



CHALMERS



# Skredorsaker och tekniska lösningar - en tillämpning i Smådala, Göta älv

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

Nora Andersson  
Sofia Einarsson  
Malin Larsson  
Ellen Lindeby

**INSTITUTIONEN FÖR SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK OCH ARKITEKTUR**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2022  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



KANDIDATARBETE 2022

**Skredorsaker och tekniska lösningar  
- en tillämpning i Smådala, Göta älv**

NORA ANDERSSON  
SOFIA EINARSSON  
MALIN LARSSON  
ELLEN LINDEBY



**CHALMERS**

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

*Avdelningen för geologi och geoteknik*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

Skredorsaker och tekniska lösningar - en tillämpning i Smådala, Göta älv  
Causes of landslides and technical solutions - an application in Smådala, Göta Älv.

Nora Andersson  
Sofia Einarsson  
Malin Larsson  
Ellen Lindeby

© NORA ANDERSSON, 2022.  
© SOFIA EINARSSON, 2022.  
© MALIN LARSSON, 2022.  
© ELLEN LINDEBY, 2022.

Handledare: Mats Karlsson, Carolina Sellin  
Examinator: Minna Karstunen

Kandidatarbete 2022  
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för geologi och geoteknik  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg

Framsida: Bild från området Smådala, Lilla Edets kommun. Fotograf: Nora Andersson

Typeset in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Gothenburg, Sweden 2022

---

## Sammanfattning

Göta älv är känt både som vattendrag och transportled, men också som en plats där flera skred inträffat. Detta kandidatarbete undersöker övergripande vilka faktorer som utlöser skred samt om det finns metoder, så kallade tekniska lösningar, som ökar stabiliteten i en slänt. Göta älvs skredkänslighet undersöks teoretiskt och en slänt längs med älvstranden i Smådala, Lilla Edets kommun har valts för vidare analys. Analysen gick ut på att ta fram en representativ jordprofil för att kunna undersöka släntstabiliteten i en odränerad och en kombinerad analys. Utifrån rekommendationer från Implementeringsnämnden för Europastandarder (IEG) har krav satts upp som gett grunden för prövningar av utvalda tekniska lösningar.

Befintlig jordprofil samt jordprofiler tillsammans med olika tekniska lösningar undersöktes i datorprogrammet GeoStudio med verktyget Slope/W. Resultatet visade att uppsatt jordprofil i teorin påvisade så låg säkerhet att slänten redan borde ha utsätts för skred. Efter tillämpningar av de tekniska lösningarna blev det tydligt att en av de vanligaste metoderna, avschaktning, var den mest effektiva åtgärden i kombination med motfyllnad eller tryckbank. Då erosion ofta är en pådrivande faktor visade det sig vara fördelaktigt att förebygga erodering och det enklaste och mest hållbara lösningen var plantering av växter i slänten. Mer sällsynta tekniska lösningar som undersöktes i litteraturstudien visade sig vara svåra att modellera i programmet och gav en knapp förbättring av stabiliteten förutom i kombination med avschaktning.

Keywords: skredrisk, Göta älv, geoteknik, släntstabilitet, släntstabilisering, skredrisk

---

## Abstract

Göta Älv is a well known river as well as a transportation link. The river is also known for its multiple landslides that have occurred over the last hundred of years. This bachelor thesis generally investigates the factors that causes a landslide and if there are stabilizing methods, also known as retaining structures, that can prevent landslides. The high risk of slope failure along Göta Älv is investigated theoretically and a specific slope has been chosen along side the river bank in Smådala, Lilla Edet for further analysis. The purpose of the analysis was to produce a representative profile of the ground conditions that allowed further analysis of slope stability for undrained and combined conditions. Based on recommendations from the Swedish Implementation board for European standard (IEG) certain factors of safety has been chosen as the threshold for chosen solutions of slope stability with retaining structures.

The existing profile of the ground conditions as well as the profiles with retaining structures was analyzed in the software program GeoStudio: Slope/W. The original slope turned out to have a safety factor so low that it should have already failed. With the assessment of the retaining structures it became clear that the most common solution, excavation, was the most effective solution in combination with buttress fills. Erosion is one of the driving factors to failure and to prevent erosion, vegetation turned out to be the most simple and sustainable solution. More unusual solutions proved to be difficult to model and did not reach demanded factor of safety without the combination of excavation.

Keywords: landslide, slope failure, Göta älv, geotechnics, slope stability, slope stabilization, retaining structures.

---

## Akronymer

CPT	Cone penetration test
DSS	Direct shear stress
SF	Säkerhetsfaktor
SGI	Statens geotekniska institut
SGU	Sveriges geologiska undersökning
MSB	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap
IEG	Implementeringskommission för europastandarder inom geoteknik

## Nomenklatur

$c_u$	Odränerad skjuvhållfasthet
$c'$	Kohesionsintercept
$u$	Portryck
$w_L$	Konflytgräns
$\gamma$	Tunghet
$\mu$	Korrektionsfaktor
$\sigma'$	Effektivspänning
$\sigma_0$	Totalspänning
$\tau$	Skjuvspänning
$\tau_f$	Skjuvspänning
$\tau_{fu}$	Odränerad skjuvspänning
$\tau_{mob}$	Mobiliserade normalspänningar
$\varphi$	Friktionsvinkel

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1	Syfte . . . . .	1
1.2	Frågeställning . . . . .	1
1.3	Avgränsningar . . . . .	2
1.4	Projektprocess . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>3</b>
2.1	Skredorsaker . . . . .	3
2.1.1	Säkerhetsfaktor . . . . .	4
2.2	Dränerad och odränerad analys . . . . .	4
2.3	Lamellmetoden . . . . .	6
2.3.1	Beräkning av säkerhetsfaktorn med Morgenstern-Price . . . . .	8
2.4	Vad är en teknisk lösning? . . . . .	8
2.4.1	När finns behov? . . . . .	9
2.5	Skredrisken kring Göta älv . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Tekniska lösningars utformning</b>	<b>11</b>
3.1	Avschaktning och motfyllnad . . . . .	11
3.2	Porttryckssänkning . . . . .	12
3.3	Jordförstärkning . . . . .	13
3.3.1	Pålning . . . . .	13
3.3.2	Kalkcementpelare . . . . .	13
3.3.3	Spontning . . . . .	14
3.3.4	Jordspikning . . . . .	15
3.3.5	Mikropelare . . . . .	15
3.4	Geonät, geotextil samt membran . . . . .	16
3.5	Geoceller . . . . .	17
3.6	Plantering i slänter - en ingengörsbiologisk metod . . . . .	17
3.6.1	Växters inverkan på jordens hållfasthet . . . . .	17
3.6.2	Problem att beräkna exakt hållfasthet . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Metod</b>	<b>19</b>
4.1	Val av område och sektion . . . . .	19
4.2	Jordlagerföljd i sektion V18/535 . . . . .	19
4.3	Stabilitetskrav och styrande dokument . . . . .	20
4.4	Stabilitetsanalys . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Områdesbeskrivning</b>	<b>22</b>
5.1	Geologisk historia Göta älv . . . . .	22
5.2	Smådala, Lilla Edets kommun . . . . .	22
5.3	Sektion V18/535 . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>25</b>
6.1	Jordprofil . . . . .	25
6.2	Stabilitetsanalys av befintlig slänt . . . . .	25

---

6.3	Stabilitetsanalys med tekniska lösningar . . . . .	26
6.3.1	Avschaktning och motfyllnad . . . . .	26
6.3.2	Portryckssänkning . . . . .	27
6.3.3	Kalkcementpelare . . . . .	27
6.3.4	Vegetation . . . . .	28
6.4	Analys av resultatet . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>30</b>
7.1	Konsekvenser av tillämpning av tekniska lösningar . . . . .	31
7.1.1	Miljöpåverkan . . . . .	32
7.2	Oväntade iakttagelser . . . . .	32
7.3	Felkällor . . . . .	33
7.4	Förslag på fortsatta studier . . . . .	34
<b>8</b>	<b>Slutsats</b>	<b>36</b>
	<b>Referenser</b>	<b>37</b>

# 1 Introduktion

I Göta älvdalen har ett antal stora skred inträffat de senaste hundra åren som innebär att nästa 40 hektar längs strandkanten ärrats samt att nio personer mist sina liv. Området runt älven har visat sig vara så kritiskt att SGI på uppdrag av regeringen genomfört ett stort projekt i att kartera skredrisken kring älven. Vid skred riskerar även andra viktiga samhällsfunktioner ta skada. Exempelvis använder flertalet kommuner älven som råvatten till dricksvattenberedning och störningar kan innebära konsekvenser som lokal dricksvattenbrist. Om rasmassorna innehåller föroreningar från tidigare utsläpp finns det risk för att hälsofarliga ämnen når vattendraget som kan påverka såväl ekosystem som dricksvattenkvaliten.

Smådala i Lilla Edets kommun är ett område med mycket hög skredrisk där många borrhålstester genomförts tidigare. Området är representativt för älven till följd av den geologiska bildningshistorien. Sektionen som utvärderades valdes utifrån att den utöver den höga skredrisken hade kraftig lutning och mycket vegetation.

## 1.1 Syfte

Kandidatarbetet har syftat till att utvärdera olika tekniska lösningar för att öka släntstabiliteten i en vald sektion utifrån bestämda aspekter. Syftet har även varit att studera vilka faktorer som orsakar skred samt vilka parametrar som är mest relevanta. Vid undersökningarna av de tekniska lösningarna togs aspekterna säkerhetsfaktor samt inverkan på lokala förhållanden i beaktning. Resultatet avsåg att ge större förståelse för hur olika tekniska lösningar kunde förbättra säkerhetsfaktorn i branta slänter i området runt Göta älv.

## 1.2 Frågeställning

Som beskrivits tidigare var arbetets huvudsakliga syfte att utvärdera olika tekniska lösningar för att öka släntstabiliteten i en vald slänt utifrån bestämda aspekter. För att uppnå detta syfte baserades arbetet på ett antal frågeställningar listade nedan.

- Vad orsakar skred?
- Vilka stabilitetsåtgärder tillämpas i Sverige respektive internationellt?
- Vilken sektion valdes och varför?
- Hur ser jordprofil och släntstabilitet ut i vald sektion?
- Vad blir stabiliteten i vald sektion vid olika tekniska lösningar?
- Vilken eller vilka lösningar är mest lämpliga för att öka säkerhetsfaktorn i slänten och varför?

### 1.3 Avgränsningar

Göta älv sträcker sig långt, därav har en avgränsning varit att enbart undersöka ett begränsat område och en specifik sektion. Ytterligare två avgränsningar var att slänten skulle vara skredkänslig samt att data från platsen fanns att tillgå då kandidatarbetet ej omfattade egna provtagningar. Då det generellt finns begränsat med data för älvbotten valdes en närmre analys av den bort. Materialparametrarna och släntens utformning antogs vara konstanta efter datainsamlingen.

Arbetet avgränsades till att undersöka sex stycken tekniska lösningar i litteraturstudien där minst en skulle anses vara en vanlig metod i Sverige. Utifrån de tekniska lösningarna som litteraturstudien gav valdes de metoder som antogs vara genomförbara i datorprogrammet ut för analys. Hänsyn till arbetsförhållanden eller produktionens genomförbarhet på plats togs ej i beaktande. Då kvicklera och jordens anisotropi ansågs vara för komplexa frågor för arbetes tidsram valdes dessa bort som parametrar i analysen.

### 1.4 Projektprocess

Inledningsvis har en litteraturstudie genomförts kring släntstabilitet samt parametrarna som påverkar den och hur programvaran som skulle användas behandlar dessa. En ytterligare litteraturstudie påbörjades därefter kring vilka tekniska lösningar som tillämpas för att förbättra släntstabiliteten både för svensk praxis samt internationellt.

Befintlig data från en vald sektion har behandlats och en jordprofil har tagits fram. Vidare analyser utgick därefter från jordprofilen för att jämförbara resultat skulle kunna genereras. Analyser som genomfördes var säkerhetsfaktorn i slänten samt den kritiska glidyttans placering för befintliga förhållanden samt vid tillämpning av olika tekniska lösningar. Till sist jämfördes resultaten för att ge svar på vilken tillämpning som gav det mest effektiva resultatet i datorprogrammet.

## 2 Bakgrund

Skred beskrivs enligt Knappett och Craig (2019) som en form av stabilitetsbrott då en sammanhängande jordmassa bryts loss från marken och kommer i glidning. Därmed kallas brottytan för glidyta. Orsaken till brott kan vara naturlig eller orsakad av mänsklig aktivitet och kan ske både ovanför och under markytan. Vad som anses vara naturliga orsaker är ofta förknippade med erosion och porvattenströmning i jorden som resulterar i avlastning och förändrad geometri, respektive förändring av hållfastheten. Mänskligt orsakade stabilitetsminskningar innebär även förändrad geometri, förändringar i yttre laster samt förändrade grundvattenförhållanden.

### 2.1 Skredorsaker

Duncan m. fl. (2014) menar att rent principiellt inträffar skred när skjuvspänningen i jorden överskrider jordens faktiska skjuvhållfasthet. Med andra ord kan en tidigare säker slänt skreda fastän skjuvhållfastheten är oförändrad om skjuvspänningarna ökar tillräckligt. Den kan även skreda om skjuvhållfastheten minskar för mycket även om skjuvspänningarna är oförändrade. Även en kombination av minskad skjuvhållfasthet och ökade skjuvspänningar kan resultera i skred. Skredytan, det vill säga glidytan, uppkommer oftast i det svagaste jordskitet där hållfastheten är som lägst (Knappett & Craig, 2019).

Skjuvhållfastheten kan förändras på flera olika sätt. En av de främsta orsakerna till försämrade hållfasthet är en minskning av jordens effektivspänning till följd av ökat porvattentryck. Förhållandet mellan jordens effektivspänning och porvattentrycket kan beskrivas med hjälp av ekvation 1 där  $\sigma_0$  står för totalspänningarna,  $\sigma'$  för effektivspänningarna i kornskelettet och  $u$  för porvattentrycket.

$$\sigma_0 = \sigma' - u \quad (1)$$

Ökning av porvattentryck kan därmed ske till följd av att grundvattenytan höjs. Annan orsak till försämring av skjuvhållfastheten är sprickbildning på aktivsidan som förkortar glidytnas längd. Hållfastheten är enligt Knappett och Craig (2019) oftast den bestämmande faktorn i glidyternas formation. Cirkulära glidytor förknippas främst med homogena och isotropiska förhållanden i jorden, det vill säga med hållfastegenskaper som är konstanta för samtliga riktningar. Därmed finns även en förståelse att icke-homogena förhållanden med anisotropa egenskaper ger snitt som till viss del även är plana.

Ökning av skjuvspänningar innebär oftast någon form av pålastning på aktivsidan eller avlastning på passivsidan (Duncan m. fl., 2014). Pålastningar kan ske på olika sätt, exempelvis genom ny bebyggelse eller dumpning av fyllnadsmassor, och påverkan beror ofta på distansen till slänten. Avlastning kan ske genom utgrävning eller erosion som ger en sänkt släntfot och/eller en brantare slänt, dvs förändring i geometrin. Vattendrag vid släntfoten verkar mothållande, så när vattennivån minskar

ger det en avlastande effekt vilket även ökar skjuvspänningarna.

### 2.1.1 Säkerhetsfaktor

För att definiera huruvida en slänt är säker eller osäker mot skred och ras, brukar begreppet *säkerhetsfaktor* (eng. factor of safety, safety factor) användas. Principiellt står säkerhetsfaktorn, förkortning SF, för förhållandet mellan tillgänglig skjuvhållfasthet i jorden och jämviktsskjuvhållfastheten precis innan brott enligt ekvation 2 (Duncan m. fl., 2014). Den tillgängliga säkerhetsfaktorn  $SF$  kan enligt Knappett och Craig (2019) beräknas med Mohr-Coulombs brottkriterium där skjuvspänningar  $\tau_f$  beskrivs i förhållande till normalspänningar  $\tau_{mob}$  approximativt enligt ekvation 2.

$$SF = \tau_f / \tau_{mob} \quad (2)$$

Generellt kan säkerhetsfaktorn för en slänt som är helt under vatten, alternativt helt torr, bestämmas uteslutande av släntens lutning i förhållande till jordens friktionsvinkel (Sällfors, 2012). Om slänten är brantare än friktionsvinkeln kommer den med andra ord att utsättas för skred. Det finns däremot krafter som håller ihop slänten, bland annat kohesionkrafter mellan kornen. Kohesionkrafter som tas i beaktande är de under grundvattenytan även om det förekommer i icke vattenmättade jordlager (Statens geotekniska institut (SGI), 2022). I de icke-vattenmättade jordlagren förekommer både luftbubblor och vatten som ger en sammandragande kraft som kan benämnas falsk kohesion. Den falska kohesionen påträffas vanligtvis i silt- och sandjordar men tas ej i beaktning vid beräkning.

Enligt Sällfors (2012) är glidykans geometri oftast relativt jämförbar med en cirkelbåges geometri. Därav brukar ytan kallas cirkulärcylindrisk glidyta vilket innebär att jordmassan roterar kring en imaginär mittpunkt längs cirkelns kant. Därmed blir den imaginära mittpunktens position intressant. Den kritiska glidytan behöver sedan testats fram genom flera beräkningar där centrum förflyttas.

## 2.2 Dränerad och odränerad analys

Beroende på om en analys är odränerad eller dränerad tillämpas olika parametrar och beräkningsmetoder menar SGI (2007). Därav skiljer sig skjuvhållfastheten i de två fallen. Odränerat tillstånd är innan portrycksutjämnningen påbörjats och dränerat tillstånd är följaktligen när portrycksutjämnningen avstannat. Alltså sker båda analyserna för statiska förhållanden och fenomenet däremellan kallas konsolidering. Den odränerade analysen bygger på att det finns ett porövertryck till följd av pålastning som med tiden utjämnas och övergår till ett dränerat tillstånd (SGI, 2007). Enligt R. Larsson (2008) är den odränerade skjuvhållfastheten initialt dimensionerande efter en spänningsförändring. Först när portrycket jämnats ut blir den dränerade skjuvhållfastheten dimensionerande. Odränerad analys är således för korttidshållfasthet medan dränerad analys används för långtidshållfasthet under mer stationära förhållanden (R. Larsson, 2008).

