A - är lutning av den piezometriska linjen

Denna korrigering påverkar säkerhetsfaktorn i slutberäkning. När den piezometriska linjen är horisontell då gäller att $H_c = H_w$, vilket innebär att när den piezometriska linjen närmar sig en vertikal linje går korrektionsfaktorn mot noll. Om freatisk korrektion används blir säkerhetsfaktorn antingen den samma eller högre (SLOPE/W LTD, 2004)

3 Programvaran LimitState:GEO 3.1

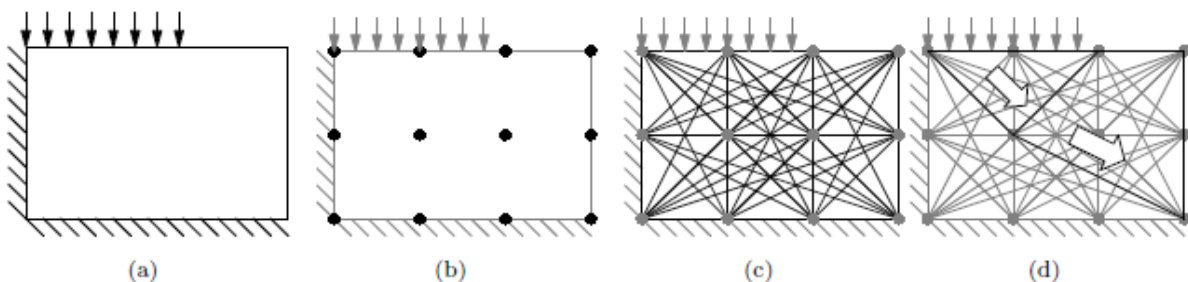
Programmet LimitState:GEO 3.1 bygger på den numeriska analysproceduren *Discontinuity Layout Optimization* (DLO) för att hitta lösningar. DLO utvecklades vid universitetet i Sheffield, England, och beskrevs först i en artikel publicerad i förfarandet av Royal Society (Smith & Gilbert 2007a). I huvudsak kan DLO användas till att identifiera kritiska translationella glidblock som går till brott. Till skillnad från traditionella metoder som vanligtvis enbart arbetar med ett par glidblock så har DLO inga sådana begränsningar. Det kan identifiera kritiska translationella brottmekanismer för varje typ av geotekniskt stabilitetsproblem. DLO är en *Limit Analysis*-metod som med hjälp av noder och glidlinjer identifierar de kritiska glidyterna mellan block i en jordmassa (Smith & Gilbert, 2007).

3.1 Discontinuity layout optimization

Discontinuity Layout Optimization (DLO) är en *upper bound limit analysis*-metod som användas för att bestämma den mängd last som kan bäras av en massa eller struktur innan kollaps inträffar. DLO identifierar med hjälp av matematisk optimering den kritiska utformningen av diskontinuitetslinjer som uppstår vid kollaps. DLO kan formuleras i termer av jämviktsrelationer ("statisk" formulering) eller i form av förskjutningar ("kinematisk" formulering) (Hawksbee, 2012).

I Limitstate:Geo formuleras DLO i form av förskjutningar längs diskontinuiteterna. Varje potentiell diskontinuitetslinjer tilldelas en variabel som definierar den relativa glidförskjutningen längs just den diskontinuitetslinjen. Kompatibiliteten kontrolleras vid varje nod genom att en linjär ekvation ställs upp med dessa variabler. En funktion definieras i termer av den totala energi som försvinner då glidning sker längs diskontinuiteterna. Ett linjärt optimeringsproblem är därmed definierat vars lösning identifierar den glidyta som uppstår vid den lägsta energiförlusten (Smith & Gilbert, 2007). Med matematisk optimering försöker DLO alltså hitta den minsta energi som behövs längs diskontinuiteterna för att förskjutningar ska uppstå. Noggrannheten av den erhållna lösningen beror på nodtätheten. Genom att använda ett större antal nodpunkter kommer deras exakta individuella position ha en relativt liten inverkan på den genererade lösningen (Limitstate LTD, 2015).

Figur 6 illustrerar DLO-metodens tillvägagångssätt vid ett belastningsproblem. I figuren illustreras ett problem där en yttre last verkar på en jordmassa. Diskretisering av jordmassan sker först med hjälp av noder som fördelas över dess yta. Potentiella diskontinuitetslinjer (glidlinjer) vid vilka förskjutningar kan ske skapas genom att alla noder förbinds till varandra och linjär optimering används för att till slut identifiera de diskontinuiteter som ingår i den kritiska brottmekanismen. I geotekniska stabilitetsproblem utgör dessa kritiska diskontinuitetslinjer den glidyta som bildas vid brott (Smith & Gilbert, 2007).



Figur 6. De olika stadierna i DLO-metoden: a) det ursprungliga problemet; b) diskretisering av jordmassan sker med hjälp av noder; c) potentiella diskontinuiteter förbinds till varandra; d) de mest kritiska diskontinuitetslinjerna identifieras med hjälp av optimering vilket ger utformningen av glidyten. (Gilbert, 2010)

Ju fler noder som finns inom ett område desto fler blir de potentiella diskontinuitetslinjerna. Att låta noderna ligga närmare varandra bidrar alltså till en mer exakt glidyta. Tittar man på det i numeriska termer och låter antalet noder tecknas som n så finns det approximativt $n(n-1)/2$ möjliga glidytor vilket innebär att 500 noder ger upphov till ca 125,000 möjliga glidytor (Hawksbee, 2012).

Några fördelar med DLO är att brottillståndet kan analyseras direkt utan behov av iterering och att egenheter kan identifieras utan svårigheter. Exempelvis syns potentiella „sprickzoner – engelska fan zone” centrerade i en nod genom att flera diskontinuitetslinjer förbinds till denna punkt (Smith & Gilbert, 2007).

En mer detaljerad beskrivning av DLO finns att läsa hos Smith & Gilbert, 2007.

