



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Analys av släntstabilitet med hänsyn till klimatförändringar

En studie av naturliga slänter i Göta älvdalen

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

Marcus Berghamn Claesson
Alfred Kindberg
Melisa Nikmanesh
Linda Oscarsson

Kandidatarbete 2019

Analys av släntstabilitet med hänsyn till klimatförändringar

En studie av naturliga slänter i Göta älvdalen

MARCUS BERGHAMN CLAEISSON
ALFRED KINDBERG
MELISA NIKMANESH
LINDA OSCARSSON

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2019

Analys av släntstabilitet med hänsyn till klimatförändringar
En studie av naturliga slänter i Göta älvdalen

MARCUS BERGHAMN CLAESSON
ALFRED KINDBERG
MELISA NIKMANESH
LINDA OSCARSSON

© MARCUS BERGHAMN CLAESSON, ALFRED KINDBERG, MELISA NIKMANESH, LINDA OSCARSSON, 2019

Handledare: Carolina Sellin
Examinator: Minna Karstunen

Kandidatarbete 2019:06
ACEX-10-19-34
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg

Typeset i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2019

Sammandrag

Göta älvdalen är i dagsläget ett högriskområde för skred, vilket gör området intressant att undersöka. Släntstabiliteten kan komma att förändras till följd av de klimatförändringar som sker. Denna rapport undersöker hur släntstabiliteten i Göta älvdalen kan komma att påverkas av klimatförändringar såsom förändrade vattennivåer, erosion på grund av ökat vattenflöde samt minskad växtlighet ovanpå slänten. Specifikt undersöks en slänt i Surte utanför Göteborg för verkliga förhållanden, samtidigt som den jämförs med en typslänt med samma materialparametrar, men annorlunda geometri. Simuleringar av dagens stabilitet samt de framtida scenariorna genomfördes i programmet GeoStudio 2018. Både simuleringar av enskilda förändringars inverkan på släntstabiliteten, samt en sammanställd analys där alla faktorer från klimatförändringar vägdes in utfördes. Resultatet visade att släntstabiliteten i framtiden kommer minska till följd av klimatförändringar och det som hade störst inverkan på släntstabiliteten var erosion av älvbotten. I rapporten behandlas även olika sätt att analysera en slänts stabilitet med hjälp av dränerat, odränerat eller kombinerat fall. Dessa gav, enligt förväntningar, olika resultat i simuleringarna. Även skillnader mellan framtagna säkerhetsfaktorer baserat på totalsäkerhetsanalys eller partialkoefficienter diskuteras. Slutligen konstateras att enligt de genomförda undersökningarna kommer släntstabiliteten med största sannolikhet att minska till följd av klimatförändringar.

Keywords: släntstabilitet, klimatförändringar, Göta älvdalen

Abstract

Today, the Göta River Valley is a high risk area in terms of slope failure, which makes the area interesting to research. The slope stability in the area might change due to ongoing climate changes. This report aims to analyze how the slope stability in the Göta River Valley might come to shift according to climate changes such as decreasing ground water levels, erosion due to an increased water flow in the river and reduced vegetation. A slope in Surte, outside of Gothenburg is examined to find the real conditions, and is compared to an imaginary slope with the same materials but with a different geometry. Simulations of today's stability as well as future scenarios are carried out in GeoStudio 2018. Both simulations of individual factors as well as a combination of the climate change factors were executed. The results showed that the factor with the most influence was erosion of the river bottom, and that the slope stability will decrease in the future due to climate change. The report also compares the differences in drained, undrained and combined analysis of slope stability which, as expected, showed varying results in the simulations. Differences between methods of determining factors of safety are also discussed, the comparison is between total and partial factors of safety. At last it is established that according to the carried out analyzes the slope stability will decrease due to climate changes.

Keywords: slope stability, climate change, Göta River

Tabeller

3.1	Givna partialkoefficienter från Eurocode	15
3.2	Given partialkoefficient, γ_d från Eurocode	16
3.3	Faktorn F_{EN} för respektive säkerhetsklass	16
6.1	Vattennivåer vid fem olika platser längs Göta älv på sträckan Lilla Edet - havet för två olika flöden	25
6.2	Tabellen visar säkerhetsfaktorer för olika sprickdjup för studerad verklig slänt	32
7.1	Redovisade säkerhetsfaktorer med respektive minskning för verkliga slänten	41
7.2	Redovisade säkerhetsfaktorer med respektive minskning för typslänten	41
7.3	Redovisad skillnad mellan totalsäkerhetsanalys och Eurocode för den verkliga slänten	42
7.4	Redovisad skillnad mellan totalsäkerhetsanalys och Eurocode för den typslänten	42
7.5	Dagens och framtidens procentuella minskning för Eurocode respektive totalsäkerhetsanalys	43

Ekvationer

3.1 Säkerhetsfaktor för moment	10
3.2 Säkerhetsfaktor för kraft	10
3.3 Geoteknisk last	15
6.1 Ökad kohesion på grund av rötter 1	31
6.2 Ökad kohesion på grund av rötter 2	31
6.3 Sprickdjup	32

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Metod	1
1.3	Avgränsningar	2
2	Göta älvdalen	3
2.1	Närområdet	4
3	Släntstabilitet	6
3.1	Lamellmetoden	6
3.1.1	GeoStudio	8
3.1.2	Morgenstern & Price metod	9
3.2	Dränerad och odränerad analys	11
3.3	Säkerhetsfaktor	12
3.3.1	Totalsäkerhetsanalys	13
3.3.2	Eurocode	14
4	Klimatförändringar	17
4.1	Vattennivå	17
4.2	Erosion	17
4.3	Vegetation	18
4.4	Sprickbildning	19
5	Beräkningsförutsättningar	20
6	Resultat för släntberäkningar	23
6.1	Vattennivåförändringar	24
6.1.1	Ökning av grundvatten- och älvnivå på grund av regnperiod	26
6.1.2	Minskning av grundvatten- och älvnivå på grund av en torrperiod	27
6.1.3	Vattenflöden på grund av övergång från högtintensiv regnperiod till torrperiod	27
6.2	Erosion	28
6.3	Vegetation	30
6.4	Sprickbildning	31
6.5	Porövertryck	33
6.6	Klimatförändringarnas sammanlagda inverkan	33
6.7	Eurocode	35

7	Diskussion	38
7.1	Jämförelse mellan slänter till följd av klimatförändringar	38
7.2	Kombinerad, dränerad och odränerad analys	40
7.3	Totalsäkerhetsanalys och Eurocode	42
7.4	Felkällor	43
7.4.1	Materialparametrar och klimatförändringar	43
7.4.2	Utvärderingar av försök	44
7.4.3	Simuleringar	45
7.4.4	Eurocode och totalsäkerhetsanalys	46
8	Slutsats	47
	Litteraturförteckning	48

1

Inledning

I dagsläget kostar skred svenska samhället cirka 200 miljoner kronor årligen (SGI, u.å.). Längs med Göta älv finns många farliga slänter och genom åren har flera omfattande ras inträffat. Ett större ras idag har potential att orsaka enorma problem för Göteborgs dricksvatten och infrastruktur i form av väg, järnväg och fartygstrafik samt i närområdet där byggnader riskerar att ta skada. Säkerhetsfaktorer för släntstabilitet är dimensionerade efter dagens förhållanden och klimatförändringarnas påverkan är relativt outforskade. Effekterna på släntstabiliteten till följd av klimatförändringar skiljer sig mycket i olika geografiska områden. Detta på grund av att klimatet förändras annorlunda i olika regioner och att geologin skiljer sig, dessutom har Göta älv ett tappningssystem och erosionsskydd som måste tas hänsyn till. Släntstabilitet i Göta älv kommer ha unika konsekvenser vilket gör att studier från andra områden skapar en missvisande bild. Olika klimatscenarier har tagits fram för området kring Göta älv. Det har exempelvis studerats hur erosion leder till ändrade tvärsektioner samt vad ökad nederbörd kan innebära för markens grundvattennivåer. Dock saknas en helhetsbild där samspel mellan de olika konsekvenserna råder och vad detta konkret leder till när det gäller säkerhetsfaktorer för släntstabilitet. En komplett simulering av förhållanden i framtiden kan alltså argumenteras vara helt frånvarande och är nödvändig för att kunna förhindra framtida katastrofer i Göta älv.

1.1 Syfte

Arbetets syfte är att kartlägga konsekvenser av olika klimatförändringar som speglar förhållanden i framtiden för Göta älvmrådet. En helhetsbild skall tas fram genom att se hur konsekvenserna av olika klimatförändringar samspelar med varandra, detta för att skapa en grund för utveckling av framtida säkerhetsfaktorer inom släntstabilitet som tar hänsyn till klimatförändringarnas påverkan på naturliga slänter. Kombinerad, dränerad och odränerad analys samt eurocode och totalsäkerhetsanalys skall jämföras och deras respektive verklighetsspeglings diskuteras.

1.2 Metod

Undersökningen utgår från en verklig slänt, belägen i Surte strax söder om Kungälv. Slänten ligger längs Göta älv och materialparametrar utvärderas från prover i närhe-

ten av slänten. Med analys av givna mätdata samt utförd fältstudie ackumulerades nödvändig information för undersökandet av släntens stabilitet. Givet var jordens tunghet och geometri, grundvattennivån och skjuvhållfastheten från triaxialförsök, trycksondering, CRS- och CPT-försök. Slänten består av lera och delades in i olika jordlagerföljder med hjälp av dess tunghetsvariationer och från tidigare vingförsök, direkta skjuvförsök, triaxialförsök samt fallkonförsök. För att göra analysen användes dataprogrammet GeoStudio 2018. Inget program kan i dagsläget spegla verkligheten exakt men valet föll på det ovannämnda eftersom det är etablerat inom branschen och tidigare erfarenheter fanns bland författarna.

Till att börja med analyserades slänten för nuvarande förhållanden och därefter med hänsyn till framtida, då klimatförändringarna bidrar till ökade påfrestningar på slänten. Olika klimatförändringar testades var för sig, sedan simulerades en kombination av alla som skall spegla ett värsta scenario år 2100. Valet av relevanta förändringar och storleken på förändringarna i slänten sammanställdes från flertalet studier om klimatförändringar och dess påverkan på bland annat hydrogeologi och erosion. Tester gjordes i dränerad, odränerad och kombinerad analys, även en jämförelse mellan Eurocode och Totalsäkerhetsanalys gjordes. Alla resultat jämfördes med varandra och de olika skillnaderna diskuterades.

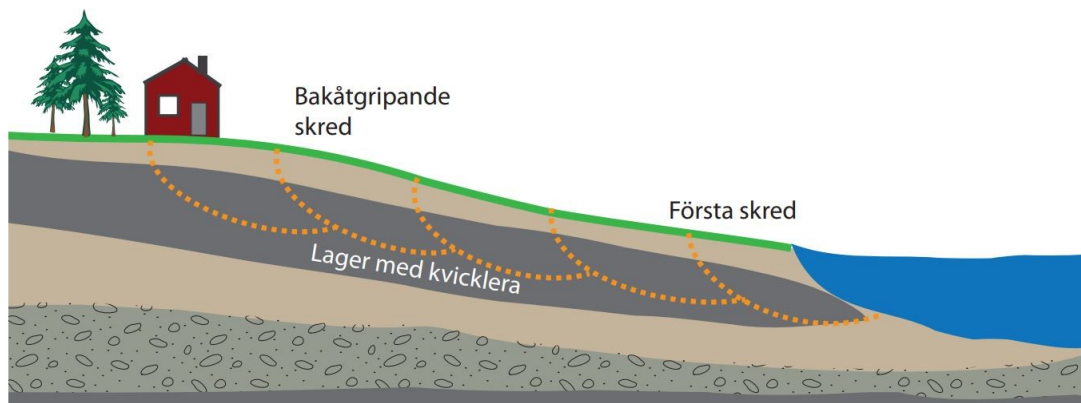
För att kunna jämföra resultaten modellerades en typslänt som analyserades på samma sätt. Denna har givits samma materialparametrar som den verkliga slänten, men en annorlunda geometri. Detta för att kunna applicera förändringarna som sker i stabiliteten på fler områden och få en mer generell bild av klimatförändringarnas påverkan i Göta älvdalen, samt att få en bredare bild av vilka förändringar som ger störst påverkan på olika typer av slänter.

1.3 Avgränsningar

Avgränsningar har gjorts på flera olika områden i projektet, detta för att säkerhetsställa kvalitén och utförligheten i arbetet. Undersökningen fokuserar på naturliga slänter i Göta älvdalen, med klimatförändringar fram till år 2100, då de längsta prognoserna för klimatförändringar sträcker sig till den tidpunkten. Även avgränsning i form av programvara för analys har valts. Det finns en mängd olika program för att räkna på släntstabilitet och för detta arbete har GeoStudio 2018 valts, detta då syftet inte är att jämföra resultaten i olika program utan få en överskådlig bild av klimatförändringars påverkan på släntstabilitet. Klimatförändringar skapar förändringar inom alla väderförhållanden, alla kommer att påverka släntstabilitet i någon grad men fokus ligger på de som skapar en betydande skillnad. Klimatförändringarna är inte konstanta ur ett geografiskt perspektiv, därför kommer de ha olika påverkan på slänter i olika delar av landet och världen.

2 Göta älvdalen

För att kunna göra analyser av släntstabilitet, samt förstå bakgrunden till varför Göta älvdalen är så skreddrabbat behövs en förståelse för den generella sammansättningen av jorden i området. Den huvudsakliga jordarten i Göta älvdalen är lera, vars mäktighet är mycket stor (SGI, 2012). Leran har avsatts under högsta-kustlinjen, vilket innebär att den till en början innehållit saltvatten men som efter tid lakats ur. Detta fenomen innebär att delar av leran är kvicklera, som leder till att de skred som sker fortplantar sig längre upp och i sidled längs med slänten och orsakar på så sätt större ras, se figur 2.1.



Figur 2.1: Utbredningen vid ett bakåtgripande skred (SGI, 2015)

Processen för bildandet av kvicklera går till så att när sötvatten flödar genom leror avsatta i saltvatten, tar vattnet med sig en liten del av saltpartiklarna och med tiden finns inget salt kvar i leran, denna process kallas urlakning. Saltet fungerar som en sammanhållande kraft mellan lerpartiklarna. När det försvinner får leran lägre flytgräns och därmed högre sensitivitet. Detta innebär att relativt små skakningar i marken kan göra att leran får sämre egenskaper och i värsta fall blir helt flytande. Den största faran med kvicklera är att ett litet skred lätt kan bli större på grund av att leran skakas om och skapa något som liknar en dominoeffekt. Det finns ingen anledning att förändra säkerhetsfaktorn för slänten på grund av kvicklera, men i ett område med sammanhängande högsensitiv lera är aldrig säkerhetsfaktorn högre än den svagaste punkten (Åhnberg m. fl., 2011). Eftersom Göta älvdalen ligger under högsta kustlinjen är en stor del av leran högsensitiv och finns främst norr om Lilla Edet men förekommer lokalt även i andra delar. Kvicklera gör det ännu viktigare att ta reda på hur släntstabiliteten förändras med hänsyn till klimatförändringar,

dock är förekomsten av kvicklera inget som tas i beaktning när slänterna undersöks i GeoStudio.

2.1 Närområdet

Längs med Göta älv finns enligt Statens Geotekniska Instituts (SGI) utredning drygt 11 000 fastigheter (SGI, 2012), varav 600 är ämnade åt specialverksamhet såsom skolbyggnader och vårdlokaler. Ett flertal industrier finns även längs med älven vilket vid ett ras kan innebära stora skador på näringslivet. En skada på en industri kan leda till ett utsläpp av miljöfarliga ämnen vilket särskilt i Göteborgsområdet skulle ha stor inverkan på samhället då en stor del av Göteborgs dricksvattenförsörjning kommer från Göta älv.



Figur 2.2: Släntens lokalisering utanför Surte. Bild från Google Maps.

Historiskt längs Göta älv i höjd med Surte där slänten ligger (se figur 2.2) har flera skred tidigare förekommit. På grund av att det finns kvicklera i området har skreden blivit mycket omfattande. Hela Göta älvdalen är känslig för skred och det är även i Göta älvdalen som det inträffat flest skred i hela Sverige (SGI, 2012). Detta gör området intressant att undersöka ur klimatsynpunkt då det redan i nuläget finns risker för skred, samt att det kan påverkas ytterligare i framtida scenarion. Vid ett fältbesök vid slänten noterades vilka byggnader som finns vid slänten och i närområdet runt den för att få en uppfattning om hur stora riskerna på närliggande infrastruktur blir vid ett potentiellt skred. Det som identifierades kunna påverkas

av ett skred var främst vägar, en järnväg och en motorbåtsklubb placerad ovanpå slänten. Bortanför vägen och järnvägen ligger bostadshus som också skulle kunna drabbas av ett eventuellt skred. Längs med älvkanten ligger flertalet industrier som kan anses vara uppbyggda på en liknande slänt som den undersökta.

3

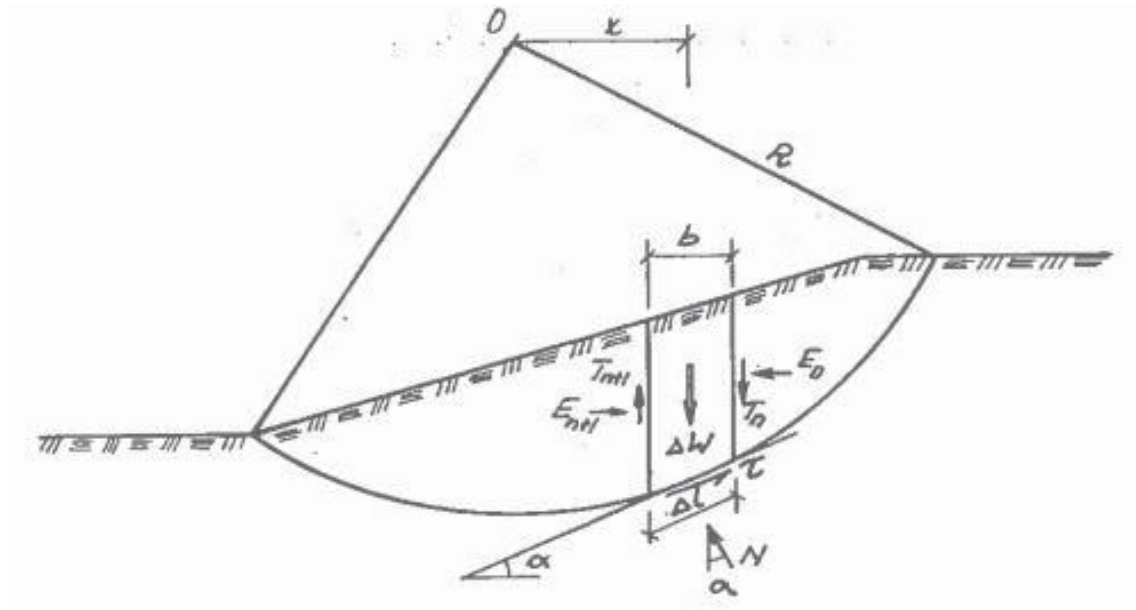
Släntstabilitet

Släntstabilitet är begreppet som redogör för den motståndskraft som råder vid en lutande markyta. Begreppet omfattar en viktig aspekt av samhällsbyggandet som beskriver jordens komplexa beteende. För att kunna redovisa en passande och korrekt formulering av stabilitetsproblemet krävs väsentlig förståelse kring innebörden för underliggande jordmekanik. En redogörelse för analysmetoder av släntstabilitet innefattar bland annat olika former av ekvationer, tabeller och tillämpningsprogram. De olika metoderna kan användas i kombination med varandra (Duncan, Wright & Brandon, 2014).

