



CHALMERS



Utformning och stabilitetsanalys av en inert deponi med ekonomisk utvärdering

En studie av en deletapp vid Swerock AB:s anläggning vid Koberg, Trollhättan kommun.

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

Alexander Andersson

Felix Kilsmark

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

Utformning och stabilisering av en inert deponi med en ekonomisk utvärdering

En studie av en deletapp vid Swerock AB:s anläggning vid Koberg, Trollhättan kommun

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

ALEXANDER ANDERSSON

FELIX KILSMARK

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelning för Geologi och geoteknik

Examinator: Mats Karlsson

Handledare: Mats Karlsson

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2026

Utformning och stabilisering av en inert deponi med en ekonomisk utvärdering

En studie av en deletapp vid Swerock AB:s anläggning vid Koberg, Trollhättan kommun

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Alexander Andersson

Felix Kilsmark

© Alexander Andersson, 2026

© Felix Kilsmark, 2026

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2026

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Chalmers Tekniska Högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Bilden har bearbetats utifrån eget taget fotografi av bergtäkten, där området bakom mothållsvallen har fyllts ut med deponimassor genom AI verktyget Artlist.

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2026

Utformning och stabilisering av en inert deponi med en ekonomisk utvärdering
En studie av en deletapp vid Swerock AB:s anläggning vid Koberg, Trollhättan kommun
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik
ALEXANDER ANDERSSON
FELIX KILSMARK
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Samhället står inför omfattande nybyggnation och renovering av byggnader och infrastruktur, vilket genererar stora mängder byggavfall. Detta avfall bör minskas, återanvändas eller återvinnas. En stor mängd material behöver dock fortfarande deponeras. Tillsammans med Swerock AB syftar denna studie till att undersöka hur en inert deponi belägen i en aktiv bergtäkt går att utformas. Detta med beaktning av material, vattennivåer i deponin samt stabilitet. Utöver dessa aspekter kommer ekonomiska perspektiv analyseras översiktligt angående anläggning och drift. Studien inleds med en litteraturstudie av verksamhetsområdet samt teori om jordhållfasthet och stabilitet. Stabilitetsanalyserna utförs i LimitState:GEO med fokus på materialfördelning, hållfasthetsparametrar samt en kort analys om släntlutning. Säkerhetsfaktorn för slänten ska vara minst 1,5 för odränerat fall och 1,3 för dränerat fall. Tre scenarier med 20, 40 samt 60 % blött material (lera) analyseras i tre olika fall av utformning (A, B och C). Vattnets påverkan analyseras också genom en jämförelseanalys av vattennivåer på 10 och 15 meter över täktbotten för fall B. Enligt resultaten har scenarierna med 20 % och 40 % blött material, särskilt i fall A och C, bäst säkerhetsfaktor. Scenariot med 60 % blött material för fall B och C tenderar till lägre säkerhetsfaktorer och därför svåra att genomföra. Fall B tenderar till lägre säkerhetsfaktorer i alla scenarier med andel lera. Slutligen går det att avgöra att fall A och C med 20–40 % blött material är mest lämpliga till deponin. Den översiktliga ekonomianalysen diskuterar variationer i lönsamhet mellan 20–60 % lera och visar på liknande slutsats som stabilitetsanalyserna. Sammantaget bedöms scenariot med 40 % blött material vara lämpligast, både ur stabilitet- och ekonomiskt perspektiv.

Nyckelord: Deponi, geoteknik, släntstabilitet, skjuvhållfasthet, odränerad analys, dränerad analys, LimitState:GEO.

Design and stabilization of an inert landfill with an economic evaluation

A study of a sub-stage at Swerock AB's facility near Koberg, Trollhättan municipality

Degree Project in the Engineering Programme

Civil Engineering

ALEXANDER ANDERSSON

FELIX KILSMARK

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of Geology and Geotechnical Engineering

Chalmers University of Technology

Abstract

Society is undergoing changes involving new constructions and renovations of buildings and infrastructure, generating a lot of construction waste. This waste should be reduced, reused or recycled but a lot still requires disposal at landfills. In collaboration with Swerock AB this study aims to investigate how an inert landfill, located within an active quarry, can be designed. This considers materials, water levels and stability as well as a brief analysis of the economic aspects of construction and operation. The study begins with a literature review about the area of the landfill and then theories of soil strength and stability. The stability analyses were done in LimitState:GEO with focus on material distribution, strength parameters as well as a brief analysis of slope inclination. The safety factor is required to be at least 1,5 for undrained analysis and 1,3 for drained analysis. Three scenarios with 20, 40 and 60 % wet material (clay) were analyzed in three design cases (A, B and C). The impact of water was also studied through a comparison of the water levels 10 and 15 meters above the floor for case B. The results show that the scenarios with 20 % and 40 % clay, especially cases A and C, achieved the best safety factors. With 60 % clay the cases B and C tended to get lower safety factors. Case B generally got lower safety factors in all scenarios. Overall, the cases A and C with 20-40 % clay were considered the most suitable for the landfill. The general economic analysis discusses variations in profitability for scenarios with 20-60 % clay content and indicates conclusion like those of the stability analyses. Overall, the scenario with 40 % wet material is considered the most suitable, from both a stability and an economic perspective.

Keywords: Landfill, geotechnics, slope stability, shear strength, undrained analysis, drained analysis, LimitState:GEO.

Förord

Föreliggande studie har genomförts som examensarbete inom den samhällsbyggnadstekniska avdelningen vid Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet berör främst släntstabilitet inom ämnet geoteknik, vilket även har berörts flertalet gånger under utbildningens gång. Studien omfattar analyser och beräkningar av släntstabilitet med hjälp av datorprogrammet LimitState:GEO samt översiktlig ekonomisk utvärdering av de olika fallen.

Detta avslutande arbete har varit både intressant och lärorikt. Det har varit extra roligt att få chansen att utveckla kunskaper i samband med ett riktigt projekt och på det sättet lära sig mer om branschen.

Vi vill börja med att tacka Malin Kronbäck för hennes engagemang och att hon gav oss möjlighet till detta examensarbete hos Swerock AB. Sedan vill vi även tacka Mattias Lindenlöv och Anders Olofsson som bidrog med data och underlag samt visning av tåkten vid platsbesöket. Vi vill även rikta ett stort tack till vår handledare Frej Hegg på Swerock AB. Det har varit ett bra samarbete där Frej bidrog med mycket underlag, administrativt arbete, kontakter samt anordning av platsbesök. Till sist vill vi rikta ett stort tack till Mats Karlsson, vår handledare och examinator på Chalmers Tekniska Högskola. Vi tackar för ett stort engagemang och bra vägledning genom hela projektet.

Göteborg, juni 2026

Alexander Andersson

Felix Kilsmark

Beteckningar

Nummer

0 Rotationscentrum

Latinska versaler

Cu Odränerad skjuvhållfasthet [kPa]

M_A Pådrivande moment [Nm]

M_R Stabiliserande moment [Nm]

W Egentyngd skredkropp [kN]

Latinska gemener

b Bredden på skivor vid beräkning av SF i dränerat tillstånd [m]

b₁ Bredden på $\Delta\sigma_{\text{Släntkrön}}$ [m]

b₂ Bredden på $\Delta\sigma_{\text{Släntfot}}$ [m]

c' Effektiv kohesion [kPa]

d Hävarm mellan W och rotationscentrum [m]

d₁ Hävarmen från $\Delta\sigma_{\text{Släntkrön}}$ till rotationscentrum [m]

d₂ Hävarmen från $\Delta\sigma_{\text{Släntfot}}$ till rotationscentrum [m]

d_w Meter vattenpelare [m]

f Multiplikationsfaktor [-]

g Tyngdacceleration [m/s²]

h Vattenpotential [m]

h_w Vattenytans höjd över glidyta [m]

l Bredd längs glidyta [m]

n Porositet [%]

r Radien på glidyta [m]

u Porvattentryck [kPa]

y Höjd [m]

y₀ Global referensnivå [m]

z Jordlagrets tjocklek [m]

Grekiska tecken

α	Vinkel för varje skiva vid beräkning av SF i dränerat tillstånd [°]
β	Glidyttans lutning [°]
γ	Tunghet jord [kN/m ³]
γ_w	Tunghet vatten [kN/m ³]
θ	Medelpunktsvinkel [°]
ρ	Densitet [kg/m ³]
$\Delta\sigma_{\text{Släntfot}}$	Utbredd extern last pålagd vid släntfot [kPa/m]
$\Delta\sigma_{\text{Släntkrön}}$	Utbredd extern last pålagd vid släntkrön [kPa/m]
σ	Totalspänning [kPa]
σ_1	Vertikal spänning [kPa]
$\sigma_2 \text{ \& } \sigma_3$	Horisontell spänning [kPa]
σ'	Effektivspänning [kPa]
τ_f	Skjuvhållfasthet [kPa]
τ_{mod}	Mobiliserande skjuvhållfasthet [kPa]
φ'	Friktionsvinkel [°]

Innehållsförteckning

Sammanfattning	vi
Abstract	vii
Förord	viii
Beteckningar.....	ix
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål.....	2
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Förändringar av förutsättningar.....	3
1.5 Frågeställning	4
2 Plats- och verksamhetsbeskrivning	5
2.1 Områdesbeskrivning.....	5
2.1.1 Geologiska förutsättningar	5
2.2 Verksamhetsområde	7
2.2.1 Skyddsområde	8
2.3 Verksamhetsbeskrivning	9
2.3.1 Tåktverksamhet	9
2.3.2 Sevesoverksamhet	9
2.3.3 Deponi	9
2.3.4 Masshantering innan deponering av inert material	11
2.3.5 Konstruktion av deponin	11
2.4 Ekonomi	12
3 Teori	13
3.1 Definition av olika deponier.....	13
3.1.1 Deponi för farligt avfall.....	13
3.1.2 Deponi för icke-farligt avfall.....	13
3.1.3 Deponi för inert avfall	14

3.2 Hållfasthet- och jordegenskaper	14
3.2.1 Friktionsjord	14
3.2.2 Kohesionsjord.....	15
3.2.3 Spänningar i jord	16
3.3 Stabilitet	17
3.3.1 Släntstabilitet cirkulär cylindriska glidytor	17
Odränerat tillstånd	17
Dränerat tillstånd	18
3.3.2 Släntstabilitet plana glidytor.....	19
3.3.3 Brottmekanismer och glidytor.....	19
3.3.4 Yttre faktorer som påverkar stabiliteten.....	20
Påverkan av yttre laster	20
Laster	20
Porvattentryck	20
Vibration från packning och täktverksamhet	21
3.4 Analysmetod.....	22
3.4.1 Dränerad analys.....	23
3.4.2 Kombinerad analys.....	23
3.4.3 Odränerad analys.....	23
3.5 Beräkningsmodell LimitState:GEO	24
3.5.1 LimitState:GEO.....	24
3.5.2 Discontinuity Layout Optimization (DLO).....	24
3.5.3 Beräkningsmetodik för säkerhetsfaktor i LimitState:GEO	25
3.5.4 Analysmetod LimitState:GEO	27
3.5.5 Vattenyta och portryck LimitState:GEO.....	27
Water table	27
Water regimes	27
4 Metod	29

4.1 Grundvattennivå	29
4.2 Val av säkerhetsfaktor	31
4.3 Val av materialparametrar	31
4.4 Volym och massa	33
4.5 Vald programvara.....	34
4.6 Utformning av modeller	34
4.6.1 Modeller utan vattentryck	37
4.6.2 Modeller med vattentryck	37
4.7 Analysmetodik och beräkningsförutsättningar.....	38
5 Resultat.....	39
5.1 Släntlutning	39
5.2 Släntstabilitet.....	39
6 Diskussion	41
6.1 Släntlutningsanalys.....	41
6.2 Släntstabilitet.....	42
6.2.1 Ideala förhållanden	42
6.2.2 Vattnet inverkan på stabiliteten.....	45
6.3 Ekonomi	46
6.4 Förhållande mellan släntstabilitet, ekonomi och hållbarhet.....	48
6.5 Studiens begränsningar och osäkerheter	49
6.5.1 Area och geometri	49
6.5.2 Antagna parametrar	50
6.5.3 Modelluppbyggnad.....	50
6.5.4 LimitState:GEO.....	51
6.6 Förslag på vidarestudier	51
7 Slutsats	52
Referenser.....	54
Bilagor.....	57

Kompletterande bilaga	57
Modeller	57

1 Inledning

I följande kapitel presenteras bakgrunden till den utförda studien. Översiktligt beskrivs vad arbetet vill uppnå inom de geotekniska och ekonomiska aspekterna för deletappen. Vidare redovisas de avgränsningar som gjorts samt förändringar i information som uppstått under projektets gång.

1.1 Bakgrund

Dagens samhälle genomgår en ständig utveckling av bebyggelse som ersätts eller byggs ut i takt med ökade behov. Nya bostadsområden, vägar och industrier etableras samtidigt som äldre konstruktioner rivs eller byggs om. Denna utveckling inom bygg- och anläggningssektorn genererar stora mängder avfall, vilket ställer höga krav på en fungerande och hållbar avfallshantering.

En grundläggande syn över avfallshantering är att i första hand undvika eller minska uppkomsten av avfall i så stor utsträckning som möjligt. Det är dock oundvikligt att avfall skapas och i de fallen ska återanvändning av materialet prioriteras innan återvinning av materialet görs. Trots detta sätt att arbeta finns det massor som saknar praktiska eller ekonomiska förutsättningar för återbruk eller återvinning. Dessa massor behöver i stället tas om hand genom deponering. Deponier omfattas av höga miljökrav i syfte att minimera risken för att föroreningar sprids till mark och vatten, med hänsyn till både omgivande miljö och långsiktig säkerhet för människor (SFS 2001:512).

Beroende på avfallstyp och dess egenskaper delas deponier in i olika kategorier. En av de är deponier för inert avfall. Dessa deponier omfattar material som har obetydlig lakbarhet, bryts ej ner biologiskt eller på annat sätt förändras väsentligt över tid. Material som kan tillhöra kategorin inert är exempelvis krossad betong, klinker, tegel och rena schaktmassor. För att deponierna inte ska påverka den omgivande miljön negativt, krävs det också att deponin har en utformning och stabilitet som inte förorsakar att deponin rasar och därmed minimerar risken för personskador.

Hur en deponi utformas beror till stor del av dess geografiska placering, hur den byggs upp och vilka materialegenskaper som deponimassorna har. Utformningen påverkas även av det omkringliggande områdets förutsättningar. Anläggande kan ske såväl ovan mark eller i befintliga schakter men oavsett metod är stabilitet en central aspekt, både i uppbyggnadsfasen

som vid sluttäckning (SGI, 2007). Deponerade massor uppvisar ofta varierande hållfasthetsegenskaper, vilket i kombination med slänter och påverkan från vatten kan påverka stabiliteten negativt i deponin. För att säkerställa en god stabilitet behöver utformning av deponin ske ur ett geotekniskt perspektiv i förhållande till de hydrologiska förhållanden som råder vid deponin. Vid etablering av en deponi finns en balansgång mellan tekniska krav och ekonomiska intressen.

Företaget Swerock AB planerar att bedriva återvinningsverksamhet samt att anlägga en deponi av inert avfall. I samband med deponiverksamheten så ska även täktverksamhet bedrivas. Detta genom att fylla deponin med deletapper i takt med att berget sprängs och hanteras för täktverksamheten. Verksamhetsområdet är beläget en bit utanför Koberg, Trollhättan kommun, där ett miljötillstånd för deponin också har upprättats. Tekniska förhållanden för utformning av deponins deletapper saknas och behöver därför undersökas vidare. Eftersom det oftast är tekniskt dåligt material som deponeras skapas utmaningar gällande stabilitet vid utformning. Samtidigt finns ett ekonomiskt intresse från företagets sida om hur lönsamheten ser ut för deponin med hänsyn till materialens beskaffenhet.

1.2 Syfte och mål

Syftet med projektet är att undersöka stabilitet i den första deletappen i västra delen av den planerade deponin i dess färdigställda och sluttäckta tillstånd. Detta för att undersöka vilka mängder blött material som kan hanteras inom olika utformningar, samt vilka utformningar som bör undvikas.

Vidare syftar studien att studera en lämplig släntlutning för att möjliggöra ett stort mottagande av material, samtidigt som hänsyn tas till fortsatt drift i bergtäkten. Dessutom vill Swerock AB att ett ekonomiskt perspektiv ska presenteras och diskuteras med hänsyn till andelen blött material som kan deponeras.

Målet är att undersöka ett spann på hur stor andel lera som är möjlig att deponera ur ett geotekniskt perspektiv för att uppnå erforderlig stabilitet och säkerhet vid framdrift. Studien undersöker ett spann på andel lera i deponin på 20–60 %. Detta spann undersöks eftersom lera är ett material som är svårt att använda i större skala, på grund av de tekniska utmaningarna som medföljer kopplad till dess beskaffenhet. Därför är det ett material som både är utmanande att deponera men som också är önskvärt att ha stor andel av i deponin i de fall då

det ej går att använda som byggnadsmaterial. Dessutom ska en översiktlig ekonomisk förståelse för deletappen fås genom resonemang och diskussion.

1.3 Avgränsningar

Följande avgränsningar har gjorts för att ta hänsyn till examensarbetets tidsram, omfattning och resurser:

- Deponin som projektet betraktar är beläget i Koberg, Trollhättan, och har en fördefinierad utformning av att brytområdet från täktverksamhet utgör deponiområdet.
 - Deponin behandlar enbart inert avfall.
 - Projektet avgränsas vid analyser till tre scenarier med 20, 40 respektive 60 % blött material i form av lera, där vardera har tre olika fall av utformning.
 - Vattenanalys genomförs endast för uppbyggnadsfall B.
 - Projektet kommer att bortse från vibrationer från täktverksamheten samt yttre laster på deletappen.
 - Diskussion gällande den ekonomiska aspekten tar endast hänsyn till mottagningspris, hanteringskostnader, tillägg för blött material samt transportkostnader.
- Ekonomistudien avgränsas i denna grad eftersom studien som helhet inte ska lägga så stor vikt på ekonomi.

1.4 Förändringar av förutsättningar

Under projektets gång förändras vissa förutsättningar från den tekniska beskrivningen, som upprättades vid ansökan om tillstånd för deponin. Förändringar som skedde tidigt i projektet är att en mothållsvall av fast berg numera behålls i konstruktionen av deponin samt ändring av de olika etapperna. Dessa förutsättningar tas hänsyn till i metod och beräkningar.

Senare under projektet förändras utformningen av den geologiska barriären. Efter tillsyn från tillsynsmyndigheten ska den inte längre gå hela vägen upp längs bergväggen som det ursprungligen visas i den tekniska beskrivningen från Swerock AB. Numera ska den endast vara placerad på täktbotten och bara konstrueras på sidorna fläckvis vid behov, vilket bedöms i takt med att etappen fylls upp.

1.5 Frågeställning

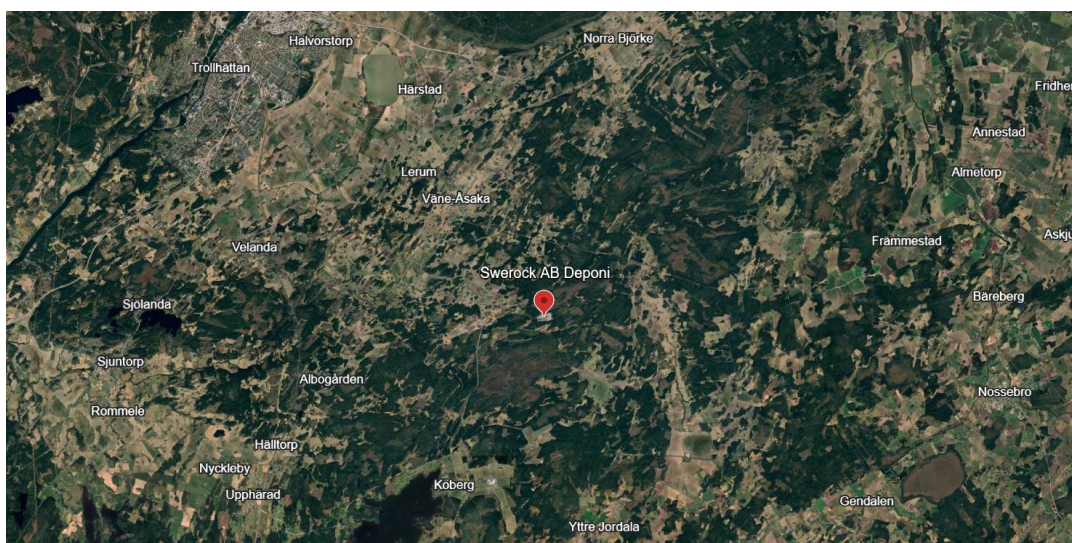
- Hur påverkar placeringen och uppbyggnaden av de deponerade massorna släntstabiliteten?
- Hur påverkar andelen lera släntstabiliteten i deponin?
- Vilken släntlutning är lämplig att använda för deletappen med hänsyn till stabilitet?
- Vilket eller vilka scenarier är mest lönsam att utföra för deletappen?