3.2 Säkerhetsfaktorn i LimitState.

Många olika definitioner av säkerhetsfaktor används inom geotekniken. Två vanliga faktorer man brukar ta hänsyn till är

- säkerhetsfaktor av last
- säkerhetsfaktor på jordhållfastheten

Beräkningsprocessen som används för att bestämma var och en av dessa faktorer för ett givet problem kommer generellt resultera i olika brottmekanismer och olika numeriska faktorer. Varje säkerhetsfaktor måste därför tolkas enligt dess definition (Limitstate LTD, 2015).

Stabila slänter kan ligga långt ifrån sitt ultimata gränstillstånd (*ultimate limit state*). För att därför kunna genomföra en ultimat gränstillståndsanalys är det nödvändigt att på något sätt driva systemet till kollaps. Detta görs generellt explicit i numeriska analyser. Det finns tre sätt att driva ett system till dess ultimata gränstillstånd med hänsyn till ovanstående definitioner av säkerhetsfaktor. Detta kan göras på tre sätt; genom att öka en existerande last i systemet, reducera jordhållfastheten eller införa en ytterligare last i systemet. LimitState löser problem genom att driva system till det ultimata gränstillståndet med hjälp av de två förstnämnda sätten. Detta görs med en så kallad *adequacy factor* (tillräcklighetsfaktor) (Limitstate LTD, 2015).

Adequacy factor definieras som den faktor med vilken specifika laster måste öka med, eller jordhållfasthet minska med, för att ett system i fråga ska gå i brott. Två typer av tillräcklighetsfaktor finns således i programmet:

- Tillräcklighetsfaktor med hänsyn till laster
- Tillräcklighetsfaktor med hänsyn till jordhållfasthet

Precis som för säkerhetsfaktorn i GeoSlope gäller att en tillräcklighetsfaktor ≥ 1 medför att systemet är säkert mot brott och en tillräcklighetsfaktor ≤ 1 medför att systemet är osäkert mot brott (Limitstate LTD, 2015).

I programmet kan alltså två sorters analysmetoder väljas för att analysera slänters stabilitet. De två analysmetoderna kallas *Factor Load(s)*-analys respektive *Factor Strength(s)*-analys.

3.2.1 Factor Load(s) analys

En *Factor Load(s)*-analys innebär att tillräcklighetsfaktorn tar hänsyn till laster. Denna analys svarar på frågor som ”hur mycket större måste en last vara för att brott ska inträffa?” och ”med vilken faktor, A, måste lasten ökas med för att brott ska ske?”. Faktorn A, som en last måste multipliceras med för att brott ska ske, är i detta fall samma som tillräcklighetsfaktorn (Limitstate LTD, 2015).

Tillräcklighetsfaktorn för laster (*adequacy factor on load*) kan tillämpas på en eller flera av följande parametrar som resulterar i en kraft i ett system:

1. En pålagd last
2. Ett materials självvikt
3. En seismisk acceleration

I de flesta fall tillämpas tillräcklighetsfaktorn på en last. I de släntstabilitetsproblem då en slänt inte har någon yttre lastpåverkan kan tillräcklighetsfaktorn appliceras på ett materials självvikt. I dessa fall rekommenderas det att tillräcklighetsfaktorn appliceras på alla material i systemet och inte enbart på ett isolerat jordblock (Limitstate LTD, 2015).

3.2.2 Factor Strength(s) analys

En *Factor Strength(s)*-analys genererar en tillräcklighetsfaktor med hänsyn till jordhållfastheten. Denna analysmetod svarar på frågor som ”Hur mycket svagare måste jorden vara för att brott ska ske?” eller ”Med vilken faktor F måste jordhållfastheten reduceras med för att brott ska ske?”. Faktor F representerar alltså tillräcklighetsfaktorn för jordhållfasthet (*adequacy factor on strength*) vid en *Factor Strength(s)*-analys (Limitstate LTD, 2015).

3.2.3 Tillräcklighetsfaktorns känslighet och noggrannhet

Om ett system har flera delar som medför kollaps och säkerhetsfaktorn enbart appliceras till en av dessa delar kommer tillräcklighetsfaktorn verka ha en missvisande hög känslighet för parameterförändringar. Vissa omständigheter kan leda till att ingen lösning hittas i LimitState. Följande svar genereras i sådana fall:

Unstable

Delar av problemet är ostabilt och den beräknade *adequacy factor on load* kan reduceras till 0. Exempel på sådana situationer är:

1. Slänter av kohesionslösa jordar vars lutning är större än jordens inre friktionsvinkeln.
2. Ingen jordhållfasthet finns
3. Om inga, eller för få, gränser finns som håller jorden på plats.

Locked

I detta fall kommer inget värde av *adequacy factor on load* leda till brott. Exempel på sådana situationer är:

1. Slänter av friktions- eller kohesiva friktionsjordar vars lutning är mindre än jordens inre friktionsvinkel.
2. Då tillräcklighetsfaktorn tar hänsyn till både pådrivande och mothållande krafter. I vissa fall kan brott inte ske om krafterna ökas samtidigt.
3. Då gränser sätts så att ingen deformation av jordmassan kan ske.

Unknown

Emellanåt händer det att LimitState inte lyckas hitta någon giltig lösning på grund av hur programmet är uppbyggt vilket leder till att en *unknown* lösning genereras. I dessa fall behöver det geotekniska problemet modifieras ytters lite innan man försöker lösa det igen (Limitstate LTD, 2015).

Då DLO är en metod som genererar den mest kritiska glidblocksmekanismen genom att ansluta noder till varandra med hjälp av glidlinjer så beror tillräcklighetsfaktorns noggrannhet på fördelningen av dessa noder. I många fall fås en tillräcklighetsfaktor med tillräckligt stor noggrannhet då nodfördelningen sätts till *Coarse* (250 noder) eller *Medium* (500 noder). *Fine* (1000 noder) och *Very Fine* (2000 noder) finns också tillgängliga och noggrannheten kan även anpassas efter egna önskemål (Smith & Gilbert, 2007).

