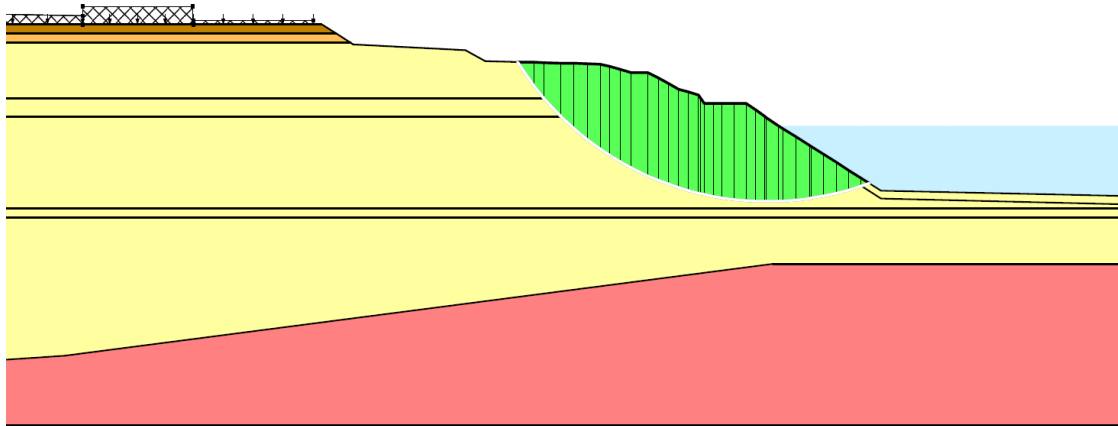




CHALMERS



# Klimatförändringar och dess effekter på stabiliteten för naturliga slänter

En analys av klimatförändringarnas potentiella påverkan på två slänter längs Göta älv

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet för samhällsbyggnad

Oskar Ahlgren  
Sofia Björkman  
Alexandros Pardali Moustakas  
Filippa Stridsman

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2025

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



KANDIDATARBETE ACEX11-25-35

## Klimatförändringar och dess effekter på stabiliteten för naturliga slänter

En analys av klimatförändringarnas potentiella påverkan på två  
slänter längs Göta älv

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet för samhällsbyggnad

Oskar Ahlgren  
Sofia Björkman  
Alexandros Pardali Moustakas  
Filippa Stridsman



**CHALMERS**

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2025

Klimatförändringar och dess effekter på stabiliteten för naturliga slänter  
En analys av klimatförändringarnas potentiella påverkan på två slänter längs Göta  
älv

*Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet för samhällsbyggnad*

© Oskar Ahlgren, Sofia Björkman, Alexandros Pardali Moustakas &  
Filippa Stridsman, 2025.

Handledare: Mats Karlsson  
Examinator: Ayman Abed

Examensarbete 2025  
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Modell av en studerad slänt, sektion 32/255 i Östra Berg.

Skriven i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg 2025

Klimatförändringar och dess effekter på stabiliteten för naturliga slänter  
En analys av klimatförändringarnas potentiella påverkan på två slänter längs Göta älv

*Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet för samhällsbyggnad*

Oskar Ahlgren, Sofia Björkman, Alexandros Pardali Moustakas &  
Filippa Stridsman

## **Sammanfattning**

Detta kandidatarbete undersöker hur förväntade klimatförändringar påverkar stabiliteten hos två representativa slänter i Östra Berg, längs Göta älv där kvicklera förekommer. Genom numerisk stabilitetsmodellering i GeoStudio 2024 med modulerna SLOPE/W och SEEP/W analyseras scenarier med ökad nederbörd och successiv erosion vid släntfoten. Resultaten visar att klimatpåverade förhållanden avsevärt försvagar de redan skredkänsliga slänterna, speciellt när intensiv nederbörd samverkar med erosion. Slutsatsen är att det finns ett behov av att i större omfattning inkludera den påverkan klimatförändringar har i framtida stabilitetsutredningar. Risken för skred kan underskattas om skredriskutredningar enbart utgår från dagens klimat. En ökad kunskap, både kring faktorernas enskilda inverkan och dess samverkan, krävs för att på ett effektivt och precist sätt kunna minimera risken för framtida skred i området.

Climate change and its effects on the stability of natural slopes  
An analysis of the potential impact of climate change on two slopes along the Göta  
River  
*Bachelor's thesis in civil engineering*

Oskar Ahlgren, Sofia Björkman, Alexandros Pardali Moustakas &  
Filippa Stridsman

## **Abstract**

This bachelor's thesis investigates how anticipated climate change impacts the stability of two representative slopes in Östra Berg along the Göta River, where quick clay is present. Through numerical stability modelling in GeoStudio 2024 using the SLOPE/W and SEEP/W modules, scenarios of increased rainfall and progressive toe erosion are analysed. The results demonstrate that climate-influenced conditions substantially weaken these already slide-prone slopes, especially when heavy precipitation coincides with erosion at the slope base. The study concludes that future stability assessments must more comprehensively incorporate the effects of climate change. Landslide risk may be underestimated if analyses rely solely on present-day climatic conditions. A deeper understanding of both the individual factors and their interactions is needed to effectively and accurately minimise the risk of future landslides in the area.

# Innehåll

<b>Figurer</b>	<b>xi</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xix</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>3</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	3
1.1.1 Tidigare skred . . . . .	5
1.1.1.1 Göta 1957 . . . . .	5
1.1.1.2 Tuve 1977 . . . . .	6
1.1.1.3 E6 Stenungsund 2023 . . . . .	6
1.2 Syfte och mål . . . . .	7
1.3 Frågeställningar . . . . .	7
1.4 Avgränsningar . . . . .	8
<b>2 Teori</b>	<b>9</b>
2.1 Göta älvdalen . . . . .	9
2.1.1 Lera och kvicklera . . . . .	10
2.1.2 Risk för skred . . . . .	11
2.1.3 Val av område - Östra Berg . . . . .	11
2.2 Naturliga slänter . . . . .	13
2.2.1 Erosion . . . . .	13
2.2.2 Varför skred uppstår . . . . .	14
2.2.3 Jordens effektivspänningar och skjuvhållfasthet . . . . .	15
2.2.4 Säkerhetsfaktorn . . . . .	17
2.2.5 Krav på säkerhetsfaktorn . . . . .	18
2.3 Klimatförändringar . . . . .	20
2.3.1 Klimatanpassning . . . . .	20
2.3.2 Klimatscenario- prognostisering av framtida nederbörds- mängder . . . . .	21
2.4 Ett förändrat porvattentryck . . . . .	24
2.4.1 Vattencykeln . . . . .	24
2.4.2 Negativa portryck . . . . .	26
2.4.3 Påverkan av icke-stationära nederbördsförhållanden . . . . .	26
2.5 Torra . . . . .	27
2.5.1 Sprickbildning . . . . .	27
2.5.2 Cykler av torra och skyfall . . . . .	28

## Innehåll

2.6	Vegetation . . . . .	28
2.7	Exempel på stabilitetsförbättrande åtgärder . . . . .	29
2.8	Teori för beräkningar i GeoStudio . . . . .	31
2.8.1	Lamellmetoden . . . . .	31
2.8.2	Morgenstern and Price . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Metod</b>	<b>33</b>
3.1	Sektion 32/255 . . . . .	34
3.2	Sektion 31/920 . . . . .	35
3.3	Regninfiltration i SEEP/W . . . . .	36
3.3.1	Nederbörds mängder . . . . .	38
3.4	Erosion i SLOPE/W . . . . .	39
3.4.1	Känslighetsanalys . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>43</b>
4.1	Sektion 32/255 . . . . .	43
4.1.1	Erosion 32/255 . . . . .	44
4.1.2	Regnsimulering 32/255 . . . . .	49
4.1.3	Regnsimulering med erosion 32/255 . . . . .	54
4.2	Sektion 31/920 . . . . .	58
4.2.1	Erosion 31/920 . . . . .	58
4.2.2	Regnsimulering 31/920 . . . . .	61
4.2.3	Regnsimulering med erosion 31/920 . . . . .	65
4.3	Känslighetsanalys för sektion 32/255 . . . . .	69
4.4	Känslighetsanalys för sektion 31/920 . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>73</b>
5.1	Simulering av erosion i SLOPE/W . . . . .	73
5.2	Förändring av nederbörd i SEEP/W . . . . .	74
5.3	Känslighetsanalys . . . . .	76
5.4	Möjliga felkällor . . . . .	78
5.5	Åtgärder . . . . .	79
5.6	Förslag på vidare studier . . . . .	80
5.6.1	En utökad analysomfattning . . . . .	80
5.6.2	Risken för bottenuppträckning . . . . .	80
5.6.3	Konsekvenserna av skyfall . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Slutsats</b>	<b>83</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Kombinerad Analys</b>	<b>I</b>
A.1	Sektion 32/255 . . . . .	I
A.1.1	Regn . . . . .	II
A.1.2	Erosion och regn . . . . .	VII
A.2	Sektion 31/920 . . . . .	X
A.2.1	Erosion . . . . .	XI

A.2.2	Regn . . . . .	XII
A.2.3	Erosion och regn . . . . .	XV

## Innehåll

# Figurer

1.1	Sveriges kartläggning av skredrisker för finkorniga jordar [2]. De röda områdena indikerar på en betydande benägenhet för jordskred. Återgiven med tillstånd. . . . .	4
1.2	Skredet vid Göta [10]. Återgiven med tillstånd. . . . .	5
1.3	Skredet vid Tuve [14]. Återgiven med tillstånd. . . . .	6
1.4	Skredet vid E6 utanför Stenungsund [19]. Återgiven med tillstånd. . .	7
2.1	Utbredningen av ett bakåtgripande skred i kvicklera. Författarnas egna bild. . . . .	10
2.2	Östra Bergs läge inom Lilla Edets kommun. Bakgrundskarta: OSM [27]. Modifierad av författarna. . . . .	11
2.3	Östra Berg skredriskkarta. Röd - Hög risk, Orange - Medel risk, Gul - Låg risk. [26]. Återgiven med tillstånd. . . . .	11
2.4	Östra berg områdesindelning. Bakgrundskarta: OSM [27]. Modifierad av författarna. . . . .	12
2.5	Valda sektioner i Östra Berg. Bakgrundskarta: OSM [27]. Modifierad av författarna. . . . .	12
2.6	Delsektioner av Göta älv [35]. Återgiven med tillstånd. . . . .	13
2.7	Faktorer som påverkar risken för skred [3]. Återgiven med tillstånd. .	15
2.8	Visualisering av skjuvhållfastheten för dränerad och odränerad analys [39]. I figuren används beteckningen $\tau$ , men i rapporten används beteckningen $s$ . Återgiven med tillstånd. . . . .	16
2.9	Kombinerad analys. Den röda linjen visualiserar hur hållfastheten baseras på dränerade parametrar fram till dess att den når gränsen för den odränerade hållfastheten [40]. Återgiven med tillstånd. . . .	17
2.10	Tabell för val av erforderlig säkerhetsfaktor, värdena är riktvärden [43]. Återgiven med tillstånd. . . . .	19
2.11	Beräknad förändring av nederbörd fram till år 2100 enligt RCP 8,5. De röda staplarna representerar mätvärden av nederbörd högre än referensperioden 1971-2000. De blå staplarna representerar mätvärden lägre än referensperioden. Den grå kurvan visar ett sammanvägt värde baserat på flera modeller för det valda utsläppsscenarioet. [49]. Återgiven med tillstånd. . . . .	21

## Figurer

2.12	Beräknad förändring av nederbörd fram till år 2100 enligt RCP 4,5. De röda staplarna representerar mätvärden av nederbörd högre än referensperioden 1971-2000. De blå staplarna representerar mätvärden lägre än referensperioden. Den grå kurvan visar ett sammanvägt värde baserat på flera modeller för det valda utsläppsscenarioet. [52]. Återgiven med tillstånd. . . . .	22
2.13	Vattencykeln för en naturlig slänt. Författarnas egna bild. . . . .	25
2.14	Principillustration av lamellmetoden där slänten delas in i vertikala skivor. [80], Återgiven med tillstånd. . . . .	31
3.1	Flödesschema för metoden i denna studie. Författarnas egna bild. . .	33
3.2	Släntgeometri och materiallager för slänt 32/255. . . . .	34
3.3	Materialparametrar för den odränerade analysen för sektion 32/255. .	34
3.4	Materialparametrar för den kombinerade analysen för sektion 32/255.	35
3.5	Släntgeometri och materiallager för slänt 31/920. . . . .	35
3.6	Materialparametrar för den odränerade analysen för sektion 31/920. .	35
3.7	Materialparametrar för den kombinerade analysen för sektion 31/920.	36
3.8	Förklaring till metod för modellering av regninfiltration med hjälp av SEEP/W. Författarnas egna bild. . . . .	37
3.9	Typslänt med erosionssteg. Författarnas egna bild. . . . .	39
3.10	Släntvinkel för erosionssteg. Författarnas egna bild. . . . .	40
4.1	Utgångsläget för sektion 32/255, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,446 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	45
4.2	Inzoomad vy av den kritiska glidyten för utgångsläget, sektion 32/255, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,446 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	45
4.3	Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 1,117 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	46
4.4	Inzoomad vy av den kritiska glidyten för sektion 32/255, odränerad analys vid 10m erosion. Säkerhetsfaktor: 1,117 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	46
4.5	Utgångsläget för sektion 32/255, kombinerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,225 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	47
4.6	Inzoomad vy av den kritiska glidyten för utgångsläget, sektion 32/255, kombinerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,225 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	47
4.7	Sektion 32/255, kombinerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 0,552 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	48
4.8	Inzoomad vy av den kritiska glidyten för sektion 32/255, kombinerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 0,552 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	48
4.9	Första versionen av slänt 32/255 (SEEP/W). Författarnas egna bild.	50
4.10	Förändring av säkerhetsfaktorn över tid utan torrskorpa (SEEP/W)..	50
4.11	Förändring av säkerhetsfaktorn över tid med torrskorpa (SEEP/W). .	50

4.12	Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 1,010 (SEEP/W). Författarnas egna bild. . . . .	51
4.13	Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 1,010 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	51
4.14	Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,967 (SEEP/W). Författarnas egna bild. . . . .	52
4.15	Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,967 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	52
4.16	Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,870 (SEEP/W). Författarnas egna bild. . . . .	53
4.17	Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,870 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	53
4.18	Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,953. Författarnas egna bild. . . . .	55
4.19	Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,953. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	55
4.20	Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,893. Författarnas egna bild. . . . .	56
4.21	Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,893. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	56
4.22	Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,783. Författarnas egna bild. . . . .	57
4.23	Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,783. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	57
4.24	Utgångsläget för sektion 31/920, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,572 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	59
4.25	Inzoomad vy av den kritiska glidytan för utgångsläget, sektion 31/920, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,572 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	59

## Figurer

4.26	Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 1,447 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	60
4.27	Inzoomad vy av den kritiska glidytan för sektion 31/920, odränerad analys vid 10m erosion. Säkerhetsfaktor: 1,447 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . .	60
4.28	Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,461 (SEEP/W). Författarnas egna bild. . . . .	62
4.29	Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,461 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	62
4.30	Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448 (SEEP/W). Författarnas egna bild. . . . .	63
4.31	Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	63
4.32	Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,377 (SEEP/W). Författarnas egna bild. . . . .	64
4.33	Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,377 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	64
4.34	Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448. Författarnas egna bild. . . . .	66
4.35	Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	66
4.36	Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,427. Författarnas egna bild. . . . .	67
4.37	Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,427. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	67
4.38	Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,376. Författarnas egna bild. . . . .	68
4.39	Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,376. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	68

5.1	En inzoomad bild av Figur 4.12 för att illustrera hur regnet ansamlas vid ytan. Utgångsläge för sektion 32/255 i en odränerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 1,010 (SEEP/W). Författarnas egna bild. . . . .	75
5.2	Förändring av säkerhetsfaktorn över tid utan torrskorpa (SEEP/W)..	76
5.3	Förändring av säkerhetsfaktorn över tid med torrskorpa (SEEP/W)..	76
5.4	Illustration av hur $c_u$ och $c'$ ökar eller minskar med 10% [40]. Modifierad av författarna. . . . .	77
5.5	Skiss av hur sektionen kan se ut i större skala. Illustrerar risken med infiltration av vatten i underliggande morän. Författarnas egna bild. .	80
A.1	Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,645. Författarnas egna bild. . . . .	II
A.2	Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,645. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	II
A.3	Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,625. Författarnas egna bild. . . . .	III
A.4	Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,625. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	IV
A.5	Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,573. Författarnas egna bild. . . . .	V
A.6	Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,573. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	VI
A.7	Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,442. Författarnas egna bild. . . . .	VII
A.8	Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,442. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . .	VII
A.9	Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,424. Författarnas egna bild. . . . .	VIII

## Figurer

- A.10 Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,424. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . . VIII
- A.11 Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,393. Författarnas egna bild. . . . . IX
- A.12 Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,393. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . . IX
- A.13 Utgångsläget för sektion 31/920 i en kombinerad analys. Säkerhetsfaktor: 0,994 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . . XI
- A.14 Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 0,926 (SLOPE/W). Författarnas egna bild. . . . . XI
- A.15 Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Författarnas egna bild. . . . . XII
- A.16 Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . . XII
- A.17 Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,262. Författarnas egna bild. . . . . XIII
- A.18 Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,262. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . . XIII
- A.19 Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Författarnas egna bild. . . . . XIV
- A.20 Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . . XIV
- A.21 Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,124. Författarnas egna bild. XV
- A.22 Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,124. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . . XV

- A.23 Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,131. Författarnas egna bild. . . . . XVI
- A.24 Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,131. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . XVI
- A.25 Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,118. Författarnas egna bild. . . . . XVII
- A.26 Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,118. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild. . . . XVII

Figurer

# Tabeller

2.1	Beräknad regnmängd för RCP4,5 och RCP8,5 för olika klimatperioder. Återkomsttid på 50 år. [54]. Återgiven med tillstånd.	23
2.2	Beräknad regnmängd för RCP4,5 och RCP8,5 för olika klimatperioder. Återkomsttid på 100 år. [54]. Återgiven med tillstånd. . . . .	23
3.1	Indata för nederbörd 2022 till 2024 samt beräknade medelvärden. . .	38
3.2	Beräknad medelnederbörd per månad efter en ökning med 10% respektive 40% [mm/månad] . . . . .	38
4.1	Resultat förändring av säkerhetsfaktor (SF) för slänt 32/255 vid erosion 0-10 m för både odränerad och kombinerad analys . . . . .	44
4.2	Säkerhetsfaktorer för sektion 32/255 utan erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökning på 10% och 40%. . . . .	49
4.3	Säkerhetsfaktorer för sektion 32/255 med 10 meters erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökning på 10% och 40%. . . . .	54
4.4	Resultat förändring av säkerhetsfaktor (SF) för slänt 31/920 vid erosion 0-10 m för både odränerad och kombinerad analys . . . . .	58
4.5	Säkerhetsfaktorer för sektion 31/920 utan erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökning på 10% och 40%. . . . .	61
4.6	Säkerhetsfaktorer för sektion 31/920 med 10 m erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökning på 10% och 40%. . . . .	65
4.7	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuvhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för odränerad analys . . . . .	69
4.8	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % minskning av skjuvhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för odränerad analys . . . . .	69
4.9	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuvhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys . . . . .	70

4.10	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % minskning av skjuhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys . . . . .	70
4.11	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för odränerad analys . . . . .	71
4.12	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % minskning av skjuhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för odränerad analys . . . . .	71
4.13	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys . . . . .	72
4.14	Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 minskning av skjuhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys . . . . .	72

Tabeller

# 1

## Inledning

I detta avsnitt presenteras en bakgrund till projektet, där bland annat några tidigare skred tas upp, följt av frågeställningar, syfte, mål och avgränsningar.

### 1.1 Bakgrund

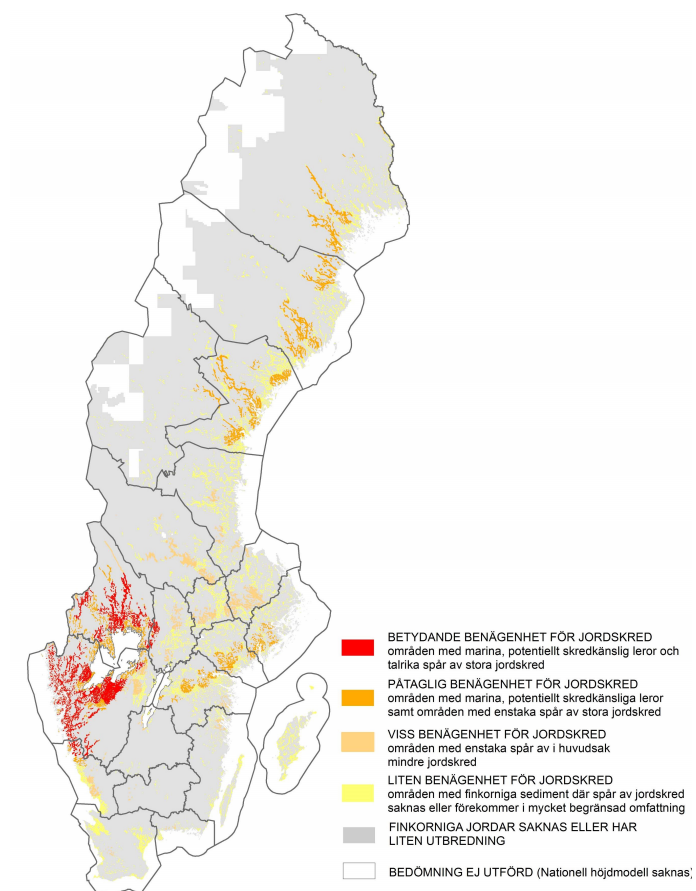
I Sverige larmas räddningstjänsten i genomsnitt 250 gånger per år till händelser som orsakas av översvämningar, ras, skred och slamström [1]. Det vanligaste fallet är översvämningar, men det är viktigt att notera att antalet larm endast utgör en indikation på hur många händelser som inträffar under ett år. I flertalet fall sker det utan att räddningstjänsten kallas in. Om inga förebyggande åtgärder vidtas, uppskattas de direkta skadekostnaderna att nå mellan 20 och 50 miljarder kronor fram till år 2100 [1].

En väsentlig del av de beräknade skadekostnaderna är relaterad till ras och skred. Dessa händelser är dock inte jämnt fördelade över landet. I Figur 1.1 visas var riskerna är som störst. De mest utsatta regionerna är mellersta Norrlandskusten, Östgöta-Sörmlandsområdet och framför allt västkusten, där Göta älvdalen utmärker sig som särskilt känslig [2].

Göta älvdalen bedöms ha de största riskerna för översvämningar och skred i Sverige [1], vilket gör området särskilt intressant att studera. Den höga förekomsten av skred i Västra Götalands län beror huvudsakligen på geologiska förutsättningar, såsom lerjordar. Den täta befolkningen och förekomsten av kritisk infrastruktur, som vägar och järnvägar, bidrar ytterligare till områdets sårbarhet. Ett större skred i Göta älvdalen skulle kunna medföra allvarliga ekonomiska och säkerhetsmässiga konsekvenser för boende och verksamheter.

I Figur 1.1 illustreras endast möjligheten för att skred kan inträffa. För att bedöma sannolikheten krävs djupare utredningar av stabiliteten, dels genom provtagningar på plats samt beräkningar av säkerhetsfaktorer [3]. Risken för skred kan även komma att öka eftersom klimatförändringarnas effekter bli alltmer påtagliga. I takt med att medeltemperaturen stiger smälter isar och havsnivåerna höjs, samtidigt som nederbördsmönstren förändras, med fler extrema skyfall och längre perioder av torka. Dessa klimatrelaterade förändringar riskerar att förstärka befintliga risker för släntstabiliteten och måste därför inkluderas i framtida riskbedömningar [4].

## 1. Inledning



**Figur 1.1:** Sveriges kartläggning av skredrisker för finkorniga jordar [2]. De röda områdena indikerar på en betydande benägenhet för jordskred. Återgiven med tillstånd.

### 1.1.1 Tidigare skred

För att belysa skredriskerna studeras tre betydelsefulla skred i Sverige; Göta år 1957, Tuve år 1977 och skredet vid E6 i Stenungsund år 2023. Genom att studera dessa fall ges en ökad förståelse för de geotekniska och mänskliga faktorer som kan bidra till skred, samt vilka konsekvenser sådana händelser kan få för samhället och dess infrastruktur.

#### 1.1.1.1 Göta 1957

Skredet i Göta inträffade den sjunde juni 1957 vid Göta älvs östra strand i Lilla Edets kommun. Det initiala skredet började som en cirka 130 meter lång spricka [5], men utvecklades till ett omfattande ras som sträckte sig över två kilometer [6]. Den resulterande flodvågen nådde en höjd på mellan fem och åtta meter och orsakade stora materiella skador, särskilt på fabriksområdet som ses i Figur 1.2. Tre personer omkom i händelsen [7] [8]. Markförskjutningen var 7–8 meter i djupled och omkring 60 meter i sidled [7] [9]. Troliga orsaker till skredet var erosion i Göta älvs botten och mänsklig påverkan genom sulfittutsläpp från fabriken, faktorer som tillsammans försvagade markens stabilitet och bidrog till att skredet utlöstes [7].



**Figur 1.2:** Skredet vid Göta [10]. Återgiven med tillstånd.

## 1. Inledning

### 1.1.1.2 Tuve 1977

Tuveskredet inträffade den 30 november 1977 och påverkade ett område på cirka 27 hektar, där 65 bostäder förstördes och nio personer omkom [11] [12]. Före skredet hade mindre markrörelser och sprickbildningar observerats, och det tros ha inletts med en spricka i Tuve Kyrkväg. Ett stort område gled därefter ner mot Kvillebäckens dalgång, där glidytona följde berggrundens lutning. Skredet utvecklades snabbt bakåt och åt sidorna, vilket framgår tydligt av omfattningen i Figur 1.3 [11].

Bland de bakomliggande orsakerna fanns ett kraftigt höstregn som ledde till mättade jordlager och förhöjt porvattentryck, vilket i sin tur minskade jordens stabilitet. Även mänsklig påverkan, såsom kulverteringen av bäcken vid Tuve kyrkväg, kan ha spelat en avgörande roll i skredets uppkomst [13]. Tuveskredet bidrog till en ökad medvetenhet om skredrisker i Sverige, vilket resulterade i att en nationell kartläggning av skredrisker i bebyggda områden inleddes för att förebygga framtida liknande naturkatastrofer [13]. En karta över skredriskkarteringen ses i figur 1.1 ovan.



**Figur 1.3:** Skredet vid Tuve [14]. Återgiven med tillstånd.

### 1.1.1.3 E6 Stenungsund 2023

Skredet vid E6:an nära Stenungsund inträffade den 23 september 2023 och påverkade ett område på cirka 14 hektar, vilket ledde till att motorvägen under en period inte var brukbar [15]. Enligt Statens geotekniska institut orsakades skredet av instabil lera i kombination med belastning från närliggande markarbeten och hög vattenmättnad i jorden [16]. Figur 1.4 visar omfattningen av skadorna på vägbanan och dess omgivningar.

Trafikverket tvingades stänga av vägen, vilket resulterade i omledning av trafik och omfattande störningar i infrastrukturen [17]. Åtgärds- och reparationsarbetet beräknades initialt ta flera månader, men vägbanan kunde återinvigas redan den tredje juli 2024 [18].



**Figur 1.4:** Skredet vid E6 utanför Stenungsund [19]. Återgiven med tillstånd.

## 1.2 Syfte och mål

Syftet med detta arbete är att studera antagna effekter av klimatförändringar på naturliga slänter längs Göta älv. Studien fokuserar särskilt på hur säkerhetsfaktorn mot skred förändras som konsekvens av förändrade klimatparametrar såsom ökad nederbörd.

Målet är att modellera och analysera stabiliteten hos två typslänter under både nuvarande och möjliga framtida klimatförhållanden.

## 1.3 Frågeställningar

1. Vilken inverkan har klimatrelaterade förändringar såsom ökade nederbörds mängder och temperaturvariationer på stabiliteten hos naturliga lerslänter?
2. Hur påverkar erosion vid släntfot och en ökad infiltration av regn säkerhetsfaktorn för de två typslänter som studeras?

## 1. Inledning

### 1.4 Avgränsningar

Denna studie avgränsas till två specifika sektioner av naturliga slänter längs Göta älv. Studien analyserar förväntade klimatförändringar fram till år 2100, förändringar efter denna period inkluderas inte.

GeoStudio 2024 tillämpas för analys av släntstabilitet, där modelleringen innefattar vissa förenklingar. Exempelvis tas ingen hänsyn till påverkan av klimatvariabler såsom lufttemperatur, vindhastighet eller vegetationens påverkan på infiltration och avdunstning. Vidare kan hydrogeologiska antaganden avvika från faktiska förhållandena, eftersom grundvattennivåerna varierar beroende på lokala och säsongsbaserade faktorer. Materialparametrar baseras på platsspecifika värden och antas vara konstanta över tid, även om infiltrationen modelleras som en tidsberoende process. Modelleringen sker i två dimensioner, vilket minskar komplexiteten men innebär att vissa tredimensionella effekter inte fångas. Analysen begränsas till statiska laster. Dynamiska påverkningar, såsom jordskalv, vibrationer eller rörliga laster från exempelvis trafik, inkluderas inte i studien. Simuleringar medför också alltid vissa felmarginaler.

Analysen kollar på två olika klimatscenarier, RCP 4,5 och RCP 8,5, som representerar ett medelhögt respektive högt utsläppsscenario för att belysa olika framtida utvecklingsvägar. Som en förenkling kopplas RCP 4,5 till en 10% ökning och RCP 8,5 till en 40% ökning av dagens medelnederbörd fram till år 2100, baserat på förväntade förändringar i nederbörd. Studien utgår från medelvärden av regnmängder per månad för åren 2022–2024. Kortsiktiga variationer i nederbörd, som extrem väderhändelser, tas inte med i analysen, utan den bygger enbart på månadsvisa medelvärden.

Analysen begränsas till odränerade och kombinerade stabilitetsanalyser. Klimatpåverkan från stabiliseringsåtgärder utvärderas inte i studien, istället redogörs översiktligt för potentiellt lämpliga åtgärder utifrån befintliga förhållanden. Dessa åtgärder analyseras dock inte i detalj.

# 2

## Teori

Detta avsnitt presenterar de teoretiska grunderna för studien, metoder för skredriskbedömning och de geotekniska faktorer som påverkar skredbenägenheten. Vidare behandlas orsaker till skred, samt begreppen effektivspänning, skjuvhållfasthet och säkerhetsfaktor. Avsnittet belyser också klimatförändringarnas inverkan, särskilt effekterna av ökad nederbörd, och redogör för de teoretiska grunderna för beräkningar i GeoStudio 2024.

### 2.1 Göta älvdalen

Göta Älv är en vattenrik älv som sträcker sig från inloppet i Vänern vid Vänersborg till havet utanför Göteborg [20]. Vid Bohus delar sig älven i två grenar som flödar på varsin sida om ön Hisingen. Den största vattenmängden flödar genom Nordre älv som går väster ut från Bohus. Resten av vattenmängden fortsätter ner till Göteborgs hamn. Göta älv är totalt omkring 93 km lång och är med ett avrinningsområde på ungefär 50 000 km<sup>2</sup> Sveriges största.

De geologiska förhållandena längs Göta älv kan variera mellan olika områden. Jordlagerföljden består till största del av lera med en underliggande friktionsjord på en eller några meter djup [20]. På vissa ställen vid Göta älvdalens kanter, nära fastmarken, träder friktionsjorden ibland fram ovan jordytan. Leran i området har varierande sensitivitet, men högsensitiv lera, så kallad kvicklera, förekommer i området.

Göta älv påverkas av Vänerns vattenstånd och hur mycket vatten som fortsätter ut i Göta älv regleras [21]. Detta är nödvändigt för att skydda mot översvämningar och skred kring Vänern och Göta älv, men också för att undvika låga vattennivåer som försvårar sjöfarten. Göta älv står dessutom för en stor del av Göteborgs dricksvattenförsörjning. Skred, låga flöden eller höga havsnivåer som kan orsaka saltinträngning skulle påverka dricksvattnet negativt. Därför regleras tappningen av vatten från Vänern till Göta älv. Det finns en gräns för hur stor tappningen från Vänern till Göta älv får vara [22]. Dämningsgränsen, alltså den nivå som vattnet normalt får ligga på, varierar under året mellan 44,55 meter och 44,85 meter. När vattennivån ligger mellan dämningsgränsen och upp till 30 centimeter över den, ska ungefär 900 kubikmeter vatten per sekund tappas ut till älven. Om vattennivån stiger mer än 30 centimeter över dämningsgränsen, ska istället ungefär 1000 kubikmeter per sekund släppas ut.

## 2. Teori

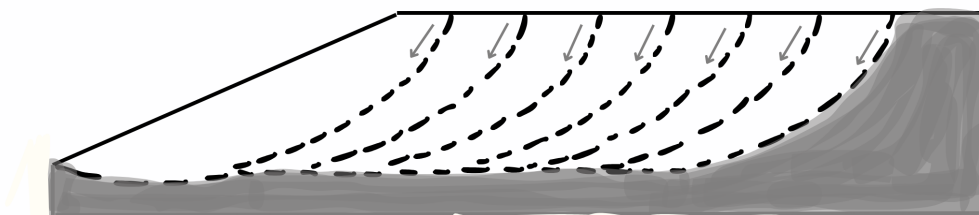
Förändringar i vattenflödet påverkar inte bara risken för översvämningar och möjligheterna för sjöfart, utan spelar också en viktig roll för grundvattennivåer och portryck i marken längs älven. Det i sin tur har stor betydelse för markens stabilitet, särskilt i områden där jorden består av lera och kvicklera.

### 2.1.1 Lera och kvicklera

Göta älvdalen är skredkänslig eftersom området till en mycket stor del består av lera [23]. Lera har en hög förmåga att absorbera och behålla vatten, vilket är en process som sker långsamt. Ju mer vatten som lagras i marken, desto större blir risken att marken börjar röra på sig och att ett skred uppstår.

Delar av området består också av kvicklera. De flesta kvickleror har bildats i lersediment som en gång avsattes på havsbotten i samband med den senaste istidens avsmältning [24]. När inlandsisen smälte och drog sig tillbaka, höjdes landmassan och leravlagringarna hamnade istället ovanför havsytan. Efter att leravlagringarna hamnat ovanför havsytan har de genomgått en urlakningsprocess, vilket har förändrat jonkoncentrationen i porvattnet. Denna urlakning har skett genom infiltration av regnvatten, påverkan av artesiska tryck och diffusion. På så sätt får leran egenskaper som gör att den kallas kvicklera. Egenskaper som är karaktäristiska för kvicklera är att den naturliga vattenkvoten är högre än dess konflytgräns, att lerans sensitivitet är 50 eller större och att den omrörda odränerade skjuvhållfastheten är som högst 0,4 kPa.

Kvicklera är en lera som är extra känslig för störning och vid omrörning förlorar den nästan all sin skjuvhållfasthet [25]. Vid störning kan leran gå från att vara fast och hållbar till att bli flytande. Det är alltså inte kvicklera som är orsaken till att skred sker, men ett skred kan fortplantas snabbt och leder därför till stora konsekvenser. Ett litet skred vid kanten av ett vattendrag kan starta en kedjereaktion. När den första massan av lera rör sig, kan leran bakom den skakas om och förlora sin stabilitet. Detta gör att även den börjar glida. Skredet kan då fortsätta bakåt, där varje nytt skred påverkar nästa område. På så sätt kan stora markområden sättas i rörelse i en serie av sammanhängande skred. En illustration av detta visas i Figur 2.1.



**Figur 2.1:** Utbredningen av ett bakåtgripande skred i kvicklera. Författarnas egna bild.

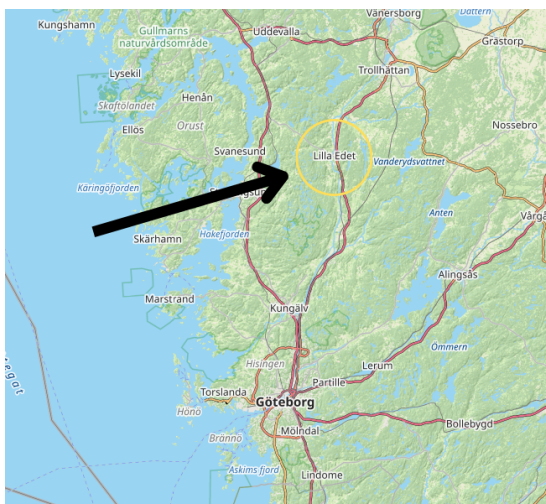
### 2.1.2 Risk för skred

Vid bedömning av skredrisk, bland annat vid Göta älvdalen, används två typer av klasser för att beskriva risken för skred [26]. Sannolikhetsklasser (S1-S5) där S1 innebär försumbar risk för skred och S5 betydlig risk och konsekvensklasser (K1-K5) där K1 innebär lindriga konsekvenser och K5 innebär katastrofala konsekvenser. Genom att sammanställa sannolikhets och konsekvensklasser (som S2/K3) erhålls en skredriskklass. Dessa olika kombinationer kategoriseras sedan på en övergripande nivå som låg, medelhög och hög skredrisk, vilket i sin tur underlättar beslut kring utbildningsbehov och markförstärkningsåtgärder.