2 Plats- och verksamhetsbeskrivning

Kapitlet behandlar en översiktlig beskrivning av den geografiska placeringen av deponi- och täktverksamheten och de olika verksamheter som Swerock AB har tillstånd att bedriva på området. Vidare presenteras information om jordarter i deponianläggningens närområde, deletappens utformning och konstruktion samt ekonomiska förutsättningar för ekonomianalysen.

2.1 Områdesbeskrivning

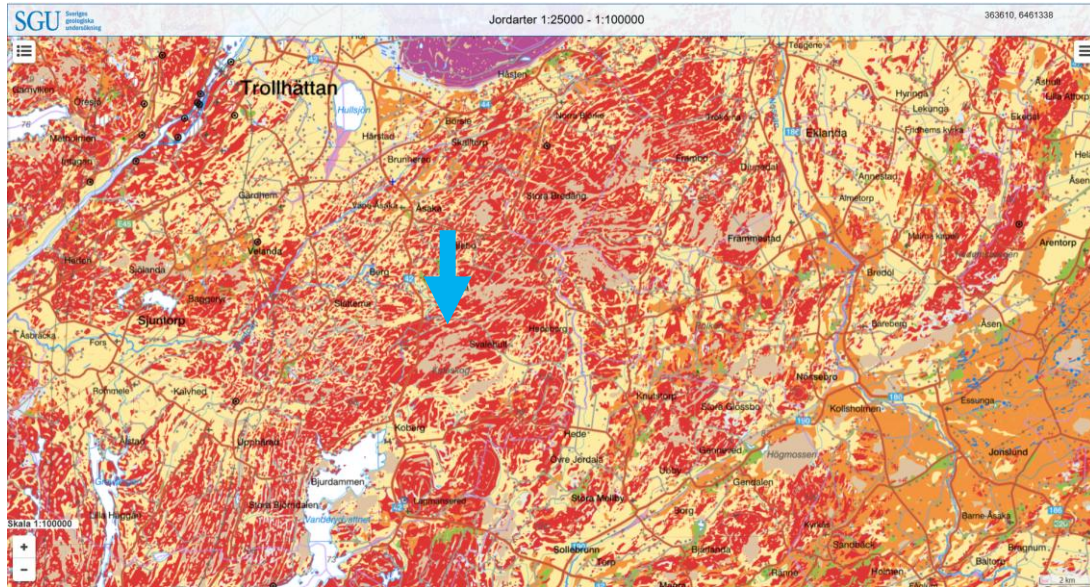
Deponianläggningen som studien berör ligger 6 km norr om Koberg och 13 km sydost om Trollhättan (Swerock AB, 2024). Se figur 1. Omgivningen runt anläggningen består i stort sett bara av stora sammanhängande åker- och skogsområden. Detta innebär alltså att verksamheten ej har direkt närliggande bostads- eller stadsområden och närmsta huset är ett fritidshus med ett avstånd på 650 meter från området. Mellan huset och verksamhetsområdet är det endast skog.



Figur 1. Visar deponins geografiska placering i förhållande till områden runt omkring (Google Earth, u.å).

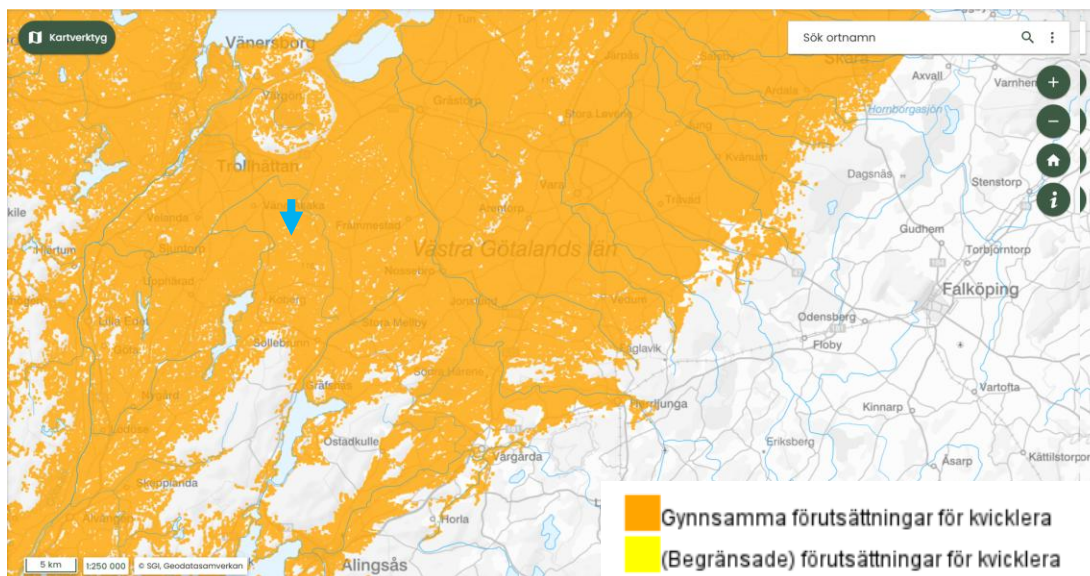
2.1.1 Geologiska förutsättningar

Området runt deponianläggningen präglas av varierande jordartsförhållanden enligt SGU:s jordartskarta (SGU, u.å.-a), se figur 2. Enligt kartan framgår skillnader mellan områdena väster och öster om deponiområdet. Marken öster om deponiområdet består enligt kartan av friktionsjord som postglacial sand och grus, medan marken väster om området i största utsträckning består av lera och silt. Se figur 3.



Figur 3. Jordartskarta över deponianläggningens närområde. Den blå pilen anger deponianläggningens placering (SGU, u.å.-a)

Enligt en kartläggning gjord av Sveriges Geotekniska Institut över områden med förutsättningar för kvicklera, visas det att deponin ligger i ett område med gynnsamma förutsättningar för förekomst av kvicklera (SGI, u.å.). Det finns dock områden söder om deponin inom upptagningsområdet som inte har förutsättningar för kvicklera. Se figur 4.

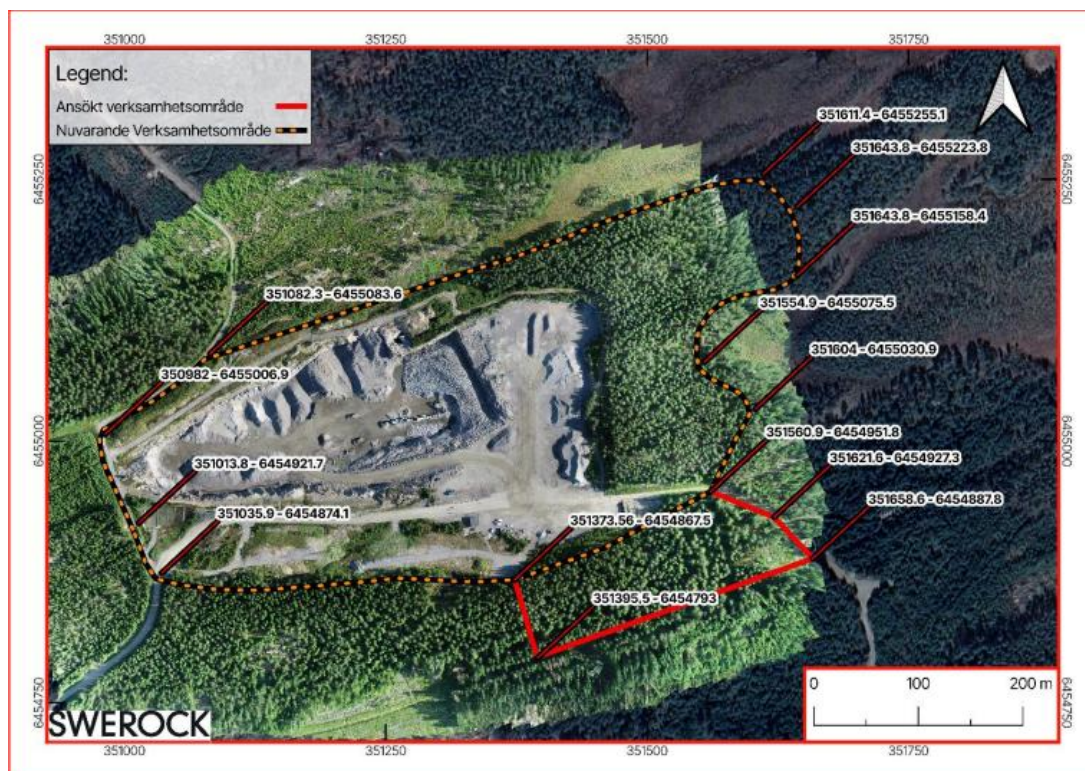


Figur 4. Illustration över hur gynnsamma förutsättningarna är för att kvicklera kan komma att deponera (SGI, u.å.).

2.2 Verksamhetsområde

Swerock AB har, efter ansökan om ändringstillstånd för inert deponiverksamhet, fått ett tillstånd till återvinningsverksamhet och inert deponiverksamhet, där tillståndet gäller till 31 maj 2042 (Länstyrelsen, 2025a). Verksamhetsområdet utökas med anledning av ändringstillståndet från 16 ha till 18 ha, se figur 5. Tåktverksamheten har en area på 6,8 ha och har enligt ändringstillståndet ett årligt uttag av jungfruligt berg (orört berg) inklusive införd entreprenadberg på maximalt 350 000 ton, och en total loss hållning om 7 000 000 ton berg (Swerock AB, 2024). Ändringstillståndet tillåter en återvinningsverksamhet med ett årligt mottagande av 100 000 ton avfall. De avfall som ingår i återvinningsverksamheten är av icke-farligt material enligt tabell 6 i den tekniska beskrivningen. 23 000 m³ ska först mottagas och läggas ut i anläggningsändamål innan mottagning av de 100 000 ton kan ske. De 23 000 m³ räknas med i de 100 000 ton första året. Den del av området där återvinningsverksamheten ska bedrivas är den utökade ytan markerad i rött i figur 5 och motsvarar en yta på 2,6 ha.

Den planerade deponin kommer anläggas från västra delen av tåkten i takt med att bergsprängningen fortlöper i östlig riktning. När brytningen i den västra delen av bergtåkten nått en nivå på +51 m kommer deponering av material påbörjas. Enligt tillståndet kommer ett totalt årligt mottagande av 200 000 ton inerta deponimassor, beskrivna i figur 6, att tillåtas in till deponiverksamheten. Sammantaget beräknas hela tåktområdet att fyllas till en nivå på ca +75 m med inerta deponimassor och uppgår till en volym om 1 500 000 m³. Förtydligande av deponins utförande beskrivs i kapitel 2.3 *verksamhetsbeskrivning*.



Figur 5. Visualisering av verksamhetsområdet samt ansökta utökningsområde (Swerock AB, 2024).

Avfallskod	Avfallstyp
17 05 04	Jord och sten
17 01 01	Betong
17 01 02	Tegel
17 01 03	Klinker och keramik
17 01 07	Andra blandningar av betong, tegel, klinker och keramik än de som anges i 17 01 06

Figur 6. Avfallstyp med respektive avfallskod enligt avfallsförordningen (Swerock AB, 2024).

2.2.1 Skyddsområde

Vid tillfället då ansökan om att bedriva deponeringsverksamhet genomfördes fanns det ett vattenskyddsområde i området (Swerock AB, 2024). Sedan 2025-04-17 är dock detta vattenskyddsområde upphävt (Länstyrelsen, 2025b).

2.3 Verksamhetsbeskrivning

Kapitlet ger en översiktlig beskrivning av den täkt- och deponiverksamhet som bedrivs vid anläggningen i Koberg, Trollhättan kommun.

2.3.1 Tägtverksamhet

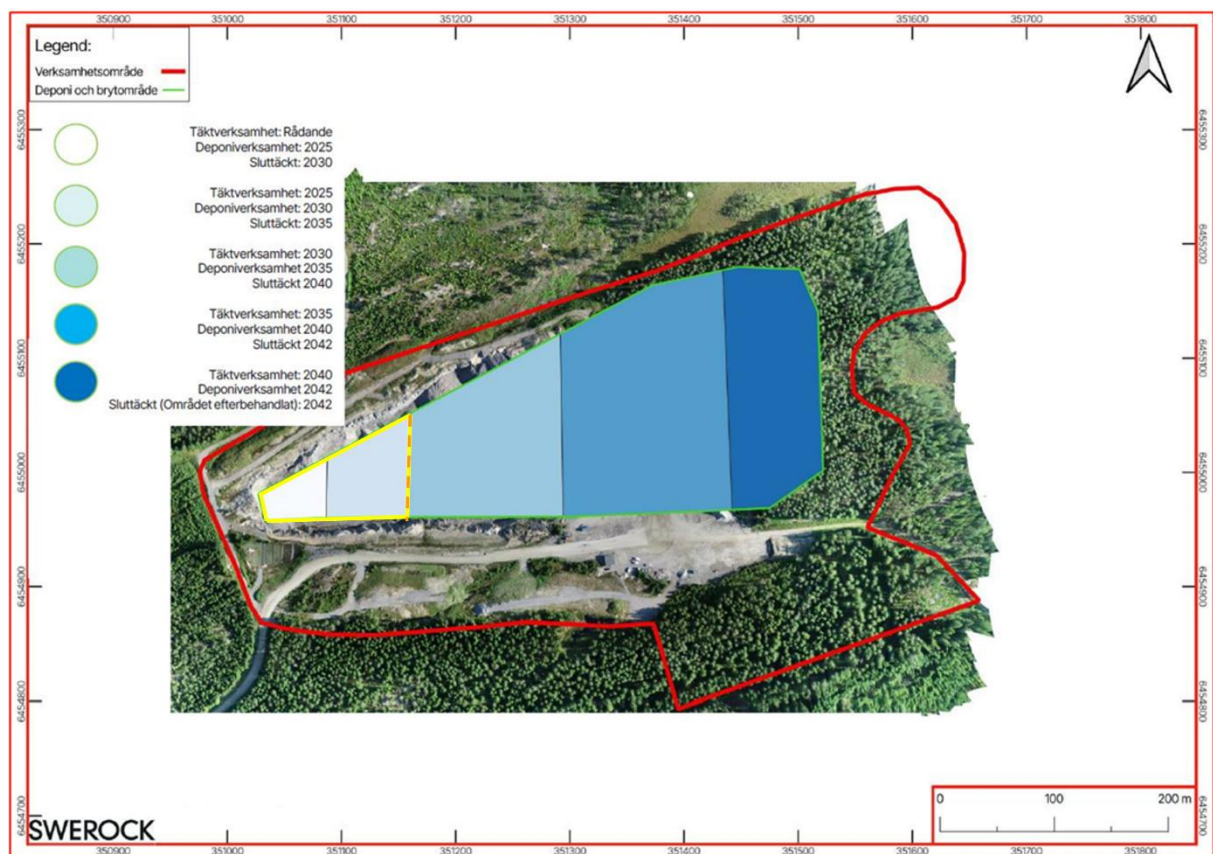
Inom verksamhetsområdet bedriver Swerock AB täktverksamhet som omfattar hela kedjan från avbaning och sprängning till krossning, sortering och transport av färdigt bergmaterial (Swerock AB, 2024). Efter sprängningsarbetet sker vid behov knackning av skut, vilket innebär att större block som inte kan hanteras av förkrossen delas upp i mindre stenblock. Bergmaterial som redan har en lämplig storlek transporteras direkt till förkrossen, vilken är placerad nära bergfronten för att minimera interna transporter. Därefter sker ytterligare krossning vid mer stationära platser i tåkten. Det färdigbearbetade materialet lagras på upplag i olika fraktioner inom verksamhetsområdet innan vidare transport till kund.

2.3.2 Sevesoverksamhet

Till följd av täktverksamheten uppstår ett behov av hantering och användning av sprängämnen (Swerock AB, 2024). Eftersom Swerock som mest bara hanterar mellan 10 och 50 ton sprängmedel omfattas de av den lägre kravnivån om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor (SFS 1999:381). Detta innebär att verksamheten också benämns som en sevesoverksamhet av den lägre kravnivån. Det är endast vid sprängtillfällen som verksamheten förvarar mer än 10 ton sprängämnen och övrig tid förvaras det inte några sprängämnen inom verksamhetsområdet.

2.3.3 Deponi

Deponin planeras att anläggas i den befintliga tåkten och sker etappvis med start i den västra delen. I takt med att täktverksamheten fortskrider kommer succesivt hela tåkten att fyllas med deponimassor. Se figur 7 för det översiktliga planerade genomförandet, där de två första etapperna på ett ungefär sammanförts till en etapp markerat i gult. Detta visas även med det gulmarkerade området.



Figur 7. Deponiplan över hur utförandet av deponin ser ut fram till 2042. Det gulmarkerade området utgör deletapp ett, vilket omfattar de två ursprungligen planerade deletapperna. Den streckade orangea linjen markerar den ungefärliga placeringen av mothällsvallen. (Swerock AB, 2024). Omarbetad med tillstånd.

Den inerta deponin används för att ta hand om material som ej går att återvinna (Swerock AB, 2024). Genom att fylla deponin i takt med brytningen inom täktverksamheten maximeras nyttjandet av området. Att arbeta med deponiverksamheten i samband med täktverksamheten möjliggörs att marken kan vara återställd enligt efterbehandlingsplanen så snabbt som möjligt. Efterbehandlingsplanen innebär att lämpligt materiallager ska läggas på deponin vid sluttäckning. Detta syftar till att skapa förutsättningar för framtida skogsbruk för markägaren samt att området efter sluttäckning ska anpassas till miljön runt omkring.

Det samordnade arbetet mellan täkt- och deponiverksamheten leder även till logistiska fördelar, eftersom transporter av material till deponin kan ske samtidigt som material från täktverksamheten kan hämtas på retur inför leverans.

Planen är att deponera jord- och schaktmassor från olika bygg- och anläggningsprojekt inom det geografiska upptagningsområdet (Swerock AB, 2024). Området sträcker sig 0–5 mil från anläggningen vid externa kunder men kan förlängas vid egna anläggningar (M.Lindenlov,

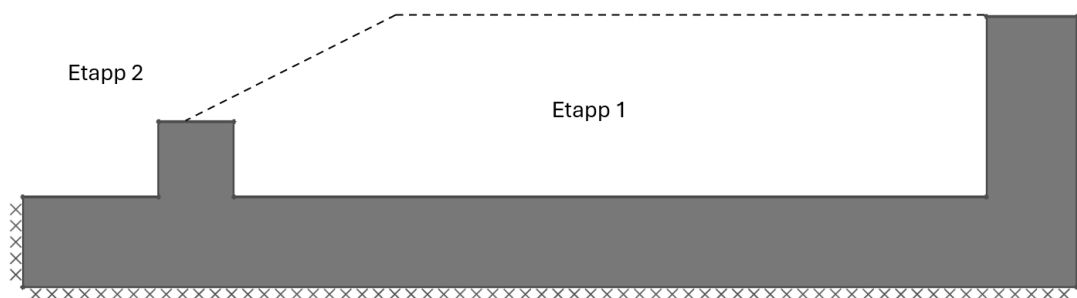
Swerock AB, personlig kommunikation, 6 mars, 2026). Upptagningsområdet beror även på marknadsförutsättningar och kan komma att anpassas från fall till fall. Till viss del kommer även restprodukter från återvinningsverksamheten vid anläggningen att deponeras, se figur 6 för avfallskoder enligt avfallsförordningen. Även massor med spår av eller innehållandes av invasiva växter kan komma att deponeras.

2.3.4 Masshantering innan deponering av inert material

Massor som anländer till anläggningen skall vara karakteriserat och förankat innan materialet ankommer (Swerock AB, 2024). Godkänt material vägs in och körs till tätkanten där det tippas. Massor kan placeras på en yta i nära anslutning till täkten om förhållanden försvårar deponeringen. På samma sätt läggs massor som ej kontrollerats på upplag för kontroll innan det deponeras i täkten (Swerock AB, 2024). Från återvinningsanläggningen kan mindre restfraktioner uppstå. Om fraktionerna uppfyller kraven för inert material deponeras materialet direkt i täkten.