Generellt är endast den dränerade skjuvhållfastheten av intresse när grovkorniga jordar analyseras. Vid analys av finkorniga jordar är det mer väsentligt att skilja på dränerad och odränerad skjuvhållfasthet (R. Larsson, 2008). Detta beror på att det i grovkorniga jordar inte hinner skapas ett porövertryck eftersom portryckets utjämnande sker i samma takt som spänningsförändringarna. I finkorniga leror uppstår det odränerade tillståndet först lång tid efter spänningsförändringen eftersom utjämnningen av portrycket tar längre tid (SGI, 2007).

Parametrar för det dränerade fallet är kohesionsintercepten  $c'$  och friktionsvinkeln  $\varphi'$ . Dränerad skjuvhållfasthet beskrivs av sambandet i ekvation 3 där  $\sigma'$  är den effektiva normalspänningen.

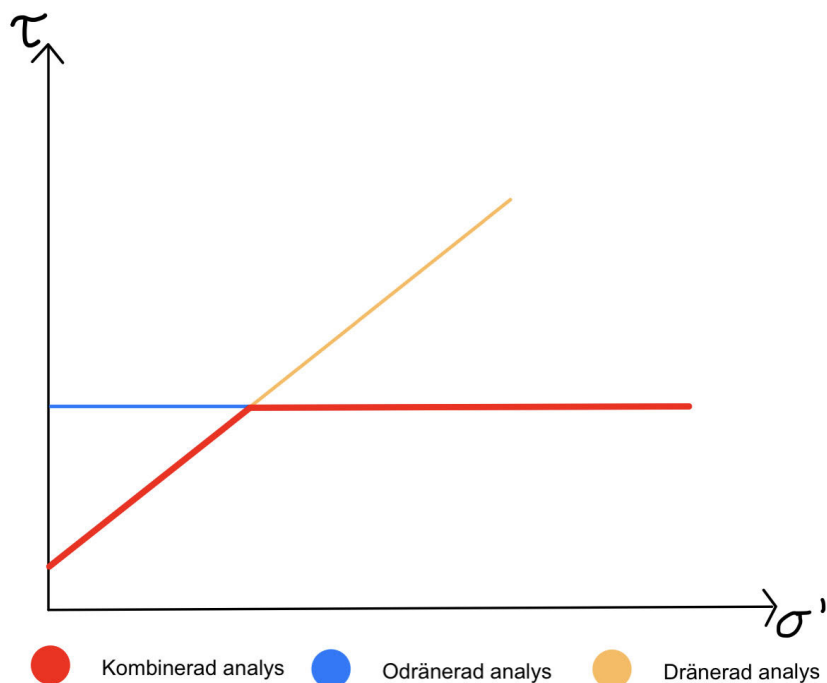
$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\varphi') \quad (3)$$

I Sverige uppskattas ofta  $\varphi'$  till  $30^\circ$ , men exakta värden kan tas fram genom triaxialtest. För det odränerade fallet saknas dessa parametrar eftersom stabiliteten är beroende av kohesionen i jorden. Därmed kan förhållandet i ekvation 3 förenklas till ekvation 4 där  $\tau_{fu}$  är befintliga hållfastheten och  $c_u$  är skjuvhållfastheten.

$$\tau_{fu} = c_u \quad (4)$$

Det finns även en analysmetod som kallas för kombinerad analys som består både av en odränerad och en dränerad analys (SGI, 2007). Den kombinerade metoden bygger på att den lägsta skjuvhållfastheten från dränerad och odränerad analys är dimensionerande, vid given effektiv normalspänningsnivå. Analysen baseras på att de båda fallen plottas in som separata funktioner i en gemensam graf och där den kombinerade analysen tas fram baserad på dessa. Den kombinerade analysen följer initialt den dränerade funktionen, eftersom den är dimensionerande vid låg effektivspänning, för att sedan följa den odränerade funktionen, detta kan ses i figur 1. Eftersom den kombinerade analysen tar båda fallen i beaktande kan denna ses som mer sanningsenlig och verklighetstrogen. Enligt ingenjörspraxis görs vanligtvis både en kombinerad och en odränerad analys av naturliga lerslänter då dräneringsförhållandena vanligtvis är varierande.

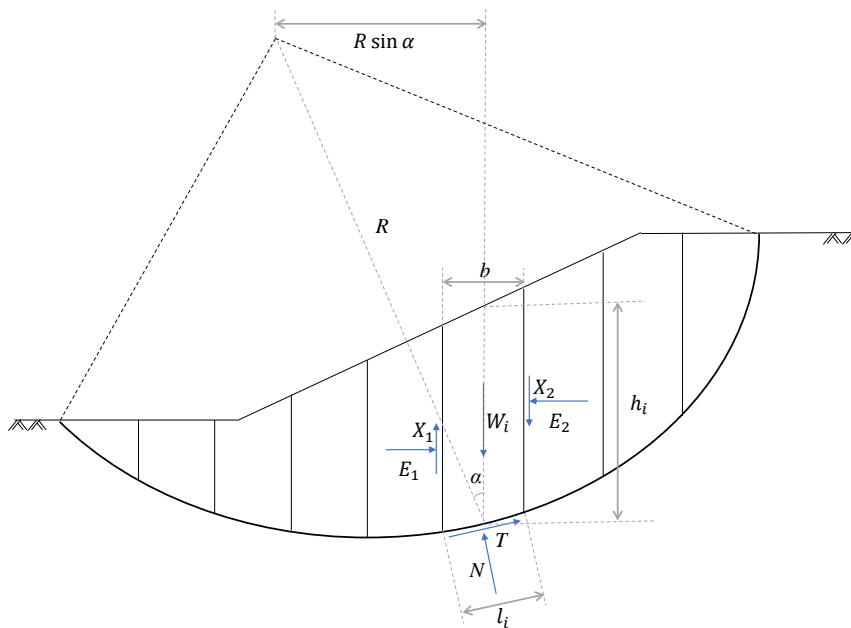
**Figur 1:** Illustration av hur skjuvhållfastheten i den kombinerade analysen förhåller sig till skjuvhållfastheten i den dränerade och odränerade analysen.



### 2.3 Lamellmetoden

Släntstabilitet kan beräknas med olika metoder både för hand och med hjälp av beräkningsprogram där lamellmetoden är en beräkningsmetod. Lamellmetoden (eng. method of slices) innebär att glidytan antas vara cirkulär cylindrisk med en centrumpunkt och en radie  $R$  enligt figur 2. Metoden bygger på att glidytan delas upp i ett ändligt antal vertikala lameller samt att glidytan är en sammanhängande kropp när slänten går till brott (Zhu m. fl., 2003). Inom lamellmetoden förekommer flera modeller så som Fellnius-, Bishops-, Janbus-, Spencer- och Morgerstern- Price-metod som baseras på antingen momentjämvikt, kraftjämvikt eller bådadatera. I modellerna görs olika antaganden för vilka krafter som verkar på varje lamell och när säkerhetsfaktorn beräknas görs det ur moment- och/eller kraftjämvikt. Figur 2 visar en slänt uppdelad i lameller med de normal- och skjuvkrafter som verkar på varje lamell med teckenförklaringar i tabell 1. Ju fler lameller slänten delas in i desto noggrannare blir det beräknade resultatet av säkerhetsfaktorn.

**Figur 2:** Lamellmetoden för en cirkulär cylindrisk glidyta som är indelad i 9 lameller samt de krafter som verkar på en lamell.



**Tabell 1:** Symbollista till figur 2

$\alpha$	Glidykans lutning mot horisontalplan
$b$	Lamellens bredd
$E$	Horisontella lamellkrafter
$h$	Lamellens höjd
$l_i$	Båglängd
$N$	Normalkraften som verkar på en lamell över längden $l_i$
$R$	Cirkelns radie
$T$	Tvärkraft vid basen av lamellen
$W$	Lamellens totala vikt
$X$	Vertikala lamellkrafter

Vid tillämpning av lamellmetoden i praktiska fall är det av stor vikt att använda en metod som tar hänsyn till både moment- och kraftjämvikt. Detta innebär både att de statiska ekvationerna uppfylls samtidigt som hänsyn tas till skjuvkrafter och normalkrafter på lamellerna. Exempel på metoder som tar hänsyn till både momentjämvikt och kraftjämvikt är Spencer och Morgenstein-Price som därmed uppfyller samtliga krav.

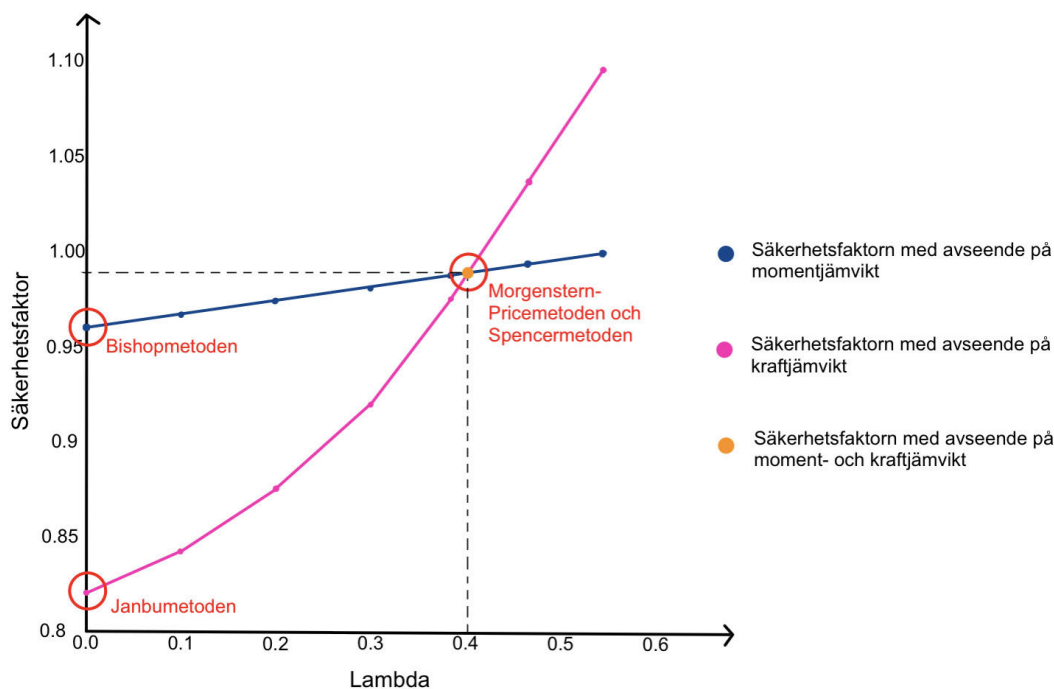
En programvara som baseras på lamellmetoden är GeoSLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd, u. å). GeoSLOPE/W har funnits sedan 1977 och med tiden utvecklats för att tillämpas på mer avancerade scenarion. Programvaran kan ta hänsyn till samtliga modeller och genererar olika säkerhetsfaktorer beroende på vilken modell som valts enligt kraftjämvikt och momentjämvikt.

### 2.3.1 Beräkning av säkerhetsfaktorn med Morgenstern-Price

Morgenstern-Price metoden uppfyller som tidigare nämnt både moment- och kraftjämvikt. Utöver det tar metoden dessutom hänsyn till skjuv- och normalkrafter som verkar på och mellan lamellerna för att ta fram säkerhetsfaktorn (GEO-SLOPE International Ltd, u. å). Det innebär att en skalningsfaktor,  $\lambda$ , tas fram för att momentjämvikten och kraftjämvikten ska vara lika. Denna skalningsfaktor relaterar till krafterna som verkar på varje lamell enligt ekvationen  $X = E \cdot \lambda \cdot f(x)$ . Där  $X$  är de vertikala skjuvkrafterna som verkar på lamellen,  $E$  är horisontella lamellkrafter och funktionen  $f(x)$  är vald till en halv sinusfunktion, där  $x$  motsvarar vilken lamell som beaktas. Således motsvarar  $\lambda$  hur stor del av funktionen  $f(x)$  som används.

Figur 3 illustrerar hur säkerhetsfaktorn plottas med hänsyn till momentjämvikt tillsammans med säkerhetsfaktorn med hänsyn till kraftjämvikt samt lambda. Släntens säkerhetsfaktor motsvarar punkten då de två linjerna möts och  $\lambda$  läses av från x-axeln. Bishops- och Janbus metod tar till skillnad från Morgenstern-Price metoden inte hänsyn till de skjuvkrafter som verkar på varje lamell, vilket resulterar i att  $\lambda$  alltid blir noll.

**Figur 3:** Säkerhetsfaktorn vid olika  $\lambda$  samt olika metoder. Bildinpiration från Krahn (2003)



## 2.4 Vad är en teknisk lösning?

I områden där det finns risk för skred, ras och erosion kan förebyggande åtgärder behöva byggas menar Räddningsverket (2008). Dessa åtgärder kallas för tekniska

lösningar och kan vara utformade på flera olika sätt samt vara avsedda att uppfylla olika ändamål. I huvudsak är en teknisk lösning en förstärkning i jordlagret som kan vara i form av ett visst material, en stödkonstruktion eller omfördelning av laster. En teknisk lösning kan vara temporär, det vill säga endast menad att verka under en kortare bestämd tid, exempelvis under en byggnation. Detta för att klara av temporära laster från arbetsfordon och maskiner. En teknisk lösning kan även vara ämnad att hålla på lång sikt, uppemot 100 år, samt variera i funktion och säkerhetsgrad beroende på vilken verksamhet som förväntas äga rum på platsen och konsekvenser den kan medföra.

#### 2.4.1 När finns behov?

En förstärkning kan behöva byggas av olika anledningar. SGI's kartläggning (SGI, 2019) redogör för om platsen anses vara i hög eller låg risk för skred, vilket ligger till grund för när förstärkningsåtgärder bör undersökas. Förstärkningar kan behövas för att bibehålla naturliga förhållanden, det vill säga även när ingen ytterligare byggnation eller verksamhet planeras på platsen. Men även om det finns ett syfte att behålla platsen som den är av andra skäl.

Miljö och säkerhet är två vanliga anledningar till att bevara en plats som den är (Räddningsverket, 2008). Ett skred vid ett vattendrag kan orsaka föroreningar i vattnet, vilket i sin tur kan rubba ekosystem i området samt förorena eventuellt dricksvatten. Ras och skred kan även skapa svåra förhinder för djurliv. Säkerhet behövs ta i beaktande när det finns risk för skred och ras intill platser där människor och djurliv rör sig, exempelvis slänter intill bilvägar, promenadstråk och bostadsområden. När nya anläggningar planläggs krävs det att ytterligare förstärkningar undersöks. Det är inte ovanligt att vägar anläggs intill slänter. Då krävs förstärkningsåtgärder för att motverka skred som kan uppkomma på grund av lastökningen. Brofundament anläggs nästan alltid i slänter där tekniska lösningar är oerhört viktiga för att förhindra skred då konsekvenserna kan bli förödande.

## 2.5 Skredrisken kring Göta älv

Göta älvdalens skredkänslighet är ingen nyhet. Genom åren har flera skred inträffat och i takt med ökad exploatering och erosion ökar även skredfrekvensen. Under de senaste 100 åren har fyra personer omkommit och 37 hektar ärrats längs Göta älv (Sveriges geologiska undersökning, u. å). Två av skreden som inträffat inom de senaste 100 åren är Surteraset i Ale kommun år 1950, samt Götaraset i Lilla Edets kommun år 1957. I Surteraset innefattade skredet ett område på cirka 600 meter i längd och 400 meter i bredd vilket resulterade i att minst 30 bostäder förstördes och en person omkom inom loppet av några minuter (Statens geotekniska institut, 2020). Även i Götaraset var skredet omfattande och ledde till dödsfall (Statens geotekniska institut, 2020). Det utbreddes sig längst en sträcka på 1,5 km samt en bredd på 250 meter. Rasmassorna orsakade enligt vittnen en flodvåg på minst fem meter. Till följd av Göta älvs historik med skred samt klimatförändringarnas påverkan på stabiliteten fick SGI, år 2008, i uppdrag av regeringen att genomföra en kartering

av skredrisken längs hela älven.

Vid ett eventuellt ras i Göta älv kan flera viktiga samhällsfunktioner kopplade till älven påverkas. Till exempel avvattnar älven en tiondel av Sveriges yta samt försörjer flera kommuner med råvatten till dricksvattenberedning (SGI, 2012b). Vid ett ras eller skred riskerar därmed jordmassorna att fördämma vattendrag. Det kan resultera i förhöjda vattennivåer uppströms, blockerad framkomst, risk för flodvåd och därmed nedströms översvämning (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), 2013). Det kan i sin tur leda till att vattenmassorna som krävs för att täcka dricksvattenberedningen stryps.

Jordmassor som faller ner i älven skulle kunna innebära att miljö- och hälsofarliga ämnen som lagrats i jordmassorna släpps ut i vattnet. Det kan resultera i stora konsekvenser både för djur- och växtlivet i området, men också i havet. När föroreningarna når dricksvattenintaget får det ytterligare konsekvenser för oss människor. Förutom infrastruktur kring älven finns även flera ekologiskt känsliga områden och ett stort biologiskt mångfald i strandängarna som kan påverkas av ämnena. Älven är dessutom ett mycket viktigt vandringsstråk för lax och havsöring. Flera områden längs älven har höga naturvärden och är viktiga för rekreation.

Utöver att vara en viktig del i dricksvattenförsörjningen är älven även en viktig transportled (SGI, 2012b). Varje år transporteras ca 2,4 miljoner ton gods på älven. I omgivningen kring älven finns även E6, E45 och järnväg som också är viktiga transportleder. Skred i området kan till följd av detta ha stor inverkan på flera transportsystem och viktig infrastruktur.

Skredrisken beror på främst på den geologiska uppbyggnaden bestående av mäktiga och lösa lerlager som är avsatta i en marin miljö (SGI, 2012b). Skredrisken beror även på varierande flöde i älven som kan orsaka kraftig erosion samt påverkan från samhällets utbyggnad och verksamheter. Skreden kan ske både över och under vattenytan och förekommer främst i leriga och siltiga jordar. De sker ofta plötsligt utan tydliga tecken på problem, men ibland kan markrörelser och marksprickor identifieras. Dessa kan ses som indikationer på framtida skred.

