



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---



# **Analys och simulering av Tuveskredet**

## En redogörelse för orsaken bakom skredet

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

Khaled Alyoussef

Annie Dristig

Elin Höjer

Kristin Olofsson Hoffmann

Gustav Sjöbeck



KANDIDATARBETE 2020: ACEX10-20-31

# Analys och simulering av Tuveskredet

En redogörelse för orsakerna bakom skredet

Khaled Alyoussef  
Annie Dristig  
Elin Höjer  
Kristin Olofsson Hoffmann  
Gustav Sjöbeck



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik  
*Avdelningen för geologi och geoteknik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2020

Analys och simulering av Tuveskredet  
En redogörelse för orsakerna bakom skredet

Khaled Alyoussef  
Annie Dristig  
Elin Höjer  
Kristin Olofsson Hoffmann  
Gustav Sjöbeck

© KHALED ALYOUSSEF, ANNIE DRISTIG, ELIN HÖJER, KRISTIN OLOFSSON HOFFMANN, GUSTAV SJÖBECK, 2020.

Handledare: Carolina Sellin  
Examinator: Minna Karstunen

Kandidatarbete 2020: ACEX10-20-31  
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för geologi och geoteknik  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg

Framsida: Bild efter Tuveskredet av Åke Hillefors, 2020, delad under CC by 4.0.

Typeset in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg, Sverige 2020

## Sammandrag

För drygt 40 år sedan inträffade Tuveskredet, ett kraftigt jordskred där 9 människor omkom och 465 människor förlorade sina hem. Händelsen utgjorde en väckarklocka som förändrade samhällets syn på skredrisker i allmänhet. Detta arbete undersöker Tuveskredet och syftar till att identifiera de faktorer som kan ha bidragit till skredförloppet. Skredet simulerades i de två programmen GeoStudio:Slope/W och LimitState:Geo och resultaten jämfördes med tidigare stabilitetsanalyser av skredområdet. Eftersom det hade varit en ovanligt regnig period före skredet undersöktes främst portrycksförändringars inverkan på släntstabiliteten. Vidare genomfördes även en litteraturstudie och intervju för att skapa en bredare förståelse kring händelsen och erhålla ytterligare en dimension till resultatet av undersökningen. Utöver analys av resultaten från datorsimuleringarna diskuteras även etiska aspekter och framtida utmaningar kopplat till skredrisker i allmänhet. I analysen konstateras bland annat att förhöjda portryck inte var den enskilt bidragande orsaken till att skredet utlöstes och fick så stor utbredning. Sammantaget dras slutsatsen att en kombination av stora mängder nederbörd, förhöjda portryck, låg stabilitet, ett progressivt brott och kvicklera bidrog till Tuveskredet och dess omfattning.

Nyckelord: Tuveskredet, Släntstabilitet, Porövertryck, Kwicklera

## Abstract

About 40 years ago the Tuve landslide occurred, a powerful landslide that killed 9 people and resulted in 465 people losing their homes. The event functioned as a wakeup call, which changed the societal view on risks of landslides in general. This paper examines the Tuve landslide and aims to identify the underlying factors contributing to the progress of the landslide. Simulations were carried out in two programs, GeoStudio:Slope/W and LimitState:Geo, where the results were compared with earlier stability analyses of the slopes. Because of the unusually rainy period prior to the landslide, changes in pore pressures and their effect on the slope stability were mainly studied. Furthermore, a literature study and interview were also conducted to create a broader understanding of the event and to obtain a further dimension to the objective of the study. In addition to the analysis of the results from the simulations, ethical and future challenges connected to slope stability are discussed. The analysis concludes that pore pressure changes are not the sole reason behind the landslide and its magnitude. To summarize, a combination of large amounts of rain, excess pore pressures, low initial stability, a progressive slide and quick clay were contributing factors to the landslide and its extent.

Keywords: The landslide at Tuve, Slope stability, Excess pore pressure, Quick clay

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1	Syfte . . . . .	1
1.2	Metod . . . . .	1
1.3	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Beräkningsmetoder gällande släntstabilitet . . . . .	3
2.1.1	Lamellmetoden . . . . .	3
2.1.2	Discontinuity layout optimization . . . . .	5
2.2	Dränerad och odränerad analys . . . . .	6
2.2.1	Dränerad analys . . . . .	6
2.2.2	Odränerad analys . . . . .	7
2.3	Kvicklera . . . . .	8
2.3.1	Geologiska förutsättningar för Kvilledalen och problematik . . . . .	8
2.4	Orsaker till skred . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Tuveskredet</b>	<b>11</b>
3.1	Områdesbeskrivning . . . . .	11
3.2	Skredförlopp och utbredning . . . . .	12
3.3	Bedömningar av Tuveskredets orsaker . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Datorsimuleringar av Tuveskredet</b>	<b>18</b>
4.1	Geostudio: Slope/W . . . . .	19
4.2	LimitState:Geo . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>22</b>
5.1	Intervju med Göran Sällfors . . . . .	22
5.1.1	Angående Tuveskredet . . . . .	22
5.1.2	Skredrisker med avseende på framtidens utmaningar . . . . .	23
5.2	Resultat från GeoStudio:Slope/W . . . . .	24
5.2.1	Sektion A-A . . . . .	24
5.2.2	Sektion B-B . . . . .	29
5.2.3	Sektion C-C . . . . .	35
5.3	Resultat från LimitState:Geo . . . . .	39
5.3.1	Sektion A-A . . . . .	39
5.3.2	Sektion B-B . . . . .	40

5.3.3	Sektion C-C . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Analys och diskussion</b>	<b>44</b>
6.1	Litteraturstudie och datorsimuleringar . . . . .	44
6.2	Etik och framtid . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Slutsats</b>	<b>49</b>
	<b>Litteraturförteckning</b>	<b>50</b>
<b>A</b>	<b>Bilaga 1</b>	
<b>B</b>	<b>Bilaga 2</b>	
<b>C</b>	<b>Bilaga 3</b>	

# 1

## Introduktion

Den 30 november 1977 inträffade ett kraftigt jordskred strax efter klockan 16 i Tuve, ett område beläget i Kvilledalen norr om Göteborg. Skredet var så omfattande att 9 människor miste livet när en markyta på 27 hektar förändrades drastisk [1]. Detta medförde även att 436 människor förlorade sina hem.

Ur ett samhällsperspektiv utgjorde händelsen en väckarklocka som förändrade synen på skredrisker i allmänhet [2]. Geotekniska kunskaper, erfarenheter och resurser som tidigare var bristfälliga, utvecklades som en följd av skredet. I takt med digitaliseringen effektiviserades konventionella beräkningsmetoder som tidigare gjordes för hand och avancerade matematiska optimeringsmodeller utvecklades. Vidare förväntas belastningen på slänter och mark att öka i framtiden på grund av allt mer befolkningstätare samhällen samt extrema väderförhållanden. Nutidens beräkningsmodeller och kunskaper är därför viktiga för att kunna förstå bakomliggande mekanismer och på så sätt kunna förebygga framtida skred.

### 1.1 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka Tuveskredet genom att utföra stabilitetsberäkningar och identifiera faktorer som kan ha bidragit till skredförloppet. Arbetet avser även att analysera beräknat resultat från datorsimuleringar och jämföra detta med tidigare stabilitetsanalyser av skredområdet. Vidare innefattar rapporten en översiktlig diskussion kring skredrisker i samband med framtida utmaningar såsom förändring av klimatet samt ökad exploatering.

### 1.2 Metod

I syfte att undersöka Tuveskredet utfördes en litteraturstudie och intervju samt datorsimuleringar. Litteraturstudien genomfördes för att erhålla en bredare förståelse och kunskap om skredets händelseförlopp samt vad som har bedömts vara orsakern bakom händelsen. Som litteraturunderlag användes följande rapporter från Statens geotekniska institut (SGI) gällande Tuveskredet: SGI rapport 10 , 11 a-c samt 18 [3], [1], [4], [5], [6]. Resultatet av studien, som redovisas i kapitlet *Tuveskredet*, tillämpades som grund för datorsimuleringarna och som underlag för efterföljande analys samt diskussion.

Simuleringar av släntstabiliteten i samband med Tuveskredet utfördes i programmen LimitState:Geo och GeoStudio där indatan baserades på borrhålsdata hämtat från SGI rapport 18. Detta gjordes för att bilda egna uppfattningar av händelseförloppet som sedan jämfördes med resultatet av litteraturstudien. I kapitlet *Datorsimuleringar av Tuveskredet* presenteras en fördjupad metodbeskrivning av simuleringarna.

En intervju genomfördes med Göran Sällfors, professor emeritus i geologi och geoteknik vid Chalmers tekniska högskola. Sällfors medverkade bland annat i utredningarna efter Tuveskredet och var en av dem som gav sin bedömning av händelsen i SGI rapport 10. Intervjun syftade till att tillföra en ytterligare dimension till resultatet av undersökningen. Under intervjun ställdes främst frågor om Tuveskredet men den gav också svar på frågor kring skredrisker med avseende på framtidens utmaningar.

### 1.3 Avgränsningar

Gällande geoteknisk indata för Tuve finns det en begränsad mängd information från borrhål tagna före och efter skredet. I arbetet har endast två borrhål före skredet beaktats, borrhål E40 respektive K41. Det finns en större mängd borrhål tagna efter skredet men majoriteten är tagna inom skredområdet. Dessa kan anses vara störda och därmed inte representativa för det ursprungliga området. Därför har endast de två borrhål som finns att tillgå utanför skredområdet beaktats, borrhål 18 och 20. Ett undantag har gjorts för två borrhål inom skredområdets centrala del, borrhål 25 och 26, då dessa var de enda som innehöll information om densitet vid större djup. Totalt resulterar detta i att endast borrhål nummer E40, K41, 18, 20, 25 och 26 har beaktats i arbetet. För placering av borrhål se figur A.1 och A.2 i Bilaga 1.

Utöver ovanstående har vissa avgränsningar gjorts i samband med datorsimuleringarna. Dessa beskrivs mer ingående i kapitlet *Datorsimuleringar av Tuveskredet*. Vidare avgränsas arbetets beaktande av samhällsetiska aspekter till att endast beröra etiska kopplingar till skred i allmänhet. Detta då arbetet i sig inte anses ha någon etisk påverkan på samhället. De samhälleliga och etiska aspekterna diskuteras i ett enskilt avsnitt i kapitlet *Analys och diskussion* tillsammans med den översiktliga diskussionen kring skredrisker i framtiden.

# 2

## Teori

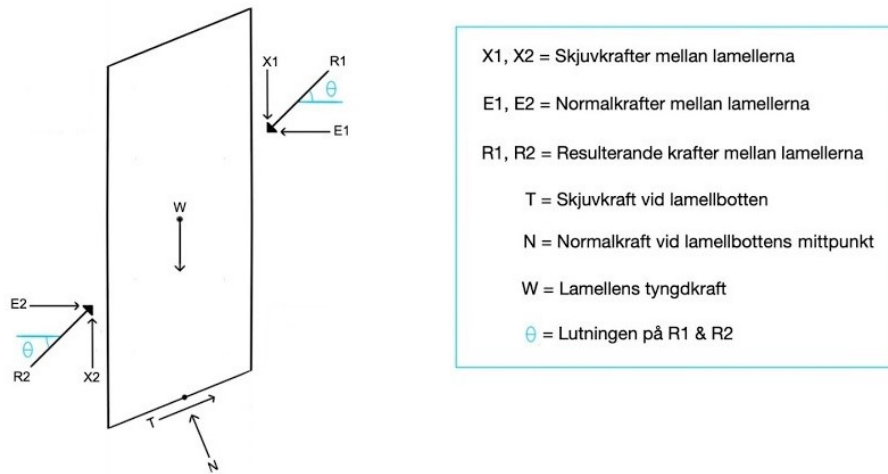
I detta kapitel presenteras en teoretisk bakgrund till centrala begrepp för arbetet, uppdelat i fyra avsnitt. De två första avsnitten syftar till att ge en mer allmän bakgrund till beräkningsmetoder och analyser av släntstabilitet. I det tredje avsnittet berörs teori om kvicklera både generellt och direkt kopplat till området i Tuve. Avslutningsvis beskrivs orsaker till skred i allmänhet.

### 2.1 Beräkningsmetoder gällande släntstabilitet

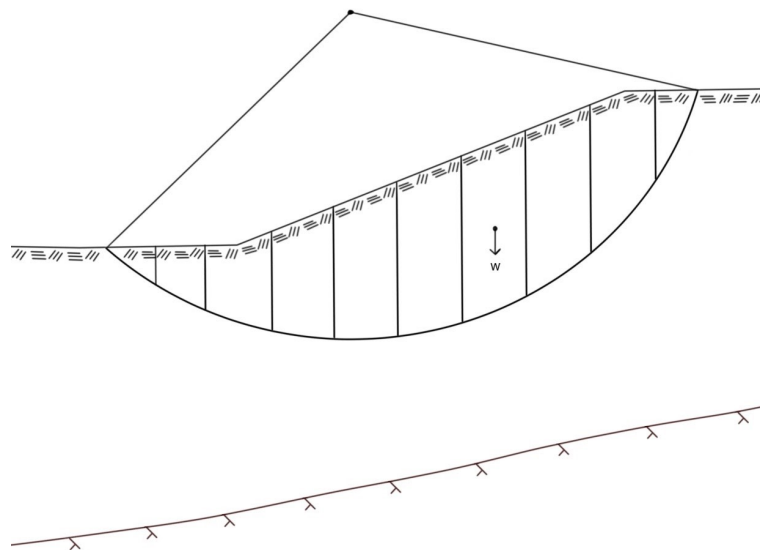
Det finns idag flera metoder för att analysera och beräkna släntstabilitet. Vid tiden för Tuveskredet var lamellmetoden den beräkningsmetod som tillämpades [7], vilken innebär att slänten delas upp i etapper som kallas för lameller. På senare år har den modernare metoden Discontinuity Layout Optimization (DLO) utvecklats vilken bygger på matematiska optimeringsmodeller. I avsnitten nedan beskrivs dessa metoder kortfattat.

#### 2.1.1 Lamellmetoden

Under 1900-talet utvecklades flera matematiska beräkningsteorier som lagt grunden för de släntstabilitetsanalyser som utförs idag. Skredet i Stigbergskajen 1916 är ett av de första dokumenterade fallen där en lamellmetod tillämpades genom att dela upp glidkroppen i mindre delar [8]. Denna förenkling av geometrin, där glidkroppen delas in i så kallade lameller, tar hänsyn till de krafter som verkar på samt mellan lamellerna enligt figur 2.1 [9]. Med metoden kunde och kan än idag den mest kritiska cirkulära glidytan beräknas, se figur 2.2.



**Figur 2.1:** Kraftverkan på en lamell enligt Lamellmetoden. Författarnas egna bild inspirerad av Abramson, Lee, Sharma & Boyce [10].



**Figur 2.2:** Slänt med en cirkulär glidyta uppdelad i lameller. Författarnas egna bild inspirerad av Sällfors [11].

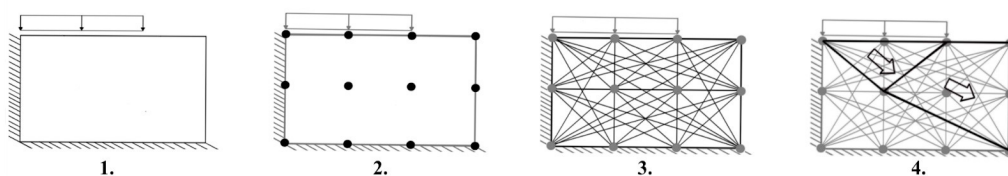
Genom att studera varje enskild lamell kan olika jämviktsekvationer ställas upp men eftersom dessa innehåller fler okända än kända variabler är de i sig själva olösbara. Med hjälp av olika antaganden har flera lamellteorier tagits fram för att lösa dessa jämvikter. Gemensamt för teorierna är att normalkraften antas verka vid lamellbottens mittpunkt vilket därmed reducerar antalet okända variabler [10]. Nedan följer en kortfattad beskrivning av teorierna.

I teorin framtagen av Fellenius 1936 antas att samtliga krafter mellan lamellerna försummas vilket gör att hänsyn endast tas till de krafter som verkar på varje enskild lamell [10]. Enligt Karstunen [12] kan denna förenkling dock anses vara av grovsta sort då säkerhetsfaktorn undervärderas med 5-20%. Under mitten av 50-talet utvecklades Fellenius metod två gånger om, först av Janbu följt av Bishop [10]. Teorierna försummar skjuvkrafterna mellan lamellerna och utgår därför från samma system av krafter där den resulterande kraften mellan lamellerna blir horisontell. Båda väger in vertikal kraftjämvikt men skiljer sig åt genom att Bishop beaktar momentjämvikt och Janbu beaktar horisontell kraftjämvikt. I Janbus teori tas alltså ingen hänsyn till rotationscentrum. Vidare introducerade Janbu en korrektionsfaktor för att kompensera för försummandet av momentjämvikt.

När de första datorerna kom på 1960-talet utformades en mer rigorös teori av Morgenstern och Price vilken antar att den resulterande kraften mellan lamellerna har en lutning som varierar med en godtycklig funktion [10]. Några år senare kom Spencers teori där lutningen på den resulterande kraften antas vara konstant. Sammantaget uppfyller dessa teorier både vertikal och horisontell kraftjämvikt samt momentjämvikt vilket ingen av de ovanstående, äldre, teorierna gör. I dagsläget bör en stabilitetsanalys enligt Svensk Standard åtminstone beakta både momentjämvikt och vertikal kraftjämvikt [13]. De rigorösa teorierna Morgenstern-Price och Spencer är godkända enligt Eurocode och är de metoder som idag tillämpas vid brottgränsdimensionering i Sverige [14].

## 2.1.2 Discontinuity layout optimization

Discontinuity layout optimization (DLO) är en relativt ny metod utvecklad i början av 2000-talet och som idag används till stabilitetsberäkningar för olika geotekniska problem [15]. DLO använder sig av matematiska optimeringsmetoder för att identifiera diskontinuiteter. Detta görs genom att den kropp som studeras delas upp i olika block med hjälp av noder där noddensiteten avgör metodens noggrannhet, se figur 2.3 del 1, 2 och 3. De kritiska diskontinuiteterna identifieras sedan och bildar en samling av lösa block, se figur 2.3 del 4. I övrigt betraktas kroppen fortfarande vara stel, utan elastiska deformationer eller brott. Gränsen mellan de lösa och stela blocken bildar då en linje där ett potentiellt brott uppstår.



**Figure 2.3:** Identifiering av kritiska diskontinuiteter enligt DLO. Författarnas egna bild inspirerad av Hawksbee, Smith & Gilbert [16].

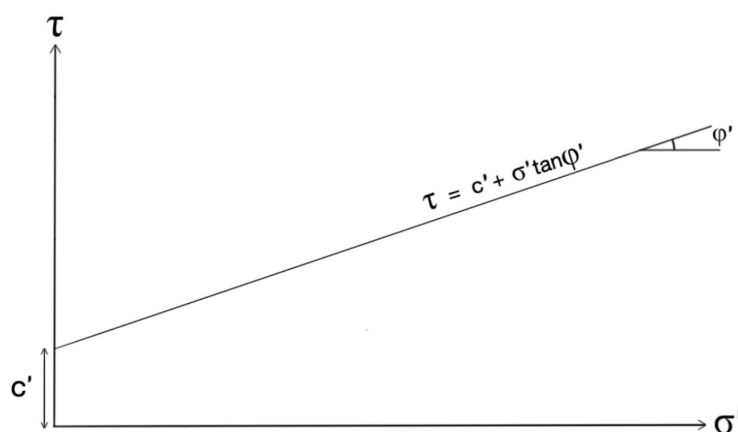
## 2.2 Dränerad och odränerad analys

Vid släntstabilitetsanalyser kan en odränerad och dränerad analys användas för att skapa en heltäckande bild av släntens hållfasthet. Med orden odränerad och dränerad menas hur lätt och snabbt vatten kan röra sig in och ut från jorden, vilket beror på jordens permeabilitet. Detta sätts i förhållande till hur stor och långvarig belastningen är. I avsnitten nedan beskrivs dessa två analyser.

### 2.2.1 Dränerad analys

I en dränerad jord kan vatten flöda in och ut ur jorden i takt med att jorden belastas eller avlastas [17]. Därmed sker ingen förändring av jordens porvattentryck. En dränerad jord behöver då nödvändigtvis inte vara torr utan en helt vattenmättad jord kan också vara dränerad. Vidare kan en odränerad jord, exempelvis lera, över tid erhålla dränerade förhållanden då poröverttryck orsakade av lastökning försvinner. Dränerad analys avser alltså långtidsfallet, det vill säga då en jord som belastas konsoliderar eftersom vatten då hinner flöda ut [18].

Jordens spänningsnivå, friktionsvinkel och deformationsegenskaper är de faktorer som främst påverkar den dränerade skjuvhållfastheten, även kallad långtidshållfastheten [19]. I grovkorniga jordar, såsom sand och grus, är det främst denna hållfasthet som studeras. Detta beror på att vatten i hög-permeabla jordar dräneras så pass snabbt att jorden nästan alltid kan anses vara dränerad [11]. Figur 2.4 nedan visar hur den dränerade skjuvhållfastheten varierar beroende på effektivspänningar, friktionsvinkel och kohesion.

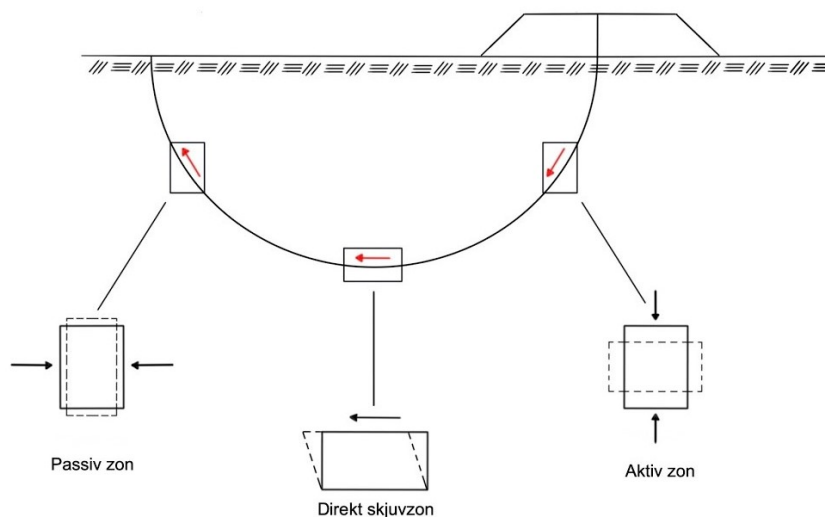


**Figur 2.4:** Dränerad skjuvhållfasthet ( $\tau$ ) som funktion av kohesion ( $c'$ ), effektivspänning ( $\sigma'$ ) och friktionsvinkel ( $\varphi'$ ). Författarnas egna bild.