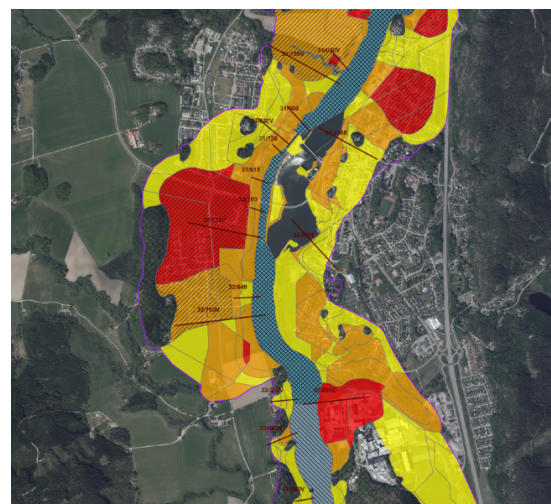
### 2.1.3 Val av område - Östra Berg

Valet av slänter att studera i detta arbete grundar sig i en analys av skredriskkartor för flera områden längs Göta älv. I Lilla Edets tätort finns ett område som kallas för Östra Berg, vars geografiska läge visas i Figur 2.2. Området valdes på grund av sin höga skredrisk.

I Östra Berg är sannolikhetsklassen S4, vilket indikerar på en mycket hög sannolikhet för skred [26]. Konsekvensklassen är K2, vilket innebär omfattande skador på infrastruktur och miljö vid ett skred. Sekundärkonsekvenserna klassas som RK4, vilket resulterar i en medelhög skredrisknivå längs stranden, medan skredrisken längre bak i området är hög, som visas i Figur 2.3.



**Figur 2.2:** Östra Bergs läge inom Lilla Edets kommun. Bakgrundskarta: OSM [27]. Modifierad av författarna.



**Figur 2.3:** Östra Berg skredriskkarta. Röd - Hög risk, Orange - Medel risk, Gul - Låg risk. [26]. Återgiven med tillstånd.

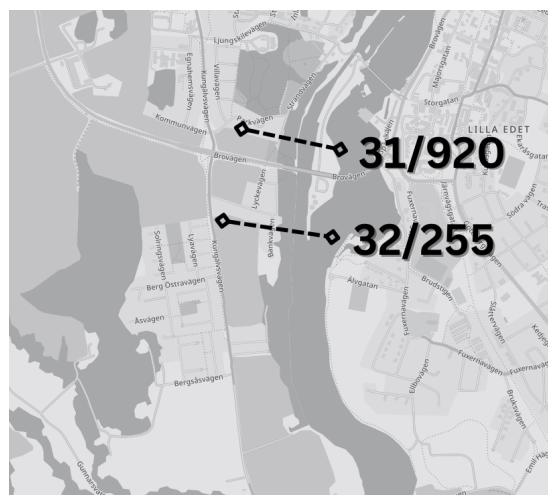
## 2. Teori

Figur 2.3 är ett utdrag från SGI:s hemsida *skredriskkarteringar* för Östra Berg, som visar skredrisknivåer i området [28]. Färgerna representerar olika risknivåer: gul indikerar låg risk (S2/K2), orange medelhög risk (S3/K2) och röd hög risk (S4/K2). S står för sannolikhet och K för konsekvenser. Figuren visar Göta älvs strandlinje tillsammans med angränsande bebyggelse, vilket tydliggör den geografiska kontexten för de identifierade riskerna.

År 2013 genomförde Ramboll Sverige AB en stabilitetsutredning av Göta älvs västra strand i Lilla Edet, där Östra Berg, i utredningen, delades in i tre zoner [29]. Denna och andra utredningar visar att kvicklera förekommer i södra och mellersta delarna av Östra Berg [30, 31]. Dessa delområden klassificeras som kvicklerahaltiga, vilket är centralt för skredriskbedömningen, eftersom kvicklera vid störning förlorar sin skjuvhållfasthet och ökar risken för omfattande skred. Därför har två slänter valts ut för analys. Rapporten använder delar av Rambolls områdesindelning för att fokusera på dessa slänter, vilket visas i Figur 2.4.



**Figur 2.4:** Östra berg områdesindelning. Bakgrundskarta: OSM [27]. Modifierad av författarna.



**Figur 2.5:** Valda sektioner i Östra Berg. Bakgrundskarta: OSM [27]. Modifierad av författarna.

Figur 2.5 visar sektionerna 31/920 och 32/255, som valts för analys i denna studie. Östra Berg består av flera slänter, vilket krävde ett urval av sektioner. Valet grundas på Rambolls stabilitetsutredning, som analyserade förhållanden för samtliga slänter i området [29]. Utredningen visar att ett skred i sektion 31/920 kan medföra risker för människoliv och betydande ekonomiska skador. Sektion 32/255 har motsvarande risker, vilket gör dessa sektioner särskilt relevanta för analys i rapporten.

## 2.2 Naturliga slänter

Naturliga slänter är lutande marktytor som har bildats genom geologiska processer som erosion, sedimentation eller istidens påverkan [32]. De skiljer sig från konstgjorda slänter såsom vägbankar som är skapade genom mänskliga ingrepp. Slänter förekommer i olika jordarter, exempelvis berg, sand och silt, men i denna rapport fokuseras enbart på naturliga slänter i lera som kännetecknas av särskilda utmaningar vad gäller stabilitet.

### 2.2.1 Erosion

Erosion är en process där jordpartiklar lossnar och transporteras bort, främst av vatten eller vind [33]. Längs vattendrag som Göta älv påverkas erosionen i hög grad av biflöden, särskilt vid kraftig nederbörd. Stora mängder vatten och sediment kan tillföras till huvudströmmen, vilket ökar flödes hastigheten och därmed erosionskapaciteten. Detta kan försvaga slänter och förändra älvens form genom ökad sedimenttransport och deponering [34].



**Figur 2.6:** Delsektioner av Göta älv [35]. Återgiven med tillstånd.

## 2. Teori

I Göta älv har erosionen studerats i flera särskilt känsliga delsträckor. En av dessa är Östra Berg (sektion 25/900–33/400), som illustreras i Figur 2.6 [35]. Ett förändrat klimat med ökade nederbördsmängder och längre perioder med höga flöden förväntas intensifiera erosionen längs älven.

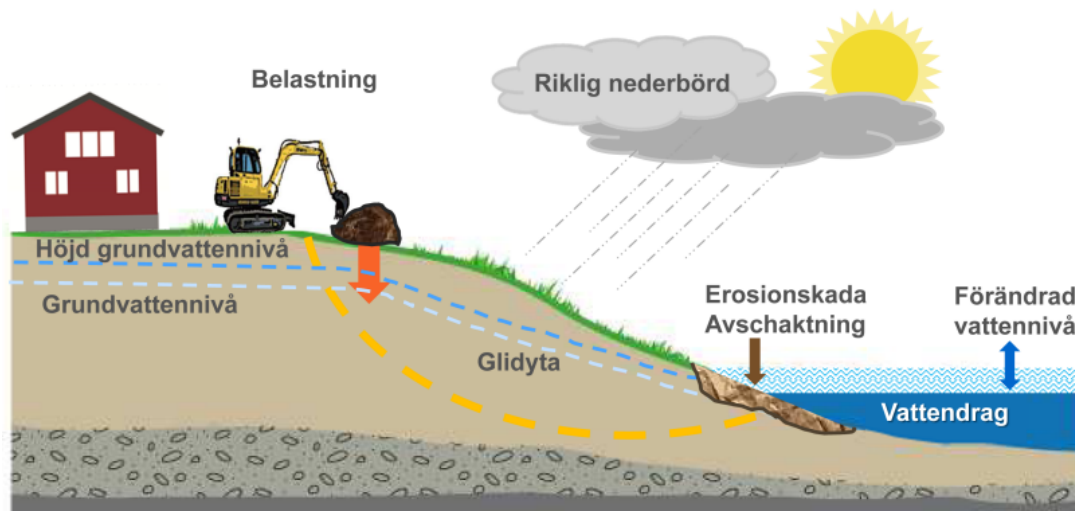
### 2.2.2 Varför skred uppstår

Skred är hastiga jord- eller bergförflyttningar som kan orsaka omfattande skador på människor, byggnader och miljö. Ofta är de en del av naturliga erosionsprocesser, där riklig nederbörd eller mänskliga ingrepp, som schaktning eller avskogning, kan fungera som utlösande faktorer [36]. Det som gör skred särskilt farliga är deras oförutsägbarhet eftersom de kan slå till plötsligt, utan tydliga varningssignaler.

Skred uppstår när stabiliteten i en slänt rubbas, vilket kan bero på flera faktorer. En viktig aspekt är markens hållfasthet, som påverkas av faktorer som vatteninnehåll och vattentryck [3]. Förändringar i klimatet, till exempel ökad nederbörd, kan försämra markens stabilitet och på så sätt öka risken för skred.

En kombination av klimatberoende förändringar, människans ingrepp i naturen, erosion och landhöjning kan ofta utlösa skred. Dessa faktorer påverkar grundvattennivåer, markfuktighet och jordens hållfasthet, vilket gör slänterna mer benägna att kollapsa [3].

En ökad belastning på släntens övre delar, orsakad av exempelvis nya bebyggelser, ökar de pådrivande krafterna och förvärrar stabiliteten [36]. När stabiliserande faktorer försvinner, till exempel genom erosion från vattendrag eller schaktning, minskar stabiliteten ytterligare. Detta är särskilt problematiskt vid sänkningar av vattennivåer i sjöar eller vattendrag, som minskar vattnets mothållande, stabiliserande effekt. I Figur 2.7 presenteras en sammanfattande visualisering av de olika faktorerna.



Figur 2.7: Faktorer som påverkar risken för skred [3]. Återgiven med tillstånd.

### 2.2.3 Jordens effektivspänningar och skjuvhållfasthet

Jord består av fasta partiklar, vatten och gas [37]. De fasta partiklarna bildar ett kornskelett som bär upp de laster jorden utsätts för, medan porerna mellan partiklarna är fyllda med vatten, gas eller en kombination av båda, ofta med lösta joner. Det är förhållandet mellan dessa beståndsdelar som avgör jordens mekaniska egenskaper, inklusive dess hållfasthet och deformationsegenskaper.

Jorden utsätts konstant för olika spänningar. Jordens totalspänning in-situ,  $\sigma_0$ , är den totala belastningen från den jord och det vatten som ligger ovanför [38]. Effektivspänning,  $\sigma'_0$ , är den spänning som bärs av det så kallade kornskelettet. Portrycket,  $u$ , är det tryck som vattnet i jordens porer utövar. Förhållandet mellan dessa tre beskrivs enligt Terzaghis ekvation.

$$\sigma_0 = \sigma'_0 + u \quad (2.1)$$

Jordens skjuvhållfasthet, dess förmåga att motstå skjuvspänningar, beror på samverkan mellan totalspänning, effektivspänning och portryck. Skjuvhållfastheten delas vanligtvis in i odränerad och dränerad hållfasthet, där valet av analysmetod bestäms av jordens permeabilitet och belastningens varaktighet [37]. Det finns även en kombinerad analys, som används för att beakta både det omedelbara (odränerade) och det långsiktiga (dränerade) svaret.

En odränerad analys används när skjuvdeformation sker så snabbt att vatten inte hinner dräneras ur jorden [37]. Den odränerade skjuvhållfastheten antas då vara konstant, eftersom de effektiva spänningarna är desamma och är ofta avgörande för korttidsstabiliteten hos slänter i kohesionsjord, se ekvation 2.2. Vid långsamma

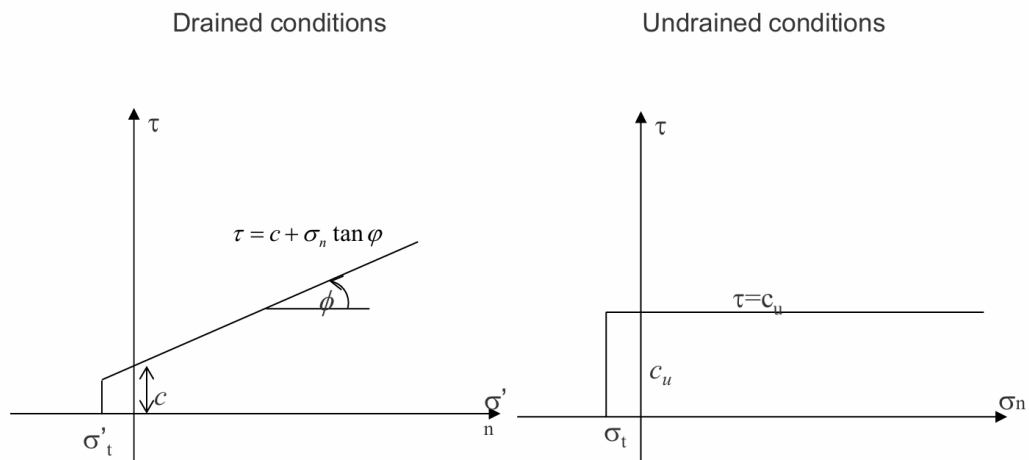
## 2. Teori

deformationer, där portrycket hinner jämnas ut, används en dränerad analys. Den dränerade skjuvhållfastheten är dimensionerande för friktionsjord på grund av dess höga permeabilitet och för långtidsstabiliteten hos slänter i kohesionsjord, se ekvation 2.3

$$s_u = c_u \quad (2.2)$$

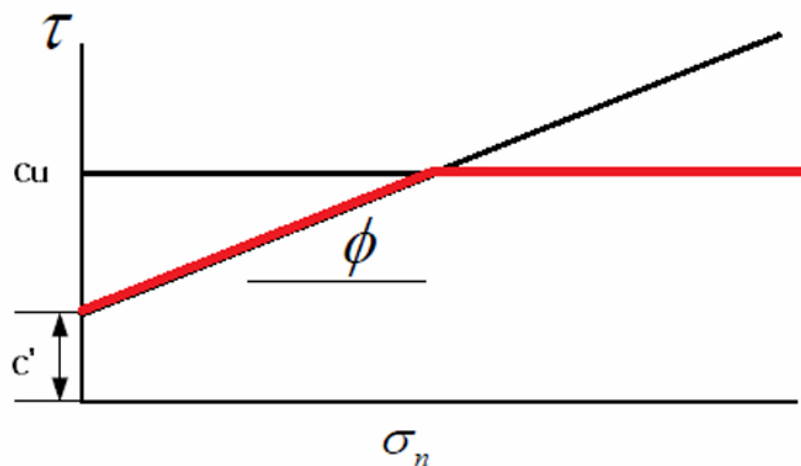
$$s_d = c' + \sigma'_o \cdot \tan(\phi') \quad (2.3)$$

Ekvation 2.2 beskriver att den odränerade skjuvhållfastheten,  $s_u$ , beror på jordens kohesion,  $c_u$ , eftersom det inte finns tid för portrycksutjämning [37]. Ekvation 2.3 beskriver den dränerade skjuvhållfastheten,  $s_d$ , där både kohesionen,  $c'$ , och den effektiva spänningen,  $\sigma'_o$ , spelar en roll. Den effektiva spänningen påverkas av belastningen som jorden utsätts för, och eftersom vattnet hinner dräneras bort, jämnas portrycken ut, vilket gör att den inre friktionen, representerad av friktionsvinkeln,  $\phi'$ , blir en viktig faktor i hållfastheten [37]. En visualisering av båda analyserna kan ses i Figur 2.8.



**Figur 2.8:** Visualisering av skjuvhållfastheten för dränerad och odränerad analys [39]. I figuren används beteckningen  $\tau$ , men i rapporten används beteckningen  $s$ . Återgiven med tillstånd.

Utöver dessa två analyser har en kombinerad analys, även kallad den friktionsbaserade odränerade skjuvhållfasthetsmodellen, utvecklats från observationer av hållfasthetstester i Skandinavien [37]. Jordens hållfasthet baseras på en kombination av dränerade parametrar  $c'$  och  $\phi'$  fram till den odränerade hållfastheten  $c_u$ . Med andra ord väljs de lägsta av alternativen, vilket går att se i Figur 2.9.



**Figur 2.9:** Kombinerad analys. Den röda linjen visualiserar hur hållfastheten baseras på dränerade parametrar fram till dess att den når gränsen för den odränerade hållfastheten [40]. Återgiven med tillstånd.

## 2.2.4 Säkerhetsfaktorn

För att kunna veta om en slänts stabilitet kommer att rubbas används en säkerhetsfaktor. Säkerhetsfaktorn  $F$ , definieras som kvoten mellan den tillgängliga skjuvhållfastheten  $s$ , och den skjuvspänning som krävs för att upprätthålla jämvikt  $\tau$  [41].

$$F = \frac{s}{\tau} \quad (2.4)$$

Ekvation 2.4 är en generell formel som anpassas beroende på typen av analys som utförs. För att uppnå en mer exakt modellering av jordens beteende och beakta olika geotekniska faktorer, används mer avancerade metoder såsom limit equilibrium metoden (LEM), limit analyses (LA) och finita element metoden (FEM) [42]. Bland dessa är den vanligaste metoden Limit Equilibrium Method (LEM), som beräknar säkerhetsfaktorn med Mohr-Coulombs brottkriterium.

När Mohr-Coulombs brottkriterium används definieras skjuvhållfastheten  $s$  beroende på analysmetoden. För en dränerad analys, används skjuvhållfastheten  $s = c' + \sigma' \tan \phi'$ , vilket ger ekvationen:

$$F = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\tau} \quad (2.5)$$

Här är  $c'$  den effektiva kohesionen, vilket är ett mått på jordens inre sammanhållning, oberoende av normalspänning [41].  $\sigma'$  är den effektiva normalspänningen, det vill

## 2. Teori

såga den totala normalspänningen minus porvattentrycket.  $\phi'$  är den effektiva friktionsvinkeln, som beskriver jordens friktionsmotstånd när partiklar glider mot varandra under skjuvning.

För den odränerade analysen förenklas Mohr-Coulombs brottkriterium. Då används beteckningen  $s = c_u$  istället för skjuvhållfastheten. Så för en odränerad analys blir ekvationen:

$$F = \frac{c_u}{\tau} \quad (2.6)$$

Här är  $c_u$  den odränerade skjuvhållfastheten. Det som förenklar ekvationen, jämfört med den dränerade analysen, är att för en odränerad analys är alltid  $\phi_u$  lika med noll [41]. Detta beror på att den snabba belastningen hindrar dränering och friktionsmobilisering. Därmed bidrar normalspänningen inte till hållfastheten.

### 2.2.5 Krav på säkerhetsfaktorn

Säkerhetsfaktorn är ett mått som används för att bedöma risken för skred. Enligt ekvation 2.4 innebär en faktor större än 1 att slänten anses vara stabil, medan en faktor mindre än 1 indikerar att skred kan inträffa. Det är dock viktigt att komma ihåg att denna modell är en förenkling av verkligheten. I en anvisning framtagen av IVA:s skredkommission [43] ges en mer detaljerad beskrivning av hur säkerhetsfaktorn bör tolkas i praktiken.

För att beräkna en mer tillförlitlig säkerhetsfaktor används begreppet totalsäkerhetsfaktor [43]. Beteckningen för denna faktor varierar beroende på vilken metod som används. Vid en odränerad analys används  $F_u$  eller  $F_{cu}$ . Vid en dränerad analys används  $F_{c'}$  eller  $F_{c\phi}$ . Det finns även en beteckning för den kombinerade analysen,  $F_{KOMB}$ .

Den acceptabla säkerhetsfaktorn bestäms utifrån undersökningens omfattning samt graden av osäkerhet i beräkningsantagandena [43]. Kravet på säkerhetsfaktorn höjs vid ogynnsamma förhållanden, exempelvis vid gles provtagning från fältundersökningar, risk för erosion eller branta slänter. Med hänsyn till dessa faktorer har Skredkommissionen definierat flera scenarier för rekommenderade säkerhetsfaktorer. En sammanställning av säkerhetsfaktorer visas i Figur 2.10

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

**Figur 2.10:** Tabell för val av erforderlig säkerhetsfaktor, värdena är riktvärden [43]. Återgiven med tillstånd.

I Figur 2.10 visas hur Skredkommissionen delar in rekommenderade säkerhetsfaktorer utifrån projektets skede och typen av markanvändning. För exempelvis naturmark, det vill säga mark utan betydande anläggningar, kan en totalsäkerhetsfaktor nära 1,0 anses acceptabel [43]. Om det däremot finns befintlig bebyggelse, krävs generellt att slänten uppnår en säkerhetsfaktor  $F_c \geq 1,5 - 1,7$  och  $F_{KOMB} \geq 1,35 - 1,45$ . Tabellen visar även specifika värden för sand, där friktionsvinkeln beaktas separat.

Eurokod 7 (EC7) är den europeiska standarden för geoteknisk dimensionering som ger tydliga riktlinjer för att designa stabila konstruktioner som grundläggningar, slänter och jordförstärkningar [44]. Istället för att använda säkerhetsfaktorn  $F$ , som exempelvis Skredkommissionen gör, använder EC7 partialkoefficienten  $\gamma$ .  $\gamma$  justerar materialparametrar som kohesion ( $c'$ ) och friktionsvinkel ( $\phi'$ ) för att säkerställa tillförlitliga beräkningar. Detta gör analyserna mer anpassningsbara till olika geotekniska utmaningar.

## 2. Teori

EC7 anger partialkoefficienter som varierar beroende på jordtyp (exempelvis lera eller sand), lasttyp (permanent eller tillfällig) och analysmetod (odränerad eller dränerad) [44]. Till exempel kan en slänt i lera kräva högre partialkoefficienter för odränerade förhållanden under kortvariga laster, medan en sandslänt analyseras med lägre värden för långsiktiga, dränerade förhållanden [44]. Även om exakta värden beror på projektets förutsättningar, ligger EC7:s riktlinjer i linje med de rekommendationer som ges av Skredkommissionen. Därför kommer denna rapport utgå från Skredkommissionens riktlinjer vid analyser.

## 2.3 Klimatförändringar

Förenta nationernas klimatpanel, IPCC, inrättades med avsikten att tillhandahålla tillförlitligt vetenskapligt underlag kring klimatförändringar. Deras rapporter, inklusive den sjätte utvärderingsrapporten (AR6), bekräftar att jorden genomgår en klimatkris på grund av ökade växthusgasutsläpp från mänskliga aktiviteter som ohållbar energianvändning och markanvändning [45]. Mellan 2011–2020 var den globala yttemperaturen 1,09 °C högre än under 1850–1900, med större öknings över land (1,59 °C) än över hav (0,88 °C).

Den kontinuerliga ökningen av den globala medeltemperaturen kommer att resultera i omfattande förändringar för klimatet, inte minst konstateras att extrema väderhändelser blir mer utbredda och mer frekvent förekommande. Då den globala vattencykeln ytterligare intensifieras som konsekvens av den globala uppvärmningen kommer nederbördsmonster att förändras och extrema nederbördsperioder bli allt vanligare. Den årliga maximala dygnsnederbörden förväntas öka, även på platser där den genomsnittliga markfuktigheten förväntas minska [45]. Att både frekvensen och intensiteten av kraftig nederbörd kommer att öka resulterar i risker för samhället ur flera aspekter [46]. Dräneringssystem överbelastas och regnorsakade översvämningar kommer att öka. Naturliga ekosystem kan förändras när de tidigare stabila hydrologiska förhållanden som arterna är anpassade till rubbas. Risken för transport- och infrastrukturskador ökar och dricksvatten blir mer sårbart för förorening. Naturliga slänter är särskilt sårbara för konsekvenserna av en mer frekvent och intensiv nederbörd. Detta eftersom slänternas hållfasthet direkt påverkas av markens vattenhalt och en accelererad erosion.

### 2.3.1 Klimatanpassning

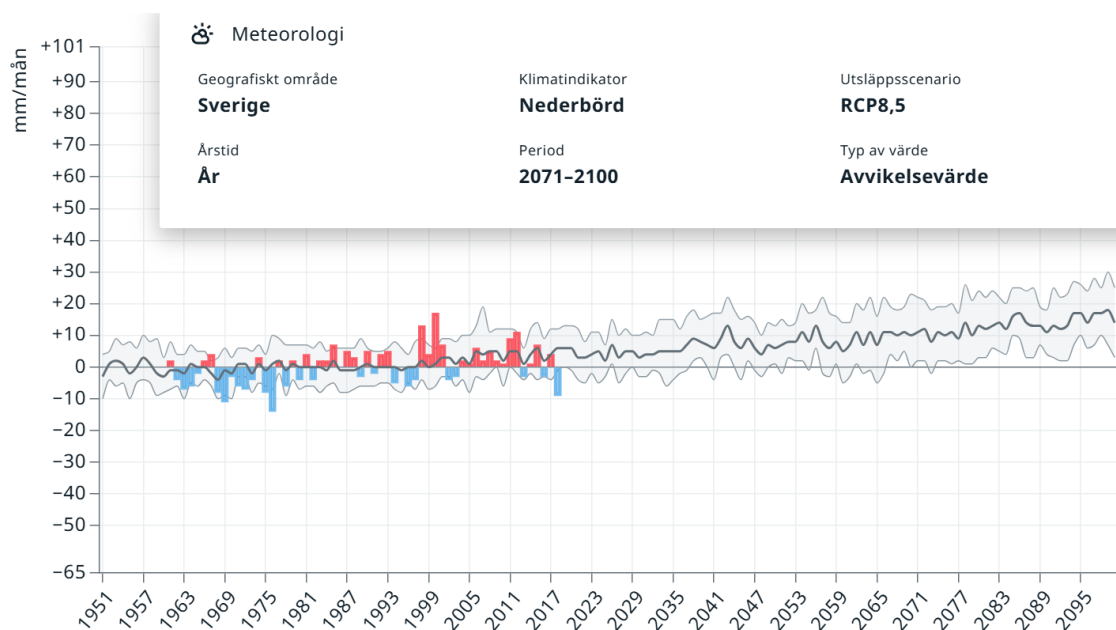
Klimatförändringar, exempelvis i form av ökad nederbörd, ökar risken för skred och erosion. För att minska både skador och kostnader behöver samhället planera proaktivt, allt från att bygga tåligare infrastruktur och stärka översvämningsskydd till att skydda ekosystem och förbättra vattenhantering i städer [47].

Dessa åtgärder är särskilt viktiga för att hantera de allt mer intensiva regn som hotar slänternas stabilitet [47]. Vid analys och planering av geostrukturer kommer det därför i framtiden bli oundvikligt att ta hänsyn till klimatförändringarna. Det finns olika tekniska lösningar för stabilisering av naturliga slänter men

för att på ett effektivt sätt kunna utföra de korrekta åtgärderna krävs ett genomgripande planeringsunderlag avseende klimatförändringarnas faktiska påverkan på släntstabiliteten.

### 2.3.2 Klimatscenario- prognostisering av framtida nederbördsmängder

SMHI har, genom att sammanställa ett flertal klimatmodeller för olika utsläppsbanor, tagit fram en klimatscenariotjänst [48]. Enligt SMHI kommer en stor del av landet, som konsekvens av ökade utsläpp av växthusgaser, utsättas för en ökning av nederbörd. I Figur 2.11 studeras konsekvenserna av utsläppsscenario RCP 8,5, vilket är det scenario där parisavtalet inte följs och utsläppen av växthusgaser i atmosfären fortsätter att öka påtagligt. Detta skulle innebära att år 2100 kommer koldioxidutsläppen att vara tre gånger så stora jämfört med år 2020. Figur 2.11 illustrerar hur stor skillnaden i nederbörd är år 2071-2100 jämfört med referensperioden 1971-2000. Klimatscenariot visar att den genomsnittliga ökningen av nederbörd i Sverige uppskattas vara cirka 14 mm per månad.



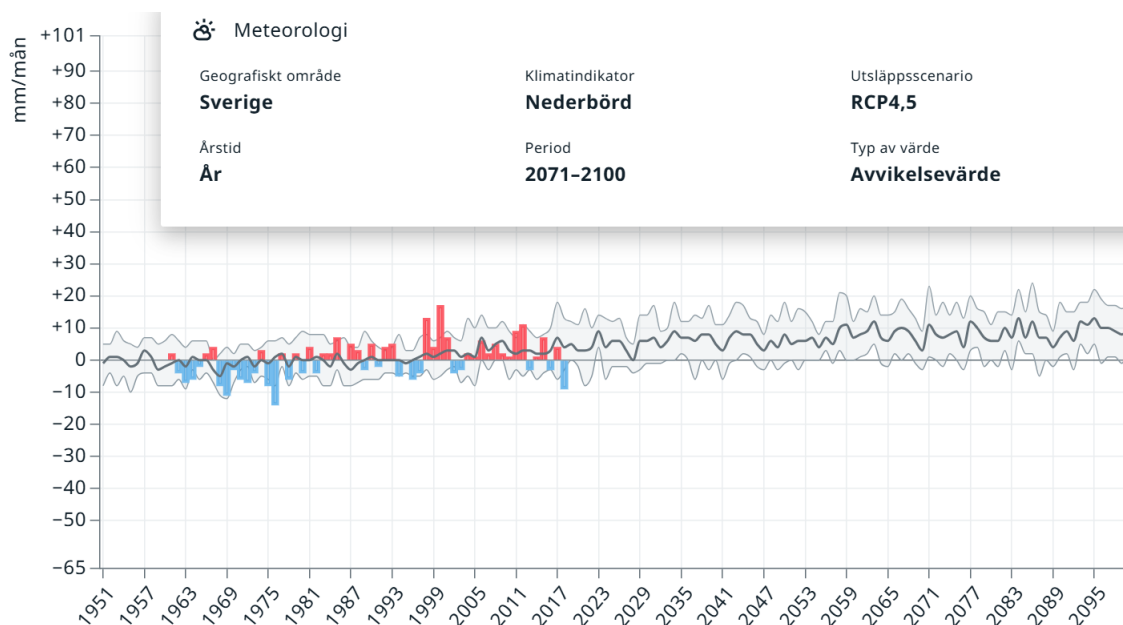
**Figur 2.11:** Beräknad förändring av nederbörd fram till år 2100 enligt RCP 8,5. De röda staplarna representerar mätvärden av nederbörd högre än referensperioden 1971-2000. De blå staplarna representerar mätvärden lägre än referensperioden. Den grå kurvan visar ett sammanvägt värde baserat på flera modeller för det valda utsläppsscenario RCP8,5. [49]. Återgiven med tillstånd.

RCP 4.5 beskriver ett scenario där växthusgasutsläppen stiger svagt fram till omkring 2040 och därefter successivt avtar [50]. Detta kan endast uppnås om samhället i högre grad än idag aktivt arbetar för att minska utsläppen. Trots detta kommer utsläppen att vara högre än vad parisavtalet har beslutat. Figur

## 2. Teori

2.12 visar hur stor skillnaden i nederbörd uppskattas vara år 2071-2100 jämfört med referensperioden 1971-2000. Klimatscenario RCP 4,5 innebär alltså att den genomsnittliga ökningen av nederbörd är cirka 10 mm.

Viktigt att lyfta är att det råder en osäkerhet kring den exakta omfattningen av nederbördsökningen fram till år 2100. Klimatscenario RCP 4,5 indikerar däremot på en ökning av medelnederbörden med 10-30% och RCP 8,5 indikerar på en ökning med 15-40% [51].



**Figur 2.12:** Beräknad förändring av nederbörd fram till år 2100 enligt RCP 4,5. De röda staplarna representerar mätvärden av nederbörd högre än referensperioden 1971-2000. De blå staplarna representerar mätvärden lägre än referensperioden. Den grå kurvan visar ett sammanvägt värde baserat på flera modeller för det valda utsläppsscenarioet. [52]. Återgiven med tillstånd.

Klimatförändringar kommer också att leda till extremare regn [50]. Ytterligare en tjänst som har tagits fram av SMHI gör det möjligt att ta fram statistik av skyfall [53]. Statistiken varierar beroende på varaktighet och återkomsttid, men också beroende på vilken del av Sverige som är av intresse. I tjänsten testades en varaktighet på 60 minuter med en återkomsttid på 50 år och sedan på 100 år. Sydvästra Sverige valdes som region. Tabell 2.1 visar att en beräknad regnmängd för ett skyfall med varaktigheten 60 minuter och återkomsttiden 50 år enligt RCP 4,5 för perioden 2071-2100 är ungefär 45,0 mm och enligt RCP 8,5 ungefär 52,5 mm. Alltså ett högre värde om den mer kritiska utvecklingsbanan kommer följas.

Klimatperiod	RCP	Regnmängd
Historisk		37.5 ± 4.4 mm
2011-2040	4.5	41.3 ± 4.8 mm
2011-2040	8.5	41.3 ± 4.8 mm
2041-2070	4.5	43.1 ± 5.0 mm
2041-2070	8.5	45.0 ± 5.2 mm
2071-2100	4.5	45.0 ± 5.2 mm
2071-2100	8.5	52.5 ± 6.1 mm

**Tabell 2.1:** Beräknad regnmängd för RCP4,5 och RCP8,5 för olika klimatperioder. Återkomsttid på 50 år. [54]. Återgiven med tillstånd.

Tabell 2.2 visar på samma sätt som Tabell 2.1 en beräknad regnmängd för RCP 4,5 och RCP 8,5 för olika klimatperioder. Varaktigheten är fortfarande 60 minuter, men återkomsttiden är satt till 100 år. Tabellen visar att för klimatperioden 2071-2100 är regnmängden för RCP 4,5 beräknad till ungefär 52,2 mm och för RCP 8,5 till ungefär 63,2 mm.

Klimatperiod	RCP	Regnmängd
Historisk		45.2 ± 7.2 mm
2011-2040	4.5	49.7 ± 7.9 mm
2011-2040	8.5	49.7 ± 7.9 mm
2041-2070	4.5	51.9 ± 8.3 mm
2041-2070	8.5	54.2 ± 8.6 mm
2071-2100	4.5	54.2 ± 8.6 mm
2071-2100	8.5	63.2 ± 10.0 mm

**Tabell 2.2:** Beräknad regnmängd för RCP4,5 och RCP8,5 för olika klimatperioder. Återkomsttid på 100 år. [54]. Återgiven med tillstånd.

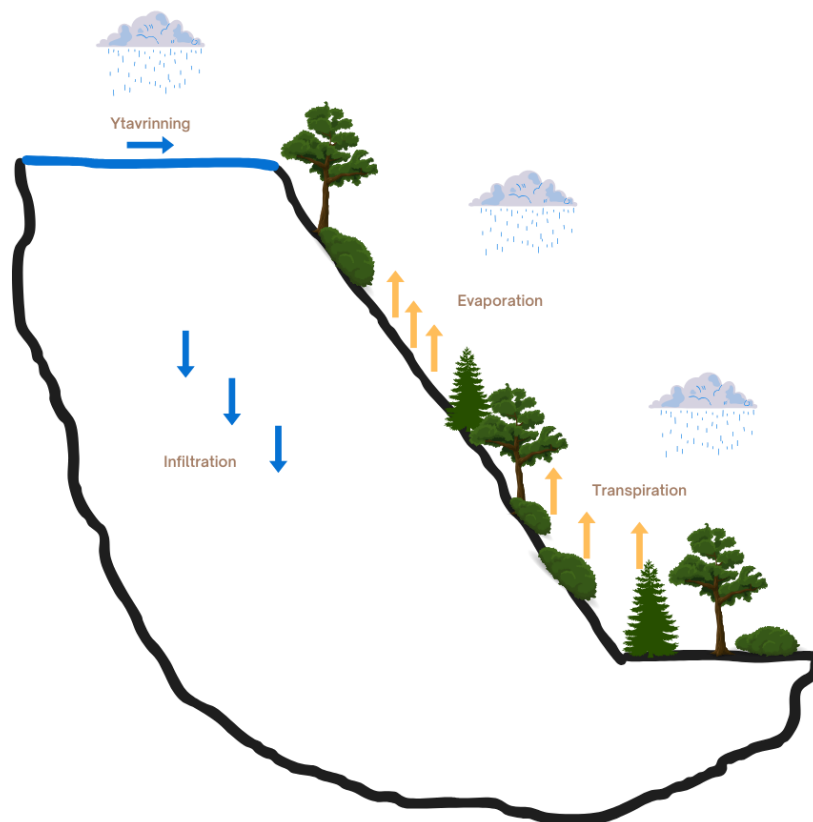
## 2.4 Ett förändrat porvattentryck

Vid en undersökning som har genomförts där nederbörds klimatet 1991-2020 har jämförts med 1961-1990 har det kunnat fastslås att nederbörden har generellt ökat för alla årstider. Ett undantag är hösten där både en svag ökning och minskning har uppnåtts på olika platser i Sverige [55]. I Västra Götaland har den totala ökningen för ett helt år varit ungefär 10%. Ökningen har varit störst under vintern och sommaren i denna del av Sverige. Under vintermånaderna har nederbörden ökat med ungefär 30% jämfört med 1961-1990 och under sommaren varierar det mellan 10-20% i området. Under våren och hösten är inte förändringarna så stora, särskilt inte under höstmånaderna. Generellt regnar det mest under sommarmånaderna [56]. Detta beror på att temperaturen är högre vilket leder till att en högre koncentration av vattenånga kan förekomma. En stor del av regnet som förekommer är skurar. De bildas när marken värms upp av solen, vilket leder till att luften närmast marken värms upp och får en lägre densitet. Den stigande luften kyls, vilket gör att vattenånga kondenserar och nederbörd uppstår. Därför regnar det oftast mest under sommarmånaderna juni, juli och augusti.