## 3 Tekniska lösningars utformning

För att öka släntstabiliteten och därmed säkerhetsfaktorn kan olika tekniska lösningar tillämpas. Olika stabiliserande åtgärder fungerar olika väl beroende på bland annat jordförhållanden, släntlutning samt om det är en naturlig slänt eller en anlagd vägbank. Vanligast i naturliga slänter i Sverige är avschaktning med eventuellt tillhörande motfyllnad samt porttryckssänkning. Andra metoder som förekommer i Sverige, men kanske främst internationellt är bland annat jordförstärkning, geonät och geotextil och andra ingenjörsmetoder.

### 3.1 Avschaktning och motfyllnad

Avschaktning och motfyllnad är två säkerhetsåtgärder som båda tillämpas för att reducera de pådrivande lasterna i en slänt samt påverka släntgeometrin (Skredkommissionen, 1996). Avschaktning, som innebär utgrävning av jordmassor, sker i släntens övre del för att eliminera jordlasten som tynger slänten. Motfyllnad placeras i släntens nedre del med avsikt att fungera som stöd med mothållande effekt emot de övre jordmassorna. De två åtgärderna kan samverka men även användas effektivt enskilt.

Avschaktning är en ytterst effektiv åtgärd ekonomiskt, men har vissa begränsningar på tillämpningsområden (Räddningsverket, 2008). Vid Råbäcken i Bodens kommun uteslöts avschaktning som alternativ vid en kritisk slänt eftersom befintlig bebyggelse på släntkrönet förhindrade schaktningsmöjligheterna. I en rapport från Skredkommissionen (1996) beskrivs avschaktning som mest lämplig i slänter med måttlig lutning där de kritiska glidytorerna är djupgående och det är stort avstånd till berg. I slänter med kraftigare lutning är glidytorerna oftast ytligare och avschaktning får mindre effekt. Men slänter med kraftigare lutning menas branta slänter där stabilitetsrisken främst beror på ras till skillnad från skredrisk.

Det är inte ovanligt att motfyllnaden består av den avschaktade volymen från släntens krön (Skredkommissionen, 1996). Däremot kan det konceptet vara problematiskt vid slänter som ansluter till vattendrag då lösa jordar lätt eroderas bort. Vid vattendrag är det istället lämpligt att använda en motfyllnad av grövre jordmassor som kan verka som erosionskydd samt bibehålla den mothållande effekten. Grövre jordmassor som används effektivt vid vattendrag är bergkross. Bergkross används oftast som erosionskydd men kan också tillämpas i större volymer som motfyllnad. Tunga motfyllnader kallas ofta för tryckbanker.

Enligt IEG (2010), Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik, är erosionskydd väsentligt att prioritera vid naturliga slänter. Prioriteringen är viktig då erosion ofta är den huvudsakliga faktorn till släntens geologiska uppkomst samt förändring i utseende över tid. Om erosionen fortskrider blir det därmed även svårt att säkerställa en stabil säkerhetsfaktor över tid. Med anledning av detta anser även IEG (2010) att avstanna erosionen bör vara den första åtgärden som

vidtas för att ge övriga åtgärder en bra grund.

Bergkross kan användas som erosionsskydd och som motfyllnadsmaterial i en tryckbank menar (Erlandsson, 2010). Att ha ett erosionsskydd i en älv har till viss del en bra effekt på miljön då den har för avsikt att bibehålla naturliga förhållanden. Däremot kan krossingen av berg, dvs utvinningen av makadamet vara kostsamt för miljön, ur energisynpunkt. Utvinning av den bergkrossen, som rent storleksmässigt ofta används som erosionsskydd vid vattendrag och då även vid Göta älv, uppskattas generera en energianvändning på 4 kWh/ton.

## 3.2 Porttryckssänkning

I slänter där det finns vattenförande skikt har porttrycket stor inverkan på släntens stabilitet (Skredkommissionen, 1996). Det kan i bland vara avgörande för huruvida det sker ett skred eller inte beroende på om porttrycket överskrider en viss nivå. Grundvattenhöjningar och porttryckshöjningar till följd av kraftiga regnfall eller ökad vattennivå i intilliggande vattendrag är vanliga skredorsaker i slänter. Detta beror på att det sker förändringar i förhållandet mellan porttrycket och effektivspänningarna i totalspänningsanalysen som innebär att effektivspänningarna minskar. Alltså friktionen och/eller kohesionen partiklarna emellan. Av denna anledning är dränering som ger porttryckssänkningar i skredkänsliga områden ofta mycket effektivt.

Enligt Skredkommissionen (1996) är det vanligt att porttryckssänkande åtgärder vidtas för att undvika att porttrycket överstiger en viss nivå. Fördelar med att bibehålla normalnivån utan att sänka porttrycket är att sättningsproblematiken nästintill utesluts och ej behöver utredas. Däremot förekommer det att åtgärder vidtas även för att sänka den normala porttrycksnivån. I de fallen blir det därmed aktuellt att även utreda sättningsfrågan som kan ge andra konsekvenser.

För att uppnå ett önskvärt porttryck eller en sänkning av porttryck kan exempelvis ytlig dränering implementeras menar Holtz och Schuster (1996). Detta syftar till att avleda ytligt vattenflöde på grund av nederbörd samt att minimera infiltration i marken. Detta kan åstadkommas med hjälp av diken och växtlighet samt planerade avrinningsvägar vid utgrävda slänter. Vid utgrävningar kan det därmed vara relevant att planera och åtgärda avrinningsvägar. Duncan m. fl. (2014) menar även att ett alternativ är att täcka marken med plast. Alternativet har däremot stora nackdelar i att slänten blir svårobserverad för förändringar.

En av de vanligaste porttryckssänkande metoderna utgår från principen om att självtrycket ska ge kontroll över porttrycket (Skredkommissionen, 1996). Detta kan ske genom installerade öppna rör, filterbrunnar eller med vertikaldräner. En annan metod som kan ge vertikal dränering är stenpelare (Edstam, 1997). Stenpelarna installeras oftast i lösa jordar för att ge dränering genom hålrummet mellan stenarna. Denna princip fungerar bäst på friktionsjord och risker vid installation i sensitiv jord är att den kan bli störd och därmed få försämrade hållfasthet.

Horisontaldräner är en annan dräneringsmetod där rör installeras horisontellt med viss lutning nedåt släntfoten för att utnyttja gravitationen till att transportera bort vatten. Enligt Duncan m. fl. (2014) är det vanligt att använda PVC-rör för denna typen av dränering även om stålrör förekommer.

### 3.3 Jordförstärkning

Utöver lösningarna avschaktning/motfyllnad och porttryckssäkning kan jorden behövas förstärkas ytterligare med hjälp av externa faktorer som verkar för att öka jordens hållfasthet inifrån. Förstärkningarna fungerar principiellt genom att implementera material och konstruktioner som individuellt har en hög hållfasthet och då samverkar med befintliga massor för att öka släntens totala stabilitet.

#### 3.3.1 Pålning

Att sätta ner pålar i marken är en metod som i första hand används för att stabilisera upp en utlagd bank menar Skredkommissionen (1996). Pålning är sällan en förstärkningsåtgärd för att stabilisera en redan ostadig slänt men kan i vissa fall användas för att förstärka en slänt när det ska ske en tillskottsbelastning vid släntkrönet. Pålar installeras i en slänt genom att först schakta bort jordmassor där pålarna ska installeras, därefter placeras pålarna ut, för att till sist lägga tillbaka de avschaktade jordmassorna på sin ursprungliga plats.

Stabiliteten försämras ofta temporärt under tiden pålning sker (Skredkommissionen, 1996). Detta beror på en rad olika anledningar. Till exempel att avschaktningen där pålen sätts ner, orsakar horisontella jordrörelser samt att det kan bildas ett högt porttryck intill pålen. Det finns även en risk att vibrationer, som uppkommer vid installationen, transporteras långa sträckor genom marken och försämrar stabiliteten tillfälligt i den aktuella slänten samt övriga släntpartier i området. Installationen behöver därför alltid ske under uppsikt och under noggran planering. Pålningen görs successivt med några pålar i taget så att hållfastheten hinner byggas upp innan nästa parti sätts i. I vissa fall kan det även krävas en temporär förstärkningslösning, till exempel en motfyllnad i botten på slänten, för att det inte ska ske något skred under installationen.

#### 3.3.2 Kalkcementpelare

Kalkcementpelare (förkortning KC-pelare) är en förstärkningsmetod som är väldigt effektiv för att öka hållfastheten i jorden (Skredkommissionen, 1996). Den används ofta i slänter där ytterligare bebyggelse är planlagd, dvs slänter som bedöms behöva förstärkning inför kommande laster. I Sverige används KC-pelare nästan uteslutande, åtminstone till nittio procent, vid förstärkningar av väg och järnvägsbankar enligt Haglund och Nilsson (2001). Anledningen till att metoden i huvudsak tillämpas vid sådana situationer är densamma som för pålning. Det beror främst på att själva

installationen av pelarna är ytterst påfrestande för stabiliteten.

Metoden är utformad så att blandningsverktyget arbetar på plats vid vald installationspunkt (Skredkommissionen, 1996). Verktyget trycks och roteras ned i marken till önskat djup för att sedan dras upp och lämna efter sig en förstärkande kalkcementblandning i jorden. Blandningens syfte är att blanda sig med jorden och, med sin höga skjuvhållfasthet, förbättra jordens hållfasthet. Rotationen, trycket och vibrationerna från installationen påverkar jorden och kräver att markens hållfasthet är hög nog för att klara av dessa extra påfrestningar utan att skred uppstår. Därav anses slänter som är instabila i ursprungligt läge inte lämpade för denna extra påfrestning.

Enligt Haglund och Nilssons studie (2001) utgörs delar av denna problematik i att installationsprocessen är oöverskådlig. Pelarens exakta utformning och beblandning med befintlig jord går inte att verifiera utan att ta upp pelaren. Jordens rörelser under marken går inte heller att observera eller förutspå tillräckligt under processen.

Kalkcementpelare har en relativt stor miljöpåverkan, främst sett till produktionen av bindemedel (Rydberg & Andersson, 2003). Energianvändning vid installation står även den för en betydande del, men bindemedelsproduktionen väger allra tyngst. Bindemedelsproduktionen syftar till cementtillverkning och kalkbränning. Precis som den befintliga problematiken vid betonganvändning i hus- och brokonstruktioner så bistår samma problematik i detta fall där cement ska tillverkas och användas i pelare. Cementtillverkning har en stor miljöpåverkan, främst i form och utsläpp av växthusgaser. Utvinningen av kalksten sker i form av sprängning och får således en negativ miljöpåverkan till följd av energiåtgången, likt bergkrossen i erosionskyddet. Bränning av kalksten genererar även det stora mängder koldioxidutsläpp precis som cementtillverkning.

#### 3.3.3 Spontning

Spontning är en vanligt förstärkningsmetod i Sverige och används främst vid temporära lösningar där schaktningsarbete ska utföras (J. Larsson m. fl., 2015). Metoden genomförs genom att sponter, i form av långa stålplankor, förs rakt ned i marken och förankras i varandras långsidor för att bilda en vertikal vägg i marken. Spontväggen motverkar då kraften från aktivsidan mot passivsidan. För att motverka aktivsidans övervägande kraft kan sponten behöva förankras. Det kan ske genom att ett stag fäst i aktivsidan, en stämp monteras på passivsidan eller genom att spontfoten förankras i fast mark.

Metoden används sällan i stora slänter som löper risk för skred eftersom avståndet ned till fast mark ofta är stort (Skredkommissionen, 1996). Avståndet till fast mark gör att varken staget eller spontfoten kan förankras på ett säkert sätt. Eventuell förankring behöver passera glidytan i slänten för att uppnå sin mothållande effekt, även detta reducerar användningsområdet i slänter där glidytan går djupt. Däremot kan sponter tillämpas i en stor slänt där skred endast riskerar att äga rum i en mindre sektion, ofta en särskilt brant sektion. En spont placeras då vid den kritiska

punkten och motverkar skred lokalt i branten.

### 3.3.4 Jordspikning

Jordspikning är en annan stabiliserande metod i slänter som har använts flertalet gånger i Europa och Nordamerika (Skredkommissionen, 1996). Principiellt installeras jordspikar i olika mönster för att verka som armering i jorden och därmed överföra krafter från den aktiva zonen till den passiva (Marxmeier & Carlsten, 2000). Den aktiva zonen består av pådrivande potentiella skredmassor och den passiva av den då potentiellt kvarstående slänten. Det som skiljer aktivsidan från passivsidan är den kritiska glidytan. Metoden fungerar både i slänter med låg säkerhetsfaktor med minimala rörelser samt i krypande slänter med rörelse. Viktigt för att jordspikningen ska fungera som armering är att upprätthålla en samverkan mellan armeringen i jorden och en ytförstärkning som stabiliserar jorden ytligt, exempelvis med hjälp av geonät eller plantering.

Utförandet av jordspikning kan ske på olika sätt genom exempelvis förborrning med injektering eller genom slagning (Marxmeier & Carlsten, 2000). Förborrad jordspikning innebär att ett foderrör matas ned efter ett hål borrats. Därefter injekteras hålet och spiken förs ned för att sedan ytligt förankras med mutter och skruvplatta. Slagna spikar injekteras däremot inte. Vid metoden slagna spikar används luftdriven eller hydraulisk slagutrustning för att spika ned armeringsjärn. Gemensamt för samtliga utföranden är att de ofta installeras i vinkel, gärna vinkelrätt mot slänten om möjlighet finns (Svenska Geotekniska Föreningen, 2004).

Enligt Marxmeier och Carlsten (2000) finns det faktorer som gör en slänt mer eller mindre lämplig för jordspikning. Generellt kan jordspikning anses lämpligt i isälvsavlagringar, fasta leror, siltiga jordar och oblockig morän. Däremot om det förekommer faktorer som är karaktäriserande för en olämplig slänt bör en annan stabiliseringsmetod väljas. Det som bland annat anses vara olämpliga förhållanden är att slänten fallerar innan spikarna är installerade och injekterade. Andra olämpliga förhållanden är exempelvis högsensitiva jordar och frostkänsliga jordar. Om injekterade spikar ska installeras behöver även grundvattennivån vara lägre än injekteringsdjupet för att inget vatten ska strömma till installationen.

### 3.3.5 Mikropelare

För att uppnå bättre stabilitet i slänter kan mikropelare (eng. micropiles) användas (Sun m. fl., 2013). Metoden har även en svensk standard enligt Svenska institutet för standarder (SIS) (2015). Mikropelare är ofta 90-300 mm i diameter och består av armeringsstål och puts/bruk som placeras i ett mönster för att uppnå önskvärd stabilitet (Patel, 2019). Metoden kräver en utrustning som är relativt liten jämfört med andra metoder och blir därmed fördelaktigt i kritiska slänter. Mikropelare förstärker slänten genom kraftöverföring från jorden in i pelarna.

### 3.4 Geonät, geotextil samt membran

En metod som kan användas för att öka säkerheten ytligt i slänter är förankrade membran som placeras ovanpå slänten (Castanon-Jano m. fl., 2021). Membranen syftar till att antingen avleda ras och stenras till släntfoten eller ett dike för att undvika faror på vägbanor och järnvägar. Alternativt syftar de till att hålla kvar löst material nära brottet och därmed hålla uppe slänten vid ras. Första alternativet brukar benämnas som lågresistent system och andra alternativet för högresistent system. Det sistnämnda avser släntstabilitet.

Högresistent system består av flera komponenter för att fungera stabiliserande (Castanon-Jano m. fl., 2021). Den första komponenten består av ett huvudmembran, vars uppgift är att fördela laster vid ras och skred. Den andra komponenten är sekundärmembran som avser att hålla kvar jord och rasat material nära brottet, förankra membranen i varandra, samt att förankra jorden. Huvudmembranet brukar bestå av metallnät eller textil med bredare maskor (200-300mm), antingen vävda eller fixerade i mötespunkterna med ståltråd eller clips. Sekundärmembran används som komplement till huvudmembranen för förhindra berggras och jordras från att falla igenom huvudmembranets maskor. I bergiga områden är det vanligt att använda metallnät i hönsnässtruktur (eng. triple torsion wire mesh). Som jordförstärkning i jordiga områden är det vanligare att antingen använda geonät (eng. geogrid), erosionsmatta av plast, eller kokosnät vid erosionsrisk. De två membranen binds sen ihop med ståltråd eller buntband för att sedan förankras till marken.

För att utnyttja membranens stabiliserande förmåga krävs förankring, vilket kan ske på olika sätt. Enligt Castanon-Jano m. fl. (2021) kan det ske med exempelvis mikropelare. Fördelen med mikropelare är att kombinationen potentiellt ger både ytlig stabilisering genom geonätet eller membranen samt mer djupgående stabilisering av mikropelarna. Holtz och Schuster (1996) nämner att även jordskpik kan användas som förankringsmetod för geonät.

Geotextil, även kallat geosyntet, är olika sorters tyger som används inom geoteknik och anläggningsteknik för att förbättra jordens stabilitet (Holtz & Schuster, 1996). Utöver att de kan ge förbättrad stabilitet vid korrekt anläggning ger det även möjlighet till att separera jordlager. Exempelvis vid ett anläggningsarbete där jordmassor grävs ur för att ersättas av nytt material, då kan geotextil placeras mellan lagrena. Andra fördelar med geotextil är att de oftast är genomsläppliga och därmed dränerande, varpå de även kan vara filtrerande.

För att kunna utnyttja geotextilens stabiliserande förmåga behöver slänten fyllas ut och byggas ut genom flera lager geotextil (Holtz & Schuster, 1996). Därmed kan slänten först behöva grävas ut för att ge plats åt installationen. Kanterna viks in och överlappas där fyllning varvas mellan lagrena. Därmed krävs ingen ytterligare förankring eftersom gravitation och friktion håller lagren på plats. Detta anses ofta vara en relativt kortsiktig lösning eftersom geotextilen kan utsättas för vandalisering och nedbrytning av olika biologiska och kemiska mekanismer.

Geonät kan användas på liknande sätt som geotextilen i utbyggda slänter. Nätet i sig är relativt styvt och består vanligtvis av polypropen eller polyten (Holtz & Schuster, 1996). Maskorna, det vill säga hålrummen, är mellan 1-10 cm. Denna metoden har använts sedan år 1979 då den första geonätförstärkta slänten anlades i Yorkshire. Efter det har metoden använts frekvent i USA och Holtz och Schuster (1996) nämner att redan 300 slänter anlagts innan år 1990. Fördelar som nämns med anläggningsmetoden är att det är kostnadseffektivt och ger möjlighet för växtlighet mellan maskorna.

