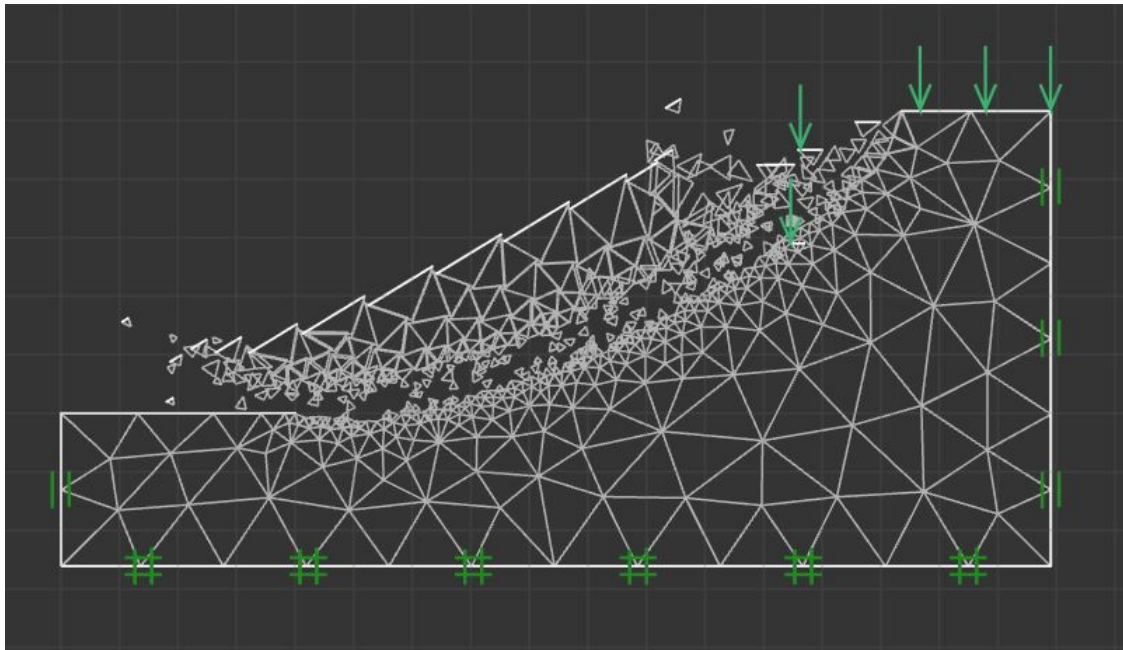




Lamell- och Finita elementmetodernas osäkerheter vid släntmodellering

Faran i Göta älvdalen

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik

André Bigott Pinto, Lucas Sornicle & Alexander Svensson

KANDIDATARBETE 2019:35

Lamell- och Finita elementmetodernas osäkerheter vid släntmodellering

ANDRÉ BIGOTT PINTO, LUCAS SORNICLE & ALEXANDER
SVENSSON



Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2019

Lamell- och Finita elementmetodernas
osäkerheter vid släntmodellering

ANDRÉ BIGOTT PINTO, LUCAS SORNICLE & ALEXANDER SVENSSON

Handledare: Hannes Hernvall, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Geologi och
geoteknik, Geoteknik

Examinator: Minna Karstunen, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Geologi och
geoteknik

Kandidatarbete 2019:35

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Chalmers Tekniska Högskola

412-96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag: Slänt som går till brott illustrerat i OptumG2.

Göteborg, Sverige 2019

Kandidatarbete 2019:35

ANDRÉ BIGOTT PINTO, LUCAS SORNICLE & ALEXANDER SVENSSON

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Geology and Geotechnics
Chalmers University of Technology

Abstract

Society has for a long time been adapting to the climate change caused by mankind. Extreme weather occurs more frequently and with it raises the risk of landslides. One of the areas that will be affected of this change is the valley along Göta river.

To prevent landslides on existing and future slopes, calculations can be made for the safety of a slope. The result of these calculations is called the safety factor and it describes the likelihood of collapse. The safety factor is nowadays mainly calculated by using two different methods. These are the Limit equilibrium method and the Finite element method.

The intention of the work was therefore to identify the strengths and weaknesses of the methods by studying existing geotechnical structures from the valley along Göta River. More specifically in the area's northern of Gothenburg and just south of Surte.

The result of the work showed several cases with similar results in relation to each other, where one program showed a higher safety factor against the other. However, in two of the investigated cases, great differences were illustrated in how the collapse of the slope would occur and how likely it was that it would occur. These two were therefore of particular interest and evaluated.

The report was based on a specific area where clay was the dominant soil. This meant a site-specific result and not a general result for other cases. In addition to site-specific results, a limited part of all available methods and software was used, which made it possible for more qualitative results to occur in other programs.

ANDRÉ BIGOTT, LUCAS SORNICLE & ALEXANDER SVENSSON

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Samhället har sedan länge varit i en anpassningsperiod på grund av klimatförändringen orsakad av människan. Extremväder inträffar mer frekvent och med det höjs risken för ras och skred. Göta älvdalen är ett av områden i Sverige som kommer drabbas från denna stora förändring.

För att förhindra ras och skred på befintliga och framtida slänter kan beräkningar genomföras för hur säker en slänt är. Resultatet från de beräkningarna benämns säkerhetsfaktor och den beskriver sannolikheten för kollaps. Säkerhetsfaktorn beräknas främst nu för tiden med hjälp av två olika metoder. Dessa är lamell- och Finita element metoden.

Arbetets avsikt blev därför att identifiera styrkor och svagheter hos metoderna genom att studera befintliga geotekniska strukturer från Göta älvdalen. Mer specifikt i området norr om Göteborg och söder om Surte.

Resultatet av arbetet uppvisade flera fall med en liknande relation, där den ena programmet uppvisade en högre säkerhetsfaktor gentemot det andra. Dock i två av de undersökta fallen illustrerades stora skillnader i hur det tänkta brottet skulle ske och hur troligt det var att det skulle inträffa. Dessa två blev därför av särskilt intresse och utvärderades.

Rapporten baserades på ett specifikt område där lera var den dominant jordarten. Detta innebar ett platsspecifikt resultat och inte ett allmänt resultat för andra fall. Utöver platsspecifika resultat så användes en begränsad del av alla tillgängliga metoder och programvaror vilket möjliggör att mer kvalitativa resultat hade kunnat producerats i andra program.

Förord

Föreliggande rapport har skrivits i ändamål till ett kandidatarbete på Chalmers Tekniska Högskola inom den samhällbyggnadstekniska avdelningen. Programmet samhällsbyggnadsteknik omfattar delvis studier om grundläggande geoteknik som återkommer i arbetet. En jämförelse av lamell-och finita elementmetoden inom släntanalys gjordes genom programmen OptumG2 och GeoStudio i syfte att hitta vilka styrkor och svagheter datorprogrammen har.

Initiativet till detta arbetet togs av Alexander Svensson, André Bigott Pinto och Lucas Sornicle.

Stort tack till Hannes Hernvall som har varit vår handledare, företaget OptumG2 och Göran Sällfors som har accepterat att dela med sig egna bilder från sin bok Geoteknik.

Contents

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	3
1.3	Metod	3
1.4	Avgränsningar	3
2	Släntstabilitet	4
2.1	Yttre påverkande faktorer	4
2.1.1	Erosion med avseende på släntstabilitet	4
2.1.2	Yttre lasters påverkan på släntstabilitet	5
2.1.3	Grundvatten med avseende på släntstabilitet	5
2.1.4	Hur vegetationen påverkar en slänts stabilitet	5
2.1.5	Temperatures negativa effekter på släntstabilitet	5
2.1.6	Nederbördens inverkan på en slänts stabilitet	5
2.1.7	Skredärr och kvicklera	6
3	Hållfastheten i jorden	7
3.1	Jordarternas uppbyggnad	7
3.2	Deformationsegenskaper	7
3.2.1	Jordens hållfasthet och Mohr-Coulombs cirkel	8
3.2.2	Dränerad skjuvhållfasthet	10
3.2.3	Odränerad skjuvhållfasthet	10
3.3	Porvatten	11
3.4	Säkerhetsfaktor	12
4	Programvaror och beräkningsmetoder	14
4.1	GeoStudio SLOPE/W	14
4.1.1	Limit Equilibrium	15
4.1.2	Säkerhetsfaktor	17
4.2	OptumG2	19
4.2.1	Utmärkande metoder för OptumG2	19
4.2.2	Limit analysis	20
4.3	Direktmetoden, en handberäkningsmetod	23
5	Resultat	25
5.1	Generella fall	25
5.1.1	Höjdproblem	25
5.1.2	Jämförelse med direktmetoden	27
5.2	Göta Älv området	30
5.2.1	3/850	30
5.2.2	3/770	33
5.3	Modifiering av slänt 3/770	36

6	Diskussion	38
7	Slutsats	41
	Bibliography	41
	Bilagor	43

Inledning

Ras och skred är snabba förflyttningar av en massa i jord eller berg. I ett ras är enskilda delar (exempelvis jordkorn eller stenar) i fri rörelse i förhållande till varandra. I ett skred är det däremot en hel sammansättning av en jordmassa eller en del av en bergslänt som rör sig (SGI, 2018a).

Beräkningar av hur säker en slänt är mot skred och ras görs för att undvika det otänkbara. Att marken under en försvinner. Ras som detta kan inträffa utan att en jordbävning sker, om bara alla förutsättningar är tillräckligt olyckliga som att belastningen ökar och jordens hållfasthet minskar av exempelvis förhöjd grundvattennivå (Kilburn & Petley, 2003). Slänter i varierande grad av risk för ras finns överallt, så för att förebygga detta krävs det effektiva metoder för att få reda på hur säker slänten är (Dehn, Bürger, Buma & Gasparetto, 2000).

I tider som dessa då klimatförändringarna är på ingång med en ökning av medeltemperatur och extremväder, behövs det förebyggande åtgärder mot släntstabilitet. Åtgärder som innebär en högre initial kostnad än om inget arbete utförs. Fördelen med det förebyggande arbete är att det blir billigare på lång sikt och att människoliv kan sparas. Nackdelen med det förebyggande arbetet är om det aldrig kommer inträffa ett skred då har pengar, oftast skattepengar lagts i onödan.

I Göteborg mynnar Göta älven ut som förser många med vatten. Älven har dock en historia av skred och eroderar i nuläget ständigt strandkanterna vilket gör att älven väljs som studieobjekt för vår rapport om vilken beräkningsmetod för släntstabilitet som lämpar sig bäst för vilka förutsättningar.

Rapportens första kapitel behandlar de bakomliggande faktorerna till varför denna studie är intressant, hur studien ska genomföras och vad som avgränsar studien. Rapportens andra och tredje kapitel behandlar yttre och inre faktorer som spelar roll i släntstabilitetsberäkningar. Rapportens fjärde kapitel går igenom dem olika beräkningsmetoderna och hur dem appliceras i programmen. I det femte kapitlet redogörs beräkningarnas resultat. Det femte kapitlet följs av en diskussion och en avslutning.

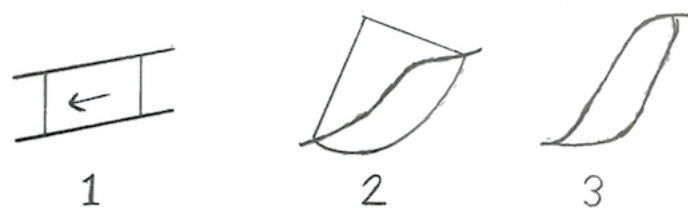
1.1 Bakgrund

Att samhället behöver anpassas för den pågående klimatförändringen är något som verkligen är på tapeten i år. Glaciärisen smälter och Greta Thunberg samlar världens unga i protester mot miljöförstöring. Oron för framtiden är ständigt närvarande och

förändringar måste göras. Förändringar där snabbmatskedjor stramar åt tillgången till engångsartiklar och gör om dem i trä om möjligheten finns, politiker väljer tåg framför flyg och fler blir mer benägna om vad de äter. Förändringarna som dem ovannämnda är bra men för lite. FN:s klimatpanel Intergovernmental Panel on Climate Change förklarar i en ny rapport vilka åtgärder som behövs för att temperaturen bara ska gå upp med 1.5°C och inte den tidigare planerade ökningen av 2°C och vad som händer om så inte är fallet (Allen et al., 2018). Exempelvis skulle alla korallrev dö och ett isfritt arkiskt hav uppstå vid en 2°C ökning. Det framtida klimatet innebär därför nya geotekniska utmaningar. Vilket är något infrastruktur, befintlig och planerad bebyggelse behöver anpassas till då ökad nederbörd och stigande havsnivåer förväntas (SGI, 2015).

Göta älvdalen i Västra Götaland är ett av områden som kommer drabbas av förändring. Älven är ett av Sveriges mest skredutsatta områden och det inträffar ett flertal skred varje år (SGI, 2018b). Området präglas av effekter från istiden då landshöjning inträffade efter att trycket från inlandsisen försvunnit. De eftervarande resterna från ett jordskred kallas skredärr. Idag finns över 200 registrerade skredärr och det riskerar att bli en ökning med den stundande klimatförändringen, vilket är problematiskt då älven rinner igenom sex kommuner med mycket bebyggelse runtom. Älven är, förutom skredtät, Sveriges vattenrikaste och försörjer många med dagligt dricksvatten. Ett stort skred likt Götaraset som inträffade 1957 där 2km strand försvann och tre personer omkom kan således ge förödande konsekvenser.

Hur stabilt ett område är kan avgöras med hjälp av beräkningar av säkerhetsfaktorn SF (Safety factor), som beror på faktorer som jordart, hållfasthetsbestämning, typ av problemställning och vilka konsekvenser ett eventuellt skred skulle ge. För att kunna räkna på säkerhetsfaktorn krävs det att man gör förenklingar och antagnaden på sitt fall. En förenkling kan vara att plana respektive cirkulär-cylindriska glidytor beräknas på observationen att glidytor i slänter med stor utsträckning i lutningsriktning ofta kan förenklas till glidning utefter ett plan och att glidytor i främst kohesionsjord antar formeln av ett cirkelsegment (Skredkommissionen, 1995).



Figur 1.1: 1=Plana glidytor, 2=Cirkulär-cylindriska glidytor och 3=Sammansatta glidytor.

Beräkningar av säkerhetsfaktorn kan göras med hjälp av många metoder som exempelvis Janbus, Bishops och Morgenstern Price. Det alla de har gemensamt är att de bygger på lamellmetoden som är ursprungsmetoden för utvärdering av släntstabilitet och som användes innan datorerna existerade. Många år efter att datorerna introducerats har mer avancerande program lanserats så att man kan dela upp en slänt i oändligt många små delar med kraftjämvikter emellan. Dessa program bygger på finita elementmetoden som är en numerisk metod som också används inom många andra områden.

1.2 Syfte

Detta arbete redogör för två mycket använda beräkningsmetoder för släntstabilitet inom geotekniken, lamellmetoden och Finita elementmetoden. Syftet med studien är att komma fram till beräkningsmetodernas styrkor respektive svagheter och hur de appliceras till olika förhållanden med hjälp av den givna datan från den utsatta sträckan Agnesberg-Bohus.

1.3 Metod

För att få fram ett resultat har given data från området studerats noga för att få ut nödvändiga parametrar som tillsammans med tvärsektionen programmerats in i respektive programvara (GeoStudio, OptumG2). För att veta om beräkningsgången i respektive program har skett på ett godkänt sätt testades två redan beräknade fall. Efter fullständiga beräkningarna, drogs slutsatser om varför resultaten blev olika.

Valet av programvarorna gjordes för att täcka in både Limit equilibrium och Limit analysis.

1.4 Avgränsningar

I en undersökning av det 100km långa området har det framkommit att det största sammanhängande området för risker återfinns i norr, mellan Trollhättan och Ödegärdet söder om Lilla Edet. Landskapet utmärks för ravinerna och höga branta slänterna. Uppgiften baseras därför på ett specifikt område vid Göta Älvdalen där lera är den dominanta jordarten. Metodanalyserna kommer därför att användas med väldigt särskilda parametrar. Detta leder till ett platsspecifikt resultat och inte ett allmänt resultat för andra fall.