Skred sker vid icke tillräcklig släntstabilitet och innebär att jämvikten upphör i en koherent jordmassa vilket etablerar en obalans i befintliga krafter som sätter jordmassan i rörelse. Av den anledningen påverkas stabiliteten i en slänt både av förändrad hållfasthet i jorden eller utomstående belastning. Skred är vanligast förekommande i silt- och lerjordar men även i vattenmättade siltiga eller leriga moräner (SGU, u. å.). Således måste det tas hänsyn till den ökade belastningen, minskade motvikten vid släntfoten och försämringen av jordens hållfasthet vid olika typer av dimensioneringar (SGI, u. å.).

3.1 Lamellmetoden

En vanlig metod för att beräkna släntstabilitet, som går att utföra med handberäkningar eller inlagt i ett beräkningsprogram, är lamellmetoden. Lamellmetoden går ut på att en glidyta delas upp i ett antal lameller där jämvikt ställs upp för varje lamell. Glidytan är där brottet sker i ett skred, den visas som den undre halvcirkeln i figur 3.1. Hur jämvikten ställs upp varierar något mellan olika metoder men grunden är uppbyggd på samma sätt. Ofta är glidytan i princip cirkulär-cylindrisk men ibland kan den anta andra former (Knappett & Craig, 2012). Detta kan hända då jorden är inhomogen, till exempel om jorden består av olika material på olika djup eller har betydande sprickbildning. Metoden illustreras i figur 3.1.



Figur 3.1: Lamellmetoden för en cirkulärcylindrisk glidyta (Sällfors, 1984)

ΔW : lamellens egenvikt.

E_n : horisontella normalkrafter på lamellen.

T_n : skjuvkrafter på sidorna av lamellen, oftast kallad X .

b : lamellens bredd.

Δl : längden på lamellens cirkelbåge i basen.

x : hävarm till lamellens mittpunkt.

R : avståndet till mitten av lamellens underkant, även cirkelns radie vid glidyta.

N : normalkraft mot glidytan.

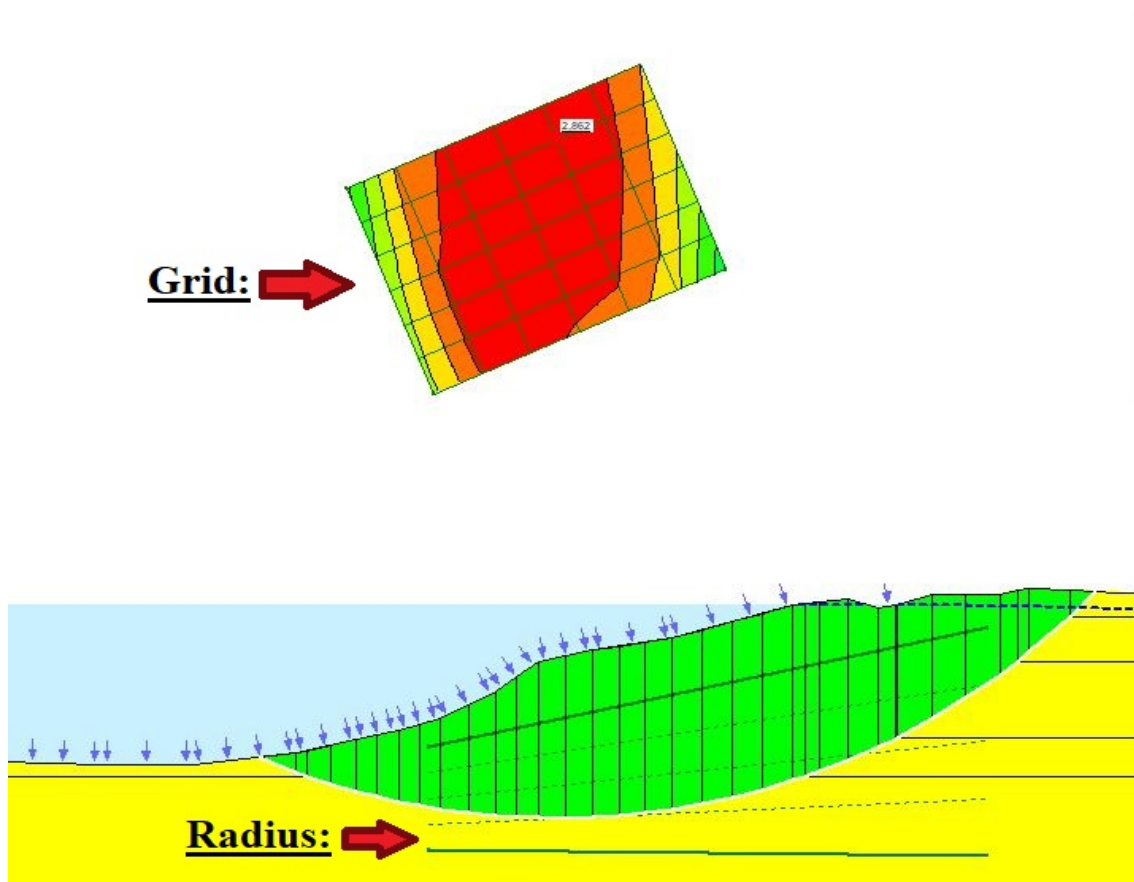
τ : skjuvkraften på lamellens bas, även kallad c_u .

α : glidytans lutning mot horisontalplanet.

Med denna information samt materialdata från jorden kan jämviktsekvationer ställas upp för att beräkna släntens säkerhetsfaktor antingen för hand eller med hjälp av olika dataprogram, vilket är det absolut vanligaste idag. Gemensamt för handberäkningar och dataprogram är att ju fler lameller slänten delas upp i desto noggrannare blir resultatet, samtidigt som det krävs mer kraft för att beräkna. När säkerhetsfaktorn ska beräknas är det omöjligt att veta exakt vilken glidyta som kommer kollapsa först och därmed ha lägst säkerhetsfaktor. Både vid beräkningar för hand och i dataprogrammen testas ett antal olika glidytor för att hitta den lägsta säkerhetsfaktorn. Den stora skillnaden är att med handberäkningar testas oftast en handfull olika glidytor och slänten delas upp i relativt få lameller. En fördel med dataprogram är att då kan slänten delas upp i betydligt fler lameller och tusentals glidytor testas på några sekunder för att hitta den farligaste glidytan med tillhörande säkerhetsfaktor.

3.1.1 GeoStudio

Dataprogrammet som används för arbetet är GeoStudio vilket är ett samlingsnamn för flera olika program som kan kombineras beroende på vad som ska analyseras. I projektet används SLOPE/W samt SEEP/W på grund av deras olika funktioner där SEEP/W, till skillnad från SLOPE/W, tar mer hänsyn till vattenflöden i slänten. I SLOPE/W används flera parametrar för att få den modellerade slänten att efterlikna den som finns i verkligheten. Grunderna är att geometri och materialparametrar ställs upp och en säkerhetsfaktor tas fram. SLOPE/W är baserat på lamellmetoden och eftersom det finns flera olika sätt att använda den på så måste en metod för att ställa upp jämvikten bestämmas. I detta arbete har Morgenstern & Price metod använts då den anses ge den mest tillförlitliga bilden i de flesta fallen eftersom den använder flest jämviktsekvationer. När glidyta tas fram i SLOPE/W finns diverse metoder, den som använts i projektet heter Grid and Radius (GeoStudio, 2018). Med metoden väljs två ytor i närheten av var lägsta säkerhetsfaktorn för slänten kan tänkas ligga. Den övre ytan är ett rutnät, så kallat grid. Den nedre ytan är ett antal streck, så kallat radius. Från varje korsning mellan två linjer i rutnätet utgår cirkeln till en cirkulär cylindrisk glidyta medan radien på cirkeln varierar med linjerna på den nedre ytan. Är det till exempel ett rutnät som innehåller 7×7 linjer samtidigt som radius har 5 nivåer så testas $7 \times 7 \times 5$ alltså 245 olika glidytor och säkerhetsfaktorerna radas upp för varje glidyta.



I beräkningar som innefattar vattenflöde kan SLOPE/W beräkna en ny säkerhetsfaktor genom att räkna ut tryckskillnaden mellan höger och vänster sida på varje lamell och få fram ytterligare en kraft att använda i lamellmetoden (GeoStudio, 2018). Det finns dock ett bättre sätt att beräkna flöden. Genom att använda programmet SEEP/W kan mer avancerade beräkningar vad det gäller krafter och förändrade och porvattentryck på grund av flöden genomföras. SEEP/W använder finita elementmetoden och är bra för att modellera exempelvis hur en snabb sänkning av vattennivån i älven påverkar grundvattennivån och säkerhetsfaktorn över tid.

3.1.2 Morgenstern & Price metod

Som nämns i avsnitt 3.1.1 finns flera olika metoder för att beräkna jämvikten i varje lamell. Den tidigaste tekniken framtagen av Fellenius tar enbart hänsyn momentjämvikt och ger således en mindre tillförlitlig säkerhetsfaktor. Under åren utvecklades nya metoder och 1965 publicerade Morgenstern & Price sin teori som än den mest utbredda idag (Krahn, 2003). Metoden ställer upp jämvikt för moment- och horisontalkraft för varje lamell samt normal- och skjuvspänning mellan lamellerna (Morgenstern & Price, 1965). Deras metod ställer även upp ett kriterium för hur horisontella normalkraften på lamellen (E) och skjuvkraften på sidan av lamellen (X) förhåller sig till varandra. Ekvationen som beskriver sambandet är $X = E \times \lambda \times f(x)$. Funktionen $f(x)$ är vald till en halv sinusfunktion där x är baserad på vilken lamell i ordningen som beaktas och λ är hur stor del av funktionen som används, mer information om hur λ tas fram visas senare. Som figur 3.3 visar är krafterna mellan lamellerna högst i mitten av glidytan.

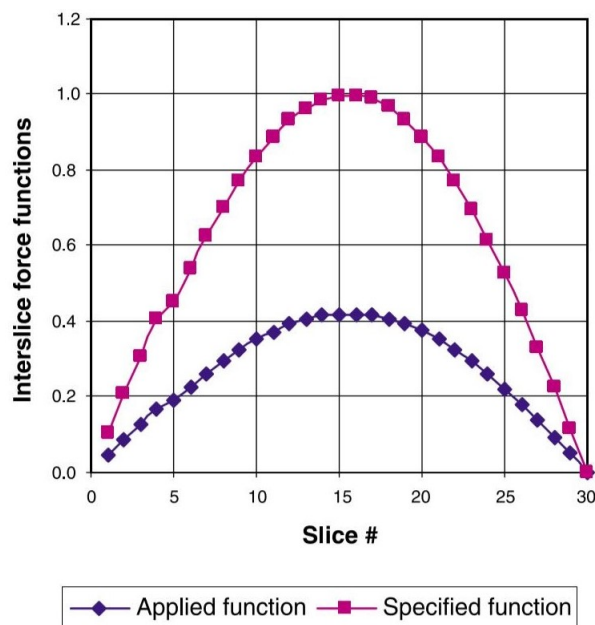


Figure 3.3: Halv sinusfunktion med 30 lameller. Den övre grafen är halva sinusfunktionen $f(x)$ medan den nedre är det λ som används, i detta fall är $\lambda = 0,43$ (Krahn, 2003).

Nedanstående ekvationer används i SLOPE/W (Krahn, 2003).

$$F_m = \frac{\Sigma[c'\beta R + (N - u\beta)R \tan \phi']}{Wx - \Sigma Nf \pm Dd} \quad (3.1)$$

$$F_k = \frac{\Sigma[c'\beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\Sigma N \sin \alpha - D \cos \omega} \quad (3.2)$$

c' : jordens kohesionsintercept.

ϕ : jordens friktionsvinkel.

u : portrycket.

N : normalkraften på basen av lamellen.

W : lamellens tyngd.

D : släntens last.

α : lamellbasens lutning.

β , R , x , f , d och ω : geometriska parametrar.

Då λ varierar ändras också storleken och vinkeln på den resulterande kraften från lamellkrafterna E och X vilket gör att även normalkraften, N varierar. Säkerhetsfaktorn för moment respektive global jämvikt plottas på y-axeln och λ plottas på x-axeln. Säkerhetsfaktorn avseende alla krafter är där kurvorna korsar i figur 3.4 varandra. Denna kombination kan öka säkerhetsfaktorn jämfört med Bishop och Janbus metoder som antar att skjuvkrafterna och därmed också λ är 0 men i vissa andra fall kan dessa metoder överskatta säkerhetsfaktorn (Morgenstern & Price, 1965).

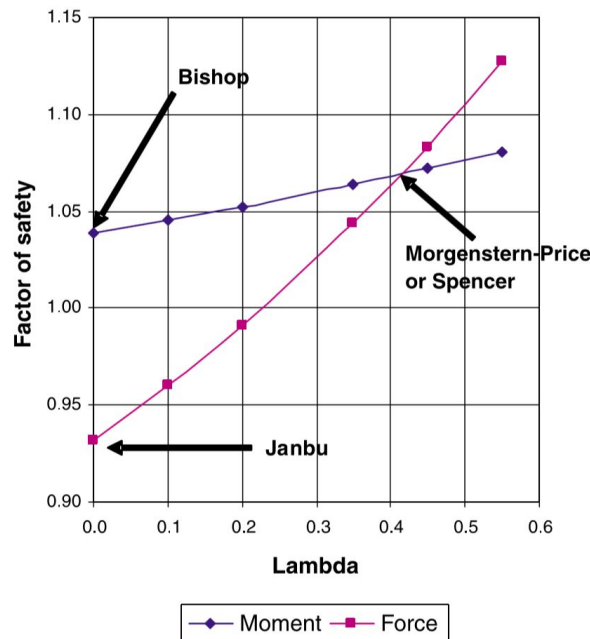
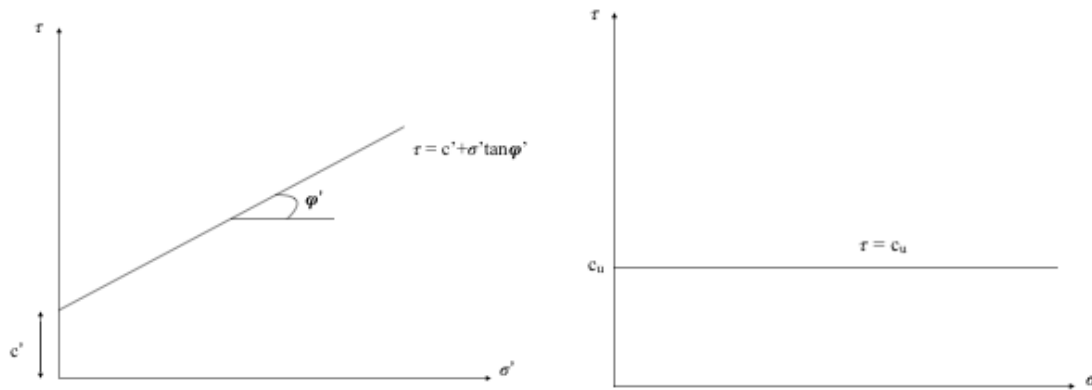


Figure 3.4: Säkerhetsfaktorns variation med olika λ (Krahn, 2003).

Vid en analys kan mycket information om varje lamell tas fram. GeoStudio summerar bland annat alla krafter, vilket λ som använts samt om det är dränerat eller odränerat vid kombinerad analys. Allt detta gör att metoden fungerar bra för i princip alla slänter oavsett geometri på slänten och glidytan.

3.2 Dränerad och odränerad analys

För beräkningar av skjuvhållfasthet i jord måste hänsyn tas till huruvida jorden kan anses vara dränerad eller odränerad. Detta avgör hur beräkningarna går till och vilka parametrar som används. Det odränerade fallet anses gälla för korttidsstabilitet och en tidsbegränsad belastning, medan det dränerade gäller då förutsättningarna varit stationära under en längre tid (Larsson, 2008). I den dränerade analysen används skjuvspänningsparametrarna c' och ϕ' , vilka inte existerar i det odränerade fallet. Kohesionsinterceptet c' är dränerad skjuvhållfasthet i vattenmättade jordar, medan ϕ' är friktionsvinkeln i jorden. Motsvarigheten c_u sätts i det odränerade fallet lika med skjuvhållfastheten τ . I det odränerade fallet är alltså stabiliteten beroende av kohesionen i jorden och använder inte någon friktionsvinkel. Detta är på grund av att det vid odränerad skjuvning skapas ett porövertryck som inte utjämnas och att effektivspänningen inte heller ökar. Eftersom ekvationen för dränerade förhållanden baseras på effektivspänningen σ_0' så minskar skjuvhållfastheten om portrycket ökar.



(a) Dränerad analys

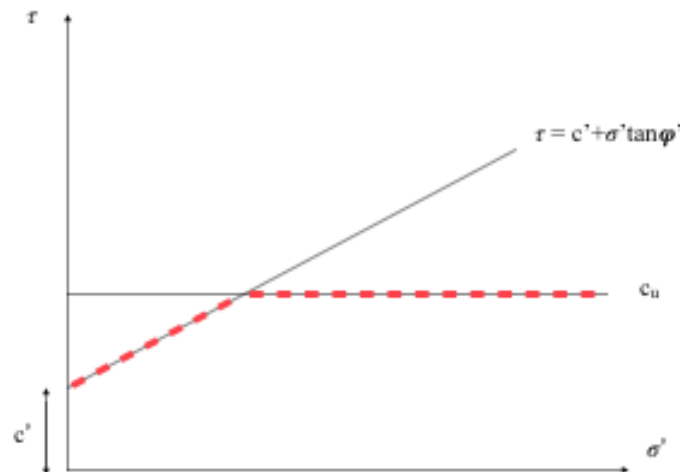
(b) Odränerad analys

Figur 3.5: Figurerna visar de olika analysformerna. Författarnas egna bilder.