### 3.5 Geoceller

Ett sätt att öka släntstabiliteten, framförallt genom att öka erosionsresistensen är att använda geoceller (Kumar m. fl., 2021). Geoceller har en tredimensionell struktur som påminner om vaxkakor. Enligt Biswas och Krishna (2017) kan geoceller bestå av geotextiler eller geonät av polyten eller högdensitetspolyten som är ultraljuds- eller maskinellt svetsade för att få till en 3D struktur. Efter de är producerade viks de ofta ihop för enklare transport till platsen de ska användas på. Geoceller förekommer i olika dimensioner med olika mönster för att kunna anpassas till platsen. När geocellerna sedan rullas ut brukar de kallas geocellsmadrasser eller geomadrasser. Jord eller annan fyllning placeras ut i de tredimensionella fickorna som ökar stabiliteten ytligt och stärker erosionskyddet.

Geoceller kan placeras ut direkt ovanpå ett släntkrön för att därefter fyllas med jord (Kumar m. fl., 2021). Alternativt kan de grävas ned och fyllas upp, därefter kan ytterligare lager med geoceller och fyllning placeras ovanpå. Eventuellt kan geogrid läggas ut mellan lager för att exempelvis fylla upp under en vägbank. När de används direkt ovanpå slänter har det påvisat ge förbättrat erosionskydd bland annat vid kraftiga regnfall. När de grävs ned, som de oftast gör vid bankar, har det även visat sig ge ökad stabilitet och bärförmåga då den kritiska glidytan har visat sig hamna utanför geocellerna (Biswas & Krishna, 2017). Andra fördelar med geoceller är att de varit mer beständiga än framförallt betongpaneler i kalla klimat (Kumar m. fl., 2021).

### 3.6 Plantering i slänter - en ingengörsbiologisk metod

Ingengörsbiologiska metoder (eng. bio-engineering) är metoder som sammanflätar biologi med ingenjörskonst. Ambitionen är att nyttja naturen, i form av levande och/eller dött växtmaterial på ett så miljövänligt vis som möjligt, för att uppnå effektiva lösningar på ingengörsmissiga problem. Ett sådant problem kan vara stabilisering av slänter och en alternativ lösning kan vara plantering av växter i slänten.

#### 3.6.1 Växters inverkan på jordens hållfasthet

Att plantera växtlighet i slänter är en effektiv och hållbar metod för att förbättra en slänts stabilitet menar Rankka (2002). Stabilitetsökningen beror främst på att växternas rötter har en positiv inverkan på jordens hållfasthet. Rötterna bygger nätverk

i marken och förankrar sig vilket binder samman jordlagren och förhindrar att både erosion och glidning uppstår. Rötternas förankring efterliknar rent principiellt externa förankringsmetoder som pålning och spontning, fast på en naturlig och hållbar väg i mindre skalor. Principen är framförallt jämförbar med armeringsnät i betong.

Utöver att verka som mekaniska förstärkningar förbättrar växterna även släntstabiliteten genom att skydda markytan från utomstående faktorer som regnvatten, vind och solljus menar Alam m. fl. (2018). När växtligheten ger skydd mot tungt regn och kraftiga vindar förhindras jordmassor från att erodera bort vid höga vatten- och vindhastigheter. Skuggbildning på slänter från stora buskage och träd skyddar jorden från uttorkning och därmed sprickbildning. Genom att undgå sprickbildning minimeras därmed risken att stora mängder vatten tränger sig ned i marken, men också att kritiska glidytor uppkommer i sprickorna.

#### 3.6.2 Problem att beräkna exakt hållfasthet

Vid en bullervall i Evertsholm, som tidigare varit utsatt för skred och ras, planterades sticklingar strategiskt ut menar Lundström (2016). Förhoppningarna var att rötterna skulle binda samman jordlagren och den ytliga växtligheten skulle skydda mot erosion från vind och regn. Efter lyckat utförande och två års observation observerades inga skred eller erosion trots en blandning av torra och kraftigt regn.

I slänter med befintlig växtlighet är det till skillnad från strategiskt planterade slänter svårare att veta exakt hur växtligheten under markytan är utformad (Rankka, 2002). Därmed blir det svårare att ta fram en representativ jordprofil. Även växter som inte är utsatta avsiktligt påverkar hållfastheten. Växters och rötters påverkningsgrad på stabiliteten beror på flera faktorer som exempelvis rotlängd, rotdiameter, rotsystemets uppbyggnad, växtarter m.m. Detta gör att stabiliteten i en slänt med befintlig växtlighet är svår att förutspå. Rankka (2002) rapporterar att rötter från större träd har ett betydande rotsystem ned till ca 3 meters djup och buskage ned till ca en meters djup. I forskning gjord av Alam m. fl. (2018) så har bedömningen istället gjorts att växternas påverkan endast är aktuell en meter ner i jorden. Beräkningar i forskningen gav påvisande förbättringar av stabiliteten i en studerad slänt. Som nämns finns det flera antagen att göra och området kring växtlightens påverkan är under stor utveckling och högaktuellt inom bio-engineering idag. Men något korrekt vis att exakt precisera vegetationens påverkan på jordens hållfasthet finns inte fastställt än, då det inte anses finnas tillräckligt med underlag.

## 4 Metod

### 4.1 Val av område och sektion

Vid val av område har kandidatarbetets avgränsningar tagits i beaktande vilket inneburit att Göta älvs strandkanter varit aktuella. För att specificera området ytterligare har SGIs skredriskartering analyserats och utvärderats för att hitta ett område med låg säkerhetsfaktor. Eftersom skredriskarteringen visade på låga säkerhetsfaktorer för flera stora partier längst älven har även mängden tillgänglig data tagits i beaktande samt diskussioner med handledare. Eftersom en större utredning av Bergström och Alaydi (2020) redan är gjord vid Smådala i Lilla Edets kommun har borrhprover och sonderingar utförts i flera sektioner och konsulterna har även dragit egna slutsatser om stabiliteten.

### 4.2 Jordlagerföljd i sektion V18/535

Från tillgänglig data valdes tio stycken borrhål i sektionen samt i närliggande sektioner för utvärdering. Avståndet mellan sektionerna var ca 200 meter och förhållandena antogs därmed vara likvärdiga. I tabell 2 redovisas de valda borrhålen samt deras höjddata i höjdsystemet RH2000. Utifrån befintlig borrhålsdata gjordes därefter flera olika sammanställningar.

Borrhål	Nivå [m]
19SW03	+4,4*
19WS51	+7,5
19WS57	+10,7
19WS52	+21,0
19WS53	+23,4
19WS58	+26,4
19WS54	+27,2
19WS55	+29,6
NV00067	+30,2
19WS81	+31,4

**Tabell 2:** Borrhålsdata med tillhörande nivåer som varit underlag för beräkningarna. \* Nivå startar på +8,9m men uppmätt tunghet (antagande: älvbottens början) börjar först vid 4,5m djup i testerna. Höjddata från ritning med nummer G-10-1-001 med höjdsystem RH2000.

För att ta fram en jordlagerföljd för sektionen sammanställdes först densiteten med avseende på djupet för samtliga borrhål ovan älven, se bilaga 1. Hänsyn till djupet istället för nivå togs eftersom nivåskillnaderna mellan borrhålen var stor samt att jordlagren följde släntens form. Vidare togs skjuvhållfasthet med avseende på nivå samt konförsök i beaktning vid indelning av ytterligare lagerskikt. Nivån togs hänsyn till på grund av hur spänningsförhållandena påverkats av älvens erodering av stränderna.

Vid bestämning av skjuvhållfastheten sammanställdes samtlig data från ving- och konförsök samt DSS-tester i Excel. Datan från ving- och konförsök korrigerades därefter med korrektionsfaktorn  $\mu = (0.43/w_L)^{0.45}$ , där  $\mu$  är korrektionsfaktorn och  $w_L$  är konflytgränsen. Korrigeringen genomfördes för att kunna jämföra testerna med värden från DSS-tester. Skjuvhållfasthetsdiagram skapades för borrhål ovan släntkrön, borrhål i slänt samt för borrhål i älvbotten med syfte att undersöka skjuvhållfasthetens variation till följd av exempelvis erosion, se bilaga 2. Data för älvbotten hämtades från borrhål 19SW03. Trendlinjerna för både skjuvhållfasthet samt tunghet antogs vara representativa för hela älvbotten.

I sammanställningen av skjuvhållfastheten, i bilaga 2, avvek värden i borrhål 19WS52 de översta metrarna och i 19WS81 de nedersta metrarna. Utöver dessa värden fanns en tydlig trend och de avvikande värdena togs därför ej i beaktning. Detta eftersom det kan bero på provets kvalitet eller en lokal avvikelse och värdena representerar därför inte den generella jordprofilen. I borrhål 19WS58 var skjuvhållfastheten vid markytan betydligt högre än i resterande borrhål till följd av bland annat växtdelar och bortsågs från av samma principer som tidigare.

Baserat på data från borrhålen antogs portrycket vara hydrostatiskt under grundvattnenytan. Då vattennivån i älven varierar mellan +6,6m och +7,6m genom reglering med slussar antogs den lägre nivån vid samtliga analyser för att ta hänsyn till det värsta scenariot.

Utifrån antaganden och sammanställningar har en jordlagerprofil för sektion V18/535 tagits fram och presenteras i resultatet i figur 6 samt i bilaga 1. Sammanfattningsvis berör antagandena undersökningsområdet, valda borrhål medans sammanställningarna berör parametrarnas värden och förändring med avseende på djup alternativt nivå.

### 4.3 Stabilitetskrav och styrande dokument

Kraven på erforderliga säkerhetsfaktorer som används i kandidatarbetet är baserade på rekommendationer för naturliga slänter från Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik (IEG) och deras rapport 4:2010 (IEG, 2010). Markanvändningen i området antogs vara i kategorin *befintlig bebyggelse och anläggning* eftersom ingen förändring av belastningen i form av bebyggelse i slänten genomfördes, utöver i syfte att öka stabiliteten. Utifrån mängden tillgänglig data och därmed mängden undersökningar som gjorts, tillsammans med den markanvändning som antagits valdes de rekommenderade säkerhetsfaktorerna till  $F_c = 1,4$  för odränerad analys och  $F_{komb} = 1,3$  för kombinerad analys. Vidare har även Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner - TK Geo 13 använts som styrande dokument i arbetet (Trafikverket, 2016).

## 4.4 Stabilitetsanalys

Med den valda jordlagerprofilen som utgångspunkt genomfördes en odränerad och en kombinerad analys för den befintliga slänten. Materialparametrarna i den kombinerade analysen beräknades med empiri enligt SGI och utgår från materialparametrarna i den odränerade analysen (R. Larsson m. fl., 2007). Utifrån empirin antogs  $\varphi' = 30^\circ$  för samtliga lerlager, och  $\varphi' = 35^\circ$  för torrskorpan. Den dränerade skjuvhållfastheten  $c'$  antogs vara  $c' = 0,1 \cdot c_u$ . Materialmodellerna för analyserna på den befintliga slänten återfinns i bilaga 3-4. I arbetet gjordes enbart totalsäkerhetsanalyser.

Utifrån de tekniska lösningar som beskrivs i kapitel 3 gjordes ett urval av fem stycken åtgärder som tillämpades i analyserna i GeoSlope. Åtgärderna dimensionerades så att stabiliteten i slänten uppnådde erforderliga säkerhetsfaktorer,  $F_c = 1,4$  och  $F_{komb} = 1,3$ . I de fall erforderliga säkerhetsfaktorer ej kunde tillfredsställas med en enskild metod kombinerades olika åtgärder. Urval av tekniska lösningar och kombinationer samt analysmodell redovisas i tabell 3.

**Tabell 3:** Tekniska lösningar som utvärderats i GeoSlope med tillhörande analysmodell

Åtgärd	Analys	Bilaga
Avschaktning och tryckbank	Odränerad	6
Avschaktning och motfyllnad	Odränerad	7
Portryckssänkning	Kombinerad	8
KC-pelare	Odränerad	9
KC-pelare och avschaktning	Odränerad	10
Vegetation	Odränerad	11
Vegetation och avschaktning	Odränerad	12

För de tekniska lösningar som innebar att nya material implementerades i slänten gjordes följande antaganden om standarden inte bidrog med exakta värden eller tillräcklig information:

- För materiallagret med vegetation antogs  $c_u=70$  kPa.
- Tungheten på KC-pelarna antogs till ett medelvärde av de två lerorna vi har i slänten, dvs 16,6 kPa.
- Då motfyllnaden placerades som en tryckbank i vattnet användes stenkross istället för det material som schaktats bort från släntkrönet.

## 5 Områdesbeskrivning

Av de många skred som skett i senare tid i Göta älv visar sig skredfrekvensen vara som högst mellan kommunerna Lilla Edet och Trollhättan (Sveriges geologiska undersökning, u. å). De största skreden som inträffat mellan kommunerna de senaste 100 åren var i Ballbo 1996 och i Göta 1957 vilka båda ligger inom Lilla Edets kommun. Berggrunden i detta området skiljer sig från älvens södra delar vilket kan vara orsaken till skredfrekvensen.

### 5.1 Geologisk historia Göta älv

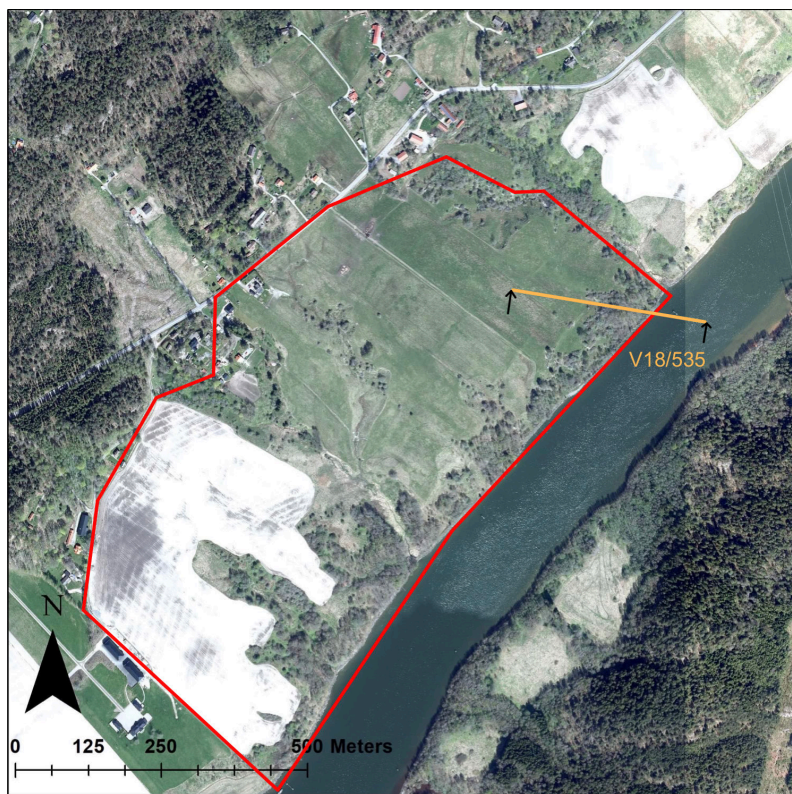
Berggrunden i Göta älv är generellt relativt uppsprucken, oregelbunden och på sina ställen är nivåskillnader mellan botten i dalgången och övrig terräng 100m (Klingberg m. fl., 2006). Mellan Göta i Lilla Edets kommun och Trollhättan har tidigare avsatta sediment nått över landytan och älvnivån allt eftersom landhöjningen fortskridit. Följden av detta är att älven tagit sig fram i en smal fåra i de norra partierna vilket gett älvstranden branta sluttningar som reser sig uppemot 20 meter från älvnivån. Sluttningarna kallas även strandbrinkar och är som högst i norra delen av Göta älv. Främst mellan Göta och Trollhättan återfinns tecken på gamla raviner och skredärr.

Efter isavsmältningen har det skett stora förändringar i Göta älvdalens utseende, främst till följd av havets utbredning samt landhöjningen (Klingberg m. fl., 2006). Havsvattnet trängde sig in i området kring älven och har påverkat en stor del av avsättningarna, både de glaciala sedimenten men också postglaciala. På jordartskartor mellan Trollhättan och Göteborg går det utläsa att de vanligast förekommande jordarterna är postglacial lera, glacial lera, urberg samt små partier av silt. Under ler- och siltsedimenten har även grövre sediment påträffats som sannolikt avlagrats genom isavsmältningen. Med anledning till berggrundens oregelbundenhet kan jordens mäktighet uppgå till 100 m även om berget är ytligt på sina ställen. Till följd av att lera i området till stor del avsatts under havsförhållanden är risken stor för att leran är sensitiv, det vill att kvicklera förekommer i området (Schoning, 2016).

### 5.2 Smådala, Lilla Edets kommun

Området som undersökts närmre i detta kandidatarbete är Smådala, en ort i Lilla Edets kommun. Orten är belägen intill Göta älv, ca 9 km söder om Trollhättan enligt figur 5. Smådala utgörs i huvudsak av bördig och kuperad åker-/ängsmark men även en del träd, buskar och längre gräs vid älvbanken. Ett fåtal fastigheter i form av bostadshus och lador återfinns på områdets nordvästra samt västra utkant på ungefär 500 meters avstånd från älven, se figur 4. Markytan är i stora delar av området beläget kring nivån +30 meter och lutar svagt mot älven. Närmare älven, där vegetationen övergår till träd och buskage, är lutningen betydligt brantare. Marknivån vid älvstranden nedanför den branta slänten är ca + 7,5m.

**Figur 4:** Utredningsområdet i Smådala med vald sektion markerad i orange. Ortofoto hämtat från SLU via Lantmäteriet (2022)



### 5.3 Sektion V18/535

Sektion V18/535 karaktäriseras av dess branta lutning efter släntkrönet med en relativt plan slänthot. Det förekommer växtlighet i form av träd och buskage i släntens krön och mitt, medans det i slänthoten förekommer ett och annat träd samt ett gräställe. Längs älvkanten finns ett erosionskydd som sträcker sig en bit ned i älven. Vattennivån i sektionen regleras till +7,6 m som dämningssgräns samt +6,6 m som sänkningsgräns (SGI, 2012a).