Förutom platsspecifika resultat så kommer bara två metoder och två datorprogram inom dem metoderna användas vilket gör att vi inte tar hänsyn till andra metoder och program som möjligen hade gett ett bättre resultat.

Släntstabilitet

En slänt kan se ut på många olika sätt. Slänten kan vara naturligt uppkommen, långsträckt med grovkorningt material eller så kan den exempelvis vara anlagd och kort med en vikt ovanpå. Detta gör att varje slänt är egen med unika förhållanden med olika säkerheter för brott. Hur säker en slänt är med avseende på skredrisk bedöms med hjälp av en säkerhetsfaktorn SF (se ekvation 2.1), som kan bli framräknad med hjälp av många olika metoder. Samlingsuttrycket för en slänts säkerhet är släntstabilitet, som beskriver en naturlig eller tillverkad slänts motståndskraft till skred eller ras.

$$SF = \frac{M_R}{M_A} \quad (2.1)$$

SF =Safety factor.

M_R = Summa av motstående krafter.

M_A = Summa av drivande/aktiva krafter.

2.1 Yttre påverkande faktorer

En slänts stabilitet påverkas av hur den är uppbyggd så som släntens lutning, höjd, jordens uppbyggnad och tyngd samt yttre påverkande faktorer så som erosion, yttre laster, grundvatten, vegetation, nederbörd, temperatur, skredärr och kvicklera.

2.1.1 Erosion med avseende på släntstabilitet

Erosion är processen då material som jord och berg nöts ner under en längre period för att sedan transporteras bort (Skredkommissionen, 1995). De tre faktorerna som bidrar till erosion är vatten, vind och vågor, där vattenerosion är den mest kritiska i fallet vid en älv. Erosion i ett vattendrag är alltid pågående och försämrar kontinuerligt stabiliteten i anslutande material, vilket då kan leda till skred. Inom slänterna kan erosion också förekomma i form av bäckfårar som kan leda till lokala brott, som i sin tur kan utlösa mer omfattande skred.

2.1.2 Yttre lasters påverkan på släntstabilitet

Yttre laster kan både ha negativa och positiva effekter på en slänts stabilitet. Hur en slänt blir påverkad beror på lastens placering. En last ovanför slänten försämrar släntens stabilitet medan en last nedanför stabiliserar. Exempelvis kan en hög vattennivå bidra till en bättre stabilitet med hjälp av vattentrycket mot slänten.

2.1.3 Grundvatten med avseende på släntstabilitet

En ökad grundvattennivå ger upphov till ökat vattentryck vilket innebär en försämring av hållfastheten då effektivspänningen sänks. Det problematiska med grundvattnet är att nivån ofta varierar och därför är svår att få korrekta värden på, vilket är problematiskt då en höjd grundvattennivå bidrar till en sämre släntstabilitet.

2.1.4 Hur vegetationen påverkar en slänts stabilitet

Träd och övrig vegetation bidrar till släntstabilitet i och med att rotsystemen håller ihop jordmassan, suger upp vatten ur jorden och minskar portrycket (Skredkommissionen, 1995). Avverkning av träd och vegetation gör då att stabiliteten minskar och att risken för främst ytliga skred ökar.

2.1.5 Temperaturens negativa effekter på släntstabilitet

Temperatur och temperaturskillnader är också viktiga parametrar för en slänts stabilitet. Temperaturskillnaderna i en jord är väldigt beroende av djup och lufttemperatur. Jorden längre ned har knappt några temperaturskillnader utan följer områdets årliga medeltemperatur medan jorden längre upp har temperaturskillnader beroende av den varierade lufttemperaturen. Skillnaderna i temperatur under ett år kan göra att en torrskorpa uppstår av uttorkning, vittring eller tjälning och slänten får tjällyftningar under vintern då det fryser och en försämrad hållfasthet under upptiningen (Knutsson, Larsson, Tremblay & Öberg-Högsta, 1998).

2.1.6 Nederbördens inverkan på en slänts stabilitet

Stora regnmängder kan likt tjällossning och snösmältning bidra till stora mängder vatten, som kan tränga ner i existerande sprickor, vilket försvagar hållfastheten. Det kan också erodera den uppmjukande marken i lokala bäckfårar och öka flödet i vattendragen (Knutsson et al., 1998).

2.1.7 Skredärr och kvicklera

Kvicklera och skredärr är indikatorer på att om ett område skulle råka ut för skred skulle det förvärras (Skredkommissionen, 1995). Detta för att strukturer i lera är väldigt känsliga för omrörningar eller störningar, då det inträffar sänks hållfastheten mycket och kollaps kan uppstå. Kvicklera kan dock inte starta skred på eget bevåg men bidrar till att skredet kan bli mer omfattande.

Hållfastheten i jorden

En jords hållfasthet beror på vilken friktion som råder mellan kornen, vilket skjuvmotstånd den har och utfällningen under kontakten mellan kornens ytor. Med skjuvning menas förmågan för en jordpartikel att passera, krossa eller komma över en annan under rörelse riktad mot normaltrycket. I lerjordar finns det utöver friktionen även bindningskrafter mellan partiklarna som påverkar hållfastheten. Man kan därför dela upp jordarter i två huvudgrupper, antingen friktionsjordar eller kohesionsjordar. (Svensson.C, 1996)

3.1 Jordarternas uppbyggnad

Jord är ett material uppbyggt av tre faser (Larsson, 2008). Den fasta fasen, den flytande fasen och gasfasen. Den fasta fasen består mestadels av mineraler och lerpartiklar, dessa bildar ett kornskellet. Hålrummen i skelettet, de så kallade porer, är fyllda med porvatten eller porgas eller båda tillsammans.

Vissa jordsegenskaper och omständigheter påverkar jordens deformationsegenskaper, hållfastheten, kapillaritet eller permeabilitet:

- Korn-eller-partikelstorleken.
- Kornformen och hur de är geometriskt arrangerade.
- Porrummets storlek fylld med vatten eller gas.
- Mängdförhållandet mellan den fasta substansen, porvattnet och porgasen.

3.2 Deformationsegenskaper

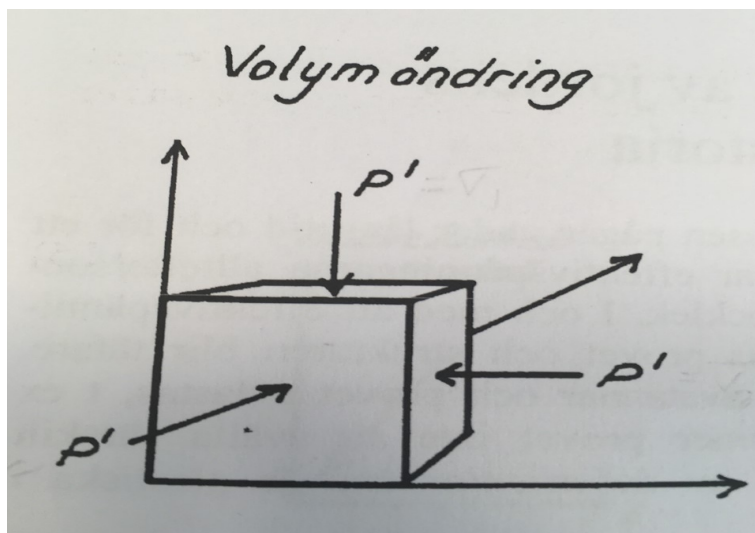
En jord kan deformeras på två olika sätt: genom volymändring eller formändring. Formändring sker när de horisontella spänningarna inte är lika stora som de vertikala spänningarna.

$$\sigma_1 - \sigma_3 \neq 0 \quad (3.1)$$

Denna spännigsskillnad kallas för deviatorspännigen.

Volymändring sker när p ökar:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 * \sigma_3}{3} \quad (3.2)$$



Figur 3.1: Volymändring, (Sällfors, 2013). Återgiven med tillstånd.

I fall då $\sigma_1 = \sigma_3$ har vi en isotropisk fördelning av effektivspänningarna. Detta leder till att $p = \sigma_1 = \sigma_3$.

σ_1 =Vertikal spänning.

σ_3 =Horisontell spänning.

Det finns både ren skjuvning och enkelskjuvning som formändringstyper. Dock så brukar det uppstå en kombination av båda under en formändring i jorden. Dessutom så kan en deformation vara elastisk eller plastisk och momentan eller tidsbunden. En elastisk deformation innebär att jorden kommer att få tillbaka sin ursprungliga form medan plastisk deformation innebär att den nyblivna töjningen kvarstår. I praktiken så uppstår ren elasticitet i leror under väldigt små töjningar, vilket gör att det inte förekommer särskilt ofta. Det som händer istället är en kombination av plastiska och elastiska deformationer (Sällfors, 2013).

3.2.1 Jordens hållfasthet och Mohr-Coulombs cirkel

När deviatorspänningen ökar blir deformationerna större, detta leder till att det uppstår brott vid en viss gräns. De pålagda spänningarna i brottfallet representerar jordens hållfasthet (Sällfors, 2013). Hållfastheten beror på en rad olika faktorer förutom spänningsnivån vid brott, exempelvis:

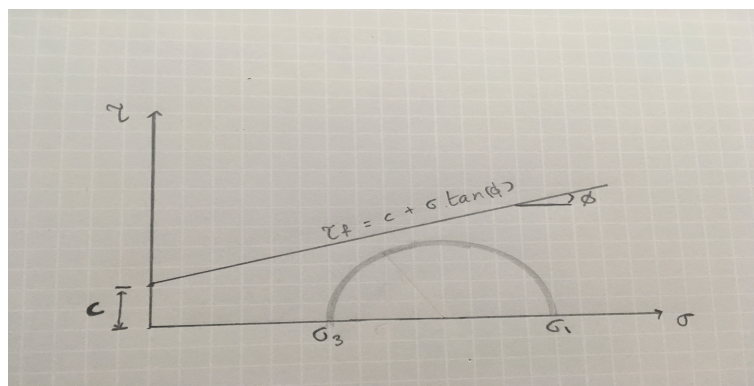
- spänningshistorien: Om jorden exempelvis tidigare blivit utsatt för pålagda laster.
- dräneringsförhållanden: Om jorden är odränerad eller dränerad.
- belastningshastighet: Om jorden utsätts för en kortvarig eller långvarig last.

- cementering: Om jordens partiklar formar kemiska bindningar blir det svårare att få rörelser i jorden.

I tidigare avsnitt nämndes det att jordens uppbyggnad har en påverkan på hållfastheten. Detta beror främst på kornstorleken och att jorden delas upp i två olika typer:

- Friktionsjordar: Sand och grövre. Friktion mellan kornen skapar en motståndskraft vid skjuvning som gör det svårare för kornen att rulla och lyftas förbi varandra.
- Kohesionjordar: Jordar där leran dominerar och kornstorleken är mindre. För att räkna jordens brottkriterium används Mohr-Coulomb's ekvation för skjuvhållfasten:

$$\tau_f = c + \sigma \tan(\phi) \quad (3.3)$$



Figur 3.2: Mohr-Coulombs cirkel.

Kohesionen är ett mått på hållfastheten i jorden. C , kohesionstalet representerar partiklarnas sammanhållningskraft i lera. I en graf med skjuvhållfastheten i Y-axel och spänningarna i X-axel är kohesionstalet lika med skärningspunkten i Y-axeln när $\sigma = 0$. Den benämns c' vid en beräkning av friktionsjord och den antas ofta vara $c' = 0$.

σ_1 är den vertikala spänningen och σ_3 är den horisontella spänningen. När deviatorspänningen blir för stor går halvcirkeln över linjen, den maximala skjuvspänningen, vilket leder till brott.

ϕ : är friktionsvinkeln. Den benämns ϕ' vid beräkning av en friktionsjord.

Tabell 3.1: Friktionsvinkelns värde efter jordart och dess lagringstäthet (Sällfors, 2013)

Lagringstäthet	Jordart						
	Silt	Sand	Grus	Sand-Morän	Grus-Morän	Makadam	Sprängsten
Löst Lagrad	26°	28°	30°	42°	38°	30°	40°
Fast lagrad	33°	35°	37°	45°	45°	35°	45°

Tabell 3.1 visar tydligt att ju större och fastare kornen är desto större friktionsvinkeln. Fast lagringstäthet ger också en större friktionsvinkel än lös lagringstäthet.

3.2.2 Dränerad skjuvhållfasthet

Under en skjuvdeformation kommer en form-och volymförändring att ske. Eftersom friktionsjordar är permeabla och kan vara vattenmättade förutsätter man att vattnet kan dräneras snabbt under belastningen eller av gravitationskraft då vattnet rinner lätt igenom. Dock hinner inte volymförändringar att ske vid dynamisk belastning eller stöt då belastningen byter form för snabbt. Ett exempel på detta är vid fall som jordbävningar (Sällfors, 2013).

3.2.3 Odränerad skjuvhållfasthet

Kohesionjordar har lägre permeabilitet. I naturen så tar det väldigt lång tid för vattnet att dräneras och man antar därför vid analyser av belastningsfall att jorden är odränerad. Det antas då att volymen är konstant. Om ett jordprov är kontraktant uppkommer det porvattenövertryck och om provet är dilatant uppkommer det porvattenundertryck. Denna förändringen i portrycken förändrar också effektivspänningarna för jorden (Sällfors, 2013).

3.3 Porvatten

I början av kapitel 3.1 förklarades det att jord är ett trefasmaterial med olika sammansättningar av porvatten och porgas. Innehållet i jorden är beroende av vilka geologiska förutsättningar jorden har bildats under och är viktig att veta då spänningarna bärs upp i skelettet och av porernas innehåll.

Om den jord som ligger under grundvattenytan har en vattenfas som är i statisk jämvikt så är även vattentrycket, eller bättre benämnt portryck, hydrostatiskt. I detta fall kan portrycket beräknas enligt ekvation 3.4 eller 3.5. Jorden ovanför grundvattenytan kan det dock vara ett negativt porvattentryck på grund av kapillärkrafterna (Larsson, 2008). Avverkning av träd och övrig vegetation medför att risken för främst ytliga skred ökar då rotsystemen dels håller ihop jordmassan, dels suger upp vatten och minskar portrycken lokalt. Detta gäller inte minst slänter i sand- och siltjordar (Skredkommissionen, 1995).

En av de mest fundamentala färdigheterna inom geotekniken är att kunna räkna ut portrycket för ett visst djup. Detta möjliggör beräkningen av totalspänningen och effektivspänningen. Där totalspänningen är lika med jordbelastningen inklusive yttre laster och effektivspänningen är lika med totalspänningen exklusive vattnets bärförmåga.

$$u = g * \rho_w * z \quad (3.4)$$

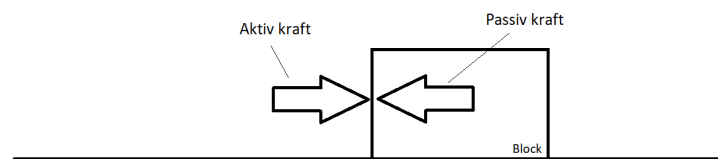
eller

$$u = \gamma_w * z \quad (3.5)$$

3.4 Säkerhetsfaktor

För att kunna beskriva vad stabilitetsförmågan hos en slänt är används ofta säkerhetsfaktorn, F . Denna faktor kan beräknas och definieras på flera olika sätt men den definitionen som används flitigast är i förhållande till kraft- eller momentjämvikt.

Den motstående kraften jämförs då med den pådrivande kraften för att se om jorden klarar av den pådrivande kraften. Detta kan jämföras ur ett mekaniskt perspektiv, där en aktiv kraft försöker flytta ett friktionsfritt block. När den aktiva kraften blir större än den passiva flyttas blocket i den aktiva kraftens riktning.



Figur 3.3: Mekanisk representation av ett block i rörelse när den aktiva kraften är större än den passiva kraften.

I jordmekaniken sker det istället deformationer och/eller skred när den pådrivande kraften är större än den motstående. Denna beräkning används på *plana eller icke cirkulära ytor*.

$$F_f = \frac{F_r}{F_d} \quad (3.6)$$

F_r = Summa av motstående krafter.

F_d = Summa av pådrivande krafter.

För rotationsglidytor beräknas säkerhetsfaktorn genom en momentjämförelse i stället för kraftjämförelse. Formeln ser i detta fall ut som följande.

$$F_f = \frac{M_r}{M_d} \quad (3.7)$$

M_r = Summa av motstående moment.