Som tidigare nämnt är det dränerade fallet mer använt för långvarig släntstabilitet vilket är vanligt för skurna eller naturliga slänter (Larsson, 2008). Då verkar skjuvspänningsparametrarna c' och ϕ' enligt figur 3.5. c' är det initiala kohesionsinterceptet mellan partiklarna i jorden och friktionsvinkeln ϕ' brukar i Sverige uppskattas till ungefär 30° , men bestäms med hjälp av triaxialförsök. Till skillnad från det odränerade fallet så existerar det inget porövertryck i det dränerade.

Dessa två fall är extremerna i beräkningen, sanningen ligger som så ofta någons därefter mellan där en kombinerad analys mest sannolikt skulle ligga närmare det

faktiska förhållandet. Därför är det numera standard att använda kombinerad analys som ett komplement till den odränerade analysen för lera (Alén, Bengtsson, Berggren, Johansson & Johansson, 2000). I den kombinerade analysen kombineras de två metoderna ovan till en gemensam och initialt används den dränerade analysens kurva, för att övergå i den odränerade när de korsas, se figur 3.6. Detta innebär i praktiken att för varje lamell i GeoStudio används den lägsta hållfasthetsparametern av det dränerade eller odränerade värdet.



Figur 3.6: Figuren visar konceptet bakom kombinerad analys. Författarnas egen bild.

I denna undersökning kommer kombinerad analys användas för de enskilda klimatförändringarnas påverkan på släntstabiliteten men för analysen av nuvarande samt slutförhållanden används alla tre metoder; dränerad, odränerad och kombinerad analys. Detta är en följd av att släntens materialparametrar innebär att kombinerad analys kan anses ge ett mer tillförlitligt resultat för den specifika slänten. Det är även ingenjörsexpraxis att utföra både en odränerad och kombinerad analys av naturliga lerslänter då det är varierande dräneringsförhållanden i slänten (Alén m. fl., 2000). Där alla tre analysmetoder används görs detta i ett jämförande syfte.

3.3 Säkerhetsfaktor

Resultatet av en säkerhetsanalys är ett framtagande av en säkerhetsfaktor. Denna kan värderas på olika sätt beroende på vilken metod som används. En utvärdering över stabiliteten för slänter och olika områden kan utföras med till exempel totalsäkerhetsfaktor eller partialsäkerhetsfaktorer, vilka används i Eurocode. Den största skillnaden mellan dessa pekar på att den erforderliga säkerheten kräver större nyanserade krav för val av partialkoefficienter (Skredkommissionen, 1995). Det vill säga att valet av partialkoefficienter grundas i mer nyanserade utredningar kring markens jordparametrar. Skillnaderna mellan dessa diskuteras vidare i avsnitt 3.3.1 samt 3.3.2.

3.3.1 Totalsäkerhetsanalys

Totalsäkerhetsanalysen innefattar en genomgång av diverse förutsättningar vilka klassas som gynnsamma eller ogynnsamma (Skredkommissionen, 1995). Efter utvärdering av förutsättningarna kan olika säkerhetsfaktorer värderas. De olika förutsättningarna som sätter grund för valet av säkerhetsfaktor är bland annat:

- Fältundersökningens innehåll samt omfattning
- Laboratorieundersökningens innehåll samt omfattning
- Beständigheten på slänten
- Släntens geometri
- Grundvatten- och portrycksförhållanden
- Ytvattenförhållanden
- Egenskaper på jorden
- Tidigare förändringar i slänten
- Nuvarande och förväntad verksamhet i slänten och dess närhet
- Konsekvenser av skred
- Analys- och beräkningsarbetets tillförlitlighet

Med ett högre antal av ovanstående förutsättningar som klassas som gynnsamma kan lägre krav på säkerhetsfaktorn utvärderas och vice versa (Skredkommissionen, 1995). Utöver denna klassificering av förutsättningarna skiljs det dessutom på hur området används. Detta avgör erforderlig säkerhetsfaktor för markanvändningens ändamål. Området kan delas in i följande kategorier:

- Bebyggelseområde
Område som är avsatt för dygnetruntvistelse, ansamling av människor eller viktiga anläggningar.
- Nyexploatering
Område som innefattar byggnader och anläggningar som tillkommer genom planläggning eller prövning av lov enligt PBL eller på annat sätt.
- Befintliga bebyggelseområden
Områden som tidigare varit exploaterade.
- Annan mark
Område som endast innefattar dagvistelse och anläggningar av mindre betydelse.
- Naturmark
Område som innefattar dagvistelse av enstaka personer samt inga anläggningar av en betydande roll.

Den erforderliga säkerhetsfaktorn för respektive område kan därefter fastställas med beaktning på risken för personskada och materiella förluster som kan ske (Skredkommissionen, 1995). Figur 3.7 representerar en schematisk uppställning över fördelningen av säkerhetsfaktorn för dränerade, odränerade och kombinerade fall med hänsyn till nämnda förutsättningar och ändamål.

Skede	Markanvändning			
	Nyexploatering	Befintlig bebyggelse och anläggning	Annan mark	Naturmark
Geoteknisk besiktning och överslagsberäkning	Minst detaljerad utredning skall utföras	$F_c > 2 + F_{c\phi} > 1,5$	$F_c > 2 + F_{c\phi} > 1,5$	F_c, F_{KOMB} och $F_\phi > 1$ (Under förutsättning att omgivande mark ej påverkas)
Detaljerad utredning	$F_c \geq 1,7 - 1,5 + F_{KOMB} \geq 1,45 - 1,35$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	$F_c \geq 1,7 - 1,5 + F_{KOMB} \geq 1,45 - 1,35$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	$F_c \geq 1,6 - 1,4 + F_{KOMB} \geq 1,4 - 1,3$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	F_c, F_{KOMB} och $F_\phi > 1$ (Under förutsättning att omgivande mark ej påverkas)
Fördjupad utredning (och kompletterande utredning)	$F_c \geq 1,5 - 1,4 + F_{KOMB} \geq 1,35 - 1,30$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	$F_c \geq 1,4 - 1,3 + F_{KOMB} \geq 1,30 - 1,20$ $F_\phi \geq 1,3 - 1,2$ (sand) Under förutsättning att restriktioner införs.	$F_c \geq 1,3 - 1,2^* + F_{KOMB} \geq 1,2 - 1,15^*$ $F_\phi \geq 1,2 - 1,15$ (sand) *) Lägre värden avser befintlig anläggning av mindre betydelse	F_c, F_{KOMB} och $F_\phi > 1$ (Under förutsättning att omgivande mark ej påverkas)

Figur 3.7: Figuren visar en tabell för erforderlig säkerhetsfaktor under olika förhållanden (Skredkommissionen, 1995).

Valet av totalsäkerhetsfaktor innefattar alltså ett beslut om vilken framtagna marginal de karaktäristiska förhållandena multipliceras med.

3.3.2 Eurocode

Som nämndes i avsnitt 3.3 baseras Eurocode på en partialsäkerhetsanalys. För att komma fram till en säkerhetsfaktor med hänsyn till Eurocode inleds framtagandet

med att avgöra den geotekniska kategorin. Detta för att kunna värdera komplexiteten i marken som skall utnyttjas. Den valda geotekniska kategorin kan behöva ändras under projektets gång. (IEG, 2010). Eurocode nämner tre olika geotekniska kategorier (GK), 1, 2 och 3. GK 1 innefattar enklare konstruktioner med slänter av lutningen 1:10, dock inte kvicklera. Vidare innefattar GK 2 konventionella konstruktioner och grundläggningsmetoder där mer utmanande lastförhållanden undviks. GK 3 kräver en oberoende granskare som avser granskning av innefattande komplexa förhållanden och okonventionella konstruktioner.

Bestämning av jordens hållfasthets- och deformationsegenskaper definieras av fältundersökningar, laboratorieförsök samt med empiri (Karlsson & Moritz, 2016). För framtagna materialegenskaper skall givna partialkoefficienter tilläggas. Partialkoefficienterna återfinns i Swedish Standards Institute, vilka visas i tabell 3.1 (Swedish Standards Institute, 2010).

Tabell 3.1: *Givna partialkoefficienter från Eurocode*

Jordparameter	Symbol	Värde
Friktionsvinkel	γ'_φ	1,25
Effektiv kohesion	γ'_c	1,25
Odränerad skjuvhållfasthet	γ'_{cu}	1,4
Enaxlig tryckhållfasthet	γ'_{qu}	1,4
Tunghet	γ'_γ	1,0

Utöver ovanstående partialkoefficienter tilläggs dessutom en partialkoefficient med avseende på säkerhetsklass (SK), γ_d (IEG, 2013). Dessa återfinns i tabell 3.2. SK1 innebär att risken för allvarliga skador är låg, SK2 att det finns medelhög risk för allvarliga personskador och SK3 innebär hög risk för allvarliga personskador.

Med fastställd säkerhetsklass beräknas därefter den dimensionerande lasteffekten med följande ekvation enligt IEGs tillämpnings dokument (IEG, 2010).

$$Geo.last = \gamma_d * 1. * G_{kj} + \gamma_d * 1.4 * Q_{kj} \quad (3.3)$$

G_{kj} = permanent last

Q_{kj} = variabel last

Tabell 3.2: *Given partialkoefficient, γ_d från Eurocode*

Säkerhetsklass	Partialkoefficient, γ_d
SK1	0,83
SK2	0,91
SK3	1,00

Slutligen tas säkerhetsfaktorn, F_{EN} fram för respektive säkerhetsklass enligt tabell 3.3 (IEG, 2010):

Tabell 3.3: *Faktorn F_{EN} för respektive säkerhetsklass*

Säkerhetsklass	F_{EN}
SK1	0,9
SK2	1,0
SK3	1,1

4

Klimatförändringar

En slänts stabilitet påverkas av flera olika faktorer. Effektivspänningar i marken, geometri, motkrafter i underkant och skjuvhållfasthet är betydande parametrar. De klimatförändringar som förändrar någon eller flera av dessa värden under en kombinerad släntstabilitetsanalys har valts att studeras och tas med i undersökningen. Vilka som valts samt dess inverkan diskuteras i avsnitten nedan.

4.1 Vattennivå

Vattennivå har betydelse för släntens stabilitet, både i mark och älv. Portryck har en direkt negativ inverkan på effektivspänningar och således leder höga grundvattennivåer till lägre stabilitet. Samtidigt leder tyngden av vattnet i älven till en motkraft mot brott och därför till högre stabilitet (Sällfors, 2013). Klimatförändringarna kommer ha påverkan på vattennivåerna och olika perioder på året leder till olika förändringar. Dessutom kommer förändringar av vattennivån i älven variera i förhållande till förändringar på grundvattennivån. Även flöden som skapas i slänten när vattennivåerna förändras orsakar krafter i jorden som behöver tas med i beräkningarna. Detta kommer leda till olika scenarion i framtiden som kan ha både positiv eller negativ inverkan på släntstabilitet.

4.2 Erosion

Erosion är ett naturfenomen som kan påverka och förändra förhållanden för slänters geometri. Det kan förändra lutning, längd, släntens egentyingden och minska motkraften i underkant. Erosion innebär att jordpartiklar avlägsnas från marken genom yttre naturkrafter som vind, vattenflöden och glaciäris (Toy, 2014). Även utan klimatförändringar kommer erosion att ha en betydelse för beräkningar av framtida slänters säkerhetsfaktor, främst där slänten är i kontakt med älven. Erosion under ytan sker genom friktion mellan vatten och botten. Friktion skapas främst vid vågbildning från stormar och fartyg, eller genom strömning och dess förändringar på

grund av nederbörd (Rydell, Persson, Blied & Rankka, 2011). Det klimatförändringarna bidrar med som eventuellt kan öka erosion ytterligare är mer extremt väder. Förändring i nederbörd leder till ändrade strömningsförhållanden i älvar som i sin tur ändrar erosionsförhållandena under vattenytan. Göta älv motverkar dock en del av dessa förändringar då det finns erosionsskydd samt reglering för strömningsförhållanden. (Rydell m. fl., 2011).

4.3 Vegetation

Vegetation har inverkan på slänters stabilitet på flera olika sätt. Vegetation kan skydda marken i området från erosion genom att minska markens utsatthet för väder och vind (Tang m. fl., 2018). Erosion ovanpå slänten har positiva konsekvenser på stabiliteten då egentygnd försvinner, dock kan erosion i sluttningen vara antingen positiv eller negativ för slätens stabilitet beroende på var den sker. Vegetationen tillför även en egentygnd som kan behöva beaktas.

Som nämns i avsnitt 4.1 har porvattentryck en negativ påverkan på släntstabilitet genom att minska effektivspänningarna. Vegetation påverkar detta genom att ta upp vatten ur marken för näring, därmed sjunker portrycket och slänten får en högre hållfasthet (Tang m. fl., 2018). Grundvattennivån kan antas minska som mest till den nivå där rötterna når. Detta varierar mycket beroende på vilken växtlighet som finns på slänten då de har olika längd på sina rötter. En modell för växtlighetens upptag av vatten kan tas fram i SEEP/W och beskrivs i GeoStudios egen artikel, detta kan alltså simuleras i programmet om rötternas nivå samt andra växtparametrar är kända (GEO-SLOPE, u. å.). Växtlighetens rötter hjälper inte bara till med att ta upp vatten, de har också en väldigt hög skjuvhållfasthet med segt brott som bidrar till skjuvhållfastheten (Tardio & Mickovski, 2015). Dessa värden varierar också då olika typer av växtlighet har olika typer av rötter. Simulering av detta kan göras i GeoStudio där värden på rötters djup, hållfasthet, diameter och "Root Area Ratio" är kända. Rötterna leder till ökad skjuvhållfasthet i marken ner till rötternas djup.

Generellt leder vegetation till en ökad släntstabilitet och att ha växtlighet på slänten kan därför ses som en åtgärd om det inte redan finns. För slänter med redan befintlig vegetation kan de angivna fördelarna gå förlorade i samband med klimatförändringar såsom längre perioder av torka, vilket reducerar växtligheten. Avsaknad av vegetation kan då vara en konsekvens som behöver beaktas i framtiden.

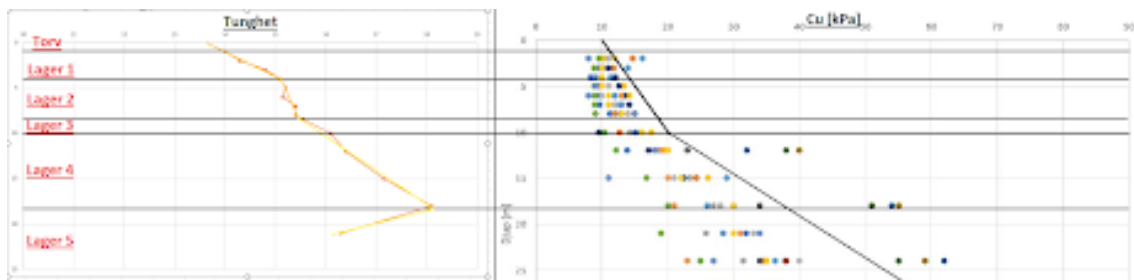
Om träd finns på slänten så kan en rotvälta ske när trädet faller (E. Norris m. fl., 2008). I händelse av storm kan flera träd falla samtidigt och krafterna de orsakar adderas. Hur stora konsekvenserna blir beror på bredd och djup av rotvältan, rötternas och trädets geometri samt vilken riktning rotvältan sker i förhållande till slänten.

4.4 Sprickbildning

I ett förändrat klimat där växterna i slänten inte är kvar finns det risk att sprickor bildas i leran (Budhu, 1999). Detta orsakar en sänkning av säkerhetsfaktorn på två sätt; den delen av glidytan som sprickan kapar av bidrar inte längre till någon hållfasthet då den inte sitter ihop med resten av glidytan, dock bidrar den fortfarande med en egentyngd. Det andra fenomenet säkerhetsfaktorn påverkas negativt av är att sprickorna kan fyllas med vatten och öka det skreddrivande momentet, i en spricka fylld med vatten är alltid portrycket hydrostatiskt. Sprickbildning sker när effektivspänningarna ökar på grund av torka och sprickornas djup beror i teorin på den odränerade skjuvhållfastheten men är väldigt osäkert.

5 Beräkningsförutsättningar

Vid analys av dagens parametrar i den verkliga slänten har det framkommit att den består av lera med skjuvhållfastheten 10 kPa vid ytan, vilken ökar linjärt med 1 kPa/m ner till 10 m djup och därefter med 2,2 kPa/m. Skjuvhållfastheten som används baseras till stor del på resultaten i triaxialförsöket, som generellt sett är mycket högre än resultat från andra försök som CPT och DSS. På grund av detta kan alla säkerhetsfaktorer i resultatet ha överskattats och behöver i så fall minskas med cirka 20 % för att få mer verkliga värden, detta diskuteras vidare i avsnitt 7.4.2. Friktionsvinkeln ϕ' varierar något beroende på djup och borrhål men har sammanställts till att vara $31,3^\circ$. Kohesionsinterceptet c' är sammanställt till 4 kPa. Tungheten varierar mellan 14 kN/m^3 och $18,1 \text{ kN/m}^3$ med olika linjära förändringar beroende av djup. Vattennivån är +0,15 meter över havet vilket innebär att grundvattennivån går ungefär 1 m ner i slänten. Slänten delades upp i ett lager torv och 5 stycken lerlager enligt figur 5.1. Dessa lager indelades så att linjära samband fanns för både tunghet och skjuvhållfasthet för alla lager. Torv valdes som översta lager efter fältstudie. Där noterades en jordyta med blandning av vass som bara delvis förmultnat, som synes i figur 5.2. Detta kan liknas vid torv och används därför som översta lager i simulering. (Cady & Gilbert, 2014). Slänten har även ett erosionskydd i höjd med vattenytan som tilldelats tunghet 16 kN/m^3 för att representera makadam.



Figur 5.1: Lerlager. Författarnas egen bild.