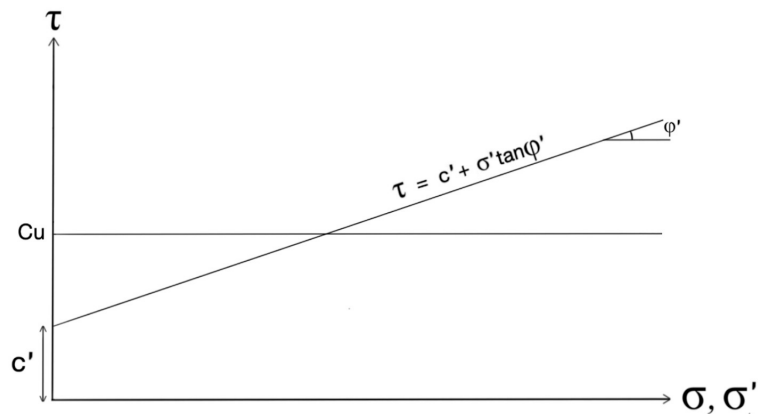
## 2.2.2 Odränerad analys

I en odränerad jord kan inte vatten flöda in och ut ur jorden då den belastas [17]. Därför syftar en odränerad analys till korttidsfallet eftersom jorden inte hinner att konsolidera. Detta medför att en förändring i last ger förändringar i portrycket.

Till skillnad från den dränerade beror den odränerade skjuvhållfastheten av belastningsfall, jordtyp, förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad [20]. Förkonsolideringstrycket innefattar den högsta vertikala spänningsnivå som en jord någonsin har utsatts för och överkonsolideringsgraden beskriver förhållandet mellan denna nivå och den rådande effektivspänningen [11]. Vanligtvis delas den odränerade skjuvhållfastheten in i tre olika fall: aktiv skjuvhållfasthet, direkt skjuvhållfasthet och passiv skjuvhållfasthet, se figur 2.5 [20]. Med aktiv skjuvhållfasthet avses den största vertikala huvudspänningen medan passiv skjuvhållfasthet avser den största horisontella huvudspänningen. Vidare berör direkt skjuvhållfasthet den skjuvning som sker i en horisontell glidyta. Den odränerade skjuvhållfastheten förenklas ofta till ett konstant värde för provpunkten som kontrolleras [19]. Figur 2.6 illustrerar skillnaden mellan odränerad och dränerad skjuvhållfasthet.



**Figur 2.5:** Aktiv, direkt och passiv skjuvhållfasthet för en cirkulär glidyta. Författarnas egna bild inspirerad av Rolf Larsson m.fl. [20].



**Figur 2.6:** Odränerad skjuvhållfasthet ( $c_u$ ) som funktion av totalspänning ( $\sigma$ ) respektive dränerad skjuvhållfasthet ( $\tau$ ) som funktion av kohesion ( $c'$ ), effektivspänning ( $\sigma'$ ) och friktionsvinkel ( $\varphi'$ ). Författarnas egna bild.

## 2.3 Kvicklera

Det finns många olika definitioner på kvicklera. I Sverige anses lera som har en sensitivitet högre än 50 och en störd skjuvhållfasthet som är mindre än 0,4 kPa vara kvick [21]. Avsnittet nedan redogör för bildning och problematik gällande kvicklera samt kopplingen till Kvilledalens geologiska historia.

### 2.3.1 Geologiska förutsättningar för Kvilledalen och problematik

Under den senaste istiden var Sveriges landmassa täckt av en landis med en mäktighet på 2-3 kilometer [4]. På grund av isens belastning på den yttre jordskorpan låg därmed stora delar av Västsverige nedpressat under vattenytan. Kvilledalens djupaste partier befann sig då på ett vattendjup nära 150 meter. Vidare, i takt med isens avsmältning, transporterades eroderat jordmaterial ut till havet och avsattes. Allteftersom isens belastning avtog höjdes landytorna sakta upp ur havet varvid stora lerområden tillslut torrlades. Lerorna i Kvilledalen har på så sätt avsatts i en marin miljö med bland annat varierande salinitet, vattendjup och strömförhållanden.

När leror avsätts i marina miljöer störs lerpartiklarnas laddningsjämvikt av den högre jonaktiviteten i havsvattnet [4]. Därmed motverkas de repellerande krafterna mellan partiklarna vilket leder till att partiklarna kan sedimentera i flockulerat tillstånd. Jämfört med avlagring i sötvatten skapar lerpartiklarnas sammanbindning således en mer porös jordskelettstruktur. Sedimenten kompakteras och konsolideras med tiden av trycket från överlagrade avlagringar vilket leder till att leror med en blandad partikelorientering, ett högt vatteninnehåll och en hög ostörd skjuvhållfasthet bildas [22]. Dessa egenskaper utgör förutsättningar för bildande av kvicklera som då vanligtvis, men alltså inte nödvändigtvis, härstammar från leror avsatta i marina miljöer [23]. På grund av de geologiska förhållandena vid avsättningen utgör

västsvenska leror den främsta potentialen för bildning av kvickleror i Sverige [24]. Vidare anses förekomsten av kvicklera i Sverige vara störst under högsta kustlinjen då all markyta under denna nivå en gång har befunnit sig under havsytan.

Problemet gällande kvicklera uppstår då den störs av yttre påverkan. Till följd av landhöjningen möjliggörs med tiden långsamma kemiska förändringar av marint avsatta lerområden i Västsverige [4]. Nedsippring av regnvatten samt grundvattenförhållanden vid framför allt artesiska porvattentryck, det vill säga då portrycksnivåerna motsvarar en grundvattenyta ovanför markytan [25], kan därmed leda till urlakning av saltjonerna som binder samman lerpartiklarna. Processen resulterar i att lerans sensitivitet ökas samt att skjuvhållfastheten reduceras. Höga porvattentryck och mekaniska störningar i ett sådant tillstånd kan leda till att lerskelettet kollapsar [4]. Leran blir därför mycket känslig för ökade belastningar eller vibrationer och kan då bli helt flytande [26].

## 2.4 Orsaker till skred

Stabiliteten i en slänt beror dels på jordens hållfasthet och dels på den belastning som jorden utsätts för [27]. Jordens hållfasthet påverkas av jordarternas egenskaper såsom kornstorlek och packningsgrad, men även av släntens geometri [28]. I tidigare avsnitt beskrevs problemet med kvicklera vilket kan resultera i skred. Kvickleran i sig initierar dock inte skred såvida den inte störs [29]. Det finns ett flertal olika faktorer som kan utlösa ett skred, både naturliga och mänskliga [30]. Exempel på naturliga orsaker till skred är klimat- och väderberoende förändringar, erosion och landhöjning [27]. Mänsklig påverkan som kan förändra stabiliteten är exempelvis avverkning av skog och exploatering [30].

Jordskred beror alltså på flera faktorer som samverkar. I jorden finns en naturlig jämvikt och det är när denna förändras som ett skred kan inträffa [30]. Det finns främst tre faktorer som kan förändra jämvikten. Dessa är minskad motvikt, ökad belastning och försämrade hållfasthet i jorden. Den minskade motvikten orsakas av händelser i släntens nedre del. Detta kan bero på att jordmassor eroderas eller schaktas bort. Ett vattendrag i botten av slänten kan vid en sänkning av vattennivån också orsaka en minskad mothållande kraft. Vidare kan skred till följd av ökad belastning bero av att de pådrivande krafterna ökar, exempelvis i form av ny bebyggelse eller påfyllnad på känsliga ställen. Utöver detta kan en höjning av grundvattennivån orsaka en försämrade hållfasthet i jorden. Detta kan exempelvis ske till följd av kraftig nederbörd eller kalhugning av skogsmark.

En ökad grundvattennivå leder till ett ökat portryck i jorden vilket reducerar jordens hållfasthet på grund av minskade effektivspänningar [31]. Portrycken kan bli så höga att de motsvarar en grundvattenyta ovanför markytan, så kallade artesiska portryck som nämnts tidigare. Detta sker exempelvis i samband med att ett lutande jordlager med hög permeabilitet begränsas lokalt av ett ovanliggande jordlager med låg permeabilitet. En sådan kombination bildar en så kallad slutna akvifer. Vidare regleras det artesiska vattentrycket i akviferen av vattennivån som råder på den

plats längre bort där akviferen är öppen. Portryckens storlek i den slutna akviferen begränsas därmed av den reglerande vattennivån och vattentrycket kan alltså inte bli högre än vad nivån motsvarar.

I norra Skandinavien är skred vanligast under våren i samband med snösmältning medan det i södra Skandinavien är vanligare under hösten då det ofta regnar mer [6]. Hur mycket denna snösmältning påverkar jordens stabilitet beror på den mängd snö som finns och tiden det tar för snön att smälta. Jordens stabilitet påverkas även av grundvattennivåns läge före snösmältning samt om marken under snön är frusen eller inte. Regnets påverkan på jordens hållfasthet beror på hur mycket det har regnat tidigare dagar och veckor. Vidare kan en torrperiod orsaka sprickor i marken vilka minskar hållfastheten. Hur stor avdunstningen av regnet är påverkar också stabiliteten.

Erosion är ett stort stabilitetsproblem för slänter då den ökar släntens lutning vilket i sin tur ökar skjuvspänningarna [6]. Lägre hållfasthet kan också uppstå då svagare jordlager exponeras i samband med att styvare, mothållande lager eroderas bort. Erosion kan även orsaka hydraulisk bottenuppträckning i botten av slänter vilket kan ge upphov till att hela slänten rasar. Vidare erhålls samma effekt då människan schaktar ur jordmassor i botten av en slänt. Denna process går däremot mycket snabbare jämfört med vid erosion.

I framtiden riskerar skredkänsligheten att öka och kan komma att bero på klimatförändringar samt landhöjning och landsänkning [30]. Vidare väntas nederbördsmängden att öka och bli mer intensiv fram till år 2100 vilket kan minska släntstabiliteten på flera sätt. Exempelvis kan grundvattentrycket öka, speciellt under vår, vinter och höst. En ökad nederbörd kan också leda till en ökad frekvens och omfattning av översvämningar vilket i sin tur bidrar till ökade vattenflöden och erosion. Detta ger främst en ofördelaktig påverkan på släntens geometri eftersom en ökad erosion resulterar i en mindre mothållande kraft i slänten. Erosionen kan även bli ett problem som följer den landsänkning och höjning som sker i Sverige till följd av inlandsisen. Släntstabiliteten minskar därmed på grund av förändrad topografi, ökad ytvattenerosion och ökad grundvattenströmning. Den stabilitetsförsämring som sker som ett resultat av landhöjning motverkas dock till viss del av det lägre portryck som uppstår eftersom grundvattennivån sänks.

# 3

## Tuveskredet

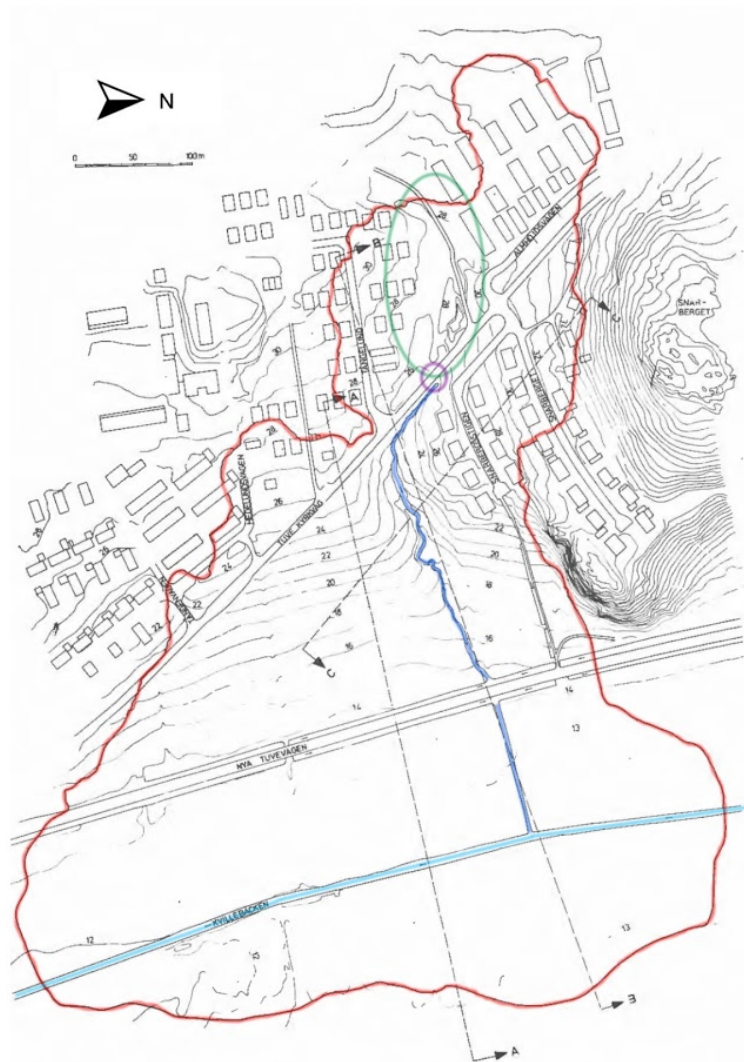
Resultatet från litteraturstudien redovisas nedan i tre avsnitt. Inledningsvis presenteras en områdesbeskrivning av Tuve följt av en beskrivning av skredets förlopp och utbredning. Avslutningsvis redogörs för olika geoteknikers bedömningar om orsaker till skredet.

### 3.1 Områdesbeskrivning

Tuve ligger i Kvilledalen på Hisingen, cirka 10 km norr om Göteborgs centrum, där områdets nord- och sydliga delar omges av berg [1]. Vidare, öster om Tuve, rinner Kvillebäcken i nordsydlig riktning enligt ljusblå markering i figur 3.1. Före skredet rann även en mindre bäck genom området i västöstlig riktning markerad i mörkblått. Denna mindre bäck hade eroderat ut en ravin där de största lutningarna i området återfanns. Resterande delar av området hade betydligt flackare slänter ner mot Kvillebäcken där lutningen mellan Tuve kyrkväg och Nya Tuvevägen uppgick till 1:12 [6].

Området utgörs främst av lera men även jordarter såsom sand, silt, morän och isälvssediment förekommer [4]. Inom skredområdet fanns exempelvis stora lermäktigheter på drygt 40 meters djup vid Tuve Kyrkväg. Närmast berggrunden förekom ett friktionsjordlager av varvad sand och silt [1]. Vidare varierade lerans sensitivitet i området generellt mellan 20 - 40 men vid Tuve kyrkväg fanns partier med kvicklera.

År 1936 skedde en ombyggnation av Tuve kyrkväg och i samband med detta utfördes även en kulvertering av den mindre bäck som korsades av vägen, se lila markering i 3.1 [6]. Däremot började bebyggelsen i området uppföras först år 1957 då flera tvåvåningshus byggdes vid Tångenvägen. Utbyggnaden av området fortsatte sedan i mitten av 60-talet. Några år senare tillkom byggnaderna vid Almhöjds- och Snarbergsområdet som utgjordes av 1,5-våningshus samt envåningshus. Under samma period exploaterades två områden med flerfamiljshus väster om skredområdet. Exploateringen resulterade därmed i att stora ytor asfalterades. Dagvattnet från dessa områden anslöts då till den mindre bäck som rann genom skredområdet vilket alltmer ökade bäckens maximala vattenföring. Vidare i samband med områdets utbyggnad kulverterades delar av bäcken ytterligare fram till Tuve kyrkväg, väster om Tångenlundsområdet samt söder om Almhöjdsområdet, se grönmarkerat område i figur 3.1.

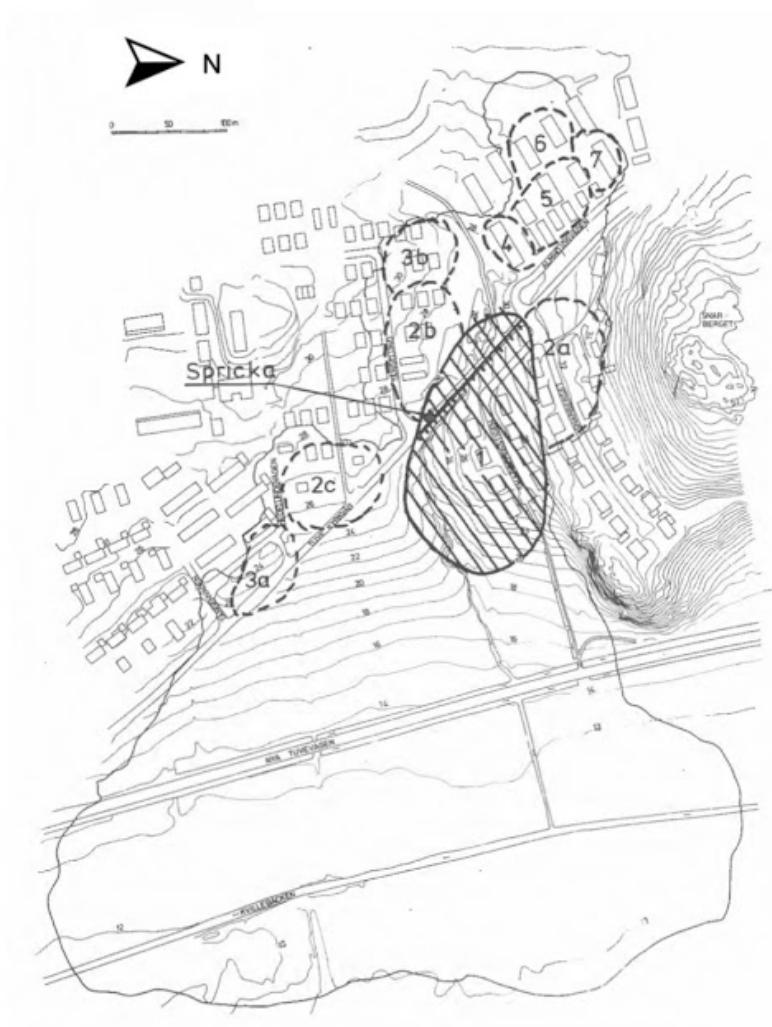


**Figur 3.1:** Skredområdet, markerat i rött, samt områdets topografi. Grönmarkerat område beskriver kulverteringen av den mindre bäcken, markerad i mörkblått, i samband med utbyggnaden väster om Tuve Kyrkväg. Lila markering beskriver området där den kulverterade bäcken korsade vägen. Kvillebäcken är markerad i ljusblått. Från [1]. Förtydligad och återgiven med tillstånd.

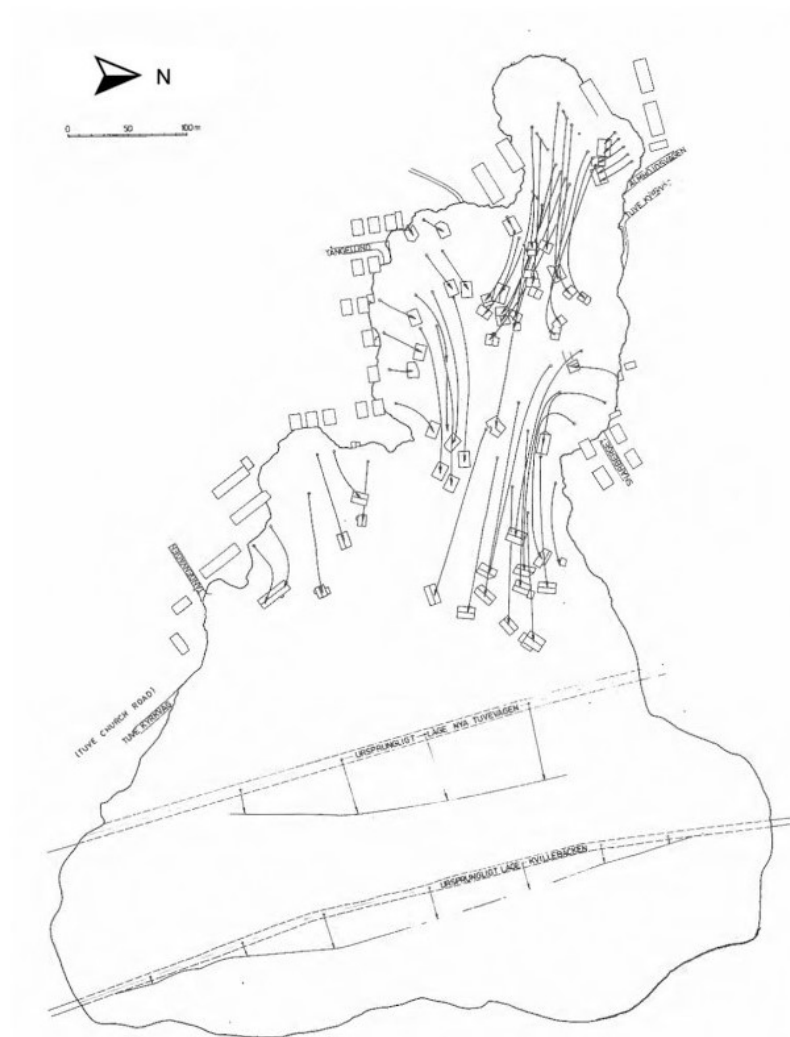
## 3.2 Skredförlopp och utbredning

Skredförloppet har främst bestämts med hjälp av ögonvittnen och automatisk registrering av avslitna elkablar [1]. De sönderslitna elkablarna var då ett bra underlag för att kunna utvärdera tidsspannet för skredet då de gav exakta tider för när de slets av. Kabelbrotten skedde under tidsspannet 16:05:33 till 16:09:41 där den första sönderslitna kabeln antas ha orsakats av ett mindre initialscred och den sista av ett bakåtgripande skred. Detta gjorde att tidsintervallet kunde begränsas till cirka 5 minuter med undantag för mindre markrörelser som inte påverkade elnätet.

Tillgången till vittnesmål var begränsad [1]. Detta berodde dels på tidpunkten men också på vädret och årstiden: De flesta var på jobb eller skola, de som var hemma var inte utomhus och sikten var dålig. Vidare, baserat på de observationer som fanns att tillgå, har en bild av skredets utveckling ändå kunnat fastställas. Inledningsvis, runt 16-tiden, utvecklades en spricka i Tuve Kyrkväg vilken sträckte sig från Snarberget till Tångelundsvägen. Det efterföljande skredet utvecklades sedan bakåt och i sidled. Byggnader, Tuve Kyrkväg och Nya Tuvevägen gled då ner mot Kvillebäcken i östlig riktning, se figur 3.2 och 3.3.



**Figur 3.2:** Skredförlopp enligt observationer från ögonvittnen där siffrorna beskriver skredets ordningsföljd. Från [1]. Förtydligad och återgiven med tillstånd.



**Figur 3.3:** Illustration av hur byggnader gled mot Kvillebäcken. Från [1]. Återgiven med tillstånd.

Totalt hade skredet en utbredning på cirka 270 000 m<sup>2</sup> med en längd på 800 m i rörelseriktningen och en bredd på 600 m [1]. Utbredningen begränsades av fast mark i norr och söder. Vidare gick stora delar av skredet så djupt som ner till berggrunden. De övre (västra) delarna av området sänktes således med ca 10 m medan de nedre (östra) delarna av området höjdes med ca 5 m.

Sammantaget miste 9 människor sina liv och 39 skadades till följd av skredet [1]. Vidare skadades 65 enfamiljshus direkt av händelsen och ytterligare 86 bedömdes ligga i riskområdet för fortsatta skred. Exempelvis fanns det bostäder längs med den västra skredgränsen vilka efter skredet stod på en 10 m tjock lerlagerkant. Även infrastruktur i form av vägar samt el- och vattenledningar skadades. Brotten på el- och vattennätet ledde också till mindre strömavbrott och begränsad tillgång till vatten i närliggande områden.