2.3.5 Konstruktion av deponin

Deletapp ett motsvarar ungefär de två första etapperna i väster, markerat med gult i figur 7. Vid nådd bottennivå på +51 m anläggs en geologisk barriär mot täktbotten. Barriären fördröjer lakvatten genom deponin till omkringliggande grundvatten (SFS 2001:512). Material som ska deponeras kommer vid färdigställd geologisk barriär att tippas från tätkant ned till täktbotten eller i tidigt skede köras ner i täkten där massorna läggs ut (Swerock AB, 2024). Materialet kommer under deponering att kompakteras och justeras med vält och bandschaktare för att förhindra hålrum och minska risken för stora sättningar. Enligt Swerock AB (2024) skall deletapp ett av deponin, utifrån principskiss i den tekniska beskrivningen, konstrueras med terrassering i form av avfallspallar med viss lutning. Detta för att minska risken för ras under deponeringsetapperna. För att ytterligare motverka detta kommer en cirka 10 m hög bergskant behållas ungefär 100 m ut från bergväggen i väster, streckad linje i figur 8 (M.Lindenlov, Swerock AB, personlig kommunikation, 6 mars, 2026). Denna bergskant utgör en mothållsvall och hjälper till att hålla emot deponimassorna. Utöver principskissen i den tekniska beskrivningen kommer alternativ lösning att undersökas i form av mothåll i slänten.



Figur 8. Sidprofil på deletappen för att visa bergets profil. Som utskrivet utgör de streckade linjerna gränsen till deletapp 2 (ritad av författare).

2.4 Ekonomi

Information och teori kring hur Swerock AB hanterar ekonomiska frågor och hur prissättningar fungerar har inhämtats genom personliga intervjuer med företagets anställda. Som underlag för den ekonomiska analysen har även uppgifter avseende mottagningspris, hanteringskostnader, tillägg för blött material samt transportkostnader erhållits från företaget. Informationen kommer användas som underlag för översiktlig förståelse för hur ekonomin varierar beroende på olika faktorer. Dessa uppgifter kommer dock ej att redovisas då priserna till viss del är fiktiva och kan variera över tid beroende på bland annat efterfrågan, inflation, material- och drivmedelspriser och marknad. Massorna som ska deponeras kommer prissättas utifrån Swerock AB:s målsättningar för lönsamhet och med hänsyn till kostnadsmassan.

Beroende på hur stort vatteninnehåll materialet har kan en viss ökning i prissättningen ske. Blött material kan alltså tilläggsdebiteras då det kan innebära större hanteringskostnader. På liknande sätt påverkas hanteringskostnaderna av hur svårhanterligt materialet är, eftersom det kan leda till åtgärder som torkning och beblandning med grövre material.

Vid kontinuerligt inflöde till deponin kan en högre nyttjandegrad av maskiner och personal erhållas och därav en förutsägbar och möjligtvis lägre hanteringskostnad per mottaget ton. Detta genom att det möjliggör en effektiv resursplanering. På motsvarande sätt kan ett ojämnt inflöde ge en ökad hanteringskostnad per ton om resurser står outnyttjade eller behöver skalas upp kortsiktigt. Detta skulle då ge en högre kostnad per ton mottagen massa.

Transportkostnader beror på sträckan som materialet ska transportera samt vilken typ av fordon som transporterar materialet. Fordonstyperna som behandlas i studien är tridem och bil med släp. En tridem definieras som en trippelaxlad lastbil där avståndet mellan den första och

tredje axeln är mindre än fem meter (Transportstyrelsen, 2025). Utifrån information från Swerock AB avser en bil med släp ett ekipage bestående av en lastbil med tillkopplat släp. För dessa olika transportsätt har pris per kilometer mottagits från Swerock AB. Dessa kostnader beaktas för att möjliggöra en stabil och marknadsmässig prissättning (M.Lindenlov, Swerock AB, personlig kommunikation, 6 mars, 2026). I studien används endast detta som underlag för att skapa förståelse över hur transporten kan påverka ekonomin.

3 Teori

Det finns många olika slags deponier och därigenom olika lagar, regler och riktlinjer. Detta bidrar till att vissa krav ställs på bland annat släntstabilitet. I följande kapitel redogörs dessa krav, hur deponin är planerad och hur området runt omkring ser ut och används. Utöver det så förklaras teorier bakom släntstabilitet i relation till materialets egenskaper. Kapitlet behandlar även beräkningsmetodiken i datorprogrammet LimitState:GEO samt de inställningar som tillämpats i studien.

3.1 Definition av olika deponier

Som nämnts i bakgrunden går det att utforma deponier olika enligt förordningen om deponering av avfall (SFS 2001:512), beroende på vilken typ och mängd material som ska hanteras. Utifrån de olika materialegenskaperna avfallet kan ha finns det även olika benämningar för deponianläggningar. Förordningen om deponering av avfall anger tre olika deponiklasser; deponi för farligt avfall, deponi för icke-farligt avfall och deponi för inert avfall.

3.1.1 Deponi för farligt avfall

Anläggningar som är anpassade för att ta emot farligt avfall regleras i Avfallsförordningen (SFS 2020:614). Enligt förordningen definieras farligt avfall genom en avfallskod markerad med en asterisk (*). Avfallskoderna finns i avfallsförordningens bilaga 3.

3.1.2 Deponi för icke-farligt avfall

Enligt avfallsförordningen (SFS 2020:614) definieras icke-farligt avfall som avfall som inte omfattas av kriterierna för farligt avfall. Alltså avfallskoder utan asterisk i avfallsförordningens bilaga 3 som nämndes under rubriken *Deponi för farligt avfall*.

3.1.3 Deponi för inert avfall

Inert avfall omfattas av klassificeringen som icke-farligt avfall med ytterligare krav, vilket innebär avfall som ej genomgår väsentliga förändringar (SFS 2001:512). Med dessa förändringar menas fysikaliska, kemiska och biologiska. Materialet får alltså inte heller lösas upp, brinna eller reagera på ett fysikaliskt, kemiskt eller annat sätt. Avfallet ska inte heller kunna brytas ned biologiskt eller vara orsaken till att miljön eller människors hälsa påverkas negativt. Materialet som avfallet består av ska även ha ett obetydligt föroreningsinnehåll, lakbarhet och lakvattnet ska inte heller ha en ekotoxicitet som har betydelse för yt- och grundvattenkvalitet.

Den färdigkonstruerade inerta deponin har inga större krav på uppbyggnaden utöver krav på genomsläpplighet i de lagren som ligger i utkanten av deponin (Naturvårdsverket, 2004). Dessa krav är dock relativt milda och ställer enbart krav på att en geologisk barriär ska användas. Detta är ett skyddande lager mellan deponins utkant och materialet som deponeras. Lakvattnet får som snabbast rinna genom den geologiska barriären på ett år och den ska minst vara 0,5 m tjock. Det finns alltså inga krav på bottentätning eller dräneringssikt i de understa delarna i deponin. En mer utförlig beskrivning på uppbyggnad och deponi kommer under rubriken *Konstruktion av deponin*.

3.2 Hållfasthet- och jordegenskaper

De material som planerats att deponeras förväntas uppvisa varierande geotekniska egenskaper och beteenden, vilket vid anläggning av en deponi måste beaktas (SGI, 2007). Därav presenteras hållfasthetsegenskaper för friktionsjord och kohesionsjord i detta kapitel samt spänningsfördelningen på ett jordelement.

3.2.1 Friktionsjord

Friktionsjord består av bland annat sand, grus och sten där dess hållfasthet i huvudsak byggs upp av friktionskrafter mellan jordpartiklarna (SGI, 2025). Dess höga permeabilitet medför att jorden näst intill alltid kan anses som dränerande och utvärderas således av effektivparametrar (Sällfors, 2013). Skjuvhållfastheten τ_f beräknas genom Mohr-Coulombs brottkriterium.

$$\tau_f = c' + \sigma' * \tan \varphi' \quad (\text{Ekv.1})$$

För friktionsjord ansätts $c' = 0$ eftersom materialet betraktas som dränerat och inga vattenpartiklar kan ge upphov till kohesion i jorden.

Hur stort motståndet mot skjuvhållfasthet är i en friktionsjord beror på hur väl packat materialet är samt kornens form och gradering (Larsson, 1989). I en hårt packad friktionsjord är hålrummen, beskrivna av porositeten n , i materialet relativt små. Detta medför att kornen behöver förflytta sig över intilliggande korn vid deformation, vilket innebär att jorden dilaterar. Vid krossning av kornens kontaktytor ökar kornens benägenhet att förflytta sig i förhållande till varandra, där dilatationseffekterna som skulle uppstått förhindras och varpå en minskning i skjuvhållfasthet erhålls. Fastpackade friktionsjordar erhåller vid låga normalspänningar höga friktionsvinklar och vid ökad spänning ökar krossningen, vilket ger en lägre friktionsvinkel. Vid låga normalspänningar leder dilatation till att tätpackat material uppvisar en betydligt högre hållfasthet jämfört med löst packat material och kan uppgå till mer än dubbelt så hög. När deformationer uppstår i det fastpackade materialet minskar skjuvhållfastheten succesivt och närmar sig den hållfasthet ett löst lagrat material uppvisar.

Löst packade material har en högre porositet gent emot fastpackade material. Den högre porositeten medför att kornen kan förskjutas utan att jorden dilaterar. Till följd av detta blir skjuvhållfastheten lägre än fastpackat material med en lägre och konstant friktionsvinkel.

3.2.2 Kohesionsjord

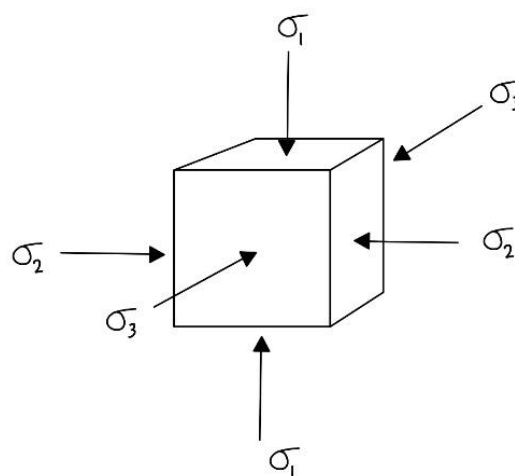
Kohesionsjord är jordtyper bestående av lera, silt, dy och gyttja (SGI, 2025). Dessa partiklar har en partikelstorlek mellan 0,06 – 0,001 mm och bidrar till att hålrummen mellan kornen blir ytterst små (Knappett & Craig, 2012). Där lera specifikt har en kornstorlek $< 0,002$ mm. Partiklarna bygger upp aggregatstrukturer och i kombination med enbart partiklar och de små hålrummen samt inverkan av vatten, bidrar detta till jordens plasticitet. Hållfastheten i kohesionsjordar byggs inte enbart upp av kohesionskrafter mellan partiklarna utan även av friktionskrafter. På samma sätt som för friktionsjordar beräknas skjuvhållfastheten enligt Mohr-Coulombs brottkriterie (ekv.1). Beräkningsgången skiljer sig dock åt beroende på om jorden är dränerad eller odränerad. Vid dränerat tillstånd beräknas skjuvhållfastheten på liknande sätt som för en friktionsjord, men med skillnaden av en kohesion större än noll. I

odränerat tillstånd antas däremot friktionsjorden vara lika med noll ($\varphi' = 0$) vilket innebär att skjuvhållfastheten definieras som $\tau_f = C_u$, där C_u utgör den odränerade skjuvhållfastheten.

Vid kraftig störning av kohesionsjord, exempelvis lera, bryts den naturliga uppbyggda strukturen och hållfastheten hos leran minskar kraftigt. Hur sensitiv en lera är definieras som förhållandet mellan den odränerade hållfastheten i ostört tillstånd och den odränerade hållfastheten i ett stört tillstånd. Sensitiviteten har stor betydelse för stabilitetsbedömning av ett område bestående av kohesionsjord så som lera (Larsson, 2008).

3.2.3 Spänningar i jord

Jord utsätts huvudsakligen av tryckspänningar orsakade av de överliggande lagren (Sällfors, 2013). Med djupet följer en kraftig ökning av spänningar och har en stor påverkan på jordens egenskaper. I jord är de huvudspänningar som verkar på ett jordelement både vertikala och horisontella vid en horisontell markyta. De olika huvudspänningarna benämns σ_1 , σ_2 och σ_3 och verkar enligt figur 9.



Figur 9. Spänningsfördelning av en jordpartikel (ritad av författare).

Eftersom den högsta spänningen verkar i vertikalled utgör σ_1 den högsta huvudspänningen, medan de horisontella huvudspänningarna σ_2 och σ_3 är lika stora. Den vertikala spänningen betecknas vanligen σ och beräknas enligt ekvation 2.

$$\sigma = \sum_{i=1}^N g * \rho_i * z_i = \sum_{i=1}^N \gamma_i * z_i \quad \text{Ekv.2}$$

Spänningar i jord överförs dels genom kontaktpunkter mellan jordpartiklarnas kornskelett och dels genom porvatten, tillsammans utgör dessa totalspänningar (σ_0). Totalspänning kan således definieras som summan av effektivspänningar σ'_0 och porvattentrycket u .

$$\sigma = \sigma' + u \quad \text{Ekv.3}$$

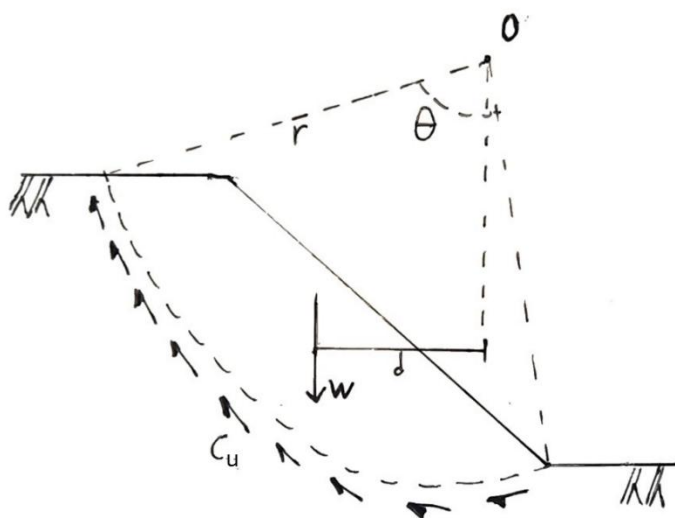
3.3 Stabilitet

Kapitlet behandlar förenklade metoder vid beräkning av stabilitet baserad på momentjämnvikt. Dessutom kommer mer avancerade brottmekanismer och glidytor att framföras samt olika typer av yttre faktorer som kan påverka stabilitet.

3.3.1 Släntstabilitet cirkulärcylindriska glidytor

Odränerat tillstånd

För skred som sker i odränerade tillstånd, beräknas säkerhetsfaktorn utifrån totalspänning och bygger på momentjämnvikt (Knappett & Craig, 2012). I sådana fall kan glidytan antas vara cirkulärcylindrisk vilket innebär att den kan beskrivas som en cirkelbåge med centrum och radie. Stabiliteten bestäms av förhållandet mellan pådrivande och mothållande moment kring rotationscentrum. Det destabiliserande momentet orsakas av skredkroppens egenvikt, vilket innebär att tyngdkraften har stor påverkan på om ett skred utlöses, medan det mothållande momentet baseras på jordens odränerade skjuvhållfasthet. Se figur 10.



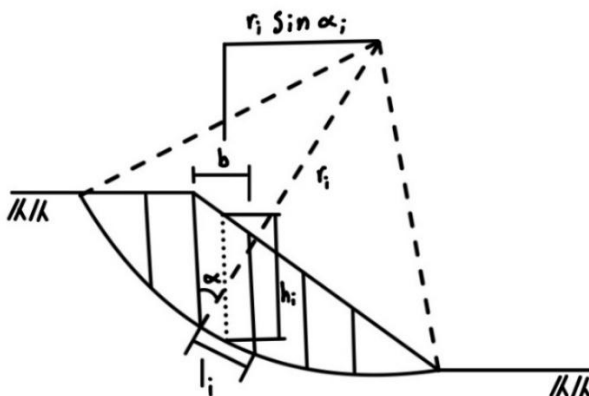
Figur 10. Visualisering av slänters pådrivande och mothållande krafter för cirkulärcylindrisk glidyta (ritad av författare).

Om det pådrivande momentet (M_R) är större än det stabiliserande momentet (M_A) innebär det att ett skred kan inträffa, vilket motsvarar en säkerhetsfaktor (SF) mindre än ett. Om SF i stället är större än ett, anses slänten vara stabil och där ett högre värde på SF indikerar en ökad stabilitet. Säkerhetsfaktorn för cirkulär cylindriska glidytor i odränerat tillstånd kan uttryckas enligt ekvation 4.

$$SF = \frac{M_R}{M_A} = \frac{c_u * r^2 * \theta}{W * d} \quad \text{Ekv.4}$$

Dränerat tillstånd

I dränerade förhållanden beräknas säkerhetsfaktorn på samma sätt som i det odränerade fallet, där utgångspunkten ligger i förhållandet mellan pådrivande och stabiliserande moment. För att kunna beräkna fram säkerhetsfaktorn delas skredkroppen upp i vertikala skivor, där varje skiva bidrar med pådrivande och stabiliserande krafter och säkerhetsfaktorn antas vara samma för varje skiva. Där beror det pådrivande momentet av skivans egentvängd, medan det mothållande momentet baseras på varje skivas tillgängliga skjuvhållfasthet längs glidytan. Se figur 11.



Figur 11. Skivindelning och variabler för beräkning av säkerhetsfaktor i dränerat tillstånd (ritad av författare).

Beräkning av säkerhetsfaktorn i dränerat tillstånd utförs enligt ekvation 5.

$$SF = \frac{\sum_i \tau_{f_i} * l_i}{\sum_i W_i * \sin \alpha_i} \quad \text{Ekv.5}$$

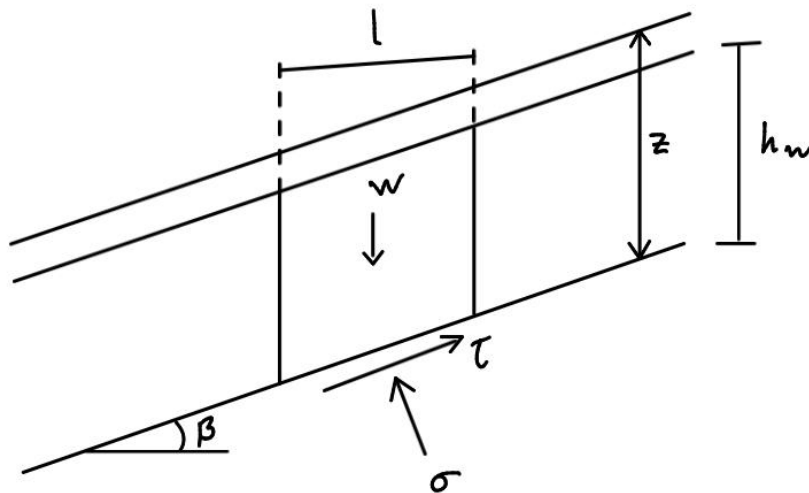
3.3.2 Släntstabilitet plana glidytor

Vid de förhållanden där jordlagrens mäktighet är relativt liten jämfört med dess utsträckning kan upphov till plana glidytor uppstå (Sällfors, 2013). För plana glidytor i odränerat tillstånd beräknas säkerhetsfaktorn genom ekvation 6. För förtyglande visualisering av generella plana glidytor, se figur 12.

$$SF = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = \frac{c_u}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Ekv.6}$$

På motsvarande sätt som i det odränerade tillståndet kan plana glidytor uppstå i dränerade förhållanden. För plana glidytor i dränerat tillstånd beräknas säkerhetsfaktorn enligt ekvation 7.

$$SF = \frac{c'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma z - \gamma_w h_w}{\gamma z} * \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} \quad \text{Ekv.7}$$



Figur 12. Visualisering av plana glidytor (ritad av författare).