Tidigare undersökningar i området Smådala är utförda av konsultbolaget WSP, samt den specifika slänten V18/535, vilket innebär att borrhålsdata och en tidigare utredning finns tillgängligt (Bergström & Alaydi, 2020). Framtagen jordprofil för sektionen presenteras i figur 6. Det översta lagret ovan slänt och i slänt består av en torrskorpa, följt av lerlager med olika egenskaper ner till berget. I älven består botten endast av lera ner till berg utöver erosionskyddet invid älvstranden. Egenskaperna som varierar mellan de olika lerorna är tunghet samt skjuvhållfasthetens variation mot djupet.

**Figur 5:** Smådala förhållande till Göteborg och Trollhättan.  
Bildkälla: Google Maps Kartdata ©2022 Sverige.

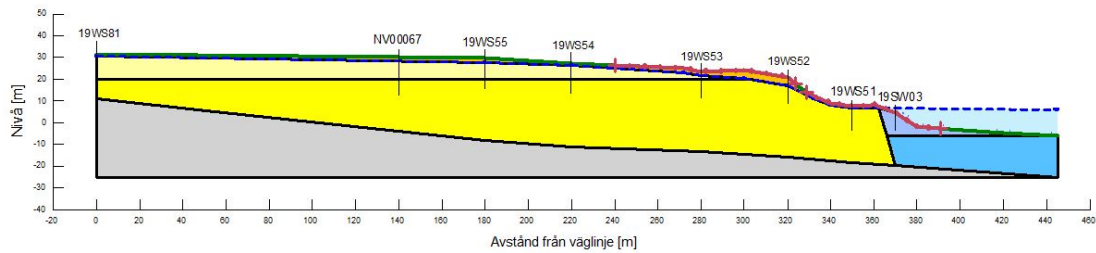


## 6 Resultat

### 6.1 Jordprofil

Utifrån antaganden och sammanställning av borrhålsdata resulterade släntens jordprofil i figur 6.

**Figur 6:** Jordlagerföljd för sektion V18/535



### 6.2 Stabilitetsanalys av befintlig slänt

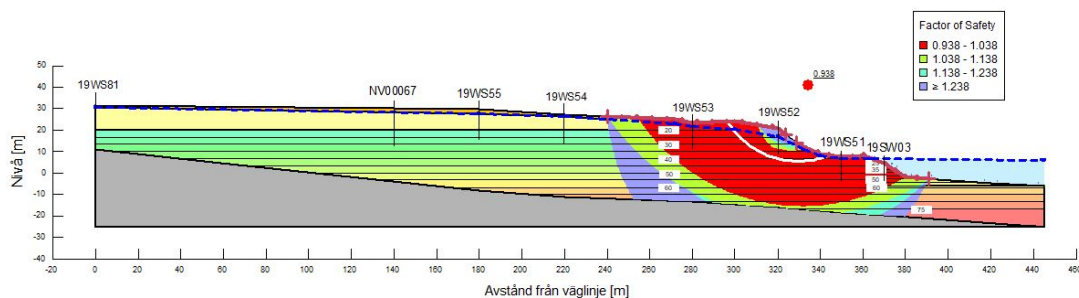
En sammanställning av resultatet från stabilitetsanalyserna av den befintliga slänten innan åtgärder implementerades finns i tabell 4. Kraven som tabellen refererar till är baserade på antaganden i metoden.

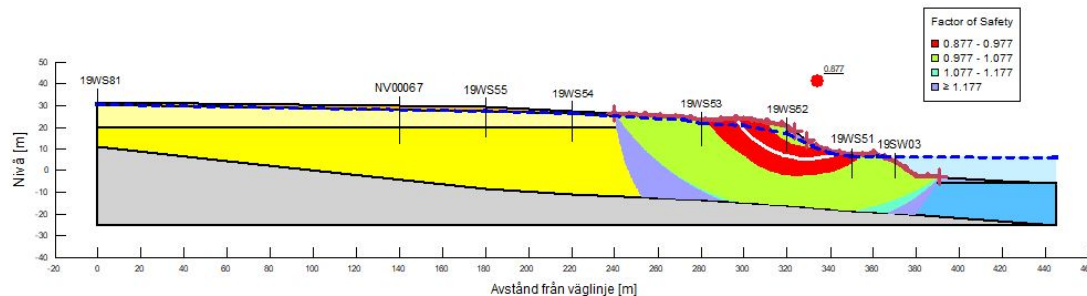
**Tabell 4:** Sammanställning av resultat från stabilitetsanalyser i den befintliga slänten

Beräkningsfall	Säkerhetsfaktor	Godkänt enligt krav
Befintlig slänt	$F_c = 0,94$	Nej
Befintlig slänt	$F_{komb} = 0,88$	Nej

Resultaten från släntstabilitetsanalyserna som genomfördes på den framtagna befintliga slänten i den valda sektionen visas i figurerna 7 och 8. Den kritiska säkerhetsfaktorn i den odränerade analysen blev 0,938 och i den kombinerade analysen blev den 0,88.

**Figur 7:** Odränerad analys av slänten i sektion V18/535



**Figur 8:** Kombinerad analys av slänten i sektion V18/535

### 6.3 Stabilitetsanalys med tekniska lösningar

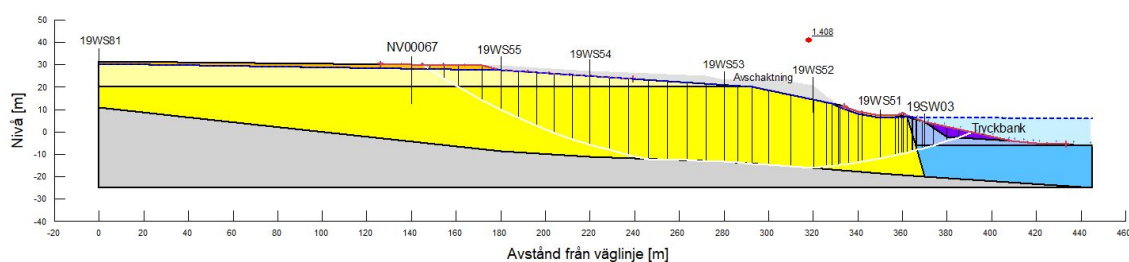
Resultaten av stabilitetsanalyserna med samtliga prövade tekniska lösningar återfinns i tabell 5. I samma tabell presenteras även om kraven om säkerhetsfaktorn uppfylldes eller ej.

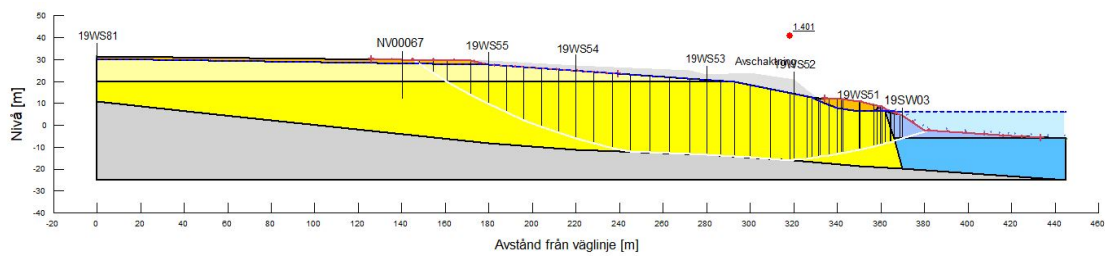
**Tabell 5:** Sammanställning av resultat från stabilitetsanalyser med åtgärder

Teknisk lösning	Säkerhetsfaktor	Godkänt enligt krav
Avschaktning och tryckbank	$F_c = 1,41$	Ja
Avschaktning och motfyllnad	$F_c = 1,40$	Ja
Porttryckssänkning	$F_{komb} = 0,91$	Nej
KC-pelare	$F_c = 1,17$	Nej
KC-pelare och avschaktning	$F_c = 1,43$	Ja
Vegetation (3m)	$F_c = 1,05$	Nej
Vegetation (3m) och avschaktning	$F_c = 1,45$	Ja

#### 6.3.1 Avschaktning och motfyllnad

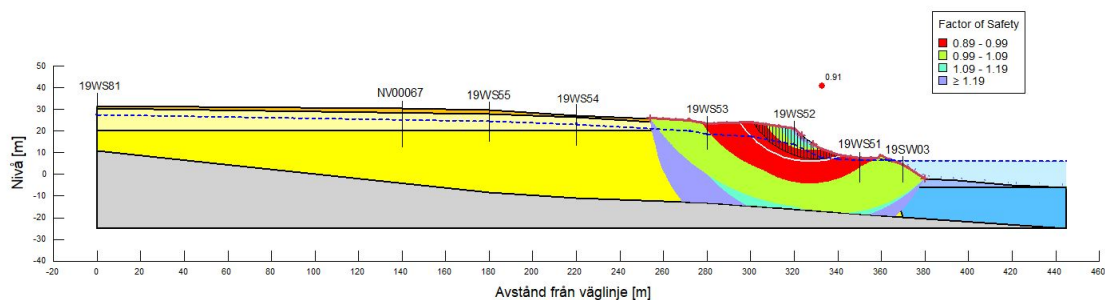
Resultaten från odränerad analys med åtgärderna avschaktning och tryckbank respektive avschaktning och motfyllnad presenteras i figurerna 9 och figur 10. Kravet på erforderlig säkerhetsfaktor, dvs  $F_c=1,4$ , uppfylldes i båda fallen. De kritiska säkerhetsfaktorerna efter tillämpad teknisk lösning blev 1,41 respektive 1,40.

**Figur 9:** Odränerad analys för åtgärden avschaktning och tryckbank

**Figur 10:** Odränerad analys för åtgärden avschaktning och motfyllnad

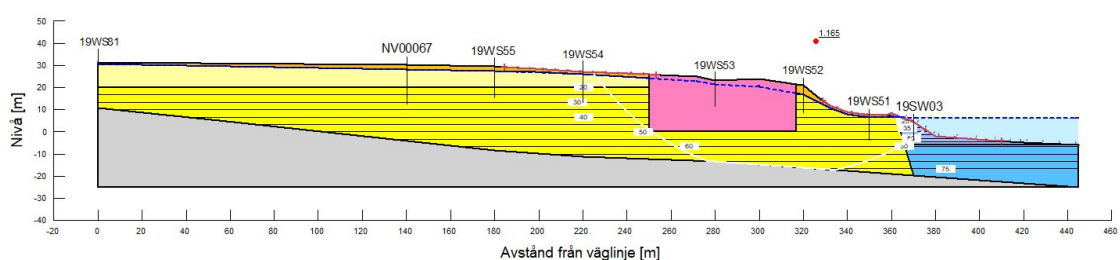
### 6.3.2 Portryckssänkning

Portryckssänkningens resultat presenteras i figur 11. Säkerhetsfaktorn visade sig stiga från 0,87 till 0,91 då grundvattenytan sänktes med 3 meter och kravet på stabilitet för kombinerad analys uppnåddes inte.

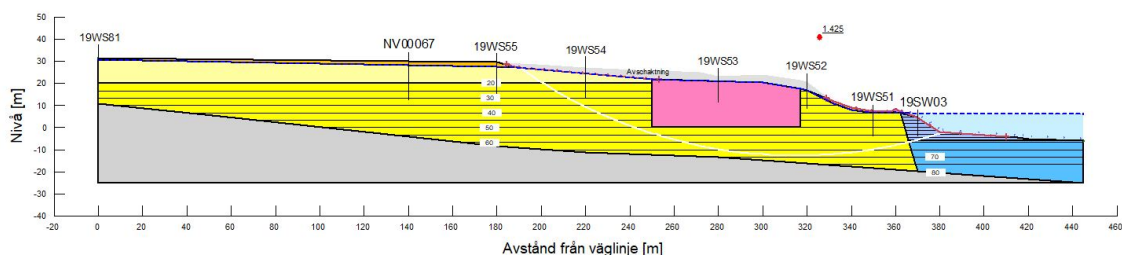
**Figur 11:** Kombinerad analys med portryckssänkning

### 6.3.3 Kalkcementpelare

Åtgärderna KC-pelare respektive KC-pelare och avschaktning i odränerad analys gav resultaten som presenteras i figurerna 12 och figur 13. Enbart KC-pelare som förstärkande åtgärd i slänten resulterade i en kritisk säkerhetsfaktor på 1,2, vilket inte uppfyllde kraven. Kombinationen av KC-pelare och avschaktning resulterade i säkerhetsfaktorn 1,43 vilket däremot uppfyllde kraven. Pelarna sträckte sig ner till nivå +0 m och hade en utbredning på 67 m i sidled.

**Figur 12:** Odränerad analys för åtgärden KC-pelare

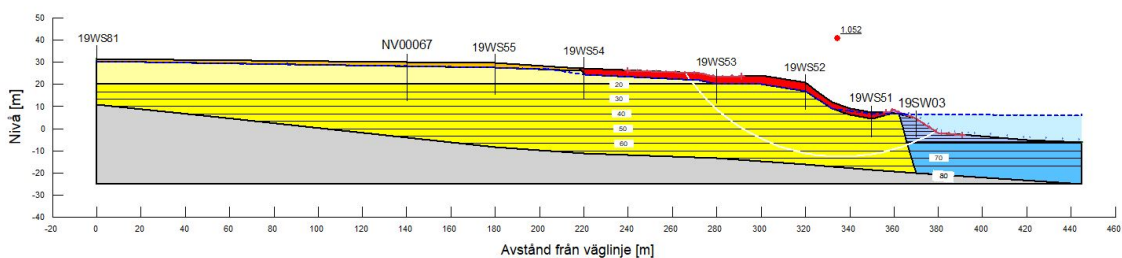
**Figur 13:** Odränerad analys för åtgärden KC-pelare i kombination med avschaktning



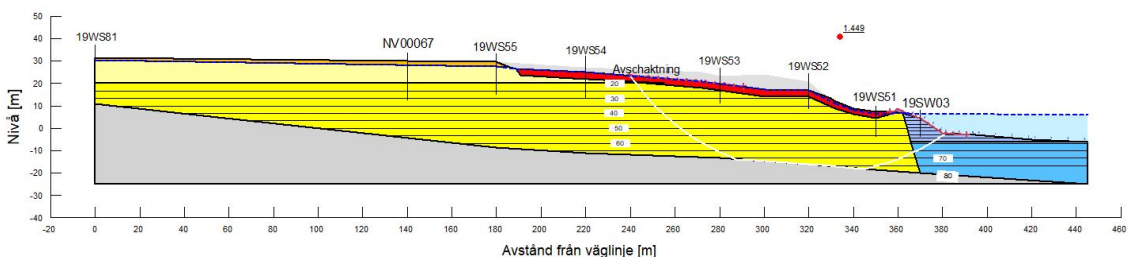
### 6.3.4 Vegetation

Vegetation med djup på 3 meter som åtgärd undersöktes enskilt samt i kombination med avschaktning för odränerad analys. Resultaten från dessa analyser presenteras i figur 14. Enbart vegetation planterad i slänten resulterade i säkerhetsfaktorn 1,05 vilket understeg kravet om erforderlig säkerhetsfaktor. Vegetation i kombination med avschaktning resulterade i säkerhetsfaktorn 1,45, vilket uppfyllde kravet.

**Figur 14:** Odränerad analys för åtgärden vegetation till 3 m djup



**Figur 15:** Odränerad analys för åtgärden vegetation till 3 m djup i kombination med avschaktning



## 6.4 Analys av resultatet

Den framtagna jordprofilen utvärderades både i odränerad och kombinerad analys och säkerhetsfaktorn visade sig vara mycket låg,  $SF < 1$ . Att  $SF < 1$  innebär att slänten redan borde rasat om modellen faktiskt var verklighetstrogen. Anledningen till varför denna modell godtogs som grund inför vidare analyser med tekniska

lösningar, beror på att vald metod för arbetet gör det möjligt att jämföra med de uppsatta kraven i metodavsnittet.

Orsaker till att säkerhetsfaktorn i befintlig slänt visade resultatet  $SF < 1$  kan bero på flera orsaker. Bland annat kan en orsak vara felaktiga antaganden och generaliseringar av exempelvis parametrarna tunghet och skjuvhållfasthet. Det kan även vara så att indatan inte var tillräckligt representativ då analyser görs på små jordprover, i förhållande till de faktiska jordvolymerna som äger rum i området. Andra osäkerheter är att anisotropi, dvs att materialegenskaper varierar beroende på riktning, ej tagits hänsyn till i modelleringen. I modelleringsprogrammet antas glidyten även ha samma säkerhetsfaktor genom hela snittet, vilket ej behöver vara fallet i verkligheten. Geometrin för slänten är dessutom en förenklad 2D modell av en 3D slänt där sektion V18/535 är den brantaste delen. Orsaker till att slänten fortfarande står kvar kan bero på vegetationen som ej tagits i beaktande vid släntutvärderingen samt falsk kohesion.

De enskilda åtgärder som gav bäst resultat med avseende på säkerhetsfaktorn var avschaktning med motfyllnad respektive tryckbank. De två metoderna förändrar geometrin av slänten och även förhållandet mellan pådrivande och mothållande krafter. Åtgärden resulterade i en förändrad glidyta samt en höjd säkerhetsfaktor.

De metoder som ej gav tillräckligt hög säkerhetsfaktor analyserades även i kombination med avschaktning. Detta visade sig ge förbättrade resultat, men då mycket tack vare avschaktningen. Därmed gav portryckssänkningen, vegetationen samt KC-pelarna inte på egen hand någon avsevärd förbättring av stabilitet i programvaran som användes. Till följd av den befintliga släntens djupa glidyta visade sig effektiviteten av grunda förstärkningar vara begränsade, däribland vegetation. Även portryckssänkningens inverkan på stabiliteten var begränsad på grund av av glidytagens geometri. De odränerade parametrarna visade sig vara dimensionerande för nästan hela glidyten vid sänkningen.

Lösningarna med geonät, geotextil, geoceller utvärderades inte i programvaran av olika skäl. För det första var det stora oklarheter kring hur metoderna skulle kunna tillämpas i programvaran för att ge trovärdiga resultat. Dessutom är vanliga tillämpningar av de nämnda materialen att bygga ut slänten och varva materialet runt lager av fyllnadsmaterial. Detta ansågs ej vara relevant för arbetet. I de fall då materialen används direkt ovanpå slänten var det även svårt att hitta lösningar för hur resultatet skulle bli trovärdigt utifrån programmets begränsningar. Dock har dessa metoderna visat sig vara effektiva i direktapplicerade studier.