### 3.3 Bedömningar av Tuveskredets orsaker

Efter Tuveskredet fick Statens geotekniska institut, SGI, i uppgift att undersöka skredet och dess orsaker. Då det fanns begränsade kunskaper om skred med stora omfattningar sammanställdes SGI:s rapport 10 innehållande erfarna geoteknikers stabilitetsanalyser och bedömningar av skredets tänkbara orsaker [3]. I detta avsnitt sammanfattas bedömningarna från rapporten.

Som nämnts tidigare i avsnitt 3.2 utlöstes ett initialscred vid Tuve kyrkväg, ett område som enligt många av geoteknikerna redan före skredet hade låg stabilitet. De stora vattenmängderna i området verkar ha varit en viktig utlösande faktor till skredet. Regnmängden i november 1977 hade enligt flera geotekniker varit ovanligt stor och var enligt Gösta Berg den största sedan bäcken kulverterades. Detta kan i sin tur ha medfört förhöjda portryck.

Enligt Fagerström & Broms, Berntson & Lindh och Löfquist bidrog områdets topografi och geologiska förhållanden till avrinning där vatten från högre partier kunde infiltrera de nedre permeabla lagren. Det var i dessa lager som skredet sedan startade. Berggrundens stora lutning vid Tuve kyrkväg medförde enligt Fagerström & Broms att det endast krävdes en liten ökning av portrycket för att ett skred skulle uppstå. Berntson & Lindh konstaterade att ett porvattenövertryck i det nedersta friktionslagret på 2-3 m över markytan kan ha bidragit till att bottenskiktet vid Tuve kyrkväg, längs med den branta delen av berggrunden, förlorade sin hållfasthet. De ovanliggande jordmassorna skulle då ha blivit instabila varvid deformationer hade uppkommit. Vidare beskrev Bertil Löfquist att portrycken kan ha resulterat i en horisontell kraft där berget lutar vilken i så fall bidrog till skredet ytterligare.

Löfquist förklarade att de höga portrycken även kan ha utvecklats på grund av erosion i det permeabla skiktet närmast berggrunden. Vattenströmmen i detta skikt kan ha fört med sig mindre partiklar som sedan fastnat längre fram. Portrycken ökade då eftersom permeabiliteten minskade på de ställen i skiktet där partiklarna hade fastnat.

De stora vattenmängderna i området kan också ha bidragit till bildningen av kvicklera. Enligt Allan Bergfelt kan förhöjda portryck vid Snarbergets sydvästra kant ha resulterat i att kvicklera bildades lokalt längs med Tuve kyrkväg. Detta hade då medfört ett minskat stöd och därmed en försämrad stabilitet vid vägbanken vilket kan ha utlöst ett skred. Bergfelt påpekade även att augusti månad före skredet var väldigt torr vilket möjliggjorde för bildandet av djupa torrsprickor. Dessa fylldes sedan av det regnvatten som kom under de efterföljande månaderna. De stora vattenmängderna som fanns i torrskorpan och i vägbanken vid Tuve kyrkväg före skredet kan då, genom en ökad tyngd, ha medfört att stabiliteten var extra låg i området vilket även Connie Olsson menade.

Initialscredet vid Tuve kyrkväg möjliggjorde enligt flera av geoteknikerna för ett bakåtgripande skred som utlöste ytterligare skred ovanför denna punkt. Det inledande

skredet kan enligt Berntson & Lindh ha medfört att mothållet för jordmassorna ovanför Tuve kyrkväg minskade. Jordmassorna började då bitvis glida iväg. Connie Olsson beskrev även att skredets fortsättning bakåt och i sidled kan förklaras med de branta skredkanter som bildades efter initialscredet vilka då medverkade till minskad stabilitet.

Skredprocessen kan enligt Bertil Löfquist ha inletts redan under regnperioden året innan. Förhöjda portryck i det nedersta permeabla lagret kan ha resulterat i en minskning av dess skjuvhållfasthet. Reduceringen förstärktes då av att lagret lutade. Portryckshöjningen kan även ha medfört en minskad skjuvhållfasthet hos det överliggande lerlagret. Vidare förklarade Löfquist att om hållfasthetsminskningen sker lokalt med annars stabila jordlager sker inget skred. Istället uppstår en mindre förskjutning i lerlagret som genom krypning fortplantar sig till den omgivande jordmassan. En sådan rörelse kan ha påverkat skjuvhållfastheten både i det permeabla lagret och i leran som på många ställen var sensitiv. Detta kan ha minskat stabiliteten i området. Om processen upprepas kan stabiliteten tillslut minska till en kritisk nivå där en portrycksökning eller en annan störning då kan utlösa ett skred. Området i Tuve hade förutsättningarna för att en sådan långvarig skredprocess skulle kunna ske. Även Connie Olsson nämnde att skjuvhållfastheten i leran successivt minskat över tid genom krypning.

Enligt konventionella stabilitetsberäkningar var säkerheten hög mot djupgående skred, trots att det faktiska skredet gick djupt. Bertil Löfquist menade att skredets stora omfattning, främst nedanför Tuve kyrkväg, inte kan förklaras med vanliga beräkningsmetoder. Även Gösta Berg konstaterade att glidytor vars storlek motsvarade skredets faktiska utbredning inte kunde beräknas till brott. För ett brott skulle det i så fall krävas orimligt höga portryck eller ett orimligt lågt värde på lerans skjuvhållfasthet. Enligt Berntson & Lindh skulle det krävas ett artesiskt portryck motsvarande 8-10 mvp över markytan för att erhålla en säkerhetsfaktor under 1 för området mellan Tuve kyrkväg och Nya Tuvevägen. Vidare ansågs dessa portryck vara orimligt höga då de borde varit mellan 2-3 m över markytan. Detta motsvarar de tryck som efter skredet uppmättes utanför skredområdet vilka därmed kan anses vara representativa för de ursprungliga tryckförhållandena.

Tillskillnad från Bertnson & Lindh ansåg Allan Bergfelt att den stora vattenmängden i området, både från en vattensamling sydväst om Tuve kyrkväg samt från kulverten, även kan ha medverkat till skredets stora utbredning. Vattensamlingen kan, som nämnts tidigare, ha resulterat i ökad infiltration av vatten i vägbanken vilket ökade dess tyngd. När glidsprickor sedan bildades fylldes dessa av vatten som genom ökade portryck förstärkte skredkrafterna samt bidrog till ökade portryck i de understa permeabla lagren.

Fagerström & Broms menade att det initiala skredets förskjutningar av jordlagren ledde till att portrycket ökade ytterligare i de permeabla lagren eftersom dessa vara löst lagrade. Detta förklaras med att portrycken ökar om de inte tillåts dränera vid volymminskning. Portrycket kan ha blivit så högt att det motsvarade totaltrycket

vilket då kan ha resulterat i att skjuvhållfastheten närmade sig noll. Därmed kan stabiliteten i området ha minskat och medfört ett stort skred.

Rune Lundström påstod att initialscredet utlöstes av stötvågor från tungtrafik i samband med ökad last från ny bebyggelse och förhöjda porttryck. Lundström menade även att skredets stora omfattning kunde förklaras med jordmassornas kinetiska energi. Då ett initialscred börjar glida omvandlas jordmassornas kinetiska energi till ett arbete som övervinner det passiva, mothållande trycket i passivzonen vars jordmassor då börjar förskjutas. Vidare beskrev Connie Olsson att det djupgående skredet kan förklaras med det tryck som de glidande jordmassorna skapade. Detta tryck kan ha blivit så stort att ett djupgående skred inträffade.

Även Bertil Löfquist beskrev att initialscredet skapade en "pådrivande kraft". En eventuellt instabil kornstruktur i det permeabla skiktet närmast berg kan ha kollapsat längs med initialscredets glidyta vilket då medförde en kraftig porttrycksökning. Vidare spreds det höga porttrycket snabbt framåt i skiktet med en försämrad skjuvhållfasthet som följd. Samtidigt kan den kraft som skapades av skredet ha bidragit till att skjuvspänningarna ökade i skiktet. Krafterna kan även ha ökat snabbt där berget lutade. I kombination med den sänkta hållfastheten resulterade detta i att skredet blev större och större. Eftersom ett tunt permeabelt skikt lätt kan brytas upp fortsatte skredet istället i den sensitiva leran. Därför berodde skredets stora omfattning enligt Löfquist främst på den sensitiva leran i området samt att det permeabla och instabila skiktet var en viktig förutsättning för initialscredet.

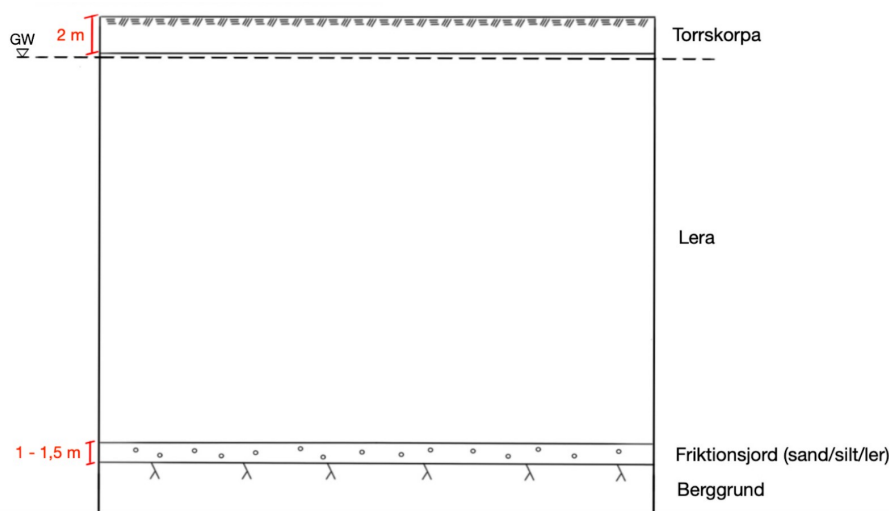
Flera av geoteknikerna beskrev även att skredets stora utbredning delvis berodde på förekomsten av kvicklera i området. Enligt Göran Sällfors fanns sådana förutsättningar för att ett lokalt skred skulle få stor omfattning, speciellt i och med lerans höga sensitivitet nära berget och berggrundens lutning. Eftersom området redan var hårt ansträngt kan initialscredet vid Tuve kyrkväg ha resulterat i ett progressivt brott. Detta var enligt Sällfors möjligt på grund av att det fanns stora områden med redan låg stabilitet i kombination med förekomsten av kvicklera i området.

# 4

## Datorsimuleringar av Tuveskredet

För att undersöka släntstabiliteten i Tuve före skredet användes två program, Geostudio:Slope/W som grundas på lamellmetoden samt LimitState:Geo som baseras på DLO. I båda programmen analyserades de tre tvärsektionerna A-A, B-B och C-C, se figur 3.1 i avsnitt 3.1, både för dränerat och odränerat fall. Efter analys och sammanställning av övrig geoteknisk data från rapporten bestämdes jordlagerföljd, placering av grundvattennivå och materialdata. Vidare modellerades slänterna enligt sektionernas geometri, se figur A.4 - A.7 i Bilaga 1. Eftersom detta underlag är begränsat förlängdes inte slänterna för de fall då glidyternas utbredning sträckte sig ända ut i kanten av sektionerna. Konsekvensen av detta antogs ge ett mindre osäkert resultat jämfört med om sektionernas geometri skulle ha förlängts baserat på egna uppskattningar.

Jordlagerföljden antogs bestå av en torrskorpa följt av ett lerlager samt ett lager med varvad sand, silt och lera närmast berggrunden, se figur 4.1. Utifrån analys av borrhål antogs torrskorpan vara 2 m och sand/silt/ler-lagret antogs vara 1-1,5 m djupt. Det mellanliggande lerlagrets tjocklek var således det enda som varierade. Grundvattennivån antogs ligga i direkt anslutning till torrskorpans underkant och öka hydrostatiskt med djupet. I sand/silt/ler-lagret undersöktes även förändringar i portrycket och dess påverkan på släntstabiliteten.



**Figur 4.1:** Antagen jordlagerföljd, ej skalenlig. Författarnas egna bild.

Jordlagrens tungheter och odränerade skjuvhållfasthet baserades på sammanställda data från relevanta borrhål erhållna från SGI:s rapport 18 [6]. I Bilaga 2 redovisas en sammanställning av den odränerade skjuvhållfastheten, korrigerad med hänsyn till konflytgränsen enligt Sällfors [11], och tungheterna i figur B.1 respektive B.2. Vidare ses värden för konflytgränsen i figur B.3. Den korrigerade skjuvhållfastheten samt tungheterna för torrskorpan och leran valdes utifrån framtagna trendlinjer. Skjuvhållfastheten för lerdjup över 25 m extrapolerades ner till 40 meters djup eftersom det framgick av litteraturstudien att lermäktigheter på drygt 40 m förekom inom skredområdet. För lerdjup över 30 m antogs tungheten fortsätta vara konstant, 16 kPa. Tungheter för sand/silt/ler-lagret, erhållna från borrhål 25 och 26, antogs vara störda och därmed inte helt pålitliga. Istället antogs ett värde baserat på jordartsdata från SGI för friktionslagret [19].

Tabell B.1-B.3 i Bilaga 2 redovisar antagna ingångsvärden för torrskorpan, lerlagret och sand/silt/ler-lagret. Startvärden för torrskorpans och lerans kohesion antogs enligt tabell B.1 och B.2. Värdet på friktionsvinkeln erhöles senare ur Göran Sällfors bok *Geoteknik* [11]. Torrskorpan och sand/silt/ler-lagret antogs alltid vara dränerade, även vid odränerad analys. Vid odränerad analys har det homogena lerlagret delats upp i tre lager för att förenkla ökningen av skjuvhållfasten med djupet enligt trendlinjen i figur B.1.

## 4.1 Geostudio: Slope/W

Samtliga analyser i Geostudio:Slope/W genomfördes enligt Morgenstern-Prices metod då den anses vara mest omfattande jämfört med tidigare beskrivna metoder. Standardinställningen för funktionen *interslice force function* ändrades inte utan *half-sine-function* användes för samtliga simuleringar enligt Morgenstern-Prices metod. Vidare vid hydrostatiskt portryck respektive portrycksförändringen i sand/silt/lerlagret gjordes även analyser enligt Spencer, Janbu och Bishop för att undersöka hur val av beräkningsmetod påverkar säkerhetsfaktorn i slänterna. För samtliga metoder användes den förvalda inställningen gällande antalet lameller som beaktas vilken delar upp glidytorerna i 30 stycken lameller.

Hänsyn togs till sprickor i torrskorpan där sprickornas djup,  $Z_c$ , beräknades till 0,8 m med ekvation 4.1 [32] där  $c$  är kohesionen i kPa och  $\gamma$  är tungheten i kN/m<sup>3</sup>:

$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan\left(45 + \frac{1}{2}\gamma\right) \quad (4.1)$$

Till följd av den kraftiga nederbörden i området vid tiden för skredet antogs sprickorna vara helt vattenfyllda både vid dränerad och odränerad analys.

Vid undersökningen av hur portrycksförändringar i sand/silt/ler-lagret påverkar släntstabiliteten förenklades sektionernas geometri genom att de delades upp i etapper som representerade olika djup. Varje etapp bestod av tre mätpunkter: Den första vid grundvattenytan, den andra i sand/silt/ler-lagrets överkant och den tredje i sand/silt/ler-lagrets mitt. Från grundvattennivån ner till sand/silt/ler-lagret antogs

portrycket öka hydrostatiskt genom hela undersökningen.

Portrycken vid förändringen i sand/silt/ler-lagret antogs inledningsvis vara så höga att effektivspänningarna blev 0 kPa. Portrycken var alltså lika stora som totalspänningarna. Totalspänningarna beräknades genom att de ovanliggande lagrens tungheter multiplicerades med respektive lagertjocklek och sedan summerades dessa för varje etapp.

Etappernas erhållna portryck när effektivspänningarna var 0 kPa fungerade som utgångspunkt för undersökningens fortsättning. Genom passningsräkning framtogs vid vilka portryck som skred uppstod. Detta antogs ske för de portryck som gav en säkerhetsfaktor under 1,05 då allt under detta kan avrundas nedåt till 1. Då det antogs att portrycket aldrig kunde bli lägre än det hydrostatiska, antogs i sådant fall det hydrostatiska portrycksvärdet vara det lägsta möjliga. Avslutningsvis beräknades porövertrycket genom att de erhållna portrycken subtraheras med de hydrostatiska och dividerades med 10 för att få svaret i meter vattenpelare.

Enligt resultatet från litteraturstudien förutspåddes det lokala skredet i sektion B-B utgöras av glidytor med mindre utbredning. Därav undersöktes även stabiliteten för glidytor med större utbredning i enlighet med det verkliga skredets totala utsträckning. Analysen utfördes endast enligt Morgenstern-Prices metod samt vid hydrostatiskt portryck för både kort- och långtidsfallet, det vill säga i både odränerat och dränerat tillstånd.

För sektion B-B gjordes även en analys av progressivt brott eftersom det lokala skredet skedde där. Då skredet antogs ha skett så snabbt att portrycket inte hann ändras undersöktes endast korttidsfallet vid analys av progressivt brott. Vid analysen valdes rasmassans tunghet till  $17 \text{ kN/m}^3$ , övriga tungheter förblev oförändrade. Rasmassorna antogs sakna hållfasthet varvid skjuvhållfastheten valdes till 0 kPa. Likt ovan antogs skred uppstå då säkerhetsfaktorn understeg 1,05. Eftersom det i programmet inte var möjligt att simulera ett progressivt brott genomfördes analysen genom att flytta geometrier och på så sätt manuellt återskapa det progressiva skredförloppet. De glidytor som gav djupast och längst skred kombinerades då och på så vis flyttades en representativ glidyta som gav ett så stort brott som möjligt. Analysen avslutades när det progressiva brottets säkerhetsfaktor översteg 1,05.

En känslighetsanalys gjordes för att undersöka hur val av kohesion för torrskorpan påverkar resultatet i den odränerade respektive dränerade analysen. I den dränerade analysen undersöktes även valet av kohesion för den dränerade leran. Undersökningarna utfördes med hydrostatiskt portryck och kohesionen antogs inledningsvis vara noll. Därefter sattes kohesionen till 10% av lerans odränerade skjuvhållfasthet [11]. Eftersom den odränerade skjuvhållfastheten ökar med djupet valdes kohesionen för den dränerade leran till 10% av skjuvhållfastheten vid lerskiktets mitt. Avslutningsvis undersöktes fallet då endast kohesionen för torrskorpan alternativt leran antogs vara noll.

## 4.2 LimitState:Geo

I LimitState:Geo användes samma materialvärden och grundvattennivå som i Geostudio:Slope/W. Däremot utfördes analyserna endast med hydrostatiskt portryck då undersökningen av porövertrycket inte lyckades hanteras med funktionerna i programmet. Av samma anledning undersöktes inte heller progressivt brott. Slänterna simulerades med noddensiten *fine* för att erhålla en högre noggrannhet. Funktionen *model rotation* stängdes av eftersom att simuleringen endast syftar till att undersöka hur jordblocken rör sig i förhållande till varandra [33].

För säkerhetsfaktorer högre än 5 erhålls resultatet *locked* då programmet inte beräknar högre säkerhetsfaktorer än detta. Så var fallet för sektion A-A. Genom att ange en reduktionsfaktor i *scenario manager* multiplicerades därför hållfasthetsparametrarna  $c'$ ,  $\tan\varphi$  och  $c_u$  med denna vilket sänkte säkerhetsfaktorn till ett värde under 5. Säkerhetsfaktorn dividerades sedan med reduktionsfaktorn för att erhålla det egentliga resultatet [33]. Avslutningsvis genomfördes en känslighetsanalys på samma sätt som Geostudio:Slope/W.

# 5

## Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från intervjun med Göran Sällfors samt datorsimuleringarna i Geostudio:Slope/W och LimitState:Geo. Analyser och reflektioner kring resultaten presenteras i ett enskilt avsnitt i efterföljande kapitel *Analys och diskussion*.

### 5.1 Intervju med Göran Sällfors

Intervjun med Göran Sällfors, professor emeritus i geologi och geoteknik vid Chalmers tekniska högskola, utfördes 19 mars 2020. Sällfors har bland annat medverkat i flera utredningar gällande större jordskred, såsom Tuveskredet, och har därmed en lång erfarenhet och stor kunskap inom ämnet. I de två avsnitten nedan följer en sammanfattning av Sällfors bedömning av Tuveskredet samt skredrisker i framtiden.

#### 5.1.1 Angående Tuveskredet

Under tidigt 60-tal när Tuve exploaterades tillhörde området den mindre kommunen vid namn Tuve kommun. Enligt Sällfors saknades då tillräckliga geotekniska kunskaper och resurser vilket resulterade i bristande förundersökningar. Utöver några enstaka borrhningar var det ingen som egentligen hade tittat på stabiliteten i området, vilket Sällfors anser berodde mycket på att Tuve då var en liten kommun. Vidare konstateras att de bristande förundersökningarna även gav en ovisshet om förekomsten av kvicklera i området. Med en vetskap om kvickleran i kombination med den låga säkerhetsfaktorn vid Tuve Kyrkväg hade inte området exploateras utan att åtgärder vidtagits.

När det gäller skredets faktiska utbredning menar Sällfors att det med konventionella metoder inte går att beräkna så stora glidytor till brott. Under utredningarna när detta upptäcktes uppkom resonemangen kring progressiva skred. Personligen anser Sällfors att det var ett lokalt skred som började vid Tuve kyrkväg där stabiliteten för en lokal glidyta var ganska låg. När ett sådant skred väl kommer igång skapas en kedjereaktion som sprider sig okontrollerat. Om någon länk i kedjan därefter brister klarar inte övriga länkar av att hantera den extra last eller impuls som tillkommer. Jordmassorna som börjar att röra sig skapar därmed ett dynamiskt tillskott som gör att skredet sprider sig mer än förväntat.

Sällfors bekräftar att det hade varit en period med mycket regn vid tiden före skredet. Vatten som runnit längs med sluttningen ner mot Tuve Kyrkväg tros ha övervämmat vägtrumorna. Detta resulterade i att vatten ansamlades på ytan likt en damm vilket bidrog till ökade portryck. Enligt Sällfors är det då inte så svårt att tänka sig att ett lokalt brott kunde ske vid Tuve kyrkväg.

Vid mätningar efter skredet visade det sig att friktionsjorden längs med berget inte hade så anmärkningsvärt höga portryck. Detta säger dock inget om hur höga portrycken tidigare var eftersom att de försvann när skredet väl utlöstes. Vidare menar Sällfors att det aldrig tidigare har observerats högre artesiska porövertryck än 30-50 kPa i området. Det betonas att det för en vanlig U-formad dalgång med lera inte kan bli högre portryck i ett nedre permeabelt jordlager än det tryck som motsvaras vid den översta kanten på lerlagret. Över denna gräns breddar vattnet och rinner då som ytvatten istället.

Sällfors understryker att den främsta orsaken bakom skredet var att det inte hade gjorts ordentliga geotekniska förundersökningar då Tuve exploaterades. Detta gjorde då att den alldeles för låga säkerhetsfaktorn vid Tuve Kyrkväg inte beaktades. Vidare anser Sällfors att vattnet som antagligen fyllde på bakom vägen och stigande portryck var det som initierade skredet. Att det sen fick den faktiska omfattningen berodde enligt Sällfors på kvickleran. Däremot hade ett skred aldrig skett om säkerhetsfaktorn varit högre från början. Då hade det lokala skredet vid Tuve Kyrkväg aldrig utlösts utan säkerhetsfaktorn där måste enligt Sällfors ha varit väldigt nära 1,0. Vidare betonas att ett sådant område aldrig hade fått bebyggas om tillräckliga förundersökningar gjorts idag.