3.3.3 Brottmekanismer och glidytor

Utöver de förenklade fallen med cirkulär-cylindriska brottytor, har jordens placering mellan varandra en avgörande betydelse för stabilitet. Skiktning och svaghetsplan i jord kan styra vilken brottyta som blir den kritiska, vilket medför att dessa inte nödvändigtvis följer en cirkulär formation (SGI, 2007). I deponier där material ofta läggs i lager kan glidytor utvecklas längs dess gränsskikt mellan materialen och speciellt om lagren är parallella med släntens lutning.

3.3.4 Yttre faktorer som påverkar stabiliteten

Som nämnts ovan påverkas släntstabiliteten av bland annat av medelpunktsvinkeln, skjuvhållfasthet och tyngdkraft på skredkroppen. I många fall förekommer det dock andra faktorer som påverkar stabiliteten.

Påverkan av yttre laster

Vid beräkning av stabilitet måste yttre laster beaktas eftersom det bidrar till förändringar i jämviktstillståndet. En ökad belastning på slänten ger ett ökat bidrag av krafter som kan orsaka glidning och ökar således det drivande momentet. På motsvarande sätt påverkar en yttre last vid släntfoten stabiliteten av slänten, då den ökar det mothållande momentet och därigenom motverkar risken för skred (Sällfors, 2013).

Laster

Som nämnts tidigare påverkas släntstabiliteten av en pålagd last i närhet av släntkrön och släntfoten. Vid anläggning av deponier uppstår laster som måste beaktas, i form av arbetsmaskiner som belastar de deponerade massorna vid packning och utformning av konstruktionen (Knappett & Craig, 2012). Dessa maskiner utövar genom sin egentyngd ett visst tryck på slänten och medför en viss påverkan på släntens stabilitet.

Porvattentryck

Porvatten är vattnet som fyller de hålrum mellan jordkornen och beter sig antingen hydrostatiskt eller hydrodynamiskt (Sällfors, 2013). Då vattnet i jorden under grundvattenytan är statiskt råder hydrostatiskt porvattentryck. Om jorden dräneras eller det sker infiltration, börjar vattnet i marken att strömma och ett hydrodynamiskt tillstånd råder.

Som framgår av ekvation 3 innebär ett ökat porvattentryck en minskning av effektivspänningar, vilket beror på att vattnet trycker isär jordkornen. Eftersom effektivspänningen påverkar den dränerade skjuvhållfastheten i jorden leder det till minskad stabilitet. Enligt ekvation 1 påverkar inte effektivspänning den odränerade skjuvhållfastheten eftersom den endast utvärderas av den odränerade skjuvhållfastheten C_u .

En faktor som kan bidra till ett ökat porvattentryck är infiltration. När regn eller smältvatten infiltrerar marken ökar vattenmängden i jorden, vilket i sin tur leder till ökat porvattentryck och påverkar stabiliteten i slänten (Wang m.fl., 2024).

Olika jordarter är även olika känsliga för ett förändrat porvattentryck (Sveriges geologiska undersökning, u.å.). Jordar med låg permeabilitet har en större tendens till att långsamt absorbera och kvarhålla vatten, vilket leder till att vattenströmningen genom jorden sker långsamt. Vid vattenmättade förhållanden uppvisar dessa dock en reduktion i stabilitet. Exempelvis kan silt plötsligt börja flyta vid uppnådd vattenmättnadsgrad. Lera är en finkornig kohesionsjord med låg permeabilitet, vilket innebär att vattenupptaget sker långsamt. I takt med att vattenhalten ökar kan hållfastheten reduceras och således försämrast stabiliteten. En variant av lera är kvicklera med särskilda egenskaper. Trots att kvicklera är vattenmättad kan den uppvisa god stabilitet i ostörts tillstånd. Vid yttre påverkan i form av exempelvis vibrationer eller belastning, kan strukturen i kvickleran plötsligt kollapsa, vilket medför en kraftig reduktion i hållfasthet och materialet övergår till en mer flytande konsistens. Denna typ av lera förekommer främst i Västsverige. Mer permeabla jordarter har en högre genomsläpplighet, vilket innebär att vatten kan transporteras snabbare genom materialets porer. Detta medför att vatten som infiltrerat i jorden dräneras bort effektivare.

Genom kapillaritet kan jordar binda vatten i porstrukturen, vilket ökar portrycket i jorden (Larsson, 2008). I verkligheten innebär detta alltså att jordens skjuvhållfasthet påverkas negativt vid ökad nederbörd. När en jord är vattenmättad är porerna fyllda med vatten, vilket innebär att ytterligare vatten inte kan tas upp av jorden. Vattnet transporteras då förbi jordlagret som ytvatten i stället för att rinna genom jorden.

Vibration från packning och täktverksamhet

Både friktionsjord och kohesionsjord påverkas av vibrationer (Knappett & Craig, 2012). Friktionsjorden reagerar främst genom påskyndad sättning vilket kan leda till att marken blir ojämn beroende på lagerföljden. Vibrationspåverkan i kohesionsjord kan ge upphov till ett ökat portryck och därmed bidra till en reduktion av jordens hållfasthet. Vid packning påskyndas alltså sättningarna i friktionsjorden och kohesionsjorden.

3.4 Analysmetod

Vid stabilitetsberäkningar för såväl naturliga som konstruerade slänter används rekommenderade säkerhetsfaktorer för att avgöra om slänten kan anses tillräckligt stabil. För att fastställa ett lämpligt värde på SF behöver först släntens säkerhetsklass bestämmas. Klassificeringen av säkerhetsklass baseras på de konsekvenser ett eventuellt skred kan medföra, med avseende på personskador som på samhällsviktig infrastruktur (Trafikverket, 2014). Vid fastställd säkerhetsklass kan en säkerhetsfaktor väljas för att uppnå de krav som ställs för den aktuella säkerhetsklassen. Säkerhetsfaktorerna bestäms för olika typer av analysmetoder, såsom odränerad analys (F_c) samt dränerad eller kombinerad analys ($F_{c\phi}/F_{komb}$). Figur 13 och tabell 1 redogör för hur säkerhetsfaktorer kan fastställas.

	Utredningsnivå	Markanvändning			
		Nyexploatering		Befintlig bebyggelse och anläggning	Annan mark
		Nybyggnation (GK1 och GK3)	Planläggning		
Tillståndsbedömning	Översiktlig	Ej tillämpbar	Minst detaljerad utredning ska utföras.	$F_c > 2$ $F_{komb}, F_{c\phi} > 1,5$	$F_c > 2$ $F_{komb}, F_{c\phi} > 1,5$
	Detaljerad	$F_c \geq 1,7-1,5$ $F_{komb} \geq 1,5-1,4$ $F_{c\phi} \geq 1,3$ (sand)	$F_c \geq 1,7-1,5$ $F_{komb} \geq 1,5-1,4$ $F_{c\phi} \geq 1,3$ (sand)	$F_c \geq 1,7-1,5$ $F_{komb} \geq 1,5-1,3$ $F_{c\phi} \geq 1,3$ (sand)	$F_c > 1,6-1,4$ $F_{komb} > 1,4-1,3$ $F_{c\phi} > 1,3$ (sand)
	Fördjupad	$F_c \geq 1,5-1,4$ $F_{komb} \geq 1,4-1,3$ $F_{c\phi} \geq 1,3$ (sand)	$F_c \geq 1,5-1,4$ $F_{komb} \geq 1,4-1,3$ $F_{c\phi} \geq 1,3$ (sand)	$F_c \geq 1,4-1,3$ $F_{komb} \geq 1,3-1,2$ $F_{c\phi} \geq 1,3$ (sand) Under förutsättning att restriktioner införs.	$F_c > 1,3-1,2$ $F_{komb} > 1,2$ $F_{c\phi} > 1,2$ (sand)
Projektering		Dimensionering utförs enligt IEG (2008b)/Trafikverket (2022).	Beroende på utredningsnivå, F_c och F_{komb} enligt tabellvärde ovan	Stabilitetsförbättrande åtgärd enligt 5.3.2 alternativt IEG (2008b)/Trafikverket (2022).	

Figur 13. Vägledande tabell för val av säkerhetsfaktorer för deponin (SGI, 2023).

Tabell 1. Säkerhetsfaktorer enligt Trafikverket (2014).

Säkerhetsklass	Odränerad analys	Kombinerad eller dränerad analys
1	1,35	1,20
2	1,50	1,30
3	1,65	1,40

3.4.1 Dränerad analys

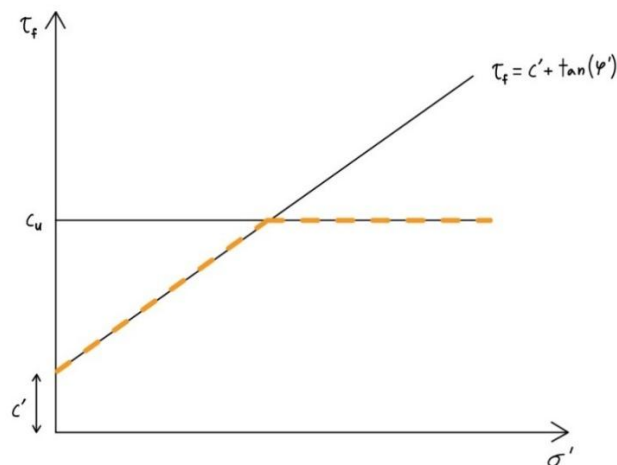
För friktionsjordar samt vid analys av långtidsstabilitet för kohesionsjordar utvärderas stabiliteten under dränerade förhållanden, där det för kohesionsjordar motiveras av en succesiv utjämning av portryck över tid och därmed når jämviktstillstånd (SGI, 2007). Figur 14 redogör för hur det dränerade förhållandet följer av ökande effektivspänningar.

3.4.2 Kombinerad analys

I de fall där det behöver fastställas huruvida det dränerade eller odränerade fallet är det styrande, kan en kombinerad analys utföras. För en kombinerad analys, vilket gäller för kohesionsjordar, utvärderas säkerhetsfaktorn för varje enskild del av glidytan där hänsyn tas till både dränerad och odränerad skjuvhållfasthet (SGI, 2023). Den av de med lägst säkerhetsfaktor blir således dimensionerande. I figur 14 utgör den orangea linjen de värden för skjuvhållfasthet som analysen utgår ifrån vid kombinerad analys. Vid låga effektivspänningar är de dränerande materialparametrarna styrande, medan de odränerade parametrarna blir dominerande med ökade effektivspänningar.

3.4.3 Odränerad analys

I de fall där släntens kortsiktiga stabilitet är av störst intresse kan en odränerad analys genomföras. Detta innebär att ingen portrycksutjämning i jorden har skett och kohesionsjordens hållfasthet uppför sig utifrån dess odränerade skjuvhållfasthet C_u (SGI, 2007). Figur 14 redovisar hur C_u har en konstant skjuvhållfasthet samt dess relation till det kombinerade och dränerade fallet.



Figur 14. Mohr-Coulombs brottkriteri för odränerad, dränerad och kombinerat fall (ritad av författare).

3.5 Beräkningsmodell LimitState:GEO

I detta kapitel beskrivs beräkningsmodellen LimitState:GEO fungerar, där lösning på optimeringsproblem genom DLO, beräkningsmetodik för säkerhetsfaktor, analysmetoder och hur modulerings av vatten i modellerna fungerar.

3.5.1 LimitState:GEO

LimitState:GEO är ett beräkningsverktyg som används för att analysera stabilitetsförhållanden i geotekniska problem och möjliggör modellering av varierande geometrier beroende på användarens krav och indata (LimitState, 2021). Genom användning av den numeriska analysmetoden *Discontinuity Layout Optimization* (DLO) diskritiseras jordmassan i noder och potentiella glidytor, varefter ett optimeringsproblem kan identifiera den kritiska brottmekanismen (Hawksbee m.fl., 2013). Metoden medför att några fördefinierade antaganden avseende geometrisk uppbyggnad inte behöver göras, eftersom ett stort antal potentiella glidytor beaktas. Detta möjliggör att analyser kan ske under komplexa geometriska förhållanden.

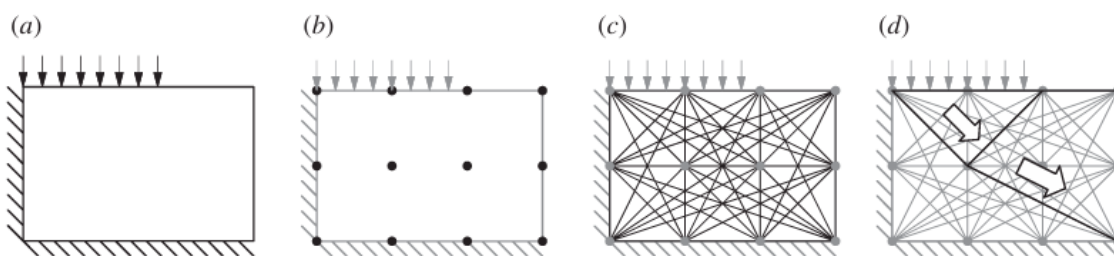
3.5.2 Discontinuity Layout Optimization (DLO)

Discontinuity layout optimization (DLO) är en numerisk gränslastanalys-metod som används för att bestämma den maximala last en kropp kan bära innan en kollaps inträffar (Hawksbee m.fl., 2013). Metoden används för att skapa plasticitetslösningar och dess tillhörande kollapsmekanismer.

Metoden bygger på att den kropp som skall studeras diskritiserar i noder som fördelas över dess yta. Noggrannheten i metoden styrs av antalet noder och dess rumsliga fördelning över ytan. Diskontinuitetslinjer mellan noderna etableras, vilka representerar potentiella glidytor. Till varje diskontinuitetslinje kopplas en variabel som beskriver den relativa förskjutningen för just den glidytan. För att identifiera den kritiska brottmekanismen formuleras ett optimeringsproblem där olika kombinationer av diskontinuiteter utvärderas. Kompatibiliteten i optimeringsproblemet säkerställs med en matris som, baserad på diskontinuiteternas riktningar, kopplar samman nodernas förskjutningar. Materialets plastiska beteende beaktas genom att diskontinuiteterna relateras till plastiska multiplikatorer, vilket säkerställer att flödessambandet uppfylls.

En målfunktion introduceras utifrån det arbetet som utförs i systemet, där både yttre laster och inre energiförluster inkluderas. Genom att lösa optimeringsproblemet kan lastfaktorn bestämmas, vilken motsvarar den mest kritiska händelsen.

Figur 15 illustrerar hur programmet löser optimeringsproblemet: a) den ursprungliga modellen, b) diskritisering av modellen med hjälp av noder, c) diskritiseringslinjer mellan dess noder som representation av potentiella glidytor, samt d) den mest kritiska diskontinuitetslinjen bestäms genom lösning av optimeringsproblemet.



Figur 15. Visualisering av lösningen för optimeringsproblemet med DLO (Hawksbee m.fl., 2013).

3.5.3 Beräkningsmetodik för säkerhetsfaktor i LimitState:GEO

Vid analys av stabilitet i LimitState:GEO används begreppet adequacy factor för att beskriva hur nära ett system befinner sig brott (LimitState LTD, 2021). För att kunna bestämma denna faktor måste modellen drivas till kollaps, vilket innebär att systemets bärförmåga succesivt närmar sin gräns tills jämvikt inte längre kan upprätthållas.

Detta kan i huvudsak göras på två olika sätt:

- Öka en befintlig last
- Reducera hållfastheten i jorden

Dessa två angreppssätt motsvara två olika definitioner av säkerhetsfaktorer som ofta förekommer inom geoteknik, där ena är en faktor baserad på belastning och den andra en faktor baserad på materialegenskaper. I LimitState:GEO behandlas dessa fall separat, vilket innebär att resultatet från respektive analys måste tolkas utifrån vald metod.

Adequacy factor anger hur mycket lasten behöver ökas vid oförändrad hållfasthet i jorden eller hur materialets hållfasthet behöver reduceras vid en oförändrad last för att kollaps ska inträffa. Inställningarna för hur programmet ska räkna görs i vad programmet kallar för scenario manager. Där kan partialkoefficienter antas som konventionella, alltså med värdet 1, men värden för partialkoefficienter kan också väljas utifrån Eurocode 7. Vid beräkning av säkerhetsfaktor för jordens hållfasthet divideras karaktäristiska värden med angivna partialkoefficienter i scenario manager. Ett beräknat värde på adequacy factor ≥ 1 innebär att konstruktionen kan anses som stabil under givna förutsättningar. Ett värde på adequacy factor < 1 indikerar i stället att systemet inte är stabilt.

Analysen kan enligt LimitState LTD (2021) också tolkas ur ett deformationsperspektiv. Programmet baseras på en rigid plastisk materialmodell, vilket innebär att inga deformationer uppstår så länge adequacy factor är större än ett. Om värdet däremot understiger ett, sker obegränsade deformationer. I praktiken följer det att deformationer sker succesivt och när faktorn närmar sig ett, antas en allt större andel av jordens hållfasthet mobiliseras.

LimitState:GEO har därför två typer av analysmetoder, säkerhetsfaktor för hållfasthet Factor strength(s) och säkerhetsfaktor med last Factor load(s). Säkerhetsfaktorn för hållfasthet besvarar frågan om hur mycket ett materials hållfasthet måste reduceras för att kollaps ska inträffa, medan säkerhetsfaktorn med last besvarar frågan om hur mycket lasten måste ökas för att kollapsa. I de fall där factor strength(s) används anses adequacy factor som en säkerhetsfaktor.

Programmet tillhandahåller fyra olika materialmodeller. En av dessa är Mohr Coulomb som beskrivits under kapitel 3.2.1 *Friktionsjord*. En annan modell är rigid, vilket innebär att den solid (volym) som ansätts, kommer ses som icke deformerbar och inga hållfasthetsvillkor tillämpas. Utöver dessa finns modellen cutoff och innebär att modellering kan ske med spännings eller tryckbrott. Den sista modellen som programmet tillhandahåller är engineered element och används i de tillfällen där spont eller jordspik behöver modelleras.

3.5.4 Analysmetod LimitState:GEO

Programvaran använder sig av två huvudsakliga analysmetoder, korttids- och långtidsanalys. Korttidsanalys representerar de odränerade förhållanden där C_u används, medan långtidsanalysen motsvarar dränerad analys där effektiva parametrarna C , σ' och φ' används.

3.5.5 Vattenyta och porttryck LimitState:GEO

LimitState:GEO har två möjliga sätt att inkludera vattentryck i analyserna. Detta görs antingen genom water tabel eller genom water regimes (LimitState LTD, 2021). För att beskriva vattentryck mellan de två olika metoderna använder programmet en prioriteringsordning för beräkningarna, där water regimes prioriteras framför water table.

Water table

En water table är ett enkelt sätt att beskriva vattentryck. Den definieras av en linje i modellen och ger en hydrostatisk tryckfördelning, där vattentrycket ökar linjärt mot djupet från 0 vid överkant vattenyta. Användningen av en water table ger en rimlig approximation av verkliga förhållanden utan att behöva modellera vattenflöden. Vattentrycket vid ett hydrostatiskt förhållande definieras enligt ekvation 8.

$$u = \gamma_w * d_w \quad [\text{Ekv.8}]$$

Water regimes

Vid mer avancerade eller lokala förändringar kan i stället en water regimes ansättas. Den appliceras på varje enskild solid i modellen, vilket möjliggör analys av lokala vattenförhållanden inom specifika delar av modellen. Det finns fyra olika typer av water regimes.

- Constant potential
- Constant pressure
- Interpolated grid
- Aquiclude

Constant potential beskriver precis som en water table ett hydrostatiskt tryck baserat på en angiven vattennivå och kan hantera negativa portryck. Den definieras enligt ekvation 9.

$$u = \gamma_w * (h - (y - y_0)) \quad [\text{Ekv.9}]$$

Constant pressure innebär att ett konstant tryck ansätts i hela området där det appliceras. Interpolated grid möjliggör en varierande tryckfördelning baserad på definierade punkter, varefter värden bestäms genom interpolering. Aquiclude används i de fall där täta modeller eller impermeabla zoner med noll portryck eller där tryckkontinuitet inte behöver uppfyllas.

4 Metod

Kapitlet redogör för de metoder som använts vid framtagning av grundvattenyta och materialegenskaper samt vilka antaganden som gjorts. Vidare beskrivs hur modellering och analyser av deponins deletapp har utförts.

4.1 Grundvattennivå

Bestämning av grundvattennivå har gjorts utifrån Sveriges geologiska undersöknings (SGU) kartvisare samt Swerock AB:s egna brunnar i anslutning till anläggningen. För att illustrera förhållandet mellan brunnarna har karta från lantmäteriet använts där brunnarnas koordinater legat till grund för positionerna utritade i figur 15 (Lantmäteriet, u.å.).