## 7 Diskussion

Kandidatarbetets syfte var sammanfattningsvis att undersöka skredorsaker samt undersöka sex olika tekniska lösningar. Utöver det var även syftet att analysera de lösningar som var tillämplingsbara i en bestämd slänt för att öka stabiliteten. Till sist syftade arbetet också på att resonera om tekniska lösningars inverkan på lokala förhållanden i Göta älv.

De mest relevanta skredutlösande faktorerna visade sig vara förändringar i geometrin till följd av erosion, bebyggelse och pålastning. På parameternivå har portryck, skjuvhållfasthet, glidytans dimensioner och därmed tyngd inverkan. På en mer övergripande nivå har även vattenföring och vattennivå i intilliggande vattendrag, en stor betydelse.

En förutsättning för att uppfylla syftet om att tillämpa tekniska lösningar på en representativ slänt, var att välja ett representativt undersökningsområde för älven. Området som valdes var Smådala, Lilla Edets kommun och den geologiska historien visade sig vara relativt likvärdig mellan Lilla Edet och Trollhättan. Detta innebär att resultatet från datormodelleringen är mest representativ för den nämnda sträckan. Däremot är jordförhållandena relativt lika även söder om Lilla Edet, även om älvens bredd skiljer sig åt mellan norra delen och södra delen. Alltså skulle tekniska lösningar ändå kunna fungera likvärdigt för hela älv dalen. Framförallt är en lösning aktuell för hela älv dalen vilket är erosions skydden medans exempelvis avschaktning bör undersökas mer lokalt. Därmed bedöms de norra delarna ha större behov av mer omfattande avschaktning än de södra, flackare delarna av älven.

För att kunna utvärdera de tekniska lösningarna i den valda slänten blev en förutsättning att ta fram en verklighetstrogen jordprofil. Till följd av de antaganden, generaliseringar och avgränsningar som jordprofilen bygger på finns flera osäkerheter kring hur verklighetstrogen profilen blev. Däribland tas inte hänsyn till jordens anisotropi eller den befintliga växtlighetens förstärkande egenskaper. Data om älvbotten var begränsad, och antaganden om tunghet och skjuvhållfasthet kan vara missbedömda utifrån given data. Eftersom analyser av jordproverna enbart görs på små volymer finns det en risk att given indata inte är representativ för området. Resultatet av säkerhetsfaktorn för den befintliga slänten blev  $SF < 1$  vilket gör att man kan konstatera att jordprofilen avviker från verkligheten eftersom slänten står idag. Trots detta har modellen optimerats utifrån arbetets förutsättningar och avgränsningar för att likna verkligheten i största möjliga utsträckning.

Från litteraturstudien framgår att olika lösningar är lämpliga för olika förhållanden. Vissa lösningar är mer ovanliga i Sverige och återfinns i huvudsak i utländsk litteratur och förekommer oftare internationellt. Exempelvis är avschaktning, motfyllnad, och portryckssänkning vanliga metoder för naturliga slänter i Sverige. KC-pelare, geotextil och geonät används i Sverige men litteraturstudien visade att det vanligtvis inte implementeras i samband med instabila, naturliga slänter. Vidare är ingenjörsbio-logiska metoder också en teknisk lösning som behandlas i litteraturstudien. Det

är något som det idag forskas mer på.

Ett annat av syftena med detta kandidatarbete var att utvärdera olika tekniska lösningar för att öka säkerhetsfaktorn i en vald sektion. Lösningar har både studerats teoretiskt och en del har även tillämpats i programvara på dator. Sammanlagt har sex stycken metoder undersökts i litteraturstudien, fyra av dem tillämpats på slänten i programvaran varav en i två varianter. Till sist har två kombinationer av lösningar undersökts i programvaran på slänten. Det resulterade i att avschaktning blev den mest effektiva åtgärden i området för att öka säkerhetsfaktorn, både i kombination med tryckbank/motfyllnad och övriga metoder.

## 7.1 Konsekvenser av tillämpning av tekniska lösningar

Det sista syftet var att undersöka inverkan och konsekvenser på lokala förhållanden. Lösningarna visade sig ge olika typer av konsekvenser så som påverkan på ekosystem och framkomlighet, konsekvenser för markägare och andra juridiska frågor.

Tryckbanken bestod, som tidigare nämnt, av stenkross som placerades i släntens underkant på älvbotten, se figur 9 alternativt bilaga 4. Lösningen gav en mycket god mothållande effekt. Däremot så krävs en vidare fundering och utvärdering om hur lämpligt det är att fylla upp älven med stenkross i kanterna. Förändringen av älvens geometri med stenkross kan försvåra sjöfartens framkomlighet i området beroende på utformning. Tryckbanken verkar som en mothållande last för slänten ovan älven, men är en pådrivande last för slänten under älven som ej undersökts i arbetet. Stenkrossen skulle därmed kunna leda till att skred istället sker i en annan lokal slänt i sektionen än den som analyserats. Även motfyllnaden i figur 10 kan medföra samma problematik.

Avschaktning visade sig vara väldigt effektivt i vald slänt, dock var massan från avschaktningen relativt stor i förhållande till slänten. Massan som i släntkrönet behövde schaktas bort innefattade områden som idag delvis består av åkermark. Att ta bort åkermark blir problematiskt juridiskt men också för den markägare som använder och utnyttjar marken till sin försörjning. Avschaktning är ett effektivt alternativ, men begränsas snabbt när marken används som exempelvis åkermark eller innefattar övrig bebyggelse. Med avschaktning tillkommer även problem vid genomförande. Om slänten ej har tillräckligt med stabilitet riskerar den att falera under själva schaktningen även om detta kandidatarbete ej tagit detta i beaktning vid modellering.

Beroende på vilken åtgärd som tillämpas påverkas utseendet på slänten och omkringliggande natur i olika stor utsträckning. Utseendet kan framförallt vara viktigt i områden där människor bor eller vistas, vilket gör att mer hänsyn till det estetiska perspektivet bör tas där. Förslagsvis skulle plantering av växter kunna tillämpas som substitut till exempelvis jordspikning och geotextil eftersom det potentiellt kan generera likvärdig hållfasthetsökning i de övre jordlagren samt medföra likvärdigt

erosionsskydd. Om kraftigare åtgärder behöver vidtas i djupare jordlager vid slänter med kohesionsjord blir mikropålning i kombination med geonät eller kokosnät mer aktuellt, eftersom växtlighet främjas i geonätets maskor. I fall där schaktning vidtas som åtgärd kan plantering av växtlighet användas som komplement. Växtligheten bidrar då till att släntens utseende till viss del återställs samt ger ökade förutsättningar för biologiskt mångfald i området. Ett avschaktat släntkrön utan någon vegetation medför istället en sämre miljö för både rekreation, floran och faunan.

### 7.1.1 Miljöpåverkan

Som tidigare nämnt är användning av växter ett miljövänligt alternativ för ytlig stabilisering av slänter och ger god inverkan på de lokala förhållandena. Växterna medför inga negativa konsekvenser för naturen och miljön kring slänten.

När bergkross används till tryckbankar används generellt större massor än vid erosionsskydd. Motfyllnaden eliminerar bland annat eventuell växtlighet i slänten, vilket medför negativa konsekvenser för djur och natur i närområdet. En tryckbank som även sträcker sig ned i älven, dvs under vattenytan, minskar älvens geometri och kan i vissa fall leda till en höjning av vattenytan. Däremot är en höjning av vattenytan ej relevant i Göta älv eftersom vattennivån regleras kontinuerligt med slussar. Att helt fylla markområde eller älvbotten med stenkross är sammanfattningsvis ingen hållbar lösning för miljön.

En annan stabiliserade lösning som visade sig påverka miljön och naturen negativt var kalkcementpelare. Processen att ta fram materialet för KC-pelare är både energikrävande och genererar stora mängder koldioxidutsläpp. Med anledning till detta bör större vikt läggas vid andra tekniska lösningar om möjligt i redan instabila slänter. KC-pelare visade sig även potentiellt vara problematisk eftersom det belastar slänten negativt under installationen.

## 7.2 Oväntade iakttagelser

Det var flera saker som visades sig vara utmärkande för undersökningen. En utmärkande iakttagelse var att avschaktning, som nämnts tidigare gav ett väldigt bra resultat för säkerhetsfaktorn. En annan sådan upplysning var att KC-pelare var både svåra att modellera i Slope/W, men också att effekten var lägre än förväntat. Flera exempel på svårmodellerade lösningar var geotextil, pelare, mikropelare, geonät och växtlighet. För flera av lösningarna beror detta på bristande litteratur, otillräckliga standarder och svårdimensionerade värden, speciellt när det kommer till hållfasthet. Trots att det finns omfattande litteratur och mycket forskning, innehöll de sällan exakta siffror och värden att tillämpa i modelleringen för att ge en representativ bild av verkligheten.

Något som dock var intressant var att slänten inte gick till skred trots den mycket låga säkerhetsfaktorn i den befintliga slänten. Detta tyder på att den växtlighet som finns i slänten idag förmodligen har en inverkan på släntens stabilitet. Dock togs växtlighetens inverkan inte i beaktande eftersom det var för komplext att mäta och bedöma för detta kandidatarbete. Även kapillärkraft var en faktor som kan ha varit bidragande till att slänten inte gick till skred, men det har inte tagits hänsyn till i analysen för den befintliga slänten. Även andra parametrar som nämnts i diskussionen kan vara orsaken till den låga säkerhetsfaktorn.

Att sänka portrycket i slänten för att förbättra säkerhetsfaktorn i en kombinerad analys fick inte det resultat som väntades. I nästintill samtlig litteratur där portryckssänkning, alternativt dränering, nämnts som en effektiv lösning. Däremot gav det endast en ytterst liten förbättring vilket i detta fall tros bero på glidytnas stora djup. I en grundare glidyta hade effekten av portryckssänkning troligtvis varit större.

Något som också var oväntat var att det krävdes mer omfattande implementering av lösningarna än förväntat för att ge effekt på säkerhetsfaktorn i modellen. Exempelvis behövde stora delar av slänten schaktas bort och det krävdes även stora mängder KC-pelare för att se en tydlig stabilitetsförändring.

### 7.3 Felkällor

De flertalet antaganden som gjorts, samt utvärderingen av materialdatan och jordlagerföljden kan också anses vara felkällor. Det faktum att analysen av den befintliga slänten resulterar i  $SF < 1$  gör att det går att konstatera att ett eller flera antaganden är felaktiga, då det i verkligheten innebär att skred i slänten redan borde inträffat. Speciellt kan bristen på tid och indata vid framtagningen av beräkningsmodellen och jordlagerföljden ha gjort att det finns svagheter i modellen.

En ytterligare felkälla som har sin grund i att det inte fanns tillräckligt med data är risken för skred vid släntfoten som jobbar sig uppåt genom att generera ytterligare skred. Detta är något som inte utvärderats eftersom älvbottnens materialparametrar endast är baserade på ett borrhål och släntprofilen i släntfoten är därmed extra osäker.

Bristfällig dokumentation och standardisering av de tekniska lösningarnas materialparametrar har lett till att flera antaganden gjorts. Dessa antaganden utgör en stor felkälla i modelleringen i Slope/W och kan innebära att resultaten är mindre verklighetstrogna.

En annan felkälla som varit ett återkommande problem och som även diskuterats tidigare i diskussionen är begränsningarna i datorprogrammet. Det har varit svårt att modellera bra verklighetstrogna lösningar i Slope/W. Delvis har detta berott på avsaknad av tydliga beskrivningar och standarder hur en del av lösningarna ska implementeras i programmet.

I de lösningar som kombinerades med avschaktning förekommer en felkälla vilken är att schaktvolymen varierar mellan analyserna. Lika stor volym avschaktades i analyserna för tryckbank och motfyllnad. Däremot var volymen inte densamma då vegetation samt KC-pelare analyserades i kombination med avschaktning. Denna metoden valdes för att undersöka om det gick att uppfylla kravet om säkerhetsfaktor snarare än att jämföra metoderna m.a.p. avschaktningsmängd. Därmed så går det inte helt att jämföra effekten av resultaten av kombinationen avschaktning/KC-pelare med avschaktning/vegetation utan att ta avschaktningsmängden i beaktande.

Till sist är mycket litteratur för geoteknik ofta gammal vilket också kan ses som en felkälla. Något som dock framkommit är att även nyare rapporter och vetenskapliga artiklar refererar till dessa äldre källor. Detta tros beror på att det fortfarande är aktuell och relevant information som står i källorna vilket är anledningen till varför dessa ändå anses lämpliga att använda.

#### 7.4 Förslag på fortsatta studier

Det var flera tekniska lösningar som hade varit intressanta att analysera i Slope/W eller andra datorprogram, men som inte var genomförbara. Dels fanns inte tillräckligt med tid för att göra en tillräckligt bra beräkningsmodell, men även begränsningar i programmet och brister i litteraturen var bidragande. Inom samma kategori hör vidare studier om vegetations påverkan på släntstabiliteten. Det är också en analys som hindrats av tid och begränsningar i programvaran. Det finns redan idag mycket pågående forskning inom området.

Även om ekonomifrågan är stor och komplex så är det något som alltid är en del av ett projekt. Ekonomi kommer alltid spela en stor roll för beslut som tas inom olika projekt. Det valdes från början att ekonomiaspekten inte skulle behandlas i den här rapporten. Ekonomin hade dock varit en intressant fortsatt studie och därmed undersöka hur mycket ekonomin spelar roll vid val av teknisk lösning samt kostnaderna för specifika åtgärder.

Det finns två aspekter med kvicklera som gjort att det inte har behandlats i denna rapporten. Dels tar inte Slope/W hänsyn till det, dels är kvicklera väldigt godtyckligt och något som det inte finns exakta värden för. Det hade varit intressant med en studie om hur kvickleran påverkar val av teknisk lösning samt hur ett skred i området skulle se ut med hänsyn till kvickleran.

En intressant fortsatt studie eller fördjupning av studien är att göra en bättre, mer verklighetstrogen modell på den befintliga slänten. Alltså att göra en beräkningsmodell där hänsyn tas till den vegetation som finns idag och även kapillära krafter m.m. Ytterligare förbättringar på beräkningsmodellen skulle kunna vara att försöka få till en släntgeometri som mer motsvarar den i verkligheten. Även andra antagande och beslut som tagits i samband med framställningen av jordprofilen skulle kunna

undersökas vidare för att göra mer vetenskapligt grundade antaganden.

Ett problem som upptäcktes i litteraturstudien var att vid installation av till exempel pålar och KC-pelare försämras släntens stabilitet tillfälligt. Detta skulle med högsta sannolikhet innebära att en redan ostabil slänt går till skred under installationen av en förstärkningsåtgärd. Eftersom genomförbarheten var en avgränsning för detta kandidatarbete är det här inget som undersökts närmare. Som en fortsatt studie skulle tillvägagångssättet för hur man förhindrar att detta inträffar kunna undersökas vidare.

## 8 Slutsats

Området i Smådala löper risk för skred vilket både litteraturstudien och datoranalyserna styrker trots osäkerheter i jordprofilen. Faktorer som riskerar att påskynda skred är erosion och annat som förändrar geometrin, bebyggelse och annan typ av pålastning. Även förändringar i vattennivån i intilliggande vattendrag samt enskilda parametrar så som skjuvhållfasthet, tunghet och portryck, kan utlösa skred.

Avschaktning i kombination med tryckbank respektive motfyllnad var som väntat efter litteraturstudien väldigt effektiv i aktuell slänt. När avschaktning kombinerades med andra lösningar var det avschaktningen som bidrog med störst inverkan på stabilitetsförbättringen. Alltså tyder det på att övriga lösningar inte fungerade effektivt eller att det inte gick att ta fram en bra modell på dem i programmet. Eftersom erosion är en viktig faktor som påverkar släntens stabilitet över tid är det viktigt att implementera erosionskydd. Det mest miljömässigt hållbara erosionskyddet är plantering av vegetation i slänten som även ger yttlig jordförstärkning.