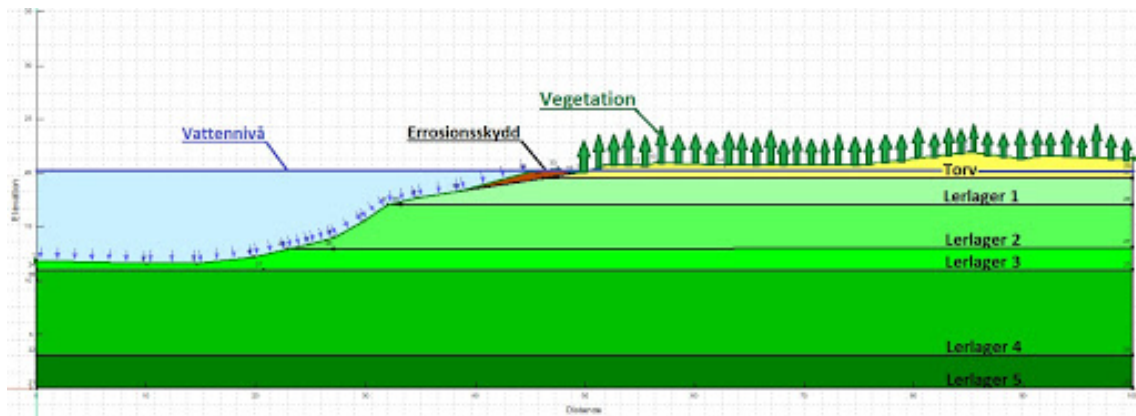
Vid fältstudie noterades en lokal miljö full av bladvass, visat i figur 5.3, som i stora mängder kan ha en betydande påverkan på släntstabilitet. Bladvass har en rotstam som sträcker sig under marken ungefär lika långt som bladvassen sträcker sig över marken, de kan nå en längd på upp till 5 m (Nationalencyklopedin, u. å.). I området hade de en ungefärlig längd på 1,5 m. Bladen kan bli $50 \times 3 \text{ cm}$ vilket skapar en area på $0,015 \text{ m}^2$. Dessa illustreras med de gröna, uppåtpekande pilarna som visas i figur 5.4.



Figur 5.2: *Jordyta. Författarnas egen bild.*

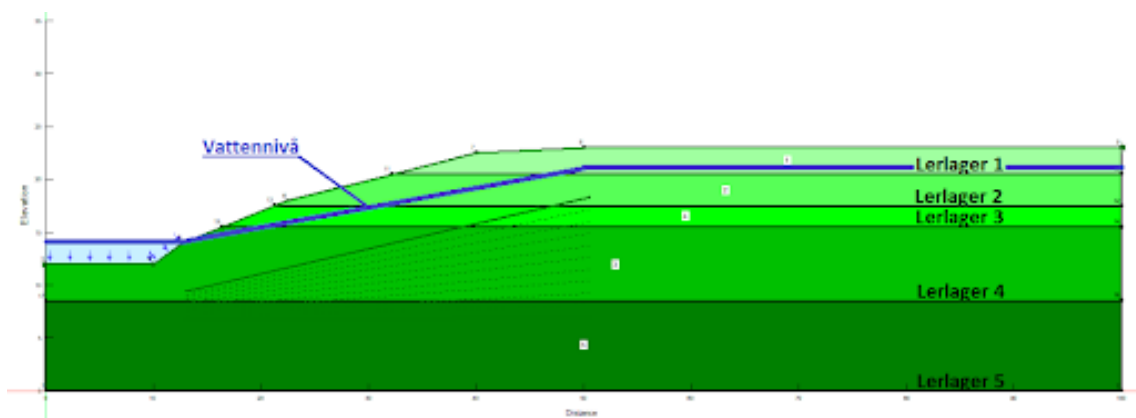


Figur 5.3: *Bild över vegetation i släntområdet. Författarnas egen bild.*



Figur 5.4: *Simulering av verklig slänt i GeoStudio. Författarnas egen bild.*

Ytterligare en slänt har modellerats för att kunna jämföras med den första. Målet med slänten är att den inte ska ha glidyta under älven, detta för att få varierande resultat. Denna slänt är en typslänt och således finns det ingen exakt data för den. Istället har det antagits att samma materialparametrar gäller som för den verkliga slänten. Dock simulerades inte rötternas vattenupptag i typslänten, detta syns i bilden över typslänten i figur 5.5.



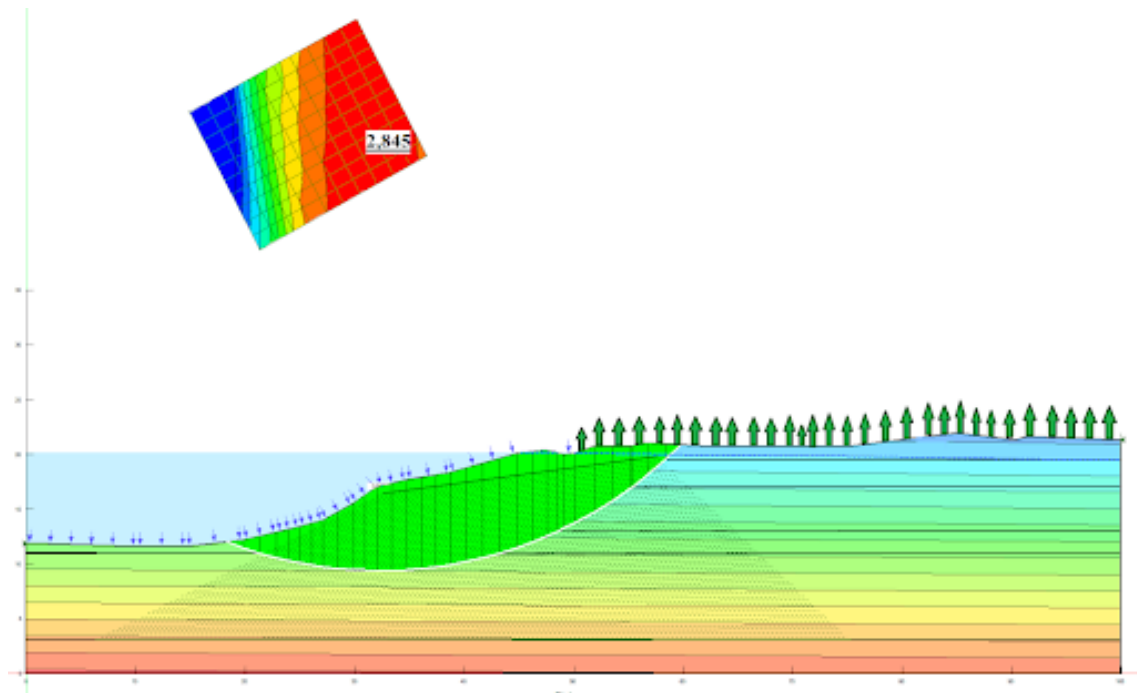
Figur 5.5: *Typslänt. Författarnas egen bild.*

6

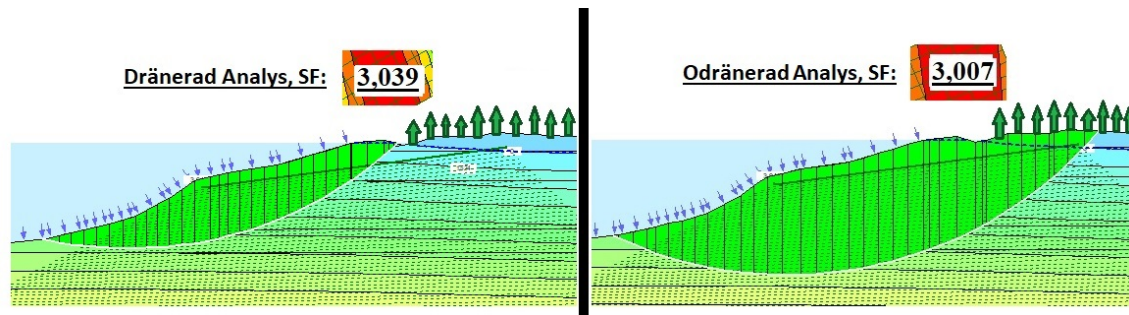
Resultat för släntberäkningar

De två slänterna har analyserats med hänsyn till olika klimatförändringar. Effekter på slänterna på grund av klimatförändringar modelleras var för sig för att analysera vilka förändringar som är ger störst påverkan var för sig. Slutligen sätts alla förändringar ihop för beräkning av säkerhetsfaktorn år 2100. För dagens tillstånd samt det beräknade tillståndet år 2100 har dränerad, odränerad och kombinerad analys genomförts. För de enskilda förändringarna har endast kombinerad analys använts. I bilderna visas portryck i marken i en färgskala för att demonstrera förändringarna som exempelvis ändrade vattennivåer och vegetation tillför.

Figureerna 6.1 och 6.2 visar beräknade säkerhetsfaktorer för den verkliga slänten för dagens förhållanden med kombinerad, dränerad och odränerad analys.



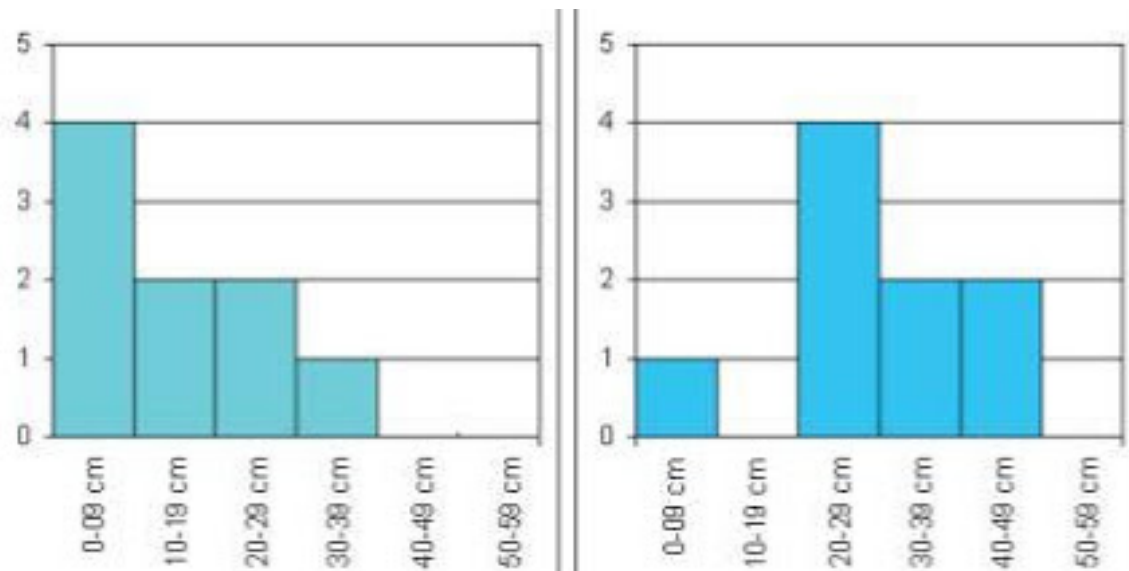
Figur 6.1: Figuren visar säkerhetsfaktor och glidyta för den studerade verkliga slänten, kombinerad analys. Författarnas egen bild.



Figur 6.2: Figuren visar säkerhetsfaktor och glidyta för den studerade verkliga slänten, dränerad och odränerad analys. Författarnas egen bild.

6.1 Vattennivåförändringar

Generellt kommer ett mer varierat klimat att råda år 2100. Fler och längre perioder med ihållande nederbörd kommer att skapa högre grundvattennivåer än vad som kan uppnås under dagens regnperioder (Rydell m. fl., 2011). Samtidigt kommer en högre medeltemperatur som förväntas år 2100 leda till mer avdunstning och längre perioder med torka. Detta leder i sin tur till en lägre grundvattennivå. Alltså kommer den lägsta grundvattennivån att vara lägre och den högsta grundvattennivån högre. Det kommer bli mer skiftande extremfall som behöver beaktas i släntstabilitet. Figur 6.3 visar en sammanställning av nio olika klimatscenariors påverkan på grundvattennivån år 2100.



Figur 6.3: Förväntad grundvattennivåförändring år 2100 (Blied & Persson, 2011).

Medelvärden för sänkning av lägsta nivå blir då 15 cm och största förändring 39 cm. Medelvärdet för ökning av högsta nivå blir ungefär 29 cm och största förändring 49 cm. Dessa stora skillnader i vattennivå kommer även att skapa ökade vattenflöden i

slänten, ökade flöden i slänten leder till mer instabila förhållanden på grund av höga porttryck, dessa måste beaktas. SEEP/W används för simulering av förändringar i vattennivåer.

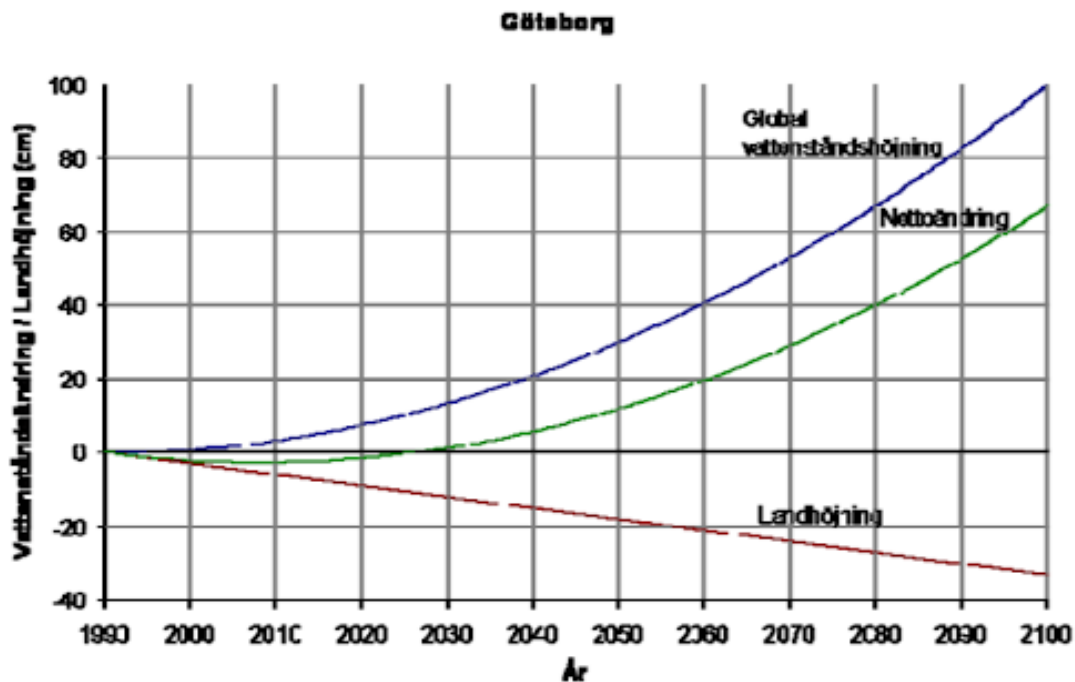
Älvens vattennivå påverkas vanligtvis på liknande sätt av torka och nederbörd som grundvattennivån (Rydell m. fl., 2011). Dock har Göta älv ett tappningssystem vilket reglerar flödet, detta motverkar förändring då regleringssystemet jobbar mot att hålla flödet konstant för exempelvis vattenverk och båttrafik. Tabell 6.1 är framtagen av SGI och visar förväntad vattennivå under 780 m³/s samt 1500 m³/s. Dessa flöden kan förväntas vid normala respektive högintensiva regnperioder år 2100. Här är förändringen inte lika stor som det för grundvattennivån då vattennivån inte varierar lika mycket. Detta leder till att vid perioder med hög nederbörd kommer grundvattennivån ligga ovanför vattennivån. Tvärtom vid torka kommer vattennivån ligga över grundvattennivån.

Tabell 6.1: *Vattennivåer vid fem olika platser längs Göta älv på sträckan Lilla Edet - havet för två olika flöden*

Ort	Vattennivå RH2000 780 m ³ /s	Vattennivå RH2000 1500 m ³ /s
Lilla Edet	0,9 - 1,1	2,3 - 2,4
Älvängen	0,5 - 0,6	1,1 - 1,2
Nödinge	0,3 - 0,4	0,9 - 1,1
Kungälv	0,3 - 0,4	0,5 - 0,6
Göteborg	-0,1 - 0,2	-0,1 - 0,2

Höga flöden på 1500 m³/s leder i Kungälv till en vattennivå ökning på 0,1-0,3 m, Kungälv är i närheten av den verkliga slänten. Detta fall kan jämföras med högsta grundvattennivån som kan öka med 0,5 m i samma område. Grundvattennivån skiftar alltså mer än älvnivån. Vid intensiv nederbörd kommer således grundvattennivån att öka mer än älvnivån. Detta kan skapa ett kritiskt scenario då en högre grundvattennivå än älvnivå är negativt för släntstabilitet. Dock är fortfarande älvnivån ovanför startnivån och det kan visa sig att älvnivån är den mest betydande faktorn. Vid låga flöden, det vill säga torrperioder, kan älvnivån av samma anledning istället ligga ovanför grundvattennivån. Att älvnivån är ovanför en kraftigt minskad grundvattennivå är positivt för släntstabilitet. Dock kan detta ändå leda till ett mer kritiskt fall då även älvnivån sjunker, om säkerhetsfaktorn är mer beroende av älvnivån än grundvattennivån kan säkerhetsfaktorn vid detta fall minska.

Älvens vattennivå kan också påverkas av förändringen i havsnivån (Rydell, Persson & Blied, 2012). I Göta älv minimeras dock detta på grund av landhöjningen som konsekvens av inlandsisen för 10 000 år sedan enligt figur 6.4. Beräkningar som SGI har gjort tyder på att vattennivån vid området Lilla Edet och nedåt inte kommer att förändras någonting till följd av havsnivåns stigning.

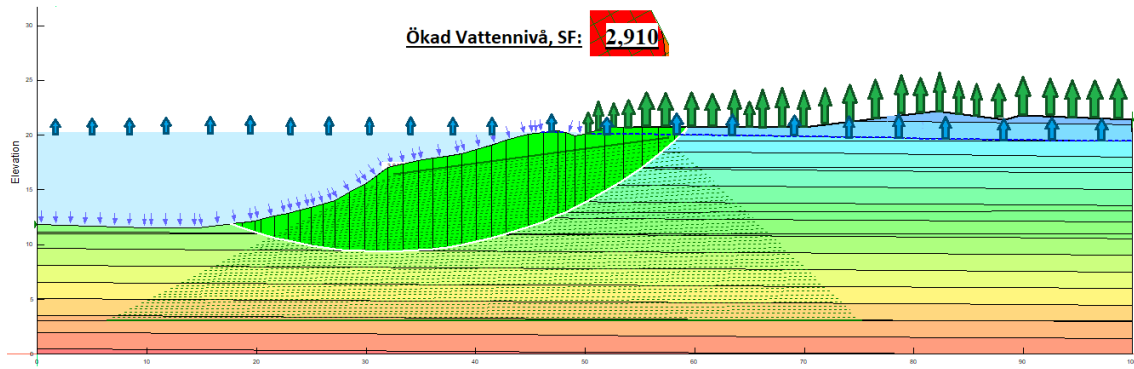


Figur 6.4: Vattenstandsändring jämfört med landhöjning fram till år 2100 (Bergström, Andréasson, Losjö, Stensen & Wern, 2011)

Med hjälp av dessa resultat togs två vattenförhållanden fram. Den ena ska simulera en nederbördsperiod där vattennivån i älven ökar med 10 cm och med 45 cm i marken. Den andra skall simulera en torrperiod med minskad älvnivå på 10 cm och minskad markvattennivå på 30 cm. En simulering av en övergångsfas mellan en nederbördsperiod och en torrperiod har också tagits fram med SEEP/W där vattennivån ändras inom loppet av 30 dagar.