M_d = Summa av pådrivande moment.

Ekvationerna 3.6 och 3.7 medför att en större pådrivande kraft/moment orsakar en minskning av säkerhetsfaktorn vilket i sin tur innebär en försämring av stabiliteten. Om säkerhetsfaktorn $F \leq 1$ anses slänten instabil medan den anses vara stabil när $F > 1$. En godtagbar säkerhetsfaktor bör vara grundad på hänsyn till återkommande kraftiga regnperioder, konsekvenser på grund av släntinstabiliteten, kunskaper om jordens långsiktiga beteende och noggrannheten på designmodellen som det har jobbats med (Cheng & Lau, 2014). Säkerhetsfaktorer mot stabilitets brott ska minst uppgå till värden efter tabell 3.2 (Trafikverket, 2011).

Tabell 3.2: Lägst godtagbart värde på säkerhetsfaktor

Säkerhetsklass	Odränerad analys	Kombinerad eller dränerad analys
1	1.35	1.20
2	1.50	1.30
3	1.65	1.40

Säkerhetsklasser ska väljas med hänsyn till risk för personskador. Följande gäller i enlighet med trafikverket (Trafikverket, 2011):

- Säkerhetsklass 1 får tillämpas då vägbana, banvall eller annan konstruktion inte berörs, t.ex. för vissa skärninsslänter.
- Säkerhetsklass 2 tillämpas om inget annat anges.
- Säkerhetsklass 3 tillämpas med avseende på stabilitetsbrott för konstruktioner på undergrund av kvicklera

Programvaror och beräkningsmetoder

Sen introduktionen av datorer så har de geotekniska beräkningarna gått över från att göras på papper och penna till att göras helt och hållet i datorerna. Att kunna göra uträkningar med hjälp av datorerna innebär att gamla beräkningsmetoder kan göras snabbare och att nya beräkningsmetoder har introducerats. Metoder som hade varit alldeles för tidskrävande att göra för hand.

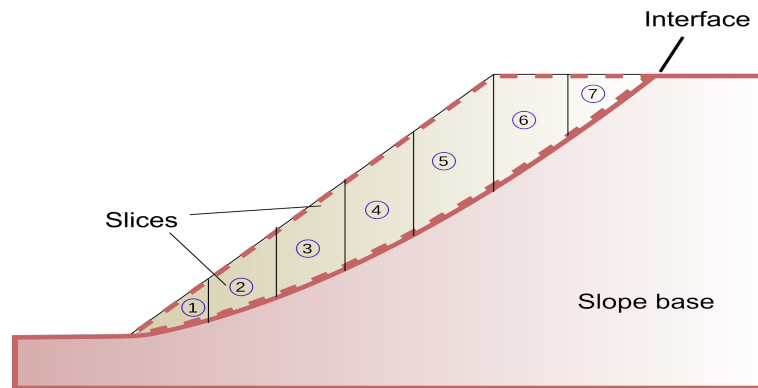
4.1 GeoStudio SLOPE/W

GeoStudio är den mest använda programvaran för jord och bergsläntsberäkningar. GeoStudio har förmågan av att räkna på slänter med olika specifikationer som glidytors former, portryck, jordegenskaper och laster (GeoSlope International, 2018). Programmet lanserades på marknaden 1977 och utvecklades av Professorn D.G Fredlund. Det kunde då bara användas på stordatorer men efter 6 år och efter att PC-datorerna började säljas år 1980, gjordes det om och bytte namn till PC-SLOPE (Geoslope International Ltd, 2018). Under åren och i takt med den teknologiska utvecklingen har GeoStudio förbättrats och blivit enklare att använda.

Programvaran använder Limit Equilibrium stabilitetsanalysmetoder som gör det möjligt att ta hänsyn till komplex stratigrafi, oregelbundet porvattentryck, variation av linjära och icke linjära skjuvhållfasthetsmodeller, koncentrerade laster, strukturell förstärkning och nästan vilken form av glidyta som helst.

Programmet GeoStudio innehåller en del olika underorganer (SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W och AIR/W) för olika typer av analyser. I arbetet utförs stabilitetsanalyser på ett flertal slänter och därför används underorganen SLOPE/W.

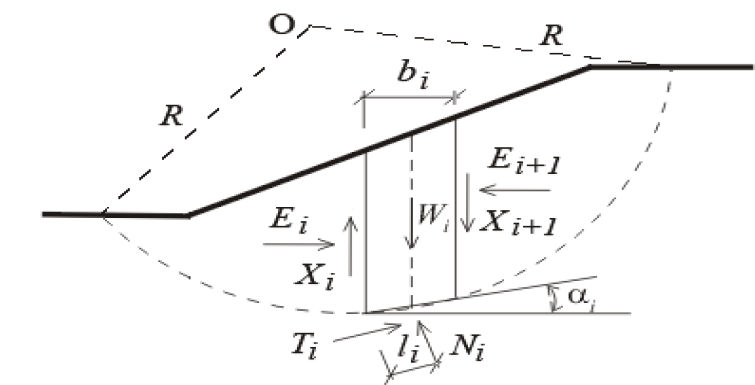
4.1.1 Limit Equilibrium



Figur 4.1: Division of the slope mass in the method of slices (Biswajit Banerjee 2015). CC-BY3.0. Återgiven med Creative Commons

Idén om att dela upp en glidande massa i vertikala lameller är det äldsta numeriska sättet att räkna på inom geotekniken och hade sin första användning i början av 1900-talet. Det var i Sverige, som Sven Hultin gjorde den första beräkningen genom att dividera den glidande överdelen i lameller. Detta förfinades senare av Wollmar Fellenius som utvecklade den första generella metoden. Under seklets gång introducerades olika metoder som exempelvis Swedish Method of Slices och Bishops Lamellmetod med viljan av att göra en så tillförlitlig limit equilibrium stabilitetsanalys som möjligt, vilket GeoStudio baserar sig på.

Limit Equilibrium metoder har dock många avgränsningar. Det är viktigt att veta vilka de avgränsningar är för att kunna använda metoderna så effektivt som möjligt (Geoslope International Ltd, 2018).



Figur 4.2: Petterson Bishop. Beskriver kraftjämvikten i en lammell (Fona 2009). Återgiven med tillstånd.

Limit Equilibriums Metoder

Fellenius metod, den första utvecklade metoden, räknade inte med krafter mellan lameller men hade bara en fullständig beräkning av momentjämvikten. Detta gjorde att det var möjligt att räkna en säkerhetsfaktor för hand med hjälp av denna metoden. Även om det blev svårt att få en exakt säkerhetsfaktor blev denna "enklare" metoden ändå så viktig på grund av att datorer inte fanns på denna tid (Geoslope International Ltd, 2018).

Bishop var den första som lyckades hitta en avancerad lamellmetod som tog hänsyn till normalkrafterna mellan lamellerna. Han tog dock inte med skjuvkrafterna vilket gör att hans analys bara innehåller en fullständig beräkning av momentjämvikten. Metoden blev ändå revolutionerande eftersom säkerhetsfaktorn blev en icke-linjär ekvation när man tog hänsyn till normalkrafterna och då behövdes hela beräkningstillgången upprepas flera gånger för att få fram ett resultat.

Janbu's Simplified Method är väldigt lik Bishops metod eftersom den också bara tar hänsyn till normalkrafterna mellan lamellerna. Dock tar den bara hänsyn till den horisontella kraftjämvikten istället för momentjämvikten.

Morgenstern-Price och Spencer metoderna kom senare i takt med den teknologiska utvecklingen. Med hjälp av datorer gick det att ta hänsyn till alla krafterna mellan lameller och få fullständiga kraft- och momentjämviktsberäkningar.

Tabell 4.1: Metodernas hänvisning till normalkraft-och momentjämvikt

Method	Moment Equilibrium	Force Equilibrium
Ordinary or Fellenius	Yes	No
Bishop's Simplified	Yes	No
Janbu's Simplified	No	Yes
Spencer	Yes	Yes
Morgenstern-Price	Yes	Yes

Tabell 4.2: Metodernas hänvisning till normal-och skjuvkrafter

Method	Interslice Normal (E)	Interslice Shear (X)	Inclination of X/E Resultant, and X-E Relationship
Ordinary or Fellenius	No	No	No interslice forces
Bishop's Simplified	Yes	No	Horizontal
Janbu's Simplified	Yes	No	Horizontal
Spencer	Yes	Yes	Constant
Morgenstern-Price	Yes	Yes	Variable; user function

Med ovanstående tabeller går det tydligt att se hur metoderna har utvecklats genom tiden till att få en så exakt lamellmetod som möjligt.

De olika metoderna har generellt ingen betydande skillnad på säkerhetsfaktorernas värde förutom för Fellenius metod där skillnaden kan vara så stor som 60% (Fredlund & Krahn, 1977). Detta är logiskt med tanke på att Fellenius metod är den första och enklaste av metoderna.

Limit equilibrium formulering

På 70-talet skapade Fredlund en matematisk formulering som omfattade alla förgående metoderna. Den kallas för General Limit Equilibrium (GLE) och baseras på två ekvationer för säkerhetsfaktorsberäkningar. Den ena ekvationen räknar fram en säkerhetsfaktor som tar hänsyn till momentjämvikten F_m och den andra tar hänsyn till den horisontella kraftjämvikten F_f (Geoslope International Ltd, 2018).

GLE formuleringen utgår från Mogenstern och Price ekvation:

$$X = E * \lambda * f(x) \quad (4.1)$$

$f(x)$ = Funktion beroende av x

λ = Procenttal av funktionen

E = Normalkraft mellan lamellerna

X = Skjuvkraften mellan lamellerna

GLE som tar hänsyn till momentjämvikten F_m blir:

$$F_m = \frac{\sum(c' * \beta * R + (N - u * \beta)R * \tan(\phi'))}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (4.2)$$

GLE som tar hänsyn till kraftjämvikten F_f blir:

$$F_f = \frac{\sum(c' * \beta * \cos(\alpha) + (N - u * \beta)\tan(\phi') * \cos(\alpha))}{\sum N\sin(\alpha) - \sum D\cos(\omega)} \quad (4.3)$$

c' = Den effektiva kohesionen

ϕ' = Den effektiva friktionsvinkeln

u = Porvattentrycket

N = Normalkrafterna som verkar på basen på en lamell

W = Lamellens tyngd

D = Koncentrerad punktlast

α = Lutning av lamellbasen

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

4.1.2 Säkerhetsfaktor

Ett av huvudproblemen i en släntanalys är att hitta den kritiska glidyten som har den minsta säkerhetsfaktorn. I datorprogrammet GeoStudio kan man använda sig av en rad olika metoder för att få fram dessa (Geoslope International Ltd, 2018):

Rutnät och radie (Grid and Radius) för cirkulär glidyta är en metod som bestämmer cirkulära glidytor med hjälp av ett rutnät. Varje punkt i rutnätet representerar mittpunkten på en av cirkelarna. Cirkelarnas radie bestäms med funktionen radius som använder sig av en eller flera punkter eller flera linjer.

Fullt specificerade glidytor används mest när glidytons position redan är känd från tidigare fältmätningar. För att enklare få positionen och formen av en glidyta kan man definiera den med en serie av datapunkter. Genom att välja funktionen Axis Point kan man få ut

en punkt där momenten kommer tas utan att direkt påverka säkerhetsfaktorns resultat som tar hänsyn till både moment och kraftjämvikt. Dock kan säkerhetsfaktorn förändras vid användningen av de förenklade metoderna.

Blockspecifierade glidytor är en användbar metod för fall med platta sidoslänter liggandes på ett tjockt skikt av lera som grund. Med hjälp av två rutnät (ett vänster och ett högerblock) går det att göra blockformade analyser av glidytor. Rutnäten kan också bytas ut till punktklinjer eller en enkel punkt. Funktionen fungerar dock inte lika bra när glidyntans hörn är för skarpa.

Ingående och utgående specifikationer: Det är svårt att hitta glidyntans början och slut med Rutnät och Radiemetoden. Därför skapades en annan funktion, ingående och utgående specifikationsmetoden, som utgår på att man "gissar" två spann på var glidyntan skulle kunna börja och sluta. Om inte ingången och utgången definieras där glidyntan är tänkt att äga rum finns det en hög risk att resultatet blir orimligt och att man missar den verkliga släntrisen. Funktionen är mest användbar när glidyntan är definierad i mjuka jordarter som lera eller impermeabla skikt som berg.

Optimeringsfunktionen är användbar för att finslipa resultatet av den kritiska glidyntan. För att hitta den lägsta säkerhetsfaktorn delas glidyntan till mindre segment. Observationen görs för att få en ny glidynta som har en lägre säkerhetsfaktor än den som utvinns ifrån släntanalysen av den cirkulära glidyntan.

Auto-Locate funktionen är en nylanserad funktion som lokaliserar olika ingång och utgångspunkter och utvinns 2000 glidytor för att hitta en approximativ lösning. Med hjälp av optimeringsfunktionen hittar den en mer exakt säkerhetsfaktor.

Freatiskt korrektion används vid fall då den piezometriska linjen lutar för mycket. Den piezometriska linjen definierar porvattentryck av en slänt vid hydrostatiskt tillstånd.

Den freatiska korrektionen H_c beräknas med:

$$H_c = H_w * \cos^2(A) \quad (4.4)$$

H_w = Det vertikala avståndet från mittpunkten av lamellens bas till den piezometriska linjen.

A = Piezometriska linjens lutning.

Säkerhetsfaktor blir antingen samma eller större efter en korrektion.

4.2 OptumG2

OptumG2 är ett omfattande finite-element-program som analyserar stabilitet och deformation i plan- och axiell belastning. Företaget bakom programmet är Optum Computational Engineering. Företaget etablerades 2013 av ett arbetslag med civilingenjörer och konsulter med akademiska bakgrunder. Sedan dess har arbetslaget växt och inkluderat mjukvaruarkitekter, programmerare, geotekniska experter samt akademiker från hela världen.

4.2.1 Utmärkande metoder för OptumG2

OptumG2 är ett program specifikt designat för geotekniska tillämpningar som utöver att dela många funktioner med tidigare program också innehåller:

Direkta svar till direkta frågor

Programmet förser en med olika analyser designade för att resultera i direkta svar till direkta frågor utan att behöva genomgå långa och överflödiga analyser. Ett exempel är ”limit analysis” som används senare i detta arbete. Limit analysis ger en snabb bedömning av den bärande kapaciteten hos olika geotekniska strukturer utan en ”incremental elastoplastic”-analys som är en flerstegsanalys (Krabbenhoft, 2018).

Övre och undre gränser

Konventionella finite-element-program resulterar i ungefärliga lösningar som kan vara säkra eller osäkra, problemet är att man inte vet. Det OptumG2 erbjuder för att lösa tidigare problem är att analyserna i programmet resulterar i två svar. Där det ena svaret beskriver det värsta fallet och det andra svaret det säkraste fallet. Övre och undre gränser ger således en uppskattning vart den exakta lösningen är (Krabbenhoft, 2018).

Automatic mesh refinement

Som standardfunktion i alla analyser i OptumG2, är det möjligt att använda en automatiskt anpassningsbar mesh-förfining. Kombinationen mellan förfining och de ovannämnda övre och undre gränser blir ett kraftfullt verktyg för att maximera noggrannheten i resultaten (Krabbenhoft, 2018).

Eurokod 7

Analyserna tillgängliga i OptumG2 är väljusterade med kraven i eurokod 7. Ultimate limit state kan hanteras med limit analysis och strenght reduction medan Serviceability limit states hanteras genom elostoplasticitet eller konsolidering. OptumG2 innehåller dessutom funktioner som tillämpar partiella faktorer som beror på olika tillvägagångssätt föreskrivna i eurokod (Krabbenhoft, 2018).

4.2.2 Limit analysis

Som nämnt ovan så resulterar Limit analysis i snabba kapacitetsapproximationer hos geotekniska strukturer utan onödigt långa metoder.

Limit analysis tillåter användningen av både fixerade och multiplicerbara laster. Metoden behåller de fixerade lasterna konstanta medan de multiplicerbara lasterna förstoras samtidigt som en global jämvikt behålls fram till kollaps (Burman, P. Acharya, Sahay & Maity, 2015).