## Referenser

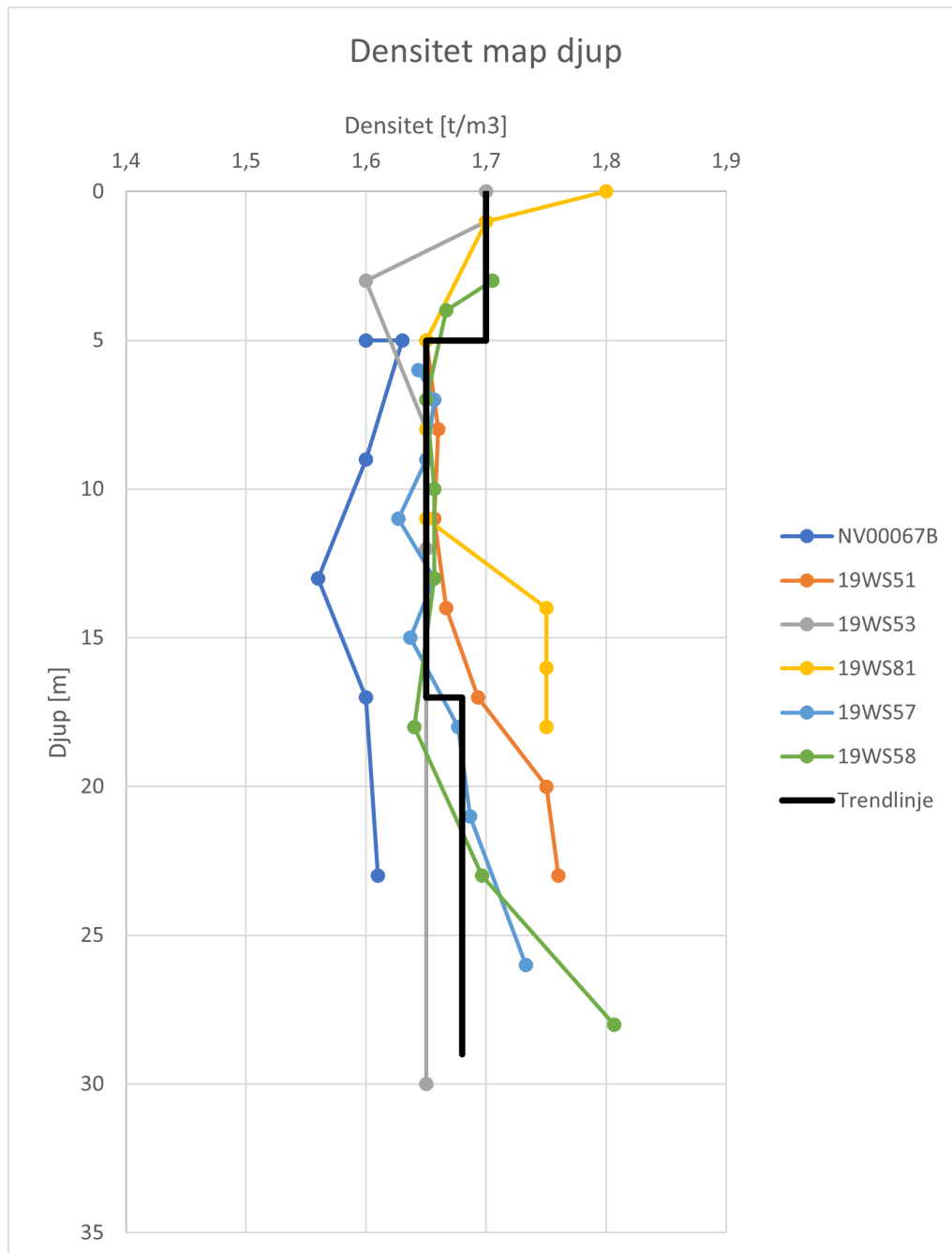
- Alam, S., Banjara, A., Wang, J., B. Patterson, W. & Baral, S. (2018). Novel Approach in Sampling and Tensile Strength Evaluation of Roots to Enhance Soil for Preventing Erosion. *Open Journal of Soil Science*, 8(12). <https://doi.org/10.4236/ojss.2018.812024>
- Bergström, F. & Alaydi, K. (2020). *Delegationen för Göta älv-Fördjupad stabilitetsutredning PM GEOTEKNIK FÖRDJUPAD STABILITETSUTREDNING* (tekn. rapport).
- Biswas, A. & Krishna, A. M. (2017). Geocell-Reinforced Foundation Systems: A Critical Review. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3, 17. <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0093-7>
- Castanon-Jano, L., Castro-Fresno, D., Blanco-Fernandez, E. & Carpio-Garcia, J. (2021). Selection of membranes and linking method in slope stabilization systems for the reduction on the installation time using multi-criteria decision analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3471–3484. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2021.03.010>
- Duncan, M., Wright, S. & Brandon, T. (2014). *Soils Strength and Slope Stability* (2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781351052740>
- Edstam, T. (1997). *Jordförstärkning 'Utländska metoder'. En litteraturstudie avseende metoder som sällan används i Sverige idag* (tekn. rapport). Statens geotekniska institut. Linköping. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300366/FULLTEXT01.pdf>
- Erlandsson, M. (2010). *Miljödata för krossprodukter och naturgrus* (tekn. rapport). IVL Svenska Miljöinstitutet AB. Stockholm.
- GEO-SLOPE International Ltd. (u. å). Stability Modeling with GeoStudio. <http://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/books/9/1/SLOPE%20Modeling.pdf>
- Haglund, E. & Nilsson, E. (2001). *Kalk och kalkcementpelare – Jämförelse mellan laboriestedabilisering och pelarinstallation* (tekn. rapport). Luleå Tekniska Universitet. Linköping.
- Holtz, R. D. & Schuster, R. L. (1996). LANDSLIDES: INVESTIGATION AND MITIGATION. Chapter 17 STABILIZATION OF SOIL SLOPES. *Transportation Research Board Special Report*, (247), 439–473.
- IEG. (2010). *Rapport 4:2010 Tillståndbedömning/klassificering av naturliga slänter och slänter med befintlig bebyggelse och anläggningar* (tekn. rapport). Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik. Stockholm.
- Klingberg, F., Pässe, T. & Levander, J. (2006). *Bottenförhållanden och geologisk utveckling i Göta älv* (tekn. rapport). Sveriges geologiska undersökning. [https://gis.swedgeo.se/dokument/SGU\\_K43.PDF](https://gis.swedgeo.se/dokument/SGU_K43.PDF)
- Knappett, J. & Craig, R. F. (2019). *Craig's Soil Mechanics*. <https://doi.org/10.1201/9781351052740>
- Krahn, J. (2003). The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3). <https://doi.org/10.1139/t03-024>

- Kumar, J. S., Nusari, M. S., Purushotam, D., Prasad, A. I. & Rajyaswori, S. (2021). Effectiveness of geocell wall, geogrid and micropile anchors for mitigation of unstable slopes. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/S40677-021-00185-Z/TABLES/2>
- Lantmäteriet. (2022). Smådala, SWEREFF99TM RH2000, flygfoto.
- Larsson, J., Dahlin, E., Svensson, J. & Olofsson, M. (2015). *Jordtryck och stödkonstruktioner vid schakt* (tekn. rapport). Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper* (tekn. rapport).
- Larsson, R., Sällfors, G. & Eriksson, L. (2007). *Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord* (tekn. rapport). Linköping. <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i3.pdf>
- Lundström, K. (2016). *Stabilisering av bullervall med ingenjörbiologiska metoder* (tekn. rapport). Trafikverket. Linköping.
- Marxmeier, N. & Carlsten, P. (2000). *VARIA 491 - Jordspikning. Tillämpningar, projektering och utförande* (tekn. rapport). Statens geotekniska institut (SGI). Linköping. <http://www.sgi.geotek.se>
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). (2013). Åtgärdskalender vid ras, skred och slamströmmar. 2. <https://rib.msb.se/filer/pdf/27281.pdf>
- Patel, A. (2019). *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01307-9>
- Rankka, K. (2002). *Vegetation som förstärkningsmetod* (tekn. rapport). SGI. Linköping.
- Rydberg, T. & Andersson, R. (2003). *Miljöeffektsbedömning (LCA) för markstabilisering* (tekn. rapport). Svensk Djupstabilisering. Linköping.
- Räddningsverket. (2008). *Förebyggande åtgärder mot skred, ras och erosion – goda exempel* (tekn. rapport). Räddningsverket, Olycksförebyggande avdelning. Karlstad.
- Schoning, K. (2016). *Saltvattenavsatta leror i Sverige med potential för att bilda kvicklera* (tekn. rapport). Sveriges geologiska undersökning. [www.sgu.se](http://www.sgu.se)
- SGI. (2007). *Deponiers stabilitet Vägledning för beräkning* (tekn. rapport). Statens geotekniska institut. Linköping.
- SGI. (2012a). *Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat Slutrapport Del 2 - kartläggning* (tekn. rapport). Statens geotekniska institut. Linköping. [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)
- SGI. (2012b). *Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat. Slutrapport del 1 - samhällskonsekvenser* (tekn. rapport). Statens Geotekniska Institut. Linköping.
- SGI. (2019). *Skredrisker i ett förändrat klimat, Prioritering för kartering, SGI Publikation 4* (tekn. rapport). Statens geotekniska institut. Linköping.
- Skredkommissionen. (1996). *Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter* (tekn. rapport). Ingenjörsvetenskapakademien. Linköping.
- Statens geotekniska insitut. (2020). Surte. <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/ras-och-skred/fakta-om-svenska-skred-och-ras/surte/>

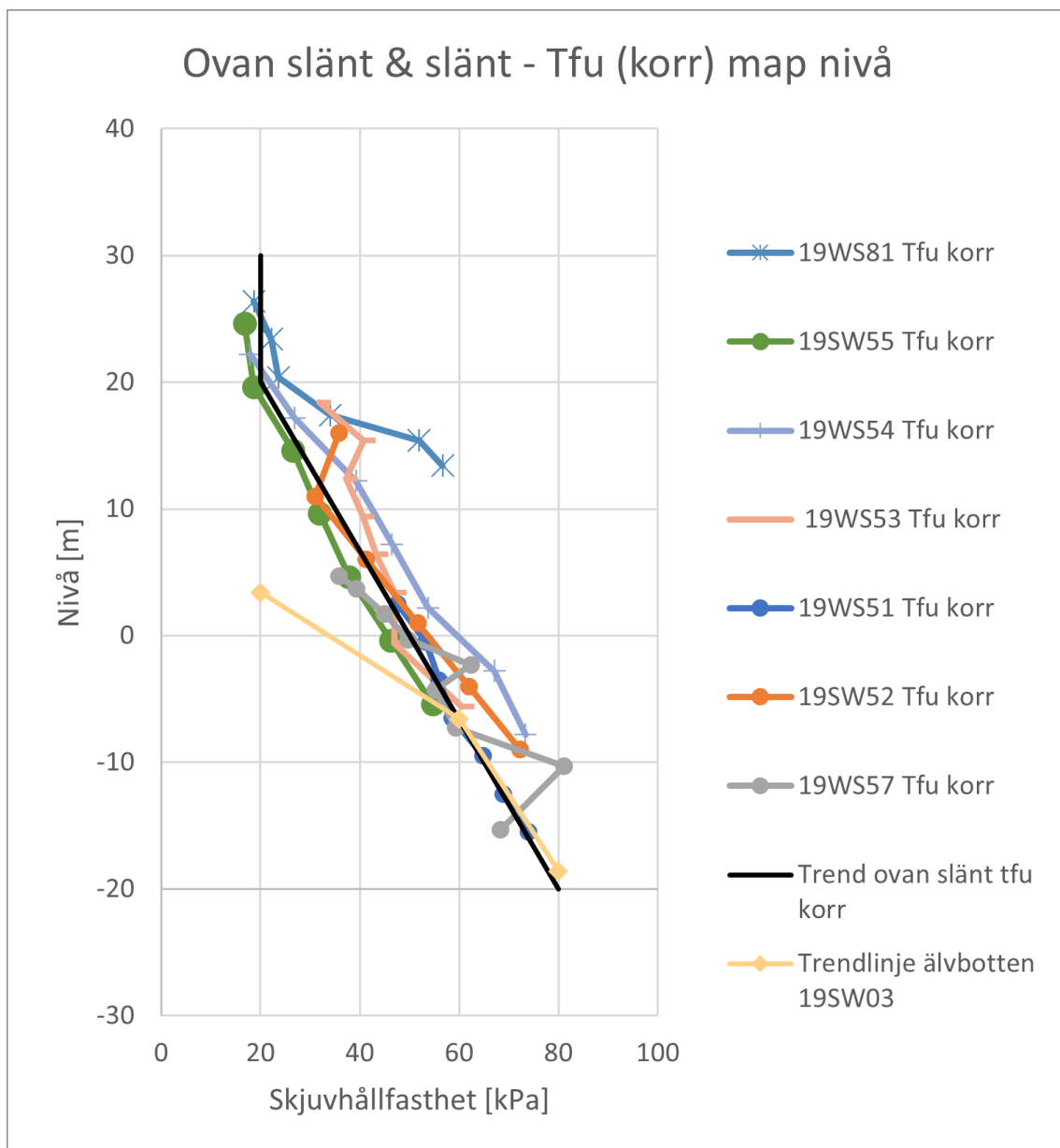
- 
- Statens geotekniska institut. (2020). Göta. <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/ras-och-skred/fakta-om-svenska-skred-och-ras/surte/>
- Statens geotekniska institut (SGI). (2022). Jords hållfasthet - SGI. <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/skjuvhallfasthet/>
- Sun, S. W., Zhu, B. Z. & Wang, J. C. (2013). Design method for stabilization of earth slopes with micropiles. *Soils and Foundations*, 53(4), 487–497. <https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2013.06.002>
- Svenska Geotekniska Föreningen. (2004). *Rapport 2:2004 Nordisk Vägledning för Armerad Jord och Jordspikning* (tekn. rapport). Linköping. <https://docplayer.se/5298753-Rapport-2-2004-nordisk-vagledning-for-armerad-jord-och-jordspikning.html>
- Svenska institutet för standarder (SIS). (2015). Utförande av geokonstruktioner- Mikropålar. [www.sis.se](http://www.sis.se)
- Sveriges geologiska undersökning. (u. å). Stora skred i Sverige. <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/stora-skred-i-sverige/>
- Sällfors, G. (2012). *Geoteknik* (Vol. 5:e upplagan). Cremona Förlag.
- Trafikverket. (2016). *Krav Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13 version 2* (tekn. rapport). Stockholm.
- Zhu, D. Y., Lee, C. F. & Jiang, H. D. (2003). Generalised framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis. *Geotechnique*, 53(4). <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.4.377>

# Appendix

## Bilaga 1 Trendlinje för densitet



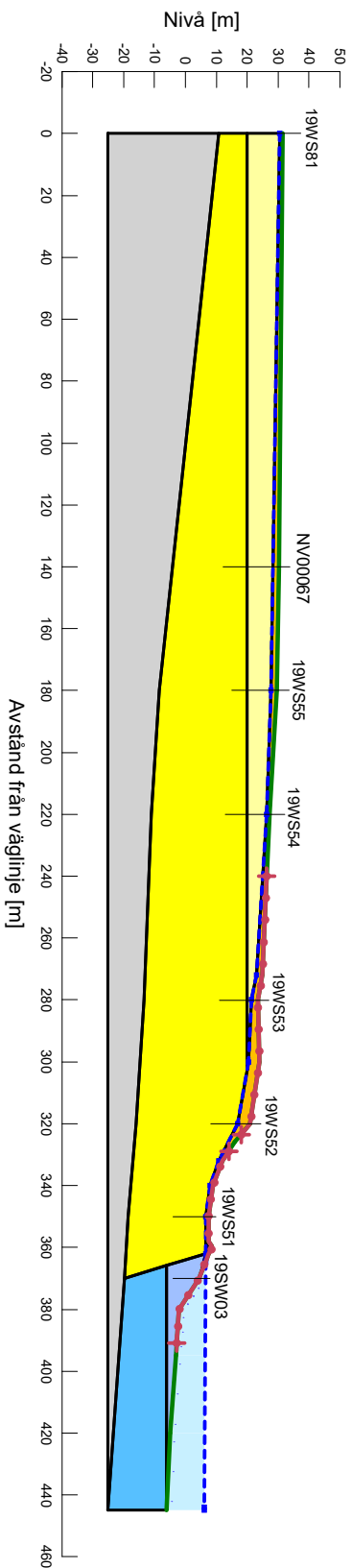
## Bilaga 2 Korrigerad skjuvhållfasthet



## Bilaga 3 Jordlagerföljd sektion V18/535

### Jordlagerföljd Sektion V18/535

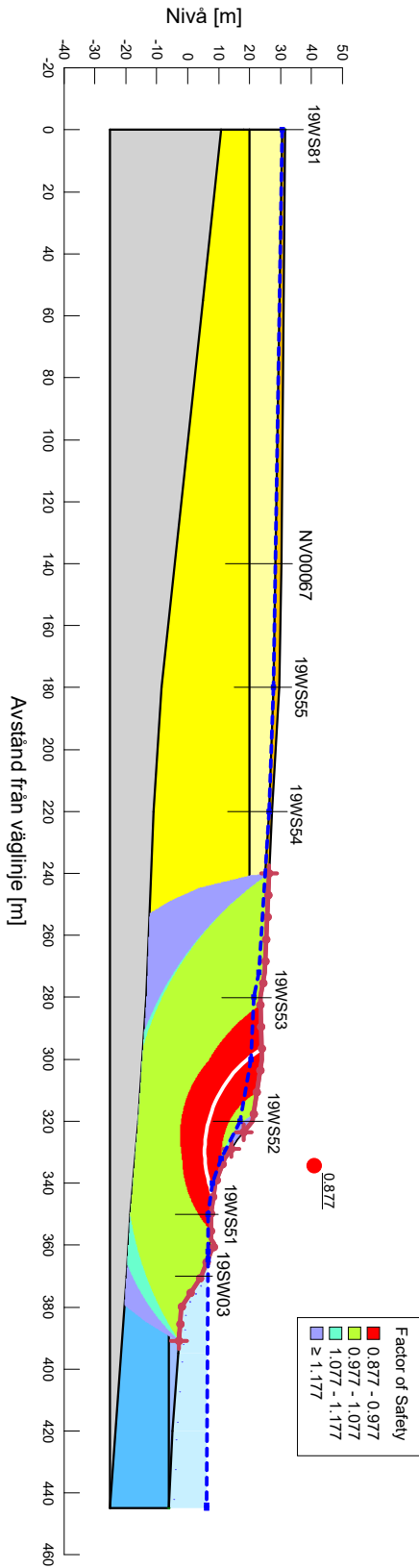
Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	Cohesion (kPa)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)
Grey	Berg	Bedrock (Impenetrable)									
Purple	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20						0	45	0
Yellow	Lera 1	Undrained (Phi=0)	16.5								
Yellow	Lera 2	S=f(datum)	16.8	20	1.5	80	20				
Light Blue	Lera älv 1	S=f(datum)	16.5	20	3.2	60	6.5				
Light Blue	Lera älv 2	S=f(datum)	17.2	20	1.5	80	20				
Orange	Torskorpa	Undrained (Phi=0)	17						20		