Avslutningsvis berättar Sällfors att lärdomarna från Tuveskredet bland annat var vetenskapen att ett litet initialscred kan leda till ett progressivt skred som får mycket större utbredning. Vidare erhöles en större förståelse för kvicklera och faran med denna. En effekt av skredet är enligt Sällfors lagstiftandet i Plan- och bygglagen (PBL) gällande markstabilitet. Det är sedan dess lag på att geotekniska undersökningar ska utföras så fort det finns förutsättningar för skred, såsom lutande mark och lera.

### **5.1.2 Skredrisker med avseende på framtidens utmaningar**

Framöver förutspås mer intensivt regn som verkar mer plötsligt och häftigt under en kortare tid. Vattennivåerna i älvar och liknande förväntas således att höjas. Enligt Sällfors kan även portrycken stiga något som följd men i väldigt många fall så är det inte portrycken som är farliga för skred. Det är snarare erosionen som är den avgörande faktorn. Visserligen ökar säkerhetsfaktorn med stigande vattennivåer men samtidigt ökar erosionen vid högre flöden menar Sällfors. Vidare betonas att erosionen inte påverkas av portrycken utan den sker endast på grund av strömmande vatten. Allra mest utsatta är de områden längs älvkanter som kröker sig eftersom erosionen ökar när strömmande vatten byter riktning. Sällfors menar även att fartygstrafik i viss mån kan bidra till ökad erosion.

Generellt när det gäller skredrisker i framtiden anser Sällfors att det finns två huvudsakliga faktorer som kan äventyra släntstabiliteten: Människan och erosionen. Vid förändring av landskapet anses den mänskliga faktorn kunna bemästras med dagens kunskap. Däremot betonar Sällfors att erosionen är den stora faran framöver då det är en naturligt pågående process som inte kan brytas. Vidare anser Sällfors att erosionen måste bevakas kontinuerligt framöver för kontroll av släntstabiliteten längs med vattendrag så att detta kan tas med i beräkningen. Förslagsvis bör myndigheter göra mätningar vart 5:e år för att upptäcka var det sker förändringar.

## 5.2 Resultat från GeoStudio:Slope/W

Resultaten från datorsimuleringen i GeoStudio:Slope/W är uppdelade nedan i tre avsnitt, ett avsnitt per tvärsektion. Inledningsvis presenteras beräknade portryck vid undersökning av portrycksförändringars påverkan på släntstabiliteten. Därefter redovisas säkerhetsfaktorer vid hydrostatiskt respektive förändrat portryck samt beräknade glidytor. Avslutningsvis presenteras en känslighetsanalys där värden på kohesionen varierar.

### 5.2.1 Sektion A-A

I tabell 5.1 och 5.2 nedan visas hur portrycken varierar med djupet enligt olika portrycksförändringar. Baserat på intervjun med Göran Sällfors har det aldrig tidigare observerats högre artesiska porövertryck än 3-5 meter över markytan. Det kan därför konstateras att det vid större djup krävs orimligt höga porövertryck för att nå en säkerhetsfaktor nära 1,0, se rödmarkerade värden i tabell 5.1 och 5.2.

För den odränerade och dränerade analysen blev säkerhetsfaktorn nära 1,0 då portrycket minskades med 109 kPa respektive 67 kPa från det portryck när effektivspänningarna var noll. Som nämnt tidigare antogs portrycken aldrig kunna bli lägre än de hydrostatiska, se blåmarkerade värden i tabell 5.1 och 5.2.

**Tabell 5.1:** Beräknade portryck vid undersökning av portrycksförändringars påverkan på släntstabiliteten för odränerad analys. Grundvattenytan antas 2 m under markytan. Rödmarkerade värden beskriver orimligt höga portryck och blåmarkerade värden motsvarar det hydrostatiska portrycket.

Odränerad analys				
Djup [m]	Hydrostatiskt portryck [kPa]	Portryck när effektivspänningarna är noll [kPa]	Portryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [kPa]	Porövertryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [meter över markytan]
5,2	32	87,2	32	0
9,2	72	151,2	72	0
25,5	235	412	303	6,8
34	320	548	439	11,9
36	340	580	471	13,1

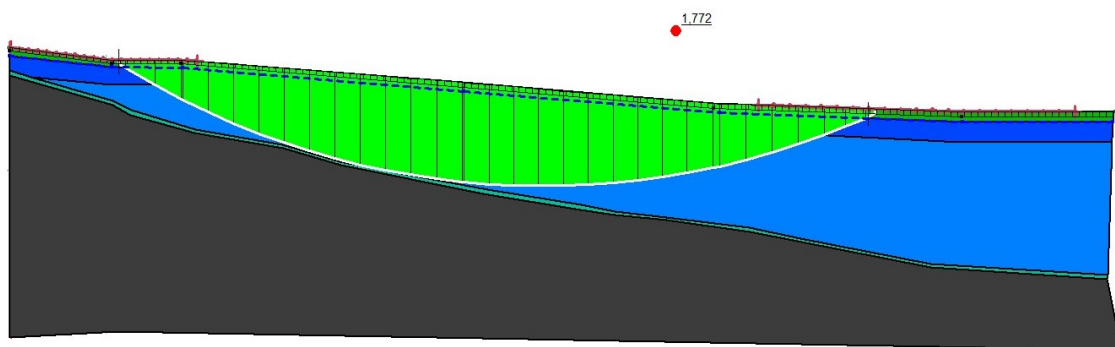
**Tabell 5.2:** Beräknade portryck vid undersökning av portrycksförändringars påverkan på släntstabiliteten för dränerad analys. Grundvattenytan antas 2 m under markytan. Rödmarkerade värden beskriver orimligt höga portryck och blåmarkerade värden motsvarar det hydrostatiska portrycket.

Dränerad analys				
Djup [m]	Hydrostatiskt portryck [kPa]	Portryck när effektivspänningarna är noll [kPa]	Portryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [kPa]	Porövertryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [meter över markytan]
5,2	32	87,2	32	0
9,2	72	151,2	84,2	1,2
25,5	235	412	345	11
34	320	548	481	16,1
36	340	580	513	17,3

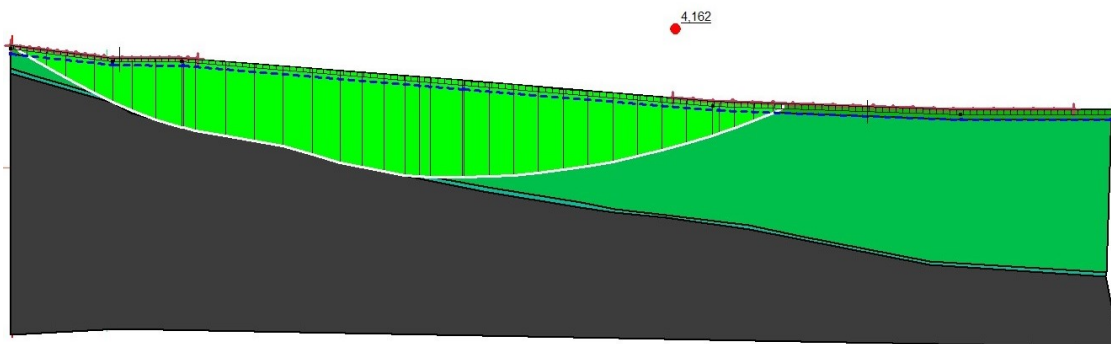
Enligt tabell 5.3 och figur 5.1 - 5.2 redovisas säkerhetsfaktorer och glidytor vid hydrostatiskt tryck för både odränerad och dränerad analys. Glidyterna når ner till berggrunden, dock är säkerhetsfaktorerna långt över brottgränsvärdet 1,0.

**Tabell 5.3:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid hydrostatiskt tryck.

Beräkningsmetod	Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
Morgenstern-Price	1,77	4,16
Spencer	1,78	4,16
Janbu	1,70	3,92
Bishop	1,78	4,15



**Figur 5.1:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid hydrostatiskt tryck enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 183 meter i horisontalld.

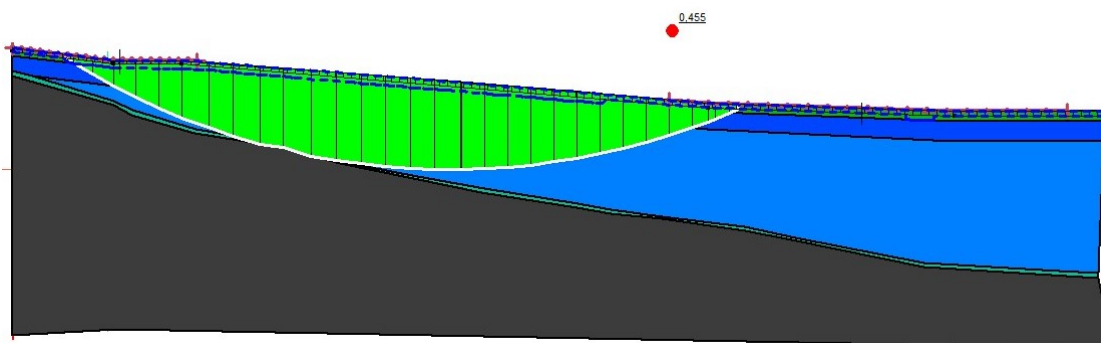


**Figur 5.2:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid hydrostatiskt tryck enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 177 meter i horisontalld.

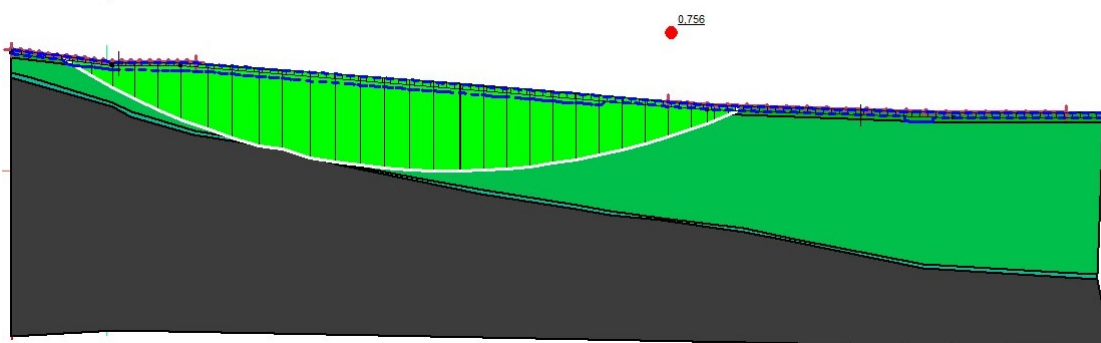
I tabell 5.4 och figur 5.3 - 5.4 redovisas säkerhetsfaktorer och glidytor vid det portryck då effektivspänningarna är noll för både odränerad och dränerad analys. Båda glidytor når ner till berggrunden och eftersom säkerhetsfaktorerna understiger 1,0 beräknas glidytorna till brott.

**Tabell 5.4:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid det portryck då effektivspänningarna är noll.

Beräkningsmetod	Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
Morgenstern-Price	0,46	0,77
Spencer	0,46	0,76
Janbu	0,47	0,73
Bishop	0,47	0,75

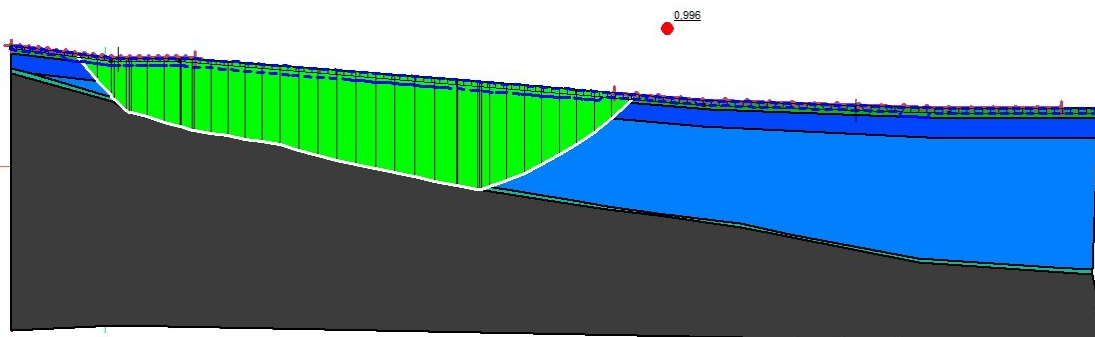


**Figur 5.3:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid portrycket då effektivspänningarna är noll enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 151 meter i horisontalld.

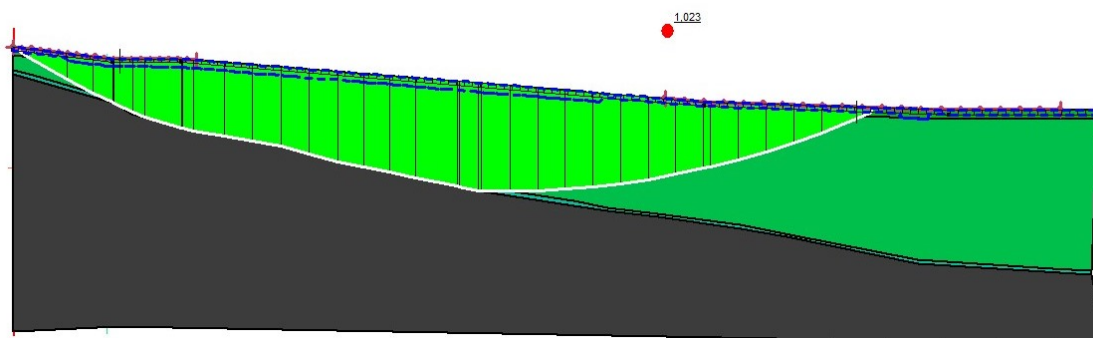


**Figur 5.4:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid portrycket då effektivspänningarna är noll enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 160 meter i horisontalld.

Glidytor vid det portryck då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 visas i figur 5.5 - 5.6 för odränerad och dränerad analys. Även i detta fall når glidyterna ner till berggrunden men i förhållande till varandra skiljer de sig mer i utbredning.



**Figur 5.5:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid portrycket då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 132 meter i horisontalld.



**Figur 5.6:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid portrycket då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 205 meter i horisontalld.

Enligt tabell 5.5 - 5.6 redovisas känslighetsanalyser för odränerat och dränerat fall. Det kan konstateras att variationen av kohesionsvärdena inte påverkar säkerhetsfaktorerna nämnvärt, även om skillnaden mellan säkerhetsfaktorerna är något större i dränerat fall.

**Tabell 5.5:** Säkerhetsfaktorer för odränerad analys med varierande kohesion.

Odränerad känslighetsanalys	
Kohesion torrskorpa [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	1,772
0	1,765
1,5	1,770

**Tabell 5.6:** Säkerhetsfaktorer för dränerad analys med varierande kohesion.

Dränerad känslighetsanalys		
Kohesion torrskorpa [kPa]	Kohesion lera [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	5	4,162
0	0	3,938
1,5	2,6	4,077
5	0	3,949
0	5	4,154

### 5.2.2 Sektion B-B

Nedan i tabell 5.7 och 5.8 visas hur portrycken varierar med djupet enligt olika portrycksförändringar. Som nämnt tidigare kan det konstateras att det vid större djup krävs orimligt höga porövertryck för att nå en säkerhetsfaktor nära 1,0, se rödmarkerade värden i tabell 5.7 och 5.8.

För den odränerade och dränerade analysen blev säkerhetsfaktorn nära 1,0 då portrycket minskades med 45 kPa respektive 46,25 kPa från det portryck när effektivspänningarna var noll.

**Tabell 5.7:** Beräknade portryck vid undersökning av portrycksförändringars påverkan på släntstabiliteten för odränerad analys. Grundvattenytan antas 2 m under markytan. Rödmarkerade värden beskriver orimligt höga portryck.

Odränerad analys				
Djup [m]	Hydrostatiskt portryck [kPa]	Portryck när effektivspänningarna är noll [kPa]	Portryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [kPa]	Porövertryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [meter över markytan]
4	20	68	23	0,3
8	60	132	87	2,7
13	110	212	167	5,7
25	230	404	359	12,9

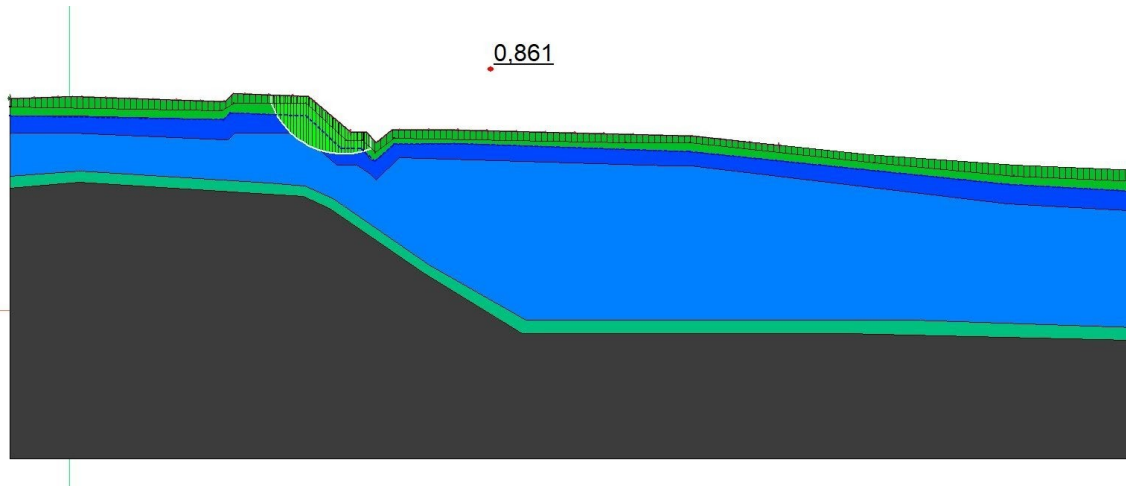
**Tabell 5.8:** Beräknade portryck vid undersökning av portrycksförändringars påverkan på släntstabiliteten för dränerad analys. Grundvattenytan antas 2 m under markytan. Rödmarkerade värden beskriver orimligt höga portryck.

Dränerad analys				
Djup [m]	Hydrostatiskt portryck [kPa]	Portryck när effektivspänningarna är noll [kPa]	Portryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [kPa]	Porövertryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [meter över markytan]
4	20	68	21,75	0,175
8	60	132	85,75	2,575
13	110	212	165,75	5,75
25	230	404	357,75	12,775

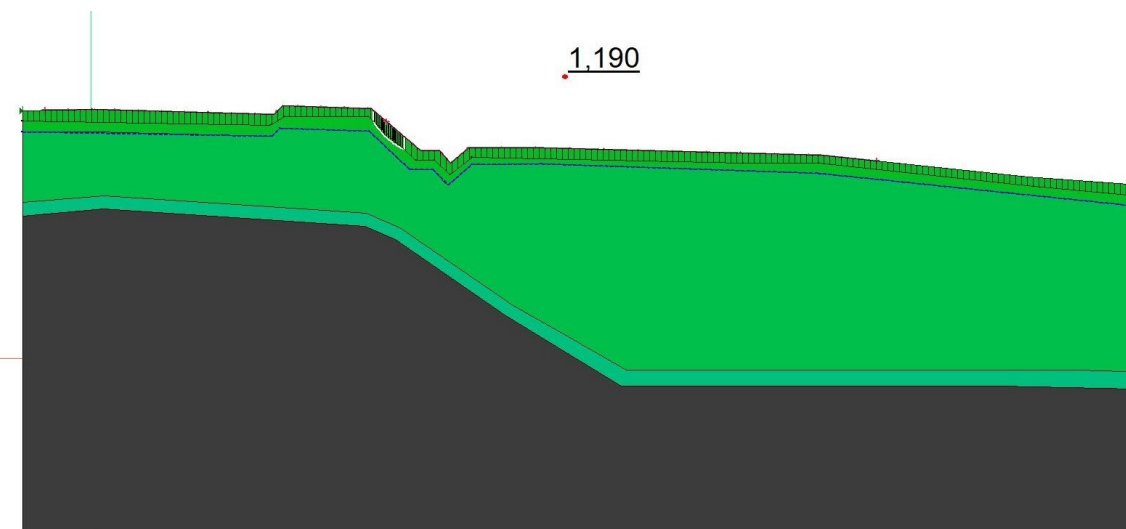
Enligt tabell 5.9 och figur 5.7 - 5.8 redovisas säkerhetsfaktorer och glidytor vid hydrostatiskt tryck för både odränerad och dränerad analys. Glidyterna når inte ner till berggrunden utan är mycket mindre jämfört med vid hydrostatiskt tryck i sektion A-A. För det dränerade fallet går glidyten endast i torrskorpan. Säkerhetsfaktorerna för odränerat fall understiger brottsgränsvärdet 1,0 vilket skiljer detta resultatet från övriga vid hydrostatiskt tryck. Däremot ligger säkerhetsfaktorerna för dränerad analys över 1,0.

**Tabell 5.9:** Säkerhetsfaktorer för dränerad och odränerad analys vid hydrostatiskt tryck.

Beräkningsmetod	Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
Morgenstern-Price	0,86	1,19
Spencer	0,90	1,19
Janbu	0,76	1,08
Bishop	0,85	1,21



**Figur 5.7:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid hydrostatiskt tryck enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 13 meter i horisontalld.

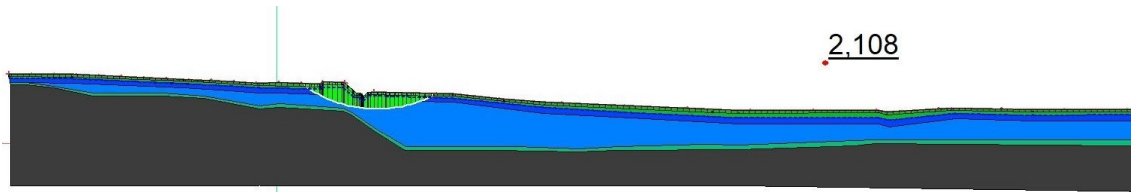


**Figur 5.8:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid hydrostatiskt tryck enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 3 meter i horisontalld.

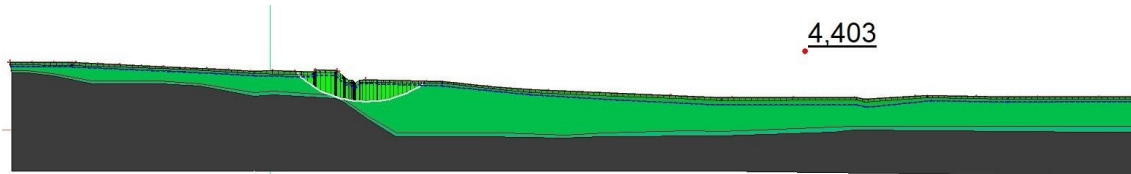
Säkerhetsfaktorer för större glidytor vid hydrostatiskt tryck redovisas i tabell 5.10. Figur 5.9 - 5.10 visar glidyternas utbredning. Säkerhetsfaktorerna är mycket högre än i tabell 5.9, skillnaden mellan odränerad och dränerad analys är också mycket större.

**Tabell 5.10:** Säkerhetsfaktorer i odränerat och dränerat fall för större glidytor vid hydrostratiskt tryck.

Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
2,11	4,40



**Figur 5.9:** Större kritisk glidyta för odränerad analys vid hydrostatiskt tryck. Utbredningen är cirka 58 meter i horisontalled.