6.1.1 Ökning av grundvatten- och älvnivå på grund av regnperiod

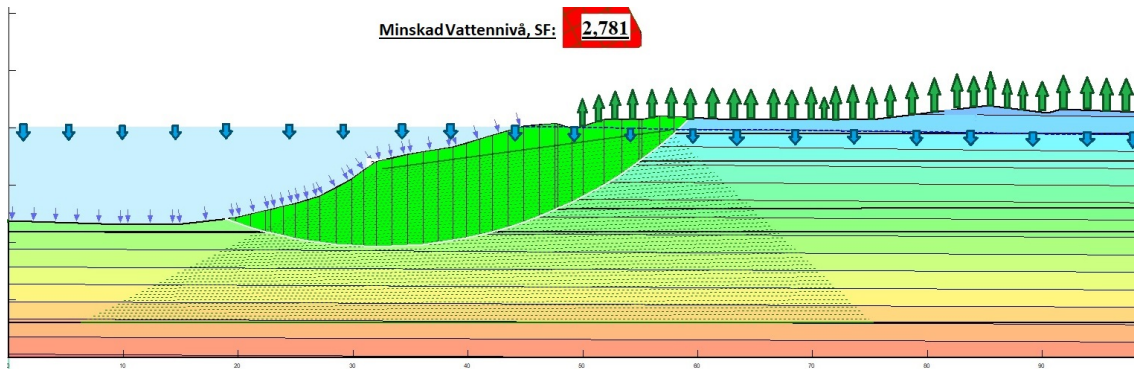
Den ökade vattennivå med 10 cm i älven och 45 cm i marken lades in i programmet. Detta ska simulera en lång regnperiod i framtiden. Den ökade grundvattennivån minimeras dock av växternas vattenupptag. Resultatet i den verkliga slänten är en ökad säkerhetsfaktor, vilket redovisas i figur 6.5. Säkerhetsfaktorn i typslänten förändrades inte av den ändrade vattennivån.



Figur 6.5: Figuren visar den verkliga släntens glidyta och säkerhetsfaktor, ökad vattennivå. Författarnas egen bild.

6.1.2 Minskning av grundvatten- och älvnivå på grund av en torrperiod

Minskad vattennivå i älven med 10 cm och minskad grundvattennivå med 30 cm simulerar en lång torrperiod. Detta leder till en minskad säkerhetsfaktor i den verkliga slänten, vilket redovisas i figur 6.6. Notera att den minskade grundvattennivån gör att rötter med 1,5 meters djup kan ha svårt att nå grundvattenytan som från start redan ligger 1-1,5 meter under markytan. Växtlighetens upptag påverkar därför inte säkerhetsfaktorn lika mycket och de positiva konsekvenserna kommer inte att vara lika betydelsefulla. Säkerhetsfaktorn i typslänten påverkades inte av en minskad vattennivå.



Figur 6.6: Figuren visar den verkliga släntens glidyta och säkerhetsfaktor, minskad vattennivå. Författarnas egen bild.

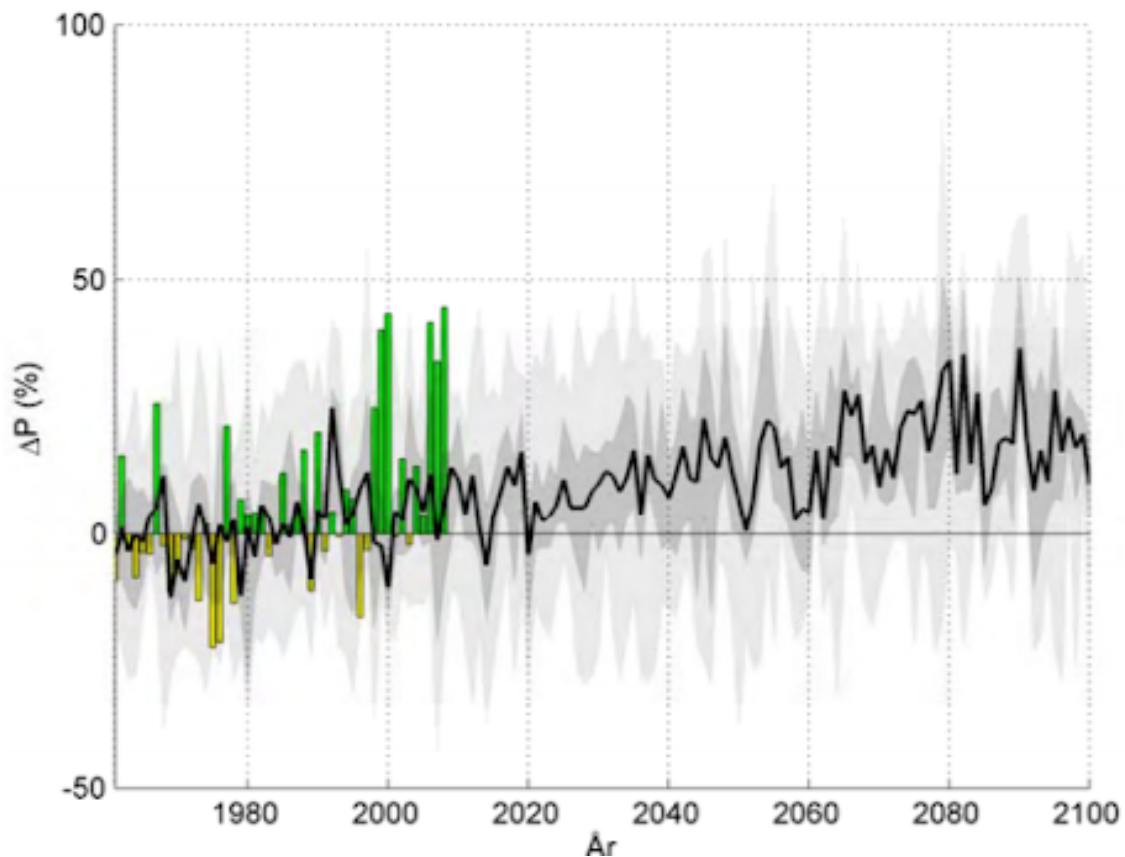
6.1.3 Vattenflöden på grund av övergång från högintensiv regnperiod till torrperiod

Då torrperioden var mest kritisk har även en simulering med en övergång från högintensiv regnperiod till torrperiod för den verkliga slänten simulerats. Det sker en liten

sänkning av säkerhetsfaktorn till följd av vattenflöden vilket leder till det mest kritiska fallet gällande vattennivåer. Dock är förändringen marginell och säkerhetsfaktorn hamnar på 2,776 för den verkliga slänten. Glidytan är heller inte märkbart skild från den vid minskad vattennivå. Vattenflöden i marken påverkar inte släntstabiliteten för typslänten.

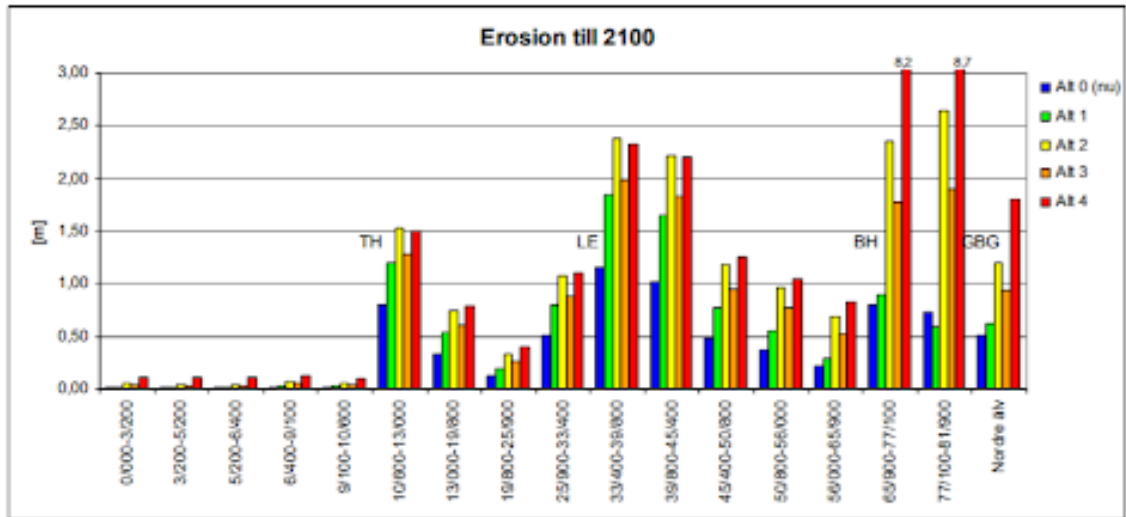
6.2 Erosion

Nederbörd kommer att förändras med klimatförändringarna till en mer varierande och generellt ökad tendens. Under de mest intensiva perioderna kommer nederbörd ha ökat med ca 20-30 % år 2100 (Åström, Eklund & Lindahl, 2011). En ökad nederbörd leder till ökat flöde i floder och älvar. Göta älvs strömning är dock reglerad av tappning för att hålla en jämn vattennivå. Regleringen tillåter ett maximalt flöde till Göta älv på $1030 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bergström m. fl., 2011). Detta krav har tvingats ökas vid krissituationer till upp mot $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. Detta samt ökad nederbörd direkt på Göta älv och ökad tillförsel från andra vattendrag gör att det trots tappning är möjligt att räkna med ökade maxflöden vid längre tillfällen i Göta älv i framtiden än vad som sker i dagsläget.



Figur 6.7: Nederbördsförändring för Göta älv dalen. Referensperiod 1961 - 1990 (Bergström m. fl., 2011).

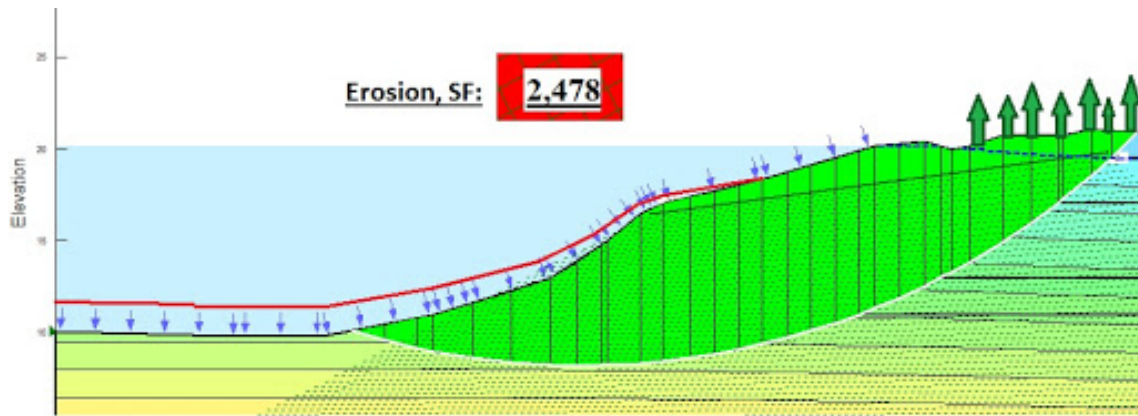
Det ökade flödet leder till ökad friktion mellan vattnet och botten som i sin tur ökar erosionen (Rydell m. fl., 2011). Botten på Göta älv är täckt av lersediment (Klingberg, 2011). Sedimenten klassas som mycket benägna att erodera vilket ökar den förväntade mängden erosion. Figur 6.8 visar ett stapeldiagram över erosion för olika delar i Göta älv och för olika medelflöden.



Figur 6.8: Beräknad total erosion fram till år 2100 för olika flöden och varaktighet (Rydell m. fl., 2011).

Figur 6.8 visar total erosion fram till år 2100 för varierande flöden och olika sektioner, där sektion 65/900 är vid den verkliga slänten. Grön, gul samt orange stapel är för flödena i spannet som kan antas relevant. Vid sektionen för slänten i fråga och ett ökat medelflöde till mellan 750-1100 m³/s, kan det då antas att bottennivån sjunkit med cirka 0,8-2,4 m år 2100. Vanligtvis kan erosion antas ske triangulärt avtagande mot ytan för kanterna (Rydell m. fl., 2012). På 70-talet anlades dock erosionsskydd i form av högar med stenblock längs stora delar av älven (Rydell m. fl., 2011). Därför antas erosion istället triangulärt avtagande upp till skyddet. Erosionsskydden har generellt bredden 3 m och sträcker sig 1-1,5 m ovan samt under vattenytan och har då en total höjd på mellan 2 och 3 m.

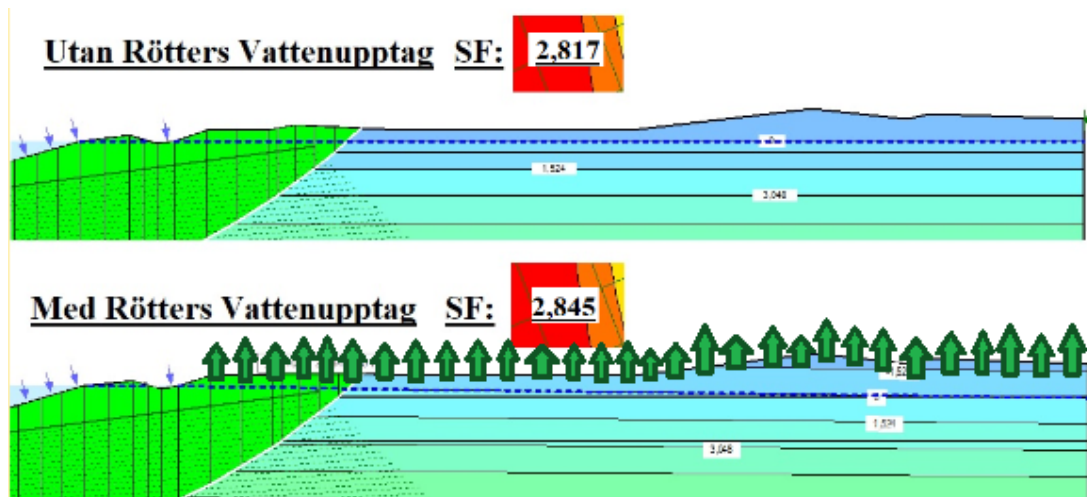
Erosion på 2 m valdes för simulering. Detta leder till högre och brantare slänter samt minskat mottryck i underkant. Detta minskar säkerhetsfaktorn i den verkliga slänten till 2,478 enligt figur 6.9. Erosion är den förändring som ger mest minskning i säkerhetsfaktor. Erosion i typslänten gav liknande förändringar.



Figur 6.9: Figuren visar den verkliga släntens glidyta och säkerhetsfaktor, erosion. Författarnas egen bild.

6.3 Vegetation

Med hjälp av SEEP/W togs en simulering av bladvassens påverkan på grundvattennivån fram i dagens slänt, med värden från fältstudie och standardvärden för vass. Ytterligare värden på temperatur, relativ fuktighet, vind, solstrålning och strålningsreflektion bestämdes genom typiska data för områdets latitud, klimat och markförhållanden. Resultatet ledde till vattenflöden mot rötterna som sänkte grundvattennivån och därmed ökade säkerhetsfaktorn enligt figur 6.10.



Figur 6.10: Simulering av verklig slänt med och utan rötters vattenupptag. Författarnas egen bild.

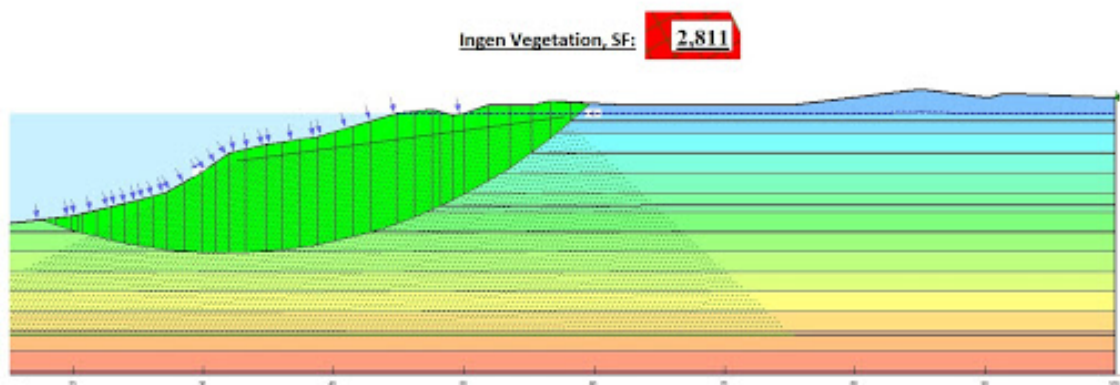
Hållfasthet från rötterna simuleras genom att öka skjuvhållfastheten i jorden ned till rötternas längd (Tardio & Mickovski, 2015). Detta görs enligt ekvationerna:

$$t_R = \epsilon * E * RAR \quad (6.1)$$

$$\Delta S = 1,2 * t_R \quad (6.2)$$

ΔS är förändringen i skjuvhållfasthet, ϵ är rötternas spänning och beror på diameter och skjuvförändring i ett skjuvförsök som gjorts av rötter i artikeln. RAR är “Root Area Ratio”, det vill säga procenthalt av marken som består av rötter i brottkurvan. Resultat, med standardvärden för bladvass, leder till ett ΔS på ungefär 1,0 kPa. Kohesionsinterceptet ökas därför i försöket med 1,0 kPa ner till ungefär 1,5 m vilket ökar säkerhetsfaktorn ytterligare. Efter fältstudie kan även konstateras att inga stora träd finns i närheten och fenomen med rotvälta kan försummas.

Påverkan från vegetation på slänten har således simulerats genom rötters vattenupptag och ökad skjuvhållfasthet ner till rötternas djup. Vegetationen kan försvinna i framtiden på grund av ökade torrperioder och detta simuleras genom att ta bort vegetationens påverkan på slänten. Resultatet blev en minskad säkerhetsfaktor till 2,811 för den verkliga slänten, visat i figur 6.11. Vegetationens vattenupptag simulerades inte i typslänten, dock lades samma skjuvhållfasthet för rötterna in och liknande förändring skedde.



Figur 6.11: Figuren visar den verkliga släntens glidyta och säkerhetsfaktor, utan vegetation. Författarnas egen bild.