Infiltration och avdunstning av vatten har stor påverkan på hållfastheten och stabiliteten för naturliga slänter. När vatten, exempelvis under regn och skyfall, infiltreras i slänten kan jorden bli mättad vilket leder till en ökning av jordens tunghet och porvattentryck. Detta resulterar i att effektivspänningarna i slänten minskar och därmed uppstår en minskning i jordens dränerade skjuvhållfasthet. Om vattnet istället avdunstar, exempelvis under perioder av torra, blir slänten omättad. När porvattentrycket i jorden minskar, ökar i stället den effektiva spänningen och därmed även skjuvhållfastheten. Vidare kan det, i en omättad jord, uppstå ett negativt porvattentryck till följd av kapillärkraften som även det kan bidra till en ökad skjuvhållfasthet i jorden. Lerjord har särskilt stor kapillärkraft.

### 2.4.1 Vattencykeln

Vid regn och skyfall infiltreras en del vatten i jorden i en slänt, men processen är komplex [57]. Hur mycket vatten som infiltreras eller avdunstar beror på klimatförhållanden och jordens vattenhalt. Vatten kommer från atmosfären i form av nederbörd, men det är långt ifrån allt som infiltreras av jorden. Nederbörd som inte fastnar på vegetation (interception) eller rinner av som ytavrinning kan infiltreras, se Figur 2.13. Förutsättningen för att ytavrinning ska ske är att nederbördsintensiteten är större än jordens infiltrationskapacitet eller att grundvattenytan överstiger marknivån [57].



**Figur 2.13:** Vattencykeln för en naturlig slänt. Författarnas egna bild.

Ytavrinningens omfattning påverkas av släntens lutning, mängden vegetation och markytans ojämnhet. Hastigheten på infiltrationen bestäms av den hydrauliska konduktiviteten, jordens vattengenomsläpplighet [57]. Värt att belysa är här att jordens hydrauliska konduktivitet inte är ett konstant värde utan förändras med jordens vattenhalt, kapillärkraften och temperatur vilket gör uppgiften att avgöra andelen nederbörd som infiltreras i jorden än mer invecklad. Vid närmare studie av en slänt under ett skyfall förändras på så sätt släntens infiltrationskapacitet under skyfallets gång. Den hydrauliska konduktiviteten i en lera är låg i början av nederbördsperioden på grund av starka kapillärkrafter. Den ökar sedan något när vatten tränger in och kapillärkrafterna minskar och sjunker slutligen igen vid full mättnad.

Av den totala mängd vatten som infiltreras ner i marken extraheras en betydande del, dels genom avdunstning, evaporation, och dels genom växternas rötter som transpiration. Dessa två processer benämns med samlingsnamnet evapotranspiration. Nettoinfiltration är den mängd vatten som återstår i marken när andelen som förlorats genom evapotranspiration har subtraheras bort från den totala mängden.

## 2. Teori

### 2.4.2 Negativa portryck

Negativt porvattentryck är ett fenomen som kan uppstå ovanför grundvattennivån på grund av kapillär stigning [58]. Ovanför grundvattennivån kan alltså vatten sugas upp genom kapillärkrafter vilket leder till att jorden kan bli mättad. När jorden är delvis mättad, det vill säga att den både innehåller luft och vatten, skapas en sugkraft som binder jordpartiklarna starkare samman, vilket leder till att jordens hållfasthet ökar [58].

Om vattenförhållandena ändras i jorden kan det leda till att det negativa portrycket minskar, vilket leder till att bindningarna mellan jordpartiklarna försvagas och därmed att hållfastheten försämras [59]. Då Göta älvdalen främst består av lera kommer detta arbete framförallt att behandla det positiva porvattentrycket som är en följd av höga grundvattennivåer då det är den primära faktorn till att ett skred uppstår.

### 2.4.3 Påverkan av icke-stationära nederbördsförhållanden

Vid studie av hur nederbördsförhållanden påverkar stabiliteten för en naturlig slänt kan antingen stationära eller icke-stationära nederbördsförhållanden antas [60]. Stationära nederbördsförhållanden innebär att extrema nederbördshändelser antas vara oföränderliga över tid vilket innebär att studien baseras på antagandet att varken intensiteten eller frekvensen av extrem nederbörd förändras signifikant över längre tidsperioder. Icke-stationära nederbördsförhållanden tar däremot hänsyn till att klimatförändringarna har en inverkan och kommer att resultera i fler och intensivare extremväderhändelser över tid än vad den historiska datan antyder [60].

Studien "Rainfall-triggered slope instabilities under a changing climate" undersöker hur extrema nederbördsförhållanden påverkar risken för skred med utgångspunkt i ett område nära Seattle, Washington [61]. Studien jämför påverkan av stationära och icke-stationära förhållanden och konkluderar att risken för skred kan underskattas om skredriskutredningar endast utgår från ett stationärt antagande. Studien baseras på en FEM-analys för en siltig jordslänt under en nederbörd med varaktighet på sju dagar, beräknad för en återkomsttid på 50 år. Simuleringen utgörs av tre stadier [61];

1. Initiala förhållanden. Infiltration i stabilt tillstånd antas och utgår från statistik för årligt regn ( $t = 0$ )
2. Transient flöde med motsvarande 7 dagars extremnederbörd ( $t = 1-7$  dagar)
3. 8 dagars transient flöde av vatten som infiltreras för att studera släntens beteende efter extrem nederbörd ( $t = 8-15$  dagar).

Studien visade att det icke-stationära nederbördsförhållandet (där hänsyn till klimatförändringarna har tagits), i jämförelse med det stationära fallet, har en mer djupgående inverkan på storleken på porvattentrycket och formen på fuktfronten

[61]. Fuktkfronten är den rörliga gränsen mellan torr och våt jord vid infiltration av vatten i en slänt. Samma porvattentrycket som fås vid  $t = 15$  dagar under det stationära tillståndet uppnås redan vid  $t = 7$  dagar för det icke-stationära förhållandet. En sådan signifikant ökning av porvattentrycket kan leda till en avsevärd minskning av jordens skjuvhållfasthet, vilket i sin tur ökar skredrisken för slänten.

Skredrisken underskattas om enbart stationära nederbördsförhållanden används. De framtida nederbördsscenariona med hänsyn till klimatförändringarna kommer att påverka jordens hållfasthet och stabilitet och därmed öka risken för skred [61]. För att undvika att få en felaktig bild av släntstabiliteten, är det av högsta vikt att inkludera framtida nederbördsförändringar (icke-stationära förhållanden) i skredriskbedömningar.

## 2.5 Torka

Torka kan leda till förändrade vattentillgångar i älven och komma att ändra markens egenskaper, vilket kan medföra en rad olika konsekvenser [62]. Långvarig torka kan leda till sänkta grundvattennivåer vilket påverkar stabilitet i omkringliggande slänter. Torrspäckor kan bildas i lerjordar, vilket kan minska jordens hållfasthet samt öka risken för erosion när nederbörd återkommer. Dessutom påverkar torka växterna vid slänterna eftersom den minskar rötternas bindande effekt i marken vilken skyddar mot avrinning och skred [62].

En förhöjd yttemperatur kan leda till kortare vintrar och ett minskat snötäcke, vilket i sin tur medför att marken blir mer exponerad för vinterregn [63]. När snötäcket uteblir minskar alltså jorden skydd mot regn och tjäle, vilket kan påskynda erosion och öka risken för skred.

### 2.5.1 Sprickbildning

Torrperioder kan ge upphov till sprickor i lerjordar när vattnet i marken avdunstar och portrycket minskar, vilket gör att jorden krymper och spricker. Sprickdjupet kan uppskattas med ekvation 2.7, som ofta anges för ren kohesionsjord utan friktionsvinkel [38].

$$z_c = \frac{2 \cdot c_u}{\gamma} \quad (2.7)$$

Där  $z_c$  är sprickdjupet,  $c_u$  den odränerade skjuvhållfastheten och  $\gamma$  jordens tunghet. När sprickorna sedan fylls med vatten exempelvis vid kraftig nederbörd eller ökad ytavrinning, kan detta leda till ökat portryck och minskad effektivspänning i jorden [64], vilket i sin tur kan påskynda erosion [65]. Tidigare studier visar även att sådana

## 2. Teori

sprickor utgör försvagade zoner i slänten där infiltrerat vatten kan påskynda skred genom att reducera jordens hållfasthet och öka de drivande krafterna [66].

### 2.5.2 Cykler av torka och skyfall

Återkommande cykler av torka följt av intensiva regnväder kan ge upphov till betydande förändringar i slänters stabilitet, särskilt i jordarter med kohesions jordar såsom lera och silt. Under torra perioder uppstår sprickor i markytan samtidigt som markens hållfasthet reduceras [67] [65] [68]. Vid efterföljande kraftiga regn tränger vatten snabbt ner i dessa sprickor, vilket orsakar ett förhöjt portryck och kan initiera skred och efterföljande massrörelser [64] [69].

I Östra Berg, som karaktäriseras av kuperad terräng med branta slänter ned mot Göta älv och jordar bestående av siltig till lerig morän, förstärks denna problematik ytterligare. Den marktekniska undersökningen visar att området innehåller flera branta slänter med erosionskänsliga jordarter, och att tidigare avschaktningar lämnat terrängen känslig för påverkan [70]. Dessutom påvisas höga grundvattennivåer och förekomst av höga portryck, vilket ytterligare bidrar till instabilitet i samband med väderomslag. Regnvatten som tränger in i torksprickor kan påskynda erosion och deformation av slänten, särskilt i områden med begränsad vegetation. Denna cykliska process av torka och skyfall innebär en gradvis försämring av jordens skjuvhållfasthet. I kombination med koncentrerad ytavrinning kan detta leda till återkommande skred.

## 2.6 Vegetation

Vegetation bidrar till ökad släntstabilitet genom att förstärka markens hållfasthet och minska erosion. Rotsystem förbättrar sammanhållningen i marken och kan öka släntens säkerhetsfaktor med upp till 50% beroende på vegetationstyp och rottäthet. Samtidigt minskar vegetation ytavrinning och bromsar vattenflödet, vilket reducerar risken för ytlig erosion [71]. I Östra Berg, där branta lerslänter lutar mot Göta älv, spelar vegetationen en avgörande roll för att stabilisera erosionskänsliga områden [70].

En viktig stabiliserande mekanism är rötternas vattenupptag, vilket reducerar markens vattenkvot och därmed ökar hållfastheten. Växter fungerar som en naturlig pump, särskilt efter regnperioder, och minskar portrycket i jorden. En effekt som är särskilt betydelsefull i finkorniga jordar som lera [72] [70]. Förutom vattenreglering bidrar rötterna direkt till markens skjuvhållfasthet genom ökad sammanhållning mellan jordpartiklar. Denna effekt är särskilt märkbar i kohesionsjordar, medan rötter i friktionsjordar främst ökar packningsgraden och friktion [73]. Rotens hållfasthetsbidrag kan beräknas med följande ekvationer:

$$t_R = \epsilon \cdot E \cdot RAR \quad (2.8)$$

$$\Delta S = 1.2 \cdot t_R \quad (2.9)$$

Där  $t_R$  är rotens hållfasthetsbidrag,  $\epsilon$  rotens effektparameter,  $E$  markens elasticitetsmodul och  $RAR$  står för rotarea per ytenhet. I områden som Östra Berg, med känsliga lerjordar, kan vegetation utgöra en kostnadseffektiv åtgärd för att minska den ytliga erosionen [70].

Vegetationens effektivitet påverkas också av släntens lutning och växttyp. På slänter med en lutning under cirka 30° kan vegetation ofta ensamt motverka erosion, medan brantare slänter vanligtvis kräver kompletterande tekniska förstärkningar [71]. Gräs med täta rötter motverkar ytlig erosion, medan träd och buskar med djupa rotsystem stabiliserar djupare jordlager. I Östra Berg bedöms en kombination av marktäckande växter och träd vara lämpligt för att uppnå långsiktig stabilitet [70].

Samtidigt riskerar klimatförändringar att försvaga vegetationens stabiliserande effekt. Längre torrperioder kan försämra rotsystemens funktion, medan intensiva regn ökar risken för erosion. I områden som Östra Berg, där slänterna redan är utsatta, är detta särskilt problematiskt [70].

## 2.7 Exempel på stabilitetsförbättrande åtgärder

Det finns tydliga tecken på att klimatförändringar kommer att ha en negativ påverkan på släntstabiliteten. Förekomsten av kvicklera i området medför ett behov av noggrant utvalda stabiliseringsåtgärder för att minimera risken för skred. Detta beror på att kvicklera är extra känsligt för störning och det krävs en stor försiktighet i samband med att dessa utförs. Vad finns det då för möjliga åtgärder?

Vid slänter runt Göta älv kan en kombination av åtgärder vara nödvändig för att säkerställa en långvarig stabilitet. En vanlig förstärkningsåtgärd utförs genom avschaktning av släntkrön och uppfyllning vid släntfot [74]. Avschaktning av släntkrön är en metod som främst används i normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad lera. Den är mest effektiv när slänten har måttlig lutning och det fasta jordlagret ligger djupt. Att kombinera denna metod med uppfyllning vid släntfot innebär att det material som schaktas bort används som fyllningsmaterial vid släntfoten. När det finns risk för erosion vid slänttån och en försämring av stabiliteten, bör uppfyllning vid släntfoten utföras som ett erosionssskydd. För att skydda mot erosion vid slänttån är det bättre att använda grövre jordmassor vid utläggning i vatten. Åtgärderna är lämpliga då ett för högt porvattentryck bidrar till släntens försämrade stabilitet. Det är dock viktigt att ha i beaktning att dessa metoder kan leda till störning i jorden, vilket kan få stora konsekvenser i en störningskänslig jord som kvicklera.

En annan åtgärd är portryckssänkning eller portryckskontroll [74]. Det kan både innebära att åtgärder vidtas för att portrycken inte ska bli högre, men det kan också innebära att portrycken i området sänks. Att sänka portrycken kan få konsekvenser

## 2. Teori

som sättningar och därför måste en sådan åtgärd först noga analyseras då även omgivande områden kan påverkas. Den vanligaste metoden för att kontrollera grundvattennivån är att installera öppna rör, filterbrunnar eller vertikaldräner med bräddavlopp på en förutbestämd nivå. Topografin och tryckförhållandena måste möjliggöra dränering genom naturligt flöde utan behov av extern pumpning. Denna åtgärd kräver också stor försiktighet då kvicklera förekommer i området.

Pålning kan användas för att stabilisera jordmassor, men kan temporärt försämra slänters stabilitet genom vibrationer och portrycksökning [74]. Det är därför viktigt att övervaka mycket noggrant om denna åtgärd skulle användas i de valda områdena. Pålning tar främst upp axiallaster, men lutande pålar kan hantera horisontalkrafter.

Kalk/cementpelare är en stabiliseringsmetod som lämpar sig bra i finkorniga jordar [74]. Inblandningen av stabiliseringsmedlet som oftast består av kalk eller kalk och cement sker direkt i marken och bildar en pelare som har en högre hållfasthet än jorden. Det leder till att hållfastheten ökar efter en viss tid. Installationen orsakar en temporär försvagning genom omrörning, portrycksökning och horisontala deformationer, vilket kräver att en försiktig etappvis installation genomförs. För att hantera skjuvkrafter installeras pelarna ofta i skivor eller gitter istället för enskilt. Metoden används främst i stabil mark och sällan för naturliga slänter på grund av höga störningsrisker. Skred till följd av felaktig installation har inträffat, vilket innebär att detta är en metod som kräver noggranna beräkningar och försiktighet.

Erosionsskydd som motverkar erosion är en lämplig åtgärd att vidta i området runt Göta älv. Erosionsskydd kan utformas på flera olika sätt och delas ofta upp i två olika kategorier, mjuka och hårda skydd [75]. Mjuka erosionsskydd använder naturmaterial som rötter, växter eller sand, medan hårda skydd byggs av material som sten eller betong. Ofta kombineras de olika materialen i ett erosionsskydd. För att skydda både djur- och växtliv i området är så kallade naturbaserade erosionsskydd fördelaktiga. De utformas utefter den lokala naturen och är gynnsamma för djur- och växtlivet. Det finns idag ett erosionsskydd i form av sprängsten som är utlagt längs hela området vid älven [30] [31].

Vegetation spelar en avgörande roll för att minska erosion. Rötter förstärker jorden genom ett sammanhållande nätverk vilket förbättrar markens stabilitet [76]. Vegetation dämpar dessutom regndropparnas påverkan och minskar ytavrinningen genom att bromsa vattenflödet och förbättra infiltrationen. Detta kan alltså fungera som en åtgärd för att minska omfattningen av erosionen och därmed öka släntstabiliteten. Vegetationen bidrar även till biologisk mångfald och förbättrar jordens näringsinnehåll [71]. Vid slänter med brantare lutning rinner däremot vattnet av snabbt. Vegetationen hinner då inte bromsa erosionsprocessen. Denna åtgärd fungerar också sämre i mycket grovkorniga jordar då växter här kan ha svårt att etablera djupa rötter [71].

## 2.8 Teori för beräkningar i GeoStudio

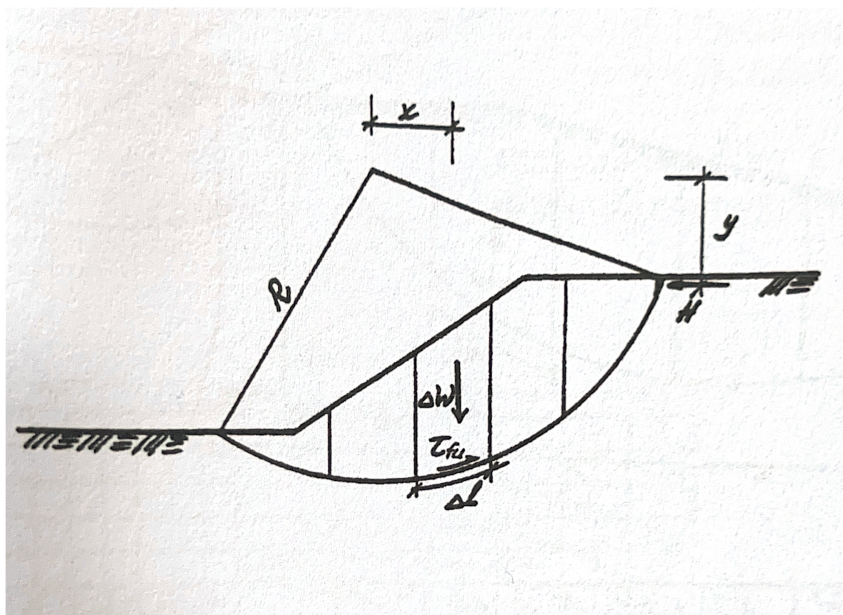
GeoStudio 2024 är ett programvarupaket för geoteknisk analys som bland annat används för att bedöma släntstabilitet genom modulen SLOPE/W. Programmet bygger på att definiera en geometri med material egenskaper och därefter genereras ett rutnät (grid) med utgångs och slutpunkter för möjliga glidytor. Genom att systematiskt testa ett stort antal glidytor inom ett specificerat område baserat på angivna start- och slutpunkter, kallade entry och exit, identifieras den mest kritiska glidytan. Det vill säga den med lägst säkerhetsfaktor [77].

### 2.8.1 Lamellmetoden

Lamellmetoden, även kallad skivmetoden, är en klassisk beräkningsmetod baserad på limit equilibrium, som ofta används för att analysera släntstabilitet. Metoden används bland annat i program som SLOPE/W och bygger på att den potentiella rasvolymen delas in i ett antal vertikala lameller (skivor). För varje lamell upprättas en jämvikt mellan pådrivande och stabiliserande krafter och moment [78] [79].

Genom att summera bidragen från varje lamell enligt en vald jämviktsmetod (exempelvis Bishop, Janbu eller Morgenstern & Price) kan en total säkerhetsfaktor för hela slänten beräknas. Fördelen med metoden är dess flexibilitet, eftersom den kan hantera variationer i jordlager, vattenförhållanden och materialparametrar. En potentiell nackdel är dock att vissa antaganden görs om skjuvspänningsfördelningen mellan lamellerna, vilket kan påverka noggrannheten i vissa situationer.

Figur 2.14 visar en principillustration av lamellmetoden där varje lamell representerar en delvolym som analyseras separat.



**Figur 2.14:** Principillustration av lamellmetoden där slänten delas in i vertikala skivor. [80], Återgiven med tillstånd.

## 2. Teori

### 2.8.2 Morgenstern and Price

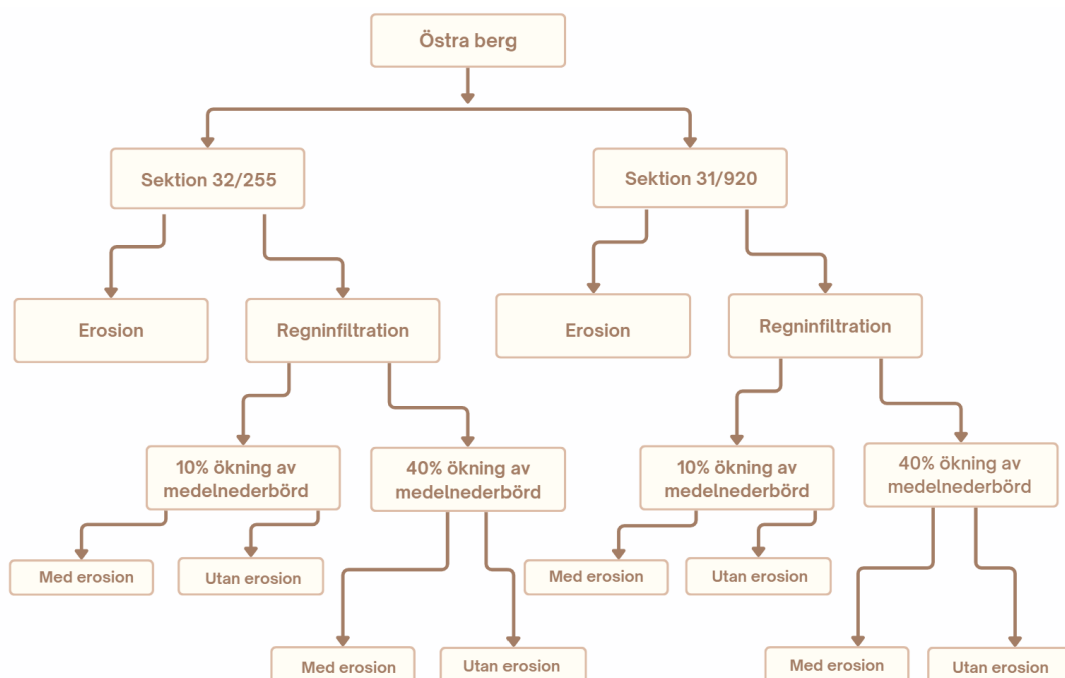
Morgenstern and Price metoden utvecklades för att brygga enklare lamellmetoder och beakta både horisontella och vertikala interlamellkrafter [81]. Genom att införa en godtycklig funktionsform för skjuv- och normalspänning mellan lamellerna kan metoden lösa både kraft och momentjämvikt på ett mer generellt sätt. Därmed anses Morgenstern and Price vara en av de mer allsidiga och exakta lamellmetoderna vid släntstabilitetsanalys.

# 3

## Metod

Studien utgår från två verkliga slänter intill Göta älv belägna i södra respektive mellersta Östra Berg. De analyserade sektionerna är 32/255 och 31/920. I en markteknisk undersökningsrapport, upprättad av Ramboll Sverige AB, presenteras en sammanställning av resultat från geotekniska undersökningar av området [70]. Med denna data som utgångspunkt modellerades de två slänterna upp i programmet GeoStudio 2024. Därefter utfördes simuleringar av relevanta processer vilka antogs påverka markstabiliteten. Simuleringarna utfördes i GeoStudios moduler SLOPE/W och SEEP/W och begränsades till två huvudsakliga påverkningsvägar: erosion och regninfiltration. För de båda sektionerna analyserades dessa faktorer var för sig. För varje undersökt faktor genomfördes en odränerad respektive kombinerad analys.

Två scenarier gällande en förändrad medelnederbörd beaktades: en ökning på 10% respektive 40%. Dessa två alternativa vägar valdes för att översiktligt representera en måttlig respektive en kraftigare utveckling av den globala uppvärmningen fram till år 2100. Där en kraftigare utveckling antogs resultera i en större ökning av nederbörd, 40%. Även kombinationen av ökad nederbörd och erosion på 10 meter testades. Ett flödesschema för metoden i denna studie återfinns i Figur 3.1.



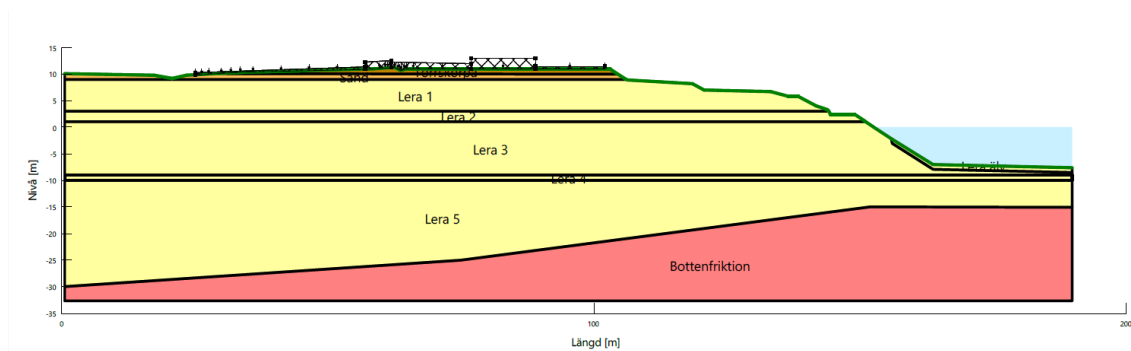
**Figur 3.1:** Flödesschema för metoden i denna studie. Författarnas egna bild.

### 3. Metod

För varje kombination av sektion och påverkningsväg genomfördes sedan bedömningar vad gäller konsekvenser för släntens stabilitet och skredrisk. Detta med utgångspunkt i en jämförelse mellan den framberäknade säkerhetsfaktorn, både i nuläget och vid antagen klimatpåverkan, och gällande krav enligt Skredkommissionen. Resultatet av föreliggande simuleringar användes sedan som grund för vidare tolkning, jämförelse och diskussion. Reliabiliteten av studiens resultat verifierades med litteratur och tidigare utförda studier presenterat i rapportens teorikapitel.

## 3.1 Sektion 32/255

En överblick över geometrin för sektion 32/255 samt namn på respektive materiallager visas i Figur 3.2 nedan.



**Figur 3.2:** Släntgeometri och materiallager för slänt 32/255.

De egenskaper och hållfasthetsparametrar som ansatts för respektive materiallager i utförda analyser för sektion 32/255 presenteras i Figur 3.3 och Figur 3.4.

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
■	Odränerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20						38	
■	Odränerad_Lera_1	S=f(depth)	16,5	20	0	20				
■	Odränerad_Lera_2	S=f(datum)	16,5		2,154	200	3	20		
■	Odränerad_Lera_3	S=f(datum)	16,2		2,154	200	3	20		
■	Odränerad_Lera_4	S=f(datum)	16,7		2,154	200	3	20		
■	Odränerad_Lera_5	S=f(datum)	16,7		1,33	200	-10	48		
■	Odränerad_Lera_Älv	S=f(depth)	16	5	0	200				
■	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
■	Odränerad_Torrskorelera	Mohr-Coulomb	18						0	

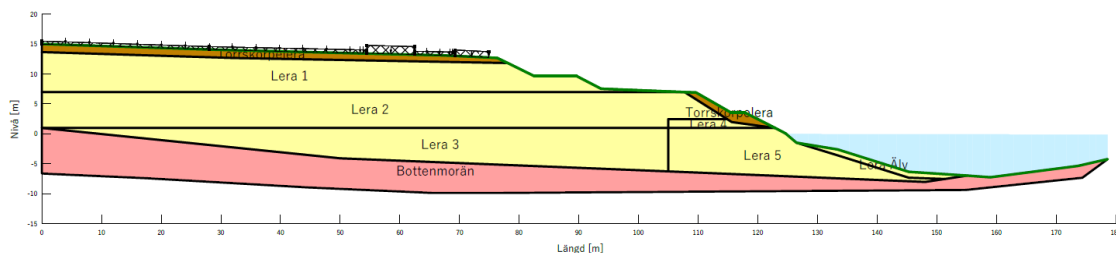
**Figur 3.3:** Materialparametrar för den odränerade analysen för sektion 32/255.

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=f(depth)	16,5	30				0		0	0,1	2	20
	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=f(datum)	16,5	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=f(datum)	16,2	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=f(datum)	16,7	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=f(datum)	16,7	30		-10	4,8	0,133	48	1,33	0,1		
	Kombinerad_Lera_Älv	Combined, S=f(depth)	16	30				0		0	0,1	0,5	5
	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=f(depth)	18	30				0		0	0,1	3	30

Figur 3.4: Materialparametrar för den kombinerade analysen för sektion 32/255.

## 3.2 Sektion 31/920

En överblick över geometrin för sektion 31/920 samt namn på respektive materiallager visas i Figur 3.5 nedan.



Figur 3.5: Släntgeometri och materiallager för slänt 31/920.

De egenskaper och hållfasthetsparametrar som ansatts för respektive materiallager i utförda analyser för sektion 31/920 presenteras i Figur 3.6 och Figur 3.7.

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Undrained Shear Strength (kPa)	Piezometric Surface	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	C-Top of Layer (kPa)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)
	Odränerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20		1						0	38	0
	Odränerad_Lera_1	Undrained (Phi=0)	15,5	17	1								
	Odränerad_Lera_2	S=f(datum)	15,5		1	7	17	2,33	31				
	Odränerad_Lera_3	S=f(datum)	16		1	1	29,32	1,5	0				
	Odränerad_Lera_4	S=f(depth)	15,5		1			1,5	0	26,32			
	Odränerad_Lera_5	S=f(depth)	16		1			1,5	0	29,32			
	Odränerad_Lera_Älv	Undrained (Phi=0)	16	5	1								
	Odränerad_Torrskorpelera	Undrained (Phi=0)	18	30	1								

Figur 3.6: Materialparametrar för den odränerade analysen för sektion 31/920.

### 3. Metod

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)	Piezometric Surface	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	c/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)
■	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38	0	1								
■	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=f(depth)	15.5		30		1	1.7	0	17	0	0.1			
■	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=f(datum)	15.5		30		1		0.233		2.33	0.1	7	1.7	17
■	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=f(datum)	16		30		1		0.15		1.5	0.1	1	2.932	29.32
■	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=f(depth)	15.5		30		1	2.632	0.15	26.32	1.5	0.1			
■	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=f(depth)	16		30		1	2.932	0.15	29.32	1.5	0.1			
■	Kombinerad_Lera_Älv	Combined, S=f(depth)	16		30		1	0.5	0	5	0	0.1			
■	Kombinerad_Torsskorpelera	Combined, S=f(depth)	18		30		1	3	0	30	0	0.1			

Figur 3.7: Materialparametrar för den kombinerade analysen för sektion 31/920.

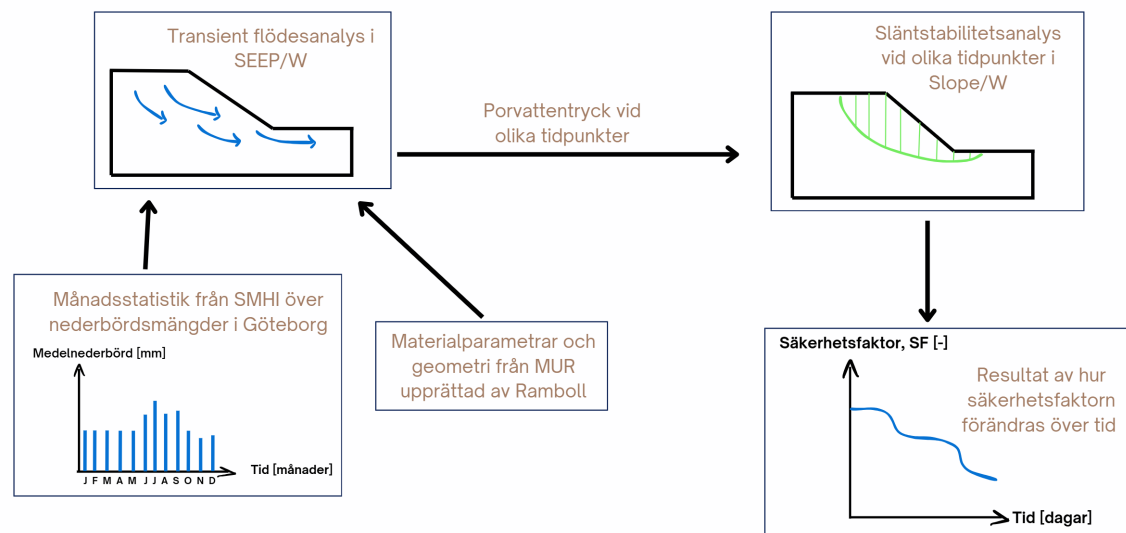
### 3.3 Regninfiltration i SEEP/W

För att undersöka de båda slänternas stabilitet under påverkan av en varierande nederbörd och regninfiltration användes både modulen SEEP/W och SLOPE/W i GeoStudio 2024. Detta för att kunna koppla den hydrogeologiska modelleringen utförd i SEEP/W till den geotekniska i SLOPE/W. En schematisk bild över tillvägagångssättet för simuleringarna återfinns i Figur 3.8 nedan.

Med syftet att få fram variationer i porvattentryck över tid, som följd av nederbördsinfiltration, genomfördes en transient flödesanalys i SEEP/W. Flödesanalysen simulerar vattentransporten genom släntens jordlager. Som yttre last på markytan, applicerades månatliga nederbördsvärden från SMHI:s klimatstatistik för Göteborg. En utförligare förklaring till vilka nederbördsmängder som applicerats återfinns nedan i kapitel 3.3.1

Tunghet och hållfasthetsparametrar, inkluderat kohesion, friktionsvinkel etcetera, för respektive jordlager tillhandahölls i en Markteknisk undersökningsrapport, MUR, framtagen av Ramboll [70]. Släntens geometri modellerades enligt information ur samma rapport. Värderna på hydraulisk konduktivitet för lerlagren hämtades från Tabell 10 i en rapport av WSP som redovisar de hydrogeologiska förutsättningarna kring Lilla Edet [82].

När porvattentrycken vid samtliga tidssteg (0-92 dagar) var framberäknade, importerades dessa sedan till SLOPE/W. För varje valt tidssteg beräknades där släntens nya säkerhetsfaktor (SF) mot skred. Detta genom att en limit equilibrium analys utfördes enligt Morgenstern-Price-metoden för att hitta samtliga potentiella glidytor samt den mest kritiska.



**Figur 3.8:** Förklaring till metod för modellering av regninfiltration med hjälp av SEEP/W. Författarnas egna bild.

### 3. Metod

#### 3.3.1 Nederbörds mängder

För att få en utgångspunkt för hur nederbörden ser ut idag används SMHIs års- och månadsstatistik för nederbörds mängder i Göteborg för respektive månad av året. Nederbörds mängden för respektive månad skiljer sig mycket från år till år. Detta kan ses genom att jämföra nederbörden för år 2022, 2023 och 2024 i Tabell 3.1. För att få ett mer representativt värde används därför istället ett medelvärde av nederbörds mängden mellan år 2022-2024 för respektive månad.

Månad	2022 [mm/mån]	2023 [mm/mån]	2024 [mm/mån]	Medelvärde 2022–2024 [mm/mån]	Medelvärde [m/s]
Januari	60	152	100	104	$3,88 \times 10^{-8}$
Februari	134	71	130	112	$4,56 \times 10^{-8}$
Mars	3	124	52	60	$2,23 \times 10^{-8}$
April	54	23	111	63	$2,42 \times 10^{-8}$
Maj	65	14	58	46	$1,70 \times 10^{-8}$
Juni	48	39	131	73	$2,80 \times 10^{-8}$
Juli	112	179	120	137	$5,11 \times 10^{-8}$
Augusti	72	163	104	113	$4,22 \times 10^{-8}$
September	76	72	77	75	$2,89 \times 10^{-8}$
Oktober	85	121	41	82	$3,07 \times 10^{-8}$
November	44	42	38	41	$1,59 \times 10^{-8}$
December	97	99	86	94	$3,51 \times 10^{-8}$

**Tabell 3.1:** Indata för nederbörd 2022 till 2024 samt beräknade medelvärden.

Genom att sedan öka denna medelnederbörd med 10% respektive 40% simuleras den ökning av nederbörd den globala uppvärmningen kan resultera i. Dessa värden presenteras i Tabell 3.2

Månad	10% ökning [mm/månad]	40% ökning [mm/månad]
Januari	114	146
Februari	121	155
Mars	66	84
April	69	88
Maj	50	64
Juni	82	104
Juli	150	190
Augusti	124	157
September	87	111
Oktober	92	117
November	45	57
December	133	169

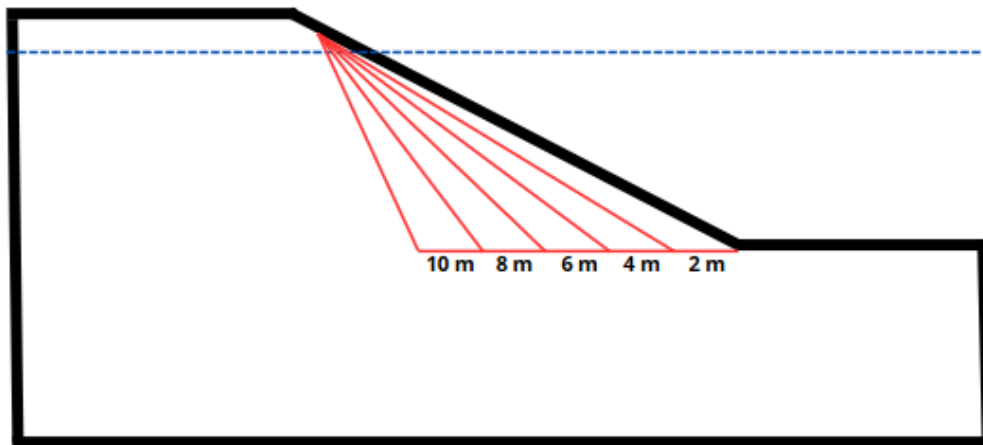
**Tabell 3.2:** Beräknad medelnederbörd per månad efter en ökning med 10% respektive 40% [mm/månad]

Tre sammanhängande månader studeras, juli-september. Valet att fokusera på sommarmånaderna i SEEP-analysen baseras på att Göteborgs skyfallssäsong normalt infaller under juli och augusti, då de största regnmängderna registreras [83]. Under denna period är risken för höga flöden, översvämningar och ökad erosion som störst, vilket gör sommar månaderna särskilt relevant för studien. Just perioden juli-september identifierades som den mest kritiska då medelnederbörden

här var som störst. Allra störst är medelnederbörden i juli månad. Nederbörden sjunker sedan något i augusti och sedan ytterligare i september.