3.3 Materialmodeller i DLO

Då LimitState:GEO baseras på *ultimate limit state*-analysis så krävs enbart parametrarna som definierar brottytan för materialmodellerna. I programmet är följande modeller tillgängliga:

- Mohr – Coulomb
- Tension and/or compression cut off
- Rigid
- Engineered Element

Materialmodellerna kan även kombineras för att generera mer komplexa brottytor. (Limitstate LTD, 2015) I rapporten tas enbart Mohr-Coulomb materialen upp. Brottytan definieras enligt figur 2, avsnitt 1.2.1.2.

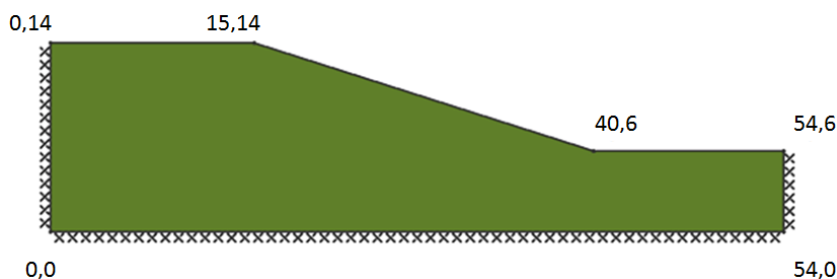
(Mer information om de övriga materialmodellerna hänvisas till Geo-Manual.pdf.)

4 Generell beskrivning av typfall

Sammanlagt är det tre typfall som analyseras i programmen. De två första har en släntgeometri som strämmer överens med figur 8 och därmed har en släntlutning på 17.74° . Dessa typfall analyseras enligt följande tillstånd:

- dränerat tillstånd
- odränerat tillstånd
- odränerat tillstånd med yttre last
- odränerat tillstånd med yttre last samt grundvattenyta

Det tredje typfallet består av flera lager lera och sand. Denna slänt har en geometri som liknar den i figur 8, men dess släntlutningen är 26° vilket bidrar till att släntens övre plåtå blir längre och släntkrönen får koordinaten (24,14).



Figur 8. Släntgeometri, med lutningen 17.74° , för typfall 1 och 2.

Generella inställningar i programmen

I GeoSlope används *Limit Equilibrium*-metoden ”*General Limit Equilibrium*” och för beräkning av säkerhetsfaktor används funktionen *autolocate*. Freatisk korrektion tillämpas på de typfall där grundvattenytan lutar.

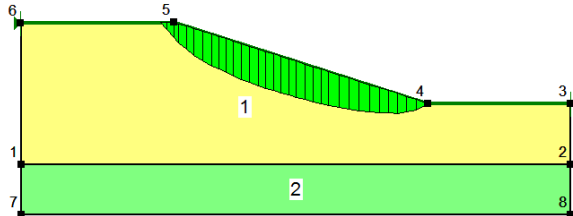
LimitStates noddensitet sätts till *medium* (500 noder) och både *factor strength*- och *factor load*-analyser utförs.

För att läsa mer om avgränsningarna i respektive program se avsnitt *Avgränsningar*.

4.1 Lerslänt

Det första typfallet består av enbart lera. Typfallet genomgår både en dränerad- och odränerad analys. Släntgeometrin stämmer överens med den i figur 8. Mer specifik information presenteras under respektive analysfall.

4.1.1 Dränerad analys av lerslänt



Figur 9. Dränerad lerslänt i GeoSlope.



Figur 10. Dränerad lerslänt i LimitState.

Slänten består av ett dränerat lerlager som vilar på en berggrund. Leran har en egenvikt $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, en kohesion $c' = 5$ och en inre friktionsvinkel $\phi' = 25^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8 och därmed en lutning på 17.74° .

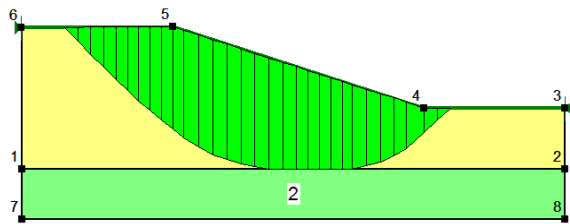
Säkerhetsfaktorn räknades fram till $SF = 2.078$ i GeoSlope.

LimitState gav en tillräcklighetsfaktor på $FS = 2.13$ vid en *factor strength*-analys. Då en *factor load*-analys utfördes blev resultatet *locked*, se avsnitt 3.2.3 *Tillräcklighetsfaktorns känslighet och noggrannhet*.

Glidytan som genererades i programmen hade ett liknande utseende, se figur 9 och 10, och skillnaden mellan faktorerna blev:

$$FS - SF = 0.052$$

4.1.2 Odränerad analys av lerslän



Figur 11. Odränerad lerslän i GeoSlope.



Figur 12. Odränerad lerslän i LimitState.

Slänten består av ett odränerat lerlager som vilar på en berggrund. Leran har en egenvikt $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, en kohesion $c_u = 50$ och en inre friktionsvinkel $\varphi = 0^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8.

Säkerhetsfaktorn räknades fram till $F = 2.537$ i GeoSlope.

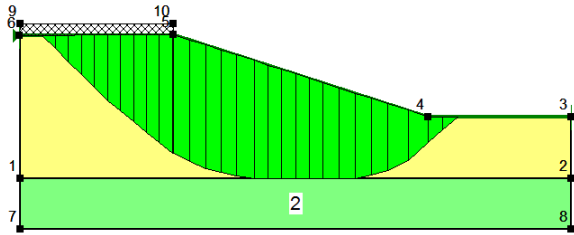
LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS = FL = 2.719$ vid en *factor strength*- och *factor load*-analys.