## Bilaga 4 Kombinerad analys för sektion V18/535

### Kombinerad analys Sektion V18/535

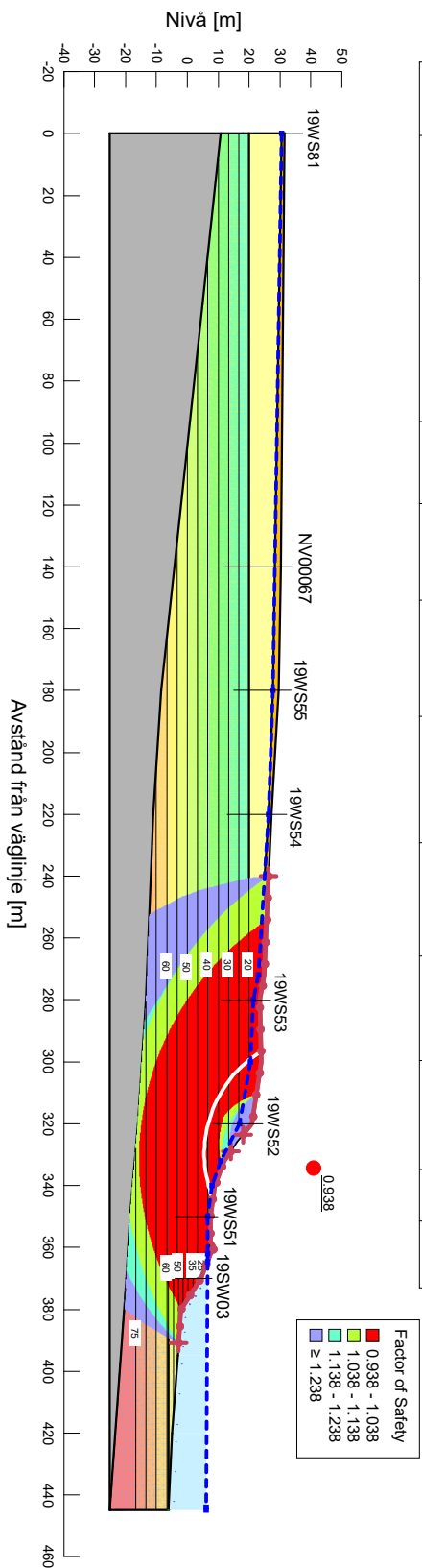
Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (°)	C-Datum (kPa)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Cu-Datum (kPa)	Cu-Top of Layer (kPa)	Cu-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	C/Cu Ratio	Datum (Elevation) (m)	Phi-B (°)
Grey	Beig	Bedrock (Impermeable)												
Purple	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20	0	45									0
Yellow	Lera 1	Combined, S=f(depth)	16.5		30		2	0		20	0	0.1		
Yellow	Lera 2	Combined, S=f(datum)	16.8		30			0.15		20	1.5	0.1	20	
Light Blue	Lera älv 1	Combined, S=f(datum)	16.5		30			0.32		20	3.2	0.1	6.5	
Light Blue	Lera älv 2	Combined, S=f(datum)	17.2		30			0.15		20	1.5	0.1	20	
Orange	Torskorpa	Combined, S=f(depth)	17		35		2	0		20	0	0.1		



## Bilaga 5 Odränerad analys för sektion V18/535










### Odränerad analys Sektion V18/535

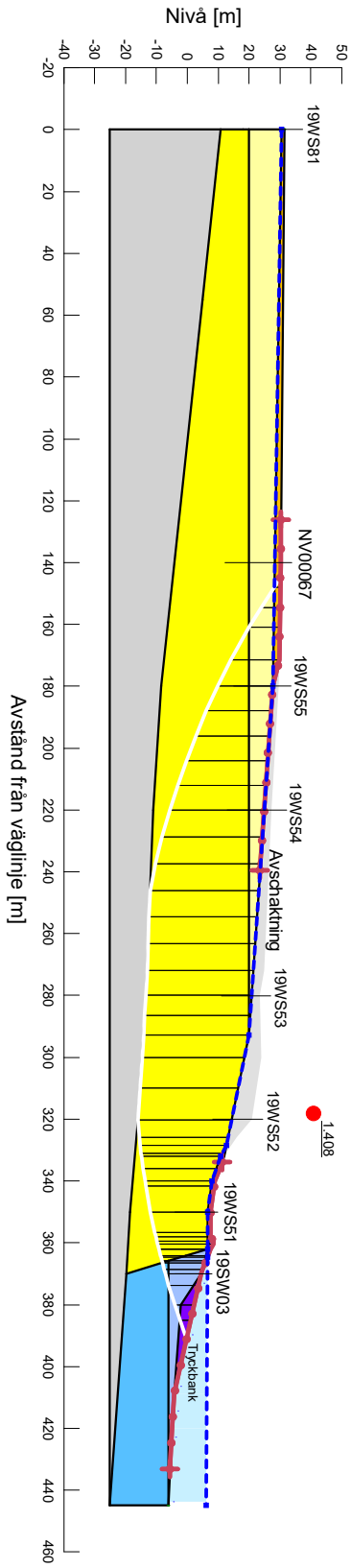
Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	Cohesion (kPa)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)
Grey	Berg	Bedrock (Impenetrable)									
Purple	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20						0	45	0
Yellow	Lera 1	Undrained (Phi=0)	16.5								
Light Yellow	Lera 2	S=f(datum)	16.8	20	1.5	80	20				
Light Blue	Lera älv 1	S=f(datum)	16.5	20	3.2	60	6.5				
Blue	Lera älv 2	S=f(datum)	17.2	20	1.5	80	20				
Orange	Torskorpa	Undrained (Phi=0)	17						20		



## Bilaga 6 Odränerad analys för avschaktning och tryckbank

Odränerad analys sektion V18/535  
Avschaktning och tryckbank

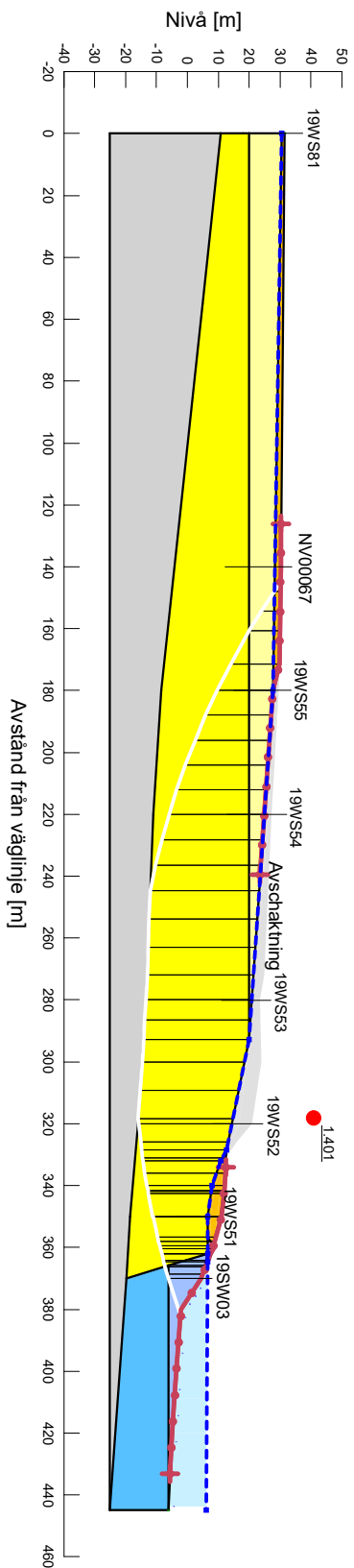
Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	Cohesion (kPa)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)
	Avschaktning	(None)									
	Berg	Bedrock (Impermeable)									
	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20					0		45	0
	Lera 1	Undrained (Phi=0)	16.5					20			
	Lera 2	S=(datum)	16.8	20	1.5	80	20				
	Lera älv 1	S=(datum)	16.5	20	3.2	60	6.5				
	Lera älv 2	S=(datum)	17.2	20	1.5	80	20				
	Torrskorpa	Undrained (Phi=0)	17					20			
	Tryckbank	Mohr-Coulomb	20					0		42	0



## Bilaga 7 Odränerad analys för avschaktning och motfyllnad

### Odränerad analys för avschaktning och motfyllnad, Sektion V18/535

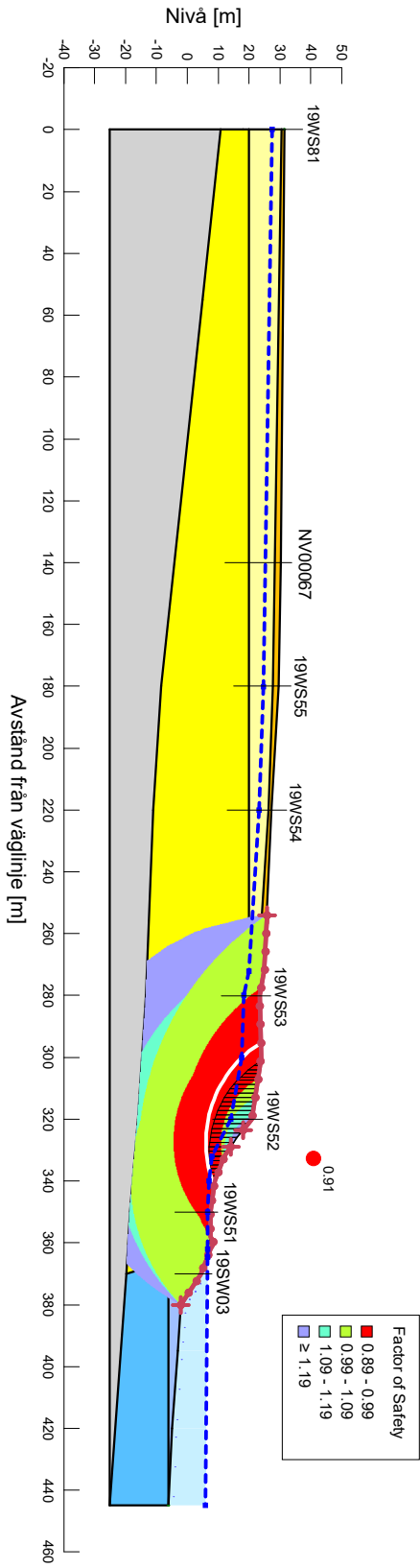
Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	Cohesion (kPa)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)
□	Avschaktning	(None)									
□	Berg	Bedrock (Imperetrable)									
□	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20					0		45	0
□	Lera 1	Undrained (Phi=0)	16.5							20	
□	Lera 2	S=(datum)	16.8	20	1.5	80	20				
□	Lera älv 1	S=(datum)	16.5	20	3.2	60	6.5				
□	Lera älv 2	S=(datum)	17.2	20	1.5	80	20				
□	Torrskorpa	Undrained (Phi=0)	17						20		



## Bilaga 8 Odränerad analys för portryckssänkning

### Kombinerad analys med portryckssänkning, Sektion V18/535

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (°)	C-Datum (kPa)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Cu-Datum (kPa)	Cu-Top of Layer (kPa)	Cu-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	C/Cu Ratio	Datum (Elevation) (m)	Phi-B (°)
Grey	Berg	Bedrock (Impenetrable)												
Purple	Erosionskydd	Mohr-Coulomb	20	0	45									0
Yellow	Lera 1	Combined, S=f(depth)	16.5		30		2	0		20	0	0.1		
Yellow	Lera 2	Combined, S=f(datum)	16.8		30			0.15	20		1.5	0.1	20	
Light Blue	Lera älv 1	Combined, S=f(datum)	16.5		30			0.32	20		3.2	0.1	6.5	
Light Blue	Lera älv 2	Combined, S=f(datum)	17.2		30			0.15	20		1.5	0.1	20	
Orange	Torskorpa	Combined, S=f(depth)	17		35		2	0		20	0	0.1		

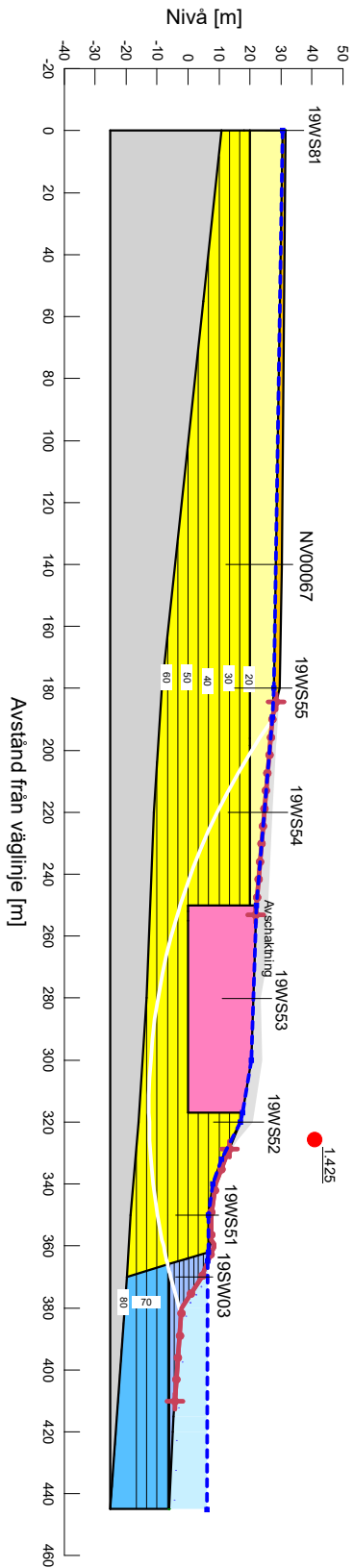




## Bilaga 10 Odränerad analys för KC-pelare i kombination med avschaktning

### Odränerad analys för KC-pelare samt avschaktning, sektion V18/535

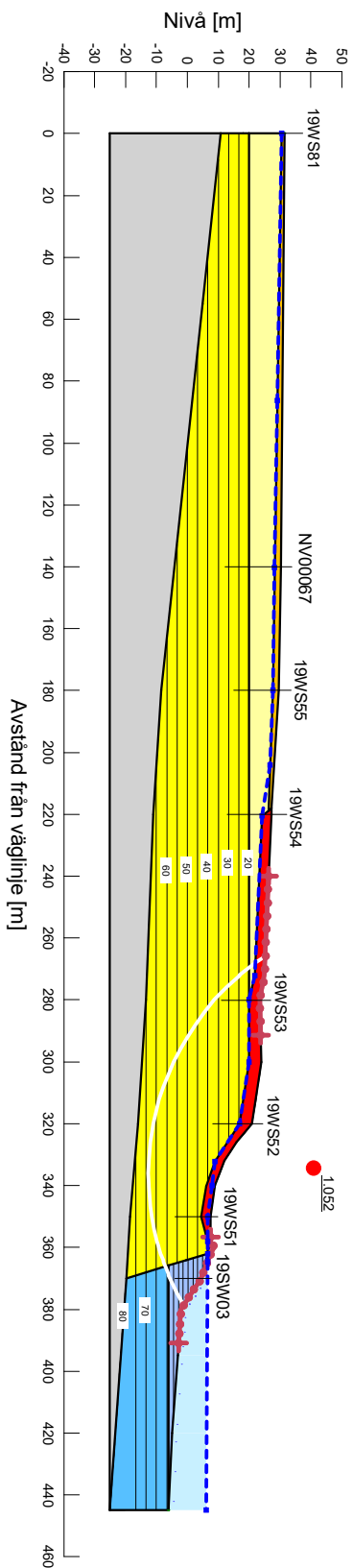
Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	Cohesion (kPa)	Cohesion <sup>1</sup> (kPa)	Phi <sup>1</sup> (°)	Phi-B (°)
Grey	Berg	Bedrock (Impermeable)									
Purple	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20					0		45	0
White	Inget	(None)									
Pink	KC	Undrained (Phi=0)	16.6					100			
Yellow	Lera 1	Undrained (Phi=0)	16.5					20			
Yellow	Lera 2	S=f(datum)	16.8	20	1.5	80	20				
Light Blue	Lera älv 1	S=f(datum)	16.5	20	3.2	60	6.5				
Light Blue	Lera älv 2	S=f(datum)	17.2	20	1.5	80	20				
Orange	Torrskorpa	Undrained (Phi=0)	17					20			



## Bilaga 11 Odränerad analys för vegetation till 3 m djup










Odränerad analys för vegetation till 3 m djup, sektion V18/535

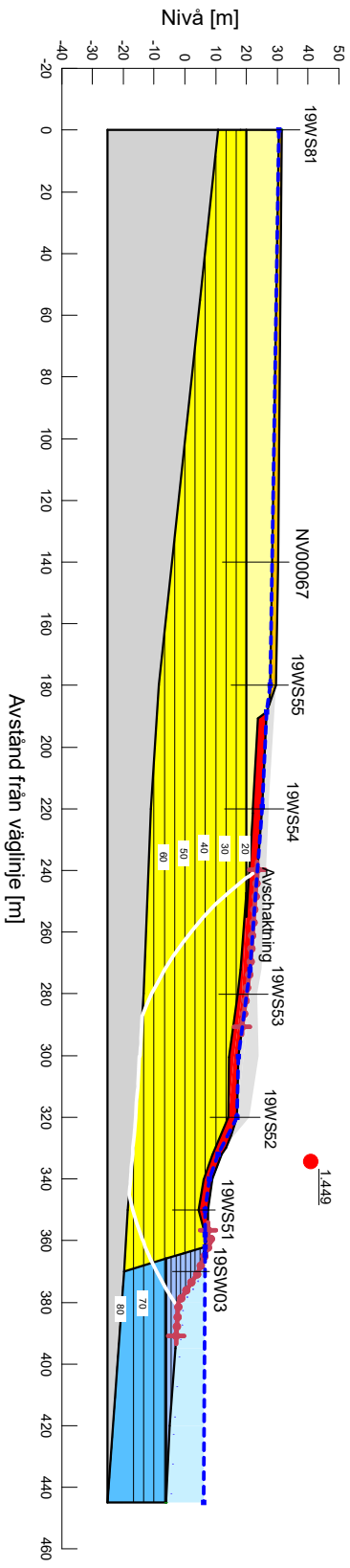
Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	Cohesion (kPa)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)
Grey	Berg	Bedrock (Impenetrable)									
Purple	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20						0	45	0
Yellow	Lera 1	Undrained (Phi=0)	16.5					20			
Yellow	Lera 2	S=f(datum)	16.8	20	1.5	80	20				
Light Blue	Lera älv 1	S=f(datum)	16.5	20	3.2	60	6.5				
Light Blue	Lera älv 2	S=f(datum)	17.2	20	1.5	80	20				
Orange	Torsskorpa	Undrained (Phi=0)	17					20			
Red	Vegetation	Undrained (Phi=0)	17					70			



## Bilaga 12 Odränerad analys för vegetation till 3 m djup i kombination med avschaktning

### Odränerad analys för vegetation till 3 m djup samt avschaktning, sektion V18/535

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	Cohesion (kPa)	Cohesion <sup>1</sup> (kPa)	Phi <sup>1</sup> (°)	Phi-B (°)
	Avschaktning	(None)									
	Berg	Bedrock (Impenetrable)									
	Erosionsskydd	Mohr-Coulomb	20					0		45	0
	Lera 1	Undrained (Phi=0)	16.5								
	Lera 2	S=f(datum)	16.8	20	1.5	80	20				
	Lera älv 1	S=f(datum)	16.5	20	3.2	60	6.5				
	Lera älv 2	S=f(datum)	17.2	20	1.5	80	20				
	Torskorpa	Undrained (Phi=0)	17								
	Vegetation	Undrained (Phi=0)	17						70		



**INSTITUTIONEN FÖR SAMHÄLLSBYGGNAD OCH ARKITEKTUR**

**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2022

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**