Utöver att kunna få fram en collapse multiplier för externa laster så är det också möjligt att beräkna faktorn som gravitationen multipliceras med för att nå kollaps. Detta är väldigt användbart i beräkningar på slänstabilitet. Faktorn som lasten/gravitationen multipliceras med kallas för "collapse multiplier" och är i detta fall även det som kallas för säkerhetsfaktor.

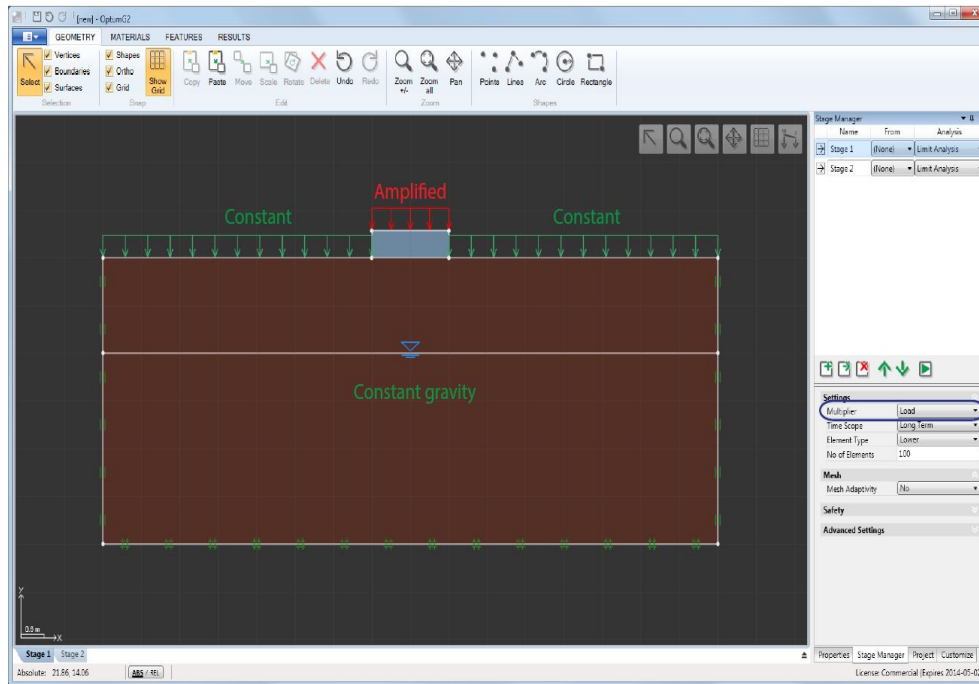
Inställningar

Förinställt i programmet hanteras laster och gravitationen på olika sätt beroende på vad som ska förstoras till kollaps. Gravitationen eller de gångbarbara lasterna. De regler som gäller i de två olika fallen visas i tabell 4.3.

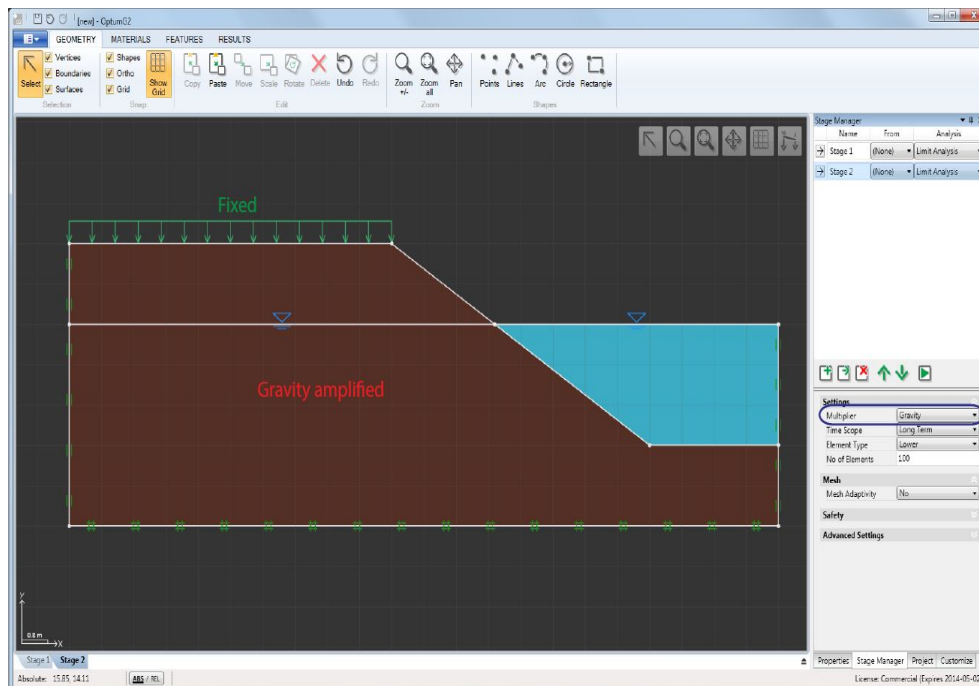
Tabell 4.3: Status av gångbarbara laster, fixerade laster och gravitation beroende på förstöringsinställning

	Förstoring av last		Förstoring av gravitation	
Multiplicerbara laster	Förstoras		Ignoreras	
Fixerade laster	Konstant		Konstant	
Gravitation	Konstant		Förstoras	

I de två olika fallen ska även elementtyper väljas. "Lower" eller "upper" är de befintliga alternativen och de resulterar i lägre eller högre säkerhetsfaktorer.



Figur 4.3: Förstoring av last (OptumCE, 2018). Återgiven med tillstånd.



Figur 4.4: Förstoring av gravitation (OptumCE, 2018). Återgiven med tillstånd.

Säkerhet

Limit analysis kräver en specifikation av det som kallas för "Design approach". Enligt eurokod 7 ska laster klassificeras som gynsamma eller ogynsamma. Inom de två klasser ska dessutom lasterna klassificeras som permanenta, variabla eller tillfälliga. Lasterna får en partiell faktor som beror på hur de klassificeras, och samma faktor multipliceras automatiskt med den ursprungliga laststorleken.

Hur olika laster klassificeras beror på vilken design approach som väljs. En total av sju olika design approaches är tillgängliga i OptumG2: Unity, DA1/1, DA1/2 och User 1-4. Standard approachen är Unity och där multipliceras lasterna med den partiella faktorn ett.

	Unity	DA1/1	DA1/2	User 1	User 2	User 3	User 4
Unit Weight - Unfavourable:							
Permanent	1	1.35	1	1	1	1	1
Unit Weight - Favourable:							
Permanent	1	1	1	1	1	1	1
Loads - Unfavourable:							
Permanent	1	1.35	1	1	1	1	1
Variable	1	1.5	1.3	1	1	1	1
Accidental	1	1	1	1	1	1	1
Loads - Favourable:							
Permanent	1	1	1	1	1	1	1
Variable	1	0	0	1	1	1	1
Accidental	1	0	0	1	1	1	1
Materials:							
c	1	1	1.25	1	1	1	1
ϕ	1	1	1.25	1	1	1	1
c_u (Tresca)	1	1	1.4	1	1	1	1

Figur 4.5: Faktorer som laster multipliceras med beroende på approach (OptumCE, 2018). Återgiven med tillstånd

På materialsidan används parametrarna c , $\tan\phi$, och c_u i eurokod. OptumG2 använder c och $\tan\phi$ för modellerna: Mohr-Coulomb, Modified Cam Clay och MHC medan Tresca är enda modellen som använder sig av c_u . OptumG2 reducerar materialparametrarna före analysen görs enligt följande.

$$c_{red} = \frac{c}{F_c} \quad (4.5)$$

$$\phi_{red} = \arctan\left[\frac{\tan(\phi)}{F_\phi}\right] \quad (4.6)$$

$$c_{u,red} = \frac{c_u}{F_{c_u}} \quad (4.7)$$

Där F_c , F_ϕ och F_{c_u} är partiella faktorer

4.3 Direktmetoden, en handberäkningsmetod

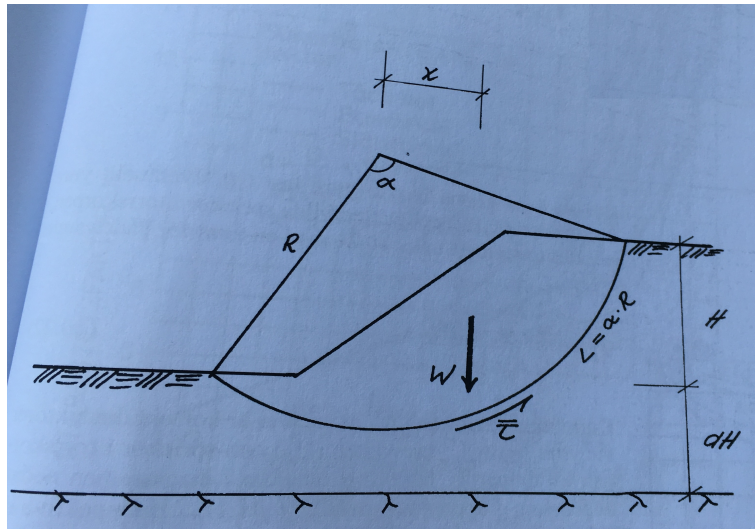
Bland alla beräkningsmetoder som kan användas för att räkna fram en säkerhetsfaktor är direktmetoden en mindre utvecklad metod som görs förhand och som ger en god uppfattning om var den farligaste glidytan kan befinna sig (Sällfors, 2013).

Direktmetoden använder sig av följande ekvationer vid beräkning av säkerhetsfaktor:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (4.8)$$

där

$$\tau_{mob} = \frac{W * x}{R * L} \quad (4.9)$$



Figur 4.6: Direktmetodsförklaring, (Sällfors, 2013). Återgiven med tillstånd.

Tyngden av glidkroppens totala massa, funktion av γ , $W = \gamma * v * H^2$

Hävarmen: $X = \varepsilon * H$

Cirkelns radie: $R = r * H$

båglängd: $L = l * H$

ε , v och r och l är dimensionslösa tal som beror på släntens och glidykans geometri och γ skrymdensiteten.

Detta leder till att:

$$\tau_{mob} = \frac{W * x}{R * L} = r_t * \gamma * H \quad (4.10)$$

Där r_t är en dimensionslös term som också beror av släntens och glidykans geometri.

Vid fall då det existerar en yttre last q och eventuellt ett yttre vattenstånd $\varepsilon_w * H_w$ ersätts $\gamma * H$ i den förgående ekvationen med en term för pådrivande tryck:

$$P_d = \frac{\gamma * H + q - \gamma_w * H_w}{\mu_q * \mu_w * \mu_t} \quad (4.11)$$

där μ_q, μ_w, μ_t är korrektionsfaktorer, H_w vattendjupet och γ_w skrymdensiteten för vatten.

Vid en odränerad analys blir säkerhetsfaktorn:

$$F_c = N_0 * \frac{\tau_f u}{P_d} \quad (4.12)$$

där N_0 är en stabilitetsfaktor

Vid dränerade analys blir porttrycket annorlunda. Om grundvattenytan som befinner sig ovanför slänten antas vara horisontell och porttrycket hydrostatiskt blir det:

$$P_e = \frac{\gamma * H - \gamma_w * H'_w(+q)}{\mu'_w} \quad (4.13)$$

Därefter räknas en ingångsparameter $\gamma_{c\phi}$ som tillsammans med slänthlutningen ger ett värde till stabilitetsfaktorn N_{cf}

$$\gamma_{c\phi} = \frac{P_e * \tan(\phi')}{c'} \quad (4.14)$$

Till slut blir säkerhetsfaktorn för dränerad analys:

$$F_{c\phi} = N_{cf} * \frac{c'}{P_e} \quad (4.15)$$

Resultat

5.1 Generella fall

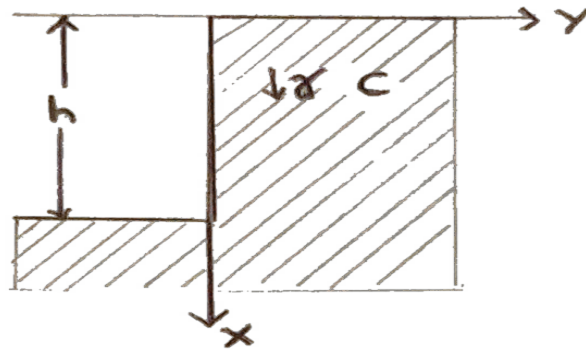
I beräkningar av slänter där det inte finns ett förbestämt svar är det svårt att veta att det framtagna svaret är rätt. Förinställningar i program stämmer inte alltid överens med givna förutsättningar vilket resulterar i osäkerheter i svaret.

5.1.1 Höjdproblem

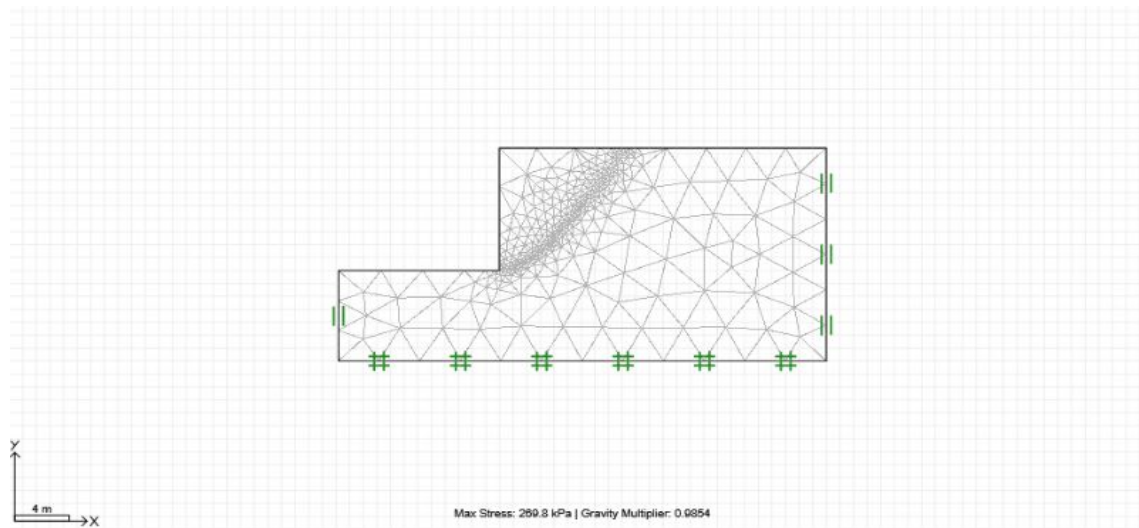
Det utpräglade stabilitetsproblemet hos en vertikal slänt med höjden h , en tillräcklig längd och en påfrestning på grund av sin egentynghd har studerats länge med hjälp av limit analysis. Materialet i den studerade slänten antas homogen och isotropisk med en tunghet γ och en kohesion C . (Pastor, Thai & Francescato, 2003). Trots många försök att lösa detta problem saknas fortfarande ett exakt värde på lastparametern Q_y i ekvation 5.1 och den bästa approximativa lösningen har blivit framräknad med en undre och övre gräns till $3.772 \leq Q_y \leq 3.7845$.

$$Q_y = \frac{\gamma * h}{C} \quad (5.1)$$

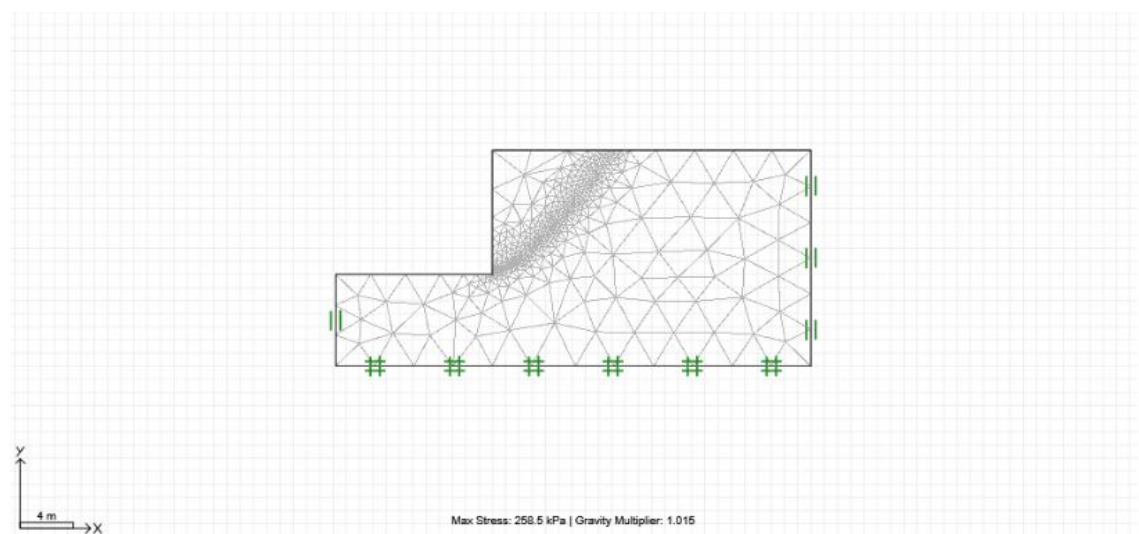
Lastparametern bestäms genom att räkna ut ett genomsnitt av gränserna och fås till $Q_y=3.77825$. Med det värdet i ekvation 5.1 och antaganden $C=40$ och $\gamma=16$ löses slänthöjden ut och beräknas till 9.45 m. En slänt som följer det givna sambandet mellan höjd, tunghet, kohesion och lastparametern bör ha en säkerhetsfaktor, $SF = 1$ om den dimensioneras enligt antaganden ovan och de framräknade dimensionerna. Detta sätts i test i GeoStudio och OptumG2.