Glidyten som genererades i programmen hade ett liknande utseende, se figur 11 och 12, och skillnaden mellan faktorerna blev:

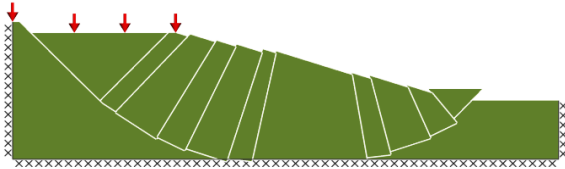
$$FS - F = 0.182$$

$$FL - F = 0.182$$

4.1.3 Odränerad analys av lerslännt med yttre last



Figur 13. Odränerad lerslännt med yttre last i GeoSlope.



Figur 14. Odränerad lerslännt med yttre last i LimitState.

Slänten består av ett odränerat lerlager som vilar på en berggrund och där en yttre last på 10 kN verkar på den övre delen av slänten. Leran har en egenvikt $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, en kohesion $c_u = 50$ och en inre friktionsvinkel $\phi = 0^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8.

Säkerhetsfaktorn räknades fram till $F = 2.342$ i GeoSlope.

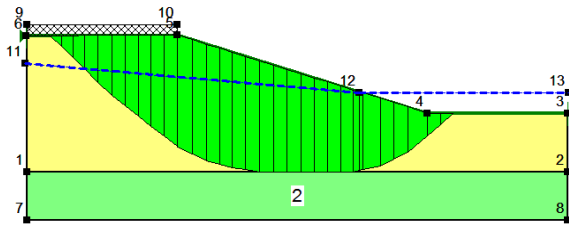
LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS = 2.515$ vid en *factor strength*-analys och en tillräcklighetsfaktor $FL = 2.515$ vid en *factor load*-analys då hänsyn togs till självlasten.

Glidytan som genererades i programmen hade ett liknande utseende, se figur 13 och 14, och skillnaden mellan faktorerna blev:

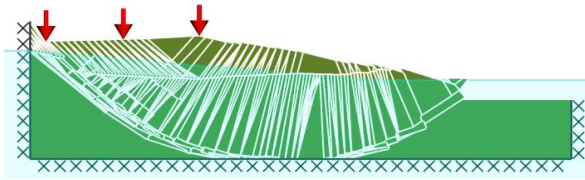
$$FS - F = 0.173$$

$$FL - F = 0.173$$

4.1.4 Odränerad analys av lerslännt med yttre last och grundvatten



Figur 15. Odränerad lerslännt med yttre last och grundvatten i GeoSlope.



Figur 16. Odränerad lerslännt med yttre last och grundvatten i LimitState.

Slänten består av ett odränerat lerlager som vilar på en berggrund och där en yttre last på 10 kN verkar på den övre delen av slänten. En grundvattennivå går genom hela slänten med en lutning på 5.1° och har därefter en kontant nivå på 8 m ovanför berggrund. Leran har en egenvikt $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, en kohesion $c_u = 50$ och en inre friktionsvinkel $\phi = 0^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8 och därmed en lutning på 17.74° .

Säkerhetsfaktorn räknades i GeoSlope fram till $F = 2.340$.

LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS = 2.742$ vid en *factor strength*-analys. Vid en *factor load*-analys blev tillräcklighetsfaktorn:

- Där hänsyn tagits till självlasten samt den yttre lasten $FL_1 = 2.742$
- Där hänsyn tagits till självlasten $FL_2 = 2.915$
- Där hänsyn tagits den yttre lasten $FL_3 = 17.18$

Glidytan som genererades i programmen hade ett liknande utseende, se figur 15 och 16, och skillnaden mellan faktorerna blev:

$$FS - F = 0.402$$

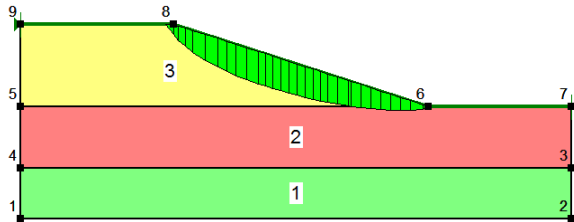
$$FL_1 - F = 0.402$$

$$FL_2 - F = 0.575$$

4.2 Slänt med lera och sand

Typfallet består av lera och sand. Det genomgår både en dränerad- och odränerad analys. Släntgeometrin stämmer överens med den i figur 8. Mer specifik information presenteras under respektive analysfall.

4.2.1 Dränerad analys av ler- och sandslänt



Figur 17. Dränerad ler- och sandslänt i GeoSlope.



Figur 18. Dränerad ler- och sandslänt i i LimitState.

Slänten består ett 6 m djupt sandlager som vilar på en berggrund. På detta sandlager ligger även ett 8 m dränerat lerlager. Sanden har en egenvikt $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=0$ och en inre friktionsvinkel $\phi=30^\circ$. Leran har en egenvikt $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och en inre friktionsvinkel $\phi=25^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8 och därmed en lutning på 17.74° .

Säkerhetsfaktorn räknades i GeoSlope fram till $F=2.041$.

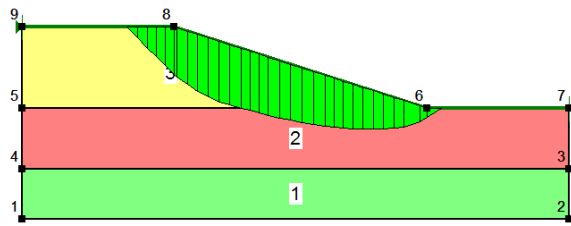
LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS=2.086$ vid en *factor strength*-analys. Vid en *factor load*-analys där hänsyn tagits till alla självlaster blev resultatet *locked*, se avsnitt 3.2.3

Tillräcklighetsfaktorers känslighet och noggrannhet.

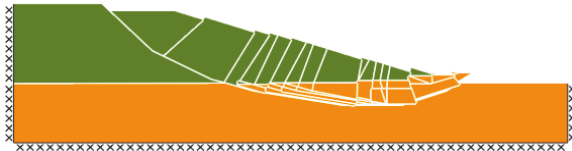
Glidyten som genererades i programmen har ett liknande utseende programmen, se figur 17 och 18. Skillnaden mellan faktorerna blev:

$FS-F=0.045$

4.2.2 Odränerad analys av ler- och sandslänt



Figur 19. Odränerad ler- och sandslänt i GeoSlope.