6.4 Sprickbildning

Det finns en stor osäkerhet i hur stora eventuella sprickor i slänten kan bli. Ekvation 6.3 är en teori om vilket djup sprickorna kan få (Budhu, 1999). I detta fall blir djupet

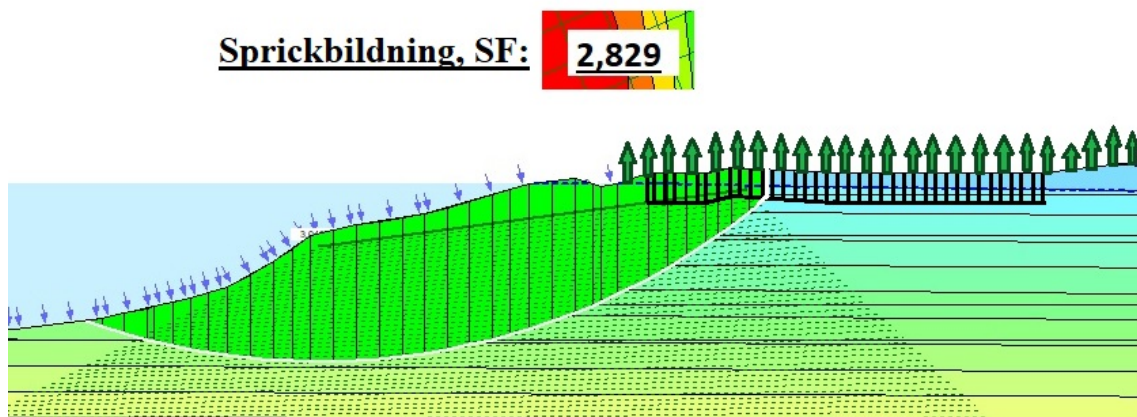
cirka 1,6 m. Olika sprickdjup har testats för att undersöka vad de har för inverkan på säkerhetsfaktorn. För att få ut den största påverkan på släntstabiliteten antas alla sprickor vara vattenfyllda.

$$z = \frac{2 * c_u}{\gamma} \quad (6.3)$$

Tabell 6.2: Tabellen visar säkerhetsfaktorer för olika sprickdjup för studerad verklig slänt

Sprickdjup	Säkerhetsfaktor
Inga sprickor	2,845
0,4 m	2,843
0,8 m	2,838
1,2 m	2,833
1,6 m	2,829
2 m	2,824
2,4 m	2,820

Som tabell 6.2 visar ger inte sprickbildningen någon stor minskning av säkerhetsfaktorn även om den finns och bör tas hänsyn till. Vid 1,6 m djupa sprickor i den verkliga slänten blir, som visas i figur 6.12, säkerhetsfaktorn 2,829 och i typslänten blir resultatet en sänkning av säkerhetsfaktorn till 1,223.



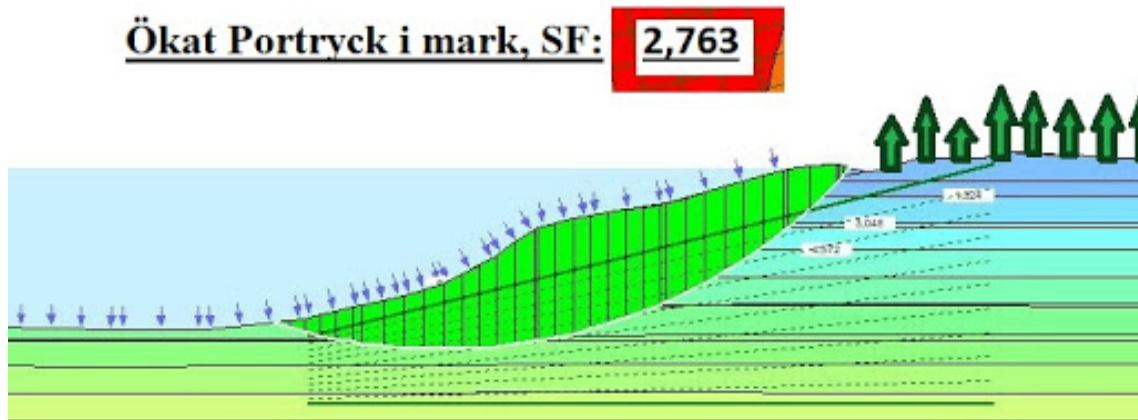
Figur 6.12: Figuren visar den verkliga släntens glidyta och säkerhetsfaktor, sprickbildning. Författarnas egen bild.

6.5 Porövertryck

Enligt Göta älvutredningen (SGI, 2012) kommer portrycken i lerslänter att öka. För undre grundvattenmagasin på 5 meters djup och nedåt kommer trycken öka med 0,3 m jämfört med idag, men för mindre djup kommer trycken inte påverkas nämnvärt. Det finns dock ett undantag och det är då det finns genomsläppliga skikt inom lerprofilen, då vatten kan tränga in där och bygga upp portrycket nedifrån. I slänten som undersöks finns ett lager med lite silt, sand och grus på cirka 15 meters djup. Detta har bedömts vara ett något mer permeabelt skikt. Då det inte kan anses som ett fullständigt permeabelt skikt har uppskattningen gjorts att det bidrar till något höjda portryck de 5 första meterna av grundvattensskiktet men inte så mycket som 0,3 m.

För denna simulering är både vattennivån i älven och grundvattennivån samma som i den nuvarande slänten, men portrycken har höjts. Vid grundvattennivån på 20,15 m är portrycken 0 men istället för att vara hydrostatiskt tryck under grundvattenytan så skapas ett porövertryck på 0,3 m. Övertrycket ökar linjärt ner till 5 m under grundvattennivån och är därefter konstant.

Figur 6.13 visar på den verkliga slänten med porövertryck och säkerhetsfaktorn blir då 2,763. När samma sak testades för typslänten blev säkerhetsfaktorn 1,222.

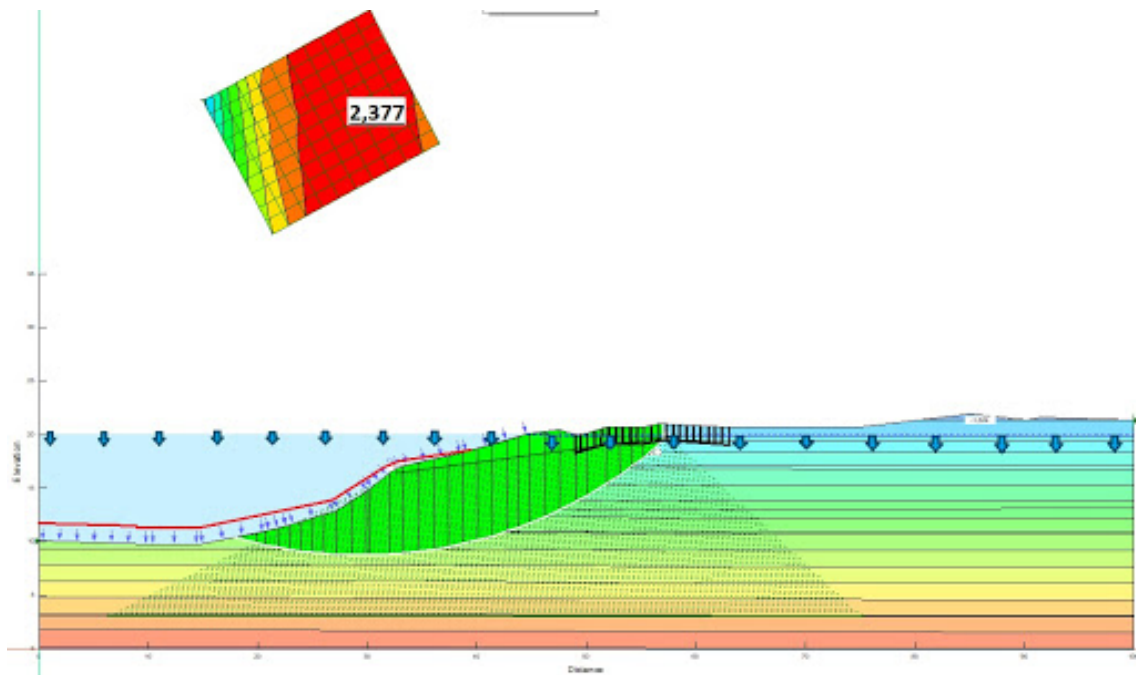


Figur 6.13: Figuren visar den verkliga släntens glidyta och säkerhetsfaktor med ökat portryck. Författarnas egen bild.

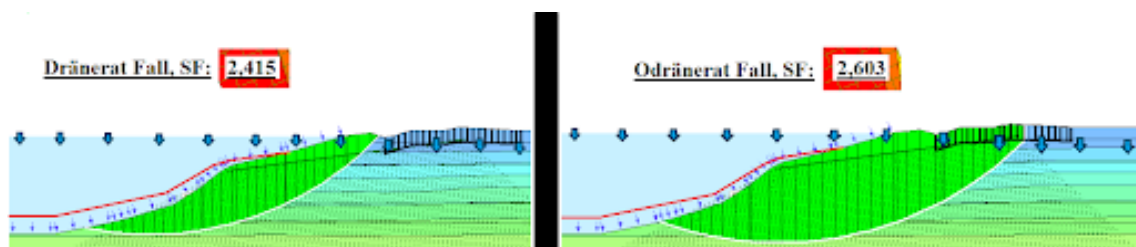
6.6 Klimatförändringarnas sammanlagda inverkan

Nedan visas en simulering som ska illustrera ett potentiellt värsta fall för släntstabilitet år 2100 i den verkliga slänten. Där kombineras alla förändringar som sker till följd av klimatförändringar till ett enda scenario. I detta fall har erosion skett enligt figur 6.9, med 2 m i älvens underkant och sedan triangulärt avtagande upp

till erosionsskyddet. Vegetationen i slänten antas ha dött på grund av de längre torrperioderna och bytts ut mot en torrskorpa med 1,6 m djupa sprickor, då detta sprickdjup gavs ur ekvation 6.3. Vattennivåerna går från en period av hög nederbörd till en period av torka vilket leder till vattenflöden i slänten. Torrperioden har visats vara mest kritisk i den verkliga slänten, även vid frånvaro av vegetation som motverkade grundvattenhöjningen vid nederbördsperioder, stabiliteten minskade ytterligare när SEEP/W användes för att ändra vattennivåerna till detta läge. Porövertrycket antas ha ökat med 0,3 m på grund av att nederbörden har ökat. Resultatet ger en säkerhetsfaktor på 2,377 för en kombinerad analys, visat i figur 6.14. Detta är en minskning med 0,468 från dagens förhållanden vilket motsvarar 16,45 % av säkerhetsfaktorn. Figur 6.15 visar samma förändring vid dränerad och odränerad analys.



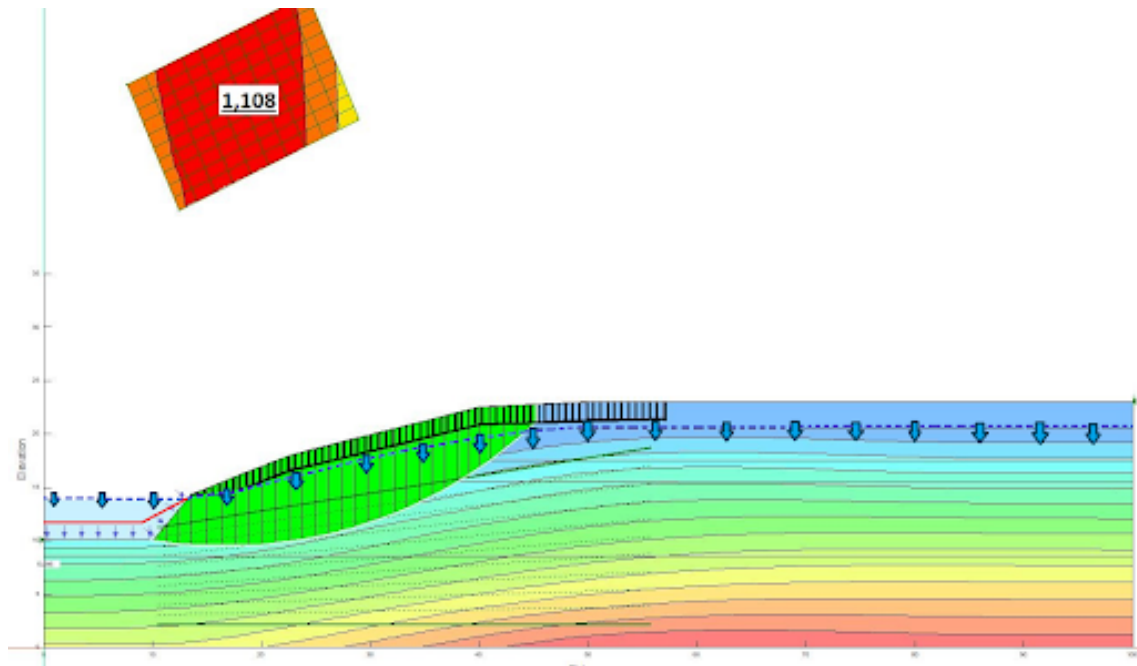
Figur 6.14: Verklig slänt, simulering av det värsta fallet år 2100. Kombinerad analys. Författarnas egen bild.



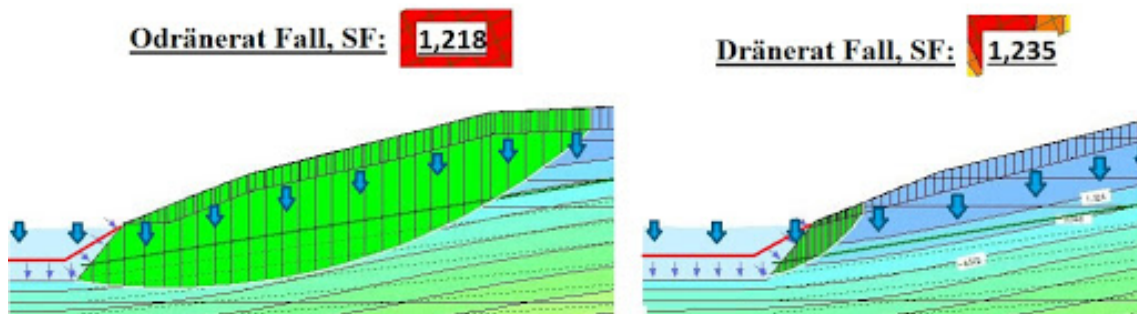
Figur 6.15: Verklig slänt, simulering av det värsta fallet år 2100. Dränerad respektive odränerad analys. Författarnas egen bild.

Ett värsta fall för typslänten år 2100 togs också fram. Samma klimatförändringar lades in och säkerhetsfaktorn hamnade på 1,108 vilket är en minskning med 10 %

från dagens värde. Resultaten med glidytor visas i figur 6.16 för kombinerad analys och figur 6.17 för dränerad och odränerad.



Figur 6.16: Typslänt, simulering av det värsta fallet år 2100. Kombinerad analys. Författarnas egen bild.



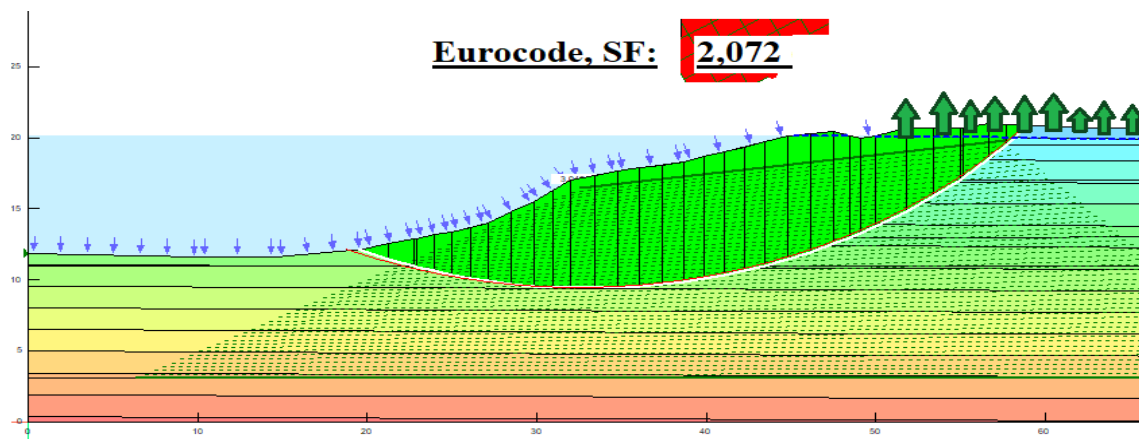
Figur 6.17: Verklig slänt, simulering av det värsta fallet år 2100. Odränerad respektive dränerad analys. Författarnas egen bild.

6.7 Eurocode

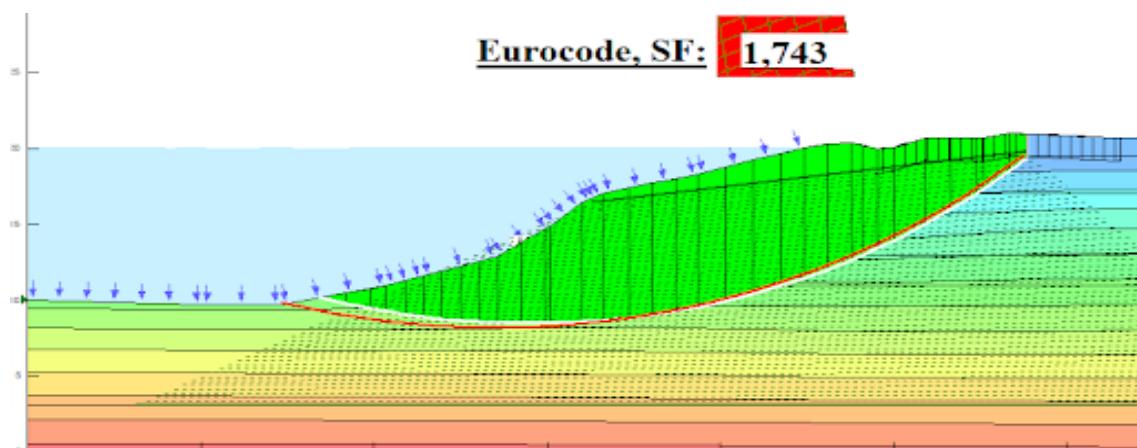
De säkerhetsfaktorer som redovisats i ovanstående del av rapporten syftar till beräkningar gjorda med totalsäkerhetsanalys. Att istället använda sig av partialkoefficienter givna i Eurocode kommer visa på förändrade värden av resultaten orsakat av en annan syn på säkerhetsfaktorns framtagande.