Figur 5.1: Vertikal slänt.



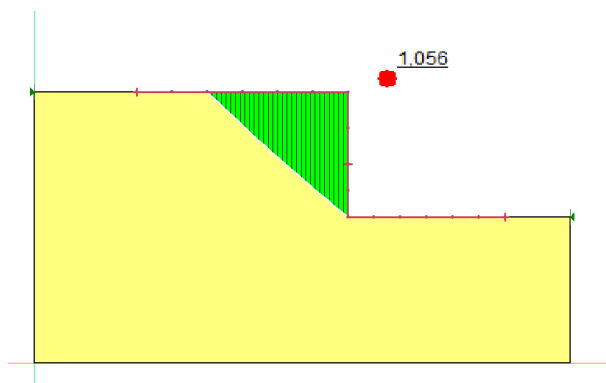
Figur 5.2: OptumG2 Lower Bound analys 0,985



Figur 5.3: OptumG2 Upper Bound analys 1,015

Resultat

OptumG2s analys "limit analysis" gav en undre säkerhetsfaktor 0.985 och övre säkerhetsfaktor 1.015. Ett genomsnitt av de två ger den exakta säkerhetsfaktorn 1.0. Det stämmer överens med den önskade säkerhetsfaktorn och därför är OptumG2 ett pålitligt program som fungerar för de studier som görs i arbetet.



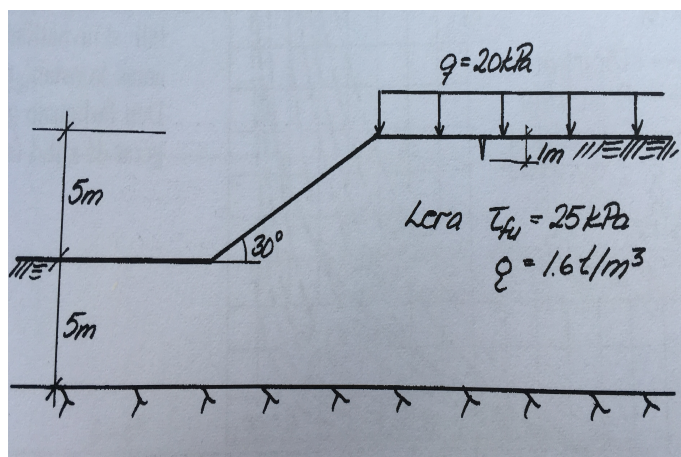
Figur 5.4: GeoStudio 1.056

Resultat

GeoStudios analys gav en säkerhetsfaktor på 1.056, ett värde som stämmer ungefär med den önskade säkerhetsfaktorn 1.0. Detta säger att GeoStudio är ett pålitligt program för studierna men kan i jämförelse med OptumG2 vara mindre exakt.

5.1.2 Jämförelse med direktmetoden

Sällfors, 2013 räknar fram säkerhetsfaktorn på en slänt med hjälp av direktmetoden i exempel 10.6 i sin bok Geoteknik.



Figur 5.5: Direktmetoden, (Sällfors, 2013). Återgiven med tillstånd.

Det är en odränerad analys där slänten har en 30 graders lutning med en extra last på 20 kPa på den övre sidan och lerans parametrar är:

$$maxdjup = 10m$$

$$\tau_{fu} = 25kPa$$

$$\rho = 1600kg/m^3$$

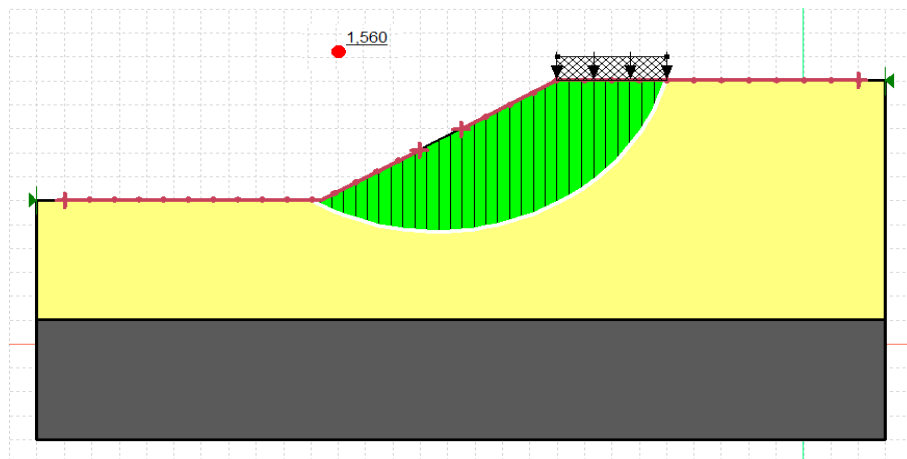
Det fås fram:

$$\rho_d = 105.2kPa$$

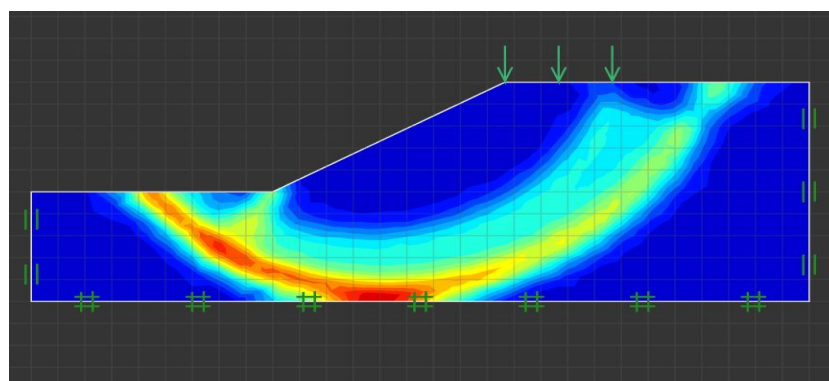
$$N_0 = 5.8$$

$$F_c = N_0 * \frac{\tau_{fu}}{\rho_d} = 1.38$$

En odränerad beräkning av säkerhetsfaktorn för samma exempel gjordes med lamellmetoden i GeoStudio och med finita elementmetoden i OptumG2.



Figur 5.6: Resultat i GeoStudio



Figur 5.7: Skjuvningsfördelning visad i OptumG2

Direktmetoden brukar vara en första handberäkning som görs för att få ett ungefärligt svar på en släntanalys (Sällfors, 2013). Lamell- och finita element metodens resultat visar

att skredrisken inte är lika stor som direktmetoden framhävde. OptumG2 illustrestade dessutom en längre och djupare glidyta än vad GeoStudio gjorde.

Tabell 5.1: Säkerhetsfaktorer från direktmetoden, GeoStudio och OptumG2

Direktmetoden	GeoStudio	OptumG2
1.38	1.560	1.666

5.2 Göta Älv området

Slänterna från sektionen 3/770 och 3/850 visade i bilagorna, ansågs vara relevanta slänter med tillräcklig information för att kunna studeras med en god noggrannhet. Med materialdata och höjdskillnader tagna från borrhål och kartor var det möjligt att rita upp modeller för slänterna i respektive programvara.

5.2.1 3/850

Slänten från sektion 3/850 och given data (bilagor 5 och 6) gjorde det möjligt att läsa ut oreducerade kohesionsvärden och tungheter i förhållande till djup. Kohesionen reducerades med hjälp av ekvation 5.2 och 5.3 och antogs öka eller minska linjärt mellan djupen. Tabell 5.2.

$$\mu = \left(\frac{0.43}{W_L}\right)^{0.45} \quad (5.2)$$

W_L =Flytgräns

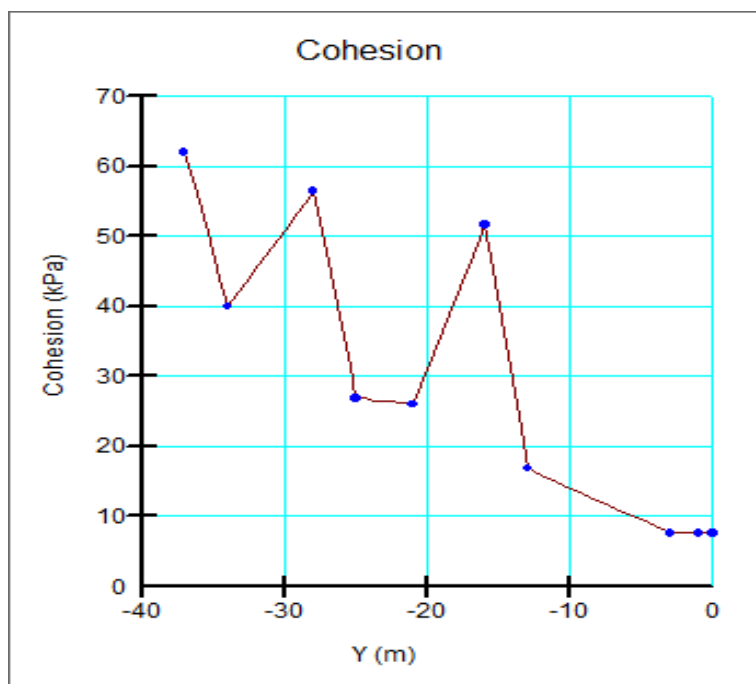
μ =Reducerande faktor

$$\tau_{fu} = \mu * \tau_k \quad (5.3)$$

τ_k =Oreducerad kohesion

τ_{fu} =Reducerad kohesion

I den dränerade analysen valdes kohesionen och friktionsvinkeln till konstanta värden. $c = 10$ i torrskorpan samt $c = 8$ och $\phi = 30^\circ$ i leran . Värden som valdes med hjälp av triax-försök(bilaga 7).



Figur 5.8: Odränerad analys 3/850: Kohesion i förhållande till djup i programvaran GeoStudio.

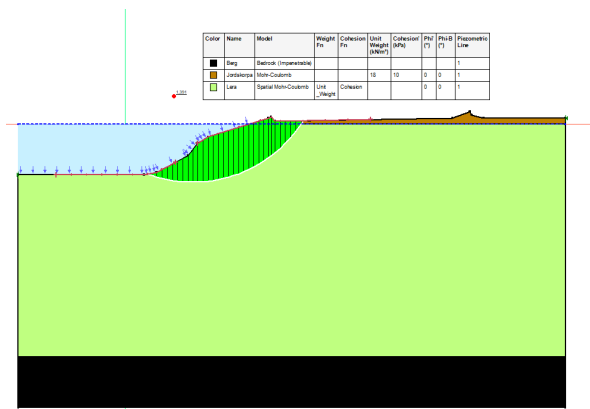
Tabell 5.2: Odränerad analys. Kohesion, tunghet och friktionsvinkel i förhållande till djup

Djup [m]	Reducerad kohesion [kPa]	Tunghet [kN/m ³]	Friktionsvinkel [°]
0	10	18	0
1	7.6	18	0
3	7.6	15	0
13	16.8	16.54	0
16	51.6	17	0
21	26	17	0
25	26.9	17	0
28	56.4	17	0
34	39.9	17	0

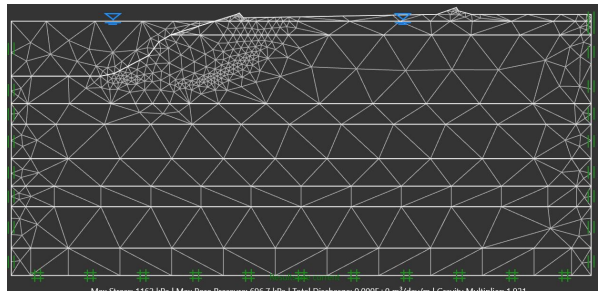
Tabell 5.3: Dränerad analys. Kohesion, tunghet och friktionsvinkel i förhållande till djup

Djup [m]	Kohesion [kPa]	Tunghet [kN/m ³]	Friktionsvinkel [°]
0	10	18	0
1	10	18	0
3	8	15	30
13	8	16.54	30
16	8	17	30
21	8	17	30
25	8	17	30
28	8	17	30
34	8	17	30

Fall 1: Odränerad analys 3/850

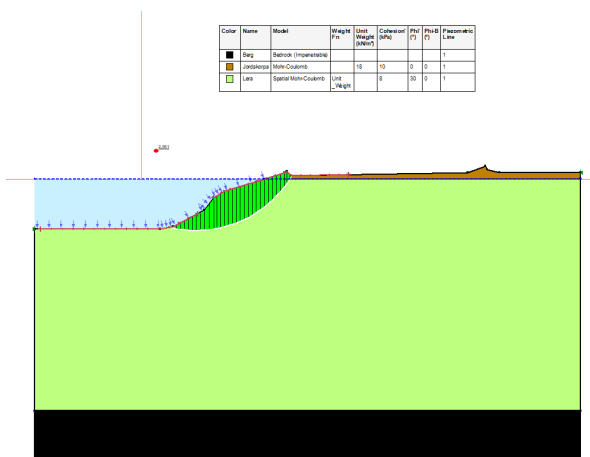


Figur 5.9: Odränerad slänt 3/850 i GeoStudio

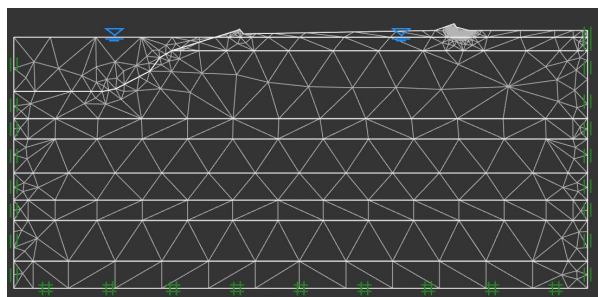


Figur 5.10: Odränerad slänt 3/850 i OptumG2

Fall 2: Dränerad analys 3/850

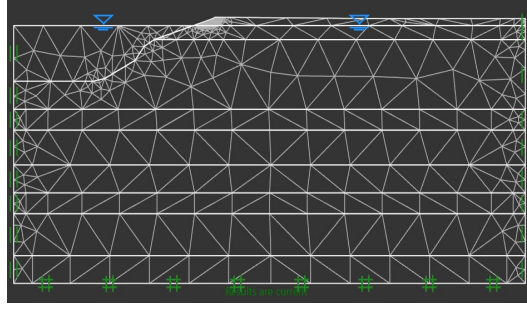


Figur 5.11: Dränerad slänt 3/850 i GeoStudio



Figur 5.12: Dränerad slänt 3/850 i OptumG2

För att illustrera en glidyta i fall 2 med samma placering i GeoStudio som i OptumG2 ändrades geometrin av släntens topp i OptumG2. Det resulterade i att de mindre slänterna på toppen försvann och att programvaran fokuserade på den längre och större slänten.