Figur 20. Odränerad ler- och sandslänt i LimitState.

Slänten består ett 6 m djupt sandlager som vilar på en berggrund. På detta sandlager ligger även ett 8 m odränerat lerlager. Sanden har en egenvikt $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=0$ och en inre friktionsvinkel $\phi=30^\circ$. Leran har en egenvikt $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c_u=50$ och en inre friktionsvinkel $\phi=0^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8 och därmed en lutning på 17.74° .

Säkerhetsfaktorn räknades i GeoSlope fram till $F=2.907$.

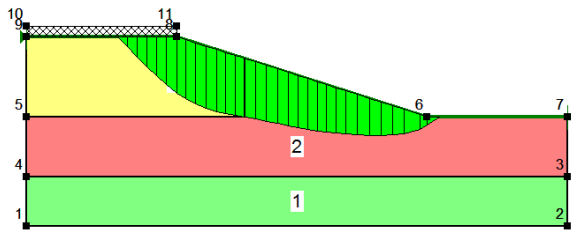
LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS=3.115$ då en *factor strength*-analys utfördes. Vid en *factor load*-analys där hänsyn tagits till alla självlaster blev tillräcklighetsfaktorn $FL=3.965$

Glidytan fick i de båda programmen en liknande form, se figur 19 och 20. Skillnaden mellan faktorerna blev:

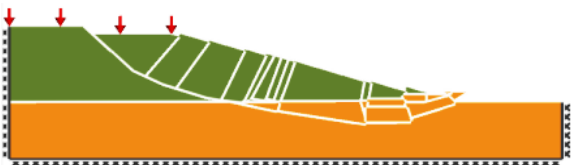
$FS-F=0.208$

$FL-F=1.058$

4.2.3 Odränerad analys av ler- och sandslänt med yttre last



Figur 21. Odränerad ler- och sandslänt med yttre last i GeoSlope.



Figur 22. Odränerad ler- och sandslänt med yttre last i LimitState.

Slänten består ett 6 m djupt sandlager som vilar på en berggrund. På detta sandlager ligger även ett 8 m odränerat lerlager samt en yttre last, 10 kN, som verkar på den övre delen av slänten. Sanden har en egenvikt $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=0$ och en inre friktionsvinkel $\phi=30^\circ$. Leran har en egenvikt $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c_u=50$ och en inre friktionsvinkel $\phi=0^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8 och därmed en lutning på 17.74° .

Säkerhetsfaktorn räknades i GeoSlope fram till $F=2.712$.

LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS=2.917$ då en *factor strength*-analys utfördes. Vid en *factor load*-analys blev tillräcklighetsfaktorn:

- Där hänsyn tagits till självlasten samt den yttre lasten $FL_1=3.572$
- Där hänsyn tagits till självlasten $FL_2=3.859$
- Där hänsyn tagits den yttre lasten $FL_3=18.49$

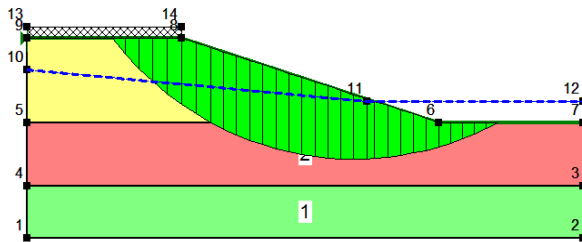
Glidytan fick i de båda programmen en liknande form, se figur 21 och 22, och skillnaden mellan resultaten från respektive program blev:

$$FS-F=0,205$$

$$FL_1-F=0,86$$

$$FL_2-F=1,147$$

4.2.4 Odränerad analys av ler- och sandslänt med yttre last och grundvatten



Figur 23. Odränerad ler-och sandslänt med yttre last och grundvatten i GeoSlope.



Figur 24. Odränerad ler-och sandslänt med yttre last och grundvatten i LimitState.

Slänten består ett 6 m djupt sandlager som vilar på en berggrund. På detta sandlager ligger även ett 8 m odränerat lerlager samt en yttre last, 10 kN, som verkar på den övre delen av slänten. En grundvattenyta går genom slänten där den Sanden har en egenvikt $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=0$ och en inre friktionsvinkel $\varphi=30^\circ$. Leran har en egenvikt $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c_u=50$ och en inre friktionsvinkel $\varphi=0^\circ$. Slänten har samma geometri som i figur 8 och därmed en lutning på 17.74° .

Säkerhetsfaktorn beräknades i GeoSlope fram till $F=1.997$.

LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS=2.534$ då en *factor strength*-analys utfördes. Vid en *factor load*-analys blev tillräcklighetsfaktorn:

- Där hänsyn tagits till självlasten samt den yttre lasten $FL_1=3,495$
- Där hänsyn tagits till självlasten $FL_2=3,803$
- Där hänsyn tagits den yttre lasten $FL_3=16.62$

Glidytan fick i de båda programmen en liknande form, se figur 23 och 24, och skillnaden mellan resultaten från respektive program blev:

$$FS-F=0,542$$

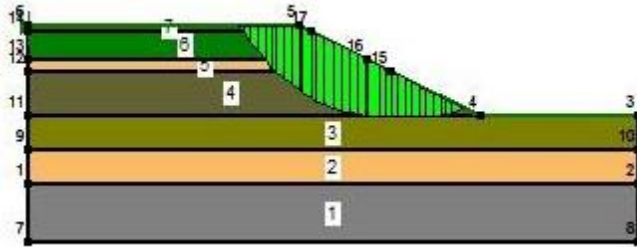
$$FL_1-F=1.503$$

$$FL_2-F=1.806$$

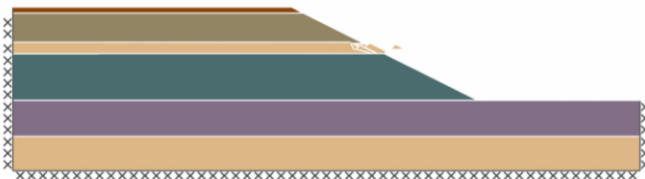
4.3 Slänt med flera lager sand och lera.