Värden för grundvattenyta hämtade från SGU:s brunnskarta är angivna i meter under markytan (SGU, u.å.-b). Brunnarna markeras med röda punkter i figur 16. Mätvärden för Swerock AB är endast angivna i nivåer och markeras i figur 16 med blåa punkter. För att ett representativt värde ska kunna användas beräknas vattenytan under markytan för brunnarna från Swerock AB. Brunnarna från Swerock AB har namngivits med SR N och SR S. Marknivå för SR N och SR S. Givna värden om marknivå och grundvattennivå redovisas i tabell 2.

Tabell 2. Brunnar inom områdets gränser med marknivå, grundvattennivå och djup under markytan. (A.Olofsson, Swerock AB, personlig kommunikation, 6 mars 2026).

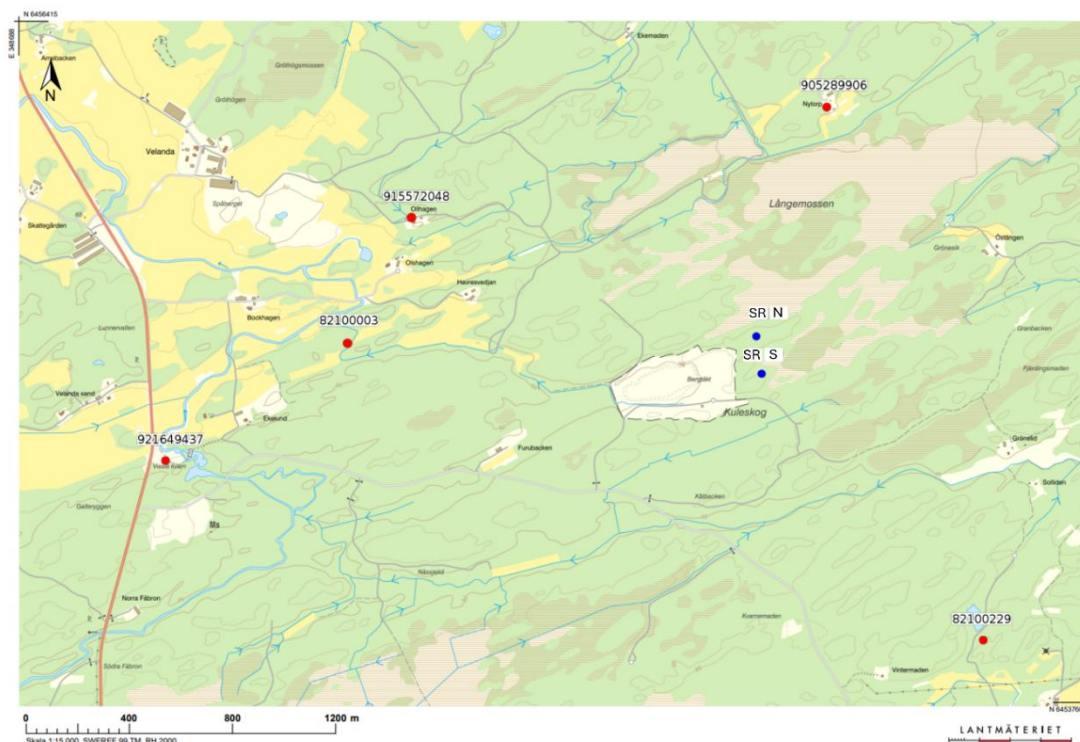
Brunn	Marknivå (m)	Grundvattennivå (m)	Djup till grundvattenyta (m under markytan)
SR N	84,1	78	6,1
SR S	81,4	74	7,4

Ett medelvärde har beräknats utifrån brunnarna markerade i figur 16 för området vid deponianläggningen. I området kring bergtäkten ligger grundvattenytan i snitt på ett djup av cirka 5 m under markytan och ger en nivå på cirka +70 m vid deletapp ett.

Höjdskillnaden inom området har en högsta marknivå i öst vilken uppgår till + 84,1 m och en lägsta marknivå på +75 m i väster, vilket leder till att ytvatten naturligt strömmar väster ut. Detta innebär att grundvatten och ytvatten kommer rinna mot deletapp ett då dess placering är i täktens västra del. Beräknade grundvattenytor under marknivå redovisas i tabell 3.

Tabell 3. Respektive brunnns grundvattenyta under marknivå.

Brunn	Meter under mark
82100003	5
82100229	6
905289906	2
915572048	4
921649437	5
SR N	6,1
SR S	7,4
Medelvärde	5



Figur 16. Brunnar använda vid framtagning av grundvattennivå i området kring deponianläggning (Lantmäteriet, u.å.).

Vid platsbesök gjordes observationer att inläckage av grundvatten är näst intill obefintliga då berget är av väldigt tät karaktär. Endast ytvatten rann in i täkten och som med hjälp av en pump länshålls från täkten. Med anledning av detta antas att någon grundvattenyta inte kommer förekomma i deletappens område.

4.2 Val av säkerhetsfaktor

En bedömning har gjorts utifrån Trafikverket (2014) och SGI (2023) att deponier är geokonstruktioner med krav på stabilitet enligt säkerhetsklass två med förutsättning att den ej är uppbyggd på kvicklera. I detta fall kommer deponin att anläggas på berg och kommer således följa bedömningen för deponin.

Valda säkerhetsfaktorer för odränerad samt dränerad analys har gjorts i samråd med Swerock AB om vilken säkerhetsfaktor de vill uppnå. Detta i kombination med information från Trafikverkets dokument tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13 (2014) samt SGI vägledning 8 (2023). Säkerhetsfaktorer som ska uppnås för deletappen presenteras i tabell 4.

Tabell 4. Säkerhetsfaktorer som ska uppfyllas för deletappen.

Säkerhetsklass	Odränerad	Dränerad
2	1,5	1,3

4.3 Val av materialparametrar

För att utföra en utredning om stabilitet för en deponi behöver antagande om materialets egenskaper göras. Antaganden kommer göras med försiktighet och vara konservativa för att inte överskatta stabiliteten i deponin. Detta med hänsyn till att täktverksamhet kommer fortgå under anläggandet av deponin, och dessutom för att deponin skall uppnå tillräcklig stabilitet för att förhindra ras eller skred som kan innebära risk för personskada vid arbete inom täkten. Det bedöms inte förekomma någon större risk utöver arbete i täktverksamheten.

I teorikapitlet har blött material florerat utan någon specifik definition. För att rimliga värden på materialegenskaper ska kunna tas fram, antas att blött material syftar till lera. I denna studie antas all lera vara blött material.

Antaganden gällande materialparametrarna görs med dokumenten Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13 och TK Geo 11. Dessutom har antaganden gjorts utifrån SGI (2008) i deras dokument Information 1 gällande lerans odränerade skjuvhållfasthet. Enligt Swerock AB ska den geologiska barriären bestå av stenmjöl med en permeabilitet på 10^{-8} m/s. För att fastställa rimliga antaganden om materialets hållfasthetsparametrar, har

information om genomsläpplighet från SGU (2024) använts för att identifiera en naturlig jordart som motsvarar permeabiliteten 10^{-8} m/s. Där framkommer det att jordarten siltig morän har en permeabilitet enligt ovan. Jordarten ligger till grund för antaganden av materialparametrar för den geologiska barriären utifrån TK Geo 13. De antagna materialparametrarna redovisas i tabell 5.

Tabell 5. Valda materialparametrar samt information om de olika jordmaterialen.

Jordtyp	Tunghet [kN/m ³]	Friktionsvinkel φ'	Skjuvhållfasthet $\tau_f / C_u / c'$ [kPa]	Kommentar
Sprängsten	$\gamma = 18$ $\gamma_{sat} = 20$	$\varphi' = 42^\circ$	$\tau_f = c + \sigma' * \tan \varphi'$	Material som antingen är deponeringsmaterial eller material från täktverksamheten som ej går att leverera till kund. Används i mothållande barriären.
Friktionsjord	$\gamma = 20$ $\gamma_{sat} = 21$	$\varphi' = 39^\circ$	$\tau_f = c + \sigma' * \tan \varphi'$	Material enligt figur 6.
Stenmjöl	$\gamma = 20$ $\gamma_{sat} = 21$	$\varphi' = 37^\circ$	$\tau_f = c + \sigma' * \tan \varphi'$	Kornstorlek 0–2 mm och permeabilitet på $8 \cdot 10^{-8}$ m/s. Används som material för den geologiska barriären i etappen.
Lera	$\gamma = 17$ $\gamma_{sat} = 17$	$\varphi' = 30^\circ$	$C_u = 12$ $C' = 0,1 \cdot C_u$	Material enligt figur 6.
Berg	-	-	-	Material för berg har i programmet ansatts som rigid, vilket innebär att inga glidytor kan skära genom soliden.

Tabell 6. Beskrivning av färgkoder i modellerna.

Typ av material	visualisering
Sprängsten	
Friktionsjord	
Geologisk barriär	
Lera	
Berg	
Vatten	

4.4 Volym och massa

Volymkapaciteten för deletappen beror på släntlutningen, area samt dess höjder. Arealen för deletappen har beräknats genom givna mått från flygbilder, se bilaga 1. I tabell 7 redovisas de uträknade volymsatserna för olika fyllnadsgrader, vilka representerar andelar av deletappens totala volymkapacitet som används för att möjliggöra jämförelser mellan de tre olika scenarierna.

Tabell 7. Volymkapaciteten i deletappen med intervall om 20 %. Hela deponins volym redovisas av 100%.

Procentandel	Volym	Enhet
20%	26 721	m ³
40%	53 443	m ³
60%	80 165	m ³
80%	106 887	m ³
100%	133 609	m ³

Omvandlingen från volym till massa har utförts med materialens densiteter vilka baseras på tungheterna enligt tabell 5. Densiteten har erhållits genom enhetsomvandling från kN/m³ till kg/m³. Densiteten användes för att beräkna mängden massa som varje scenario kommer medföra. Den framtagna massan utgör det centrala underlaget för den ekonomiska analysen, se tabell 8, eftersom intäkter och kostnader från deponimassorna baseras på mängden massa uttryckt i ton.

Tabell 8. Lerans, friktionsjordens och sprängstenens vikt i ton för scenarier med 20%, 40% respektive 60% lera. Även den totala vikten för deponimassorna redovisas.

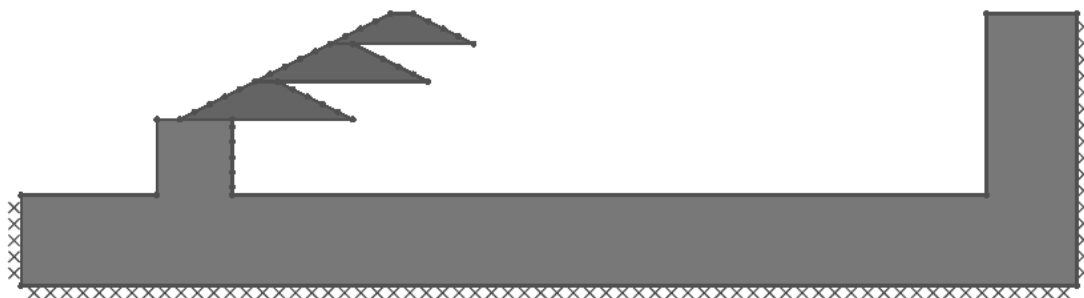
	Tunghet	g	Densitet	20 % lera	40 % lera	60 % lera
Enhet	kN/m ³	m/s ²	kg/m ³	ton	ton	ton
lera	17	9,81	1733	46 307	92 614	138 921
friktionsjord	20	9,81	2039	200 137	145 658	91 180
Sprängsten	18	9,81	1835	16 000	16 000	16 000
Total				262 444	254 272	246 100

4.5 Vald programvara

LimitState:GEO har valts som beräkningsverktyg på grund av dess förmåga att analysera stabilitetsproblem med hög noggrannhet vid komplexa geometriska förhållanden. Genom programmets användning av DLO sker en systematisk identifiering av kritiska brottmekanismer, där flertalet potentiella glidytor beaktas. Detta är fördelaktigt i projektet eftersom deponins geometri och jordfördelning varierar mellan scenarier och fall. Därmed möjliggör programmet en flexibel och realistisk modellering.

4.6 Utformning av modeller

Analyserna har gjorts med förenklade modeller över hur deponin i stort ser ut. Modelleringen har gjorts med hänsyn till att inga datapunkter över hur marken varierar längs väggar, mothållsvall och botten av deponin har framtagits. Detta innebär att endast helt plana ytor antagits, se figur 18. Om datapunkter över markens variation hade varit tillgänglig vid tidpunkten för studiens genomförande, hade en noggrannare modell kunnat upprättats. Eftersom täkten inte var fullt utskjuten på platsen vid studiens genomförande fanns dessa datapunkter ej tillgängliga. Modellerna är uppbyggda utifrån de mått som angavs i bilaga 1 samt nivåer som redovisas i tekniska beskrivningen (Swerock AB, 2024). Detta gäller utformning av täkten utan massor samt den geologiska barriären, eftersom placeringen sker utifrån de tänkta fallen som presenteras nedan. Utformningen av deletappen har frångått principskissen (i tekniska beskrivningen) om terrassering av avfallspallar, i syfte att undersöka stabiliteten vid en maximal mängd deponerade massor. För att fastställa en lutning på slänten genomfördes modellering och kort känslighetsanalys, där vinklarna 1:1,5 och 1:2 undersöktes i LimitState:GEO. Genom analysen konstaterades det att en konstant vinkel om 1:2 ansågs mest lämpad för slänten. Vid utformning av mothållande barriär har uppbyggnaden följt principen uppåtströmsmetoden vid anläggning av gruvdammar (Kossoff m.fl., 2014).



Figur 17. Principutformning av mothållande barriär där massor ska deponeras till höger i bilden (utformad av författare).

Den mothållande barriären består av tre parallelltrapetser. De två nedersta har en basbredd på 23 m och en höjd på 5 m, medan den översta har en basbredd på 19 m och en höjd på 4 m. För samtliga tre parallelltrapetser uppgår den övre bredden till 3 m.

Lagertjockleken i modellen har valts att variera för att illustrera att skillnader i materialegenskaper och variationer i inflödet av material kan medföra varierande lagertjocklekar. Placering av lera respektive friktionsjord har utformats i syfte att ge en bredare bild av möjliga utfall eftersom placeringen ej går att förutse. Detta med hänsyn till mängden material som kan tas emot. Som beskrivits i tabell 6 har färgkoder använts vid uppbyggandet av modellerna. Färgerna har i huvudsak gjorts med avsikt att efterlikna verklighetstroga förhållanden, med undantag av den geologiska barriären. Den har tilldelats en grön färg för att tydligt särskiljas från de andra materialen och påvisa att en geologisk barriär har anlagts. För att ge en större överblick av hur olika jordmaterial kan komma att placeras har tre olika fall per scenario studerats.

För att enkelt navigera bland scenarier och fall har ett beteckningssystem införts som beskriver lerans placering i uppbyggnaden.

A – Stabilitetsanpassad utformning

B – Närmast barriär

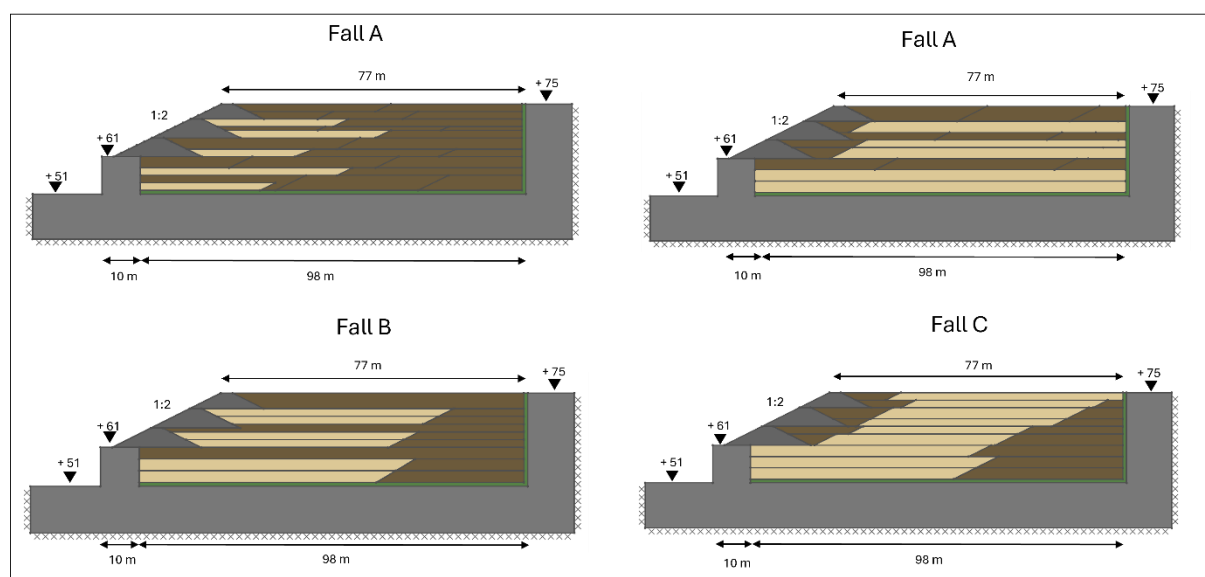
C – Diagonal utbredning i höjddled

Fall A har en varierande utformning där placeringen av leran i deletappen beror på vilket scenario som analyseras. Lera kan således förekomma intill mothållande barriär, i mitten av deletappen men så väl in mot bergväggen i väst. Placeringen varierar även i höjddled för att åstadkomma en uppbyggnad som klarar de föreskrivna säkerhetsfaktorerna. På så sätt är denna utformning stabilitetsanpassad.

Fall B analyserar hur stabiliteten i slänten påverkas då stora delar av leran placerats intill den mothållande barriären. Uppbyggnaden har valts att utföras för att illustrera problematiken som kan uppstå till följd av lerans låga hållfasthetsegenskaper, när bidraget från friktionsjordens stabiliserande egenskaper är begränsad.

Fall C har en utformning där leran staplats på höjd med viss förskjutning i sidled vilket skapar en formation liknande ett stående parallelogram. Modelluppbyggnaden har utformats för att

skapar förutsättningar som gynnar utvecklingen av kritiska glidytor. Detta med syftet att undersöka om en uppbyggnad som ger större möjlighet till utveckling av kritisk glidyta uppvisar högre känslighet för stabilitet.



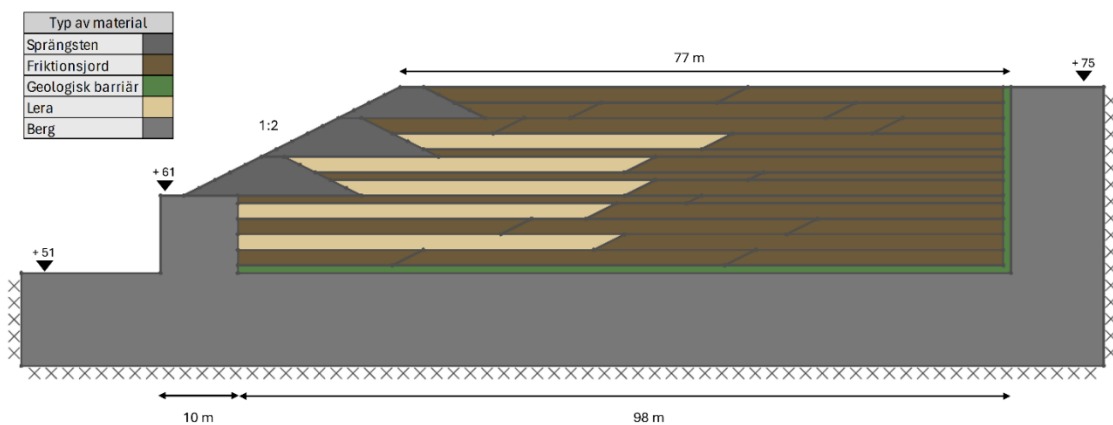
Figur 18. Illustration av de olika uppbyggnadsfallen. Två av fall A redovisas för att tydliggöra skillnaden mellan fall A och övriga scenarier (utformad av författare).

Varje scenario A-C följs av 20, 40 eller 60 som ändelse för att beskriva vilken procentandel lera som scenariot och fallet innehåller. Dessa fall betraktas som ideala eftersom ingen påverkan från vatten har inkluderats i analyserna. Eftersom ingen permanent grundvattenyta bedöms förekomma i deletappen undersöks i stället två olika vattennivåer för att analysera hur variationer i vattennivå påverkar släntens stabilitet.