### 3.4 Erosion i SLOPE/W

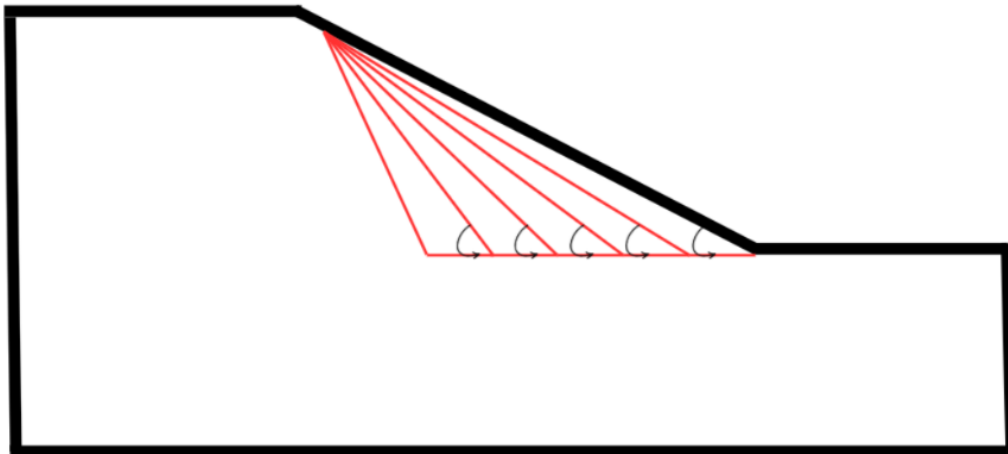
Hur erosion påverkar slänternas stabilitet har beräknats utifrån en förenklad princip som Figur 3.9 illustrerar. Analysen utgår från antagandet att erosion vid släntfoten kommer att leda till att ett litet lokalt skred sker. Detta kommer att öka släntens lutning, vilket de olika stegen i figuren nedan motsvarar. En startpunkt vid släntfoten och en slutpunkt strax ovanför vattennivån har använts. Skred 2-10 m från släntfoten har sedan undersökts för respektive sektion.



**Figur 3.9:** Typslänt med erosionssteg. Författarnas egna bild.

För att ytterligare förtydliga hur de undersökta slänterna blir brantare har också vinkeländringen på slänten mätts för varje erosionssteg. Hur denna släntvinkel har mätts illustreras nedan i Figur 3.10.

### 3. Metod



**Figur 3.10:** Släntvinkel för erosionssteg. Författarnas egna bild.

Tunghet och hållfasthetsparametrar, inkluderat kohesion, friktionsvinkel etcetera, för respektive jordlager tillhandahölls i en Markteknisk undersökningsrapport, MUR, framtagen av Ramboll [70]. Släntens geometri modellerades enligt information ur samma rapport.

#### **3.4.1 Känslighetsanalys**

En känslighetsanalys har utförts för att undersöka hur stor påverkan skjuvhållfastheten har på släntens stabilitet. Både en ökning och en minskning med 10% av skjuvhållfastheten har genomförts. De nya värdena applicerades sedan på respektive erosionssteg (0-10 meter). Resultatet utgjordes av nya säkerhetsfaktorer för respektive steg samt den procentuella skillnaden jämfört med säkerhetsfaktorn innan förändring av materialparametrar. Känslighetsanalysen utfördes både på sektion 32/255 och sektion 31/920.

### 3. Metod

# 4

## Resultat

Detta avsnitt presenterar resultaten från studien av skredrisker i Östra Berg, där analysen är uppdelad efter sektioner enligt Figur 3.1. Resultaten omfattar beräknade säkerhetsfaktorer för erosion, regnsimuleringar, en kombination av erosion och regnsimuleringar samt en känslighetsanalys. Dessa resultat ger en detaljerad bild av skredbenägenheten under olika scenarier och belyser de faktorer som mest påverkar stabiliteten i området.

### 4.1 Sektion 32/255

I denna del presenteras resultaten för sektion 32/255, vars geografiska läge beskrivs i det teoretiska avsnittet och illustreras i Figur 2.5. Varje del inleds med en sammanfattande tabell som ger en översikt av resultaten. Tabellerna presenterar de viktigaste parametrarna och mätvärdena, följt av en detaljerad beskrivning av hur resultaten har tagits fram och simulerats med hjälp av GeoStudio 2024.

Erosionen analyseras med beräkningar i SLOPE/W. Först redovisas släntens nuvarande tillstånd, som benämns utgångsläget, följt av det slutliga erosionssteget vid en förskjutning av släntfoten med 10 meter. Båda stegen presenteras för odränerad och kombinerad analys.

Regnsimuleringen utförs med SEEP/W och inleds med utgångsläget. Därefter simuleras regnpåverkan för tre scenarier: dagens regn, en ökning med 10% och en ökning med 40%. Resultaten för den odränerade analysen presenteras, medan figurer från den kombinerade analysen finns i Bilagor A.1.1. Slutligen visas hur kombinationen av olika regnmängder och en erosion på 10 meter påverkar släntens säkerhetsfaktor. Även här redovisas den odränerade analysen, med den kombinerade analysen i Bilagor A.1.2.

## 4. Resultat

### 4.1.1 Erosion 32/255

Tabell 4.1 presenterar säkerhetsfaktorer från SLOPE/W för utgångsläget (0m) och erosionsstegen 2-10m, för sektion 32/255.

Erosion [m]	Släntvinkel [°]	SF odränerad 32/255	SF kombinerad 32/255
0	31,12	1,446	1,225
2	37,30	1,423	1,162
4	43,10	1,358	1,010
6	50,60	1,284	0,866
8	60,21	1,206	0,717
10	72,13	1,117	0,552

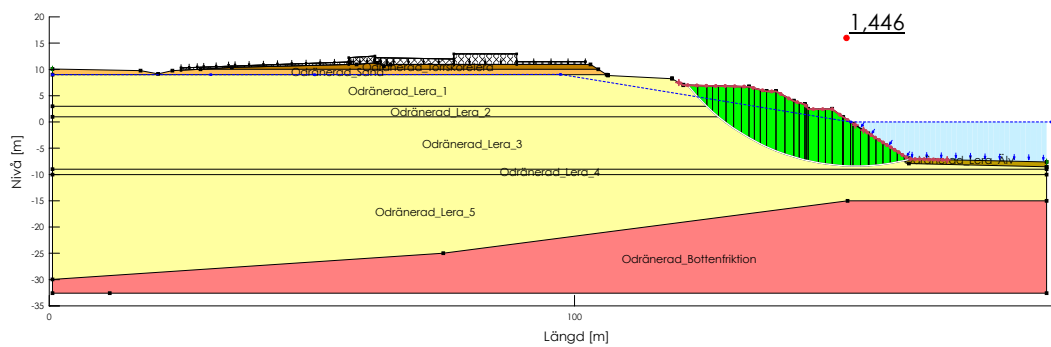
**Tabell 4.1:** Resultat förändring av säkerhetsfaktor (SF) för slänt 32/255 vid erosion 0-10 m för både odränerad och kombinerad analys

I Tabell 4.1 redovisas erosionsstegen i meter, vilket beskriver förskjutningen av släntfoten från utgångsläget. Till vardera erosionssteg visas också tillhörande släntvinkel i grader. Vidare visas de beräkande säkerhetsfaktorerna för varje steg, både för den odränerade och kombinerade analysen.

Figur 4.1 visar släntens utgångsläge samt beräknad säkerhetsfaktor baserat på en odränerad analys. En inzoomad vy av glidytorna presenteras i Figur 4.2.

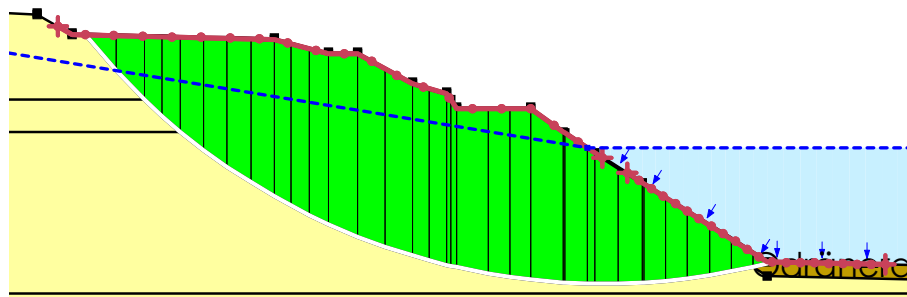
Title: Sektion 32/255 Östra berg Södra  
 Created By: ACEX111-VT25-35  
 Date: 2025-04-08  
 Name: Utgångsläge Odränerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Odränerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20						38	
Yellow	Odränerad_Lera_1	S=f(depth)	16,5	20	0	20				
Yellow	Odränerad_Lera_2	S=f(datum)	16,5		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_3	S=f(datum)	16,2		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=f(datum)	16,7		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_5	S=f(datum)	16,7		1,33	200	-10	48		
Dark Yellow	Odränerad_Lera_Älv	S=f(depth)	16	5	0	200				
Orange	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
Brown	Odränerad_Tonskärelera	Mohr-Coulomb	18						0	



**Figur 4.1:** Utgångsläget för sektion 32/255, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,446 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

1,446



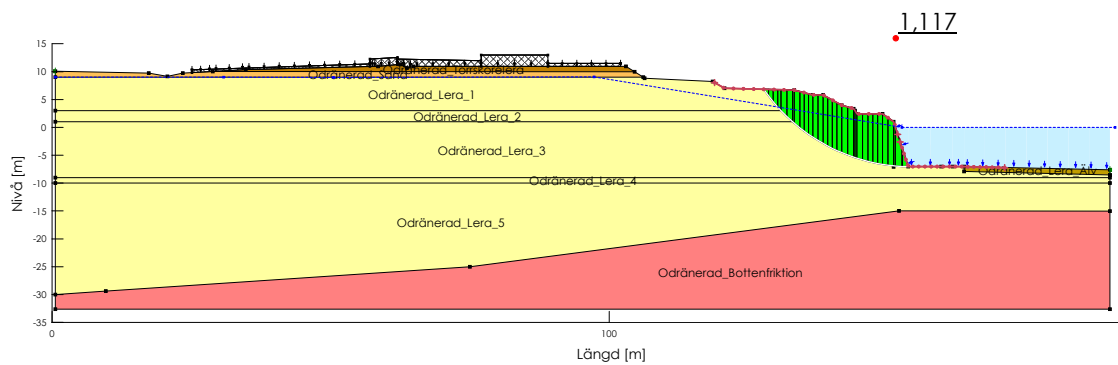
**Figur 4.2:** Inzoomad vy av den kritiska glidytan för utgångsläget, sektion 32/255, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,446 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

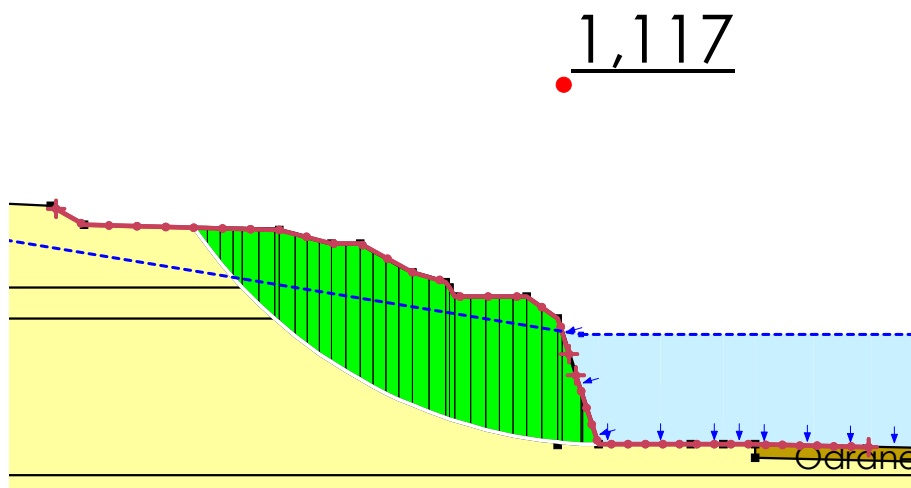
Figur 4.3 visar säkerhetsfaktorer från SLOPE/W för en odränerad analys vid 10 meters erosion i sektion 32/255. En inzoomad vy av glidytorna presenteras i Figur 4.4.

Title: Sektion 32/255 Östra berg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-08  
 Name: Erosion 10m Odränerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-δ (°)	Include Ru in FWP	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Piezometric Surface	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)
	Odränerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	0	38	0	No		1					
	Odränerad_Lera_1	S=f(depth)	16,5				No		1	20	0	20		
	Odränerad_Lera_2	S=f(datum)	16,5				No		1		2,154	200	3	20
	Odränerad_Lera_3	S=f(datum)	16,2				No		1		2,154	200	3	20
	Odränerad_Lera_4	S=f(datum)	16,7				No		1		2,154	200	3	20
	Odränerad_Lera_5	S=f(datum)	16,7				No		1		1,33	200	-10	48
	Odränerad_Lera_Alv	S=f(depth)	16				No		1	5	0	200		
	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	0	36	0	No	18	1					
	Odränerad_Tonskorelera	Mohr-Coulomb	18	30	0	0	No							



**Figur 4.3:** Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 1,117 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

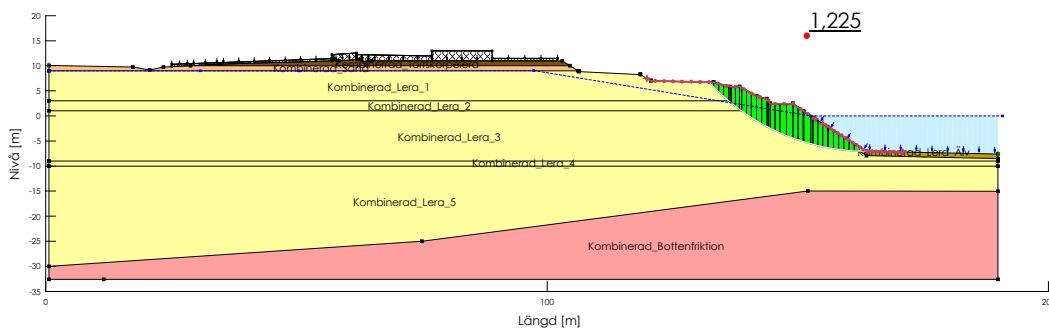


**Figur 4.4:** Inzoomad vy av den kritiska glidytan för sektion 32/255, odränerad analys vid 10m erosion. Säkerhetsfaktor: 1,117 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

På samma vis gjordes beräkningar för den kombinerade analysen. Säkerhetsfaktorn för utgångsläget presenteras i Figurer 4.5, där inzoomad vy kan ses i Figur 4.6.

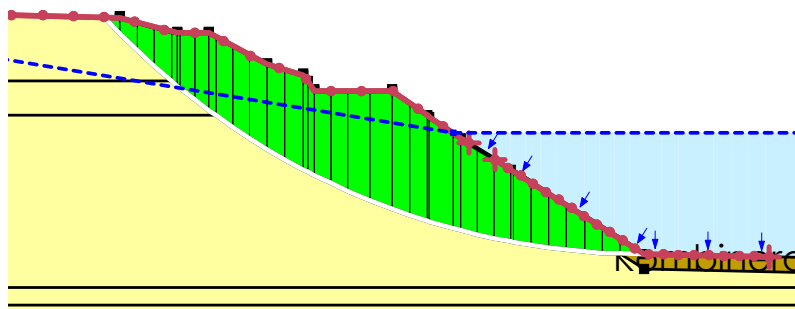
Title: Sektion 32/255 Östra berg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-08  
 Name: Utgångsläge Kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
	Kombinerad_Bottenfiktion	Mohr-Coulomb	20	38									
	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	16.5	30				0		0	0.1	2	20
	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(datum)	16.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(datum)	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
	Kombinerad_Lera_Äv	Combined, S=(depth)	16	30				0		0	0.1	0.5	5
	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
	Kombinerad_Torskorpelera	Combined, S=(depth)	18	30				0		0	0.1	3	30



**Figur 4.5:** Utgångsläget för sektion 32/255, kombinerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,225 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

1,225



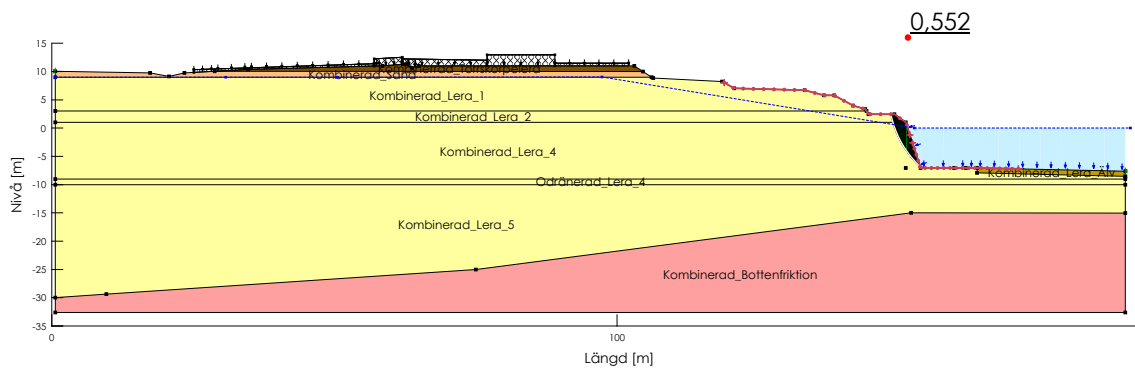
**Figur 4.6:** Inzoomad vy av den kritiska glidytan för utgångsläget, sektion 32/255, kombinerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,225 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

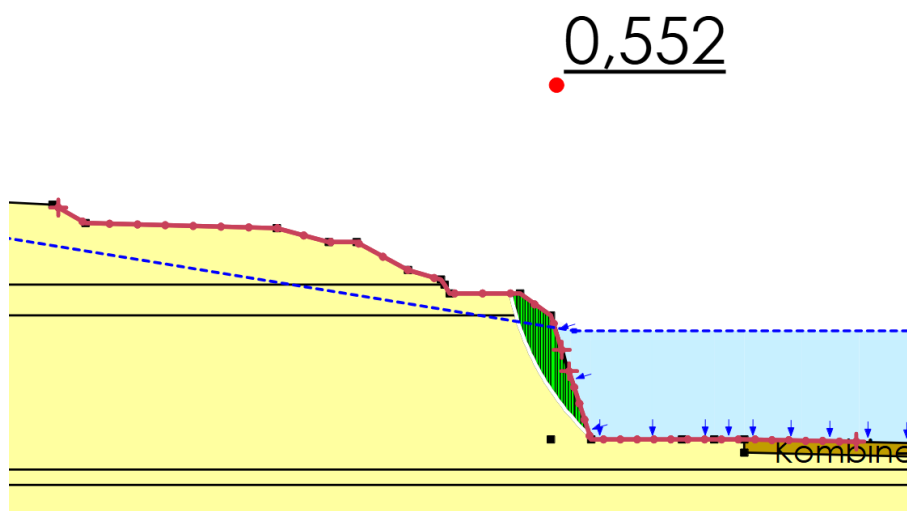
I Figur 4.7 visas säkerhetsfaktorn vid 10 meters erosion, med tillhörande inzoomad vy i Figur 4.8.

Title: Sektion 32/255 Östra berg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-08  
 Name: Erosion 10m Kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Piezometric Surface	Include $R_u$ in FWP	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)	Phi-B (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20					1	No	0	38						0	
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=f(depth)	16,5			0		1	No		30	0		0,1	2	20		
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=f(datum)	16,5	3	2	0,2154		1	No		30	20	2,154	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=f(datum)	16,7	3	2	0,2154		1	No		30	20	2,154	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=f(datum)	16,7	-10	4,8	0,133		1	No		30	48	1,33	0,1				
Green	Kombinerad_Lera_Riv	Combined, S=f(depth)	14			0		1	No		30			0,1	0,5	5		
Brown	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20					1	No	0	36						0	18
Brown	Kombinerad_Torskorpelera	Combined, S=f(depth)	18			0		1	No		30			0,1	3	30		
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=f(datum)	16,7	3	20	2,154	200	1	No									



**Figur 4.7:** Sektion 32/255, kombinerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 0,552 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.



**Figur 4.8:** Inzoomad vy av den kritiska glidytan för sektion 32/255, kombinerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 0,552 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

### 4.1.2 Regnsimulering 32/255

Tabell 4.2 presenterar säkerhetsfaktorer från SEEP/W baserat på simulerad regn (dagens nivå, +10%, +40%) över tre månader, för sektion 32/255.

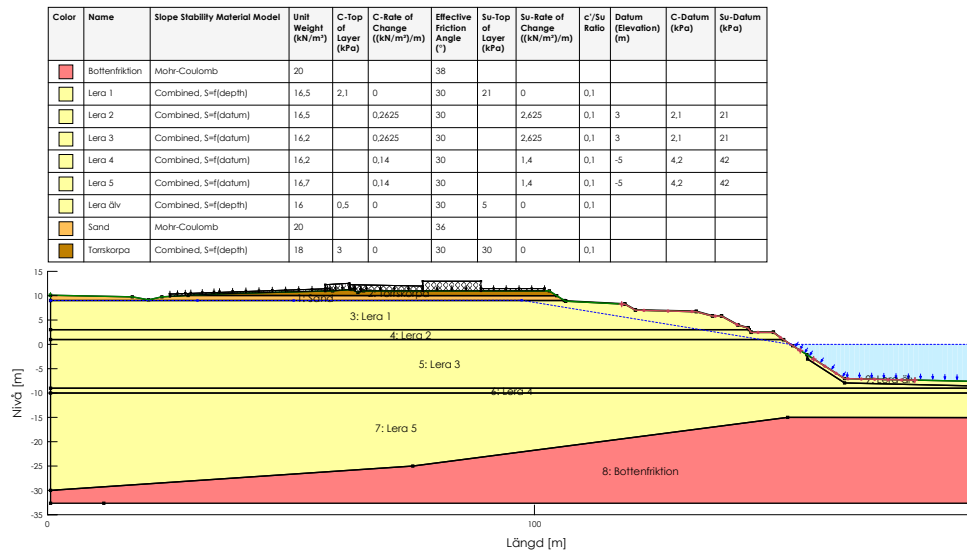
Analys	Tidpunkt	Regn idag	+10% regn	+40% regn
<b>Odränerad</b>	Utan Regn	1,442	1,442	1,442
	Juli	0,991	0,915	0,705
	Augusti	0,898	0,838	0,734
	September	1,010	0,967	0,870
<b>Kombinerad</b>	Utan Regn	1,068	1,068	1,068
	Juli	0,682	0,629	0,475
	Augusti	0,599	0,561	0,493
	September	0,645	0,625	0,573

**Tabell 4.2:** Säkerhetsfaktorer för sektion 32/255 utan erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökningarna på 10% och 40%.

I Tabell 4.2 redovisas säkerhetsfaktorerna för odränerad och kombinerad analys. Tidpunkten *Utan Regn* avser analysen vid dag 0, då ingen regnpåverkan har tillförts. *Juli* motsvarar simuleringen efter 31 dagar, *Augusti* efter 62 dagar, och *September* efter 92 dagar. För att undersöka effekten av ökad regnpåverkan, har två ytterligare analyser genomförts där dagens regnmängd med ökningarna på 10% och 40%. Dessa scenarier presenteras också i tabellen.

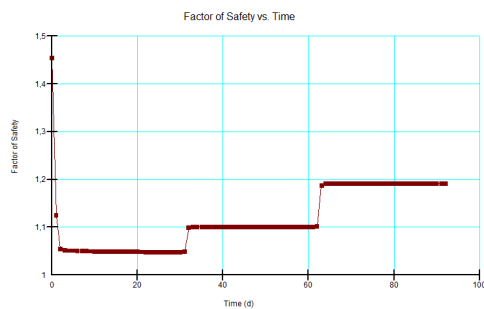
## 4. Resultat

SEEP/W användes för att simulera hur olika regnmängder skulle påverka släntens säkerhetsfaktor. En första version för slänten visas i Figur 4.9.

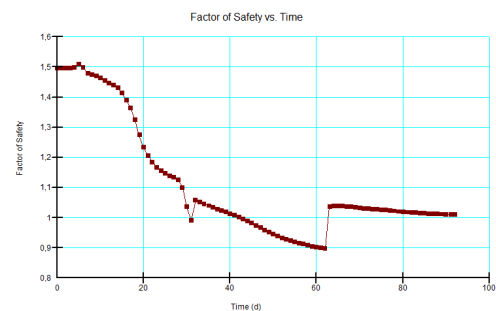


**Figur 4.9:** Första versionen av slänt 32/255 (SEEP/W). Författarnas egna bild.

Geometrin i Figur 4.9 orsakade problem vid simulering av regn i SEEP/W, då nästintill inget vatten kunde tränga in i lerlagret. Eftersom detta resulterade i en missvisande säkerhetsfaktor och denna geometrin är en förenkling av verkligheten, lades en 1 meter tjock torrskorpa ovanpå leran. Detta möjliggjorde mer infiltration, vilket påverkade hur säkerhetsfaktorn varierade över tid. I Figur 4.10 syns variationen av säkerhetsfaktorn över tid utan torrskorpan, och Figur 4.11 visas förändringen över tid med torrskorpan. Denna justering har tillämpats till samtliga SEEP/W-simuleringar.

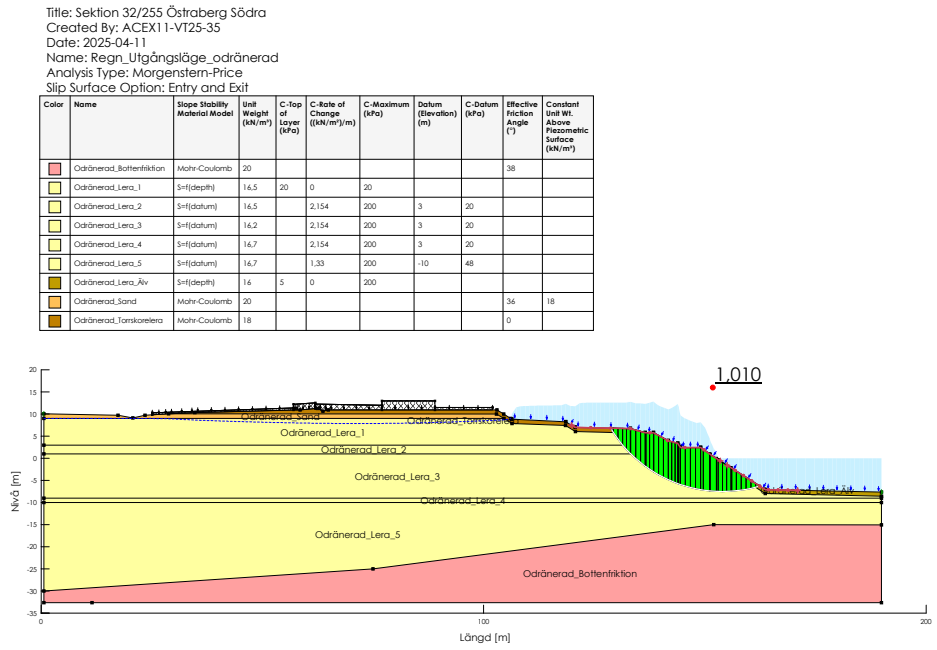


**Figur 4.10:** Förändring av säkerhetsfaktorn över tid utan torrskorpa (SEEP/W).

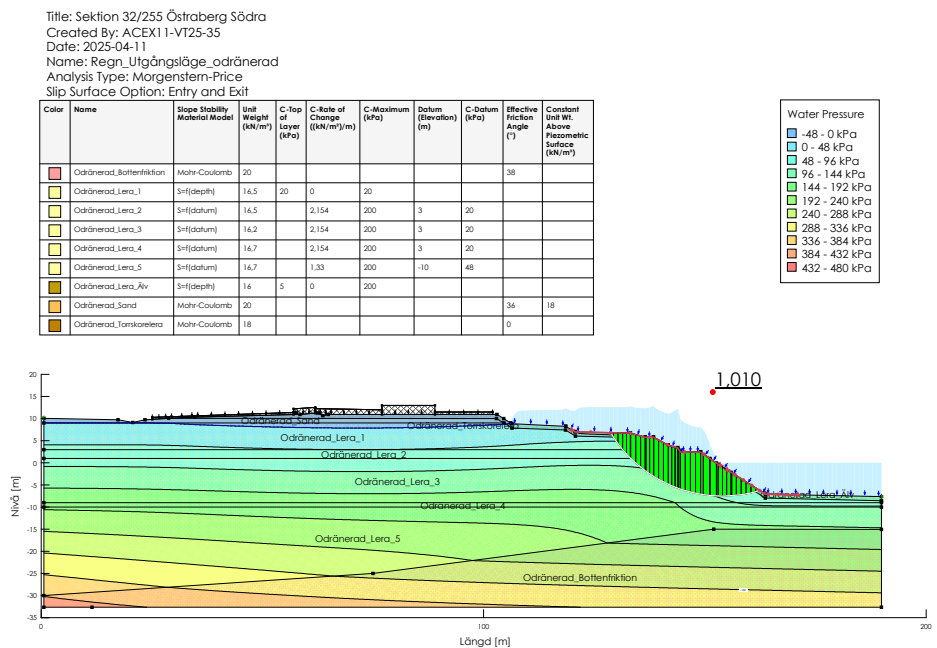


**Figur 4.11:** Förändring av säkerhetsfaktorn över tid med torrskorpa (SEEP/W).

Figur 4.12 visar släntens utgångsläge för den odränerade analysen, där en regnsimulering motsvarande tre månader av dagens regnmängd har applicerats mellan älven och det bebyggda området. I Figur 4.13 går det att se hur porvattentrycket varierar.



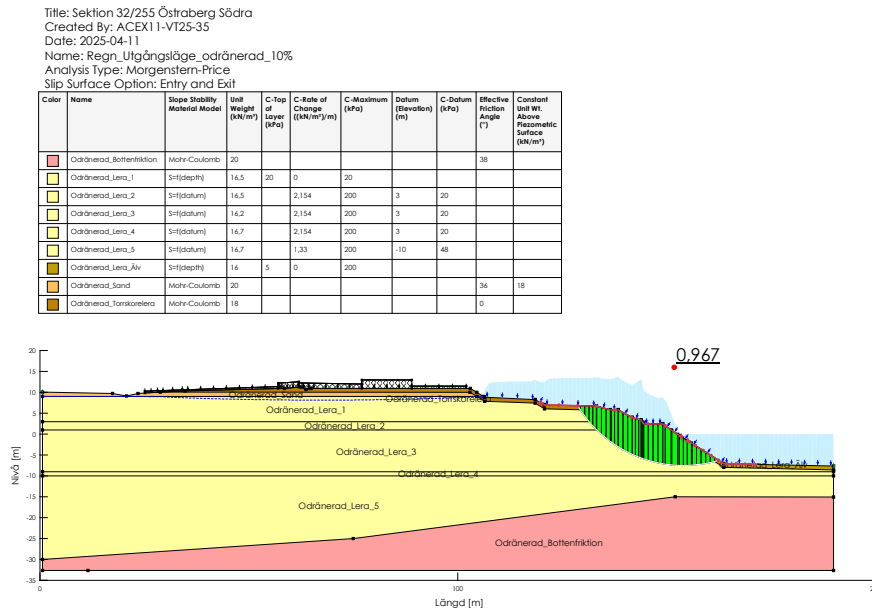
**Figur 4.12:** Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 1,010 (SEEP/W). Författarnas egna bild.



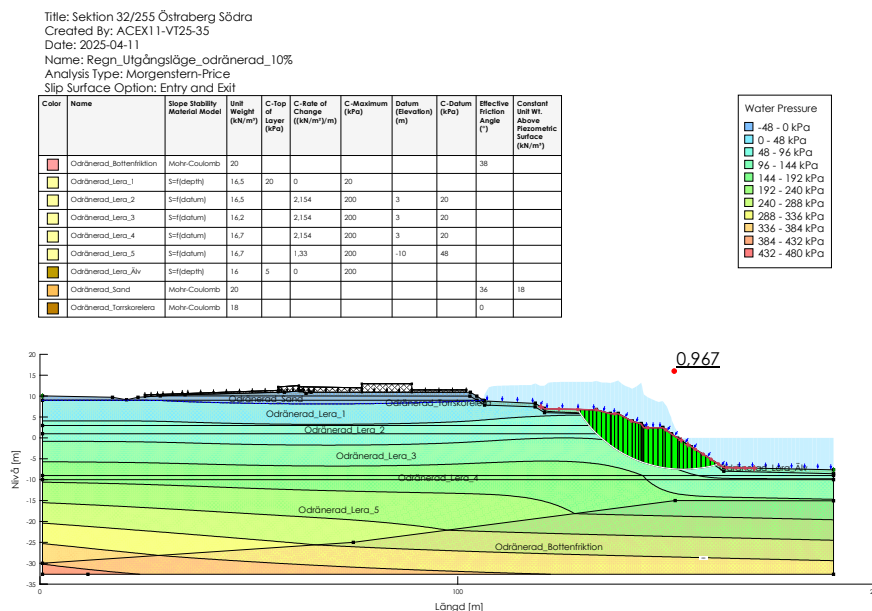
**Figur 4.13:** Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 1,010 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

Simuleringar med ökad regnmängd genomfördes för att representera en måttlig respektive en kraftigare utveckling av den globala uppvärmningen. Först simulerades en regnmängdsökning med 10%, följt av en ökning med 40%, jämfört med nuvarande nivåer. Simuleringarna baseras på beräknade regnmängder för en tremånadersperiod. Resultaten för dessa scenarier visas i Figurerna 4.14, 4.15, 4.16 och 4.17



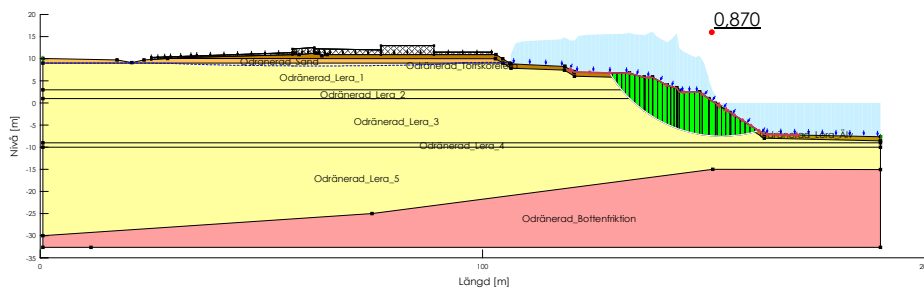
**Figur 4.14:** Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,967 (SEEP/W). Författarnas egna bild.