Figur 5.13: Dränerad slänt 3/850 i OptumG2. Med glidyta lik GeoStudios

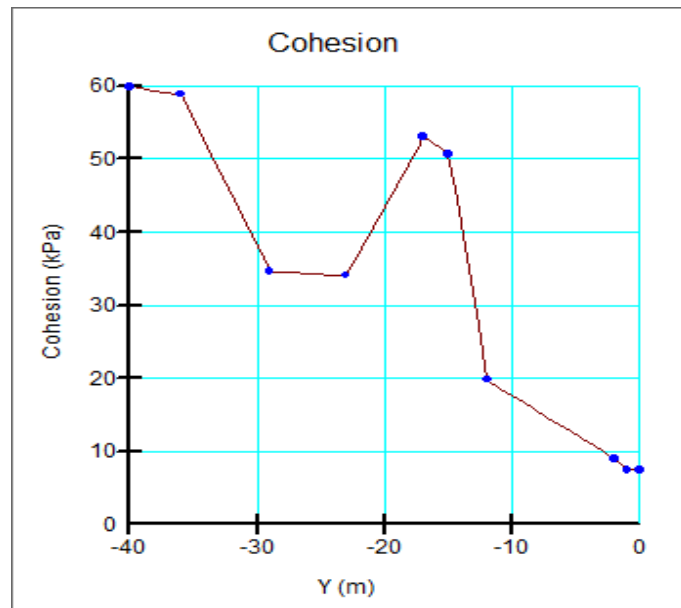
Tabell 5.4: Säkerhetsfaktorer 3/850 i GeoStudio och OptumG2.

	Odränerat	Dränerat
GeoStudio	1.39	2.56
OptumG2	1.62 - 1.65	3.79 - 4.25 (4.49-4.52)

De beräknade säkerhetsfaktorerna i OptumG2 visade ett större motstånd mot brott i jämförelse med GeoStudio både i det dränerade och det odränerade fallet. Glidyterna för fall 1 illustrerade ovan indikerade stora likheter mellan programmen till skillnad från fall 2 där glidyterna skiljde sig åt i både storlek och placering. Förändringarna i OptumG2 påverkade glidyternas placering men stora skillnader mellan säkerhetsfaktorerna och glidyternas placering är fortfarande märkbara.

5.2.2 3/770

Den odränerade analysen av slänt 3/770 konstruerades i programmen med hjälp av kohesioner och tungheter utlästa från mätvärden av sektionens närliggande borrhål. Dessa kohesioner och tungheter antogs öka eller minska linjärt mellan olika djup på samma sätt som i slänt 3/850. I Tabell 5.3 presenteras materialegenskapernas förändring i förhållande till djupet.



Figur 5.14: Odränerad analys 3/770: Kohesion i förhållande till djup i programvaran GeoStudio.

Tabell 5.5: Odränerad analys. Kohesion, tunghet och friktionsvinkel i förhållande till djup

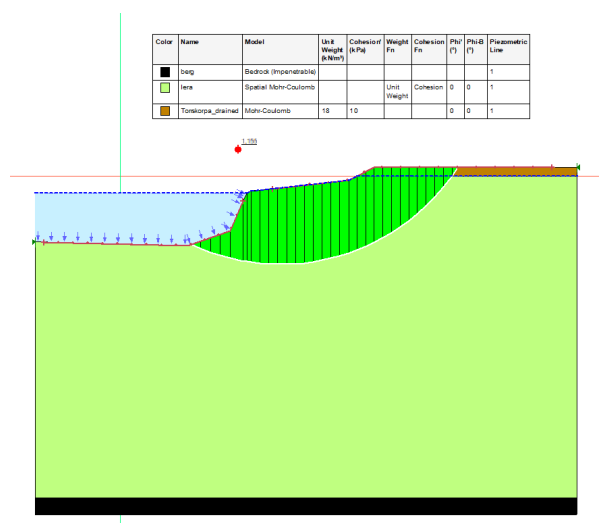
Djup [m]	Kohesion [kPa]	Tunghet [kN/m ³]	Friktionsvinkel [°]
0	10	15	0
1	7.5	15	0
2	9	15	0
12	19.8	16	0
15	50.6	18	0
17	53.1	19	0
23	34.1	16	0
29	34.6	16.95	0

Den dränerade analysen gjordes istället med konstanta kohesion-och friktionsvärden som utlästes grafiskt från givna triaxialförsök. Tabell 5.6.

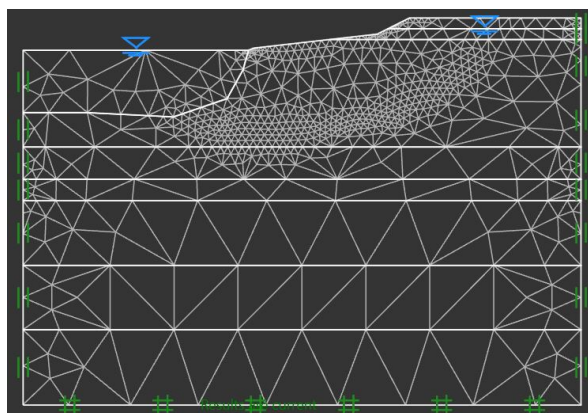
Tabell 5.6: Dränerad analys. Kohesion, tunghet och friktionsvinkel i förhållande till djup

Djup [m]	Kohesion [kPa]	Tunghet [kN/m ³]	Friktionsvinkel [°]
0	10	15	0
1	10	15	0
2	8	15	30
12	8	16	30
15	8	18	30
17	8	19	30
23	8	16	30
29	8	16.95	30

Fall 3: Odränerad analys 3/770

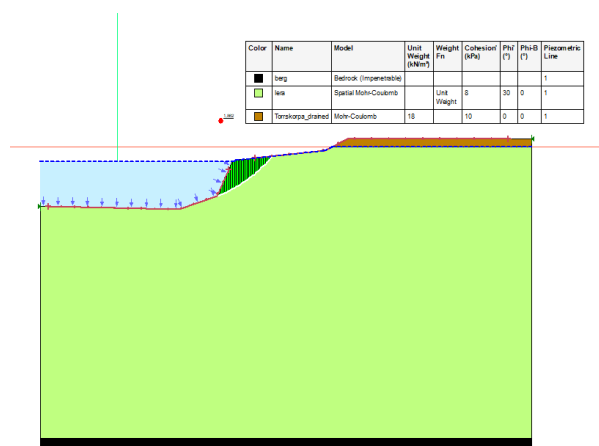


Figur 5.15: Odränerad slänt 3/770 i GeoStudio

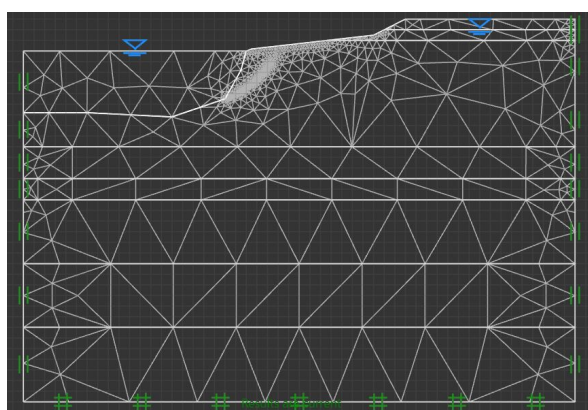


Figur 5.16: Odränerad slänt 3/770 i OptumG2

Fall 4: Dränerad analys 3/770



Figur 5.17: Dränerad slänt 3/770 i GeoStudio



Figur 5.18: Dränerad slänt 3/770 i OptumG2

Även här visade de beräknade säkerhetsfaktorerna i OptumG2 högre motstånd mot brott jämfört med GeoStudio. För varje fall är brottytorna snarlika mellan programmen men skiljer sig åt på grund av en storleksminskning mellan den odränerade och dränerade analysen.

Tabell 5.7: Säkerhetsfaktorer 3/770 i GeoStudio och OptumG2.

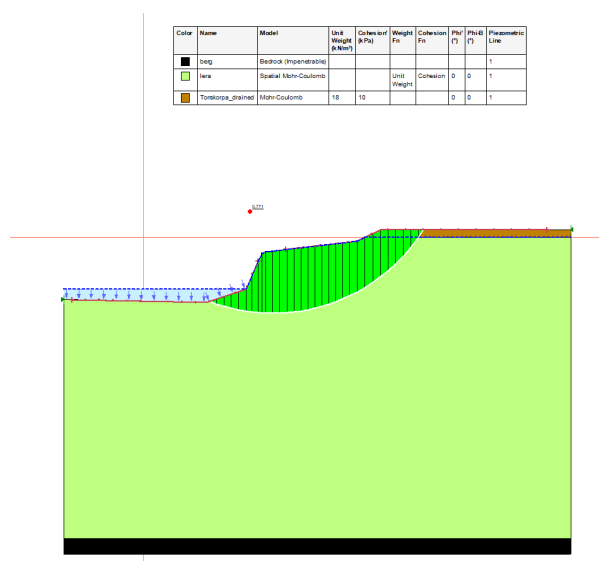
	Odränerat	Dränerat
GeoStudio	1.155	1.86
OptumG2	1.27 - 1.29	2.66 - 2.78

5.3 Modifiering av slänt 3/770

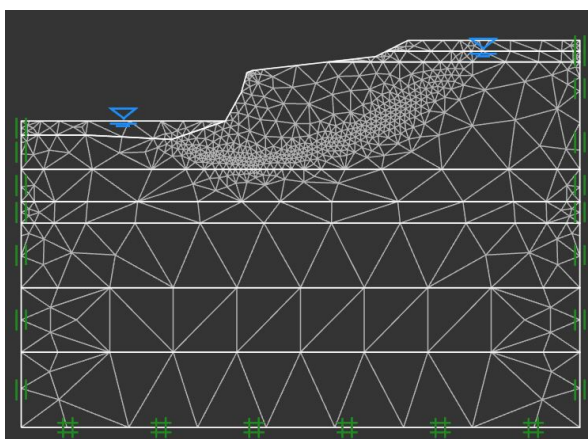
Tidigare avsnitt illustrerade olikheter på två befintliga slänter i dränerade och odränerade tillstånd. Detta avsnitt till skillnad från dem redogör för hypotetiska fall. Vad som skulle hända om vattennivån plötsligt sänks, om en del av stranden försvinner eller om en vikt placeras nära vattnet.

Stabilitetsanalyser för vattenminskning och erosion berör det odränerade fallet medan lastpåfrestningen på slänten berör det dränerade fallet. Den tillagda lasten är en last på 20kPa utbredd på 10 meter.

Fall 5: Sänkning av vattennivå i älven 3/770

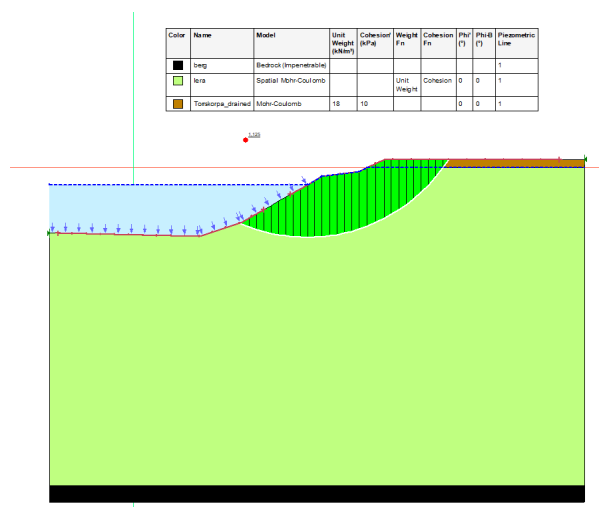


Figur 5.19: Sänkt vattennivå 3/770 i GeoStudio

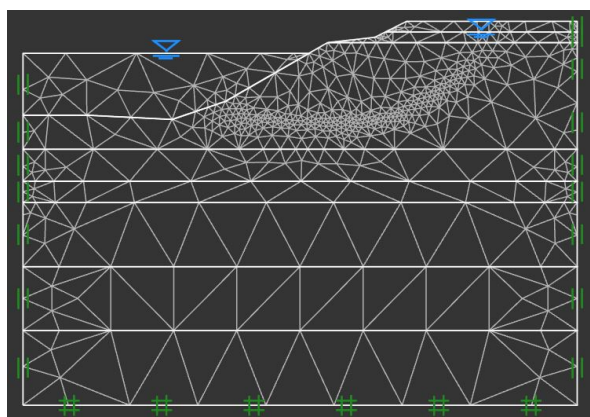


Figur 5.20: Sänkt vattennivå 3/770 i OptumG2

Fall 6: Erosion i slänt 3/770

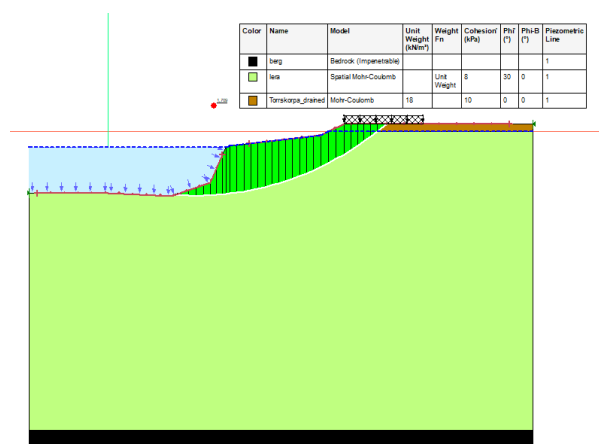


Figur 5.21: Eroderad slänt 3/770 i GeoStudio

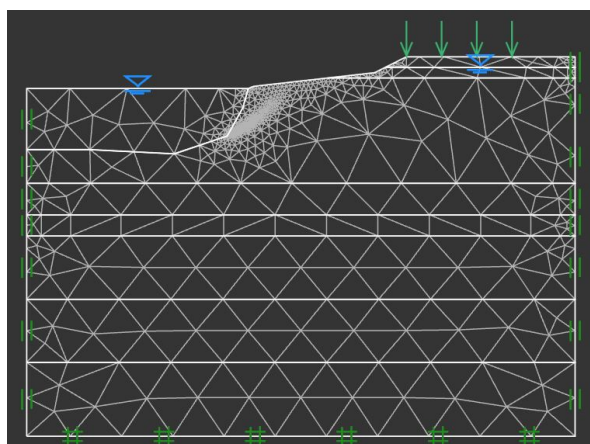


Figur 5.22: Eroderad slänt 3/770 i OptumG2

Fall 7: Yttre last på toppen av slänt 3/770



Figur 5.23: Pålagd utbredd last på slänt 3/770 i GeoStudio



Figur 5.24: Pålagd utbredd last på slänt 3/770 i OptumG2

Tabell 5.8: Säkerhetsfaktorer i GeoStudio och OptumG2.

	Sänkt vattennivå	Eroderad strand	Last
GeoStudio	0.77	1.125	1.71
OptumG2	0.83 - 0.84	1.25 - 1.27	2.50 - 2.81

Samma resultatmönster som för slänt 3/850 upprepas. OptumG2 håller i regel högre säkerhetsfaktorer i jämförelse med GeoStudio (Tabell 5.6). Intressant är glidyornas utseenden i fall 7 och hur $SF < 1$ i fall 5 vilket innebär att programmen förutsätter brott.

Diskussion

Säkerhetsfaktor

En relation mellan GeoStudios funktion SLOPE/W och OptumG2s beräkningar av säkerhetsfaktorn kan utläsas efter analyserna. Där den beräknade säkerhetsfaktorn i GeoStudio är mindre än den i OptumG2. Detta gäller alla fall 1-7 och skillnaden ligger mellan 0.07-1.46. Det som gör att differensen blir så stor är att i fall 2 så uppstår glidyterna på två olika ställen. Om man skulle bortse från fall 2 så blir differensen istället 0.1-0.95, vilket är en betydlig minskning. Att resultaten i programmen blir olika beror på att det är två olika metoder som används (finita elementmetoden och lamellmetoden) och att lammelmotoden vi använder i GeoStudio använder sig av en korrektionsfaktor med avseende på säkerhet som gör att svaret man får ut i GeoStudio alltid blir lite lägre än i OptumG2.