Den första vattenanalysen har en vattennivå på +10 m från täktbotten ansatts, vilket motsvarar nivån där mothållsvallen upphör och sprängsten tar över som mothåll. Denna nivå valdes för att illustrera de effekter som kan uppstå vid övergången mellan det fasta berget och sprängstenen. Den andra vattennivå har ansatts till en nivå på +15 m från täktbotten och används för att analysera hur släntens stabilitet påverkas av en förhöjd vattennivå över mothållsvallens nivå. Även om dessa vattennivåer i deletappen inte bedöms som sannolika, på grund av länshållning som sker fram tills att hela deponin är färdigställd, är det relevant att analysera hur stabiliteten påverkas om en vattennivå etableras i takt med förändrat klimat.

I de fall där vattentryck har analyserats har fall B valts som scenario och representerar en översiktlig bild över responsen av vattnets inverkan på stabiliteten. I de fallen följer benämningen B-V10 och B-V15. Där B står för scenariot och följs av 20,40 eller 60 precis

som i de ideala fallen, V står för vatten och 10/15 står för vilken vattennivå i meter över täktbotten i deletappen som analysen har undersökt.



Figur 19. Exempelmodell baserad på modell B20 har använts som illustrationsfigur över deletappen, där längder, nivåer och lutning av slänt redovisas. Observera att de gråa linjerna är de avgränsningar som uppstår vid uppdelning av materialet i LimitState:GEO (utformad av författare).

4.6.1 Modeller utan vattentryck

Enligt Swerock AB (2024) kommer lakvatten ledas från deletappen och pumpas från deponin. Med anledning av det har ett idealiserat tillstånd för deletappen analyserats trots att det troligtvis inte kommer vara fallet i verkligheten. Analyser av ideala förhållanden har genomförts med avsikt att på ett tydligt sätt visa skillnaderna av stabilitet vid olika formationer av deponimassorna. Samtidigt har ideala förhållanden genomförts för att enkelt visa skillnaderna i säkerhetsfaktor vid påverkan av vatten.

4.6.2 Modeller med vattentryck

Vid analys med vattentrycket i deponin har ingen grundvattenyta modellerats då det antagits att en grundvattenyta i deponin inte är trolig. En water regime med inställning constant potential har använts för att representera vattennivåer som kan uppstå i botten av deletappen till följd av infiltration. Eftersom det underliggande berget antogs vara mycket tätt följer att vattnet har en begränsad förmåga att infiltrera i bergssprickor. Infiltrerat vatten i deponin kan således ansamlas ovanpå berget och bilda lokala vattennivåer. Antaganden för constant potential har gjorts där en vattenyta har ansatts till nivåer om +10 respektive +15 m från täktbotten. Water regimes placerades på varje enskild solid som modellerats till de två olika nivåerna från täktbotten.

4.7 Analysmetodik och beräkningsförutsättningar

Vid bestämning av säkerhetsfaktor för stabilitet av de tre olika scenarierna och fallen har både odränerad och dränerad analys tillämpats i enlighet med de krav Trafikverket (2014) ställer på geokonstruktioner. Enligt Trafikverket (2014) kan stabilitetsanalyser utföras med odränerad, kombinerad eller dränerad analys.

Av den anledning att programvaran inte tillhandahåller en kombinerad analys, har därför odränerad och dränerad analys genomförts. Det odränerade fallet har använts i syfte att kontrollera de kortsiktiga förhållandena i deponins slänt och bedöms vara mest relevant att undersöka då slänten inte utgör en permanent konstruktion. I de fall där stora delar av deletappen utgörs av friktionsjord utvärderas säkerhetsfaktorn mot dränerande hållfasthetsegenskaper i enlighet med kapitel 3.4.1 *Dränerad analys*. I de fall där etappen utgörs av mestadels kohesionsjord har dränerad analys också utförts för att kontrollera stabiliteten över tid.

Av analysmetoderna som presenteras under kapitel 3.5.3 *Beräkningsmetodik för säkerhetsfaktor i LimitState:GEO*, har endast adequacy factor med hänsyn till jordens hållfasthetsegenskaper studerats. Det har gjorts med anledning av att projektet syftar till att studera deletappen vid sluttäckning och fortsatt drift av täkt och deponi. Detta medför att inga direkta laster kommer att befinna sig på släntkrönet utan det är jordens hållfasthet som dominerar. För att studera förhållanden i modellen med hänsyn till jordens hållfasthetsegenskaper har beräkningsmetoden Factor strength(s) använts.

Enligt LimitState LTD (2021) behöver inga justeringar i programmet utföras inför beräkning av stabilitet, utan en säkerhetsfaktor kan direkt beräknas. Detta gör att inställningarna i scenario manager är oförändrade och partialkoefficienterna som programmet använder vid beräkning har ett ansatt värde av ett. Vid beräkning ger programvaran ett resultat motsvarande totalstabiliteten i deletappen. Vid analys har en noddensitet om 1000 noder tillämpats. LimitState:GEO är ett robust beräkningsverktyg men samtidigt känsligt för mindre förändringar i modellens geometri. Vid modifiering av solider uppstod i vissa fall ojämn fördelning av noderna över soliderna som bygger upp modellen eller längs dess randvillkor (boundaries). Detta genererade en lösning som angavs som unknown vid körning av programmet, alltså kunde ingen lösning erhållas. För att erhålla ett tillförlitligt resultat krävdes en manuell justering av nodfördelningen i dess x- och y koordinater.

5 Resultat

Kommande kapitel redovisar de resultat som erhållits från antagna parametrar samt modellering i LimitState:GEO av deletappen. Resultaten redovisas utifrån de tre studerade scenarierna med de tre tillhörande fallen A-C, inklusive analys av påverkan från vattennivåer om +10 respektive +15 m i deletappen från täktbotten.

Sammanställningen av resultaten har för stabilitetsanalysen gjorts i tabellform för att möjliggöra en tydlig jämförelse mellan scenarier och fall. Resultaten för stabiliteten har till varje scenario och fall en tillhörande bild vars glidyta schematiskt redovisas. Med hänsyn till det stora antalet figurer har dessa valts att placeras under *Modeller* där de vita linjerna representerar potentiella glidytor.

5.1 Släntlutning

En översiktlig känslighetsanalys för släntlutningen genomfördes med lutningarna 1:1,5 och 1:2. Resultaten dokumenterades inte kvantitativt utan analyserades och gav indikationer på att en flackare släntlutning gav generellt högre säkerhetsfaktor. Utifrån den relativt stora skillnaden i säkerhetsfaktor, på cirka 0,2 – 0,5 mellan lutning 1:1,5 och 1:2, resulterade det i att en släntlutning på 1:2 valdes för att genomföra analyserna. Detta eftersom en brantare lutning bedömdes ge för dålig stabilitet.

5.2 Släntstabilitet

Tabellen nedan redovisar resultatet av släntstabiliteten som genomfördes med hjälp av datorprogrammet LimitState:GEO.

Tabell 9. Redovisar resultaten av säkerhetsfaktorer för varje enskilt scenario och fall. Dessa med avseende på andel lera, fall och vatten. Den gröna texten redovisar värden som är godkända och den röda texten redovisar värden som är underkända.

Scenario 20% Lera	Säkerhetsfaktor		Scenario 40% Lera	Säkerhetsfaktor		Scenario 60% Lera	Säkerhetsfaktor	
Uppbyggnad	Odränerad	Dränerad	Uppbyggnad	Odränerad	Dränerad	Uppbyggnad	Odränerad	Dränerad
A20	1,578	1,842	A40	1,866	1,838	A60	1,637	1,842
B20	0,8628	1,842	B40	1,043	1,87	B60	0,8106	1,842
C20	1,839	1,839	C40	1,71	1,859	C60	0,5628	1,838
Scenario 20% Lera	Säkerhetsfaktor		Scenario 40% Lera	Säkerhetsfaktor		Scenario 60% Lera	Säkerhetsfaktor	
Uppbyggnad	Odränerad	Dränerad	Uppbyggnad	Odränerad	Dränerad	Uppbyggnad	Odränerad	Dränerad
B20-V10	0,8618	1,842	B40-V10	1,042	1,838	B60-V10	0,811	1,842
B20-V15	0,8618	1,729	B40-V15	0,9867	1,759	B60-V15	0,7988	1,712

Resultatet i tabell 9 visar att samtliga analyserade fall i det dränerade tillståndet, utan hänsyn till vattnets inverkan, överstiger den angivna säkerhetsfaktorn på 1,3. På motsvarande sätt gäller det för odränerade fallet, men med undantag för fallen B20, B40, B60 och C60, där säkerhetsfaktorn inte överskrider det föreskrivna värdet om 1,5.

Vid analyser inkluderande vattnets inverkan konstateras, i likhet med de ideala fallen, att de dränerade säkerhetsfaktorena överstiger det ansatta värdet av 1,3. I det odränerade fallet underskrider dock alla säkerhetsfaktorn på 1,5.

Resultatet visar också att den största säkerhetsfaktorn för ideala förhållanden erhålls i analys B40 dränerat fall, se bilaga 14, med en säkerhetsfaktor på 1,87. Den lägsta erhållna säkerhetsfaktorn återfinns i analysförsök C60 odränerat fall, se bilaga 31, med en säkerhetsfaktor på 0,5628.

Med inverkan av vatten erhålls den lägsta säkerhetsfaktorn i försök B60-V15 med en säkerhetsfaktor på 0,7988, se bilaga 29. Dess högsta säkerhetsfaktor erhålls i både B20-V10 och i B60-V10 med säkerhetsfaktorn 1,842, se bilagorna 6 och 26.

6 Diskussion

För att erhålla en djupare förståelse i vad resultaten säger, presenteras i följande kapitel en diskussion där olika perspektiv och tolkningar belyses. Här behandlas de geotekniska och ekonomiska aspekter separat för att tydliggöra respektive analysområde, vartefter sambandet mellan de diskuteras.

6.1 Släntlutningsanalys

Som framgår av resultatet för släntlutning valdes en flackare lutning för slänten innan analyserna med lutningen 1:2. Känslighetsanalysen påvisade relativt stora variationer i säkerhetsfaktor mellan de analyserade släntlutningarna (1:1,5 och 1:2), där skillnad uppgick till cirka 0,2 – 0,5 i säkerhetsfaktor för både odränerade och dränerade förhållanden.

Den observerade minskningen av säkerhetsfaktorn vid brantare lutning är rimlig och förväntad. Vid en brantare släntlutning medför att materialet närmar sig sin kritiska friktionsvinkel, vilket reducerar stabiliteten och ökar skredrisken.

Med utgångspunkt från teorin om släntstabilitet för cirkulär cylindriska glidytor, kan radien och vinkeln som spänner över glidyten variera. Troligtvis sker denna förändring inte i så stor omfattning att det stabiliserande momentet ökar proportionellt mot det pådrivande momentet.

Resultaten för säkerhetsfaktorerna indikerar att en flackare släntlutning än 1:2 kan vara nödvändig vid lerhalt över 40 %, vilket även framgår från den översiktliga känslighetsanalysen. En annan åtgärd kan vara att öka den mothållande barriärens tjocklek. Det skulle resultera i ett större upptag av de tryckkrafter som leran och friktionsjorden mobiliserar mot mothållet. Detta medför i praktiken ett ökat behov och mottagande av sprängsten, vilket inte alltid är optimalt då materialet har goda tekniska egenskaper och kan vara mer lämpat för andra, mer kritiska konstruktioner som kan göra mer nytta i samhället. Om extern tillgång på sprängsten är otillräcklig måste material tas från den egna täktverksamheten, vilket riskerar att leda till en försämrad lönsamhet i verksamheten.

6.2 Släntstabilitet

För att skapa en djupare förståelse för de erhållna resultaten behandlar detta kapitel såväl de ideala förhållandena som vattnets inverkan på stabiliteten, och en diskussion om eventuella åtgärder som kan behöva vidtas.

6.2.1 Ideala förhållanden

I fall B ligger stora delar av leran i direkt anslutning till mothållet. Att säkerhetsfaktorerna i ideala förhållanden är betydligt lägre i de analyserna, beror troligtvis på lerans låga odränerade hållfasthetsegenskaper. Detta visar att placeringen av lösare massor har stor betydelse för deponins stabilitet. Jämförelsevis med fall A där även friktionsjord är placerad mellan leran och barriären, ger det resultatet en märkbart större säkerhetsfaktor i alla scenarier. Detta beror högst troligt på att friktionsjorden, med sin tyngd och friktionsvinkel, bidrar med ett extra lager mothåll när glidytan bildas i leran. Undantaget blir fall A i scenariot med 20 % lera. Eftersom leran utgör en begränsad andel av den totala vikten, kan den placeras i anslutning till barriären. Dock i fall B20 där leran ligger hela vägen upp till krönet på den nedersta parallelltrapetsen av sprängstenen, erhålls en låg säkerhetsfaktor vid odränerad analys. Detta beror på att det bildas en svag zon, vilket försämrar stabiliteten och resulterar i en markant lägre säkerhetsfaktor för fall B20 jämfört med A20 och C20 i de odränerade analyserna. Se bilaga 3, 5 och 11 för fall A20, B20 respektive C20. Generellt bedöms placeringen av leran ha en mindre påverkan på stabiliteten i scenariot med 20 % lera.

I fall C40 erhöles en högre säkerhetsfaktor i odränerad analys jämfört med B40 eftersom glidytan utvecklas i mothållsvallen som utgörs av fast berg, se bilaga 21 respektive 15. Glidytan går in i mothållsvallen eftersom leran redan är utformad i en bågform som sträcker sig ned till mothållsvallen. Eftersom leran är det materialet med sämst beskaffenhet, följer den kritiska glidytan lerans form då all lera ligger i ett stort lager. Därav förs glidytan ner mot mothållsvallen. Precis som i scenariot med 20 % lera, följer att säkerhetsfaktorn i fall A och C vid 40 % lera överstiger de föreskrivna säkerhetsfaktorerna, och bedöms således vara stabila. Se bilagorna 13 och 21.

Resultaten visar att andelen lera endast förändrar säkerhetsfaktorn drastiskt i scenariot med 60 % lera i odränerat tillstånd. Alltså går det att anta att en lerandel över 40 % påverkar släntstabiliteten negativt i sådan utsträckning att det måste beaktas. Då varje scenario visar tydlig förändring i säkerhetsfaktor vid jämförelse av uppbyggnadssätten A, B och C leder

detta till ett konstaterande att uppbyggnadssättet är avgörande för stabiliteten. Tydligast blir det i scenariot med 60 % lera där säkerhetsfaktorerna är låga jämfört med resterande scenarier. Att placera leran som i fall B och C vid 60 % lera visar tydligt på låg säkerhet enligt tabell 9 och bilagorna 25 och 31, medan endast fall A uppnår godkänd säkerhetsfaktor. Eftersom endast ett av tre uppbyggnadssätt uppnår godkänd säkerhetsfaktor bedöms scenariot med 60 % lera inte vara optimalt att genomföra. Om deponin ska innehålla mer än 40 % lera bör uppbyggnadssättet särskilt beaktas, alternativt utformas på ett sätt som motsvarar fall A vid 60% lera eller kompletteras med en anpassad mothållande barriär. Se bilaga 23.

Resultaten visar tydligt att de dränerade fallen inte förändras avsevärt mycket beroende på scenario och fall av uppbyggnad. I bilagorna för de dränerade fallen syns det tydligt att alla glidytor går i den mothållande barriären. Detta visar att den stabiliserar friktionsjorden och leran i sådan omfattning att den kritiska glidytan bildas i utkanten av mothållet. Alltså är det lutningen i kombination med sprängstenens friktionsvinkel och effektivspänning som är de avgörande faktorerna för att glidytan utvecklas där. Spänningarna som verkar i det yttersta skiktet av mothållet är lägre relativt material längre in i slänten. Det betyder inte att mothållet är en svag länk utan endast det yttersta skiktet. Den verkliga hållfastheten vid packad sprängsten kan vara högre än vad modellerna visar, vilket beror på vilken packningsgrad som kan uppnås.

Generellt kan placeringen av leran ha stor inverkan på deponins stabilitet. Om deponin ska utformas på ett specifikt sätt gällande materialens hållfasthetsegenskaper, kan det leda till svårigheter eftersom materialet då måste läggas i en viss ordning. Det innebär att materialet kan behöva läggas på upplag. Där behöver det förvaras för att senare läggas ut på dess specifika plats. Alternativt kan avbrott i mottagning av material uppstå, då tillgången på specifika material inte alltid finns tillgängligt vid den tidpunkt då de behövs.

De materialparametrar som antagits i analyserna har en direkt inverkan på resultaten för släntstabiliteten. Som tidigare nämnts valdes konservativa parametrar för att inte överskatta hållfastheten. Detta med hänsyn till risk för personskador vid arbete i täktverksamheten som ska vara i drift parallellt med deponianläggningen. Resultaten visar också hur dessa parametrar påverkar stabiliteten utifrån placering och vilken analystyp som utförs. För friktionsjorden och sprängstenen där ingen kohesion antagits styrs skjuvhållfastheten av friktionsvinklarna 39° respektive 42° i kombination med effektivspänningar. Detta återspeglar hur stabila slänterna i deletapperna blir, vilket framgår tydligt i de dränerade analyserna där

säkerhetsfaktorerna är höga och relativt konstanta mellan de olika scenarierna och fallen. I de dränerade analyserna får lerans hållfasthetsparametrar, det vill säga kohesion och friktionsvinkel, en begränsad påverkan på resultatet eftersom den kritiska glidyten går i sprängstenen. Detta indikerar att liknande resultat troligtvis hade erhållits om leran inte inkluderats i modellen.

Även i vissa odränerade fall, såsom C20, A40, C40 och A60 som visas i bilagorna 11, 13, 21 och 23, kan det observeras att större mängder sprängsten och friktionsjord som placeras i eller nära slänten bidrar till en ökad säkerhetsfaktor. Resultaten är därmed i linje med teorin enligt Mohr Coulomb eftersom ett värde på friktionsvinkeln som närmar sig 45° ger ökad skjuvhållfasthet. Detta kan också kopplas till kornens förflyttningar, då en ökad packningsgrad begränsar kornens möjlighet att dilatera. Dock gäller denna packning endast för friktionsjorden och sprängstenen, eftersom packning av leran stör materialstrukturen ger det en kraftig reduktion av dess hållfasthet.

Enligt tabell 5 uppvisar leran de lägsta materialparametrarna i studien. Detta märks tydligt i resultatet då säkerhetsfaktorn minskar med en ökad andel lera i deponin. I de odränerade fallen styrs leran endast av dess odränerade skjuvhållfasthet, där ett lågt värde har valts på grund av att leran troligtvis är omrörd, alltså att dess naturliga stabila uppbyggnad har brutits ner, vid ankomst till deponianläggningen. Detta medför att leran bidrar med ett begränsat motstånd mot skjuvning och ger således en tydlig inverkan på stabiliteten. Observationer från bilagorna under rubriken *Modeller* visar att de kritiska glidyten i odränerad analys ofta sker genom leran, vilket bekräftar att dess låga hållfasthet bidrar till de svagaste zonerna i modellerna. Det är även förväntat utifrån vad teorin säger om odränerad analys, där endast odränerad skjuvhållfasthet beaktas. Utöver rotationsbrott kan även plana glidyten utvecklas till följd av att materialet deponeras i lager och särskilt när lagrens horisontella utbredning är stor i förhållande till dess mäktighet. För att minska risken för plana brott kan dränerande lager placeras ovan och under lerskikten för att förbättra avvattningen.

Som nämnt ovan kommer leran ha lägre hållfasthet när den ska deponeras jämfört med innan upptagning. Detta gäller även om leran ursprungligen uppvisar god beskaffenhet, samtidigt som variationer i hållfasthetsegenskaper förekommer inom upptagningsområdet. Baserat på SGI:s kartläggning av kvicklera och SGU:s jordartskarta bedöms området kring deponianläggningen ha goda förutsättningar för förekomst av både kvicklera och lera. I ett

större perspektiv förekommer förutsättningarna för kvicklera främst västerut om anläggningen, medan dessa succesivt avtar söder ut och öster ut. Detta indikerar att lera som tas emot för deponering bedöms kunna uppvisa varierande beskaffenheter. Vid mottagning av större mängder kvicklera kan ytterligare åtgärder krävas utöver de som tidigare nämnts, exempelvis celluppbyggnad, vilket kan öka både hanteringstid och hanteringskostnaden.