För att avgöra huruvida jorden klarar av aktuell belastning krävs det att beräkningen visar på att effekten av stabiliserande faktorer, R , är större än den totala lasteffekten, S (Per-Evert Bengtsson, Bo Berggren, Lars Ohlsson & Håkan Stille, 1991). Genom valet av säkerhetsklass visas det därefter hur mycket marginal det ska vara för motståndet, R . Dessa faktorer R och S kan ses som stokastiska variabler vilka kan redovisas i form av statistiska parametrar. Dessa kan bland annat vara värden som beskriver tyngdpunkten för sannolikhetstäthetsfunktionen, vilket är en beskrivning av medelvärdet och spridningen runt denna, alltså variansen kring tyngdpunkten. Spridningen blir större ifall det råder en större osäkerhet i medelvärdessvariabeln. Framtagandet av dessa parametrar kräver avancerade processer kring beräkning och tester. Med partialkoefficientmetoden, som Eurocode bygger på, ersätts dessa stokastiska värden på R och S med dimensionerande värden så att sambandet $R_d \geq S_d$ istället fås. De nya dimensionerande värdena R_d samt S_d framtas genom division av karakteristisk bärförmåga f_k med en given partialkoefficient respektive multiplikation av karakteristisk last med en annan given partialkoefficient. Viktigt att komma ihåg är att valet av partialkoefficient grundas i valet av det karakteristiska värdet. Detta värde bygger i sin tur till exempel på medelvärdet eller 5 %-fraktilen för det statistiska framtagandet som gjorts.

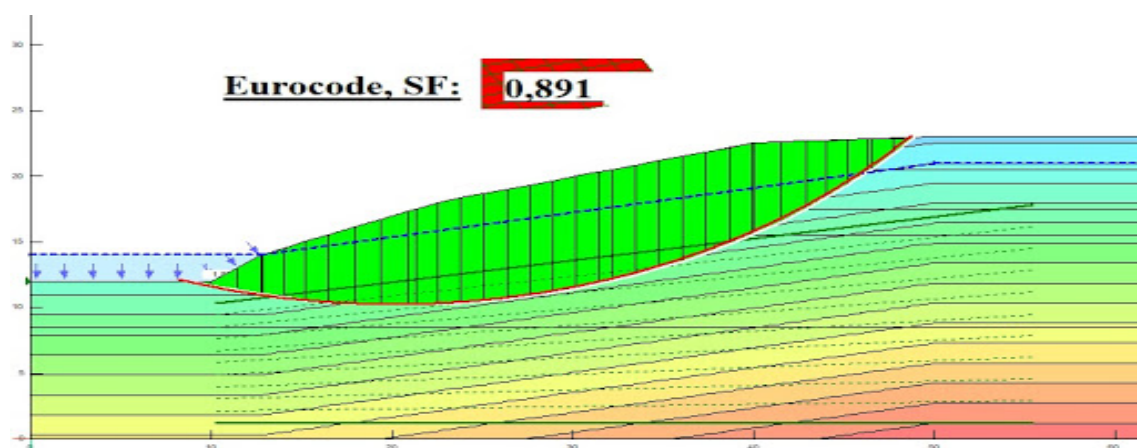
Kommande figurer, figur 6.18 till figur 6.21, i detta avsnitt redovisar för de resultat som erhålls då partialkoefficienterna redovisade i Eurocode användes. Säkerhetsfaktorn visar ett lägre värde för alla fall. Det röda strecket i figurerna representerar glidytan för beräkningar gjorda med totalsäkerhetsanalys. Alla beräkningar gjordes med kombinerad analys.



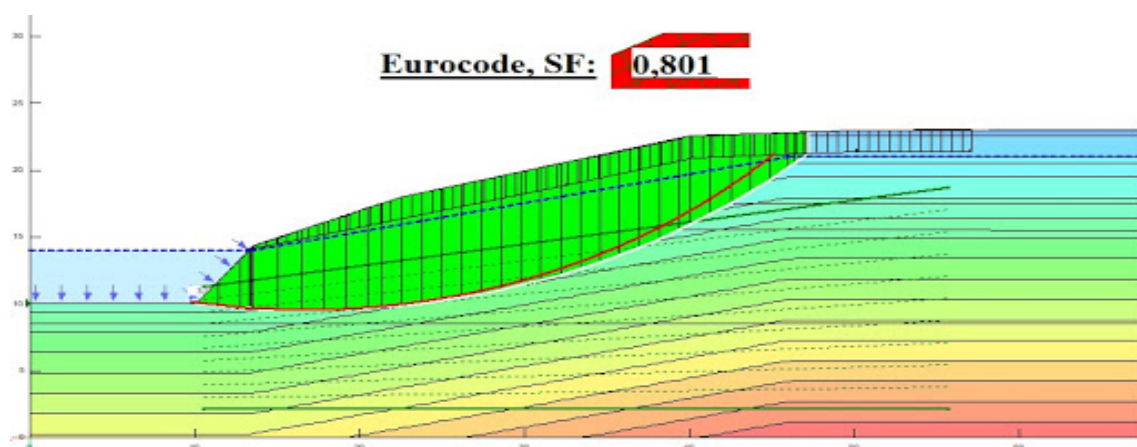
Figur 6.18: *Verklig slänt i nuvarande tillstånd. Författarnas egen bild.*



Figur 6.19: Verklig slänt med simulering av värsta fallet år 2100. Författarnas egen bild.



Figur 6.20: Typslänt i nuvarande tillstånd. Författarnas egen bild.



Figur 6.21: Typslänt med simulering av värsta fallet år 2100. Författarnas egen bild.

7

Diskussion

Två slänter har skissats upp för att kunna jämföras med varandra. Slänterna har olika geometri och därmed skiljer sig påverkan från klimatförändringarna. Den verkliga slänten ritades upp först och sedan typslänten. Detta då vissa förändringar inte hade någon, eller marginell inverkan på den verkliga slänten. Till exempel så ligger den verkliga slänten till stor del under vatten medan typslänten har en större del ovan älvnivån. I huvuddelen av diskussionen kommenteras endast det kombinerade fallet. Alla slänter längs Göta älv är olika vilket medför att det inte är representativt att bara studera en slänt och dess förändring efter klimatförändringar. Två slänter ger inte hela bilden men betydligt mer än att bara analysera en slänt. Flera osäkerheter vad gäller materialparametrar, geometri, val av kombinerad analys med flera leder till osäkerheter som kan skilja dagens säkerhetsfaktorer från verkligheten. Dock ligger fokus på förändringen i säkerhetsfaktor från idag till år 2100 vilket gör dessa osäkerheter mindre relevanta.

7.1 Jämförelse mellan slänter till följd av klimatförändringar

Resultatet för den verkliga slänten år 2100 leder, med kombinerad analys, till en procentuell minskning av säkerhetsfaktorn med 16,45 %. Olika klimatförändringar hade olika stor betydelse på släntstabiliteten och i den verkliga slänten hade erosion den i särklass största påverkan. Även en förändrad vattennivå och högre portryck hade stor betydelse. Samtidigt gav förlust av vegetation och sprickbildning en marginell skillnad. En ökad vattennivå ledde till en mycket stabilare slänt i dagens klimat. Även i framtiden ledde det till en ökad säkerhetsfaktor, dock mindre betydande då vegetationen inte längre motverkade de negativa effekterna av ökat portryck.

Typslänten hade en procentuell minskning år 2100 på 10 %, dock var förändringen från 1,231 till 1,113 och slänten är närmare brott från början. Denna slänt hade också erosion som en betydande faktor, dock ledde sprickor och förlust av vegetation till något större förändringar än i den verkliga slänten. Det som skiljde typslänten mest från den verkliga slänten var vid förändring i vattennivå och portryck. Højning och sänkning av vattennivån ledde inte till någon betydande skillnad i typslänten. När det kom till portrycksförändringar sänktes den verkliga släntens säkerhetsfaktor med nästan 3 % efter att portrycken höjdes medan typslänten sänktes med under 1 %. Detta beror på att en större del av glidytan påverkades i den verkliga slänten

då större del av den ligger under grundvattennivån.

Det som skiljde mest i resultaten mellan de två slänterna var ändrad vattennivå. När vattennivån ändras så ändras den i både älv och i marken, dessa två konsekvenser har motsatt effekt. Mer vatten i älven leder till mer mottryck i underkant och således till högre släntstabilitet. Tvärtom leder mer vatten i marken till högre portryck som i sin tur leder till lägre effektivspänningar och lägre säkerhetsfaktor. Detta medför att en del slänter förändras kritiskt vid högre vattennivåer, medan andra förändras kritiskt vid lägre vattennivåer. De två slänterna har gemensamt att de båda har ett vattendrag i underkant, detta gör att det blir mer kritiska förhållanden vid låga vattennivåer då det minskar mottrycket från vattendraget.

Slänterna får väldigt olika effekter av vattennivåförändring på grund av glidytor-
nas utformning. För typslänten, där glidytan mestadels är i marken, tar effekterna av vattennivåerna i älv och mark ut varandra eftersom den mothållande kraften ökar på samma gång som skjuvhållfastheten minskar, således är säkerhetsfaktorn i typslänten inte beroende av variationer i vattennivå. Däremot sker förändring i den verkliga slänten, som mestadels är under vatten. På grund av detta är vattennivån i älven markant mer betydande än grundvattennivån och kritiska fall uppstår när vattennivån sjunker. Därför kan en slutsats dras att slänter med vattendrag i underkant i framtiden främst kommer att påverkas av ändrade vattennivåer när slänten, och således glidytan, är under vattenytan. Detta på grund av att kritiska förhållanden kommer uppstå under långa perioder av torka. Slänter utan vattendrag i underkant kan istället bli kritiska vid långa perioder av nederbörd på grund av högre portryck i marken.

Som diskuterats i tidigare stycke beror klimatförändringarnas påverkan till stor del på släntens geometri med glidytans form, placering och djup. Båda slänterna som analyserats har långa och djupa glidytor vid kombinerad analys, cirka 40 m långa och 8 m djupa. Den verkliga slänten har majoriteten av sin glidyta under älven, typslänten har istället större delen av sin glidyta över älvnivån. Om typslänten fanns på riktigt hade detta gett möjlighet för vegetation att växa över en större del av glidytan. Hade glidytan dessutom varit grundare eller om det funnits större växter med djupare rötter skulle vegetationen eventuellt ha en större påverkan på säkerhetsfaktorn.

Ingen av slänternas säkerhetsfaktor påverkas mer än 1 % av 1,6 m djupa sprickor, även om typslänten har en något större förändring. Detta är förväntat då den djupaste delen av glidytan är över 8 m, samtidigt försvinner endast någon enstaka meter av totalt 40 m glidyta som mothållande kraft. Sprickbildning är svårt att förutspå och att sprickorna blir 1,6 m djupa är långt ifrån säkert. Vid test av olika djup ner till 2,4 m visade det sig att säkerhetsfaktorn minskade med cirka 0,01 per meter spricka, det vill säga en väldigt liten förändring. I en grundare och kortare glidyta kan sprickor leda till att en större andel av mothållande kraften försvinner när sprickorna skär av en större del av glidytan i längsled. Parallellt är trycket från vattnet i sprickorna lika högt som i tidigare fall men den totala mothållande kraften

minskar då en mindre slänt inte skapar lika stora krafter. Således påverkas säkerhetsfaktorn betydligt mer av sprickbildning i dessa fall.

Med denna information i åtanke är det därför möjligt att anta att störst förändring på säkerhetsfaktorer i framtiden sker för grunda glidytor som sträcker sig under vattendrag. Således kan högre förändringar än 16,45 % erhållas för dessa slänter och behöva beaktas i framtiden.

Erosionen ger den mest betydande förändringen i släntstabiliteten för båda slänterna, dock har den störst inverkan på den verkliga slänten som har erosionsskydd. Erosionsskydd byggs främst för att förhindra negativa konsekvenser på grund av erosion, detta innebär att inte älvens kanter ska förändras och expandera upp mot intilliggande byggnader. Erosionsskydd är också tänkt att fungera stabiliserande för slänter ovan vattenytan, dock befinner sig den verkliga slänten under vattenytan och således under erosionsskyddet. Detta leder till att erosionsskyddet bara förhindrar de positiva effekterna erosion kan ha på släntstabiliteten, det som sker ovanför slänten. Erosionsskyddet i den verkliga slänten kan därför anses ha en negativ påverkan på släntstabiliteten och att ta bort eller flytta detta är en naturlig och effektiv åtgärd för att öka säkerhetsfaktorn. Noterbart är att erosionsvärdena som används för modelleringen är tagna från där den verkliga slänten befinner sig. Det är ett av områdena där erosion är som högst, detta på grund av bottenmaterialet. På många andra platser är erosionen betydligt mindre och därmed även konsekvenserna.

Varje år inspekteras och åtgärdas delar av skyddet över vattenytan men under vattenytan är läget mer osäkert. Vid modelleringen har det antagits att skydden fungerar som de ska men i Göta älvtredningen framgår det att erosionsskyddet vid vissa delar förflyttats mot mitten av älven till följd av erosionen i underkant (Rydell m. fl., 2011). Detta kan ha en positiv påverkan på den beräknade säkerhetsfaktorn år 2100. Om det visar sig att skyddet ligger längre ut kan det ha en positiv effekt då det kan ge ett visst skydd mot erosion närmare släntfoten där den kritiska erosionen sker, det kan även anses vara en liten mothållande kraft mot skred.

7.2 Kombinerad, dränerad och odränerad analys

I tabellerna 7.1 och 7.2 visas beräknade säkerhetsfaktorer för den verkliga slänten respektive typslänten med kombinerad, dränerad och odränerad analys.

Tabell 7.1: Redovisade säkerhetsfaktorer med respektive minskning för verkliga slänten

Verklig slänt	Idag	2100	minskning [%]
Dränerad	3,039	2,415	20,5
Odränerad	3,007	2,603	13,4
Kombinerad	2,845	2,377	16,5

Tabell 7.2: Redovisade säkerhetsfaktorer med respektive minskning för typslänten

Typslänt	Idag	2100	minskning [%]
Dränerad	1,580	1,235	21,8
Odränerad	1,370	1,218	11,9
Kombinerad	1,232	1,108	10,0

Det första som är värt att notera är att teorin som används i Sverige för att inte underskatta säkerhetsfaktorn stämmer överens med resultaten från simuleringarna. I alla fallen ger den kombinerade analysen den lägsta säkerhetsfaktorn, detta eftersom kombinerad analys använder det lägsta hållfasthetsvärdet av dränerad och odränerad analys för varje lamell. I kombinerat fall för slänterna som analyserats har dränerade egenskaper använts för ungefär fem lameller längst till vänster, resten har haft odränerade egenskaper. Den kombinerade analysens säkerhetsfaktor må vara marginellt mindre, men ändå såpass mycket mindre att förstärkningsåtgärder kan övervägas i större grad och därmed ge en stabilare slänt. Dock är förstärkningsåtgärder inte nödvändigt om inte säkerhetsfaktorn underskrider kravet för stabilitet.

Det mest anmärkningsvärda är att säkerhetsfaktorn för det dränerade fallet minskar betydligt mer än övriga, framförallt är skillnaden stor i typslänten. En observation är att glidyterna för kombinerat och odränerat fall i princip är identiska medan för dränerat fall så är glidyterna betydligt mindre, grundare och närmre vattnet. För dränerat fall är skjuvhållfastheten i hög grad beroende av effektivspänningarna. Till följd av att effektivspänningarna är lägst på låga djup samt att överliggande vatten orsakar lägre effektivspänningar än ovanliggande lera så hamnar glidyten som beskrivet ovan. Det förklarar även varför dränerade egenskaper endast används för de fem lamellerna längst till vänster i den kombinerade analysen.

En anledning till att den dränerade säkerhetsfaktorn minskar mer än övriga kan vara att glidyten är grundare. Som tidigare nämnts är grunda glidyter mer känsliga för klimatförändringar i form av vegetationsförlust och sprickbildning. En grund glidytta gör att förändringar som sänkningen av kohesionsinterceptet c' med 1 kPa påverkar en större del av det relevanta området. På samma sätt blir erosionen mer

betydande. När glidytan är mindre försvinner en större andel av den mothållande kraften än i de andra fallen. På grund av att glidytan är grundare så påverkas typslänten mer än den verkliga slänten i den dränerade analysen.

7.3 Totalsäkerhetsanalys och Eurocode

De två studerade metoderna för framtagning av säkerhetsfaktor visar på resultat som redovisas i tabell 7.3 och tabell 7.4:

Tabell 7.3: Redovisad skillnad mellan totalsäkerhetsanalys och Eurocode för den verkliga slänten

Verklig slänt	Totalsäkerhetsanalys	Eurocode	minskning [%]
Idag	2,845	2,072	27,2
Framtid	2,377	1,763	25,8

Tabell 7.4: Redovisad skillnad mellan totalsäkerhetsanalys och Eurocode för den typslänten

Typslänt	Totalsäkerhetsanalys	Eurocode	minskning [%]
Idag	1,232	0,891	27,7
Framtid	1,108	0,801	27,7

Beräkningar utförda med Eurocode visar i detta fall på resultat $\sim 27\%$ lägre än totalsäkerhetsanalysen. Skillnaden beror på de partialkoefficienter som tillämpats och på vilket karakteristiskt värde de appliceras på. Något som kan vara värt att ta i beaktning är att det redan finns faktorer i Eurocodes uppbyggnad som tar hänsyn till att förändringar i klimat kan ske. Detta gör att klimatförändringar i viss mån appliceras två gånger, på så sätt kan en överskattning av förändringen uppstå. Skillnaden på värdet hos säkerhetsfaktorn är att i totalsäkerhetsanalysen används en säkerhetsfaktor för maximal tillåten marginal, medan för Eurocode ansätts en säkerhetsfaktor som beskriver närmare för då brott inträffar. Att Eurocode resulterar i ett värde närmare brott förklaras med den bakomliggande tanken kring partialkoefficienterna. Partialkoefficienterna är framtagna på sådant vis att det ska visa på en säker beskaffenhet som befinner sig över gränsen för brott. Framtagandet av partialkoefficienterna utförs till stor del av statistiska metoder med fokus på medelpunkt och varians. Detta resulterar i att även fast beräkningar med Eurocode inte reflekterar över det exakta värdet för aktuellt område så visar den på ett värde närmare verkligheten än totalsäkerhetsanalysen. För att uppnå en mer exakt slutsats över jordegenskaperna krävs en stor mängd tester som utförs på varje enskilt område för att därefter visa på platsspecifika partialkoefficienter.