**Figur 4.15:** Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,967 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_odränerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Odränerad_Bottenfiktions	Mohr-Coulomb	20						38	
Yellow	Odränerad_Lera_1	Shf(depth)	16,5	20	0	20				
Yellow	Odränerad_Lera_2	Shf(datum)	16,5	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_3	Shf(datum)	16,2	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_4	Shf(datum)	16,7	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_5	Shf(datum)	16,7	1,33	200	-10	48			
Orange	Odränerad_Lera_Av	Shf(depth)	16	5	0	200				
Orange	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
Orange	Odränerad_Torskoaletra	Mohr-Coulomb	18						0	

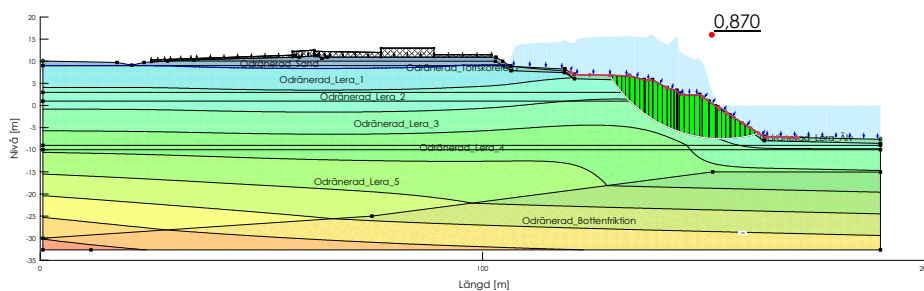


**Figur 4.16:** Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,870 (SEEP/W). Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_odränerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Odränerad_Bottenfiktions	Mohr-Coulomb	20						38	
Yellow	Odränerad_Lera_1	Shf(depth)	16,5	20	0	20				
Yellow	Odränerad_Lera_2	Shf(datum)	16,5	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_3	Shf(datum)	16,2	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_4	Shf(datum)	16,7	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_5	Shf(datum)	16,7	1,33	200	-10	48			
Orange	Odränerad_Lera_Av	Shf(depth)	16	5	0	200				
Orange	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
Orange	Odränerad_Torskoaletra	Mohr-Coulomb	18						0	

Water Pressure	
Blue	-48 - 0 kPa
Light Blue	0 - 48 kPa
Light Green	48 - 96 kPa
Green	96 - 144 kPa
Dark Green	144 - 192 kPa
Yellow-Green	192 - 240 kPa
Yellow	240 - 288 kPa
Orange	288 - 336 kPa
Red-Orange	336 - 384 kPa
Red	384 - 432 kPa
Dark Red	432 - 480 kPa



**Figur 4.17:** Utgångsläge för sektion 32/255, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,870 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

Den kombinerade analysen för samma simuleringar går att se i Bilagor A.1.1.

## 4. Resultat

### 4.1.3 Regnsimulering med erosion 32/255

Tabell 4.3 presenterar säkerhetsfaktorer från SEEP/W för sektion 32/255, baserat på simulerat regn (dagens nivå ,+10%,+40%) över tre månader, tillsammans med en erosion på 10 meter.

<b>Analys med Erosion</b>	<b>Tidpunkt</b>	<b>Regn idag</b>	<b>+10% regn</b>	<b>+40% regn</b>
<b>Odränerad</b>	Utan Regn	1,187	1,187	1,187
	Juli	0,955	0,871	0,677
	Augusti	0,847	0,785	0,650
	September	0,953	0,893	0,783
<b>Kombinerad</b>	Utan Regn	0,650	0,650	0,650
	Juli	0,453	0,430	0,372
	Augusti	0,415	0,397	0,355
	September	0,442	0,424	0,393

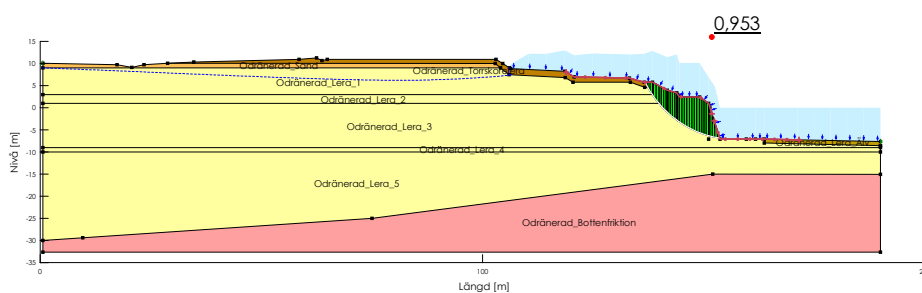
**Tabell 4.3:** Säkerhetsfaktorer för sektion 32/255 med 10 meters erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökningarna på 10% och 40%.

Tabell 4.3 följer samma mall som regnsimuleringen, säkerhetsfaktorerna redovisas för odränerad och kombinerad analys. Tidpunkten *Utan Regn* avser analysen vid dag 0, då ingen regnpåverkan har tillförts. *Juli* motsvarar simuleringen efter 31 dagar, *Augusti* efter 62 dagar, och *September* efter 92 dagar. För att undersöka effekterna av ökat regn har två ytterligare analyser genomförts, där dagens regnmängd ökats med 10% respektive 40%. Alla simuleringar har utförts i kombination med en erosion på 10 meter.

Figur 4.18 visar slänten med 10 meters erosion i den odränerade analysen, där en regnsimulering motsvarande tre månader av dagens regnmängd har applicerats. I Figur 4.19 går det också att se hur porvattentrycket varierar.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

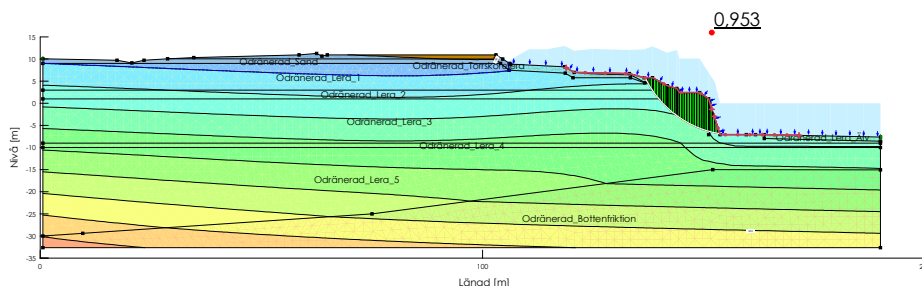
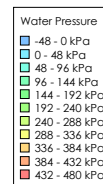
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>3</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Odränerad_Bottenfiktions	Mohr-Coulomb	20						38	
Yellow	Odränerad_Lera_1	Sr(f(depth))	16,5	20	0	20				
Yellow	Odränerad_Lera_2	Sr(f(datum))	16,5	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_3	Sr(f(datum))	16,2	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_4	Sr(f(datum))	16,7	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_5	Sr(f(datum))	16,7	1,33	200	-10	48			
Orange	Odränerad_Lera_Alv	Sr(f(depth))	16	5	0	200				
Orange	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
Orange	Odränerad_Torskoletta	Mohr-Coulomb	18						0	



**Figur 4.18:** Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,953. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

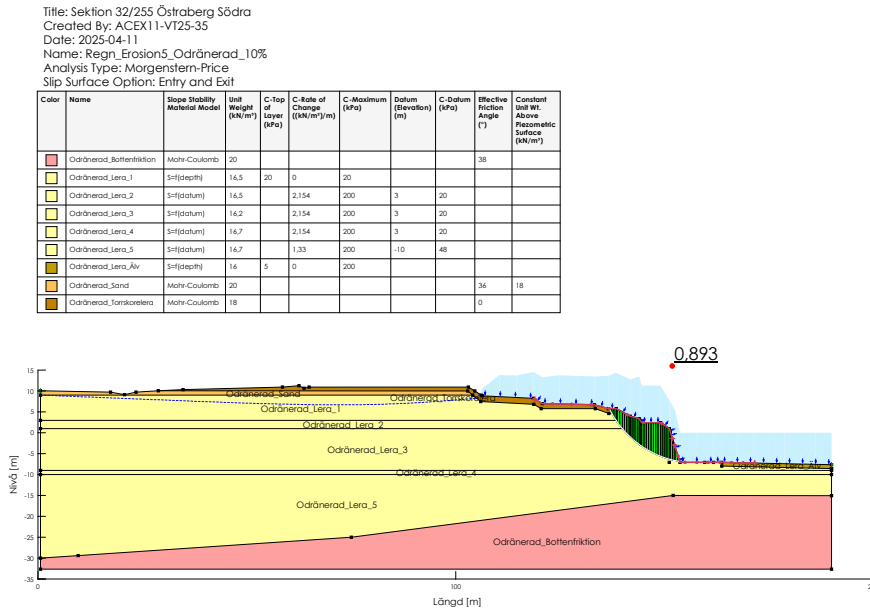
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>3</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Odränerad_Bottenfiktions	Mohr-Coulomb	20						38	
Yellow	Odränerad_Lera_1	Sr(f(depth))	16,5	20	0	20				
Yellow	Odränerad_Lera_2	Sr(f(datum))	16,5	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_3	Sr(f(datum))	16,2	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_4	Sr(f(datum))	16,7	2,154	200	3	20			
Yellow	Odränerad_Lera_5	Sr(f(datum))	16,7	1,33	200	-10	48			
Orange	Odränerad_Lera_Alv	Sr(f(depth))	16	5	0	200				
Orange	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
Orange	Odränerad_Torskoletta	Mohr-Coulomb	18						0	



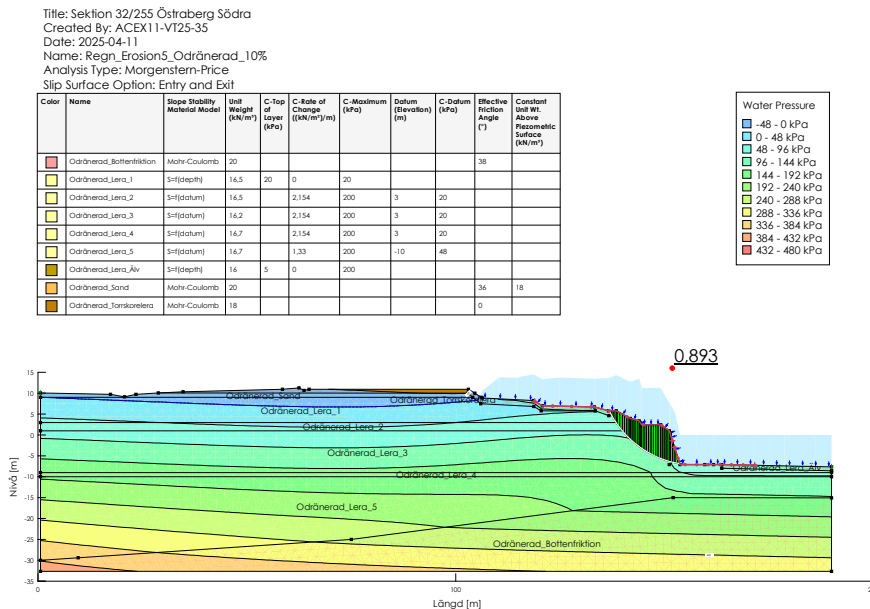
**Figur 4.19:** Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,953. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

#### 4. Resultat

Därefter testades igen att öka regnmängden för att återspegla möjliga framtida scenarier. Ökningarna 10% och 40% valdes igen för att lättare kunna jämföra resultaten. Regnsimuleringarna baseras fortfarande på de beräknade regnmängderna för en tre-månadersperiod. Resultaten för dessa scenarier presenteras i Figureerna 4.20, 4.21, 4.22 och 4.23



**Figur 4.20:** Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,893. Författarnas egna bild.

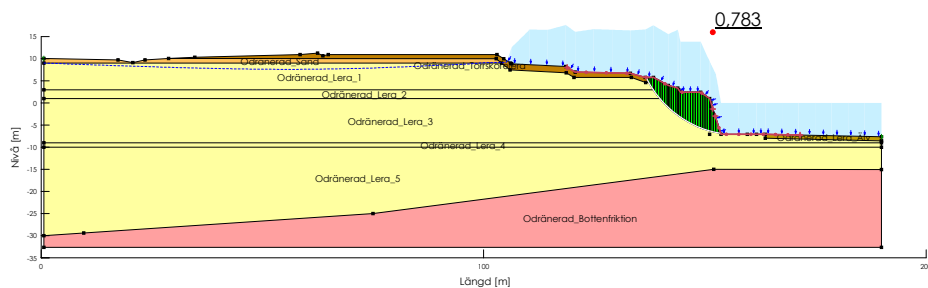


**Figur 4.21:** Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,893. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>3</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Odränerad_Bottenfraktion	Mohr-Coulomb	20						38	
Yellow	Odränerad_Lera_1	Sr(depth)	16,5	20	0	20				
Yellow	Odränerad_Lera_2	Sr(datum)	16,5		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_3	Sr(datum)	16,2		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_4	Sr(datum)	16,7		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_5	Sr(datum)	16,7		1,33	200	-10	48		
Orange	Odränerad_Lera_Alv	Sr(depth)	16	5	0	200				
Orange	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
Orange	Odränerad_Torskaletena	Mohr-Coulomb	18						0	

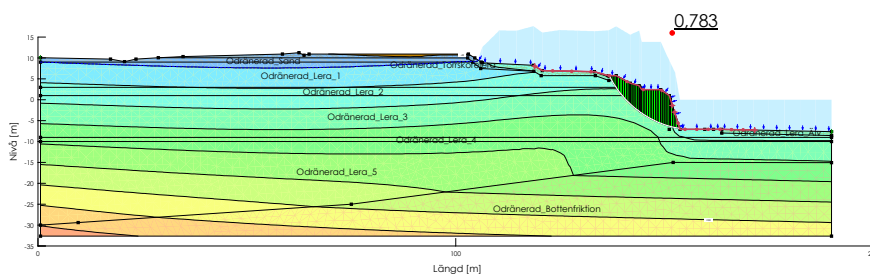


**Figur 4.22:** Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,783. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>3</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )
Red	Odränerad_Bottenfraktion	Mohr-Coulomb	20						38	
Yellow	Odränerad_Lera_1	Sr(depth)	16,5	20	0	20				
Yellow	Odränerad_Lera_2	Sr(datum)	16,5		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_3	Sr(datum)	16,2		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_4	Sr(datum)	16,7		2,154	200	3	20		
Yellow	Odränerad_Lera_5	Sr(datum)	16,7		1,33	200	-10	48		
Orange	Odränerad_Lera_Alv	Sr(depth)	16	5	0	200				
Orange	Odränerad_Sand	Mohr-Coulomb	20						36	18
Orange	Odränerad_Torskaletena	Mohr-Coulomb	18						0	

Water Pressure	
Blue	-48 - 0 kPa
Light Blue	0 - 48 kPa
Light Green	48 - 96 kPa
Green	96 - 144 kPa
Dark Green	144 - 192 kPa
Yellow-Green	192 - 240 kPa
Yellow	240 - 288 kPa
Orange	288 - 336 kPa
Red-Orange	336 - 384 kPa
Red	384 - 432 kPa
Dark Red	432 - 480 kPa



**Figur 4.23:** Sektion 32/255, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,783. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

Den kombinerade analysen för samma simuleringar går att se i Bilagor A.1.2.

## 4.2 Sektion 31/920

I denna del presenteras resultaten för sektion 31/920, vars geografiska läge beskrivs i det teoretiska avsnittet och illustreras i Figur 2.5. Varje del inleds med en sammanfattande tabell som ger en översikt av resultaten. Tabellerna presenterar de viktigaste parametrarna och mätvärdena, följt av en detaljerad beskrivning av hur resultaten har tagits fram och simulerats med hjälp av GeoStudio 2024.

Erosionen analyseras med beräkningar i SLOPE/W. Först redovisas släntens nuvarande tillstånd, som utgör utgångsläget, följt av det slutliga erosionstillståndet vid en förskjutning av slänthöjden med 10 meter. För denna sektion visas endast analyserna för odränerade analysen, figurer från den kombinerade analysen finns i Bilagor A.2.1.

Regnsimuleringen utförs med SEEP/W och inleds med utgångsläget. Därefter simuleras regnpåverkan för tre scenarier: dagens regn, en ökning med 10% och en ökning med 40%. Resultaten för den odränerade analysen presenteras, medan figurer från den kombinerade analysen finns i Bilagor A.2.2. Slutligen visas hur kombinationen av olika regnmängder och en erosion på 10 meter påverkar släntens säkerhetsfaktor. Även här redovisas den odränerade analysen, med den kombinerade analysen i Bilagor A.2.3.

### 4.2.1 Erosion 31/920

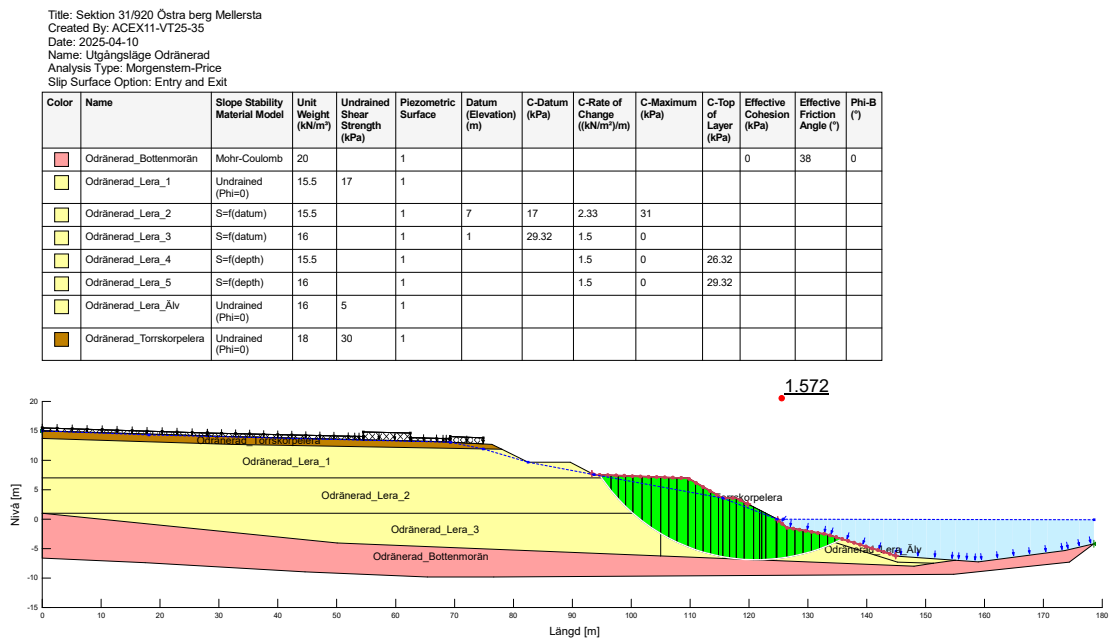
Tabell 4.4 presenterar säkerhetsfaktorer från SLOPE/W för utgångsläget (0m) och erosionsstegen 2-10m, för sektion 31/920.

Erosion [m]	Släntvinkel [°]	SF odränerad 31/920	SF kombinerad 31/920
0	13,31	1,572	0,994
2	14,50	1,561	0,986
4	18,14	1,541	0,980
6	20,75	1,515	0,968
8	24,18	1,487	0,953
10	28,86	1,447	0,926

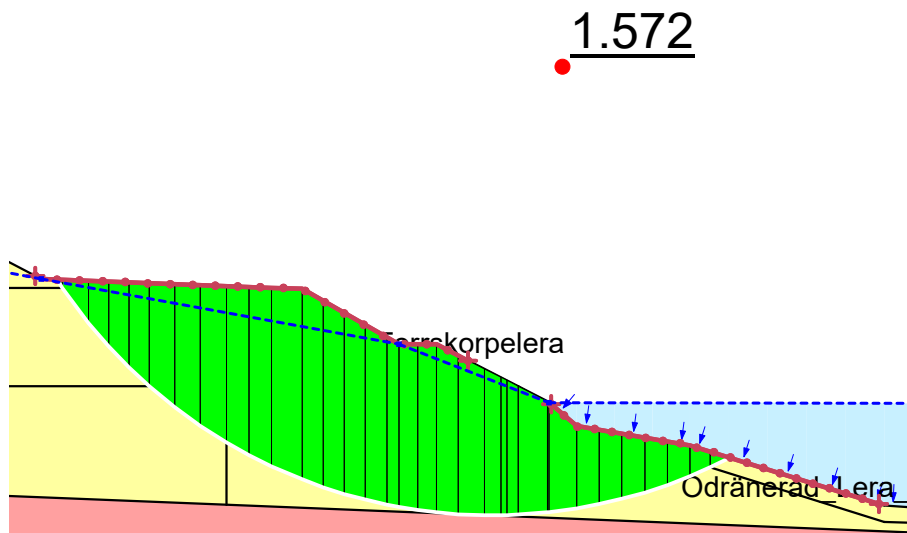
**Tabell 4.4:** Resultat förändring av säkerhetsfaktor (SF) för slänt 31/920 vid erosion 0-10 m för både odränerad och kombinerad analys

I Tabell 4.4 redovisas erosionsstegen i meter, vilket beskriver förskjutningen av slänthöjden från utgångsläget. Till vardera erosionssteg visas också tillhörande släntvinkel i grader. Vidare visas de beräknade säkerhetsfaktorerna för varje steg, både för den odränerade och kombinerade analysen.

Figur 4.24 visar släntens utgångsläge samt beräknad säkerhetsfaktor baserat på en odränerad analys. En inzoomad vy av glidytorna presenteras i Figur 4.25.



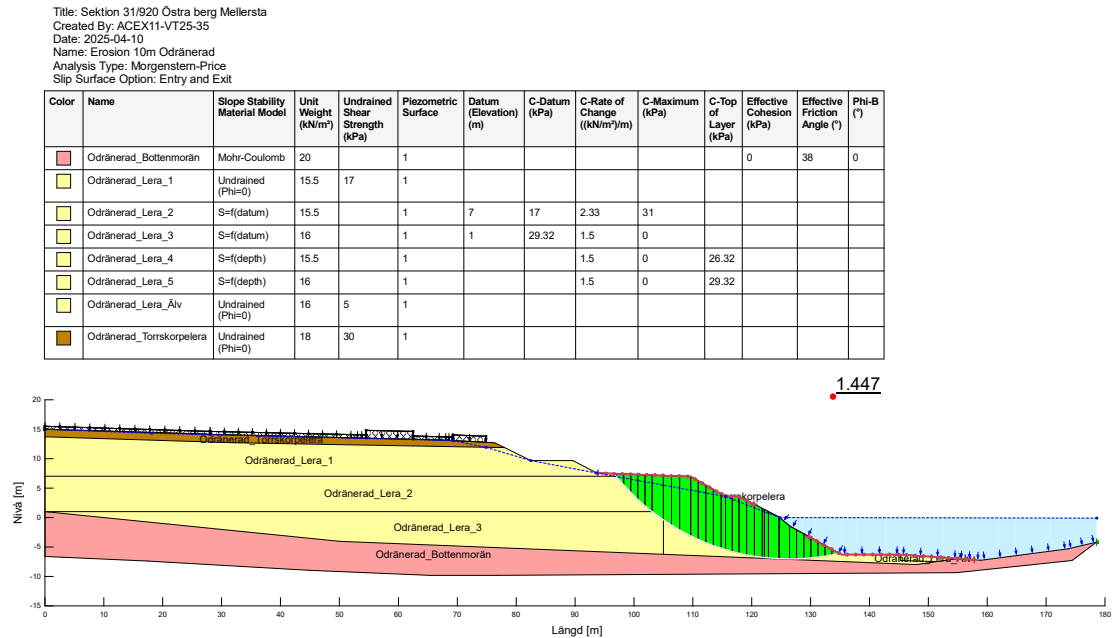
Figur 4.24: Utgångsläget för sektion 31/920, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,572 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.



Figur 4.25: Inzoomad vy av den kritiska glidytan för utgångsläget, sektion 31/920, odränerad analys. Säkerhetsfaktor: 1,572 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

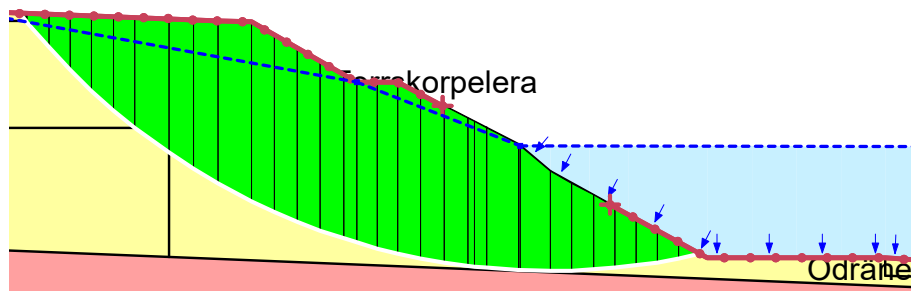
## 4. Resultat

Figur 4.26 visar säkerhetsfaktorer från SLOPE/W för en odränerad analys vid 10 meters erosion i sektion 31/920. En inzoomad vy av glidyterna presenteras i Figur 4.27.



**Figur 4.26:** Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 1,447 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

1.447



**Figur 4.27:** Inzoomad vy av den kritiska glidytan för sektion 31/920, odränerad analys vid 10m erosion. Säkerhetsfaktor: 1,447 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

### 4.2.2 Regnsimulering 31/920

Tabell 4.5 presenterar säkerhetsfaktorer från SEEP/W baserat på simulerad regn (dagens nivå, +10%, +40%) över tre månader, för sektion 32/255.

Analys	Tidpunkt	Regn idag	+10% regn	+40% regn
<b>Odränerad</b>	Utan regn	0,970	0,973	0,971
	Juli	0,453	0,363	0,272
	Augusti	0,376	0,364	0,308
	September	0,461	0,448	0,377
<b>Kombinerad</b>	Utan regn	0,262	0,272	0,269
	Juli	0,291	0,256	0,216
	Augusti	0,251	0,253	0,243
	September	0,239	0,262	0,239

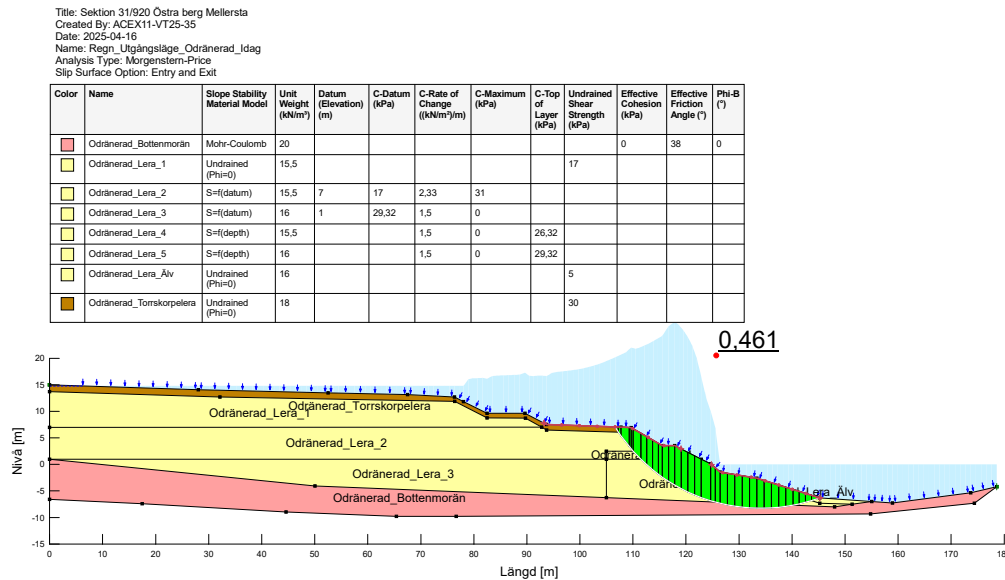
**Tabell 4.5:** Säkerhetsfaktorer för sektion 31/920 utan erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökning på 10% och 40%.

I Tabell 4.5 redovisas säkerhetsfaktorerna för odränerad och kombinerad analys. Tidpunkten *Utan Regn* avser analysen vid dag 0, då ingen regnpåverkan har tillförts. *Juli* motsvarar simuleringen efter 31 dagar, *Augusti* efter 62 dagar, och *September* efter 92 dagar. För att undersöka effekterna av ökat regn har två ytterligare analyser genomförts, där dagens regnmängd ökats med 10% respektive 40%. Dessa scenarier presenteras också i tabellen.

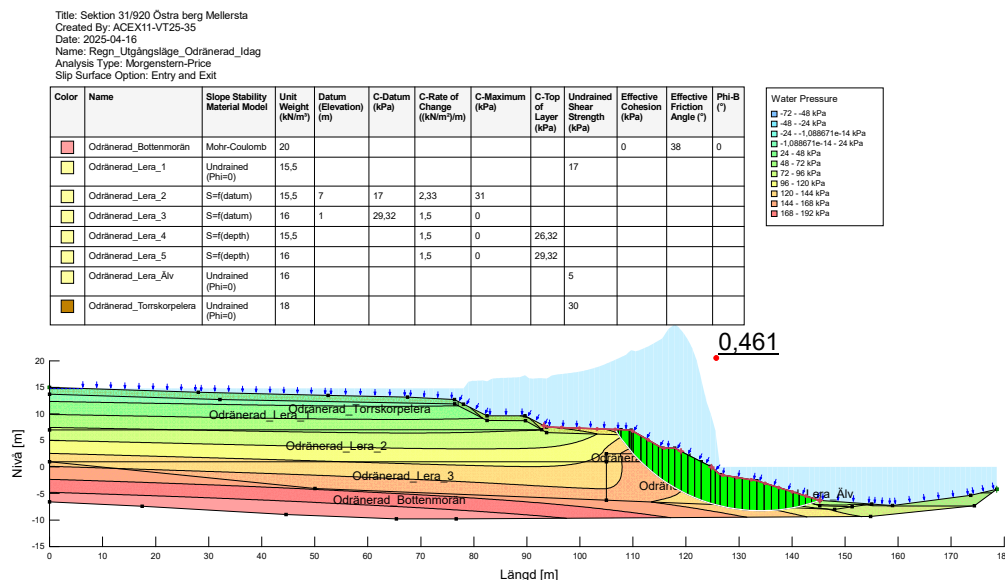
SEEP/W användes igen för att simulera hur olika regnmängder skulle påverka släntens säkerhetsfaktor. Denna gången lades en torrskorpa på 1 meter ovanpå leran direkt för att möjliggjorde infiltration.

## 4. Resultat

Figur 4.28 visar släntens utgångsläge för den odränerade analysen, där en regnsimulering motsvarande tre månader av dagens regnmängd har applicerats mellan älven och det bebyggda området. I Figur 4.29 går det att se hur porvattentrycket varierar.



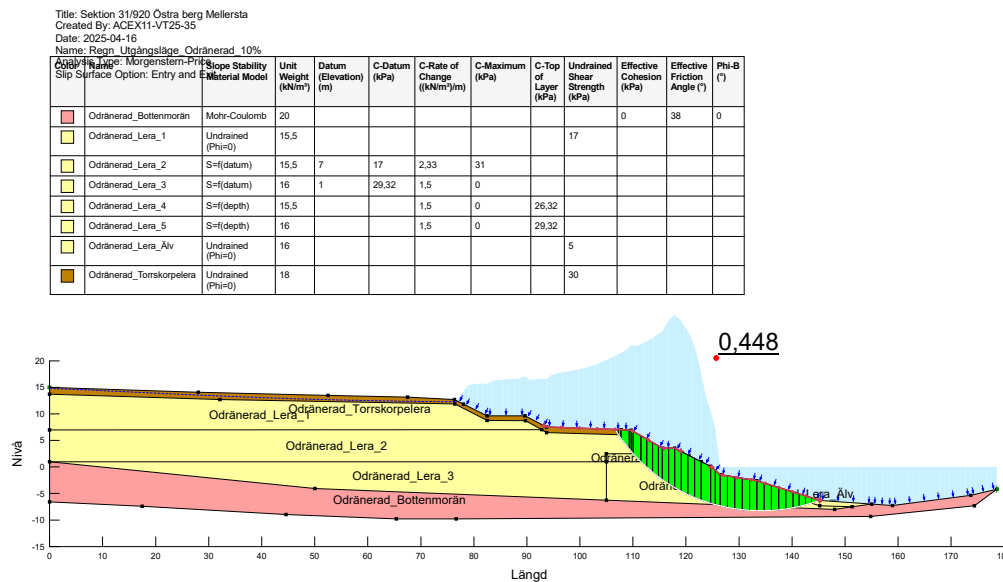
**Figur 4.28:** Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,461 (SEEP/W). Författarnas egna bild.



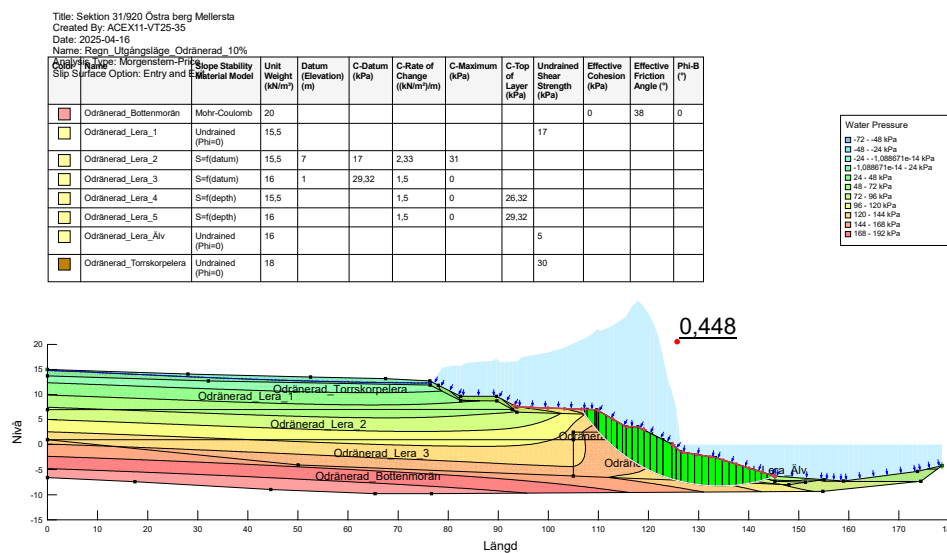
**Figur 4.29:** Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,461 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

Simuleringar med ökad regnmängd genomfördes för att återspegla möjliga framtida scenarier. Först testades en ökning med 10%, följt av en ökning med 40%, jämfört med dagens nivå. Regnsimuleringarna baseras fortfarande på de beräknade regnmängderna för en tre-månadersperiod. Resultaten för dessa scenarier presenteras i Figureerna 4.30, 4.31, 4.32 och 4.33



**Figur 4.30:** Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448 (SEEP/W). Författarnas egna bild.

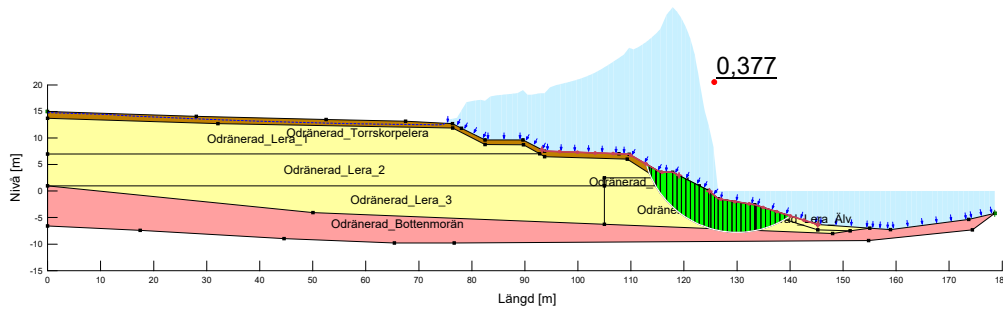


**Figur 4.31:** Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Odränerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	C-Top of Layer (kPa)	Undrained Shear Strength (kPa)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)
Red	Odränerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20							0	38	0
Yellow	Odränerad_Lera_1	Undrained (Phi=0)	15,5						17			
Yellow	Odränerad_Lera_2	S=(datum)	15,5	7	17	2,33	31					
Yellow	Odränerad_Lera_3	S=(datum)	16	1	29,32	1,5	0					
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=(depth)	15,5			1,5	0	26,32				
Yellow	Odränerad_Lera_5	S=(depth)	16			1,5	0	29,32				
Yellow	Odränerad_Lera_Alv	Undrained (Phi=0)	16						5			
Brown	Odränerad_Torrskorpelera	Undrained (Phi=0)	18						30			

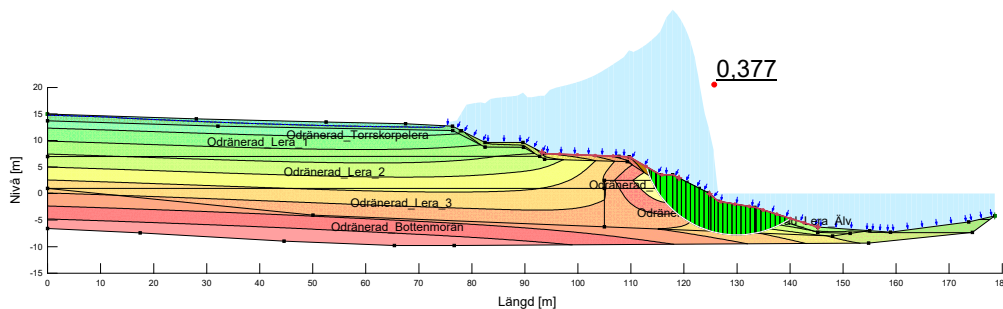


**Figur 4.32:** Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,377 (SEEP/W). Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Odränerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	C-Maximum (kPa)	C-Top of Layer (kPa)	Undrained Shear Strength (kPa)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)
Red	Odränerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20							0	38	0
Yellow	Odränerad_Lera_1	Undrained (Phi=0)	15,5						17			
Yellow	Odränerad_Lera_2	S=(datum)	15,5	7	17	2,33	31					
Yellow	Odränerad_Lera_3	S=(datum)	16	1	29,32	1,5	0					
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=(depth)	15,5			1,5	0	26,32				
Yellow	Odränerad_Lera_5	S=(depth)	16			1,5	0	29,32				
Yellow	Odränerad_Lera_Alv	Undrained (Phi=0)	16						5			
Brown	Odränerad_Torrskorpelera	Undrained (Phi=0)	18						30			

Water Pressure	
Blue	72 - 48 kPa
Light Blue	48 - 24 kPa
Very Light Blue	24 - 0,08867e-14 kPa
White	-1,08867e-14 - 24 kPa
Light Green	24 - 48 kPa
Green	48 - 72 kPa
Dark Green	72 - 96 kPa
Very Dark Green	96 - 120 kPa
Black	120 - 144 kPa
Dark Blue	144 - 168 kPa
Very Dark Blue	168 - 192 kPa



**Figur 4.33:** Utgångsläge för sektion 31/920, odränerad analys med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,377 (SEEP/W). Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

Den kombinerade analysen för samma simuleringar går att se i Bilagor A.2.2.