6.2.2 Vattnet inverkan på stabiliteten

Den lokala vattennivån i deletappen kan påverkas av exempelvis skyfall eller längre nederbördsperioder och är högst relevanta att undersöka, eftersom dessa förväntas förekomma mer frekvent i framtiden. Som nämnts tidigare ska vatten avlägsnas genom pumpning, men vid kraftiga nederbördsmönster finns emellertid en risk att pumpkapaciteten blir otillräcklig och infiltration kan resultera i en förhöjd vattennivå i deletappen.

För fallen där vattnets inverkan beaktas observeras inga betydande skillnader i resultatet av säkerhetsfaktorer i de odränerade analyserna. Detta är väntat eftersom glidyten i samtliga fall utvecklas i leran, där stabiliteten i odränerat tillstånd beräknas utifrån den odränerade skjuvhållfastheten C_u . Leran är redan i detta tillstånd vattenmättad, vilket innebär att porerna i leran är fyllda med vatten. Ytterligare vatten i deletappen påverkar därför inte leran. Därav erhålls ingen tydlig skillnad mellan ideala förhållanden, utan påverkan av vatten, och när vattnet beaktas. Utifrån analyserna i fall B, där analys med vatten har utförts, bedöms utfallet vara liknande för fall A och C när vattnets påverkan beaktas. En intressant observation är att fallen B20-V10 och B20-V15, se bilagorna 7 och 9, i odränerat tillstånd inte visar någon skillnad i säkerhetsfaktor. Detta innebär att de är lika ostabila och vattnet har ingen påverkan på stabilitet i dessa fall upp till 15 meter över täktbotten. Vid analysen beräknades båda fallen med samma noggrannhet i noddensitet, vilket resulterade i samma värde på säkerhetsfaktorn.

De dränerade fallen överstiger de föreskriva säkerhetsfaktorerna, men de påverkas negativt av en höjd vattennivå. Detta framgår av de mindre variationerna av säkerhetsfaktor för de tre fallen av en analys med en vattennivå på 15 m från täktbotten, jämfört med en vattennivå på 10 m från täktbotten. En höjd vattennivå medför ett ökat porvattentryck i jorden, vilket följer de hydrostatiska förhållanden som antagits vid användning av constant potential. Den observerade minskningen är därmed också i linje med Mohr-Coulombs brottkriterium. Vid utvärdering av B20-V15, B40-V15 och B60-V15 framgår det enligt bilagorna 8, 18 och 28 att placering av lera i direkt anslutning till mothållet inte medföra att glidyten bildas i leran.

Brottet sker enligt modellerna i det yttersta skiktet av mothållet. För de dränerade analyserna innebär det att glidytan med stor sannolikhet utvecklas i sprängstenen eller friktionsjorden i både fall A och fall C. Med utgångspunkt i att ett ökat porttryck leder till minskade effektivspänningar, är det ett rimligt antagande för båda fallen.

6.3 Ekonomi

Det är viktigt att understryka att värden som tillhandahållits, men som inte presenteras, av Swerock AB inte nödvändigtvis är uppgifter som överensstämmer med aktuella ekonomiska siffror för verksamheten. Värdena har enbart använts som underlag för att möjliggöra en översiktlig analys över hur olika ekonomiska utfall kan variera.

Vid analys av de givna värden gällande mottagningspris, hanteringskostnad, transportkostnad och tillägg blött material, framgår att lönsamheten påverkas i hög grad av relationen mellan hanteringskostnader och ersättning för blött material. Under förutsättningen att mottagningspriset hålls konstant genererar en lägre hanteringskostnad en högre marginal jämfört med en högre hanteringskostnad. Kostnaden för hantering är nära kopplad till materialets hanterbarhet. Ett material med mer komplexa geotekniska egenskaper, exempelvis kvicklera, kan kräva ökade resurser i form av maskinanvändning, arbetsinsats och anpassning vid utläggning av material, för att stabiliteten i deletappen inte ska försämrats. Detta innebär att ökade kostnader kan genereras eftersom fler eller mer omfattande åtgärder måste vidtas.

Ett sådant material kan eventuellt också ge ett tillägg som påverkar det ekonomiska resultatet. Det innebär att de ekonomiska utfallen som bedöms vara mest sannolika utgörs av högsta kostnad och högsta tillägg (HH) samt lägsta kostnad och lägsta tillägg (LL). I sådant fall utgör LL det mest ekonomiskt fördelaktiga utfallet. Detta kan förklaras av att den högre hanteringskostnaden i HH utgör en större negativ påverkan på marginalen än vad det högre tillägget kan kompensera för. I enskilda fall kan utfallet dock bli annorlunda om tillägget exempelvis blir högre samtidigt som hanteringskostnaden är oförändrad. Detta innebär att osäkerheter kring om och i vilken omfattning tillägg för lera erhålls medför en större risk i scenarier med större andel lera, då prissättningen förutsätter att ett visst tillägg erhålls om materialet klassas som blött. Om inget tillägg tillkommer är en lägre andel lera mer fördelaktig, då hanteringskostnader generellt blir lägre. Om ett tillägg däremot erhålls och kompenserar för de ökade kostnaderna, kan en högre andel lera i stället bidra till förbättrad lönsamhet. Lerans påverkan på resultatet beror till stor del av dess lägre densitet, vilket

medför en lägre intäkt och lägre lönsamhet eftersom mottagningspriset är per ton. Mot bakgrunden att densiteten för lera är mindre jämfört med friktionsjord och sprängsten, ger en högre andel av dessa en större intäkt förutsatt att inget tillägg för lera erhålls. Även om en ökad andel lera kan generera ett visst tillägg, begränsas den positiva effekten på intäkten. Detta beror av lerans lägre densitet jämfört med friktionsjord och sprängsten.

Transportkostnaderna påverkas av varierande körsträckor inom upptagningsområdet, där en längre körsträcka leder till ökade transportkostnader. Om en kund ska erbjudas samma pris för mottagning av material påverkar körsträckan marginalen. Således kommer mottagningspriset att behöva justeras efter transportkostnader för att möjliggöra en jämn prissättning.

Från ett ekonomiskt perspektiv leder en större andel lera till mer lönsamhet, utgående från att tillägg för blött material ges. I det resonemanget följer då att scenariot med 60 % lera är mest lönsamma av de tre scenerier studien analyserat. Om tillägget inte är tillgängligt bidrar dock mer lera till att den slutgiltiga vikten av massorna som deponeras blir lägre. Eftersom prissättning sker med avseende på vikt bidrar det till en sämre lönsamhet.

I scenariot med 20 % andel lera går det att konstatera att skillnaden i lönsamheten mellan fallen med och utan tillägg är relativt begränsad. Detta beror på att materialvolymen till största del, fyra femtedelar, utgörs av friktionsjord och sprängsten. Eftersom intäkt baseras på vikt innebär lerans lägre densitet att en andel om 20 % har begränsad påverkan på det ekonomiska utfallet. Tillägget för 20 % scenariot kommer således bidra marginellt till den totala intäkten, vilket resulterar i en mindre skillnad mellan fallen utan och med tillägg.

Vid ökande lerandel blir skillnaden mer tydlig, eftersom tilläggets betydelse ökar. Den ekonomiska risken ökar därmed i takt med att andelen lera ökar, eftersom lönsamheten i högre grad påverkas av vilket tillägg som kan erhållas för materialet. Scenariot med 40 % lera blir ett mellanting mellan 20 och 60 % ur ett rent ekonomiskt perspektiv. Ur ett geotekniskt perspektiv går det dock att se flera fördelar med denna andel lera, dessa diskuteras i kapitel *6.2 Släntstabilitet*.

Om det vid anläggningsskedet uppmärksammas svårigheter med lera som ska deponeras, kan kompletterande åtgärder utöver den mothållande barriären behöva vidtas. Detta för att möjliggöra deponering av större mängder lera utan att försämra stabiliteten. Åtgärder som uppehåll av utläggning av svårhanterliga material med avsikt att låta materialet torka ur, kan

leda till minskad produktionskapacitet och längre ledtider. Tiden det tar för materialet att torka tillräckligt är varierande. Detta medför i sin tur ökade kostnader. Med hänsyn till den tillståndsgivna tidsperioder som Swerock behöver förhålla sig till, medför även långa torktider att verksamheten riskerar att bli försenad. Eftersom det är ett avtalat tidsfönster, krävs det att tidplanen hålls alternativt att ett ändringsavtal förhandlas.

En ytterligare åtgärd som kan vara ett alternativ är inblandning av grövre material i leran. Inblandningen medför ökad dränering, vilket medför att effektivspänningarna i leran etableras i en snabbare takt. Detta kan innebära att material som företaget skulle kunnat sälja behöver användas, antingen genom jungfruligt material eller återvunnet material, vilket bidrar till en förlust av intäkter som kan komma att kompenseras av tillägg för blött material.

6.4 Förhållande mellan släntstabilitet, ekonomi och hållbarhet

Om det är möjligt ur ett geotekniskt perspektiv att ha en märkbart brantare lutning på slänten medför det att deponin kan rymma mer material i varje etapp. Det leder till att varje etapp framstår vara mer lönsam. Dock bör det uppmärksammas att i deponiverksamhetens slutskede kommer hela deponin vara fylld. Detta innebär att deponianläggningen ur ett bredare perspektiv endast kan ta emot en begränsad total materialvolym. Detta gör att släntlutningen i varje etapp inte påverkar slutgiltiga volymen i hela deponin.

Med en brantare lutning finns möjligheten att genomföra varje etapp med en större volym deponerat material. Dock är den årliga mottagningen av material för deponering begränsad till maximalt 200 000 ton per år. Om delettappen underskrider detta tak kan en brantare släntlutning möjliggöra att etappen färdigställs snabbare. Därav går det att påbörja nästa etapp så länge material finns och maxtalet inte överskrids. Detta bidrar till att marken kan återställas till dess ursprungliga nivå och funktion i ett tidigare skede, samtidigt som företaget kan påbörja nya projekt på andra orter snabbare.

Ur ett ekologiskt hållbarhetsperspektiv vore det förmånligt att spara material som är tillräckligt tekniskt lämpligt för att återanvända. Detta kan till exempel vara viss form av friktionsjord. Ur detta perspektiv kan en större andel lera vara fördelaktigt att deponera, då det möjliggör att tekniskt användbara material sparas för återanvändning, vilket bidrar till uppnådda hållbarhetsmål samt att riktlinjer enligt avfallstrappan uppnås. Om ett material är

tillräckligt bra för återanvändning är det oftast mer lönsamt att efter återvinningsförfarande, sälja det som byggmaterial eller återvinna det i andra projekt i stället för att deponera det.

Över tid kan det vara ekonomiskt lönsamt att satsa på att klara hållbarhetsmål då detta ofta bidrar till goda relationer med kunder. Om hållbarhetsmål är uppnådda eller ett visst projekt uppnår en viss grad av hållbarhet så kan detta leda till att en beställare, som exempelvis är statligt ägd, prioriterar vilket företag som ska utföra arbeten i framtiden. Därav kan ett hållbart arbetssätt i nutid bidra till möjligheter att få fler projekt i framtiden.

Även fast det är förmånligt med en ekologisk hållbarhet i kombination med att deponin ger god ekonomisk lönsamhet, så måste stabilitetsanalysen beaktas. Detta eftersom det ska bedrivas verksamhet i närhet av slänten och därav finns det risk för personskador vid ett eventuellt skred. Vid bedömning av hur mycket lera som kan tas emot för deponering måste alla dessa aspekter beaktas och utefter det behöver prioriteringar göras.

6.5 Studiens begränsningar och osäkerheter

Tillförlitligheten i resultaten påverkas av flera faktorer och är förknippade med vissa osäkerheter kopplad till metodval, modelluppbyggnad och indata. Dessa osäkerheter presenteras därför i detta kapitel.

6.5.1 Area och geometri

I släntstabilitetsberäkningarna finns det flera möjliga felkällor som kan påverka resultatet. Vid felaktig utmätning av geometrin medför det att modellen inte är tillräckligt bra anpassad för den verkliga geometrin. Detta är dock mindre troligt eftersom måtten är tagna från flygbilder som är gjorda med fotogeometri vilket leder till väldigt exakta mått. I bilaga 1, från vilken deletappens geometri har framtagits genom manuell inmatning av mått, upprättades innan den sista bergpallen hade sprängts bort.

Den manuella hämtningen av mått i kombination med att bergpallen fanns kvar vid tidpunkten för underlaget, bidrar till ytterligare osäkerheter i etappens geometri, särskilt med hänsyn till mothållsvallens exakta placering.

6.5.2 Antagna parametrar

Flera materialparametrar för jordar har antagits utifrån litteraturstudien snarare än faktiskt testade och uppmätta parametrar. Eftersom dessa parametrar inte nödvändigtvis motsvarar de förhållanden för den studerade platsen och dess massor, kan värdena avvika från verkliga förhållanden och påverkar således resultatets tillförlitlighet. Troligtvis kommer leror med sämre beskaffenheter deponeras än vad som antagits i studien. Speciellt i de händelser då kvicklera ska deponeras.

6.5.3 Modelluppbyggnad

Modellernas uppbyggnad i LimitState:GEO baseras på förenklade antaganden för att representera en möjlig övergripande bild av hur jordförhållandena i deponin kan komma att utformas. Eftersom ordningsföljden för hur jordmassorna kommer deponeras inte kan förutsägas med säkerhet, finns en osäkerhet kring hur väl modellerna representerar de faktiska förhållandena. Analyserna är utförda i ett tvärsnitt av deletappen och tar således endast hänsyn till tvådimensionella aspekter. Men i verkligheten följer tredimensionella förhållanden. Med anledning av detta finns begränsningar i hur väl säkerheten för hela deletappen kan bedömas, eftersom variationer i lageruppbyggnad kan förekomma i sidled.

Samtidigt bör det noteras att den porvattennivån som antagits i modellen sannolikt överskattar förhållandena i deletappen. Detta eftersom lakvattnet avleds från etappen och därefter pumpas från deponin.

Den kvarlämnade mothållsvallen utgör en viktig del av deletappens stabilitet. Eventuella sprickor i vallen, till följd av sprängning eller naturligt bildade, kan försämra dess mothållande funktion genom att skapa svaghetsplan i bergmassan. Därav bedöms sprängningens inverkan spela roll för vallens stabiliserande effekter. Bergmassans faktiska kvalitet och eventuella sprickor har inte analyserats djupare i denna studie, utan antagits vara intakt i släntstabilitetsanalyserna, och utgör därav en osäkerhet i resultaten.

6.5.4 LimitState:GEO

Vid beräkning i LimitState:GEO går det att ställa in utformningen av noderna i varje modell. I beräkningarna användes noddensitet 1000, men för att respektive modell skulle kunna generera resultat varierade avståndet mellan noderna något. Påverkan på den slutliga säkerhetsfaktorn är liten, men det kan förklara mindre skillnader i resultaten. Alltså ställer detta in hur exakt den beräknade säkerhetsfaktorn blir eftersom tätheten av noderna justeras. Det ger en noggrannare analys i vissa fall, men eftersom avståndet som användes endast varierar marginellt påverkas exaktheten i svaret. Detta kan exemplifieras i de dränerade tillstånden där glidyten i samtliga scenarier och fall utvecklas i den mothållande barriären. Trots att dess glidytor i stort sett har samma utformning, visar resultatet på små skillnader i säkerhetsfaktor. I scenariot 20 % lera skiljer det endast en tusendel mellan fall A och B mot Fall C. Vid 40 % lera skiljer det mellan fall A och B en tusendel medan mot fall C skiljer det en tiondel. I sista scenariot 60 % lera följer ett återkommande mönster som i scenariot med 20 % lera, men med en skillnad om två tusendelar. Trots denna marginella skillnad vid en noddensitet om 1000 noder, bedöms resultaten vara jämförbara.

Trots att programmet är gediget och kan genom diskretisering med noder analyser komplexa geometrier, finns det begränsningar även för programmet. Mothållsvallen som hjälper till att hålla emot schaktmassorna har troligtvis påverkat programmets förmåga att hitta en lösning till problemet. Detta kan ligga bakom att programmet ofta fick lösningen unknown, vilket resulterade i att nodfördelningen fick justeras manuellt.

6.6 Förslag på vidarestudier

Detta arbete har begränsats till utformning, andel blött material och stabilitet samt ekonomisk lönsamhet, vilket öppnar upp för ytterligare frågeställningar. Eftersom täktverksamhet kommer bedrivas i samband med att deletapperna i deponin genomförs, är det relevant att undersöka hur stor påverkan vibrationer har på slänten. Vid färdigställd deponi är det också relevant att undersöka hur sättningar kommer utvecklas i området med avseende på långsiktighet för bruk av mark. Slutligen föreslås att undersöka hur processen från planläggning till färdigställd deponi kan effektiviseras för framtid deponiverksamhet.

7 Slutsats

För att Swerock AB ska kunna genomföra deletapp ett i den befintliga täkten, krävs det en utformning som både uppfyller geotekniska stabilitetskrav och som ger en god lönsamhet. För att kunna avgöra detta har placering av schaktmassor, i kombination med olika lerhalter, analyserats för att undersöka hur stabiliteten påverkas. Utöver det har den ekonomiska lönsamheten studerats mellan olika fall och scenarier. Detta för att kunna avgöra vilket alternativ som är mest lämpligt att genomföra.

Genom mönstret som syns i resultatet går det att konstatera att en större andel lera leder till sämre släntstabilitet. Detta med reservation av att en viss andel lera måste uppnås för att säkerheten ska påverkas drastiskt. Utifrån genomförda analyser går det att konstatera att andelen lera påverkar stabiliteten och att 20–40 % lera är mest lämplig att genomföra vid odränerade förhållanden. Detta eftersom 60 % lera tydligt blir svårt att genomföra med avseende på släntstabilitet. Om högre säkerhetsfaktor eftersträvas bör friktionsjorden och leran inte uppvisa sämre beskaffenheter än de materialparametrar som antagits i denna studie.

Med utgångspunkt i stabilitetsanalyser från denna studie medför placering av blöta massor i nära anslutning till släntens mothållande barriär en drastisk försämring i stabilitet. Att lägga ut lera vid barriären är dock möjligt men bör begränsas till scenariot med 20 % lera och utformas på liknande sätt som A20. Utifrån resultaten går det att konstatera att det finns flera olika formationer som är möjliga. För 20–40 % scenarierna är de mest fördelaktiga utformningarna när en större andel friktionsjord placeras intill barriären, alternativt att leran är utformad på sådant sätt att glidyten förs ned i mothållsvallen och återspeglas i fall C. Generellt bör leran placeras närmre bergväggen i väst. Den utformning som bör undvikas följer uppbyggnad enligt fall B.

Resultatet visar att säkerhetsfaktorn minskar markant vid lerhalter över 40 %, vilket innebär att en flackare släntlutning och en tjockare mothållande barriär kan behövas för att uppnå tillräcklig stabilitet. Baserat på resultaten och den övergripande känslighetsanalysen bedöms en släntlutning om 1:2 vara lämplig för scenarier med 20–40 % lera.

Vid 20 % lera kommer skillnaden i lönsamheten, beroende på om tillägg ges eller inte, vara minst jämfört med de andra scenarierna som studeras. Det sker en mindre ökning av denna skillnad vid scenariot 40 % lera. Utifrån slutsatsen att scenarierna med 20–40 % lera utgör de

mest fördelaktiga alternativen med avseende på stabilitet, bedöms det att 40 % scenariot vara det mest lönsamma. Detta mot bakgrunden att ur ett miljö- och konstruktionsperspektiv är mer eftersträvarvärt att deponera material med sämre tekniska egenskaper. Vidare påverkas detta av tillgängligheten och tidpunkten för mottagningen av olika materialtyper. Detta i kombination med att vid 40 % lera kan en högre lönsamhet åstadkommas eftersom tillägg blött material blir större jämfört med 20 % scenariot.