Typfallet består av flera lager lera och sand. Det genomgår enbart en odränerad analys.. Mer specifik information presenteras under respektive analysfall. Den genomgår enbart en *factor strength*-analys i LimitState.

4.3.1 Slänt med flera lager lera och två lager sand



Figur 25. Slänt med flera lager sand och lera i GeoSlope.



Figur 26. Slänt med flera lager sand och lera i LimitState.

Slänten består av sex jordlager och dess lutning är 26° . Från berggrunden uppåt är lagerföljden:

- Ett 3 m dränerat sandlager med tyngd $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och $\varphi=30^\circ$
- Ett 3 m odränerat lerlager med tyngd $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c=55$ och $\varphi=0^\circ$
- Ett 4 m odränerat lerlager med tyngd $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c=40$ och $\varphi=0^\circ$
- Ett 1 m dränerat sandlager med tyngd $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och $\varphi=30^\circ$
- Ett 2.5 m dränerat lerlager med tyngd $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och $\varphi=40^\circ$
- En 0.5 m torrskorpa med tyngd $\gamma=17 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och inre friktionsvinkel $\varphi=40^\circ$

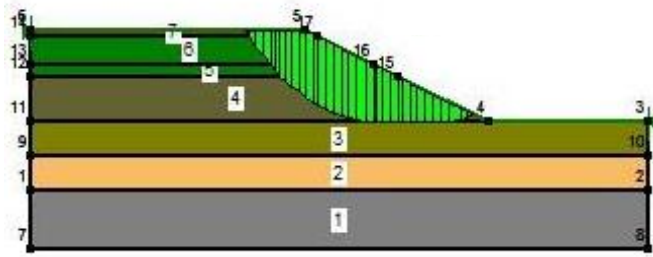
Säkerhetsfaktorn beräknades i GeoSlope fram till $F=2.156$. LimitState gav en tillräcklighetsfaktor $FS=1.971$ då en *factor strength*-analys utfördes.

De resulterande glidyterna från respektive program skiljer sig markant åt i detta typfall. GeoSlope identifierar en cirkulär cylindrisk yta som stäcker sig över de översta fyra jordlagren, se figur 25. LimitStates kritiska glidyta är i förhållande till GeoSlope väldigt liten och berör enbart det svagare sandskiktet som ligger mellan två lerlager, se figur 26.

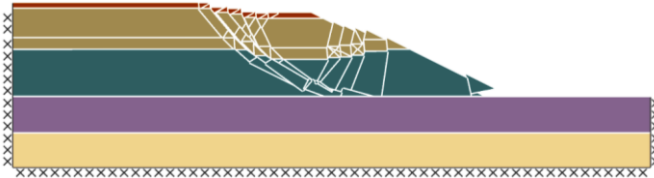
Skillnaden mellan resultaten från respektive program blev:
 $F-FS=0.185$

När slänten analyseras med en grundvattenyta med djupet 9 m blir säkerhetsfaktorn i GeoSlope $F=1.723$ och LimitStates tillräcklighetsfaktor blir $FS=1,972$ då en *factor strength*-analys utförs. Detta resulterar i en större glidyta för slänten i GeoSlope men glidytan i LimitState ändras inte.

4.3.2 Slänt med flera lager lera och ett lager sand



Figur 27. Slänt med flera lager lera och ett lager sand i GeoSlope.



Figur 28. Slänt med flera lager lera och ett lager sand i LimitState.

Släntens lutning är 26° och dess jordlagerföljden är följande från berggrund och uppåt:

- Ett 3 m dränerat sandlager med tyngd $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och $\phi=30^\circ$
- Ett 3 m odränerat lerlager med tyngd $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c=55$ och $\phi=0^\circ$
- Ett 4 m odränerat lerlager med tyngd $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c=40$ och $\phi=0^\circ$
- Ett 3.5 m dränerat lerlager med tyngd $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och $\phi=40^\circ$
- En 0.5 m torrskorpa med tyngd $\gamma=17 \text{ kN/m}^3$, kohesion $c'=5$ och inre friktionsvinkel $\phi=40^\circ$

GeoSlope beräknade säkerhetsfaktorn till $F=2.228$.

Limitstate:Geo gav en tillräcklighetsfaktor $FS=2.34$ när en *factor strength*-analys utfördes.

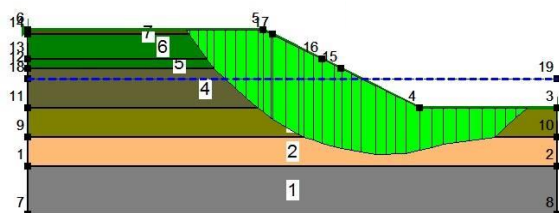
De kritiska glidytona från respektive program har ett liknande utseende där ingen utav dem skär ner i det nedre lerlagret. Skillnaden mellan säkerhetsfaktorerna från respektive program är:

$$FS-F=0,112$$

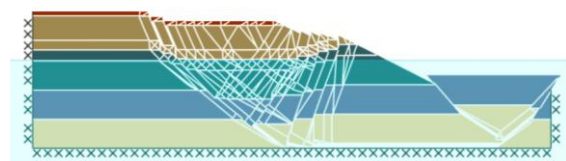
En grundvattenyta med höjden 9 m ovanför berggrund resulterade i en sänkning av säkerhetsfaktorn i programmen och säkerhetsfaktorerna blev $F=1.775$ respektive $FS=1,901$. Glidytona hade än en gång ett liknande utseende även om Limits glidyta gick hela vägen ner till berggrunden, se figur 29 och 30.