När det gäller direktmetoden så blev de framräknade resultaten större än resultatet från handberäkningen. Detta kan förklaras av att direktmetoden inte är en lika exakt metod som lamellmetoden och finita elementmetoden. Direktmetoden brukar vara en första handberäkning som görs för att få ett ungefärligt svar på en släntanalys. Lamell- och finita elementmetodens resultat visar att skredrisken inte är lika stor som direktmetoden visade.

Fallet med den vertikala slänten är det enda fallet där GeoStudio presenterar ett högre resultat än vad OptumG2 gör. Det exakta resultatet är menat att bli $SF=1$ vilket det blir i OptumG2 om man tar medelvärdet mellan den övre och undre gränsen. I GeoStudio blir svaret dock lite över 1 vilket kan förklaras av att det framtagna sambandet är utformat för finita element beräkningar och inte lammel.

Att på ett produktivt och tillförlitligt sätt beräkna en säkerhetsfaktor och modellera en slänt gör att man säkert kan dimensionera inför framtiden. Konstruerandet av stabila slänter minskar exempelvis materialanvändningen vid lagningar eller ombyggnationer vilket innebär ekonomiska besparingar. Detta leder till en ökad hållbarhet och en minskad klimatpåverkan från byggbranschen som i många andra fall har en stor inverkan på klimatet.

Glidytor

De framtagna glidyterna är i alla beräknade fall av cirkulärcylindrisk form. Glidyterna har liknande utseende i fallen 1,3,4,5 och 6 i GeoStudio och OptumG2. Fall 2 och 7 uppmärksammas på grund av stora skillnader.

I fall 2, den dränerade analysen av slänt 3/850 illustrerar GeoStudio en stor glidytta under

släntens största slutning. OptumG2 exponerar i stället en mindre slänt på torrskorpan som programmet betraktar som mindre säker. Om man bortser från den mindre slänten lägger OptumG2 fokus på samma slänt som GeoStudio. Den nya modellen i OptumG2 bildar en mindre cirkulär glidyta än GeoStudio och ökar den redan stora skillnaden i SF från 1.75 till 2.48. Dessutom når inte den nya glidytan längre ner än Det är vanligt att man bortser från mindre detaljer så som den mindre slänten för att få en analys över det intressanta området vattennivån. Det kan bero på att vattnet i älven utgör en motstående kraft mot slänten och att det inte tas hänsyn till i samma utsträckning i GeoStudio.

I många fall kan det vara belönande att vara detaljerad. I OptumG2 kan detta vara en belastning som ger oreläpanta analyser. Fall 2 är ett tydligt exempel på när ett sådant problem uppstår.

I fall 7 illustreras glidyterna i en dränerad analys när slänten 3/770 belastas. Placeringen av glidyterna är lik mellan programmen men likt fall 2 skiljer de sig märkbart i storlek. Precis som i fall två skiljer sig också SF märkbart enligt Tabell 5.8.

Inverkan av vattennivå, erosion och yttre laster

Konsekvensen av en lägre vattennivå blir en mindre säkerhetsfaktor. Detta eftersom en högre vattennivå bidrar till en bättre stabilitet på grund av att vattentrycket på sidan av slänten bidrar som en motstående kraft.

Erosionens inverkan leder istället till att slänten får en annan geometri som kan bidra till en försämrade hållfasthet. Vilket är intressant med stundande klimatförändringar som leder till extremväder vilket innebär en ökad havsvattennivå och erosion. Där en ökad havsvattennivå kan bidra till en stabilare slänt samtidigt som en ökad havsvattennivå bidrar till mer erosion.

Den yttre lasten på 20kPa försämrade säkerhetsfaktorn med 1 decimal på den dränerade analysen. Detta kan uppfattas som en väldigt liten ändring men i dessa låga nivåer av en säkerhetsfaktor har det en väldigt stor inverkan eftersom man anser att en slänt inte är "tillräckligt säker" om den ligger under 1.2-1.65 beroende på säkerhetsklass och typ av analys. Det är då väldigt viktigt att göra släntanalyser även om den tillagda lasten anses vara liten.

Beräkningsmetodernas styrkor och svagheter

En av GeoStudios styrkor är att programmet är förinställt med säkerhetsmarginaler. Detta medför att svaret alltid blir "säkrare" i och med att man får ut en lägre säkerhetsfaktor än vad det skulle blivit utan säkerhetsmarginaler. Detta är en bra funktion då det är mycket osäkerheter som råder i jorden och det är svårt att få en exakt bild av hur den är uppbyggd, då det ofta är stora jordmassor som ska täckas av undersökningen. I GeoStudio finns också funktionen att se många olika glidytor som har andra säkerhetsfaktorer vilket skiljer sig från OptumG2 där man bara får ut två glidytor, en för den övre gränsen och en för den undre gränsen.

En av styrkorna i OptumG2 är att programmet själv räknar ut vart glidytan kommer

uppstå, vilket skiljer sig från GeoStudio där vi använde oss av funktionen "Entry and exit". Detta innebär att en själv måste förutsäga var glidytan kommer uppstå.

GeoStudio delar upp kritiska slänter i en glidyta bestående av lameller och lämnar resterande del av marken oanalyzerad. OptumG2 delar däremot upp hela slänten med hjälp av en mesh bestående av ett förvalt antal element. Meshfunktionen illustrerar slänternas glidytor på ett så noggrant sätt som det önskas då noggrannheten höjs när antalet element ökas. Att veta var kollapsen inträffar först är bra i fall det önskas en förstärkning av slänten. Utöver det har OptumG2 förmågan att visa animationer av brottets rörelser till skillnad från GeoStudio. Detta är ett intressant estetiskt verktyg som kan vara fördelaktigt vid presentationer.

Vad som mer skiljde sig var hur programmen gick till väga för att hitta säkerhetsfaktorer. OptumG2 multiplicerar gravitationskraften till brott uppstår. I GeoStudio är det inget som driver till kollaps, det bygger enbart på jämviktsekvationer där kraften som ligger på slänten jämförs med hållfastheten i jorden. OptumG2s tillvägagångssätt uppfattades mer hållbart då en global jämvikt användes istället för en jämvikt mellan lamellerna.

Genom att bygga stabila slänter som inte rasar minskar man materialanvändningen vid lagningar eller ombyggnationer vilket leder till en minskad miljöpåverkan från byggbranschen som i många andra fall har en stor miljöpåverkan.

Slutsats

De framräknade säkerhetsfaktorerna i respektive program skiljer sig åt för varje fall men påvisar ett upprepande mönster, där GeoStudio alltid är mindre optumG2 och differensen mellan dem inte är större än 0.95 om samma glidyta studeras i båda programmen, vilket ofta är fallet. Ibland inträffar det dock att de skiljer sig både i utseende och placering. Detta gör då att utfallet blir väldigt olika varandra.

Programmen delar en del grundläggande likheter som material- och geometriinställningar men det som gör dem intressanta är deras olikheter. OptumG2 är ett enkelt program som samtidigt tilltalar en estetisk vilket återges i hur ett brott illustreras med hjälp av mesh och animation. GeoStudio däremot kräver en del förståelse, då kvalificerade gissningar krävs för att få ut ett svar.

Det har visat sig genom arbetsgången att inverkan av yttre faktorer kan innebära att farliga situationer uppstår. Exempelvis när vattennivån och vattenflödet i en älv pendlar ges olika säkerhetsfaktorer vilket är något som måste tas i beaktning vid beräkningar.

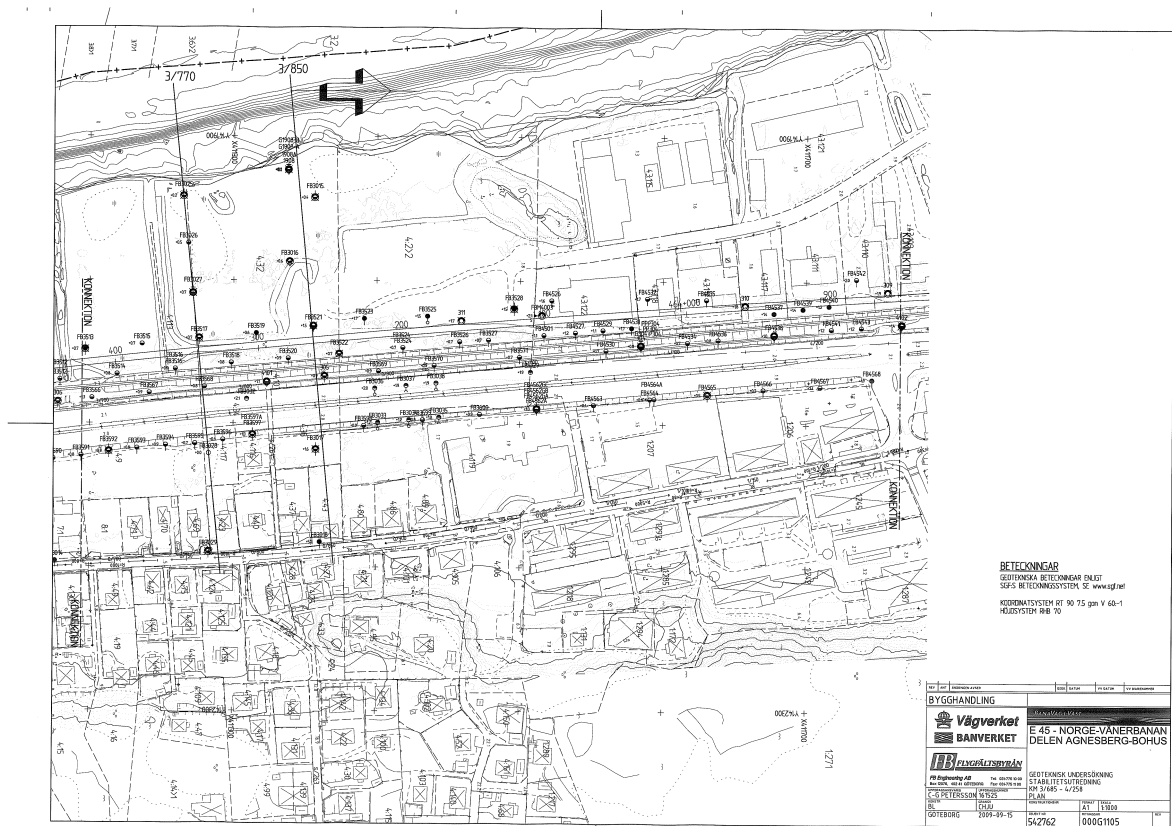
I scenarier där osäkerheten är stor lämpar sig GeoStudio bättre för att det finns en medräknad säkerhetsmarginal medan i scenarier som är mer undersökta och detaljerade passar OptumG2 bättre då dess globala jämvikt resulterar i ett mer exakt svar. Detta är hur appliceringen av programmen till verkligheten med hänsyn till dess svagheter och styrkor uppfattas.

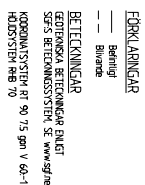
Bibliography

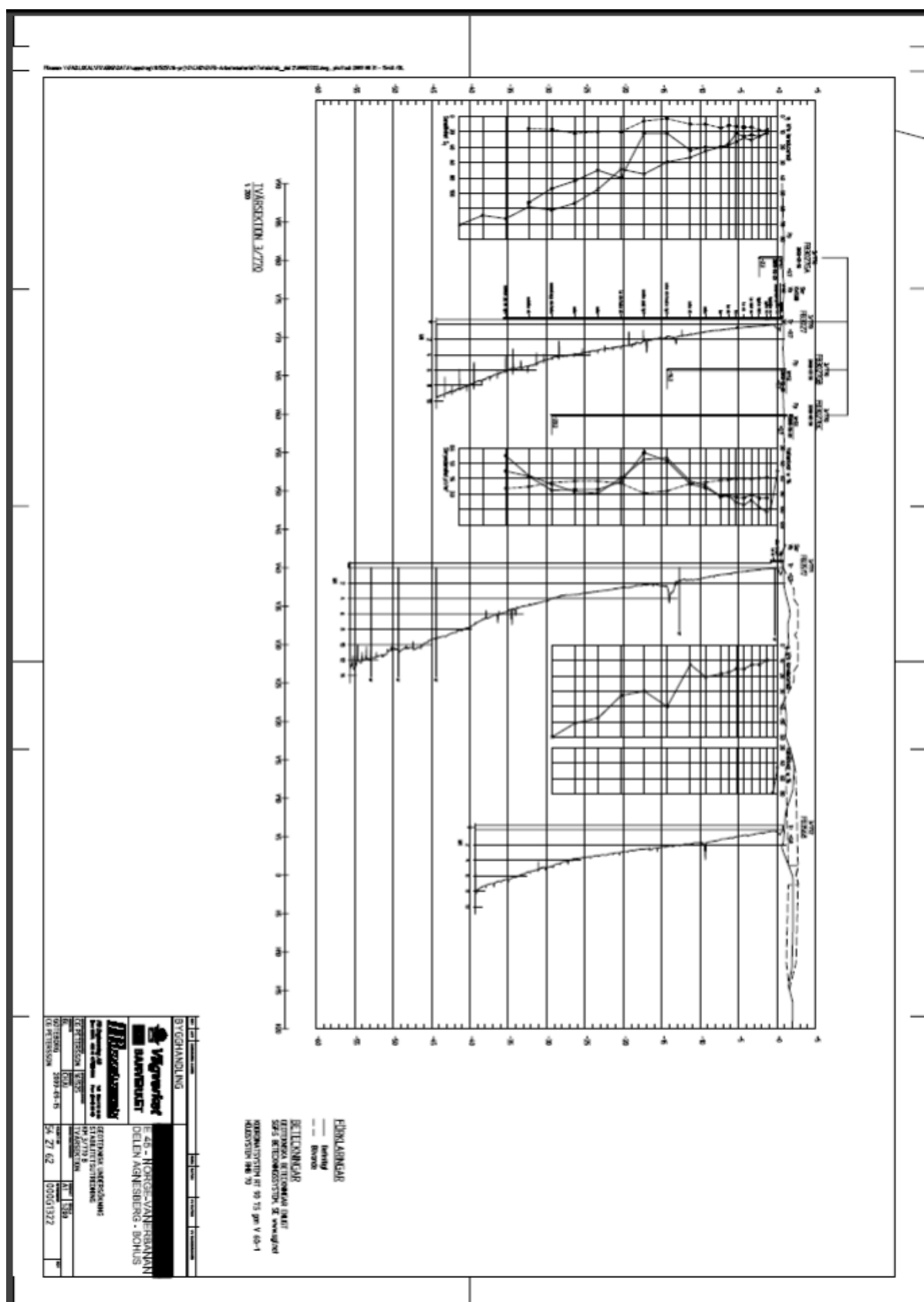
- Allen, M., Dube, O., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, S., Humphreys, M., ... Zickfeld, K. (2018). *Global warming of 1.5 °c*. intergovernmental Panel on Climate Change.
- Burman, A., P. Acharya, S., Sahay, R. & Maity, D. (2015). A comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16, 467–492.
- Cheng, Y. & Lau, C. (2014). *Slope stability analysis and stabilization*. CRC Press.
- Dehn, M., Bürger, G., Buma, J. & Gasparetto, P. (2000). *Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling*. Elsevier.
- Fredlund, D. & Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. University of Saskatchewan.
- GeoSlope International, L. (2018). *Stability modeling with geostudio*.
- Kilburn, R. C. & Petley, N. D. (2003). *Forecasting giant, catastrophic slope collapse: Lesson from vajont, northern italy*. Elsevier.
- Knutsson, S., Larsson, R., Tremblay, M. & Öberg-Högsta, A. (1998). *Siltjordars egenskaper*. Statens geotekniska institut.
- Krabbenhoft, K. (2018). *Optumce/features manual, version 2018*. OptumCE.
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Statens geotekniska institut.
- Pastor, J., Thai, T. & Francescato, P. (2003). New bounds for the height limit of a vertical slope. *Communications in numerical methods in engineering*.
- Sällfors, G. (2013). *Geoteknik*. Cremona Förlag.
- SGI. (2015). *Stabilitetsförhållanden i göta älvdalen. vägledning vid användning av resultat från göta älvutredningen*. Statens geotekniska institut.
- SGI. (2018a). *Ras, skred och slamströmmar*. Statens geotekniska institut.
- SGI. (2018b). *Skredrisk göta älv*. Statens geotekniska institut.
- Skredkommissionen. (1995). *Anvisningar för slänstabilitetsutredningar*. Statens geotekniska institution.
- Svensson, C. (1996). *Ingenjörsgelogiska exkursion, sveriges jordarter*. Lund Tekniska Högskola.
- Trafikverket. (2011). *Trv geo, trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner*.