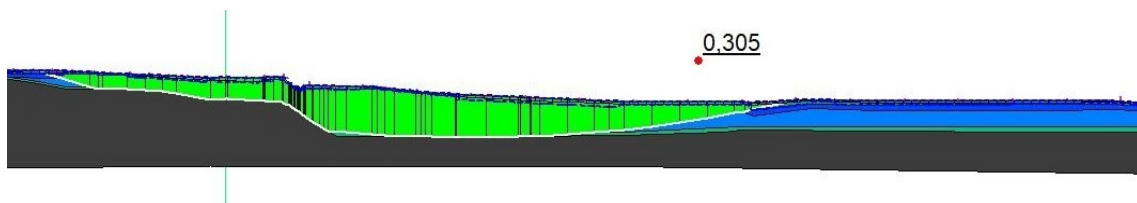


**Figur 5.10:** Större kritisk glidyta för dränerad analys vid hydrostatiskt tryck. Utbredningen är cirka 59 meter i horisontalled.

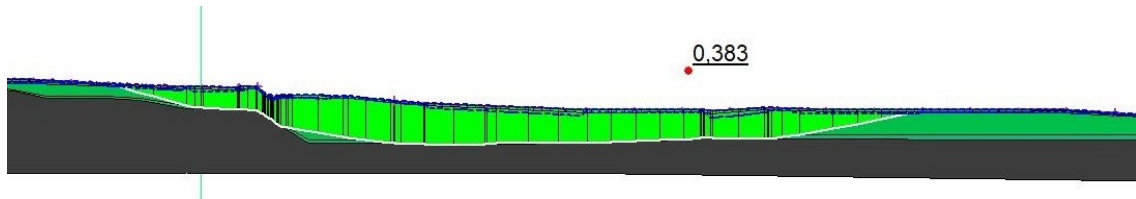
I tabell 5.11 och figur 5.11 - 5.12 redovisas säkerhetsfaktorer och glidytor vid det portryck då effektivspänningarna är noll för både odränerad och dränerad analys. Glidyterna når ner till berggrunden och har en mycket stor utbredning i enlighet med skredets faktiska utbredning. Detta skiljer sig från övriga resultat vid portrycksfallet då effektivspänningarna är noll. Säkerhetsfaktorerna understiger brottgränsvärdet 1,0 rejält.

**Tabell 5.11:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid det portryck då effektivspänningarna är noll.

Beräkningsmetod	Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
Morgenstern-Price	0,31	0,38
Spencer	0,30	0,36
Janbu	0,30	0,40
Bishop	0,30	0,39

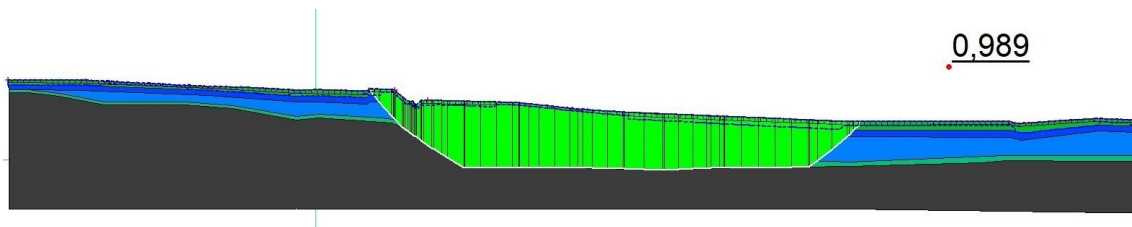


**Figur 5.11:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid portrycket då effektivspänningarna är noll enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 390 meter i horisontalled.

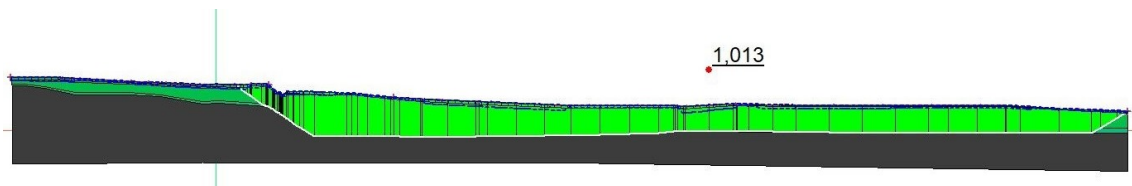


**Figur 5.12:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid portrycket då effektivspänningarna är noll enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 434 meter i horisontalld.

Glidytor vid det portryck då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 visas i figur 5.13 - 5.14 för odränerad och dränerad analys. Även i detta fall når glidyterna ner till berggrunden men för dränerad analys är utbredningen större jämfört med vid portrycket då effektivspänningarna är noll.

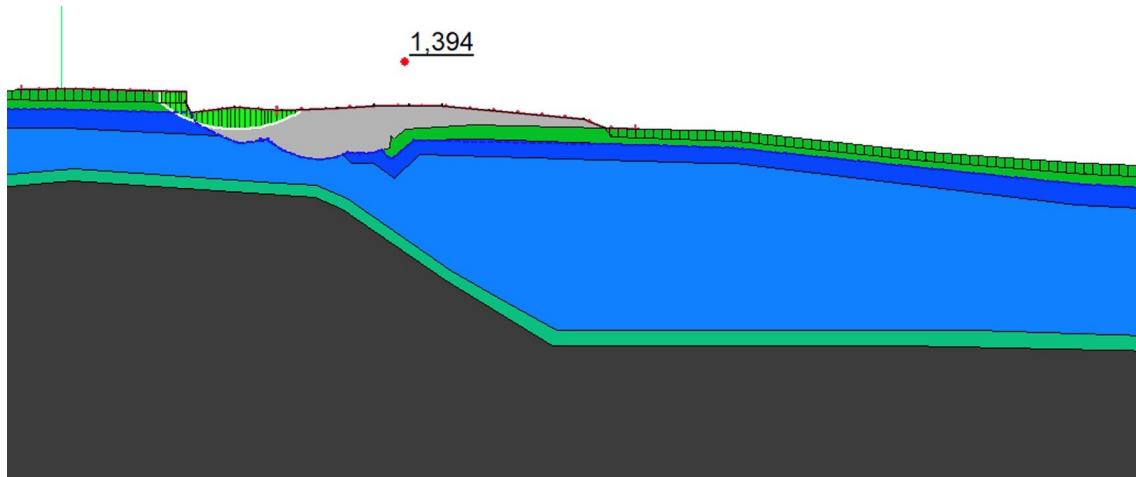


**Figur 5.13:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid portrycket då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 192 meter i horisontalld.



**Figur 5.14:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid portrycket då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 525 meter i horisontalld.

I figur 5.15 nedan visas säkerhetsfaktorn för den slutgiltiga utbredningen av progressivt brott i odränerat fall vid hydrostatiskt tryck. Det gråfärgade lagret representerar rassmassans utbredning. Det kan konstateras att det progressiva brottet inte får samma omfattning jämfört med det faktiska skredet.



**Figur 5.15:** Kritisk glidyta samt slutgiltig utbredning för ett progressivt brott i odränerat fall. Utbredningen är cirka 49 meter i horisontalld.

Enligt tabell 5.12 - 5.13 nedan redovisas känslighetsanalyser för odränerat och dränerat fall. Det kan konstateras att variationen av kohesionsvärdena inte påverkar säkerhetsfaktorerna nämnvärt i odränerat fall. Däremot är skillnaden stor mellan säkerhetsfaktorerna i dränerat fall. För den dränerade analysen erhålls samma säkerhetsfaktor då kohesionen är 0 kPa i torrskorpan och leran som för fallet när kohesionen är noll i torrskorpan men 5 kPa i leran, se rödmarkerade värden i tabell 5.13.

**Tabell 5.12:** Säkerhetsfaktorer för odränerad analys med varierande kohesion.

Odränerad känslighetsanalys	
Kohesion torrskorpa [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	0,861
0	0,827
1,5	0,837

**Tabell 5.13:** Säkerhetsfaktorer för dränerad analys med varierande kohesion.

Dränerad känslighetsanalys		
Kohesion torrskorpa [kPa]	Kohesion lera [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	5	1,190
0	0	0,689
1,5	2,6	0,886
5	0	1,190
0	5	0,689

### 5.2.3 Sektion C-C

I tabell 5.14 nedan visas hur portrycken varierar med djupet enligt olika portrycksförändringar för odränerad analys. Även i detta fall ses att orimligt höga porövertryck krävs för att nå en säkerhetsfaktor nära 1,0, se rödmarkerade värden i tabell 5.14. För den odränerade analysen blev säkerhetsfaktorn nära 1,0 då portrycket minskades med 25 kPa från det portryck när effektivspänningarna var noll.

För den dränerade analysen genomfördes ingen portrycksförändring eftersom säkerhetsfaktorn blev större än 1,0 då effektivspänningarna var noll. I tabell 5.15 redovisas portryckets variation med djupet då effektivspänningarna var noll.

**Tabell 5.14:** Beräknade portryck vid undersökning av portrycksförändringars påverkan på släntstabiliteten för odränerad analys. Grundvattenytan antas 2 m under markytan. Rödmarkerade värden beskriver orimligt höga portryck.

Odränerad analys				
Djup [m]	Hydrostatiskt portryck [kPa]	Portryck när effektivspänningarna är noll [kPa]	Portryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [kPa]	Porövertryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [meter över markytan]
8	60	132	107	4,7
9,5	75	156	131	5,6
12,5	105	204	179	7,4
27	250	436	411	16,1

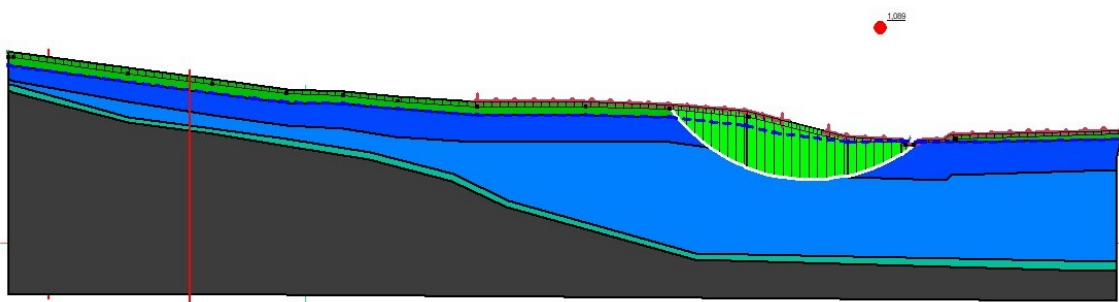
**Tabell 5.15:** Beräknade portryck vid undersökning av portrycksförändringars påverkan på släntstabiliteten för dränerad analys.

Dränerad analys				
Djup [m]	Hydrostatiskt portryck [kPa]	Portryck när effektivspänningarna är noll [kPa]	Portryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [kPa]	Porövertryck när säkerhetsfaktorn är nära 1,0 [meter över markytan]
8	60	132	-	-
9,5	75	156	-	-
12,5	105	204	-	-
27	250	436	-	-

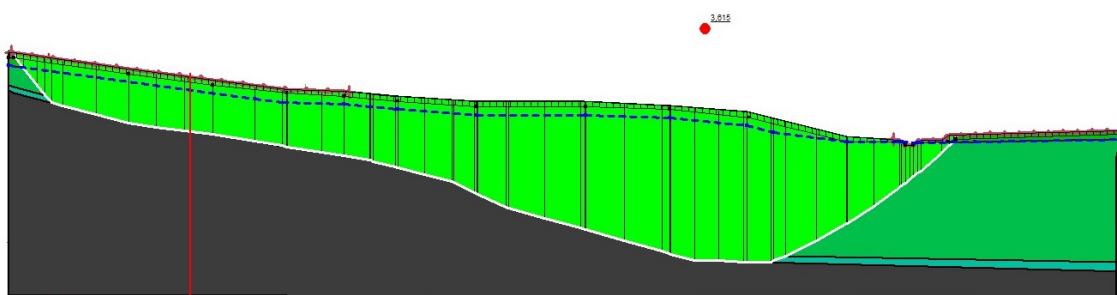
I tabell 5.16 och figur 5.16 - 5.17 redovisas säkerhetsfaktorer och glidytor vid hydrostatiskt tryck för både odränerad och dränerad analys. Glidyternas storlek och geometri varierar stort mellan odränerad och dränerad analys. En tydlig skillnad ses också i säkerhetsfaktorerna där de vid odränerad analys ligger runt 1,0. Vid dränerad analys är säkerhetsfaktorerna mycket högre och varierar runt 3,5.

**Tabell 5.16:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid hydrostatiskt tryck.

Beräkningsmetod	Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
Morgenstern-Price	1,09	3,62
Spencer	1,09	3,71
Janbu	0,98	3,30
Bishop	1,09	3,59



**Figur 5.16:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid hydrostatiskt tryck enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 43 meter i horisontalled.

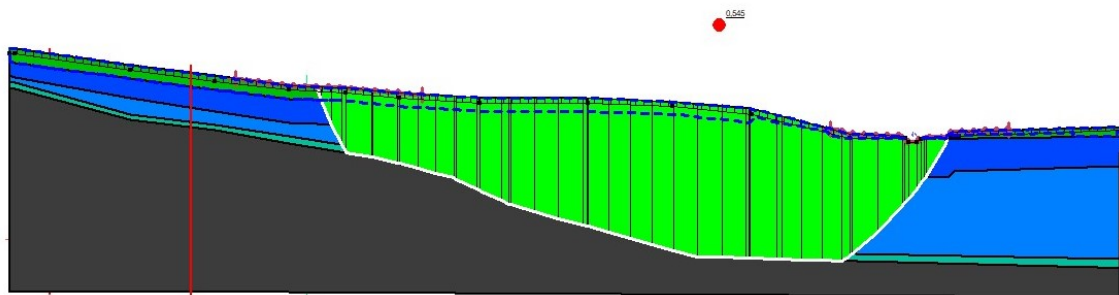


**Figur 5.17:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid hydrostatiskt tryck enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 174 meter i horisontalled.

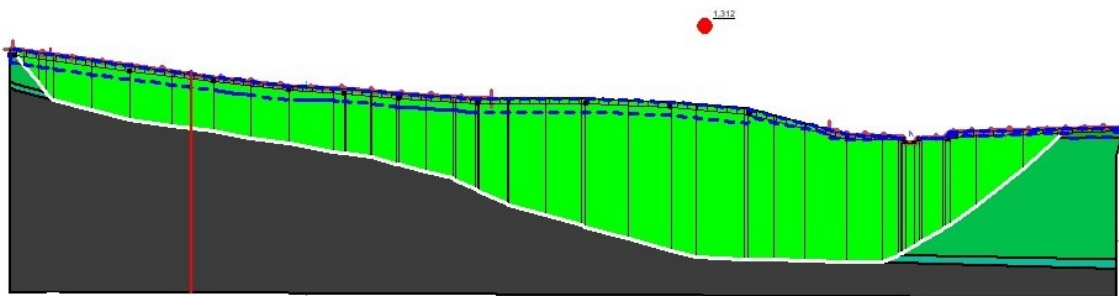
I tabell 5.17 och figur 5.18 - 5.19 redovisas säkerhetsfaktorer och glidytor vid det portryck då effektivspänningarna är noll för både odränerad och dränerad analys. Noterbart är de mycket låga säkerhetsfaktorerna som erhålls vid odränerad analys samt att säkerhetsfaktorerna för dränerad analys överstiger brottsgränsvärdet 1,0.

**Tabell 5.17:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid det portryck då effektivspänningarna är noll.

Beräkningsmetod	Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
Morgenstern-Price	0,55	1,31
Spencer	0,54	1,33
Janbu	0,53	1,25
Bishop	0,54	1,29

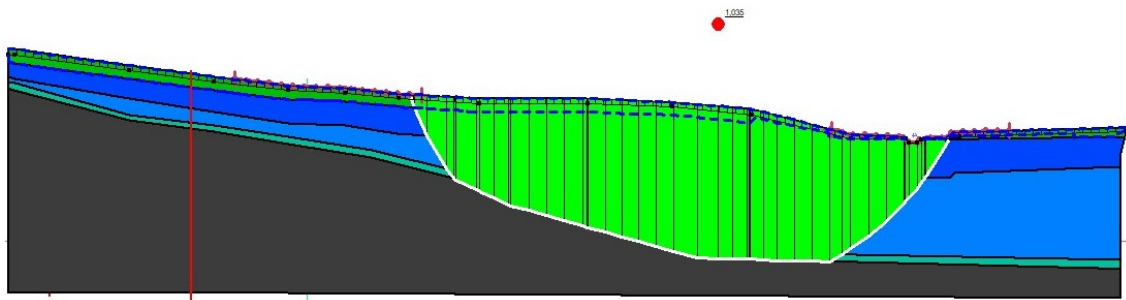


**Figur 5.18:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid portrycket då effektivspänningarna är noll enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 113 meter i horisontalld.



**Figur 5.19:** Kritisk glidyta för dränerad analys vid portrycket då effektivspänningarna är noll enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 190 meter i horisontalld.

Glidytan vid det portryck då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 visas i figur 5.20 för odränerad analys. Som tidigare nämnts undersöktes inte portryckets påverkan på släntstabiliteten för dränerad analys i detta fall eftersom säkerhetsfaktorn var större än 1,0 redan då effektivspänningarna var noll.



**Figur 5.20:** Kritisk glidyta för odränerad analys vid porttrycket då säkerhetsfaktorn är nära 1,0 enligt Morgenstern-Prices metod. Utbredningen är cirka 99 meter i horisontalld.

Tabell 5.18 - 5.19 redovisar resultatet av en känslighetsanalys för odränerat och dränerat fall. Det kan konstateras att variationen av kohesionsvärdena inte påverkar säkerhetsfaktorerna nämnvärt, även om skillnaden mellan säkerhetsfaktorerna är något större i dränerat fall.

**Tabell 5.18:** Säkerhetsfaktorer för odränerad analys med varierande kohesion.

Odränerad känslighetsanalys	
Kohesion torrskorpa [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	1,089
0	1,081
1,5	1,084

**Tabell 5.19:** Säkerhetsfaktorer för dränerad analys med varierande kohesion.

Dränerad känslighetsanalys		
Kohesion torrskorpa [kPa]	Kohesion lera [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	5	3,610
0	0	3,537
1,5	2,6	3,577
5	0	3,541
0	5	3,610

## 5.3 Resultat från LimitState:Geo

Resultaten från datorsimuleringen i LimitState:Geo redovisas sektionvis nedan. Beräknade säkerhetsfaktorer och glidytor vid hydrostatiskt tryck redovisas samt en känslighetsanalys där kohesionen varieras.

### 5.3.1 Sektion A-A

I tabell 5.20 redovisas säkerhetsfaktorer för dränerad och odränerad analys vid hydrostatiskt tryck. Säkerhetsfaktorerna är mycket högre jämfört med motsvarande fall i GeoStudio:Slope/W. Den odränerade och dränerade säkerhetsfaktorn skiljer sig även mycket åt i förhållande till varandra. Däremot är glidytornas geometrier relativt lika för odränerad och dränerad analys, dessa visas i figur 5.21 och 5.22. Brottet når ner till berggrunden, dock är säkerhetsfaktorerna långt över brottgränsvärdet 1,0.

**Tabell 5.20:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid hydrostatiskt tryck.

Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
2,88	7,46



**Figur 5.21:** Brott för odränerad analys vid hydrostatiskt tryck med säkerhetsfaktorn 2,88. Utbredningen är cirka 214 meter i horisontalled.



**Figur 5.22:** Brott för dränerad analys vid hydrostatiskt tryck med säkerhetsfaktorn 7,46. Utbredningen är cirka 205 meter i horisontalled.

Känslighetsanalyser för odränerat och dränerat fall redovisas i tabell 5.21 och 5.22 nedan. Det kan konstateras att variationen av kohesionsvärdena inte påverkar säkerhetsfaktorerna nämnvärt i odränerat fall. Däremot är skillnaden något större i dränerat fall. Variationen i kohesion gav inte heller någon större skillnad för glidytorernas geometri, se figur C.1 - C.6 i Bilaga 3.

**Tabell 5.21:** Säkerhetsfaktorer för odränerad analys med varierande kohesion.

Odränerad känslighetsanalys	
Kohesion torrskorpa [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	2,879
0	2,856
1,5	2,862

**Tabell 5.22:** Säkerhetsfaktorer för dränerad analys med varierande kohesion.

Dränerad känslighetsanalys		
Kohesion torrskorpa [kPa]	Kohesion lera [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	5	7,464
0	0	7,090
1,5	2,6	7,282
5	0	7,144
0	5	7,436

### 5.3.2 Sektion B-B

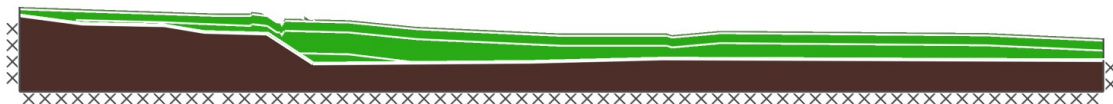
Enligt tabell 5.23 redovisas säkerhetsfaktorer för dränerad och odränerad analys vid hydrostatiskt tryck. Säkerhetsfaktorerna skiljer sig något jämfört med motsvarande fall i GeoStudio:Slope/W. Skillnaden är störst i dränerat fall. Tillskillnad från den dränerade understiger den odränerade säkerhetsfaktorn värdet 1,05 och beräknas därmed till brott. Vidare ses i figur 5.23 och 5.24 att glidytorernas geometrier är relativt lika motsvarigheterna i GeoStudio:Slope/W.

**Tabell 5.23:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid hydrostatiskt tryck.

Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
1,01	1,66



**Figur 5.23:** Brott för odränerad analys vid hydrostatiskt tryck med säkerhetsfaktorn 1,01. Utbredningen är cirka 20 meter i horisontalld.



**Figur 5.24:** Brott för dränerad analys vid hydrostatiskt tryck med säkerhetsfaktorn 1,66. Utbredningen är cirka 12 meter i horisontalld.

Nedan i tabell 5.24 och 5.25 redovisas känslighetsanalyser för odränerat och dränerat fall. Det kan konstateras att variationen av kohesionsvärdena påverkar säkerhetsfaktorerna något i odränerat fall. Däremot är skillnaden större i dränerat fall. Då kohesionen är 0 kPa i torrskorpan ses att den odränerade och dränerade säkerhetsfaktorn är likartade. För dränerat fall ses även att säkerhetsfaktorn då kohesionen är 0 kPa i torrskorpan är oberoende av kohesionen i leran, se rödmarkerade värden i tabell 5.25. Vidare gav variationen i kohesion inte någon större skillnad för glidytorernas geometri i det dränerade fallet, se figur C.7 - C.12 i Bilaga 3. Dock är denna skillnad större i odränerat fall.

**Tabell 5.24:** Säkerhetsfaktorer för odränerad analys med varierande kohesion.

Odränerad känslighetsanalys	
Kohesion torrskorpa [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	1,012
0	0,8841
1,5	0,9678

**Tabell 5.25:** Säkerhetsfaktorer för dränerad analys med varierande kohesion.

Dränerad känslighetsanalys		
Kohesion torrskorpa [kPa]	Kohesion lera [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	5	1,657
0	0	0,8839
1,5	2,6	1,137
5	0	1,517
0	5	0,8839

### 5.3.3 Sektion C-C

Tabell 5.26 redovisar säkerhetsfaktorer för dränerad och odränerad analys vid hydrostatiskt tryck. Säkerhetsfaktorn för odränerad analys överensstämmer med motsvarande fall i GeoStudio:Slope/W. För det dränerade fallet erhålls dock ett högre värde. I båda fall överstigs brottgränsvärdet 1,0. Däremot är glidyornas geometrier relativt lika för odränerad och dränerad analys, dessa visas i figur 5.25 och 5.26.