Tabell 7.5: Dagens och framtidens procentuella minskning för Eurocode respektive totalsäkerhetsanalys

	Idag	2100	minskning [%]
Eurocode			
Verklig slänt	2,072	1,763	14,9
Typslänt	0,891	0,801	10,1
Totalsäkerhetsanalys			
Verklig slänt	2,845	2,377	16,5
Typslänt	1,232	1,108	10,0

Vid jämförelse mellan Eurocode och totalsäkerhetsanalys vad gäller klimatförändringars påverkan på kombinerad analys, var resultaten väldigt liknande. Förändringen i säkerhetsfaktor från dagens fall till år 2100 var procentuellt ungefär i samma storleksordning, vilket redovisas i tabell 7.5. En mindre förändring skedde dock när Eurocode implementerades. Detta kan bero på att totalsäkerhetsanalysen generellt har högre säkerhetsfaktorer och på så sätt en större tendens att förändras.

7.4 Felkällor

En stor källa som gör att det framtagna resultatet blir svårt att applicera på verkligheten är att alla värden från klimatförändringarna är osäkra. Ingen vet hur klimatet kommer bli, inget alternativ är därför rätt. Potentiella värsta fall som fortfarande är inom rimliga gränser och är baserade på mätningar har använts.

7.4.1 Materialparametrar och klimatförändringar

I modelleringen har ingen hänsyn tagits till att det finns en omättad zon med ytvatten över grundvattennivån. Denna omättade zon orsakar två fenomen varav det ena är att jordens tunghet ökar då vattnet tynger ner marken utan att bära upp partiklarna som grundvattnet gör. Det andra är att det leder till negativa portryck och därmed högre effektivspänning samt högre skjuvhållfasthet. I den verkliga slänten ligger en väldigt liten del av leran över grundvattenytan och på grund av detta bör således inte säkerhetsfaktorn påverkas i någon större utsträckning efter att klimatförändringarna modellerats. I typslänten kan det ha en något större påverkan men det kommer rimligtvis aldrig leda till att säkerhetsfaktorn överskattas, eftersom negativa portryck bör höja säkerhetsfaktorn mer än vad högre egentyngd sänker den. Det är dock möjligt att den verkliga säkerhetsfaktorn sänks mer än beräknat om dagens negativa portryck antingen hamnar under grundvattenytan eller fylls med

lite mer vatten, vilket då gör att portrycken ökar något även om de ändå kommer vara negativa.

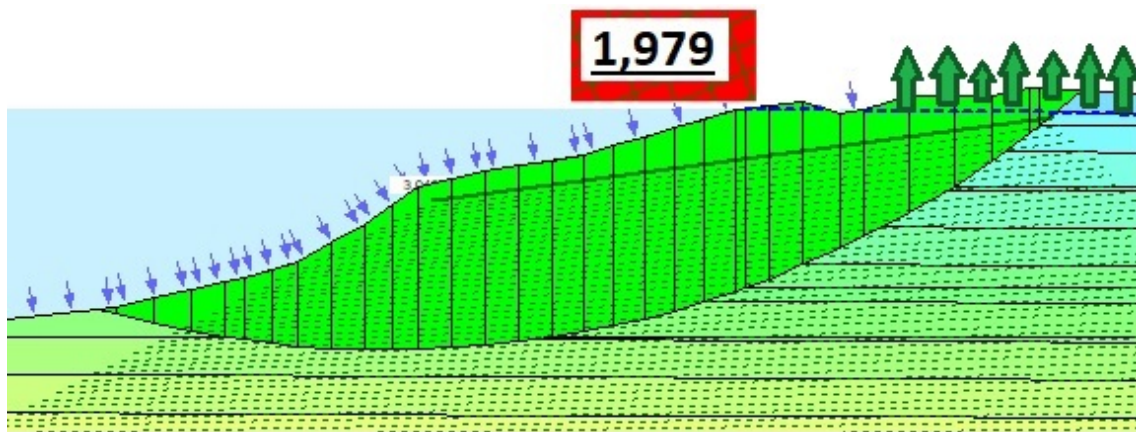
Ingen hänsyn har tagits till dagens porövertryck. Detta beror i huvudsak på att den givna datan vid mindre djup, där detta är relevant, visar väldigt olika tryck i olika punkter så att ingen tydlig trend kan uppskattas. Precis som när det handlar om negativa portryck bör detta inte ge någon signifikant påverkan på resultatet. I detta fall är det dock möjligt att säkerhetsfaktorn överskattas något om det visar sig att porövertryck faktiskt existerar.

Förutom att det råder stor osäkerhet i hur mycket lera som totalt kommer eroderas bort är det även osäkert hur erosionen fördelar sig i området, både tvärs över älven samt längs med den. Stora lokala variationer kan förekomma och små ras kan medföra att erosionen inte fördelar sig i slänten på samma sätt som har antagits. Ingen hänsyn har heller tagits till förändrade vattennivåer till följd av erosionen av älvbotten.

7.4.2 Utvärderingar av försök

Efter att materialparametrarna sammanställts och slänten modellerats för olika klimatförändringar noterades att för höga värden använts då triaxialförsöket togs med i beräkningarna för odränerade skjuvhållfastheten, c_u . Även kohesionsinterceptet c' antogs vara högre än normen säger. Detta kommer inte påverka slutsatserna i någon större utsträckning men säkerhetsfaktorerna som beräknats är sannolikt för höga.

För att undersöka vad den överskattade skjuvhållfastheten har för påverkan på resultatet utfördes ett test på den verkliga slänten med lägre hållfasthetsvärden för leran. För att beräkna skjuvhållfastheten ignorerades triaxialförsöken helt och därmed blir lerans skjuvhållfasthet fortfarande 10 kPa vid ytan, men ökar med 0,3 kPa/m ner till 10 meters djup, jämfört med tidigare 1 kPa/m. Från 10 meters djup och nedåt ökar skjuvhållfastheten med 1,2 kPa/m istället för tidigare 2,2 kPa/m. Friktionsvinkeln ϕ' fortsatte vara 31,3° medan c' , istället för tidigare framtagna 4 kPa, sattes till 0,1 kPa. Övriga parametrar var desamma som tidigare och kombinerad analys genomfördes, se figur 7.1. Säkerhetsfaktorn blir i detta fall 1,979 medan det blir 2,845 för de värden som använts för analyserna i resultatet, alltså ger nya värden för skjuvhållfasthet och kohesionsintercept en minskning på ungefär 30 %.



Figur 7.1: *Kombinerad analys med lägre hållfasthetsparametrar. Författarnas egen bild.*

Å andra sidan behöver felet inte nödvändigtvis vara så stort, då ingen hänsyn har tagits till jordens anisotropi. Anisotropi innebär att jordens odränerade skjuvhållfasthet varierar i längsled beroende på om det är i aktivzonen, passivzonen eller direkta skjuvzonen. För att ta fram en korrekt säkerhetsfaktor bör detta beaktas i beräkningarna. I detta fall är värdena för skjuvzonen och passivzonen ungefär lika stora, medan de för aktivzonen är cirka 80 % högre. Dessa värden har inte testats för slänterna som undersökts i detta arbete, men för en slänt lite söder om Surte med liknande materialdata kunde säkerhetsfaktorn höjas med cirka 15 % när hänsyn togs till anisotropi (Hernvall, 2017). I detta fall kan värdet 1,979 ökas till 2,276 vilket gör att säkerhetsfaktorerna i denna rapport är cirka 20 % lägre än vad som beräknats. För att få en mer verklig bild av olika förändringar bör alltså alla säkerhetsfaktorer sänkas i den storleksordningen. Däremot om glidytor varierar i placering och form vid olika klimatförändringar så blir resultaten inkonsekventa ifall hänsyn tas till anisotropi i marken. Då fokus i rapporten inte ligger på säkerhetsfaktorns startvärde utan på förändringen i tid, har inte anisotropi applicerats i försöken.

7.4.3 Simuleringar

Vegetationssimuleringen har två felkällor. GeoStudios funktion för att simulera vegetation är relativt obeprövad och kan skilja sig från verkligheten. Dessutom är många av de värden som lagts in för att simulera vegetationen osäkra. Temperatur, nederbörd, strålning och liknande har valts utifrån representativa värden för Göteborgsområdet men kan skifta från ett typfall för dagens och framtida förhållande.

Ett vanligt förekommande problem vid simuleringar av verkligheten är att det inte är möjligt att få in en exakt överensstämmande bild av slänten i programmet. Många felkällor kan ligga i provtagningarna, att de tas på icke-representativa mät-punkter eller att den fysiska provtagningen och mätutrustningen är osäker. Efter detta ska värdena tolkas och utvärderas och föras in i programmet. Detta gör att resultaten som fås i simuleringarna har en osäkerhetsfaktor som är svår att uppskatta.

Eftersom grid- och radiusmetoden används i GeoStudio tillämpas lamellmetoden och cirkulär cylindriska glidytor för att beräkna säkerhetsfaktorn. I och med detta används jämvikt för att beräkna säkerhetsfaktorer och metoden kan därför ha vissa begränsningar jämfört med finita elementmetoden. Framförallt är skillnaderna större när det gäller spänningsfördelning i jord med olika kornstorlekar eftersom finita elementmetoden bättre tar hänsyn till vad exempelvis ett tunt lager sand har för påverkan på resten av slänten.

7.4.4 Eurocode och totalsäkerhetsanalys

Uppnådda säkerhetsfaktorer visar på olika resultat beroende på vilken analysform som tas i beaktning. Att beräkna med partialkoefficienter angivna i Eurocode visade på minskat värde av säkerhetsfaktor. Totalsäkerhetsanalys klassar säkerhetsfaktorn som den nödvändiga marginalen av kraft eller arbete för att nå beräknat brottvärde. Att istället redovisa säkerhetsfaktorn för dess risk att faktiskt nå beräknat brottvärde (Per-Evert Bengtsson m. fl., 1991) kommer förenkla för utförligare beslutsunderlag inom de flesta samhällsliga aspekterna. Beräkning med Eurocode visar på ett resultat som närmare beskriver fallet för då slänten når sitt brottvärde. Vid beräkning med Eurocode är det dock nämnvärt att reflektera över att säkerhetsfaktorerna är framtagna på sådant tillvägagångssätt som möjligen inte är exakta. Bestämningen av säkerhetsfaktorer är på uteslutet vis framtagna genom statistiska metoder. Däremot återfinns svårigheten i att avgöra för vilken metod som visar på det bästa resultatet för efterfrågad säkerhetsmarginal.

8

Slutsats

Resultaten visar att klimatförändringarna i sin helhet kommer ha en negativ påverkan på släntstabiliteten. Värdena på förändringarna som beaktas ligger i överkant och kan ha överskattats, dock kan det även ha underskattats då det kan komma att bli än mer kritiska förhållanden. I den verkliga slänten som undersöktes sänktes säkerhetsfaktorn med 16,45 % år 2100. Den faktor som har absolut störst påverkan på den slänten är erosion följt av poröverttryck och förändringar i vattennivå. Det kan finnas slänter där förändringarna är ännu större, ett exempel som framkommit i denna studie är att säkerhetsfaktorn för slänter med grunda glidytor förändras mer än andra. Det är alltså viktigt att komma ihåg att alla slänter har olika förutsättningar, eftersom många faktorer påverkar släntstabiliteten är det omöjligt att ta fram en mall som stämmer för hela Göta älvdalen. Ytterligare undersökningar bör genomföras för en schematisk bild av klimatförändringarnas påverkan på släntstabiliteten i hela Göta älvdalen och därmed säkerställa att alla slänter är stabila i framtiden.

Litteraturförteckning

- Alén, C., Bengtsson, P.-E., Berggren, B., Johansson, L. & Johansson, (2000). *Skredriskanalys i Göta älvdalen - Metodbeskrivning* (forskningsrapport nr. 0348-0755). Linköping: Statens geotekniska institut. Hämtad från <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r58.pdf>
- Bergström, S., Andréasson, J., Losjö, K., Stensen, B. & Wern, L. (2011). *Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen*. Sveriges geotekniskt institut. Hämtad från http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_27.pdf
- Blied, L. & Persson, H. (2011). *Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älvdalen till följd av förändrat klimat* (forskningsrapport nr. 6-1001-0037). Linköping: Statens geotekniska institut. Hämtad från https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_9.pdf
- Budhu, M. (1999). *Soil mechanics & foundations*. New York: John Wiley & sons, inc.
- Cady & Gilbert, H. (2014). Peat. *Accessience*. doi: <https://doi.org/10.1036/1097-8542.493400>
- Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability* (2nd utgåvan). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- E. Norris, J., Stokes, A., B. Mickovski, S., Cammeraat, E., Van Beek, R., C. Nicoll, B. & Achim, A. (2008). *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. The Netherlands: Springer. Hämtad från https://books.google.se/books?id=YWPcffxM_A0C&pg=PA93&lpg=PA93&dq=uproot+slopestability&source=bl&ots=qsMLwW3het&sig=ACfU3U0Jjzsd7stB03rbXdrlX9mtddovHw&hl=sv&sa=X&ved=2ahUKEwiYjJPESvfAhUMI1AKHXNbD3oQ6AEWAHoECAYQAQ#v=onepage&q=uproot%20slopestability&f=false
- GEO-SLOPE. (u. å.). *Transpiration by Root Water Uptake*. GEO-SLOPE International Ltd. Hämtad från <http://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/examples/9/0/VadoseW/Transpiration%20by%20Root%20Water%20Uptake.pdf>
- GeoStudio. (2018). *Stability modeling with SLOPE/W*. GeoStudio. Hämtad från <http://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/books/10/0/SLOPE%20Modeling.pdf>

- Hernvall, H. (2017). *Clay slopes and their stability: An evaluation of different methods* (doktorsavhandling, Chalmers University of Technology). Hämtad från <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/250898/250898.pdf>
- IEG. (2010). *Tillämpningsdokument : EN 1997-1 kapitel 11 och 12, slänter och bankar* (nr. 2008:6, rev 1). Stockholm: Implementeringskommission för Europastandarder inom geoteknik (IEG). Hämtad från <http://www.sgf.net/web/page.aspx?refid=3387>
- IEG. (2013). *Tillämpningsdokument – Grunderna i Eurokod 7* (nr. 2008:2, rev 3). Stockholm: Implementeringskommission för Europastandarder inom geoteknik (IEG). Hämtad från <http://www.sgf.net/web/page.aspx?refid=3387>
- Karlsson, M. & Moritz, L. (2016). *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner-TK Geo 13 (version 2.0)*. Trafikverket. Hämtad från <http://trvdokument.trafikverket.se/Versioner.aspx?spid=27&dokumentId=TDOK%202013%3a0667>
- Klingberg, F. (2011). *Bottenförhållanden i Göta älv*. Sveriges geotekniskt institut. Hämtad från http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_6.pdf
- Knappett, J. & Craig, R. (2012). *Craig's soil mechanics* (8th utgåvan). London & New York: Spon Press.
- Krahn, J. (2003). The 2001 R.M. Hardy lecture: the limits of limit equilibrium analyses. *NRC Canada, 40*. Hämtad från <https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc433/lecture-material/Krahn-2002HardyAddress.pdf>
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Statens geotekniska institut. Hämtad från <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>
- Morgenstern, N. & Price, V. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique, 15(1) pp. 79-93*. Hämtad från <https://era.library.ualberta.ca/items/14b23206-b500-4025-9132-e250eb0b1d8f>
- Nationalencyklopedin. (u. å.). *Bladvass*. Nationalencyklopedin. Hämtad 2019-04-12, från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/bladvass>
- Per-Evert Bengtsson, Bo Berggren, Lars Ohlsson & Håkan Stille. (1991). *Geoteknik och statistik : partialkoefficienter* (nr. 1991:25). Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning. Hämtad från <http://hdl.handle.net/2077/47954>
- Rydell, B., Persson, H. & Blied, L. (2012). *Klimateffekt på vattennivåer, erosion och grundvattenförhållanden i Göta älv*. Sveriges Geotekniska Institut. Hämtad från <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v624-1.pdf>
- Rydell, B., Persson, H., Blied, L. & Rankka, W. (2011). *Erosionsförhållanden i Göta älv* (forskningsrapport). Linköping: Sveriges Geotekniska Institut. Hämtad från http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_1.pdfTags
- SGI. (u. å.). *Varför inträffar skred?* Hämtad 2019-03-11, från <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/ras-och-skred/varfor-intraffar-skred/>
- SGI. (2012). *Skredrisker i Göta älv dalen i ett förändrat klimat* (forsknings-

- rapport nr. 6.1-1203-0204). Linköping: Statens geotekniska institut. Hämtad från https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_slutrapport_del1.pdf
- SGI. (2015). *Stabilitetsförhållanden i Göta älvdalen* (forskningsrapport). Linköping: Statens geotekniska institut. Hämtad från <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/sgi-vagledning/sgi-vl2.pdf>
- SGU. (u. å.). *Skred och ras*. Hämtad 2019-03-11, från <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/>
- Skredkommissionen. (1995). *Anvisningar för släntstabilitetsutredningar* (forskningsrapport nr. 3:95). Linköping: Ingenjörsvetenskapsakademien. Hämtad från https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/ovrigt/pdf/skredk_r3-95.pdf
- Swedish Standards Institute. (2010). *Svensk Standard SS-EN 1997-1:2005 - Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner – del 1: Allmänna regler*. Swedish Standards Institute. Hämtad 2019-02-27, från <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/konstruktionsaspekter/ssen199712005/>
- Sällfors, G. (1984). *Handbok för beräkning av Slänters stabilitet*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning.
- Sällfors, G. (2013). *Geoteknik: jordmateriallära, jordmekanik* (5. uppl utgåvan). Göteborg: Cremona.
- Tang, A. M., Hughes, P. N., Dijkstra, T. A., Askarinejad, A., Brenčić, M., Cui, Y., ... Van Beek, V. (2018). Atmosphere–vegetation–soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. doi: <https://doi.org/10.1144/qjgeh2017-103>
- Tardio, G. & Mickovski, B. (2015). Method for synchronisation of soil and root behaviour for assessment of stability of vegetated slopes. *Ecological Engineering*. Hämtad från https://www.naturalea.eu/Ntr/wp-content/uploads/2018/05/g_tardio_soil_and_root.pdf
- Toy, T. J. (2014). Erosion. *Accessience*. doi: <https://doi.org/10.1036/1097-8542.240900>
- Åhnberg, H., Larsson, R., Bengtsson, P.-E., Lundström, K., Löfroth, H. & Tremblay, M. (2011). *Hantering av kvickleraförekomst vid stabilitetsutredning för Göta älv* (forskningsrapport nr. GÄU - delrapport 32). Linköping: Statens Geotekniska Institut. Hämtad från http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_32.pdf
- Åström, S., Eklund, D. & Lindahl, S. (2011). *Hydrodynamisk modell för Göta älv*. Sveriges geotekniskt institut. Hämtad från http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_3.pdf