Bilagor

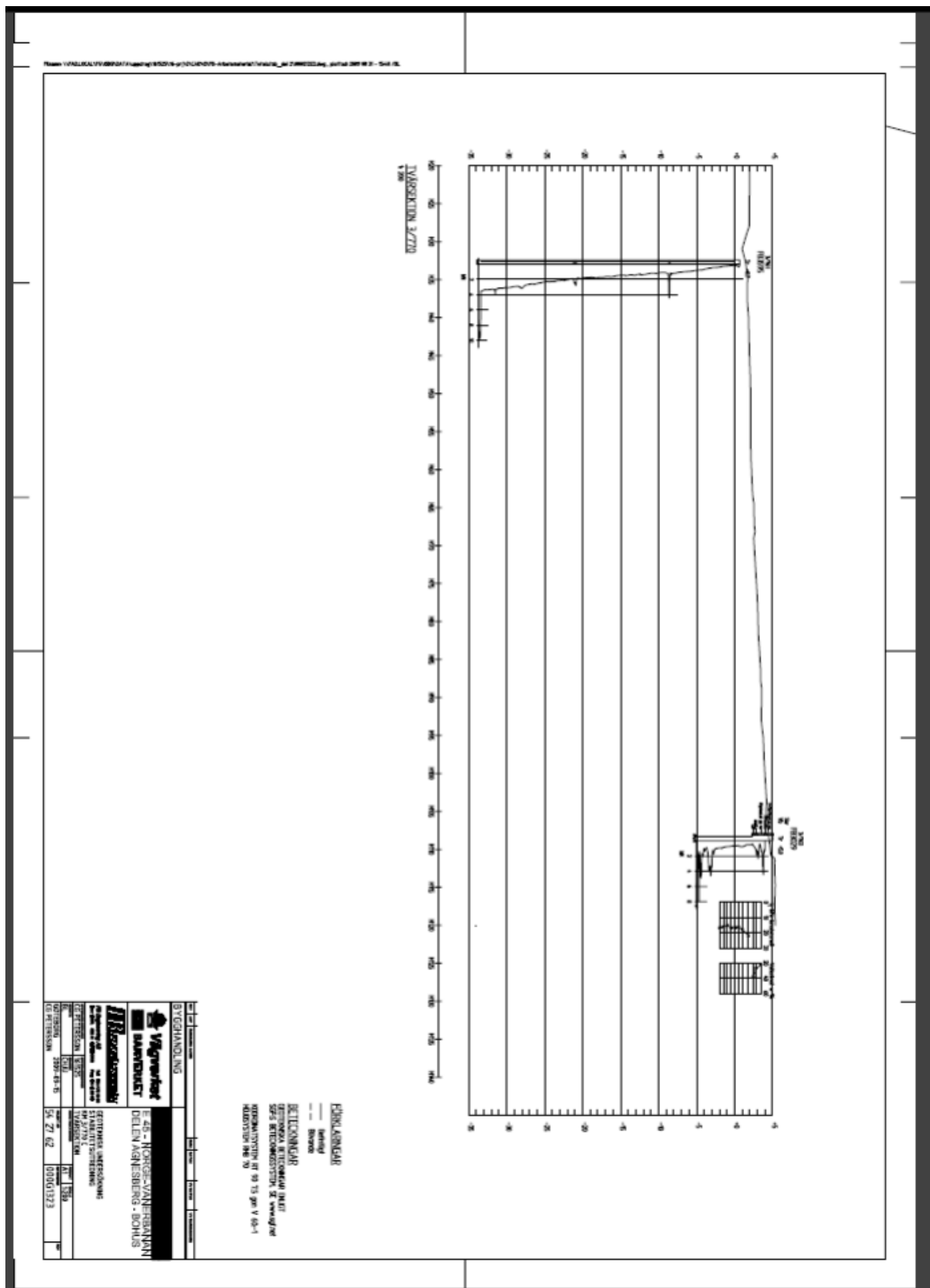
Bilaga 1

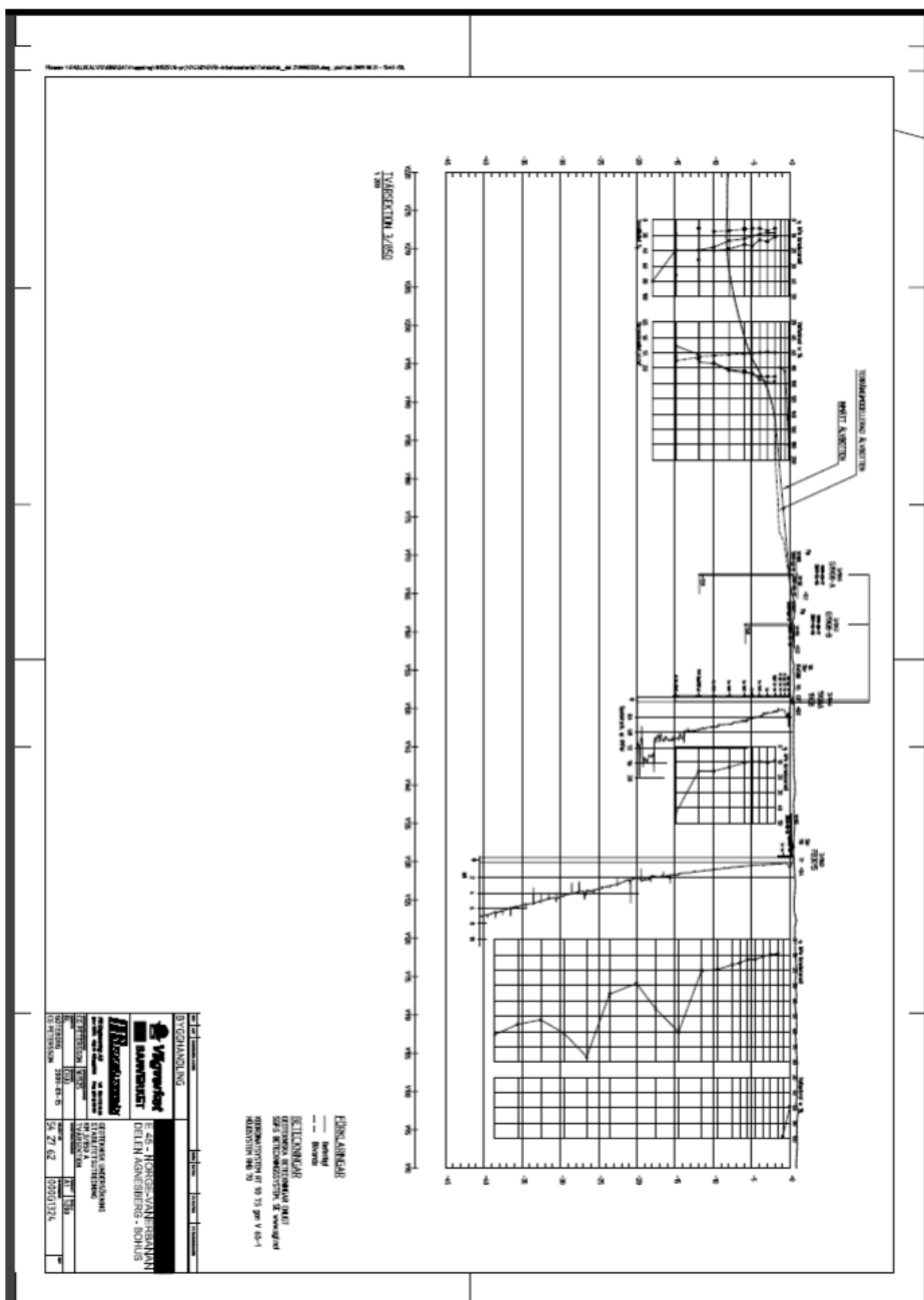


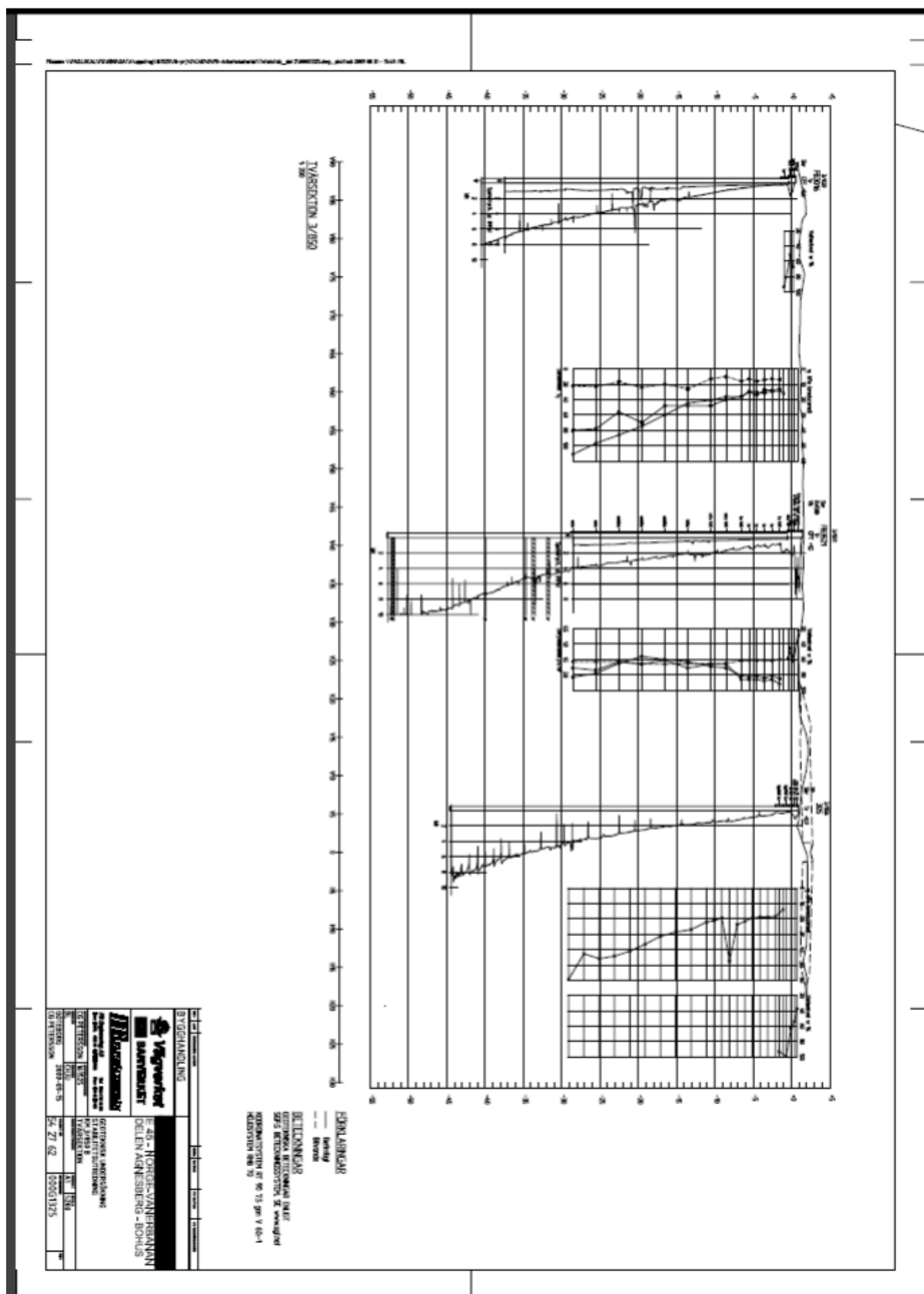


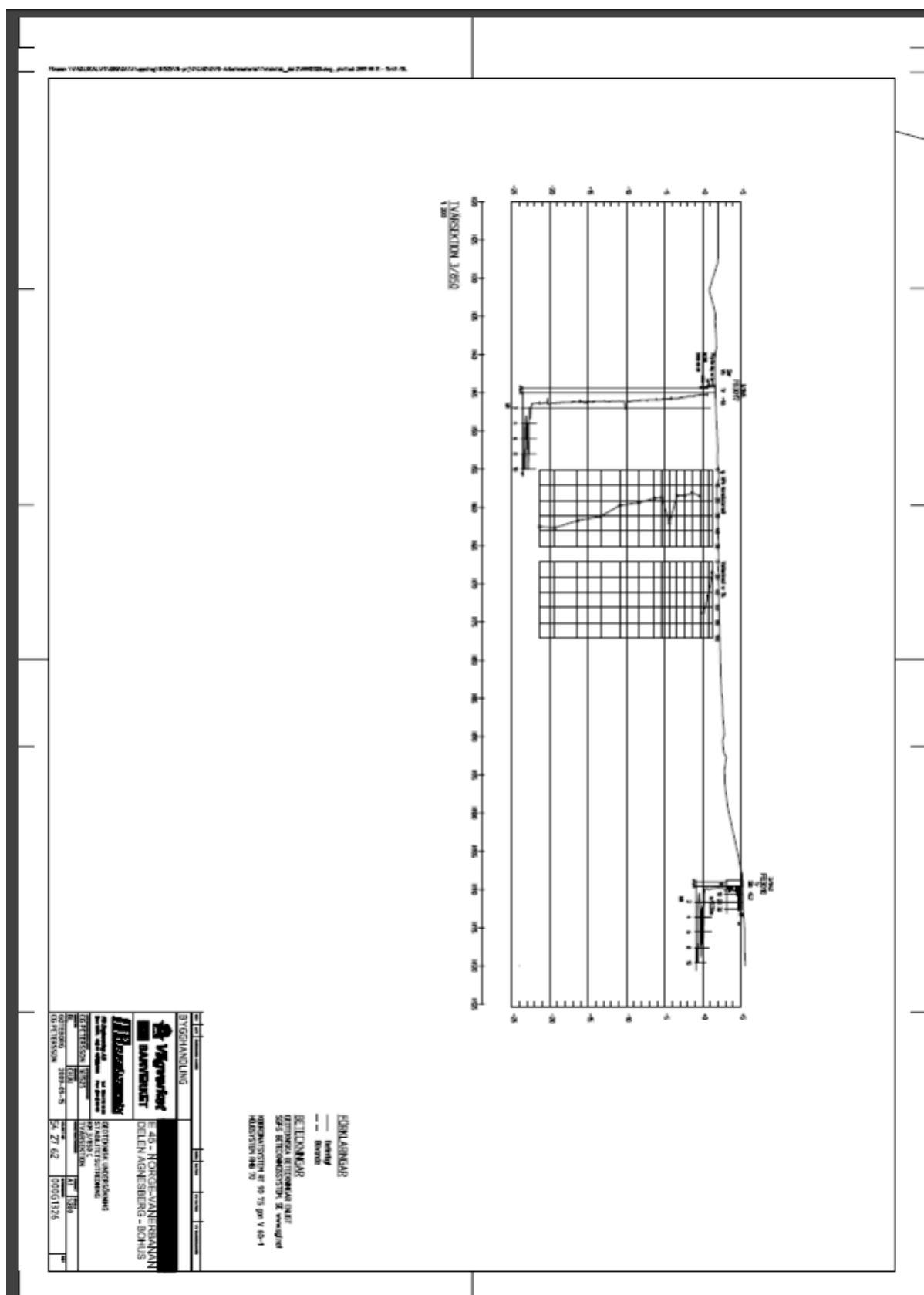


Bilaga 4









Bilaga 8

Chalmers tekniska högskola GEO

Triax försök, aktivt & passivt odränerat

Provet har belastat upp till angivna konsolideringsspänningar och har sedan fått konsolidera i ca ett dygn.

Konsolidering:

Datum: 2009-10-28
Projekt: E45
Punktnummer: FB2201, FB2202, FB2203
Djup: 12m, 18m, 24m, 30m
Tub:
Utförare: Peter Hedborg