**Tabell 5.26:** Säkerhetsfaktorer för odränerad och dränerad analys vid hydrostatiskt tryck.

Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor dränerad analys
1,17	2,64



**Figur 5.25:** Brott för odränerad analys vid hydrostatiskt tryck med säkerhetsfaktorn 1,17. Utbredningen är cirka 55 meter i horisontalld.



**Figur 5.26:** Brott för dränerad analys vid hydrostatiskt tryck med säkerhetsfaktorn 2,64. Utbredningen är cirka 46 meter i horisontalld.

Känslighetsanalyser för odränerat och dränerat fall redovisas i tabell 5.27 och 5.28 nedan. Det kan konstateras att variationen av kohesionsvärdena inte påverkar säkerhetsfaktorerna nämnvärt i odränerat fall. Däremot är skillnaden stor i dränerat fall. För dränerat fall ses även att säkerhetsfaktorn då kohesionen är 0 kPa i torrskorpan är oberoende av kohesionen i leran, se rödmarkerade värden i tabell 5.28.

Vidare gav variationen i kohesion även en stor skillnad gällande glidyornas geometri i det dränerade fallet, se figur C.13 - C.18 i Bilaga 3. Dock är skillnaden i geometri försumbar för odränerad analys.

**Tabell 5.27:** Säkerhetsfaktorer för odränerad analys med varierande kohesion.

Odränerad känslighetsanalys	
Kohesion torrskorpa [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	1,166
0	1,142
1,5	1,149

**Tabell 5.28:** Säkerhetsfaktorer för dränerad analys med varierande kohesion.

Dränerad känslighetsanalys		
Kohesion torrskorpa [kPa]	Kohesion lera [kPa]	Säkerhetsfaktor
5	5	2,635
0	0	1,445
1,5	2,6	2,196
5	0	1,884
0	5	1,445

# 6

## Analys och diskussion

I nedanstående avsnitt analyseras och diskuteras resultaten från datorsimuleringarna vilka jämförs med resultatet av litteraturstudien. Avslutningsvis diskuteras etiska aspekter och framtida skredrisker.

### 6.1 Litteraturstudie och datorsimuleringar

Enligt resultatet i GeoStudio:Slope/W och LimitState:Geo konstateras att säkerhetsfaktorerna för stora glidytor vid ett hydrostatiskt tryck är så höga att ett brott av denna omfattning kan uteslutas. Detta gäller för samtliga sektioner och visas exempelvis i figur 5.9 och 5.10 samt figur 5.21 och 5.22. Detta motstrider det faktiska skredet vilket dessutom utgjordes av betydligt större glidytor än det beräknade resultatet. Det kan därför konstateras att det krävs en inverkan av ytterligare faktorer för att nå ett brott av större omfattning.

En faktor som enligt flera geotekniker i avsnitt *Bedömningar av Tuveskredets orsaker* bedömdes vara en bidragande orsak till skredet är förhöjda portryck i friktionslagret närmast berggrunden. Ett artesiskt porövertryck på 2-3 m över markytan var enligt Berntson & Lindh tillräckligt för att bottenskiktet vid Tuve Kyrkväg skulle tappa sin hållfasthet. Samtidigt ansåg de att det skulle krävas ett orimligt högt porövertryck på 8-10 m för att erhålla en säkerhetsfaktor under 1,0 mellan Tuve Kyrkväg och Nya Tuvevägen. Vidare styrks orimligheten av bedömningen att mätningar utanför skredområdet indikerade på porövertryck motsvarande 2-3 m över markytan efter skredet. Ur intervjun med Göran Sällfors framgick även att det aldrig tidigare hade observerats högre artesiska porövertryck än 30-50 kPa i området. Däremot är det svårt att veta exakt hur höga portrycken faktiskt var när skredet inträffade eftersom de förhöjda portrycken försvinner när skredet väl utlöses, vilket beskrevs i intervjun.

Resultatet av portrycksförändringar i GeoStudio:Slope/W anger att det vid större djup för samtliga sektioner krävs artesiska porövertryck upp mot 20 m för att ett brott ska inträffa, vilket exempelvis redovisas i tabell 5.1 och 5.2. Trots att det är svårt att veta hur höga portrycken var före skredet kan det ändå konstateras att de beräknade porövertrycken är orimligt höga baserat på bedömningarna ovan. Att detta skulle vara en ensam bidragande orsak till omfattningen av det faktiska skredet är därmed osannolikt. Samtidigt menar Fagerström & Broms att när ett skred väl utlösts skapas förskjutningar i jordlagren vilka kan leda till så höga portryck att skjuvhållfastheten närmar sig noll. Ur denna aspekt kan de beräknade porövertryc-

ken å andra sidan anses vara rimliga.

Som tidigare konstaterats har de större glidyterna vid hydrostatiskt tryck för höga säkerhetsfaktorer för att ett brott ska inträffa utan inverkan av ytterligare faktorer. Däremot kan för sektion B-B ses i både GeoStudio:Slope/W och LimitState:Geo att en mindre kritisk glidyta beräknas till brott vid hydrostatiskt tryck, se figur 5.7 respektive 5.23. Enligt resultatet av litteraturstudien bedömde de flesta geotekniker att området vid Tuve Kyrkväg hade låg stabilitet före skredet. Endast en liten förändring, såsom ett ökat portryck, kan därmed ha bidragit till ett initialskred vid vägen. Vattenmängden som bland annat ansamlades där till följd av den över-svämmande kulverten kan då givit förutsättningar till detta. Eftersom det därmed är troligt att en mindre glidyta gav upphov till skredförloppet kan glidytan i B-B motsvara ett sådant initialskred. Dessutom skär sektion B-B det parti av Tuve Kyrkväg där skredförloppets initiala spricka uppstod enligt ögonvittnen, vilket styrker resonemanget.

Enligt flera av geoteknikerna kan en bidragande faktor till skredets faktiska utbredning vara att initialskredet möjliggjorde för ett bakåtgripande skred. Detta utlöste då ytterligare skred genom ett progressivt brott. Däremot visar resultatet i GeoStudio:Slope/W att ett progressivt brott inte resulterar i en så stor omfattning, vilket figur 5.15 redovisar. Återigen, likt förhöjda portryck, kan detta betyda att ett progressivt brott inte är en enskilt bidragande faktor till det faktiska skredets utbredning.

Att det progressiva brottet enligt simuleringen i GeoStudio:Slope/W inte gav den förväntade omfattningen som litteraturstudien antydde säger dock inget om hur det faktiskt var i verkligheten. I simuleringen togs exempelvis ingen hänsyn till de pådrivande krafter och den kinetiska energi som Löfquist och Lundström bland annat redogjorde för. Vidare bedömde många av geoteknikerna att kvickleran var en avgörande faktor till skredets stora utbredning. Med tanke på att en kvicklera som störs tappar all sin hållfasthet kan det tänkas vara mycket rimligt att ett progressivt brott där kvickleran omrörs resulterar i en stor omfattning. En sådan okontrollerbar process är i detta fall svår att efterlikna i simuleringar. Även om programmen hade klarat av att efterlikna effekterna av kvicklera skulle omfattningen ändå vara svår att avgöra på grund av det begränsade geotekniska underlaget från förundersökningarna i området.

Resultatet i GeoStudio:Slope/W visar att säkerhetsfaktorerna skiljer sig åt mellan de olika beräkningsmetoderna. Ett övergripande samband som urskiljs är att Janbus metod oftast ger lägst säkerhetsfaktor för både odränerat och dränerat fall, vilket exempelvis redovisas i tabell 5.3. Eftersom Janbus teori inte tar hänsyn till skjuvning mellan lamellerna beror säkerhetsfaktorn på glidytagens geometri. Dessutom tas ingen hänsyn till momentjämvikt vilket då innebär att teorin inte blir lika representativ för cirkulära glidytor där det sker en rotation mellan lamellerna. Däremot ses i tabell 5.11 att Janbus metod ger högst säkerhetsfaktor för dränerad analys för fallet då effektivspänningarna är noll. En förklaring till detta kan vara att teorin överskattar

säkerhetsfaktorn med upp till 5 % för vissa glidytor [10]. Enligt tabell 5.11 styrks detta då den procentuella skillnaden mellan säkerhetsfaktorerna för Morgenstern-Prices respektive Janbus metod är ca 5 %.

En generell jämförelse mellan simuleringarna i GeoStudio:Slope/W och Limitstate:Geo är att de sektionsvisa resultaten ger likvärdiga glidytor men skiljer sig åt när det gäller säkerhetsfaktorernas storlek. I LimitState:Geo erhålls mycket högre säkerhetsfaktorer jämfört med GeoStudio:Slope/W vilket exempelvis visas i tabell 5.3 och 5.20. Eftersom att det är två helt olika program där lamellmetoden respektive DLO används är det inte konstigt att resultaten skiljer sig åt. Vidare kan sägas att noggrannheten i beräkningarna beror på de inställningar som appliceras gällande antalet lameller som beaktas eller val av noddensitet: Ju fler lameller som glidytorna i GeoStudio:Slope/W delas upp i eller ju högre noddensiteten är i LimitState:Geo, desto noggrannare blir analyserna.

Som nämnts i kapitlet *Datorsimuleringar av Tuveskredet* antogs ett startvärde på kohesionen till 5 kPa för både torrskorpan och leran i odränerad såväl som dränerad analys. För att se vilken påverkan antagandet hade på resultatet genomfördes en känslighetsanalys där olika värden på kohesion analyserades. För samtliga sektioner blev resultatet att den odränerade analysen överlag inte påverkades nämnvärt av olika värden på kohesionen, vilket exempelvis redovisas i tabell 5.5. För sektion B-B i LimitState:Geo är dock variationen av resultaten större för odränerad analys, se tabell 5.24. Säkerhetsfaktorn som sticker ut erhålls då kohesionen är noll. En begränsning i LimitState:Geo är att kohesionen inte kan anges till noll utan sätts då automatiskt till 0,1 kPa. Detta i kombination med släntens geometri kan vara orsaken till den utstickande säkerhetsfaktorn för sektion B-B.

För sektion B-B erhålls likvärdiga säkerhetsfaktorer i dränerat fall då kohesionen är 0 kPa i torrskorpan trots att kohesionen i leran varierar. Detta gäller i både GeoStudio:Slope/W och LimitState:Geo och erhålls även för sektion C-C i LimitState:Geo. I dessa fall kan alltså säkerhetsfaktorerna anses vara oberoende av kohesionen i leran, vilket antagligen beror på att glidytorna i princip enbart går i torrskorpan, se exempelvis figur C.11 i Bilaga 3. Generellt blir dock skillnaden mellan säkerhetsfaktorerna i dränerat fall större när kohesionen varierar jämfört med i odränerat fall. Detta styrker att startvärdet på 5 kPa borde ha ändrats för dränerad analys för att erhålla ett mer rättvisande resultat. Startvärdet kan därför anses vara rimligt för en odränerad analys men borde ha ändrats för den dränerade analysen.

Vid en jämförelse av odränerad och dränerad analys kan flera skillnader i resultaten urskiljas. Exempelvis för sektion A-A ses i tabell 5.1 och 5.2 att det krävs högre porövertryck i det dränerade fallet för att erhålla en säkerhetsfaktor nära 1,0. Däremot för sektion B-B är det porövertryck som krävs så gott som likvärdigt för både odränerat och dränerat fall, vilket redovisas i tabell 5.7 och 5.8. Detta kan förklaras med skillnaderna mellan säkerhetsfaktorerna: I sektion A-A är skillnaden mellan den ursprungliga säkerhetsfaktorn vid hydrostatiskt tryck för odränerad respektive dränerad analys mycket högre jämfört med i sektion B-B. Att det då i sektion A-A

krävs ett mycket högre porövertryck för att reducera säkerhetsfaktorn till nära 1,0 i dränerat fall är inte orimligt.

Generellt för samtliga resultat för både GeoStudio:Slope/W och LimitState:Geo ses att säkerhetsfaktorerna i dränerat fall är högre jämfört med i odränerat fall. En anledning till detta kan vara att det uppskattade startvärdet för kohesionen i dränerat fall är för hög vilket styrks enligt känslighetsanalysen. Dessutom kan detta antagna värde anses vara mindre representativt för Tuve jämfört med den odränerade skjuvhållfastheten vilken erhöles från borrhål tagna i området.

Under arbetets gång har ytterligare tre felkällor identifierats. Den första gäller utritningen av grundvattennivån och släntens geometri i simuleringsprogrammen. På grund av att det i programmen är svårt att hantera en hög noggrannhet kan inritningarna ha varierat med upp till 0,5 m. Å andra sidan kan noggrannheten på ingångsdatan också diskuteras på grund av bristande underlag och osäkerheter kring dess framtagande. Troligen har skillnader gällande inritningen i programmen inte så stor påverkan på det slutgiltiga resultatet men bör ändå ses som en felkälla.

Den andra felkällan synliggörs exempelvis i figur 5.6 där den kritiska glidyten går ända ut i släntens vänstra sida. Felet upptäcktes direkt under simulering men åtgärdades inte vilket beskrivs i kapitlet *Datorsimuleringar av Tuveskredet*. Genom att åtgärda detta skulle fler glidytor ha beaktats vilket då skulle kunna innebära att en lägre säkerhetsfaktor erhålls. Även om en större del av slänten då beaktas behöver detta dock inte nödvändigtvis betyda att en mer kritisk glidyta återfinns.

Den sista felkällan är kopplad till den bristfälliga mängden geoteknisk data som finns från Tuveområdet. I arbetet har det antagits att det kan bildas ett porövertryck i friktionslagret. Även om de nordliga och sydliga delarna av skredområdet omges av berg i dagen finns det ingen data som styrker att friktionslagret nådde dagen någonstans i området eller om det bara fanns i vissa partier av området. Om friktionslagret aldrig når dagen kan inte vattnet nå ner dit vilket medför att porövertryck inte kan bildas i lika stor omfattning.

## 6.2 Etik och framtid

En naturkatastrof som Tuveskredet kan väcka en rad etiska frågor samt frågor om framtiden. Skredet är ett exempel på hur illa det kan gå om det inte tas hänsyn till geotekniska risker. En av anledningarna till att dessa risker bortses ifrån eller underskattas kan bero på ekonomiska aspekter: Att göra geotekniska undersökningar kräver resurser och kunskap vilket kostar pengar. Vidare kan kostnaderna bli ännu större om förstärkningsåtgärder behöver göras. Detta leder till att kostnader och säkerhet måste balanseras.

Intervjun med Göran Sällfors visade att då området började exploateras runt år 1960 tillhörde det Tuve Kommun. Tuve var en liten kommun med begränsade resurser och geoteknisk kunskap vilket resulterade i att tillräckliga geotekniska undersökningar

inte utfördes för området. Trots att ekonomin och kunskapen kan ha varit begränsad borde ändå större försiktighet ha vidtagits redan på 60-talet med tanke på att Göta Älv-området tidigare utsatts för stora skred, såsom skredet i Surte 1950 [34]. Med dagens kunskap och regelverk hade detta troligtvis aldrig kunnat ske. Paradoxalt nog kommer mycket av denna kunskap från lärdomar av Tuveskredet vilka kanske inte erhållits om skredet inte skett.

Baserat på intervjun och avsnitt 2.4 förväntas framtida skredrisker i känsliga områden att öka i takt med ökad exploatering och ett förändrat klimat. Mer intensiva regn kan bland annat bidra till förhöjda portryck och ökad erosion vilka i sin tur försämrar släntstabiliteten. Enligt Göran Sällfors är det dock erosionen och inte portrycken som är den mest kritiska aspekten gällande släntstabiliteten i framtiden. I arbetets analys av datorsimuleringarna konstateras att orimligt höga porövertryck skulle ha krävts som enskilt bidragande faktor till Tuveskredet. Eftersom Tuve kan anses vara representativt för andra känsliga områden, såsom i Göta Älvdalen, styrker arbetet därmed Sällfors bedömning. Portrycksförändringar anses kunna regleras med dagens kunskap och erfarenheter. Däremot kan erosionens framtida påverkan anses vara svårare att kontrollera vilket underbyggs av Sällfors förklaring att erosionen är en naturligt pågående process. Erosion kan därför förväntas vara en av de mest kritiska faktorerna till ökade skredrisker i framtiden.

Att bo och leva i närheten av vatten är idag eftertraktat och med tanke på ökad exploatering kan erosionen vid dessa områden bli problematisk eftersom människan kommer fortsätta att bygga där. Därför anses att en kontinuerlig bevakning av dessa områden är viktigt både före och efter exploatering, dels för att övervaka hur framtida förhållanden förändras och dels för att kunna garantera säkerheten för byggnader, infrastruktur samt människor. Det är en etisk och ekonomisk fråga som kan konstateras bli ännu viktigare i framtiden.

# 7

## Slutsats

Av arbetets resultat och analys kan det konstateras att säkerhetsfaktorerna för stora glidytor vid ett hydrostatiskt tryck är så höga att ett brott av denna omfattning kan uteslutas. För att nå ett brott enligt skredets faktiska utbredning krävs därför en inverkan av ytterligare faktorer. Förhöjda portryck bedöms inte var en ensamt bidragande orsak till omfattningen av skredet men kan ha medverkat som en pådrivande faktor när skredet väl har utlösts. Vidare konstateras att den mindre kritiska glidytan som enligt resultatet beräknas till brott vid hydrostatiskt tryck kan motsvara det initialscred vid Tuve Kyrkväg som har förutsatts initiera skredet. Det bedöms även att initialscredets progressiva brott, utan inverkan av kvicklera och de dynamiska krafter som skapades under skredförloppet, inte ensamt bidrog till skredets faktiska utbredning. Sammantaget kan ett troligt händelseförlopp därför ha varit att förhöjda portryck till följd av stora mängder nederbörd och en övervämmad kulvert medförde ett initialscred vid Tuve Kyrkväg där stabiliteten sedan tidigare var låg. Skredets faktiska utbredning kan vidare förklaras med att inverkan av kvicklera, dynamiska krafter och förhöjda portryck eskalerade det progressiva brott som därefter uppstod. Därmed dras slutsatsen att det var kombinationen av dessa faktorer som bidrog till Tuveskredet och dess omfattning.

# Litteraturförteckning

- [1] Jan Hartlen. *Tuvaskredet slutrapport*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 1984. URL: <https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r11a.pdf>.
- [2] Statens geotekniska institut. *Tuve*. 2018. URL: <https://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/ras-och-skred/fakta-om-svenska-skred-och-ras/tuve/>.
- [3] Gösta Berg m.fl. *Tuveskredet 1977-11-30. Inlägg om skredets orsaker*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 1981. URL: <https://swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r10.pdf>.
- [4] Statens geotekniska institut. *Tuveskredet Geologi*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 1981. URL: <https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r11b.pdf>.
- [5] Thorsten Blomquist och Gunnar Gustafson. *Tuveskredet Hydrogeologi*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 1981.
- [6] Rolf Larsson och Mats Jansson. *The Landslide at Tuve November 30 1977*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 1982. URL: <https://swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r10.pdf>.
- [7] Göran Sällfors. *Privat kommunikation*. April, 2020.
- [8] Sven Hansbo. *Foundation Engineering*. Amsterdam: Newnes, 1994.
- [9] Rolf Larsson. *Släntstabilitetsberäkningar i lera*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 1983. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1299925/FULLTEXT01.pdf>.
- [10] L.W. Abramson m.fl. *Slope Stability And Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002, s. 355–356.
- [11] Göran Sällfors. *Geoteknik*. 5. utg. Göteborg: Cremona Förlag, 2013.
- [12] Minna Karstunnen. *Privat kommunikation*. Nov, 2019.
- [13] *Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner-Del 1: Allmänna regler Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1: General rules*. Tekn. rapport. 2005. URL: [www.eurokoder.se](http://www.eurokoder.se), .
- [14] Implementeringskommission för Europastandarder inom geoteknik. *Tillämpningsdokument : EN 1997-1 kapitel 11 och 12, slänter och bankar*. Stockholm: Implementeringskommission för Europastandarder inom geoteknik (IEG), 2008. ISBN: 9789185647248.
- [15] Colin Smith och Matthew Gilbert. “Application of discontinuity layout optimization to plane plasticity problems”. I: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (2007). ISSN: 14712946. DOI: 10.1098/rspa.2006.1788.

- [16] Samuel Hawksbee, Colin Smith och Matthew Gilbert. "Application of discontinuity layout optimization to three-dimensional plasticity problems". I: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (2013). DOI: 10.1098/rspa.2013.0009.
- [17] J. Michael Duncan, Stephen G. Wright och Thomas L. Brandon. *Soil Strength and Slope Stability*. 2. utg. John Wiley & Sons, Incorporated, 2014, s. 19–30.
- [18] Göran Sällfors. *Privat kommunikation*. Mars, 2020.
- [19] Rolf Larsson. *Jords egenskaper*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 2008. URL: <https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>.
- [20] Rolf Larsson m. fl. *Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord*. Tekn. rapport. Linköping: Statens geotekniska institut, 2007. URL: <https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i3.pdf>.
- [21] Silvia Salas-Romero m. fl. "Subsurface characterization of a quick-clay vulnerable area using near-surface geophysics and hydrological modelling". I: *Solid Earth* (2019). ISSN: 18699529. DOI: 10.5194/se-10-1685-2019.
- [22] John J Clague och Douglas Stead. *Landslides - Types, Mechanisms and modeling*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, s. 83–94.
- [23] Sveriges geologiska undersökning. *Kvickleror*. URL: <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/skredkanslighet-i-olika-jordarter/kvickleror/>.
- [24] Kristian Schoning. *Saltvattenavsatta leror i Sverige med potential för att bilda kvicklera*. Tekn. rapport. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning, 2016. URL: <http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1608-rapport.pdf>.
- [25] Statens geotekniska institut. *Vagnhärad*. 2018. URL: <https://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/ras-och-skred/fakta-om-svenska-skred-och-ras/vagnharad/>.
- [26] Statens geotekniska institut. *Jordarter*. 2019. URL: <https://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/lera-och-kvicklera/>.
- [27] Statens geotekniska institut. *Varför inträffar skred?* 2019. URL: <https://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/ras-och-skred/varfor-intraffar-skred/>.
- [28] Sveriges geologiska undersökning. *Skred och ras*. URL: <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/>.
- [29] Hjärdis Löfroth m. fl. *Tillämpning och utvärdering av metoder för kartläggning av kvicklera*. Tekn. rapport. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2018. URL: <https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/uppdraagsrapporter/uppdraagsrapport-kartlaggning-av-kvicklera.pdf>.
- [30] Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. *Varför inträffar skred och ras?* 2019. URL: <https://www.msb.se/sv/annesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/naturolyckor-och-klimat/skred-ras-och-erosion/varfor-intraffar-skred-och-ras/>.
- [31] J.A. Knappett och R.F. Craig. *Craig's soil mechanics*. 8th. New York: Spoon Press, 2012.