### 4.2.3 Regnsimulering med erosion 31/920

Tabell 4.6 presenterar säkerhetsfaktorer från SEEP/W för sektion 31/920, baserat på simulerat regn (dagens nivå ,+10%,+40%) över tre månader, tillsammans med en erosion på 10 meter.

Analys med Erosion	Tidpunkt	Regn idag	+10% regn	+40% regn
<b>Odränerad</b>	Utan regn	0,766	0,766	0,766
	Juli	0,473	0,341	0,297
	Augusti	0,374	0,361	0,330
	September	0,448	0,427	0,376
<b>Kombinerad</b>	Utan regn	0,117	0,117	0,117
	Juli	0,118	0,187	0,282
	Augusti	0,126	0,158	0,149
	September	0,124	0,131	0,118

**Tabell 4.6:** Säkerhetsfaktorer för sektion 31/920 med 10 m erosion. Tabellen visar påverkan av simulerat regn under tre månader, med ökningarna på 10% och 40%.

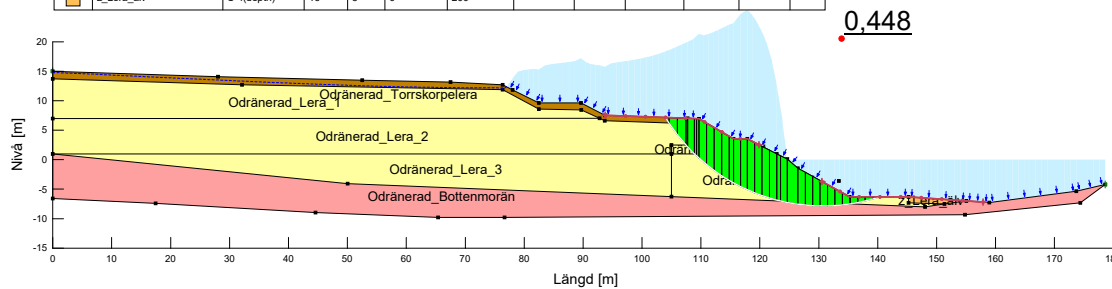
Tabell 4.6 följer samma mall som regnsimuleringen, säkerhetsfaktorerna redovisas för odränerad och kombinerad analys. Tidpunkten *Utan Regn* avser analysen vid dag 0, då ingen regnpåverkan har tillförts. *Juli* motsvarar simuleringen efter 31 dagar, *Augusti* efter 62 dagar, och *September* efter 92 dagar. För att undersöka effekterna av ökat regn har två ytterligare analyser genomförts, där dagens regnmängd ökats med 10% respektive 40%. Alla simuleringar har utförts i kombination med en erosion på 10 meter.

## 4. Resultat

Figur 4.34 visar slänten med 10 meters erosion i den odränerade analysen, där en regnsimulering motsvarande tre månader av dagens regnmängd har applicerats. I Figur 4.35 går det också att se hur porvattentrycket varierar.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad\_Idag  
 Analysis Type: Morgenstem-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

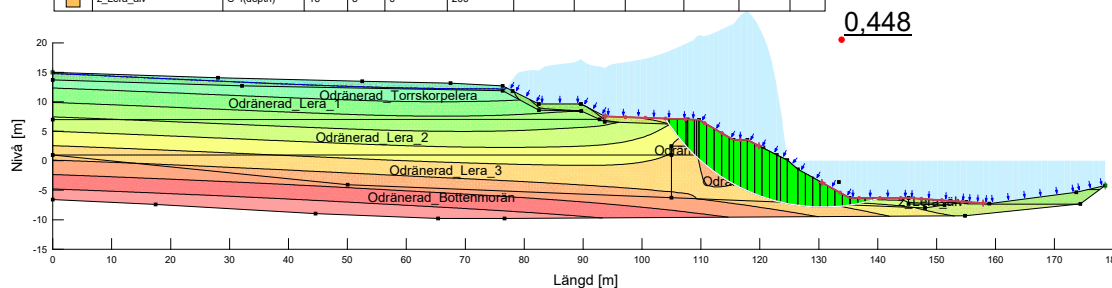
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Undrained Shear Strength (kPa)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)
Red	Odränerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20							0	38	0
Yellow	Odränerad_Lera_1	Undrained (Phi=0)	15,5						17			
Yellow	Odränerad_Lera_2	S=(datum)	15,5	2,33	31	7	17					
Yellow	Odränerad_Lera_3	S=(datum)	16	1,5	0	1	29,32					
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=(depth)	15,5	26,32	1,5	0						
Yellow	Odränerad_Lera_5	S=(depth)	16	29,32	1,5	0						
Brown	Odränerad_Torrskorpelera	Undrained (Phi=0)	18						30			
Orange	z_Lera_alv	S=(depth)	16	5	0	200						



**Figur 4.34:** Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad\_Idag  
 Analysis Type: Morgenstem-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

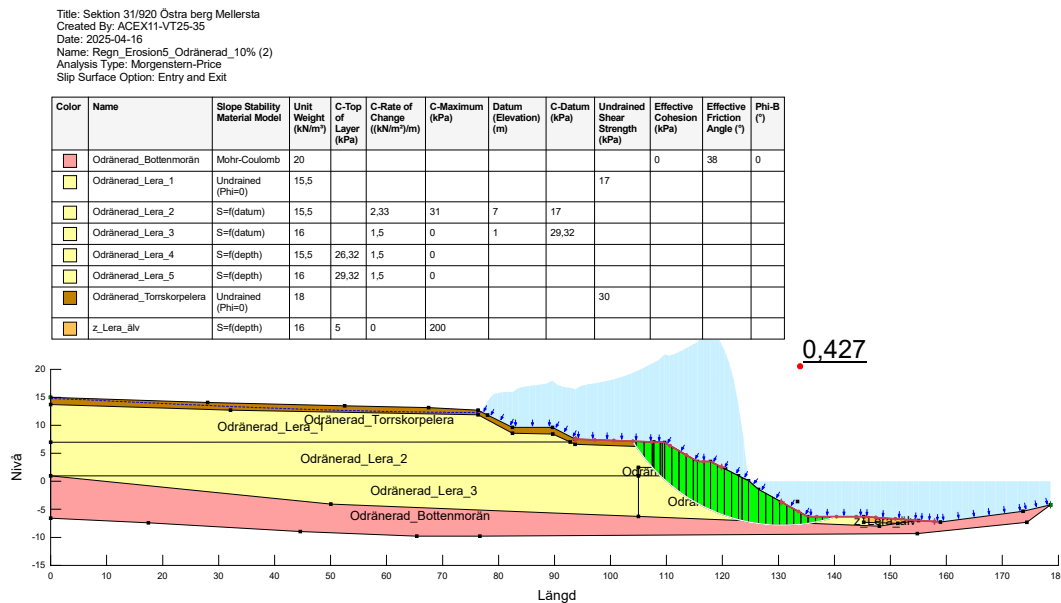
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Undrained Shear Strength (kPa)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)	Water Pressure
Red	Odränerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20							0	38	0	-72 - 48 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_1	Undrained (Phi=0)	15,5						17				-48 - 24 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_2	S=(datum)	15,5	2,33	31	7	17						-24 - -1,088671e-14 - 24 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_3	S=(datum)	16	1,5	0	1	29,32						-1,088671e-14 - 24 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=(depth)	15,5	26,32	1,5	0							24 - 48 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_5	S=(depth)	16	29,32	1,5	0							48 - 72 kPa
Brown	Odränerad_Torrskorpelera	Undrained (Phi=0)	18						30				72 - 96 kPa
Orange	z_Lera_alv	S=(depth)	16	5	0	200							96 - 120 kPa
													120 - 144 kPa
													144 - 168 kPa
													168 - 192 kPa



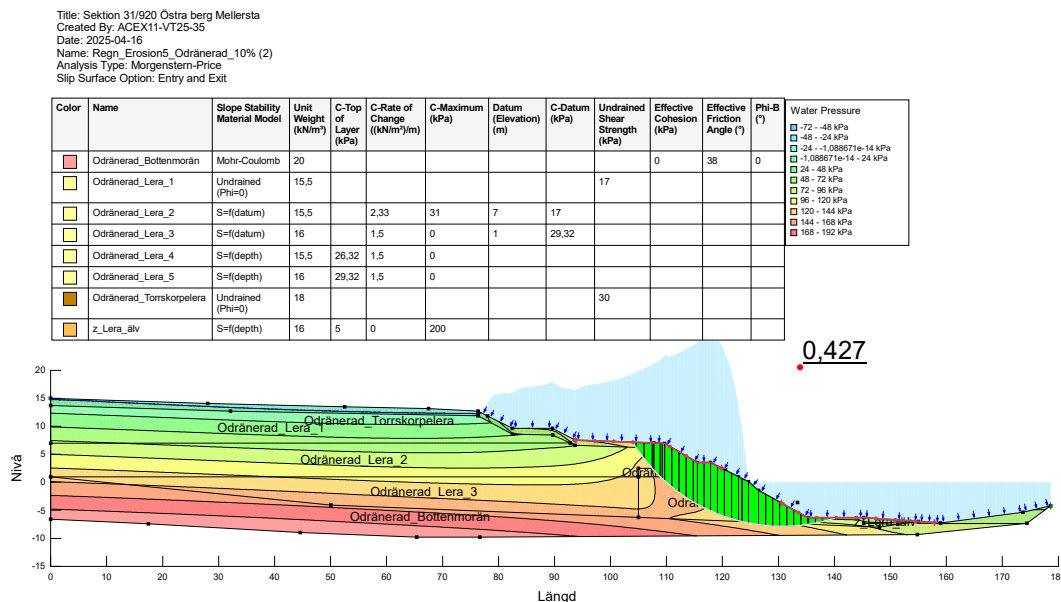
**Figur 4.35:** Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,448. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

Därefter testades igen att öka regnmängden för att återspegla möjliga framtida scenarier. Ökningarna 10% och 40% valdes igen för att lättare kunna jämföra resultaten. Regnsimuleringarna baseras fortfarande på de beräknade regnmängderna för en tre-månadersperiod. Resultaten för dessa scenarier presenteras i Figureerna 4.36, 4.37, 4.38 och 4.39



**Figur 4.36:** Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,427. Författarnas egna bild.

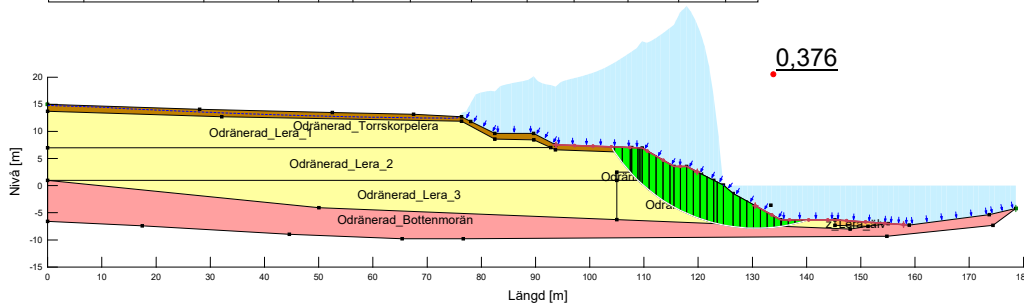


**Figur 4.37:** Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 10% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,427. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## 4. Resultat

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad\_40% (3)  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

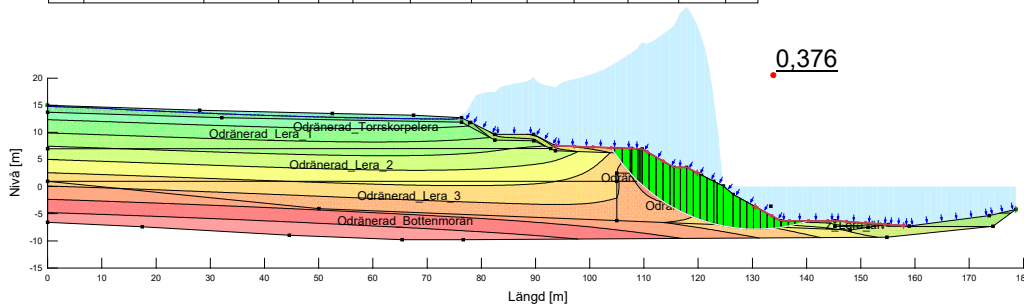
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Undrained Shear Strength (kPa)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)
Red	Odränerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20							0	38	0
Yellow	Odränerad_Lera_1	Undrained (Phi=0)	15.5						17			
Yellow	Odränerad_Lera_2	S=f(datum)	15.5	2.33	31	7	17					
Yellow	Odränerad_Lera_3	S=f(datum)	16	1.5	0	1	29.32					
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=f(depth)	15.5	26.32	1.5	0						
Yellow	Odränerad_Lera_5	S=f(depth)	16	29.32	1.5	0						
Brown	Odränerad_Torrskorpelera	Undrained (Phi=0)	18						30			
Orange	z_Lera_alv	S=f(depth)	16	5	0	200						



**Figur 4.38:** Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,376. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Odränerad\_40% (3)  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Undrained Shear Strength (kPa)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)	Water Pressure
Red	Odränerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20							0	38	0	-72 - -89 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_1	Undrained (Phi=0)	15.5						17				-89 - -244 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_2	S=f(datum)	15.5	2.33	31	7	17						-24 - -1,058671e+14 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_3	S=f(datum)	16	1.5	0	1	29.32						-24 - -48 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_4	S=f(depth)	15.5	26.32	1.5	0							-48 - 72 kPa
Yellow	Odränerad_Lera_5	S=f(depth)	16	29.32	1.5	0							-72 - 96 kPa
Brown	Odränerad_Torrskorpelera	Undrained (Phi=0)	18						30				-96 - 120 kPa
Orange	z_Lera_alv	S=f(depth)	16	5	0	200							-120 - 144 kPa



**Figur 4.39:** Sektion 31/920, odränerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerat regn ökad med 40% jämfört med dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 0,376. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

Den kombinerade analysen för samma simuleringar går att se i Bilagor A.2.3.

### 4.3 Känslighetsanalys för sektion 32/255

En känslighetsanalys har genomförts för att undersöka hur stor påverkan skjuvhållfastheten har på slänternas stabilitet. Resultaten redovisas i tabellerna nedan.

Erosion [m]	SF odränerad med 10% <b>ökning</b> av skjuvhållfasthet	Förändring av SF [%]
0	1,524	+5,4
2	1,501	+5,5
4	1,436	+5,7
6	1,360	+5,9
8	1,279	+6,1
10	1,187	+6,3

**Tabell 4.7:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuvhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för odränerad analys

Tabell 4.7 visar vad säkerhetsfaktorn vid utgångsläget och alla fem erosionssteg blir när skjuvhållfastheten ökas med 10% för odränerad analys för sektion 32/255. Ökningen av säkerhetsfaktorn är mellan 5,4-6,3%. Erosionsstegen som har använts till att undersöka hur mycket erosionen påverkar stabiliteten redovisas i Figur 3.9.

Erosion [m]	SF odränerad med 10% <b>minskning</b> av skjuvhållfasthet	Förändring av SF [%]
0	1,365	-5,6
2	1,341	-5,8
4	1,279	-5,8
6	1,207	-6,0
8	1,132	-6,1
10	1,046	-6,4

**Tabell 4.8:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % minskning av skjuvhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för odränerad analys

#### 4. Resultat

Tabell 4.8 visar säkerhetsfaktorn vid en minskning på 10% av skjuvhållfastheten för samma sektion och analys, alltså sektion 32/255 och odränerad analys. Analysen har gjorts på utgångsläget och alla fem erosionssteg. Minskningen av säkerhetsfaktorn är mellan 5,6-6,4%.

Erosion [m]	SF kombinerad med 10% <b>ökning</b> av hållfasthet	Förändring av SF [%]
0	1,241	+1,3
2	1,179	+1,5
4	1,029	+1,9
6	0,884	+2,1
8	0,732	+2,1
10	0,569	+3,1

**Tabell 4.9:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuvhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys

Tabell 4.9 visar hur mycket säkerhetsfaktorn ökar när skjuvhållfastheten ökas med 10% för kombinerad analys för sektion 32/255. Analysen har genomförts på alla fem erosionssteg och utgångsläget. Ökningen av säkerhetsfaktorn är mellan 1,3-3,1%.

Erosion [m]	SF kombinerad med 10% <b>minskning</b> av hållfasthet	Förändring av SF [%]
0	1,189	-2,9
2	1,141	-1,8
4	0,991	-1,9
6	0,848	-2,1
8	0,702	-2,1
10	0,536	-2,9

**Tabell 4.10:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % minskning av skjuvhållfasthet för sektion 32/255 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys

Tabell 4.10 visar hur mycket säkerhetsfaktorn minskar för alla steg när skjuvhållfastheten minskar med 10% för kombinerad analys för sektion 32/255. Minskningen av säkerhetsfaktorn är mellan 1,8-2,9%.

## 4.4 Känslighetsanalys för sektion 31/920

Nedan redovisas resultaten för känslighetsanalysen som har genomförts för sektion 31/920.

Erosion [m]	SF <b>odränerad</b> med 10% <b>ökning</b> av hållfasthet	Förändring av SF [%]
0	1,695	+7,8
2	1,684	+7,9
4	1,662	+7,9
6	1,625	+7,3
8	1,587	+6,7
10	1,552	+7,3

**Tabell 4.11:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för odränerad analys

Tabell 4.11 visar hur mycket säkerhetsfaktorn ökar vid alla steg för odränerad analys för sektion 31/920 när skjuvhållfastheten ökar med 10%. Säkerhetsfaktorn ökar med 6,7-7,9%.

Erosion [m]	SF <b>odränerad</b> med 10% <b>minskning</b> av hållfasthet	Förändring av SF [%]
0	1,447	-8,0
2	1,437	-7,9
4	1,420	-7,9
6	1,395	-7,9
8	1,369	-7,9
10	1,332	-7,9

**Tabell 4.12:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % minskning av skjuhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för odränerad analys

#### 4. Resultat

Tabell 4.12 visar hur mycket säkerhetsfaktorn minskar för utgångsläget och de fem erosionsstegen vid en minskning av skjuvhållfastheten på 10% för samma sektion och analys, alltså sektion 31/920 och odränerad analys. Säkerhetsfaktorn minskar med 7,9-8,0%.

Erosion [m]	SF <b>kombinerad</b> med 10% <b>ökning</b> av hållfasthet	Förändring av SF [%]
0	1,013	+1,9
2	1,005	+1,9
4	1,00	+2,0
6	0,988	+2,1
8	0,972	+2,0
10	0,943	+1,8

**Tabell 4.13:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 % ökning av skjuvhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys

Tabell 4.13 visar hur mycket säkerhetsfaktorn ökar för kombinerad analys för sektion 31/920 vid alla erosionssteg och utgångsläget när skjuvhållfastheten ökar med 10%. Säkerhetsfaktorn ökar mellan 1,8-2,1%.

Erosion [m]	SF <b>kombinerad</b> med 10% <b>minskning</b> av hållfasthet	Förändring av SF [%]
0	0,973	-2,1
2	0,964	-2,2
4	0,959	-2,1
6	0,949	-2,0
8	0,935	-1,9
10	0,908	-1,9

**Tabell 4.14:** Resultat av känslighetsanalys. Förändring av säkerhetsfaktor (SF) efter 10 minskning av skjuvhållfasthet för sektion 31/920 vid erosion 2-10 m för kombinerad analys

Tabell 4.14 visar för samma analys och sektion, alltså sektion 31/920 och kombinerad analys, hur mycket säkerhetsfaktorn minskar för alla steg när skjuvhållfastheten minskas med 10%. Minskningen är mellan 1,9-2,2%.

# 5

## Diskussion

Detta avsnitt presenterar en diskussion av studiens huvudsakliga delar, med fokus på resultatet av simuleringarna av erosion och nederbörd utförda i SLOPE/W och SEEP/W. Dessutom diskuteras resultatet av känslighetsanalysen, möjliga felkällor, föreslagna åtgärder och förslag på vidare studier.

Föreliggande studie inleddes med en genomgripande litteraturöversikt av tillgängligt material och tidigare utförda studier kring konsekvenserna av klimatförändringar på stabiliteten hos naturliga slänter. Detta för att, på ett välgrundat sätt, avgränsa simuleringarna vilka utfördes i GeoStudio 2024 till enbart de som antas vara allra mest kritiska. Det kunde noteras att de mest kritiska effekterna har alla en tydlig koppling till den förväntade förändringen i nederbördsmonstret. Framförallt de farhågor vilka uppstår i samband med att regnen blir allt fler och mer intensiva. Som konsekvens av ett ökat porvattentryck sjunker skjuvhållfastheten i slänten när regnvatten infiltreras i jorden. Erosion vid släntheten ökar som konsekvens av ett ökat flöde i älven och erosion längs slänten ovan vattenytan ökar på grund av en ökad ytavrinning. Därför begränsades simuleringarna i SLOPE/W och SEEP/W till just dessa två, erosion och ökad infiltration av nederbörd. Exempelvis hade även en förändrad ytvattennivå i Göta älv kunnat vara en relevant konsekvens men på grund av de strikta kraven för intervallet vattennivån måste ligga inom, antogs detta inte vara en kritisk konsekvens.

### 5.1 Simulering av erosion i SLOPE/W

Slänter betraktas som stabila om säkerhetsfaktorn ligger över 1,5-1,7 för odränerad analys och 1,35-1,45 för kombinerad analys. För att analysera hur stabil slänten är idag har säkerhetsfaktorn för den befintliga slänten beräknats med hjälp av SLOPE/W. Säkerhetsfaktorn för odränerad analys för sektion 32/255 är 1,446 och uppfyller därför inte kravet. För kombinerad analys är säkerhetsfaktorn 1,225, vilket inte heller uppfyller kravet. För sektion 31/920 är säkerhetsfaktorn 1,572 vid utgångsläget för odränerad analys och uppfyller kravet. För kombinerad analys är säkerhetsfaktorn 0,994, vilket inte uppfyller kravet utan istället tyder på att modellen inte stämmer överens med verkligheten då säkerhetsfaktorn är lägre än 1 vilket innebär att slänten är så pass instabil att skred redan ska ha inträffat. Det är med andra ord tydligt att de två slänterna är kritiska redan från början.

De två slänterna från de två olika sektionerna i södra respektive mellersta Östra

## 5. Diskussion

Berg uppnår inte, förutom odränerad analys för sektion 31/920, säkerhetskraven som gäller vid nyexploatering. Något som inte har tagits hänsyn till i beräkningarna är att det idag finns ett erosionskydd i form av sprängsten utlagt längs hela området. Det innebär att säkerhetsfaktorerna är sannolikt högre i verkligheten. Det innebär också att det idag finns ett skydd mot erosion. Vid kraftiga regn är dock ökad erosion en sannolik konsekvens. Beräkningarna som har genomförts i SLOPE/W tar alltså inte hänsyn till det befintliga skydd mot erosion som finns idag.

För att simulera erosion på ett tydligt och verklighetstroget sätt har det antagits att en konsekvens av erosion är att ett litet lokalt skred sker. Detta kommer att leda till att en bit av slänten släpper och lutningen blir brantare. Detta har genomförts i fem steg. Där 2 m, 4 m, 6 m, 8 m och 10 m har dragits in från slänthöjden och sedan upp till precis ovanför grundvattennivån. När materialet försvinner vid foten av slänten så försvinner den mothållande kraften som hjälper resten av slänten att hållas på plats. Det leder till att slänten blir mer instabil, eftersom det inte finns lika mycket material som håller emot tyngdkraften från materialet ovanför. Det utrymme vid slänthöjden där lera har eroderats bort kommer dock att fyllas av vatten och fungerar som en mothållande kraft, vilket ökar stabiliteten. Dock har vatten lägre densitet än vad lera i slänten har, vilket innebär att den mothållande kraften från vattnet är mindre än den från lera. Så trots den mothållande kraften från vattnet blir slänten mer instabil när lera eroderas bort. Vilket resultatet också tyder på, då säkerhetsfaktorn blir lägre.

### 5.2 Förändring av nederbörd i SEEP/W

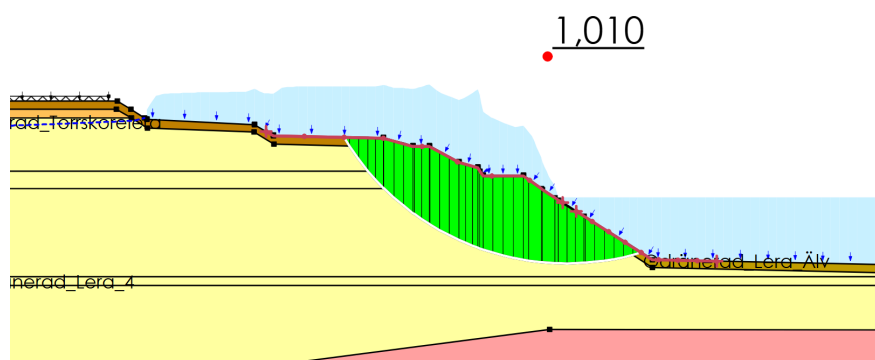
Visionen med simuleringen av infiltration av regnvatten i slänten var att få ut portryck vid olika tidpunkter under de studerade månaderna juli-september. Detta för att få en bild av hur säkerhetsfaktorn förändras i takt med det förändrade porvattentrycket i slänten.

Den förväntade ökningen av nederbörd är beroende av vilket RCP-scenario utvecklingen följer. Att göra en tydlig uppdelning av analysen i GeoStudio enligt de två utvecklingsbanorna RCP 4,5, en måttligare utveckling av den globala uppvärmningen, och RCP 8,5, den kraftigare utvecklingen, var initialt tanken men visade sig vara utmanande. Detta då det råder stor osäkerhet kring den exakta omfattningen av nederbördsökningen fram till år 2100. Klimatscenariot RCP 4,5 indikerar däremot, som nämnt i teoriavsnittet, en ökning med 10-30 procent och RCP 8,5 indikerar en ökning med 15-40 procent. Resultatet av simuleringen med en nederbördsökning på 10 procent bör därmed tolkas som mer representativ för utvecklingen enligt RCP 4,5-scenariot, medan resultatet av en ökning på 40 procent bättre borde överensstämma med en utveckling i linje med RCP 8,5.

Ur den graf som initialt presenteras i resultatet för simuleringarna i SEEP/W kan det tydligt observeras en förändring av säkerhetsfaktorn i samband med en förändrad nederbördsmängd. Se Figur 5.2. Så fort ett regn appliceras på slänten sjunker säkerhetsfaktorn direkt och ligger sedan på samma värde under

hela månaden. När nederbördsmängden under nästkommande månad förändras, förändras också säkerhetsfaktorn på samma sätt och lägger sig på en ny nivå vilken är konstant under dessa 30/31 dagar. När nederbörden minskar ökade säkerhetsfaktorn och när nederbörden ökar minskade istället säkerhetsfaktorn. Nederbördsmängden är stor i juli månad (de första 31 dagarna i simuleringen) och blir sedan lägre i augusti och september vilket gör att säkerhetsfaktorn ökar efter 30 dagar och sedan ökar igen efter 61 dagar. Detta mönster i förändringen av säkerhetsfaktorn kan initialt uppfattas vara helt i linje med det som teoretiskt bör inträffa. För en dränerad analys innebär en ökad regninfiltration ett ökat porvattentryck. Eftersom ett ökat porvattentryck, enligt Terzaghis ekvation, innebär en minskad effektivspänning och därmed en minskad skjuvhållfasthet, borde säkerhetsfaktorn sjunka när regnmängden ökar. Vilket den gör.

En närmare granskning visade däremot att detta inte utgjorde den egentliga orsaken till det observerade resultatet. Eftersom de två sektionerna denna studie utgår från består av lera hela vägen upp till markytan av slänten kommer jorden, på grund av lerans mycket låga hydrauliska konduktivitet, att bli mättad i princip direkt. Detta med påföljden att inget av efterkommande regn kommer att kunna infiltreras ner i jorden och porvattentrycket i jorden kommer att hållas relativt jämnt under hela det studerade tidsintervallet. Detta gör att regnet, i programmet, istället ansamlas vid ytan och lägger sig som en pådrivande last ovanpå slänten. Den huvudsakliga anledningen till förändringen av säkerhetsfaktorn visar sig alltså vara att lasten av vattnet ovan slänten förändras när regnmängden förändras, inte att portrycket i sig blir högre. Ett exempel på hur vattenansamlingen som bildas kan se ut illustreras i Figur 5.1 nedan.

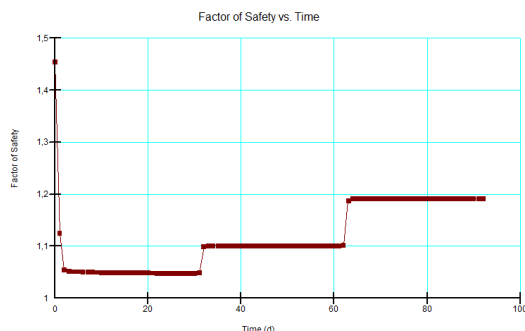


**Figur 5.1:** En inzoomad bild av Figur 4.12 för att illustrera hur regnet ansamlas vid ytan. Utgångsläge för sektion 32/255 i en odränerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Säkerhetsfaktor: 1,010 (SEEP/W). Författarnas egna bild.

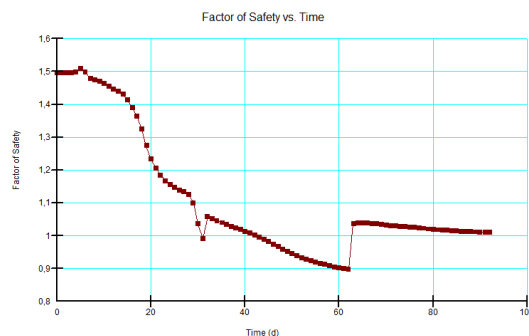
Efter att problemet observerats genomfördes en justering där en torrskorpa med mäktigheten 1 meter tillfördes längs med slänten. Detta för att bättre simulera den verkliga slänten med förhoppningen att få ett mer tillförlitligt resultat. Enligt den

## 5. Diskussion

MUR vilken indatan för simuleringarna baseras på är leran av samma kvalitet hela vägen upp till markytan. Detta antogs vara en förenkling då jorden vid markytan ofta består av vegetation etcetera som gör att hållfastheten och tungheten på leran förändras. Torrskorpan möjliggör för en större andel nederbörd att infiltreras. Att förändra släntens jordlagerföljd på detta sätt visade sig ge ett mer trovärdigt resultat då säkerhetsfaktorn, efter denna åtgärd, förändrades mer successivt istället för att, som innan, lägga sig på en jämn nivå direkt. Jämför Figur 5.2 och Figur 5.3 nedan. De båda graferna återfinns även i resultatet i Figur 4.10 och 4.11.



**Figur 5.2:** Förändring av säkerhetsfaktorn över tid utan torrskorpa (SEEP/W).



**Figur 5.3:** Förändring av säkerhetsfaktorn över tid med torrskorpa (SEEP/W).

Däremot är det av vikt att belysa att, trots att torrskorpan möjliggjorde en viss infiltration, kvarstod till viss del problemet med ansamling av vatten vid ytan. Detta kan till exempel observeras i Figur 5.1 där ansamlingen av vatten uppstod trots att en torrskorpa är adderad. Simuleringsresultatet avviker från vad som kan förväntas i praktiken då vattnet istället hade runnit av längs markytan och därmed inte utgjort en pådrivande last vilken resulterar i de extremt låga säkerhetsfaktorer som framräknats. Även porvattentrycken visar sig också, på grund av detta, bli orimliga. Med detta resonemang som grund kan de framräknade säkerhetsfaktorer alltså inte anses utgöra ett tillförlitligt underlag för vidare bedömning.

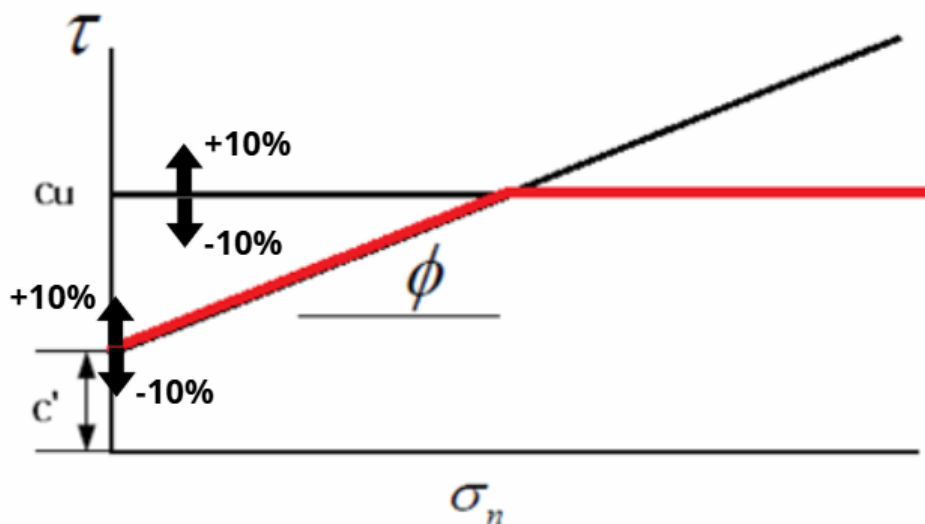
### 5.3 Känslighetsanalys

Det finns alltid en osäkerhet i geotekniska analyser. Dels på grund av betydande naturliga variationer och dels på grund av mätosäkerheter vilka är svåra att undgå. Med avsikten att öka resultatets tillförlitlighet inkluderades därför en känslighetsanalys i denna studie. Att utföra simuleringen av erosion på nytt men där skjuvhållfastheten i respektive lerlager varierades med  $\pm 10\%$  blev ett lättfattligt sätt att få en uppfattning kring modellernas känslighet för osäkerheter i indata.

Resultatet av känslighetsanalysen presenteras i Tabellerna 4.7 till 4.14. Variationen i hur mycket säkerhetsfaktorn förändras ligger mellan 1,3-8,0%. Förändringen blir

större för den odränerade analysen än vad den blir för den kombinerade analysen. Detta gäller för båda sektionerna. Ett tydligt exempel på detta är för sektion 31/920 vid 10% minskning av skjuvhållfastheten. För den odränerade analysen minskar säkerhetsfaktorn 7,9-8,0%, se Tabell 4.12, och för den kombinerade analysen minskar säkerhetsfaktorn istället bara 1,9-2,2%, se Tabell 4.14.

Vid jämförelse av de olika analysmetoderna blir det, genom att studera figur 5.4 nedan, tydligt att variabeln som är styrande skiljer sig mellan analyserna. Effekten på släntstabiliteten blir större när den odränerade skjuvhållfastheten,  $c_u$ , ändras jämfört med när den effektiva kohesionen,  $c'$ , ändras. I den odränerade analysen av de två slänterna är  $c_u$  den enda variabeln som är styrande. Säkerhetsfaktorn blir därför, i denna analysmetod, direkt mer känslig för ett förändrat värde på  $c_u$  vilket ses genom att den procentuella förändringen av säkerhetsfaktorn här blir mycket större. I den kombinerade analysen finns istället flera variabler som påverkar säkerhetsfaktorn. Den procentuella förändringen av säkerhetsfaktorn tydliggör att en förändring av den effektiva kohesionen *har* en påverkan på säkerhetsfaktorn, men bara till viss del. En ökning eller minskning av  $c'$  ger inte lika stor påverkan eftersom exempelvis värdet på friktionsvinkeln även har en avgörande påverkan. Med andra ord överensstämmer resultatet av den känslighetsanalys som utförts med det som teoretiskt sett borde skett.



**Figur 5.4:** Illustration av hur  $c_u$  och  $c'$  ökar eller minskar med 10% [40]. Modifierad av författarna.

Känslighetsanalysen visar alltså att en tioprocentig variation i skjuvhållfastheten resulterar i en relativt liten förändring av säkerhetsfaktorn. Den har däremot fortfarande en påverkan på resultatet. Dock finns möjligheten att andra parametrar i detta fall har större inverkan på släntens stabilitet. För att få ett mer tillförlitligt resultat hade det med andra ord varit en bra idé att genomföra en känslighetsanalys

som inkluderade fler parametrar.