Skillnaden mellan säkerhetsfaktorn blev:

$$FS-F=0,126$$



Figur 29. Slänt med flera lager lera, ett lager sand samt grundvattenyta i GeoSlope



Figur 30. Slänt med flera lager lera, ett lager sand samt grundvattenyta i LimitState

5. Diskussion

Säkerhetsfaktorn

Differensen mellan GeoSlopes säkerhetsfaktor och LimitStates *Adequacy of strength* (tillräcklighetsfaktor då en *factor strength*-analys utförts) sträcker sig i våra fall mellan ett intervall på ca 0.05-0.5. GeoSlopes säkerhetsfaktor liknar mest Limits *Adequacy of strength* som båda baseras på materialens hållfasthetsegenskaper. LimitStates *Adequacy of strength* har dock alltid visat sig vara större än GeoSlopes säkerhetsfaktor i våra typfall. Detta antar vi bero på att LimitState baseras på *Discontinuity Layout Optimization* som är en *upper bound limit*-analysmetod vilket innebär att svaret DLO genererar är högre än vad det exakta svaret för problemet egentligen är. Även om en god approximation av den riktiga brottmekanismen återfinns så finns det inget sätt att urskilja med hur mycket den genererade lösningen överskrider den riktiga lösningen utan att göra en jämförelse med en oberoende *lower bound*-analys. Detta innebär att DLO ger ett ickekonservativt svar på de problem som lösts. Även om en finare nodfördelning i LimitState hade valts så skulle detta inte påverka resultatet nämnvärt. Vårt val av att använda metoden *Auto-Locate* i GeoSlope kan spela roll för differensen mellan säkerhetsfaktorerna. Metoden söker den lägsta kritiska glidyten mellan 2000 potentiella glidytor. Att funktionen är relativt ny kan föra med sig vissa brister vid bestämning av den kritiska glidyterna och den lägsta säkerhetsfaktorn. Om man hade tagit någon annan metod, exempelvis *Grid and radius* eller *Entry and Exit points*, vars antal potentiella glidytor kan gå upp till flera tusen, kanske differenserna i säkerhetsfaktorerna skulle bli mindre. Med dessa funktioner, och för de flesta *limit equilibrium*-metoderna, måste dock användaren själv ha en förutbestämd uppfattning om var den kritiska glidyten kommer befinna sig.

Att låta användaren bestämma stabiliteten hos en extremt komplex geoteknisk struktur och behöva göra antaganden kring brottmekanismen bidrar till att spekulationer och uppskattningar krävs. En fördel med att använda DLO är att det inte krävs några sådana antagande av glidyternas form eller plats innan analys utförs.

Differensen mellan GeoSlopes säkerhetsfaktor och LimitStates *adequacy on load* har i många utav typfallen varit stor. Beroende på vilka faktorer *Adequacy on load* tar hänsyn till så blir resultaten olika. Det är därför orimligt att jämföra GeoSlopes säkerhetsfaktor med LimitStates *adequacy on load*.

Glidytor

I majoriteten av våra släntfall har de kritiska glidyterna en cirkulär-cylindrisk form. Varken GeoSlope eller LimitState har något problem med att identifiera dem och får, sinsemellan, i stor utsträckning fram en likartad form på glidyterna.

Skillnaden mellan hur programmen presenterar de kritiska glidyterna är väsentlig. DLO låter LimitState, utöver den kritiska glidyten, urskilja glidlinjer mellan rigida block inuti den del av slänten som går till brott. LimitState visar alltså tydliga gränser mellan jordblock som går till ras och visar med hjälp av en animation hur dessa rör sig i förhållande till varandra vid brott. Detta, tillsammans med möjligheten att se slänten i 3D, ger en tydlig illustration av hur slänten beter sig och en bra uppfattning av hur det ser ut när den väl rasar. I GeoSlope illustreras den kritiska glidyten med lameller, där varje lamell bygger på antagande att den har samma säkerhetsfaktor medan de krafter som verkar på lamellen skiljer sig i storleksordning.

Fall 3- den lilla sandglidyten

I avsnitt 4.3.1 *Slänt med flera lager lera och två lager sand* fick vi ett intressant resultat där glidyterna skiljde sig väldigt mycket åt. LimitState uppfattade friktionsmaterialet som den mest kritiska delen av slänten och avgränsade glidyten till just det området. GeoSlope uppfattade typfallet mer omfattande

och genererade en mycket stor glidyta som inte avgränsade sig till enbart friktionsmaterialet. Denna stora skillnad mellan programmens resultat fick oss undra i fall om det beror på att de använder DLO och LE och att LimitState uppfattar den icke cirkulär cylindrisk glidyta. I alla analyser som utförts har Limit alltid fått en säkerhetsfaktor som varit större än det GeoSlope beräknat. För just detta fall är det tvärtom. Vi antog att LimitState identifierade denna lilla glidyta som den mest kritiska, men om programmet skulle identifiera en mer omfattande glidyta så skulle glidytan likna det GeoSlope fick fram och säkerhetsfaktorn för LimitState hade antagligen varit större än GeoSlopes $F=2.156$. Denna hypotes ledde till att vi bytte ut det kritiska sandlagret mot en lera (se avsnitt 4.3.2 *Slänt med flera lager lera och ett lager sand*). Resultatet blev nu att glidyterna i de båda programmen fick en liknande utformning samt en säkerhetsfaktor som skiljde sig med 0.112. Det stämde alltså överens med vår hypotes och precis som vi antog blev säkerhetsfaktorn större i LimitState.

För att veta vad detta beror på krävs flera analyser av olika slänter med liknande jordlagerföljd, det vill säga ett tunt friktionslager mellan kohesionsmaterial.

Yttre last och grundvattenytta

Den yttre lasten medför i samtliga typfall en minskning av säkerhetsfaktorn. Detta var förväntat då en yttre last bidrar till att de pådrivande krafter i slänten ökar, se ekv 1.7 i avsnitt 1.3 *Säkerhetsfaktorn F*. Om man har ett yttre vattenstånd kan detta bidra till en högre motstående kraft som medför att släntstabilitet ökar. Å andra sidan det vattnet som finns i slänten orsakar en förändring i spänningarna i jorden som leder till instabilitet av en slänt. I båda programmen har yttre last och grundvattenytta bidragit till en lägre säkerhetsfaktor i jämförelse med den säkerhetsfaktor som har fått då samma typfall inte har varit påverkad av yttre last och grundvattenytta. I de fall där slänt är utsatt för de två faktorer fick vi skillnad mellan GeoSlopes säkerhetsfaktor och LimitStates *adequacy of strength* på ca 0.4-0.5.