- [32] “Tutorial 16 Tension Cracks”. 2018. URL: [https://www.rocscience.com/help/slide2/pdf\\_files/tutorials/Tutorial\\_16\\_Tension\\_Crack.pdf](https://www.rocscience.com/help/slide2/pdf_files/tutorials/Tutorial_16_Tension_Crack.pdf).
- [33] LimitState:Geo. *Privat kommunikation*. April, 2020.
- [34] Sveriges geologiska undersökning. *Stora skred i Sverige*. URL: <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/stora-skred-i-sverige/>.

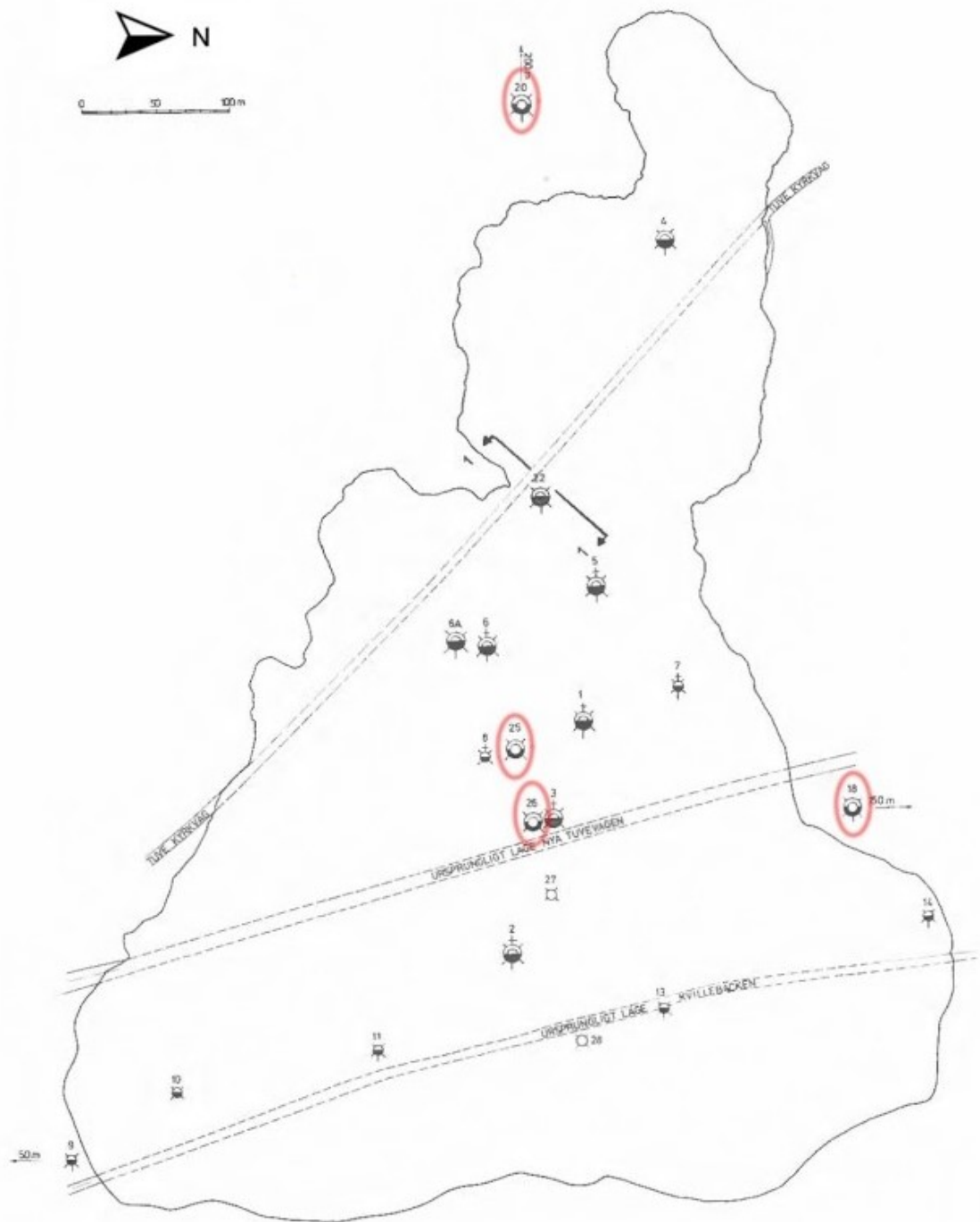


# A

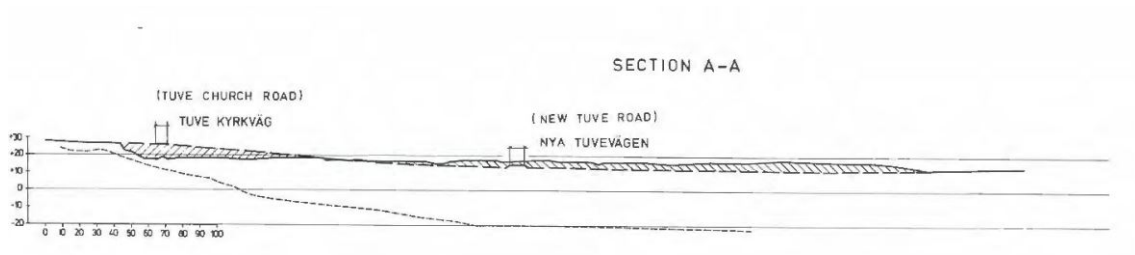
## Bilaga 1



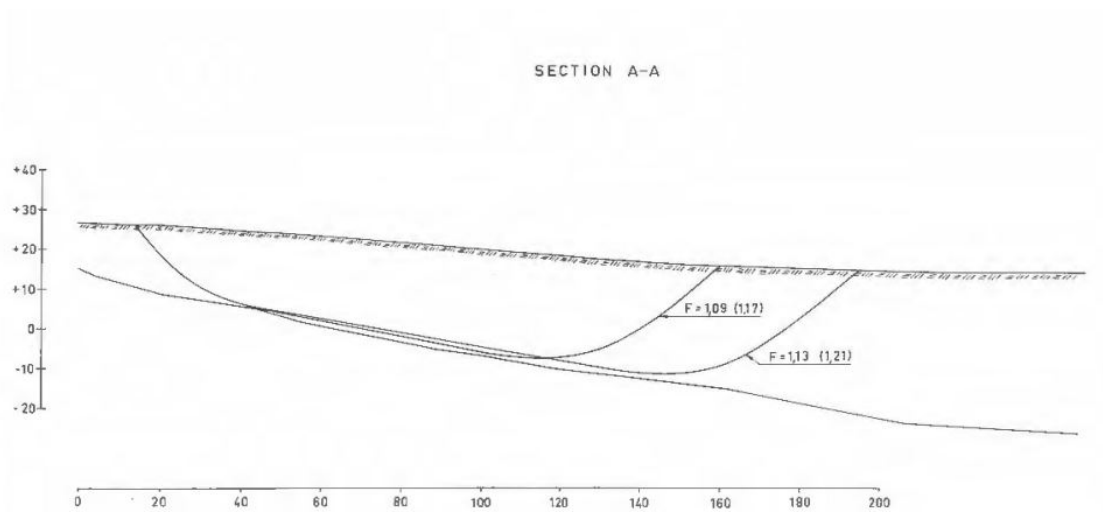
**Figur A.1:** Borrhålsplacering innan skredet inträffade. I arbetet beaktas de rödmarkerade borrhålen. Från [6]. Förtydligad och återgiven med tillstånd.



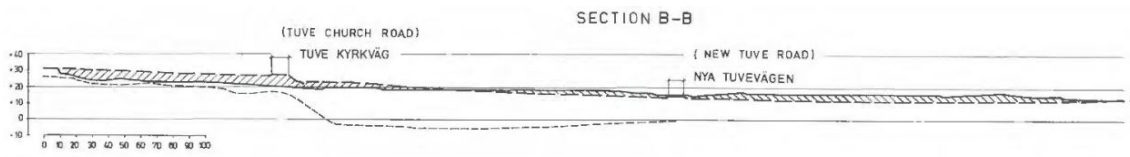
**Figur A.2:** Borrhålsplacering efter skredet inträffade. I arbetet beaktas de rödmarkerade borrhålen. Från [6]. Förtydligad och återgiven med tillstånd.



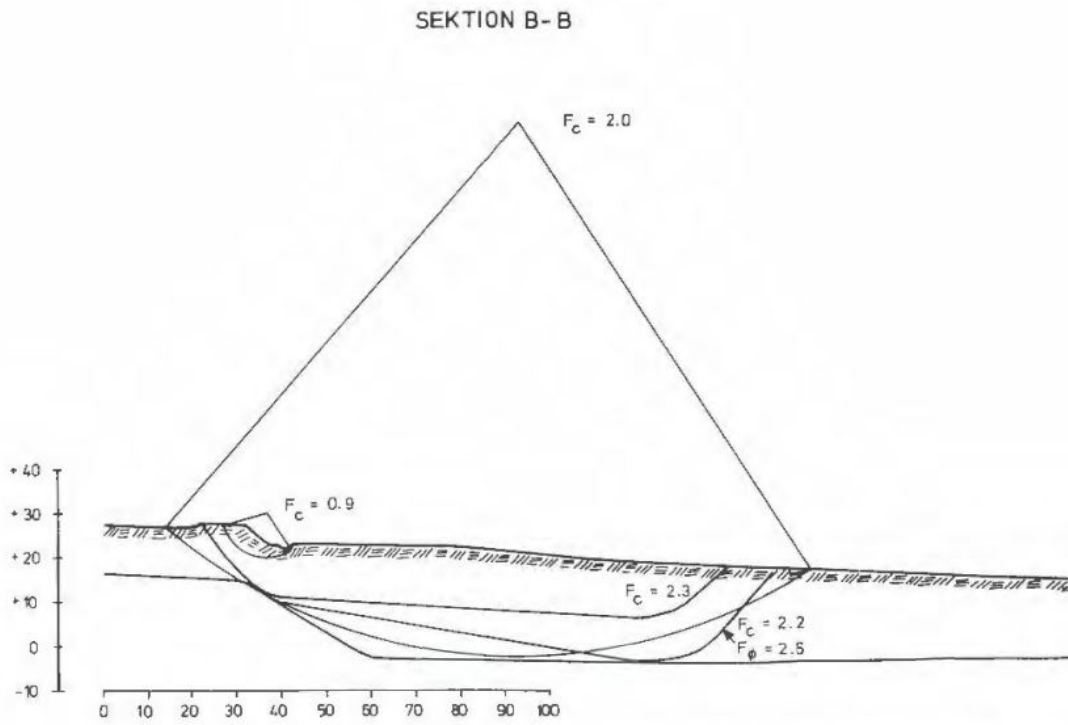
**Figur A.3:** Geometri för hela sektion A-A. Från [6]. Återgiven med tillstånd.



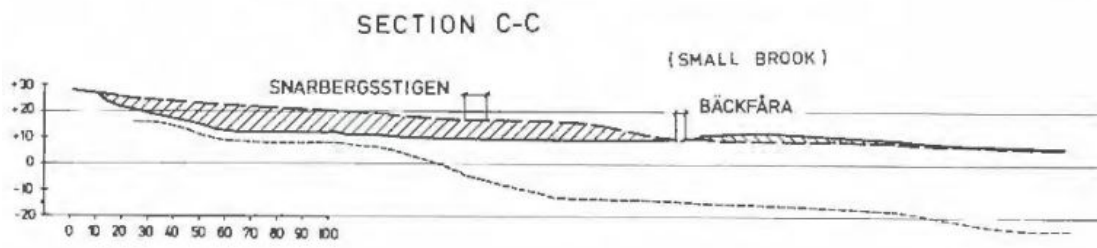
**Figur A.4:** Geometri för en mindre del av sektion A-A. Från [6]. Återgiven med tillstånd.



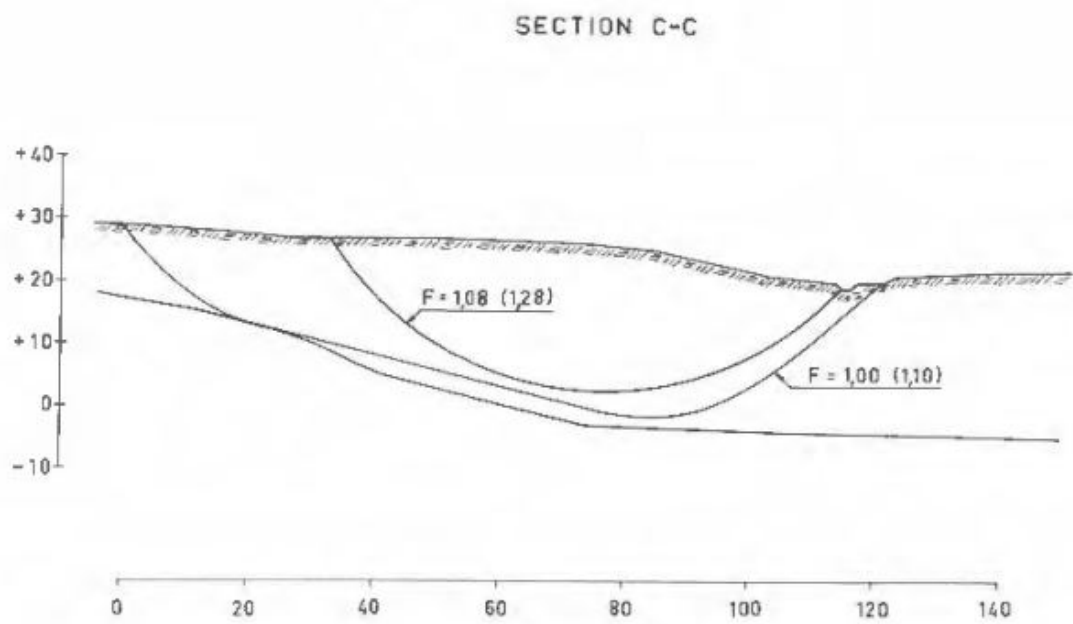
**Figur A.5:** Geometri för hela sektion B-B. Från [6]. Återgiven med tillstånd.



**Figur A.6:** Geometri för en mindre del av sektion B-B. Från [6]. Återgiven med tillstånd.



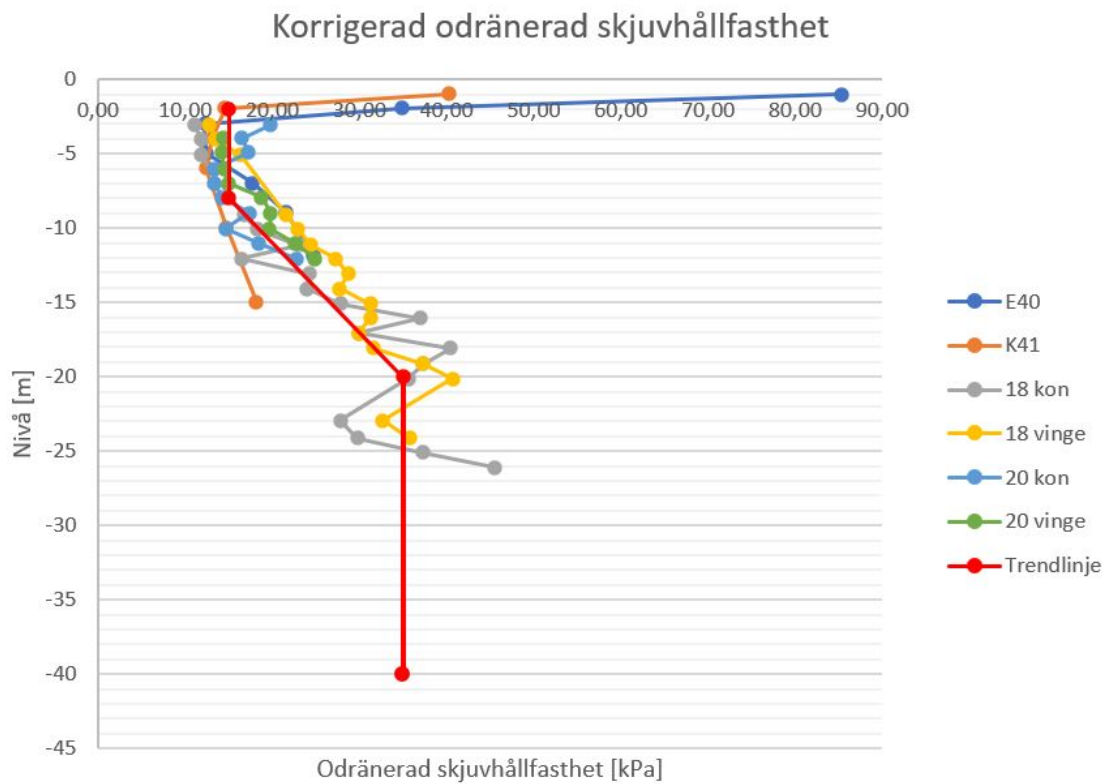
Figur A.7: Geometri för hela sektion C-C. Från [6]. Återgiven med tillstånd.



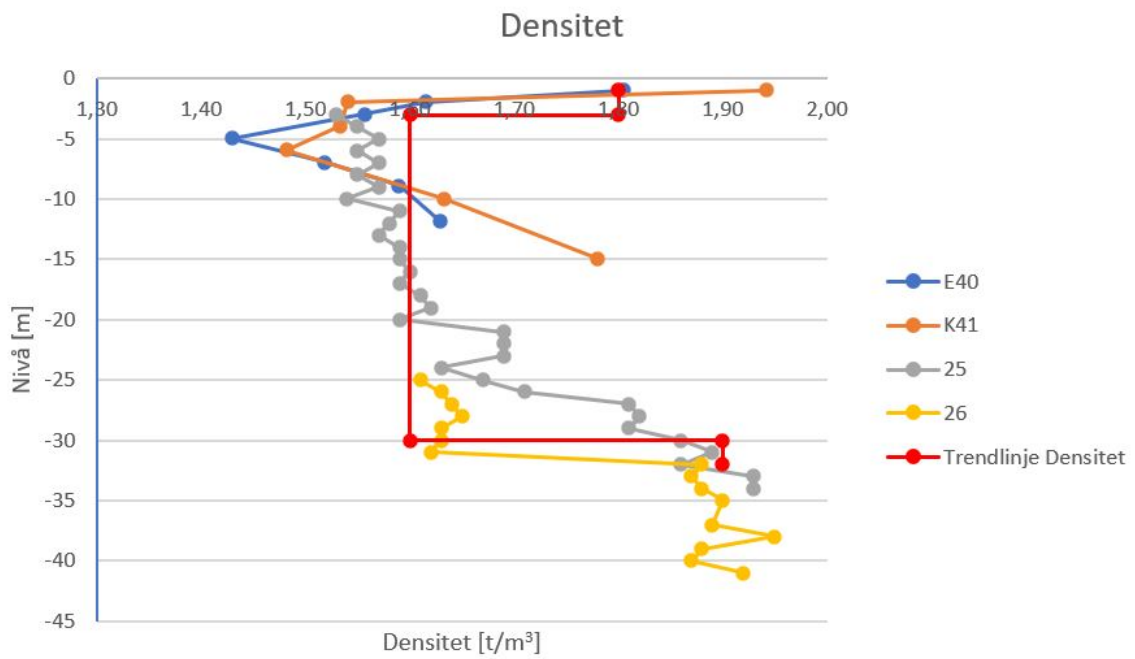
Figur A.8: Geometri för en mindre del av sektion C-C. Från [6]. Återgiven med tillstånd.

# B

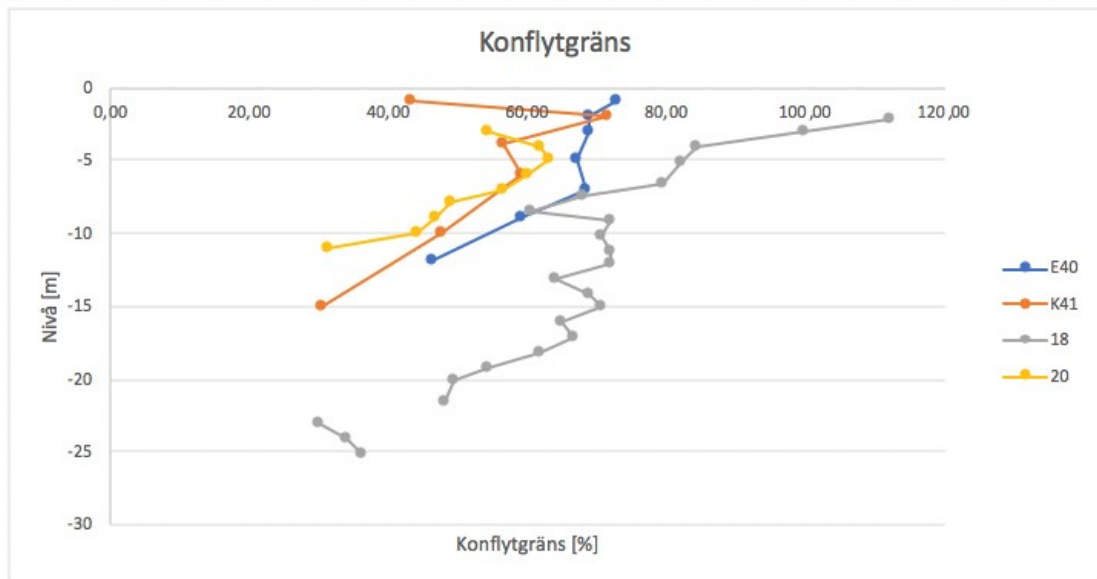
## Bilaga 2



Figur B.1: Sammanställning av odränerad skjuvhållfasthet.



Figur B.2: Sammanställning av densitet.



Figur B.3: Sammanställning av konflytgräns.

**Tabell B.1:** Ingångsvärden torrskorpa.

Tunghet, $\gamma$	18 [kN/m <sup>3</sup> ]
Kohesion, $c'$	5 [kPa]
Friktionsvinkel, $\varphi'$	30°

**Tabell B.2:** Ingångsvärden lera.

Tunghet, $\gamma$	16 [kN/m <sup>3</sup> ]
Odränerad skjuvhållfasthet, 2-7 m djup	15 [kPa]
Odränerad skjuvhållfasthet, 7-20 m djup	15+1,7×z[kPa]
Odränerad skjuvhållfasthet, 20-25 m djup	37 [kPa]
Kohesion, $c'$	5 [kPa]
Friktionsvinkel, $\varphi'$	30°

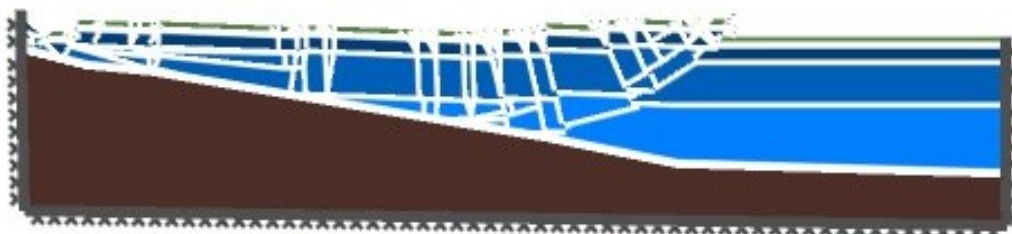
**Tabell B.3:** Ingångsvärden sand/silt/lerlager.