### 5.4 Möjliga felkällor

Göta älvdalen består av en stor del lera och kvicklera förekommer på flera ställen både i södra och mellersta Östra Berg. Det är därför viktigt att ha detta i beaktning då ett skred som sker i ett område med kvicklera blir mer omfattande då den är extra känslig för störning och kan förlora nästan all sin skjuvhållfasthet vid till exempel ett eventuellt skred. Detta innebär att ett mycket litet skred kan få stora konsekvenser och det kan skapas en kedjereaktion där skredet kan fortplantas bakåt. Med tanke på att det är konstaterat att det förekommer kvicklera i stora delar av både södra och mellersta Östra Berg så är det mycket viktigt att vara medveten om vad det innebär och vilka risker som det för med sig. Vid undersökning av slänterna i GeoStudio tas inte förekomsten av kvicklera i beaktande. Det är dock viktigt att tydliggöra att förekomsten av kvicklera i området inte bör ignoreras. Även om denna rapport inte innehåller några specifika beräkningar kopplade till kvicklera, är det viktigt att ha kunskap om ämnet för att förhindra att en situation där ett skred okontrollerat kan fortplantas och leda till förödande konsekvenser.

Det finns fler parametrar som inte tas hänsyn till eller där förenklade uppskattningar har gjorts. En stor del av de parametrar som har använts kommer från tidigare undersökningar av släntstabiliteten som har genomförts för samma slänter. Dessa undersökningar kommer från 2013 respektive 2015 och det har därför antagits att inga förändringar har skett i området sedan dess. En parameter där det inte fanns något tidigare exempel på var konduktiviteten som användes i SEEP/W var och därför har en uppskattning gjorts baserade på WSPs rapport kring de hydrogeologiska förhållandena i Lilla Edet.

En annan parameter som inte har tagits någon hänsyn till är växter i området. Eftersom inget platsbesök vid de två slänterna har utförts är det inte möjligt att dra några säkra slutsatser om hur mycket vegetation som finns i områdena. Vegetation bidrar till ökad släntstabilitet och kan öka en slänts säkerhetsfaktor med upp till 50% och motverkar erosion. Avsnitt 2.6 beskriver hur rotarmering och evapotranspiration bidrar till att öka sammanhållningen och skapa ett sug i markens översta skikt. Dessa stabiliserande mekanismer är inte inkluderade i GeoStudio-modellerna vilket är standard i stabilitetsanalyser men utgör fortfarande en möjlig felkälla. Det innebär att säkerhetsfaktorerna med stor sannolikhet är högre i verkligheten. Rotsystem kan motverka ytlig glidning, men deras stabiliserande effekt minskar när erosion kapar rötterna eller vid initiering av djupa kvickleraskred.

Ytterligare en uppskattning som har gjorts är mängden regn per månad. Den totala årsmedelnederbörden är ungefär samma varje år, men hur mycket det regnar per månad kan variera stort mellan olika år. I denna undersökning har ett medelvärde för nederbörden år 2022, 2023 och 2024 beräknats. För att få ett ännu mer tillförlitligt resultat borde ett medelvärde för regnmängder över en längre

period beräknas.

En annan viktig felkälla är att GeoStudiomodellerna inte inkluderar klimatets variation på markförhållandena. Som nämnts i avsnitt 2.5 och 2.6 påverkar faktorer som torra och växtlighet portryck, infiltration och hållfasthet. Dessa parametrar är avgörande och beroende på klimatförhållanden kan de förstärka eller mildra effekten av de studerade processerna (erosion och infiltration regn). Ett exempel på detta är sektion 31/920, där en mycket låg säkerhetsfaktor observerades i simuleringarna, visat i Tabell 4.6. Resultatet tyder på att exempelvis långvarig torra följt av intensiv nederbörd kan leda till kraftig portrycksuppbyggnad, vilket i sin tur reducerar släntens stabilitet. Torksprickor kan fungera som infiltrationskanaler och därmed förvärta effekten av efterföljande regn. Eftersom dessa typer av mekanismer inte modellerats i GeoStudio, bör resultaten tolkas med viss försiktighet.

Vid användning av GeoStudio-programmen SLOPE/W och SEEP/W för släntstabilitetsanalyser finns flera potentiella felkällor. En felkälla är att programmet gör förenklade antaganden om markens homogenitet och isotropi. Programmet tillåter dessutom endast en tvådimensionell analys vilket inte stämmer överens med verkligheten.

Dessa felkällor bör tas i beaktande vid tolkning av resultaten. Det som är av största vikt i denna analys är därför förändringen av säkerhetsfaktorn, innan jämfört med efter påverkan av erosion eller ökad nederbörd, snarare än den faktiska säkerhetsfaktorn.

## 5.5 Åtgärder

Det kommer att krävas förstärkningsåtgärder i båda slänterna inför år 2100. Avsnitt 2.7 tar upp flera olika förstärkningsåtgärder som är vanligt förekommande i slänter som behöver av olika anledningar stabiliseras. Det finns ett befintligt erosionsskydd vid båda slänterna i form av sprängsten som har blivit utlagt längs kanten. Klimatförändringar kommer att leda till att risken för erosion kommer att öka och därför kommer det befintliga erosionsskyddet behöva ses över samt eventuellt förstärkas för ytterligare skydd mot erosion. Eftersom kvicklera är mycket känslig för störningar, krävs stor försiktighet vid val och utförande av stabiliseringsåtgärder. Felaktigt genomförda åtgärder kan förvärta situationen och i värsta fall leda till skred. Därför måste metoderna anpassas noggrant till de geotekniska förhållandena.

Effektiv riskhantering längs Göta älv förutsätter tillgång till aktuell och detaljerad information om flera nyckelfaktorer. Erosionshastigheter, kontinuerligt uppmätta porvattentryck, statistik över nederbörd och en detaljerad lagerföljd är avgörande för att bedöma släntstabilitet (jämför avsnitt 2.2.1). Även kartläggning av rotzoner är viktig, eftersom vegetationen kan bidra till att stabilisera de översta jordlagren enligt teorin i avsnitt 2.6. Utan denna information riskerar förstärkningsåtgärder att dimensioneras på felaktiga grunder.

## 5.6 Förslag på vidare studier

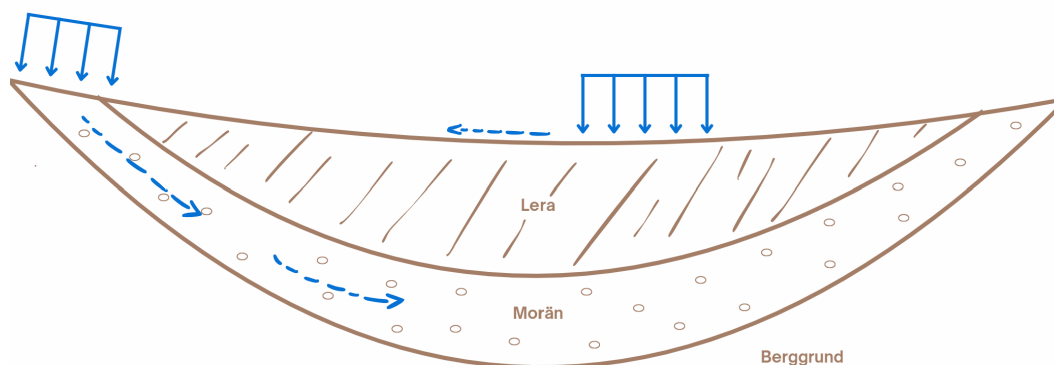
För att få en mer komplett bild av klimatförändringarnas potentiella påverkan på stabiliteten hos naturliga slänter, både i Göta älvdalen generellt och i Östra Berg i synnerhet, presenteras här nedan förslag på vidare studier. Förslagen inkluderar en utökad analysomfattning, studier kring risken för bottenuppträckning samt studier vilka lägger fokus på konsekvenserna av specifikt intensiva, kortvariga regn.

### 5.6.1 En utökad analysomfattning

För att komplettera denna studie föreslås först och främst vidare studier där fler sektioner och faktorer beaktas. För att få en mer heltäckande bild och därmed möjliggöra för mer övergripande slutsatser kring området runt Östra Berg är det av värde att inkludera fler slänter än enbart de två som analyserats i denna studie. Som nämnt i kapitel 5.4 om möjliga felkällor, finns det även en rad faktorer vilka inte beaktats i de utförda simuleringarna. Att fokusera på exempelvis vegetationens påverkan, eventuella sprickor i torrskorpan, temperaturvariationer, vind och mänsklig påverkan i form av dynamiska laster är därför ett annat förslag på vidare studier.

### 5.6.2 Risken för bottenuppträckning

En viktig aspekt vilken inte har lyfts i de simuleringar som utförts i SEEP/W är att regnet inte enbart påverkar markytan vid lerlagret. Vattnet kan också infiltrera ner i det underliggande friktionslagret i släntens ytterområden där lerlagret inte täcker markytan. En skiss av hur den geologiska modellen över Östra Berg-området intill Göta älv kan se ut i större skala och hur regnet infiltreras visas i Figur 5.5.



**Figur 5.5:** Skiss av hur sektionen kan se ut i större skala. Illustrerar risken med infiltration av vatten i underliggande morän. Författarnas egna bild.

Ett förslag på vidare studier är att fokusera på just konsekvenserna av regninfiltration i moränen. Vattenföring under leran är särskilt relevant att studera eftersom när vattnet når ner till ett område med ett tätt lerlager ovan och berggrund under kommer vattnet att dämmas upp. Konsekvensen blir ett ökat porvattentryck. En situation vilken kan resultera i bottenuppträckning och allvarliga stabilitetsproblem för slänten.

Denna studie har endast simulerat regn som appliceras direkt på ytan av leran. Framtida studier bör, för att bättre efterlikna verkliga förhållanden, inkludera variationer i randvillkoren längs släntens kortsidor. Randvillkor vilka tillåter regn att tränga in i den underliggande moränen och flöda under lerlagret.

### 5.6.3 Konsekvenserna av skyfall

Medelnederbörden kommer att öka fram till år 2100. Den mest påtagliga konsekvensen av den globala uppvärmningen vad gäller förändrade nederbördsmönster är dock inte främst en ökning i total nederbörd, utan fler korta, intensiva regn. I denna studie undersöktes konsekvenserna av regn över en längre period (3 månader) vilket motsvarar en generell ökning av medelnederbörden. En längre varaktighet valdes framförallt med syftet att möjliggöra för vattnet att hinna infiltrera.

Ett förslag på vidare studier kan därför vara att fokusera på konsekvenserna av skyfall, alltså kraftiga regn under en kort tid, på grund av att dessa förväntas bli allt vanligare och innebär andra konsekvenser för släntstabiliteten. Den höga hastigheten och intensiteten i infiltration av vatten i slänten resulterar i kritiska konsekvenser för släntens skjuvhållfasthet. Djup erosion till följd av koncentrerade avrinningar är även det en viktig konsekvens av skyfall. Den ökade ytavrinningen skapar bäckar längs slänten vilka förändrar geometrin och gör slänten mer utsatt vid kommande regn.

## 5. Diskussion

# 6

## Slutsats

Studien visar att klimatförändringar har en tydlig påverkan på stabiliteten hos naturliga lerslänter. Detta bekräftas utifrån litteraturöversikten samt de analyser som utförts i GeoStudio 2024. Särskilt framträdande är de effekter med koppling till den förväntade förändringen i nederbördsmonstret. Framförallt de farhågor vilka uppstår i samband med att regnen blir allt fler och mer intensiva. Resultatet indikerar att erosion vid släntfot och ökad nederbörd försämrar säkerhetsfaktorn och ökar därmed risken för att ett skred inträffar.

Simuleringarna av en successiv erosion visar en tydlig negativ effekt på släntstabiliteten. Även analyserna i SEEP/W där regninfiltration simulerats gav en indikation på hur en ökad nederbörd kan påverka stabiliteten. Samtidigt bör resultaten tolkas med försiktighet eftersom noggrannheten påverkas av förenklingarna i datorsimuleringen. Exempelvis krävs ytterligare analyser av infiltration av nederbörd för att, med säkerhet, kunna dra slutsatser kring konsekvenserna för släntstabiliteten. Vidare bör det betonas att en generalisering av resultaten till hela Göta älvdalen inte är möjlig. Stabilitetsförhållandena skiljer sig mellan dalens olika slänter.

Det är tydligt att det finns ett behov av att i större omfattning inkludera den påverkan klimatförändringar har i framtida stabilitetsutredningar. Utifrån föreliggande studie blir det tydligt att risken för skred kan underskattas om skredriskutredningar enbart utgår från dagens klimat. En ökad kunskap, både kring faktorernas enskilda inverkan och dess samverkan, krävs för att på ett effektivt och precist sätt kunna minimera risken för framtida skred.

## 6. Slutsats

# Litteratur

- [1] SGI. *Riskområden för ras, skred, erosion och översvämning*. Besökt: 24 februari 2025. 2021. URL: [https://sgi.se/globalassets/georisker-och-geodata/ru\\_riskomraden\\_slutrapport\\_final\\_210528\\_tillganglig\\_slutversion\\_ny.pdf](https://sgi.se/globalassets/georisker-och-geodata/ru_riskomraden_slutrapport_final_210528_tillganglig_slutversion_ny.pdf).
- [2] SGU. *Ny karta visar skredbenägna områden i Sverige*. Besökt: 24 februari 2025. 2015. URL: <https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/aldre-nyheter/2015/november/ny-karta-visar-skredbenagna-omraden-i-sverige/>.
- [3] SGI. *Varför inträffar skred?* Besökt: 16 februari 2025. 2025. URL: <https://www.sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/ras-och-skred/varfor-intraffar-skred/>.
- [4] Naturvårdsverket. *Klimatet i framtiden*. Besökt: 4 februari 2025. 2024. URL: <https://www.naturvardsverket.se/annesomraden/klimatforandringar/klimatet-i-framtiden/>.
- [5] Lilla Edet Bilder. *Göta skredet i Lilla Edet 1957*. Besökt: 8 februari 2025. 2023. URL: <https://lillaedetbilder.se/63743422.html>.
- [6] Wikipedia. *Göta raset*. Besökt: 8 februari 2025. 2023. URL: <https://sv.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6taraset>.
- [7] Statens geotekniska institut (SGI). *Göta raset*. Besökt: 8 februari 2025. 2023. URL: <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/ras--skred-och-slamstrommar/intraffade-rasskred-och-ovriga-jordroresler/gota/>.
- [8] TTELA. *60 år sedan fabriken rasade ner i älven*. Besökt: 8 februari 2025. 2017. URL: <https://www.ttela.se/nyheter/lilla-edet/60-ar-sedan-fabriken-rasade-ner-i-alven.fbfdcd28-d5b6-4e24-8d54-12e8ec75320e>.
- [9] Sveriges Radio. *60 år sedan Göta raset i älven*. Besökt: 8 februari 2025. 2007. URL: <https://www.sverigesradio.se/artikel/1410787>.
- [10] Claes Claesson. *Raset vid Göta Cellulosa 7.6.1957. Båten Perle av Aalborg*. Online Image. Identifier: VM001522S. Fritt från kända upphovsrättsliga restriktioner – Public Domain Mark (PDM). Fotograf: Claesson, Claes. Accessed: 8 April 2025. 1957. URL: <https://digitaltmuseum.se/021015954159/>.

## Litteratur

- [11] Statens geotekniska institut (SGI). *Tuveraset 1977*. Besökt: 9 februari 2025. 2023. URL: <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/ras--skred-och-slamstrommar/intraffade-rasskred-och-ovriga-jordroresler/tuve/>.
- [12] YouTube. *Tuveraset 1977*. Besökt: 9 februari 2025. 2023. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=BzH5RsS9xTA>.
- [13] Statens geotekniska institut (SGI). *Skredet i Tuve, Göteborg den 30 november 1977*. Tekn. rapport. Besökt: 9 februari 2025. Statens geotekniska institut (SGI), 1978. URL: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r10.pdf>.
- [14] Åke Hillerfors. *Cylinderskred, rotationsskred, skålskred :: Ingår i serie med fotonr. 7033:1-168 med bilder från Tuveskredet som skedde 1977*. Online Image. Göteborg Naturhistoriska Museum, ID: GNM7033:002, CC BY license. Original photograph date: 1977-11-30 or later. Published: October 6, 2015. Updated: January 13, 2021. Accessed: 8 April 2025. 1977. URL: <https://digitaltmuseum.se/021015954159/cylinderskred-rotationsskred-skalskred-ingar-i-serie-med-fotonr-7033-1-168-med>.
- [15] Sveriges Television. *Stort ras vid E6 i Stenungsund - flera personer skadade*. Besökt: 10 februari 2025. 2023. URL: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vast/stort-vagras-pa-e6-an-i-stenungsund-flera-personer-skadade>.
- [16] Statens geotekniska institut (SGI). *PM: Skred E6 Munkeröd Stenungsund*. Besökt: 10 februari 2025. 2023. URL: [https://www.sgi.se/globalassets/ras-skred-och-slamstrommar/5.6-2309-1144-pm-tib-skred-e6-munkerod-stenungsund\\_230928\\_optimized.pdf](https://www.sgi.se/globalassets/ras-skred-och-slamstrommar/5.6-2309-1144-pm-tib-skred-e6-munkerod-stenungsund_230928_optimized.pdf).
- [17] Trafikverket. *E6 Stenungsund - Omledning och återuppbyggnad*. Besökt: 10 februari 2025. 2023. URL: [https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-land/e6-stenungsund---omledning-och-ateruppbyggnad/#relaterade\\_lankar](https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-land/e6-stenungsund---omledning-och-ateruppbyggnad/#relaterade_lankar).
- [18] Trafikverket. *Nu öppnar vi E6 förbi Stenungsund*. Besökt: 10 februari 2025. 2024. URL: <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-land/e6-stenungsund---omledning-och-ateruppbyggnad/nyheter-for-projekt-e6-stenungsund-omledning-och-ateruppbyggnad/2024/nu-oppnar-vi-e6-forbi-stenungsund/>.
- [19] Trafikverket. *E6 Stenungsund — Omledning och Återuppbyggnad (Image)*. Online Image. besökt: 8 April 2025. URL: <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-land/e6-stenungsund---omledning-och-ateruppbyggnad/>.
- [20] SGI. *Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat, Göta älv-utredningen: Slutrapport del 2 - Kartläggning*. Tillgänglig online. 2012. URL: [https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/gota-älvutredningen/gau\\_slutrapport\\_del2.pdf](https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/gota-älvutredningen/gau_slutrapport_del2.pdf).

- [21] SMHI. *Problem kring vattennivåer och flöden i Vänern och Göta älv*. Hämtad från SMHI:s kunskapsbank. n.d. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/sveriges-sjoar/problem-kring-vattennivaer-och-floden-i-vanern-och-gota-alkv>.
- [22] SMHI. *Fakta om Vänern*. Hämtad från SMHI:s kunskapsbank. n.d. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/de-stora-sjoarna/fakta-om-vanern#:~:text=V%C3%A4nern%20%C3%A4r%20Sveriges%20st%C3%B6rsta%20sj%C3%B6och%20Europas%20tredje,Sveriges%20st%C3%B6rsta%20sj%C3%B6och%20Europas%20tredje%20st%C3%B6rsta%20sj%C3%B6>.
- [23] Sveriges geologiska undersökning (SGU). *Skredkänslighet i olika jordarter*. Besökt 8 februari 2025. n.d. URL: <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/skredkanslighet-i-olika-jordarter>.
- [24] Karin Rankka. *Kvicklera – bildning och egenskaper – Litteraturstudie*. Besökt: 8 februari 2025. 2003. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300421/FULLTEXT01.pdf>.
- [25] Statens geotekniska institut. *Skredrisk i Göta älvdalen*. Besökt: 8 februari 2025. 2018. URL: <https://www.sgi.se/sv/skredriskgotaalkv>.
- [26] Statens Geotekniska Institut (SGI). *Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat - Slutrapport del 3 - Kartor*. Besökt: 12 februari 2025. 2012. URL: [https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/gota-alkvutredningen/gau\\_slutrapport\\_del3.pdf](https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/gota-alkvutredningen/gau_slutrapport_del3.pdf).
- [27] OpenStreetMap contributors. *OpenStreetMap cartographic and geographic data*. <https://www.openstreetmap.org/copyright>. Data licensed under the Open Database License (ODbL). 2025.
- [28] Statens geotekniska institut. *Skredriskkarteringar – Göta älv (karta)*. <https://gis.sgi.se/hajk/?m=skredriskkarteringar>. Tillgänglig via SGI:s webbkarta för skredriskkartering. 2023.
- [29] Statens geotekniska institut. *Göta älv - Områden - Östra Berg*. Besökt: 4 maj 2025. 2025. URL: <https://swedgeo.se/sv/samhallsplanering--sakerhet/gotaalkv/gotaalkv-omraden/ostra-berg/>.
- [30] Ramböll Sverige AB. *Västra älvstranden, fördjupad utredning, mellersta delområdet*. Tekn. rapport. Slutrapport till Lilla Edets kommun. Göteborg: Ramböll Sverige AB, 2015.
- [31] Ramböll Sverige AB. *Västra älvstranden, fördjupad utredning, södra delområdet*. Tekn. rapport. Slutrapport till Lilla Edets kommun, Uppdragsnummer 61461253085-03. Göteborg: Ramböll Sverige AB, 2013.
- [32] Muni Budhu. *Soil Mechanics and Foundations*. 3rd. Wiley, 2015.
- [33] R. P. C. Morgan. *Soil Erosion and Conservation*. Second Edition. Harlow, England: Longman Group UK Limited, 1995. ISBN: 0-582-24492-7.
- [34] National Research Council. *Soil Erosion: Causes and Mechanisms; Prevention and Control*.

## Litteratur

- [35] Bengt Rydell. *Göta älvutredningen – delrapport 1*. Besökt: 16 februari 2025. 2011. URL: [https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau\\_delrapport\\_1.pdf](https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_1.pdf).
- [36] MSB. *Ras och skred*. Besökt: 16 februari 2025. n.d. URL: <https://www.msb.se/sv/arnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/naturolyckor-och-klimat/skred-ras-och-erosion/>.
- [37] Statens geotekniska institut (SGI). *SGI Varia 560: Klimatanpassning i Sverige – en sammanställning av åtgärder och strategier*. Besökt: 4 februari 2025. 2024. URL: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v560-1.pdf>.
- [38] Muni Budhu. *Soil Mechanics and Foundations*. John Wiley & Sons, besökt: 25 mars 2025. 2010. URL: <https://kwkhaing.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/12/budhu-soil-mechanics-foundations-3rd-txtbk.pdf>.
- [39] Mats Karlsson. *Föreläsning om "slope stability"*. Föreläsning, Chalmers. Datum: 15 mars 2025, Kurs: BOM360. 2025.
- [40] GeoStudio. *SLOPE/W Student Manual 2018-v1*. Tillgänglig som PDF. 2018.
- [41] IstaSazeh. *Soil Strength and Slope Stability*. Besökt: 16 februari 2025. 2021. URL: <https://istasazeh-co.com/wp-content/uploads/2021/11/Soil-Strength-and-Slope-Stability-1.pdf>.
- [42] Sumit Kumar, Shiva Shankar Choudhary och Avijit Burman. *The effect of slope height and angle on the safety factor and modes of failure of 3D slopes analysis using limit equilibrium method*. Besökt: 10 februari 2025. 2023. URL: <https://bjbas.springeropen.com/articles/10.1186/s43088-023-00423-3>.
- [43] SKREDKOMMISSIONEN. *Anvisningar för släntstabilitetsutredningar*. Besökt: 17 februari 2025. 1995. URL: [https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/ovrigt/pdf/skredk\\_r3-95.pdf](https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/ovrigt/pdf/skredk_r3-95.pdf).
- [44] Eurocode. *Eurocode 7: Geotechnical Design - Part 1: General Rules*. Besökt: 17 februari 2025. 2004. URL: [https://www.ngm2016.com/uploads/2/1/7/9/21790806/eurocode\\_7\\_-\\_geotechnical\\_designen.1997.1.2004.pdf](https://www.ngm2016.com/uploads/2/1/7/9/21790806/eurocode_7_-_geotechnical_designen.1997.1.2004.pdf).
- [45] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [46] Naturvårdsverket. *Effekter i Sverige – Klimatet i framtiden*. Besökt: 8 februari 2025. 2024. URL: <https://www.naturvardsverket.se/arnesomraden/klimatforandringar/klimatet-i-framtiden/effekter-i-sverige/>.
- [47] Klimatanpassning.se. *Exempel på klimatanpassning*. Besökt: 15 februari 2025. 2024. URL: <https://www.klimatanpassning.se/exempel>.

- [48] SMHI. *Framtidens klimat - Medeltemperatur (RCP8.5, 2071-2100)*. Besökt: 18 februari 2025. 2025. URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/enkel-scenariotjanst/sverige/medeltemperatur/rcp85/2071-2100>.
- [49] SMHI. *Fördjupad Klimatscenariotjänst*. Besökt: 18 februari 2025. 2025. URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/fordjupade-klimatscenarier/met/sverige/medelnederbord/rcp85/2071-2100/year/anom>.
- [50] SMHI. *Framtidens klimat - Medeltemperatur (RCP4.5, 2071-2100)*. Besökt: 18 februari 2025. 2025. URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/enkel-scenariotjanst/sverige/medeltemperatur/rcp45/2071-2100>.
- [51] SMHI. *Klimatscenarier för Sverige – Bearbetning av RCP-scenarier för meteorologiska och hydrologiska effektstudier*. Uppdaterad 2024. Hämtad 8 maj 2025. 2015. URL: <https://www.smhi.se/publikationer-fran-smhi/sok-publikationer/2015-04-12-klimatscenarier-for-sverige---bearbetning-av-rcp-scenarier-for-meteorologiska-och-hydrologiska-effektstudier>.
- [52] SMHI. *Fördjupad klimatscenariotjänst*. Besökt: 18 februari 2025. 2025. URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/fordjupade-klimatscenarier/met/sverige/medelnederbord/rcp45/2071-2100/year/anom>.
- [53] SMHI. *Skyfallsstatistik – regional statistik för extrema korttidsregn*. Senast uppdaterad 2025. Hämtad 8 maj 2025. 2025. URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/skyfallsstatistik-regional-statistik-for-extrema-korttidsregn>.
- [54] SMHI. *Skyfallsstatistik – Regional statistik för extrema korttidsregn*. Besökt: 20 februari 2025. 2025. URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/skyfallsstatistik-regional-statistik-for-extrema-korttidsregn>.
- [55] SMHI. *Sveriges klimat har blivit varmare och blötare*. Tillgänglig via SMHI. URL: <https://www-tst.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/sveriges-klimat/sveriges-klimat-har-blivit-varmare-och-blotare> (hämtad 2025-04-20).
- [56] SMHI. *När regnar det?* Tillgänglig via SMHI. URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/regn/nar-regnar-det> (hämtad 2025-04-20).
- [57] Shubhra Pk. “EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON SOIL EMBANKMENTS”. Master’s thesis. Toronto, Ontario: York University, 2017. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/154836464.pdf>.
- [58] Tensar International. *Pore Water Pressure*. Besökt: 16 februari 2025. 2020. URL: <https://www.tensarinternational.com/resources/articles/pore-water-pressure>.

## Litteratur

- [59] Adam Bogdanski. *Stability of slopes in clay – A parametric study*. Besökt: 16 februari 2025. 2013. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:689729/FULLTEXT01.pdf>.
- [60] L. Cheng och A. AghaKouchak. “Nonstationary Precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate”. I: *Scientific Reports* 4 (2014), s. 7093. DOI: 10.1038/srep07093. URL: <https://www.nature.com/articles/srep07093>.
- [61] Joe D. Robinson, Farshid Vahedifard och Amir AghaKouchak. “Rainfall-triggered slope instabilities under a changing climate: comparative study using historical and projected precipitation extremes”. I: *Canadian Geotechnical Journal* 54.1 (2017), s. 117–127. DOI: 10.1139/cgj-2015-0602. URL: <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0602>.
- [62] Claes-Olof Brandesten. *Klimatförändringarnas påverkan på dammsäkerheten*. Besökt: 10 februari 2025. 2022. URL: <https://www.svk.se/siteassets/3.sakerhet-och-beredskap/dammsakerhet/flodesdimensionering-och-klimat/klimatforandringarnas-paverkan-pa-dammsakerheten.pdf>.
- [63] L. Maruffi m. fl. “Soil erosion and sediment transport under climate change for Mera River, in Italian Alps of Valchiavenna”. I: *Science of the Total Environment* 806 (2022), s. 150651. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150651.
- [64] I. W. Arya m. fl. *Effect of pore water pressure on soil crack against safety factor of slope stability*. Journal of Physics: Conference Series, vol. 1450, 012014, besökt: 25 mars 2025. 2020. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012014>.
- [65] Mojtaba Hosseini m. fl. *Influence of Surface Cracks on the Stability of Cracked Soil Slope*. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, vol. 18, nr. 4, s. 82–90, besökt: 25 mars 2025. 2022. URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/article/view/579/331>.
- [66] Skogsstyrelsen. *Så förhindrar du skador i erosionskänslig terräng*. Broschyr, besökt: 25 mars 2025. 2018. URL: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/bruka-skog/skogsbruk-i-erosionskanslig-terrang/folder---sa-forhindrar-du-skador-i-erosionskanslig-terrang.pdf>.
- [67] Yong-xin Li och Xiao-li Yang. *Stability analysis of crack slope considering nonlinearity and water pressure*. KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 20, nr. 6, s. 2289–2296, besökt: 25 mars 2025. 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824037334>.
- [68] Radoslaw L. Michalowski. *Stability assessment of slopes with cracks using limit analysis*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 50, nr. 9, s. 1011–1021, besökt: 25 mars 2025. 2013. URL: <https://cdnsiencepub-com.eu1.proxy.openathens.net/doi/pdf/10.1139/cgj-2012-0448>.

- [69] Ariane Locat m.fl. *Sensitive Clay Landslides in Canada*. 70th Canadian Geotechnical Conference (GeoOttawa 2017), paper nr. 875, besökt: 25 mars 2025. 2017. URL: [https://www.researchgate.net/publication/320386463\\_SENSITIVE\\_CLAY\\_LANDSLIDES\\_IN\\_CANADA](https://www.researchgate.net/publication/320386463_SENSITIVE_CLAY_LANDSLIDES_IN_CANADA).
- [70] Ramböll Sverige AB. *Markteknisk undersökningsrapport (MUR), Västra Älvsstranden fördjupad utredning – Södra Delområdet*. Tekn. rapport. Slutrapport, Uppdragsnummer: 61461253085-03, På uppdrag av Lilla Edets Kommun. Göteborg: Ramböll Sverige AB, dec. 2013.
- [71] Gao-Lin Wu m.fl. “Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis”. I: *Journal of Applied Ecology* 57.5 (2020), s. 875–885. DOI: 10.1111/1365-2664.13597. URL: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13597>.
- [72] Shin-ichi Nanko, Yuji Hiraoka och Ryusuke Hatano. “Root water uptake and its impact on soil moisture dynamics in a forested hillslope”. I: *Biogeosciences* 17.22 (2020), s. 5787–5802. DOI: 10.5194/bg-17-5787-2020. URL: <https://bg.copernicus.org/articles/17/5787/2020/>.
- [73] Gianmarco Tardio och Stefan B. Mickovski. “Method for synchronisation of soil and root behaviour for assessment of stability of vegetated slopes”. I: *Ecological Engineering* 82 (2015), s. 222–230. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.059. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857415300094>.
- [74] Statens Geotekniska Institut (SGI). *Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter - Rekommendationer för dimensionering och projektering*. Besökt: 12 februari 2025. 1996. URL: [https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/ovrigt/pdf/skredk\\_r2-96.pdf](https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/ovrigt/pdf/skredk_r2-96.pdf).
- [75] SGI - Sveriges Geologiska Undersökning. *Katalog över naturbaserad erosionsskydd*. Besökt: 1 mars 2025. 2024. URL: <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/stranderosion/fran-inventering-till-atgard/atgarder-for-skydd-mot-stranderosion/katalog-over-naturanpassade-erosionsskydd/>.
- [76] R. R. Ziemer. “The Role of Vegetation in Slope Stability”. I: *International Union of Forestry Research Organizations, Symposium on the Effects of Forest Land Use on Erosion and Slope Stability*. USDA Forest Service, 1981. URL: <https://www.fs.usda.gov/psw/publications/ziemer/ZiemiIUFRO1981.PDF>.
- [77] GEOSLOPE International Ltd. *GeoStudio 2023 User Guide*. Version 2023.1, Tillgänglig via Seequent. 2023. URL: <https://www.geoslope.com/products/geostudio>.
- [78] A.W. Bishop. “The use of the slip circle in the stability analysis of slopes”. I: *Géotechnique* 5.1 (1955), s. 7–17. DOI: 10.1680/geot.1955.5.1.7. URL: <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>.

## Litteratur

- [79] GEO-SLOPE International Ltd. *Slope/W 2020 Manual: Modeling Soil and Rock Slopes*. Calgary, Canada, 2020. URL: <https://www.geo-slope.com/resources>.
- [80] Göran Sällfors. *Geoteknik*. 5. utg. 5:e upplagan. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola, 2013.
- [81] N.R. Morgenstern och V.E. Price. "The analysis of the stability of general slip surfaces". I: *Géotechnique* 15.1 (1965), s. 79–93. DOI: 10.1680/geot.1965.15.1.79. URL: <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>.
- [82] WSP Sverige AB. *PM Hydrogeologi: Anläggande av sluss i Lilla Edets kommun, Västra Götalands län*. Tekn. rapport Bilaga B1. Tillgänglig via Sjöfartsverket. Trafikverket, sept. 2024. URL: <https://www-n.sjofartsverket.se/globalassets/farledsprojekt/slussar-i-trollhatte-kanal/tillstandsansokan-lilla-edet/bilaga-b-teknisk-beskrivning/bilaga-b1-pm-hydrogeologi.pdf>.
- [83] Göteborgs Stad. *Skyfall i Göteborg – Så påverkar skyfall staden*. Hämtad 8 april 2025. 2024. URL: <https://goteborg.se/wps/wcm/connect/c0a14829-579f-458f-8bb6-1205e321392f/Kretsloppsnytt%2Bom%2Bskyfall%2Bi%2BG%C3%B6teborg.pdf?MOD=AJPERES>.

# A

## Kombinerad Analys

### A.1 Sektion 32/255

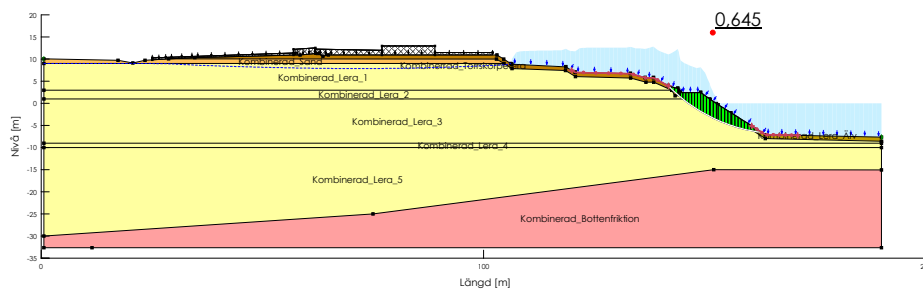
Denna sektion presenterar resultat från den kombinerade analysen av sektion 32/255, som inte behandlas i kapitel 4. Resultatet är uppdelade i två delar: Regn samt en kombination av erosion och regn.