Vilka konsekvenser medför detta till verkliga situationer?

Man kan tro att LimitStates ickekonservativa resultat av säkerhetsfaktorn skulle kunna vara ett problem då man arbetar med ett verkligt fall. Har man en slänt vars säkerhetsfaktor ligger nära ett kan en ickekonservativ säkerhetsfaktor ge en skev uppfattning av släntens stabilitet. Det kan då te sig säkrare att arbeta med GeoSlope som visat sig vara mer konservativt. Man bör ha i åtanke att slänters stabilitet vid byggprojekt måste ha en säkerhetsfaktor över en viss gräns. För att öka släntstabiliteten utförs åtgärder så som jordspikning och förankring i fastare material till dess att man uppnått ett säkert värde på säkerhetsfaktorn. Detta värde ligger ofta långt ovanför ett och ju längre över ett faktorn kommer desto mindre spelar intervallskillnaden roll. Det är därmed ingen stor betydelse, utifrån ett säkerhetsperspektiv, om man väljer att arbeta med det mer konservativa GeoSlope eller LimitState vid geotekniska problem där säkerhetsfaktorn måste ligga långt ovanför ett.

Teoretiskt kan LimitStates ickekonservativa sätt vara till en ekonomisk fördel för företag. Låt säga att man vid ett byggprojekt behöver en säkerhetsfaktor större än 6 hos en slänt, då kommer LimitState ”snabbare” komma upp till det bestämda värdet eftersom det i många fall får ett mer ickekonservativt resultat än vad GeoSlope får. Mindre åtgärder för slänten behövs alltså göras enligt LimitState och det i sin tur medför teoretiskt mindre kostnader.

6. Slutsats

GeoSlopes säkerhetsfaktorerna och LimitStates *adequacy on strength* skiljer sig åt och har i våra typfall en differens på ca 0.05-0.6. LimitStates säkerhetsfaktor är i en majoritet av fallen större än GeoSlopes. Det beror på att *Discontinuity Layout Optimization* är en *upper bound*-analys vilket medför att resultatet har en tendens att bli ickekonservativt, något som kan tolkas som en nackdel med programmet.

Programmen identifierar liknande kritiska glidytor i många av typfallen. Det händer att de ibland tolkar typfallen på olika sätt och därmed genererar vitt skilda kritiska glidytor. För att ta reda på varför detta sker krävs ytterligare analyser programmen emellan. För att kunna använda många av GeoSlopes metoder och funktioner måste användaren ha en föräning om hur den kritiska glidyten kommer se ut och var den kommer befinna sig. Detta ställer krav på att användaren av programmet kan göra korrekta antaganden och uppskattningar, något som kan vara svårt vid komplexa geotekniska problem. Sådana antaganden behöver inte göras i LimitState som automatiskt identifierar en slänts kritiska glidyta.

Källor

Rapporter

IVAs Skredkommision. (1995) *Anvisningar för släntstabilitetutredningar*. Linköping (Rapport 3:95)

Cheng, Y.M., Lau C.K. (2008) *Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight*, United States: CRC Press

Cheng, Y.M., Lau C.K. (2014) *Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight, Second edition*. United States: CRC Press

Fredlund, D.G., Krahn, J. (1977), *Comparison of slope stability methods of analysis*. Canada: University of Saskatchewan

Fredlund, D.G., Krahn, J., Pufahl, D.E. (1981) *The relationship between limit equilibrium slope stability methods*. Canada : Dept. of Civil Engineering, University of Saskatchewan

Gilbert, M., Smith, C., Haslam, I. and Pritchard, T. (2010). *Application of discontinuity layout optimization to geotechnical limit analysis problems*. United Kingdom: University of Sheffield

GEO-SLOPES International LTD (2008), *Stability modelling with SLOPE/W 2007*. Canada (fourth edition)

Hultén, C., Olsson, M., Svahn, V., Rankka, K., Odén, K., Engdah, M. (2005) *Släntstabilitet i jord Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat: Deluppdrag 1*. Linköping: Statens Geotekniska Institut SGI

Hawksbee, S. (2012) *3D ultimate limit state analysis using discontinuity layout optimization*. United Kingdom: University of Sheffield

Larsson, R. (2008) *Jords egenskaper*. Linköping: SGI (5e utgåvan - reviderad)

LimitState Ltd (2015) *LimitState:GEO Manual Version 3.2.d*. United Kingdom: University of Sheffield.

Smith C, Gilbert M. (2007), *Application of discontinuity layout optimization to plane plasticity problems*. United Kingdom: Universities of Leeds, Sheffield and York

Zhu, D.Y., Lee, C.F., Jiang, H.D. (2003) *Generalised framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis*, Geotechnique, 2003, v. 53, n.4, p. 377-395

Böcker

Budhu, M. (2000) *Soil Mechanics and Foundations*. America: John Wiley and sons inc

Hansbo, S. (1975) *Jordmateriallära*. Stockholm : AWE/Gebers

Liu, C., Evett, J. (2007) *Soils and Foundations*; Fifth edition. Prentice Hall

Murthy, V. (2002) *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. USA: CRC Press

Sällfors, G (1985) *Slänters stabilitet*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola

Sällfors, G. (2013) *Geoteknik; jordmateriallära, jordmekanik; femte upplagan*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola

Huang, Y.H. (2014) *Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method: Fundamentals and Methods*. American Society of Civil Engineers (ASCE)

Länkar

Statens geotekniska institut (2015) *Varför inträffar skred* . <http://www.swedgeo.se> (2015)