Tunghet, $\gamma$	19 [kN/m <sup>3</sup> ]
Kohesion, $c'$	0 [kPa]
Friktionsvinkel, $\varphi'$	30°

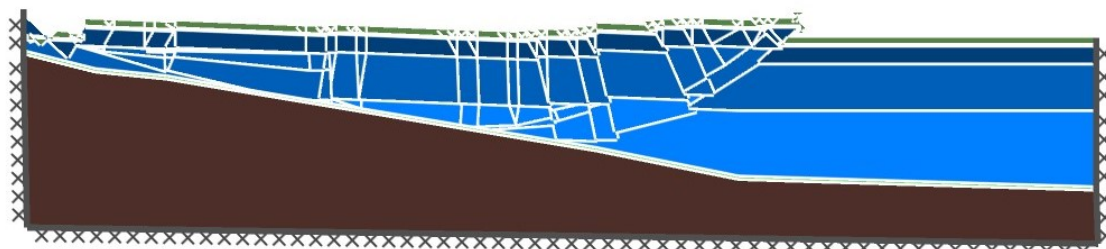
# C

## Bilaga 3

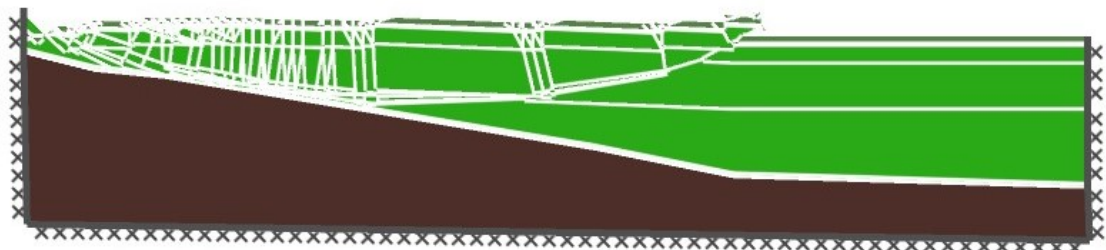
### C.1 Känslighetsanalys A-A LimitState:Geo



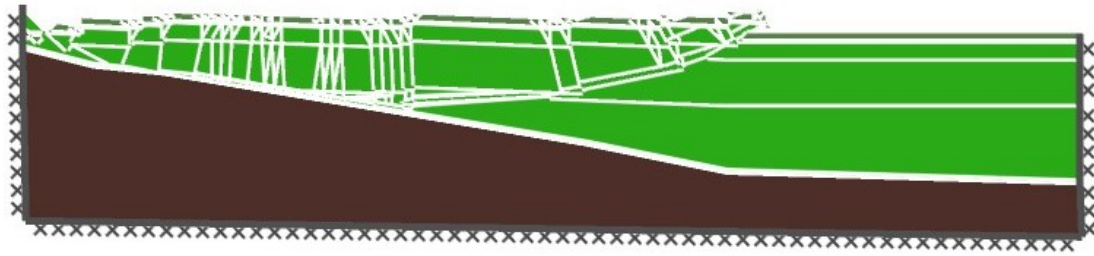
**Figur C.1:** Kritisk gildyta då  $c'=1,5$  i torrskorpan för odränerad analys. Utbredningen är ca 212 m i horisontalled.



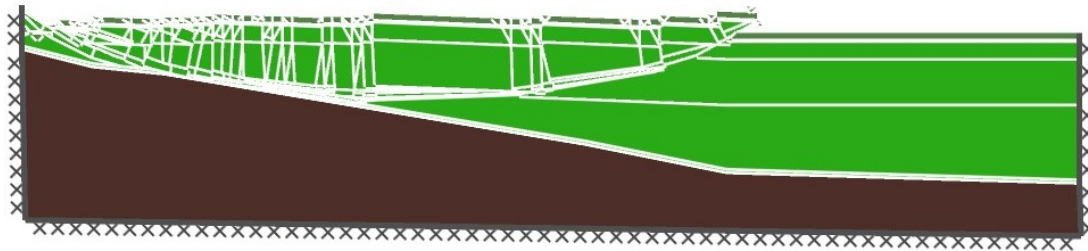
**Figur C.2:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan för odränerad analys. Utbredningen är ca 214 m i horisontalled.



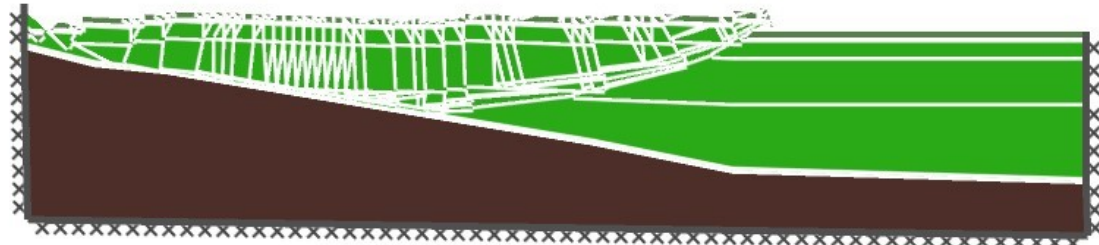
**Figur C.3:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan och leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 202 m i horisontalled.



**Figur C.4:** Kritisk gildyta då  $c'=1,5$  i torrskorpan och  $c'=2,6$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 205 m i horisontalled.

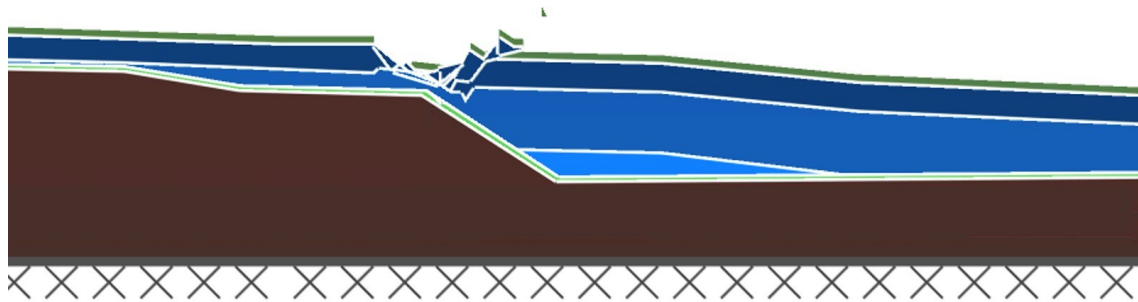


**Figur C.5:** Kritisk gildyta då  $c'=5$  i torrskorpan och  $c'=0$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 202 m i horisontalled.

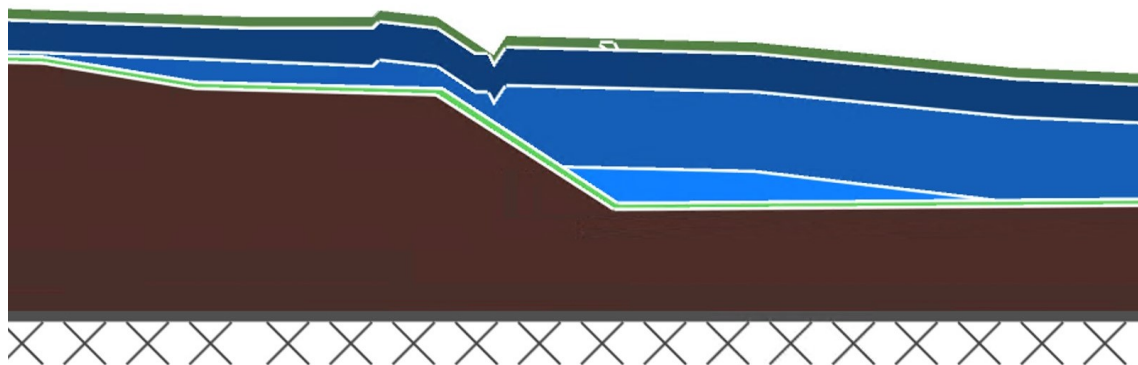


**Figur C.6:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan och  $c'=5$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 205 m i horisontalled.

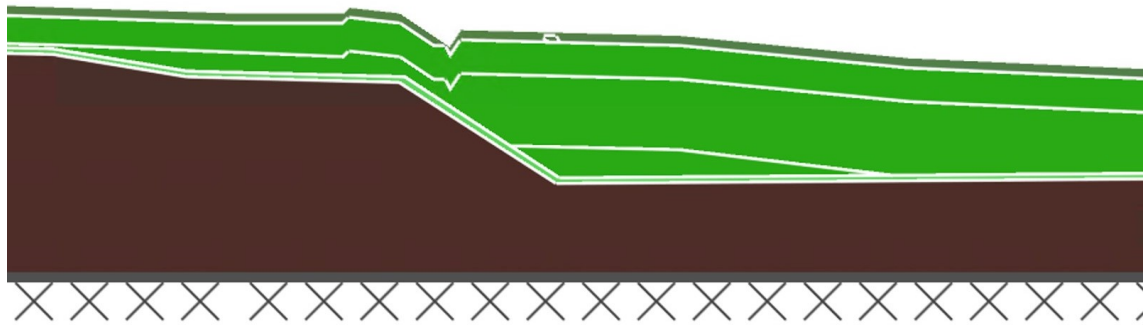
## C.2 Känslighetsanalys B-B LimitState:Geo



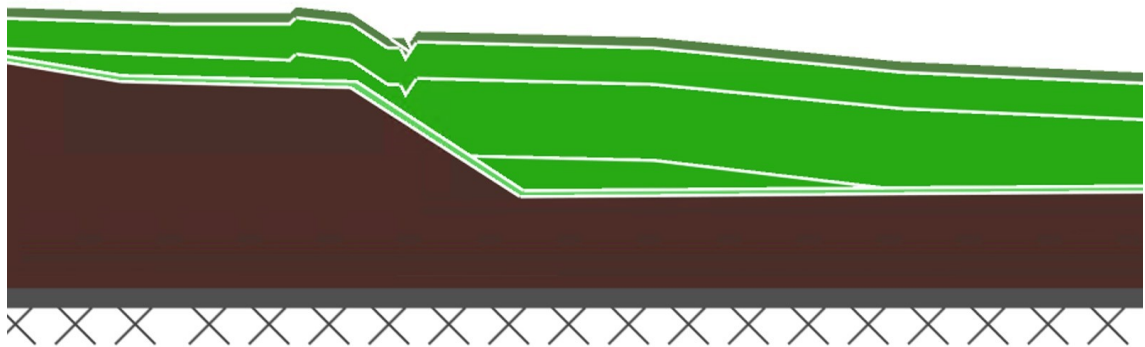
**Figur C.7:** Kritisk gildyta då  $c'=1,5$  i torrskorpan för odränerad analys. Utbredningen är ca 20 m i horisontalled.



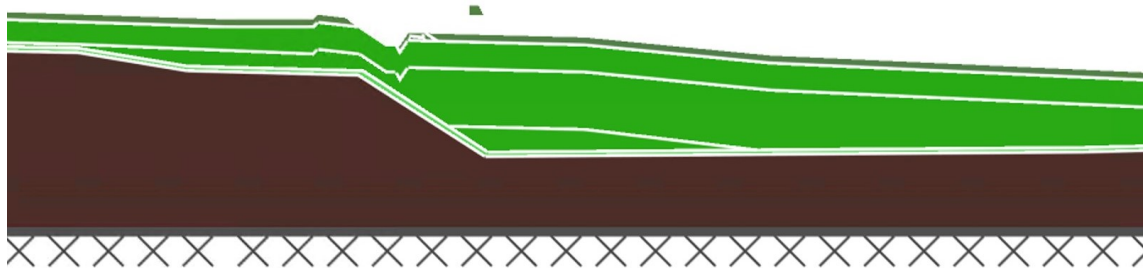
**Figur C.8:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan för odränerad analys. Utbredningen är ca 3 m i horisontalled.



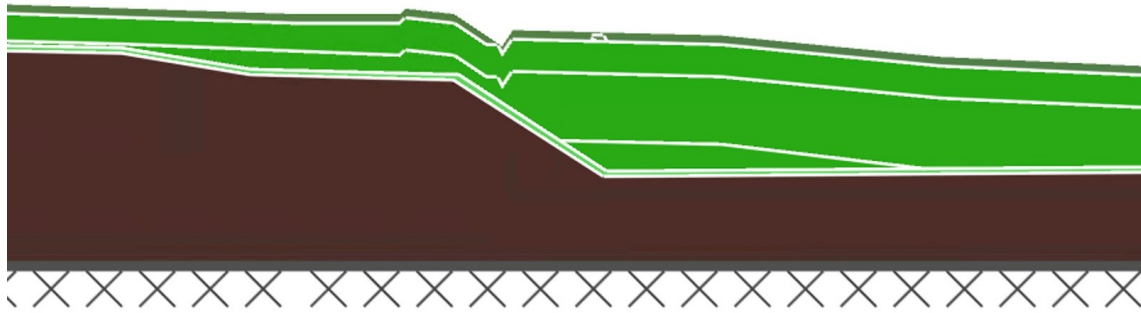
**Figur C.9:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan och leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 3 m i horisontalled.



**Figur C.10:** Kritisk gildyta då  $c'=1,5$  i torrskorpan och  $c'=2,6$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 3 m i horisontalled.

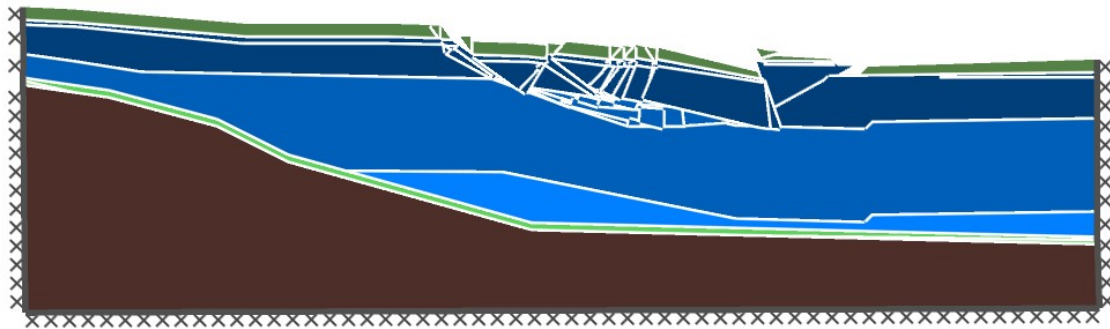


**Figur C.11:** Kritisk gildyta då  $c'=5$  i torrskorpan och  $c'=0$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 12 m i horisontalled.

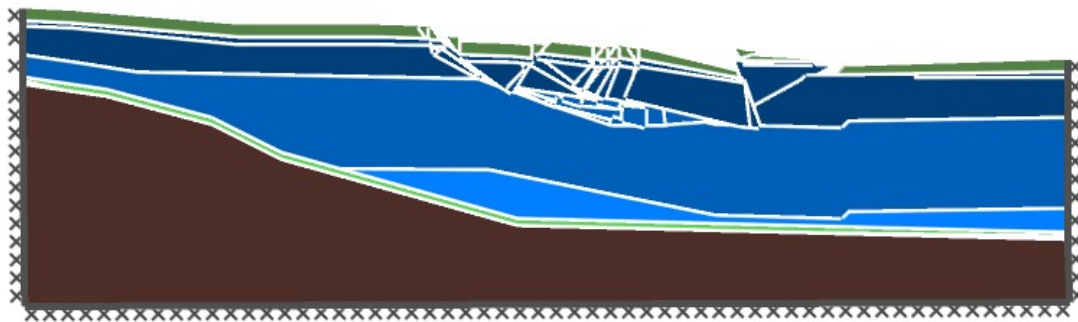


**Figur C.12:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan och  $c'=5$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 3 m i horisontalled.

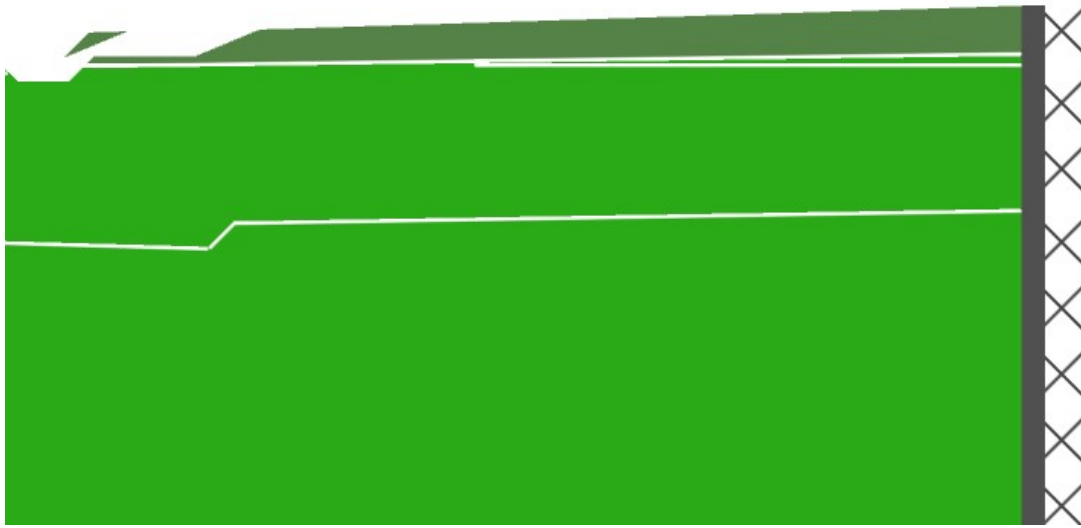
### C.3 Känslighetsanalys C-C LimitState:Geo



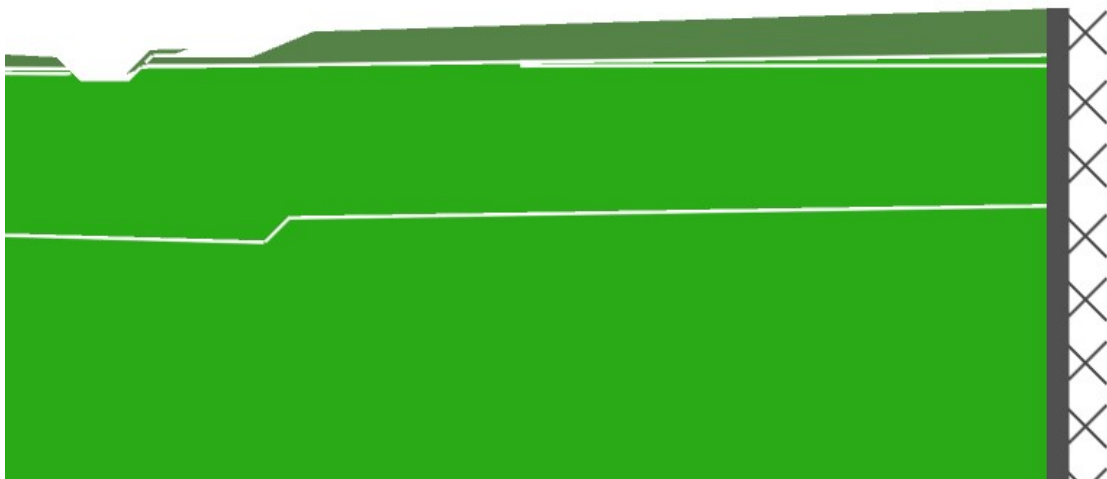
**Figur C.13:** Kritisk gildyta då  $c'=1,5$  i torrskorpan för odränerad analys. Utbredningen är ca 55 m i horisontalled.



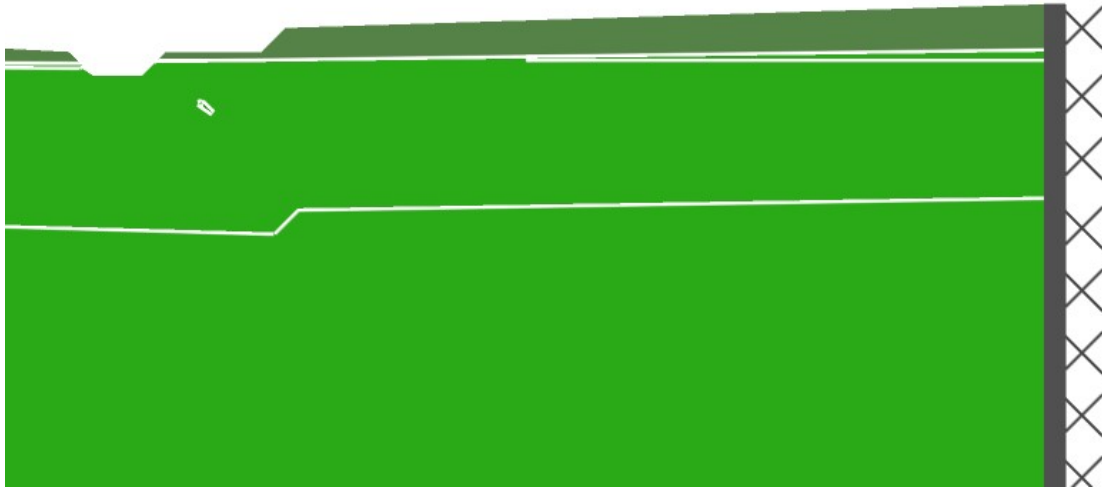
**Figur C.14:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan för odränerad analys. Utbredningen är ca 55 m i horisontalled.



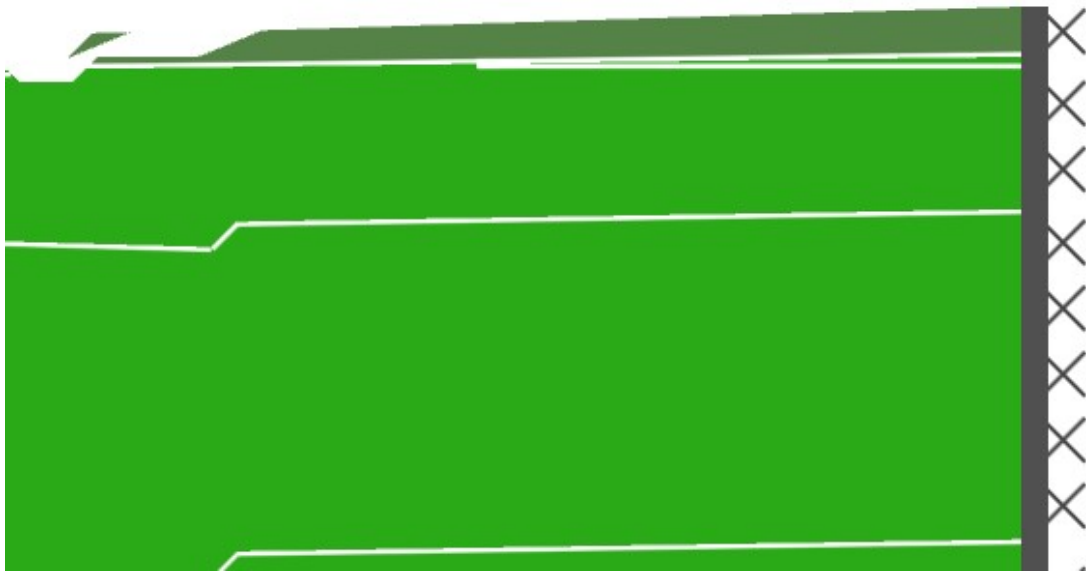
**Figur C.15:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan och leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 3 m i horisontalled.



**Figur C.16:** Kritisk gildyta då  $c'=1,5$  i torrskorpan och  $c'=2,6$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 3 m i horisontalled.



**Figur C.17:** Kritisk gildyta då  $c'=5$  i torrskorpan och  $c'=0$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 1 m i horisontalled.



**Figur C.18:** Kritisk gildyta då  $c'=0$  i torrskorpan och  $c'=5$  i leran för dränerad analys. Utbredningen är ca 3 m i horisontalled.