# A. Kombinerad Analys

## A.1.1 Regn

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-r(depth)	16.5	30				0		0	0.1	2	20
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-r(datum)	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-r(datum)	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-r(datum)	14.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-r(datum)	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
Orange	Kombinerad_Lera_Äv	Combined, S-r(depth)	16	30				0		0	0.1	0.5	5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Tamkorpelera	Combined, S-r(depth)	18	30				0		0	0.1	3	30

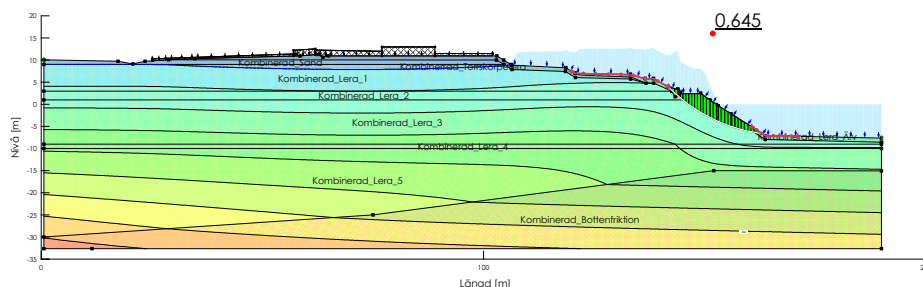


**Figur A.1:** Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,645. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-r(depth)	16.5	30				0		0	0.1	2	20
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-r(datum)	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-r(datum)	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-r(datum)	14.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-r(datum)	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
Orange	Kombinerad_Lera_Äv	Combined, S-r(depth)	16	30				0		0	0.1	0.5	5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Tamkorpelera	Combined, S-r(depth)	18	30				0		0	0.1	3	30

Water Pressure	
Blue	-48 - 0 kPa
Light Blue	0 - 48 kPa
Light Green	48 - 96 kPa
Green	96 - 144 kPa
Dark Green	144 - 192 kPa
Light Yellow	192 - 240 kPa
Yellow	240 - 288 kPa
Orange	288 - 336 kPa
Dark Orange	336 - 384 kPa
Red	384 - 432 kPa
Dark Red	432 - 480 kPa

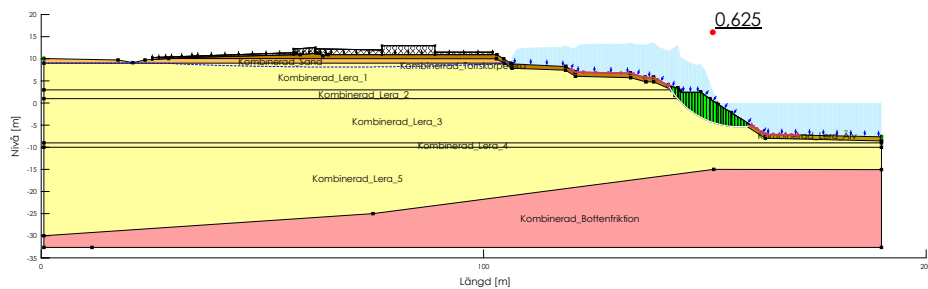


**Figur A.2:** Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,645. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VI25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_kombinerad\_10%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-r(depth)	16.5	30				0		0		0.1	2
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-r(datum)	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-r(datum)	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-r(datum)	16.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-r(datum)	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
Orange	Kombinerad_Lera_Rv	Combined, S-r(depth)	16	30				0		0		0.1	0.5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Tanskopelera	Combined, S-r(depth)	18	30				0		0		0.1	3



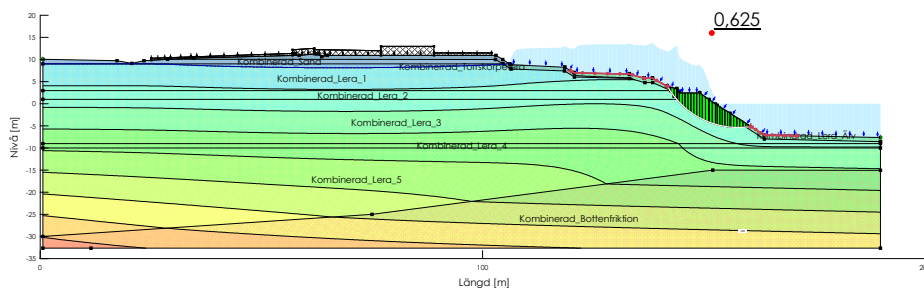
**Figur A.3:** Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,625. Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_kombinerad\_10%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Light Blue	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-(f(depth))	16.5	30				0	0	0	0.1	2	20
Light Green	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-(f(datum))	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Light Green	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-(f(datum))	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Light Green	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-(f(datum))	16.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Light Green	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-(f(datum))	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
Light Blue	Kombinerad_Lera_Äv	Combined, S-(f(depth))	16	30				0	0	0	0.1	0.5	5
Light Blue	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Light Blue	Kombinerad_Tankorpetera	Combined, S-(f(depth))	18	30				0	0	0	0.1	3	30

Water Pressure
-48 - 0 kPa
0 - 48 kPa
48 - 96 kPa
96 - 144 kPa
144 - 192 kPa
192 - 240 kPa
240 - 288 kPa
288 - 336 kPa
336 - 384 kPa
384 - 432 kPa
432 - 480 kPa

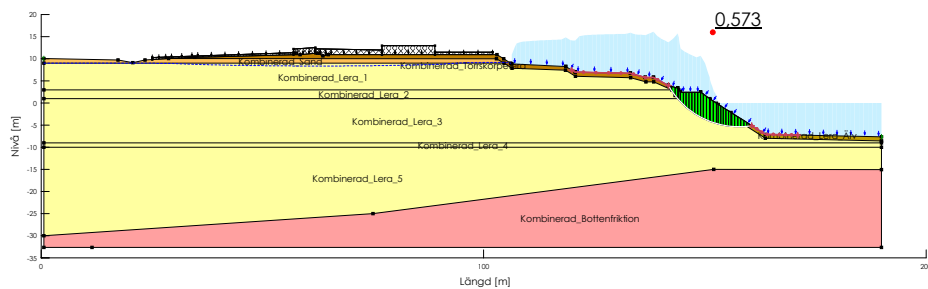


**Figur A.4:** Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,625. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_kombinerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-r(depth)	16.5	30				0		0	0.1	2	20
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-r(datum)	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-r(datum)	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-r(datum)	16.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-r(datum)	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
Orange	Kombinerad_Lera_Rv	Combined, S-r(depth)	16	30				0		0	0.1	0.5	5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Tanskopelera	Combined, S-r(depth)	18	30				0		0	0.1	3	30



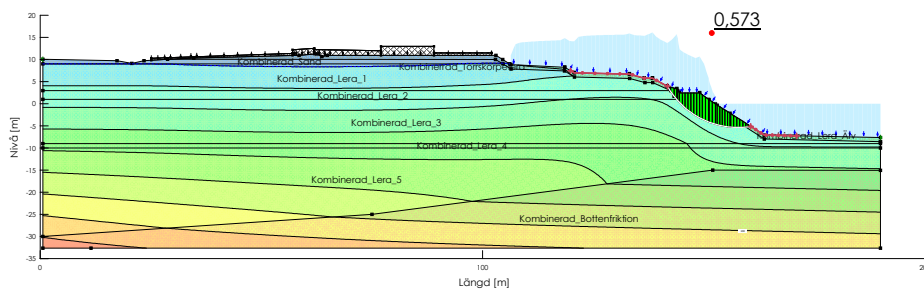
**Figur A.5:** Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,573. Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_kombinerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>3</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>3</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-(f(depth))	16.5	30				0	0	0	0.1	2	20
	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-(f(datum))	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-(f(datum))	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-(f(datum))	16.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-(f(datum))	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
	Kombinerad_Lera_Äv	Combined, S-(f(depth))	16	30				0	0	0	0.1	0.5	5
	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
	Kombinerad_Tankorpetera	Combined, S-(f(depth))	18	30				0	0	0	0.1	3	30

Water Pressure
-48 - 0 kPa
0 - 48 kPa
48 - 96 kPa
96 - 144 kPa
144 - 192 kPa
192 - 240 kPa
240 - 288 kPa
288 - 336 kPa
336 - 384 kPa
384 - 432 kPa
432 - 480 kPa

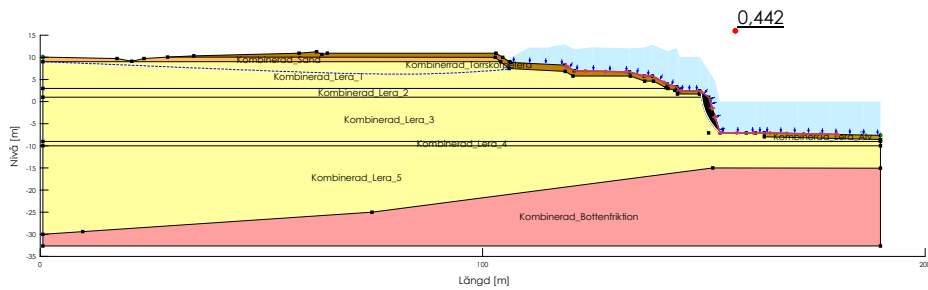


**Figur A.6:** Utgångsläge för sektion 32/255 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,573. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

### A.1.2 Erosion och regn

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-rf(depth)	16,5	30				0		0	0,1	2	20
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-rf(datum)	16,5	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-rf(datum)	16,2	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-rf(datum)	16,7	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-rf(datum)	16,7	30		-10	4,8	0,133	48	1,33	0,1		
Orange	Kombinerad_Riv	Combined, S-rf(depth)	16	30				0		0	0,1	0,5	5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Tonkspetera	Combined, S-rf(depth)	18	30				0		0	0,1	3	30

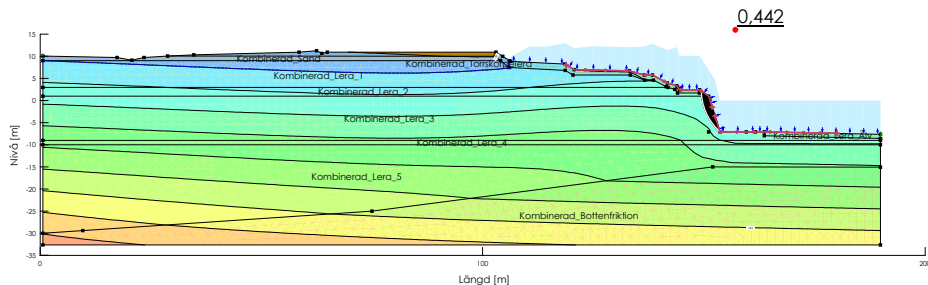


**Figur A.7:** Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,442. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-rf(depth)	16,5	30				0		0	0,1	2	20
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-rf(datum)	16,5	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-rf(datum)	16,2	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-rf(datum)	16,7	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-rf(datum)	16,7	30		-10	4,8	0,133	48	1,33	0,1		
Orange	Kombinerad_Riv	Combined, S-rf(depth)	16	30				0		0	0,1	0,5	5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Tonkspetera	Combined, S-rf(depth)	18	30				0		0	0,1	3	30

Water Pressure	
Blue	-48 - 0 kPa
Light Blue	0 - 48 kPa
Green	48 - 96 kPa
Light Green	96 - 144 kPa
Yellow-Green	144 - 192 kPa
Yellow	192 - 240 kPa
Orange	240 - 288 kPa
Light Orange	288 - 336 kPa
Dark Orange	336 - 384 kPa
Red-Orange	384 - 432 kPa
Red	432 - 480 kPa

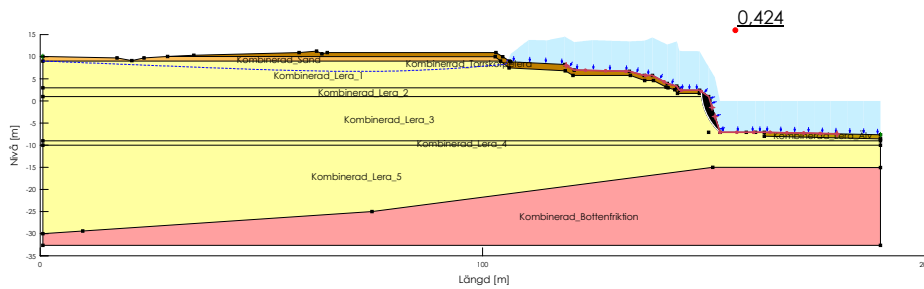


**Figur A.8:** Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,442. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_10%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

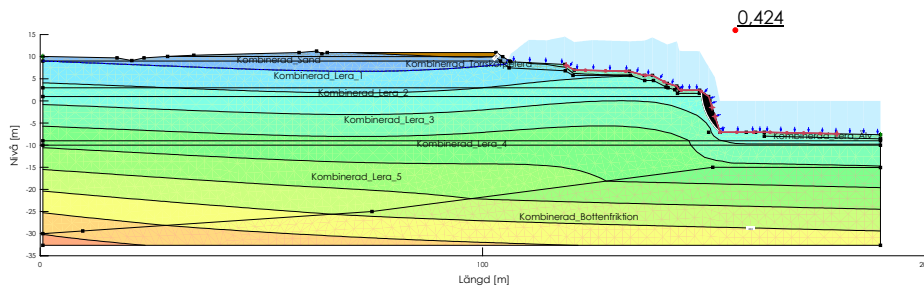
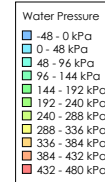
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m³)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m³)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m³)/m	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m³)/m	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-rf(depth)	16.5	30				0		0	0.1	2	20
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-rf(datum)	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-rf(datum)	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-rf(datum)	16.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-rf(datum)	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
Orange	Kombinerad_Lera_Av	Combined, S-rf(depth)	16	30				0		0	0.1	0.5	5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Torskopetera	Combined, S-rf(depth)	18	30				0		0	0.1	3	30



**Figur A.9:** Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,424. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_10%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m³)	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m³)	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m³)/m	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m³)/m	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-rf(depth)	16.5	30				0		0	0.1	2	20
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-rf(datum)	16.5	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-rf(datum)	16.2	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-rf(datum)	16.7	30		3	2	0.2154	20	2.154	0.1		
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-rf(datum)	16.7	30		-10	4.8	0.133	48	1.33	0.1		
Orange	Kombinerad_Lera_Av	Combined, S-rf(depth)	16	30				0		0	0.1	0.5	5
Orange	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
Orange	Kombinerad_Torskopetera	Combined, S-rf(depth)	18	30				0		0	0.1	3	30

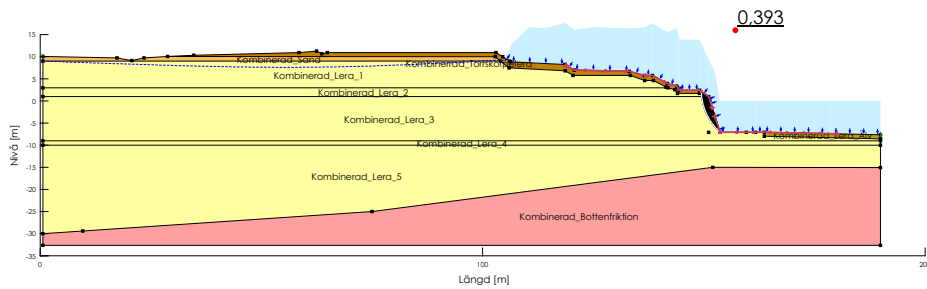


**Figur A.10:** Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,424. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

## A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

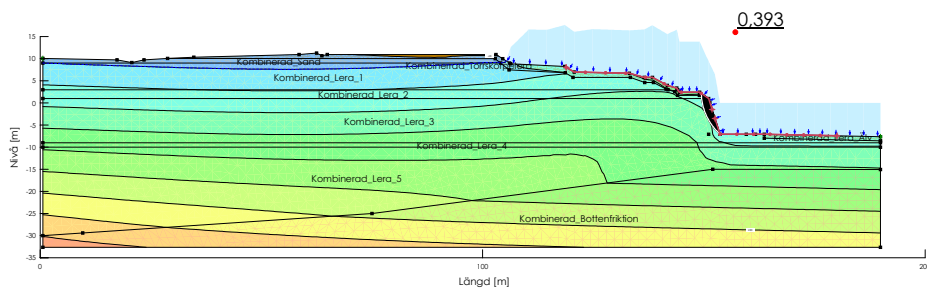
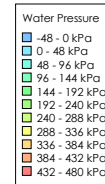
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-r(depth)	16,5	30				0		0	0,1	2	20
	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-r(datum)	16,5	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-r(datum)	16,2	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-r(datum)	16,7	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-r(datum)	16,7	30		-10	4,8	0,133	48	1,33	0,1		
	Kombinerad_Lera_Av	Combined, S-r(depth)	16	30				0		0	0,1	0,5	5
	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
	Kombinerad_Torskopetera	Combined, S-r(depth)	18	30				0		0	0,1	3	30



**Figur A.11:** Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,393. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 32/255 Östraberg Södra  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Friction Angle (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m <sup>3</sup> )	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Datum (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	C-Top of Layer (kPa)	Su-Top of Layer (kPa)
	Kombinerad_Bottenfriktion	Mohr-Coulomb	20	38									
	Kombinerad_Lera_1	Combined, S-r(depth)	16,5	30				0		0	0,1	2	20
	Kombinerad_Lera_2	Combined, S-r(datum)	16,5	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_3	Combined, S-r(datum)	16,2	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_4	Combined, S-r(datum)	16,7	30		3	2	0,2154	20	2,154	0,1		
	Kombinerad_Lera_5	Combined, S-r(datum)	16,7	30		-10	4,8	0,133	48	1,33	0,1		
	Kombinerad_Lera_Av	Combined, S-r(depth)	16	30				0		0	0,1	0,5	5
	Kombinerad_Sand	Mohr-Coulomb	20	36	18								
	Kombinerad_Torskopetera	Combined, S-r(depth)	18	30				0		0	0,1	3	30



**Figur A.12:** Sektion 32/255 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,393. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

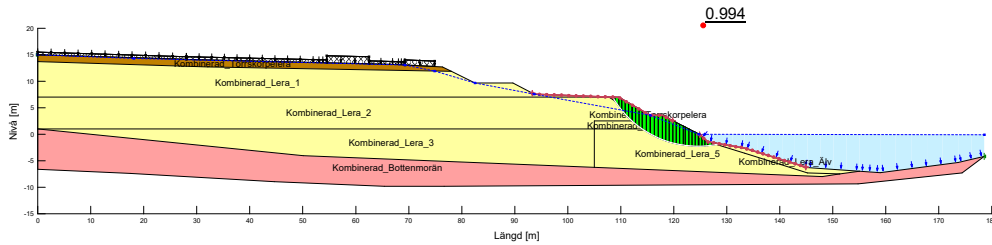
## **A.2 Sektion 31/920**

Denna sektion presenterar resultat från den kombinerade analysen av sektion 31/920, som inte behandlas i kapitel 4. Resultatet är uppdelade i tre delar: Erosion, Regn samt en kombination av erosion och regn.

## A.2.1 Erosion

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-10  
 Name: Utgångsläge Kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

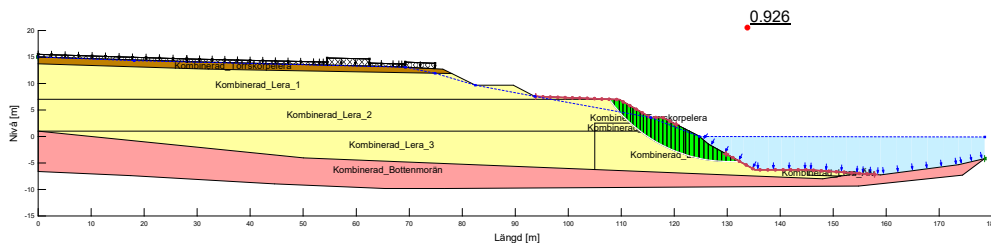
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)	Piezometric Surface	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38	0	1								
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=f(depth)	15.5		30	1	1.7	0		17	0	0.1			
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=f(datum)	15.5		30	1		0.233		2.33	0.1	7	1.7	17	
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=f(datum)	16		30	1			0.15		1.5	0.1	1	2.932	29.32
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=f(depth)	15.5		30	1	2.632	0.15	26.32	1.5	0.1				
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=f(depth)	16		30	1	2.932	0.15	29.32	1.5	0.1				
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=f(depth)	16		30	1	0.5	0	5	0	0.1				
Brown	Kombinerad_Torskorpelela	Combined, S=f(depth)	18		30	1	3	0	30	0	0.1				



**Figur A.13:** Utgångsläget för sektion 31/920 i en kombinerad analys. Säkerhetsfaktor: 0,994 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-10  
 Name: Erosion 10m Kombinerad  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)	Piezometric Surface	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38	0	1								
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=f(depth)	15.5		30	1	1.7	0		17	0	0.1			
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=f(datum)	15.5		30	1		0.233		2.33	0.1	7	1.7	17	
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=f(datum)	16		30	1			0.15		1.5	0.1	1	2.932	29.32
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=f(depth)	15.5		30	1	2.632	0.15	26.32	1.5	0.1				
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=f(depth)	16		30	1	2.932	0.15	29.32	1.5	0.1				
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=f(depth)	16		30	1	0.5	0	5	0	0.1				
Brown	Kombinerad_Torskorpelela	Combined, S=f(depth)	18		30	1	3	0	30	0	0.1				



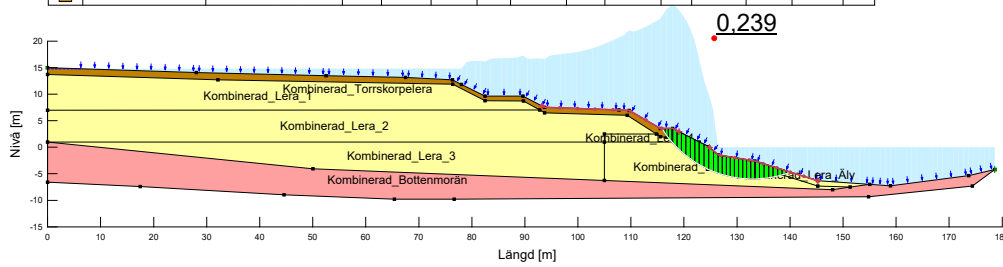
**Figur A.14:** Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m. Säkerhetsfaktor: 0,926 (SLOPE/W). Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

## A.2.2 Regn

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Kombinerad\_Idag  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(fdepth)	15,5	30	1,7	0	17	0	0,1					
	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17		
	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32		
	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(fdepth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1					
	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(fdepth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1					
	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(fdepth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1					
	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(fdepth)	18	30	3	0	30	0	0,1					

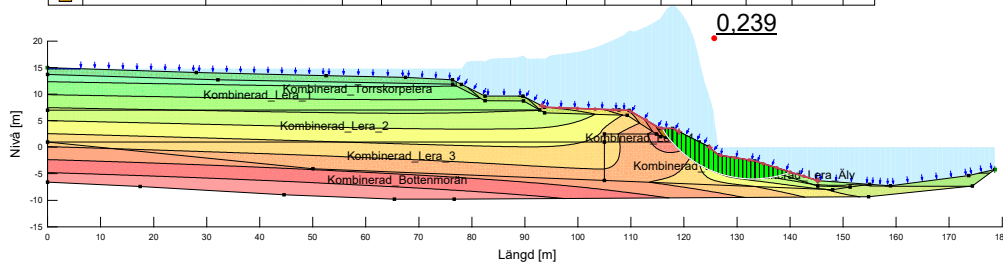


**Figur A.15:** Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Kombinerad\_Idag  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(fdepth)	15,5	30	1,7	0	17	0	0,1					
	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17		
	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32		
	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(fdepth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1					
	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(fdepth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1					
	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(fdepth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1					
	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(fdepth)	18	30	3	0	30	0	0,1					

Water Pressure
72 - 48 kPa
48 - 24 kPa
24 - 0 kPa
0 - 1088071e-14 kPa
1088071e-14 - 24 kPa
24 - 48 kPa
48 - 72 kPa
72 - 96 kPa
96 - 120 kPa
120 - 144 kPa
144 - 168 kPa
168 - 192 kPa

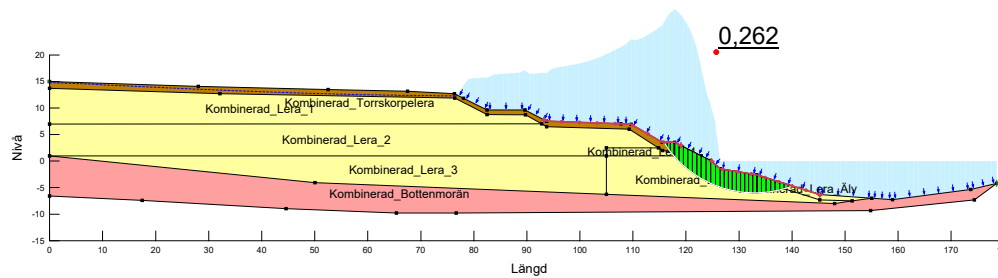


**Figur A.16:** Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Kombinerad\_10%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(f(depth)	15,5		30	1,7	0	17	0	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(f(datum)	15,5		30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17	
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(f(datum)	16		30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32	
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(f(depth)	15,5		30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(f(depth)	16		30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(f(depth)	16		30	0,5	0	5	0	0,1				
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(f(depth)	18		30	3	0	30	0	0,1				

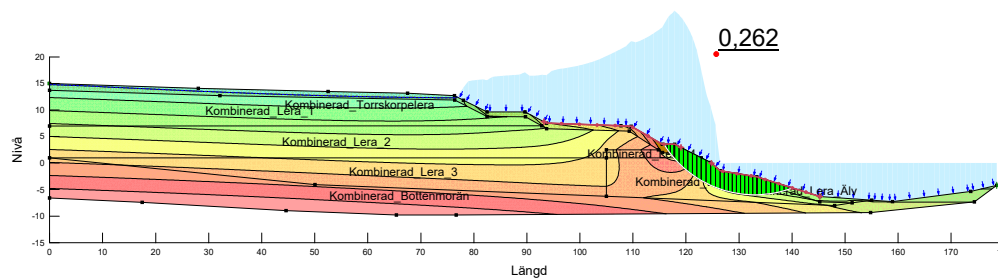


**Figur A.17:** Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,262. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Kombinerad\_10%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(f(depth)	15,5		30	1,7	0	17	0	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(f(datum)	15,5		30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17	
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(f(datum)	16		30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32	
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(f(depth)	15,5		30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(f(depth)	16		30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(f(depth)	16		30	0,5	0	5	0	0,1				
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(f(depth)	18		30	3	0	30	0	0,1				

Water Pressure	
Blue	72 - 48 kPa
Light Blue	48 - 24 kPa
Light Green	24 - 0,086671e-14 kPa
Green	-1,086671e-14 - 24 kPa
Dark Green	24 - 48 kPa
Light Blue	48 - 72 kPa
Light Green	72 - 96 kPa
Green	96 - 120 kPa
Dark Green	120 - 144 kPa
Light Blue	144 - 168 kPa
Light Green	168 - 192 kPa

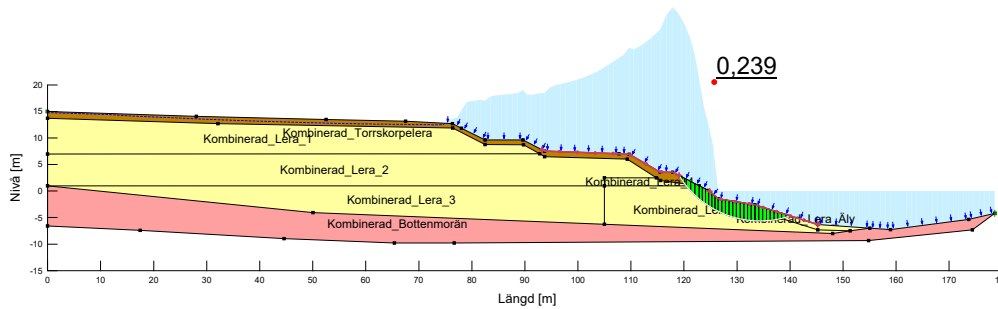


**Figur A.18:** Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,262. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Kombinerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5	30	1,7	0	0,233	17	0	0,1	7	1,7	17	
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30					2,33	0,1	1	2,932	29,32	
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30			0,15		1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_Älv	Combined, S=(depth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1					
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18	30	3	0	30	0	0,1					

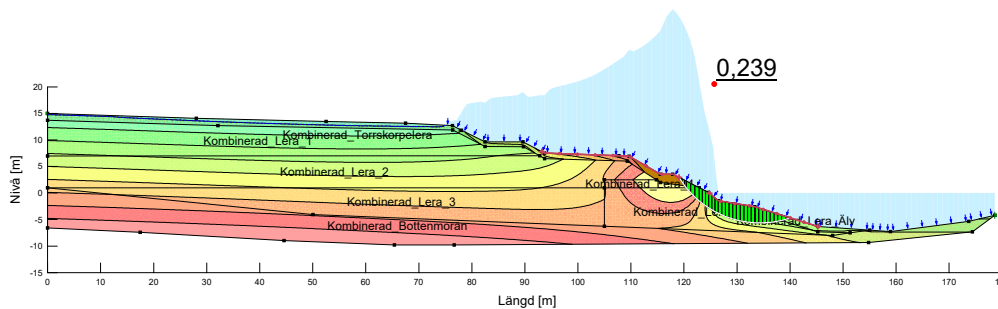


**Figur A.19:** Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-11  
 Name: Regn\_Utgångsläge\_Kombinerad\_40%  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>3</sup> )/m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5	30	1,7	0	0,233	17	0	0,1	7	1,7	17	
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30					2,33	0,1	1	2,932	29,32	
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30			0,15		1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_Älv	Combined, S=(depth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1					
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18	30	3	0	30	0	0,1					

Water Pressure
72 - 48 kPa
24 - 24 kPa
24 - 1,088671e-14 kPa
24 - 48 kPa
48 - 72 kPa
72 - 96 kPa
96 - 120 kPa
120 - 144 kPa
144 - 168 kPa
168 - 192 kPa

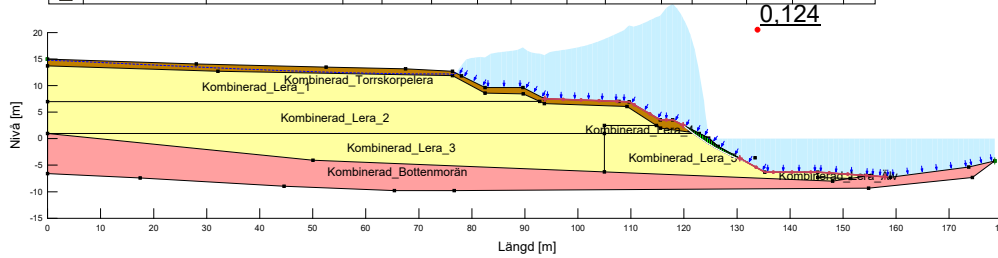


**Figur A.20:** Utgångsläge för sektion 31/920 i en kombinerad analys med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,239. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

### A.2.3 Erosion och regn

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_Idag  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

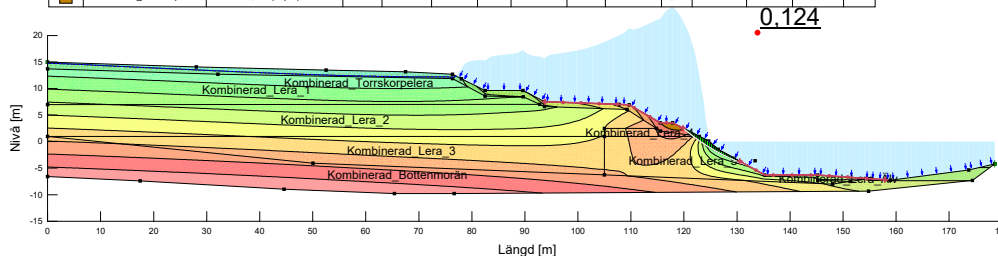
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5	30	1,7	0	17	0	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(depth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1					
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18	30	3	0	30	0	0,1					



**Figur A.21:** Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,124. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_Idag  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change (kN/m <sup>2</sup> /m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)	Water Pressure
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0	72 - 48 kPa 48 - 24 kPa 24 - 1,08667e-14 - 24 kPa -1,08667e-14 - 24 kPa 24 - 48 kPa 48 - 72 kPa 72 - 96 kPa 96 - 120 kPa 120 - 144 kPa 144 - 168 kPa 168 - 192 kPa
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5	30	1,7	0	17	0	0,1						
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17			
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32			
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1						
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1						
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(depth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1						
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18	30	3	0	30	0	0,1						

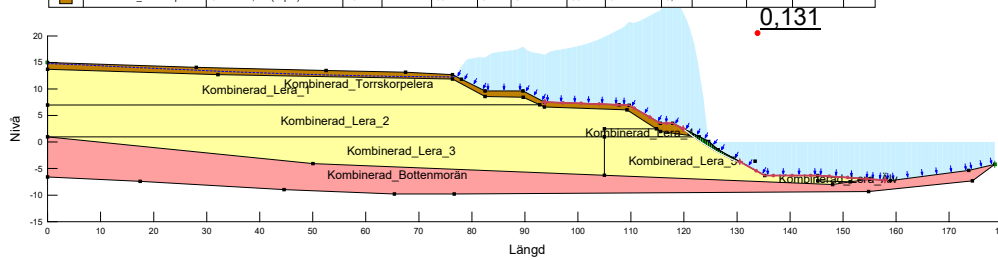


**Figur A.22:** Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,124. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_10% (2)  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

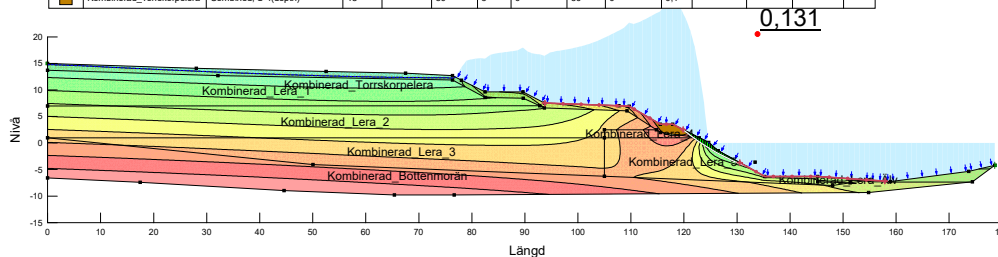
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5		30	1,7	0	17	0	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5		30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17	
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16		30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32	
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5		30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16		30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1				
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(depth)	16		30	0,5	0	5	0	0,1				
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18		30	3	0	30	0	0,1				



**Figur A.23:** Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,131. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_10% (2)  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)	Water Pressure
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0	72 - 48 kPa 48 - 24 kPa 24 - 11,088671e-14 - 24 kPa -1,088671e-14 - 24 kPa 24 - 48 kPa 48 - 72 kPa 72 - 96 kPa 96 - 120 kPa 120 - 144 kPa 144 - 168 kPa 168 - 192 kPa
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5		30	1,7	0	17	0	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5		30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16		30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5		30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16		30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_Alv	Combined, S=(depth)	16		30	0,5	0	5	0	0,1					
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18		30	3	0	30	0	0,1					

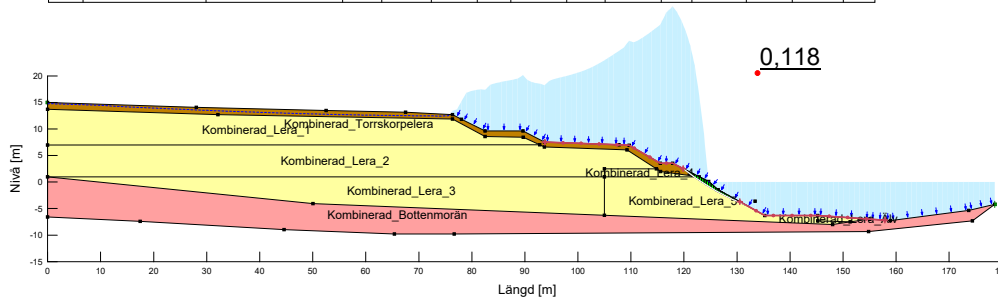


**Figur A.24:** Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,1. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,131. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

# A. Kombinerad Analys

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_40% (3)  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

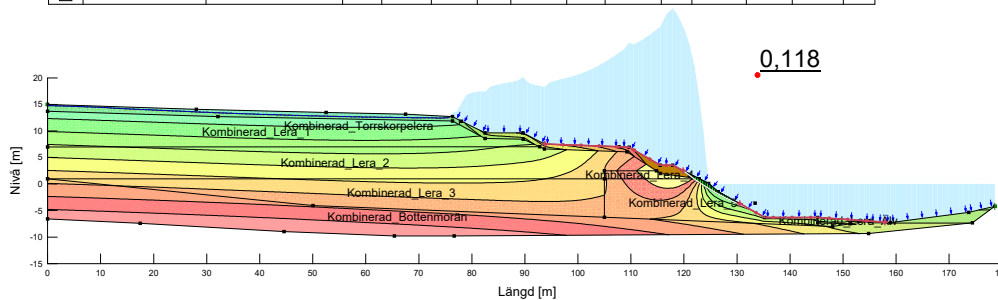
Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5	30	1,7	0	17	0	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17		
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32		
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1					
Yellow	Kombinerad_Lera_Älv	Combined, S=(depth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1					
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18		30	3	0	30	0	0,1				



**Figur A.25:** Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,118. Författarnas egna bild.

Title: Sektion 31/920 Östra berg Mellersta  
 Created By: ACEX11-VT25-35  
 Date: 2025-04-16  
 Name: Regn\_Erosion5\_Kombinerad\_40% (3)  
 Analysis Type: Morgenstern-Price  
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Su-Top of Layer (kPa)	Su-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	c'/Su Ratio	Datum (Elevation) (m)	C-Datum (kPa)	Su-Datum (kPa)	Phi-B (°)	Water Pressure
Red	Kombinerad_Bottenmorän	Mohr-Coulomb	20	0	38									0	72 - 48 kPa 48 - 24 kPa 24 - 0 kPa -1,08867E-14 - 24 kPa 24 - 48 kPa 48 - 72 kPa 72 - 96 kPa 96 - 120 kPa 120 - 144 kPa 144 - 168 kPa 168 - 192 kPa
Yellow	Kombinerad_Lera_1	Combined, S=(depth)	15,5	30	1,7	0	17	0	0,1						
Yellow	Kombinerad_Lera_2	Combined, S=(datum)	15,5	30		0,233		2,33	0,1	7	1,7	17			
Yellow	Kombinerad_Lera_3	Combined, S=(datum)	16	30		0,15		1,5	0,1	1	2,932	29,32			
Yellow	Kombinerad_Lera_4	Combined, S=(depth)	15,5	30	2,632	0,15	26,32	1,5	0,1						
Yellow	Kombinerad_Lera_5	Combined, S=(depth)	16	30	2,932	0,15	29,32	1,5	0,1						
Yellow	Kombinerad_Lera_Älv	Combined, S=(depth)	16	30	0,5	0	5	0	0,1						
Brown	Kombinerad_Torrskorpelera	Combined, S=(depth)	18		30	3	0	30	0	0,1					



**Figur A.26:** Sektion 31/920 i en kombinerad analys med en erosion på 10m tillsammans med simulerad nederbörd motsvarande dagens regnmängd multiplicerat med 1,4. Beräknad säkerhetsfaktor: 0,118. Visar även tillhörande porvattentryck. Författarnas egna bild.

INSTITUTIONEN FÖR något ämne  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**