Referenser

- Google Earth*. (u.å.). Hämtad 13 april 2026, från
https://earth.google.com/web/search/kobertg/@58.21674782,12.5144629,88.8042939a,38202.9672848d,35y,0h,0t,0r/data=CiwiJgokCbuc4vSof01AEaim_QQA-0xAGXqltoRF0S1AIUAX_haPUyZaQgIIAToDCgEwQgIIAEoICPfjzOoBEAA
- Hawksbee, S., Smith, C., & Gilbert, M. (2013). Application of discontinuity layout optimization to three-dimensional plasticity problems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 469(2155).
<https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0009>
- Knappett, J. A., & Craig, R. F. (2012). *Craig's Soil Mechanics* (8:e uppl.). Spon Press.
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229–245.
<https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2014.09.010>
- Lantmäteriet. (u.å.). *Min Karta*. Hämtad 07 mars 2026, från
<https://minkarta.lantmateriet.se/>
- Larsson, R. (1989). *Hållfasthet i friktionsjord*. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1299887&dswid=7631>
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. <https://swedgeo.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1299902&dswid=-7359>
- LimitState. (2021). *Product Description*. <https://www.limitstate.com/geo-documentation>
- LimitState LTD. (2021). *LimitState:GEO Manual*. <https://www.limitstate.com/geo-documentation>
- Länstyrelsen. (2025a). *Länsstyrelsen Västra Götaland Miljöprövningsdelegationen: Ändringstillstånd till avfallshantering*.
- Länstyrelsen. (2025b, april 17). *Skydda dricksvattnet - vårt viktigaste livsmedel*.
<https://gavso.se/>
- Naturvårdsverket. (2004, maj). *Deponering av avfall*. Naturvårdsverket.
www.naturvardsverket.se
- SFS 1999:381. (u.å.). *Lag (1999:381) om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor | Sveriges riksdag*. Försvarsdepartementet. Hämtad 18 maj 2026, från https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-1999381-om-atgarder-for-att-forebygga-och_sfs-1999-381/

SFS 2001:512. (u.å.). *Förordning om deponering av avfall*. Klimat- och näringslivsdepartementet. Hämtad 03 februari 2026, från https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2001512-om-deponering-av-avfall_sfs-2001-512/

SFS 2020:614. (u.å.). *Avfallsförordningen* (Klimat- och Näringslivsdepartementet). Klimat- och näringslivsdepartementet. Hämtad 03 februari 2026, från https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/avfallsforordning-2020614_sfs-2020-614/

SGI. (u.å.). *Kartläggning av kvicklera*. Hämtad 15 maj 2026, från https://gis.sgi.se/hajk/?m=metodik_kvicklera

SGI. (2007). *Deponiers stabilitet Vägledning för beräkning*. <https://swedgeo.diva-portal.org/smash/get/diva2:1299901/FULLTEXT01.pdf>

SGI. (2023). *SGI vägledning 8 Utredning av släntstabilitet utgåva 1*. <https://swedgeo.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1743423&dswid=-306>

SGU. (u.å.-a). *SGUs jordarts-kartvisare*. Hämtad 15 maj 2026, från <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-25-100.html>

SGU. (u.å.-b). *SGUs Kartvisare brunnar*. Hämtad 03 mars 2026, från <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar.html>

SGU. (2024). *Produkt: Genomsläpplighet Förändringsförteckning*. <https://api.sgu.se/oppnadata/genomslapplighet/ogc/features/v1>

Statens geotekniska institut (SGI). (2025, mars 14). *Ordlista*. <https://www.sgi.se/forskning-och-utveckling/ordlista>

Sveriges geologiska undersökning. (u.å.). *Skredkänslighet i olika jordarter*. Hämtad 17 februari 2026, från <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/skredkanslighet-i-olika-jordarter/>

Swerock AB. (2024). *Teknisk Beskrivning – Bilaga A*.

Sällfors, G. (2013). *Geoteknik* (5:e uppl.). Cremona.

Trafikverket. (2014). *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13* (2013:0667). <https://trvdokument.trafikverket.se/Default.aspx>

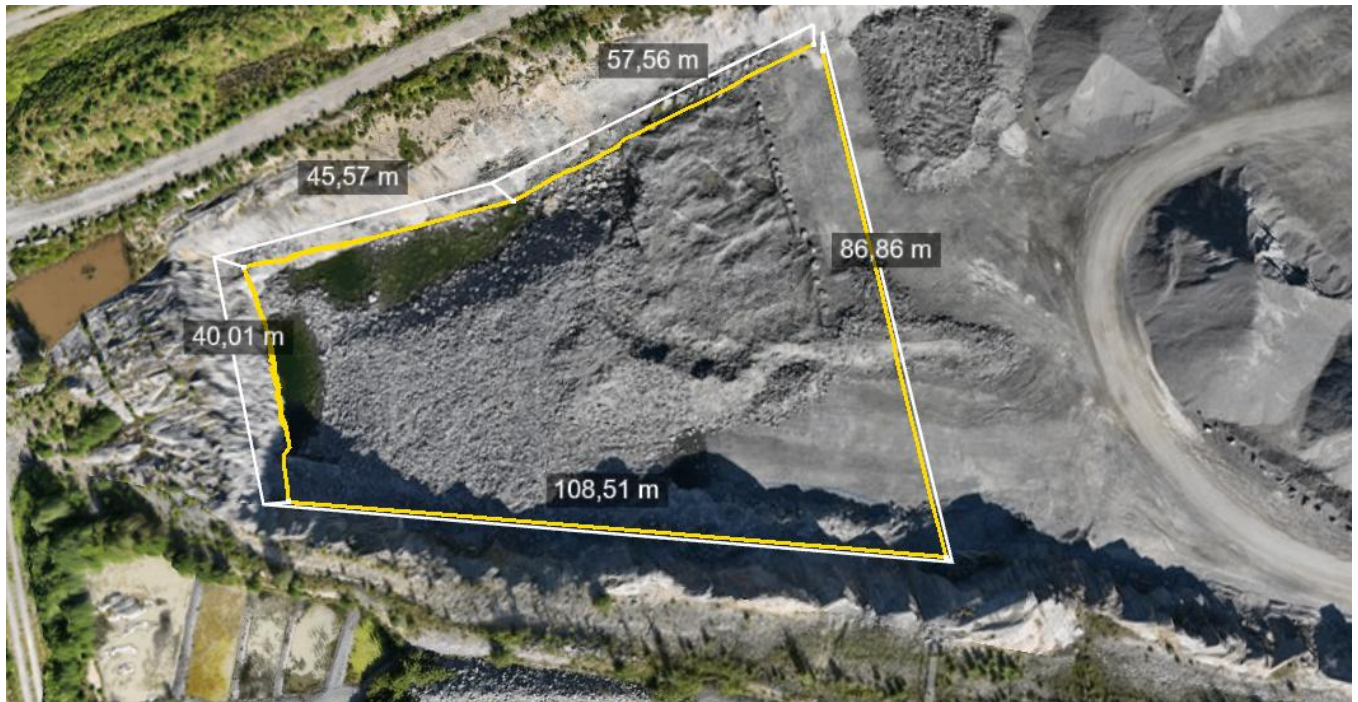
Transportstyrelsen. (2025, maj 23). *Tillåtet axel-, boggi- och trippelaxeltryck - Transportstyrelsen*. <https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/yrkestrafik/gods-och-buss/matt-och-vikt/viktbestammelser/tillatet-axel-boggi-och-trippelaxeltryck/>

Wang, J. H., Xu, W. J., & Liu, X. X. (2024). A slope stability analysis method considering the rainfall hydrology process. *Engineering Geology*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107775>

Bilagor

Kompletterande bilaga

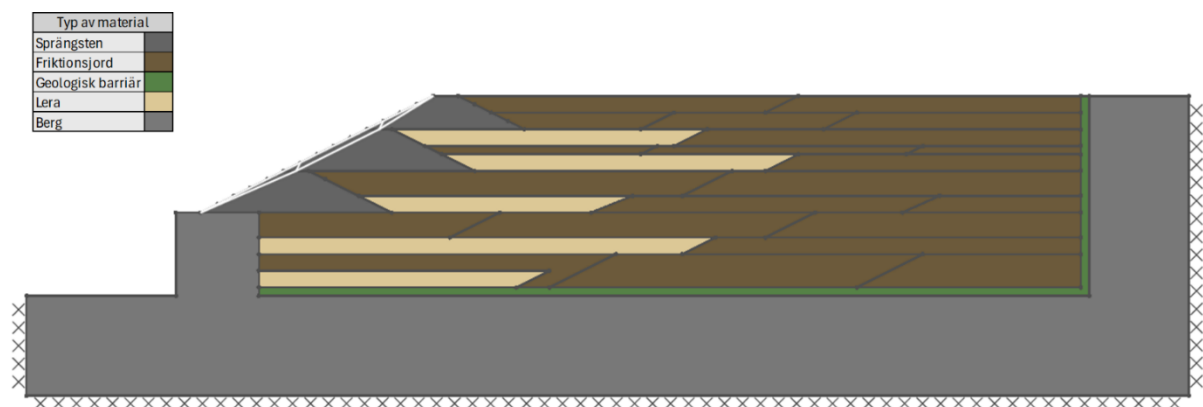
Bilaga 1



Figur 20. Flygfoto taget innan området var fullt utskjutet med måttangivelser över deletapp ett (F. Hegg, Swerock AB, personlig kommunikation, 1 april, 2026).

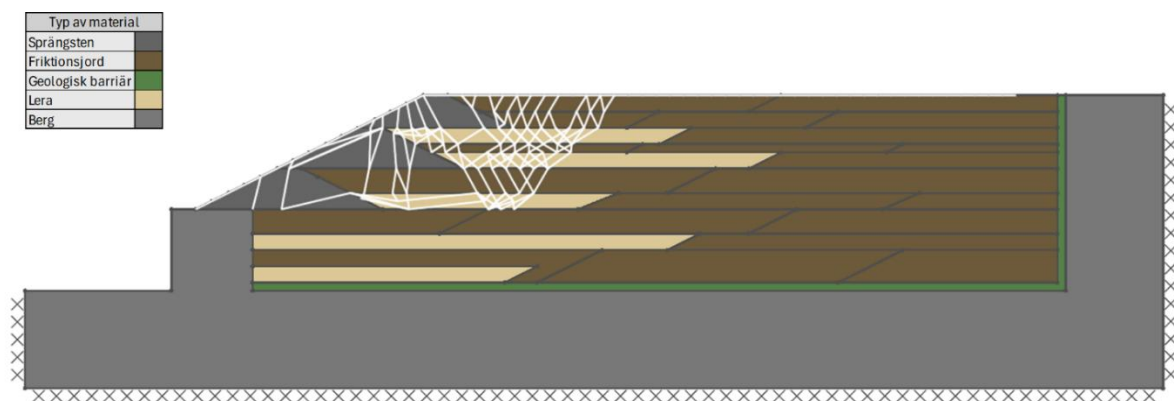
Modeller

Bilaga 2



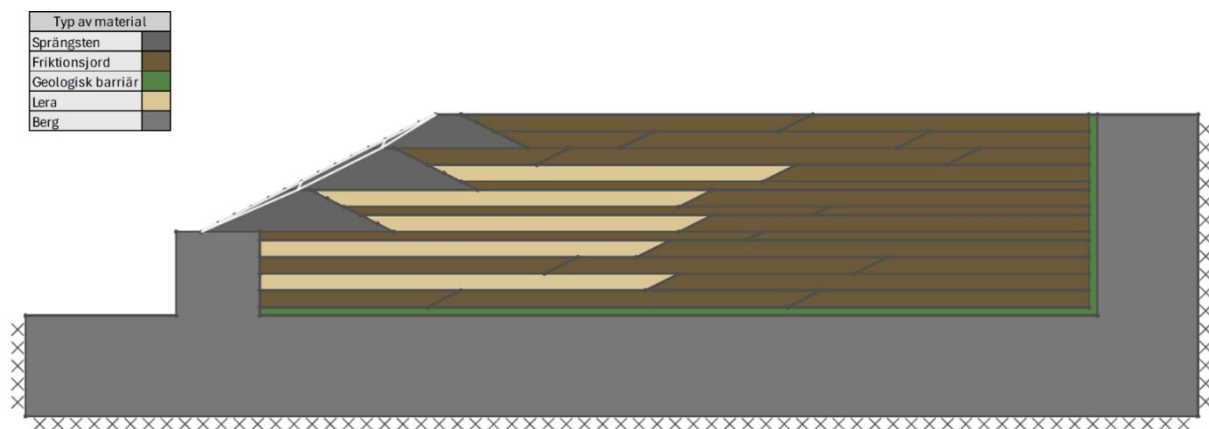
Figur 21. A20 dränerad analys. $SF=1,842$.

Bilaga 3



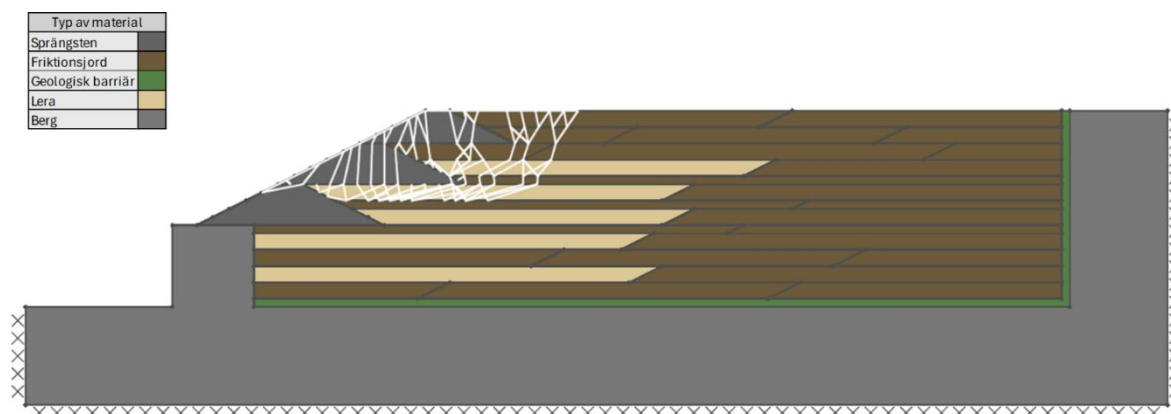
Figur 22. A20 odränerad analys. $SF=1,578$.

Bilaga 4



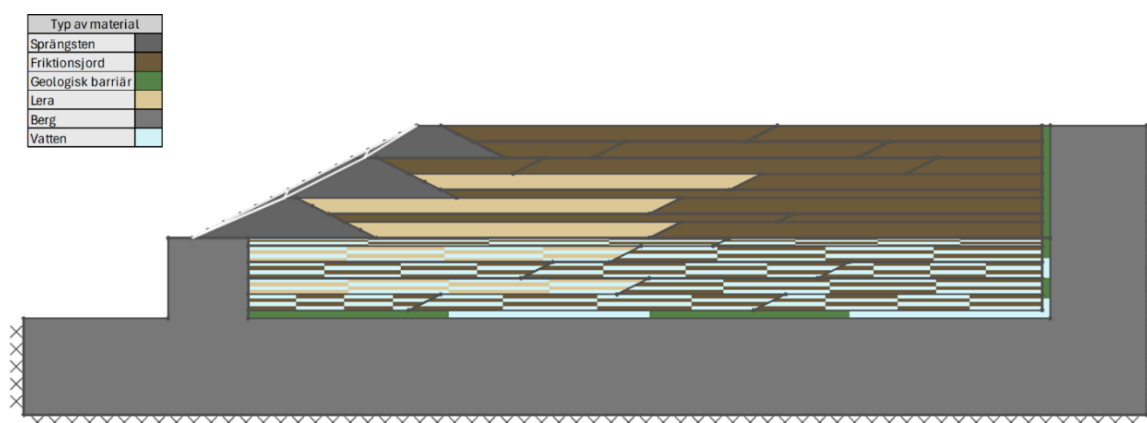
Figur 23. B20 dränerad analys. $SF=1,842$.

Bilaga 5



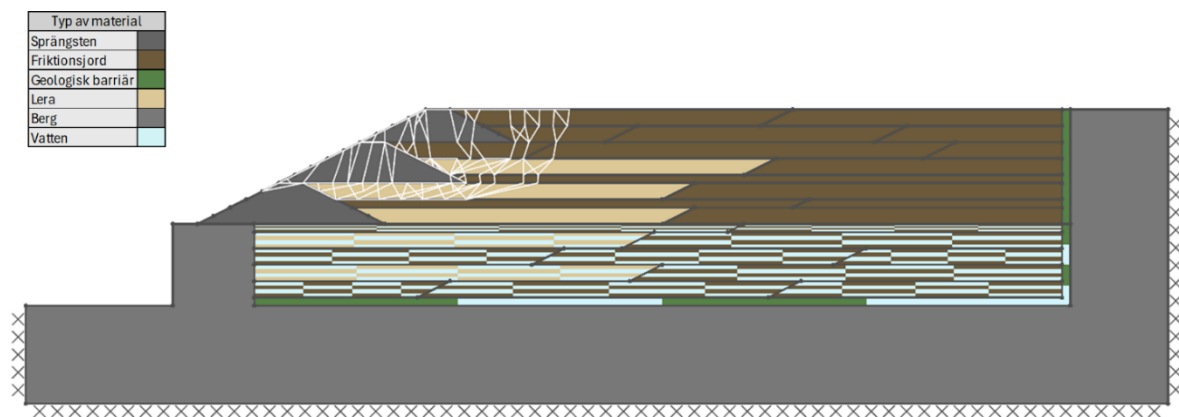
Figur 24. B20 odränerad analys. $SF=0,8628$.

Bilaga 6



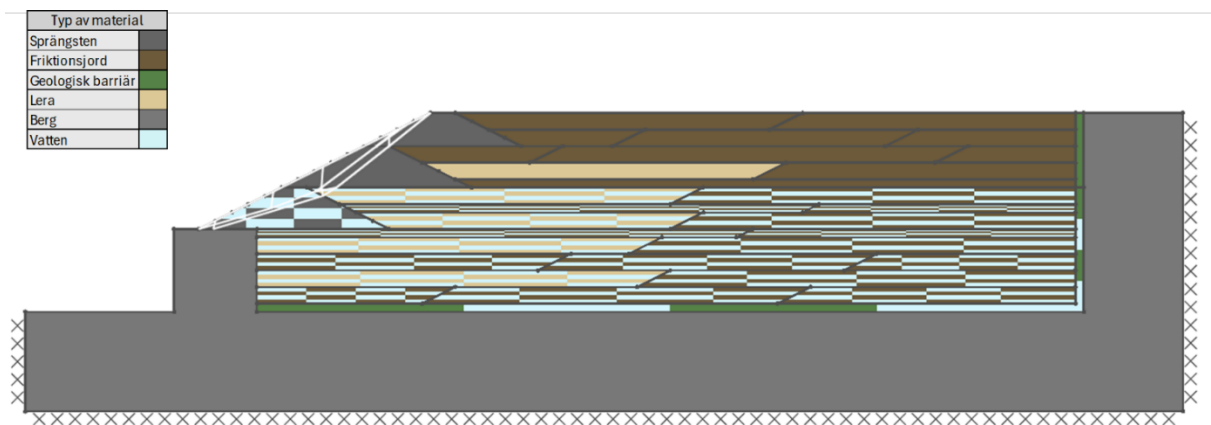
Figur 25. B20-V10 dränerad analys. $SF=1,842$.

Bilaga 7



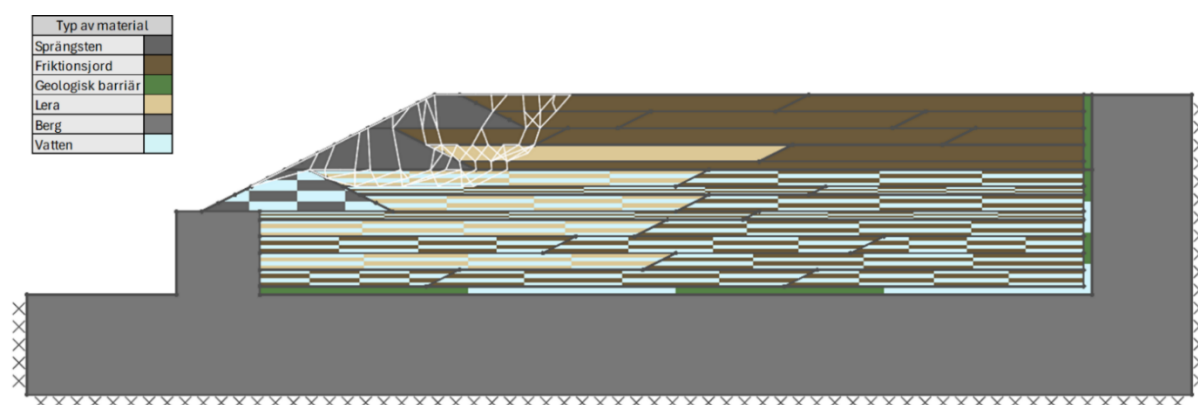
Figur 26. B20-V10 odränerad analys. $SF=0,8618$.

Bilaga 8



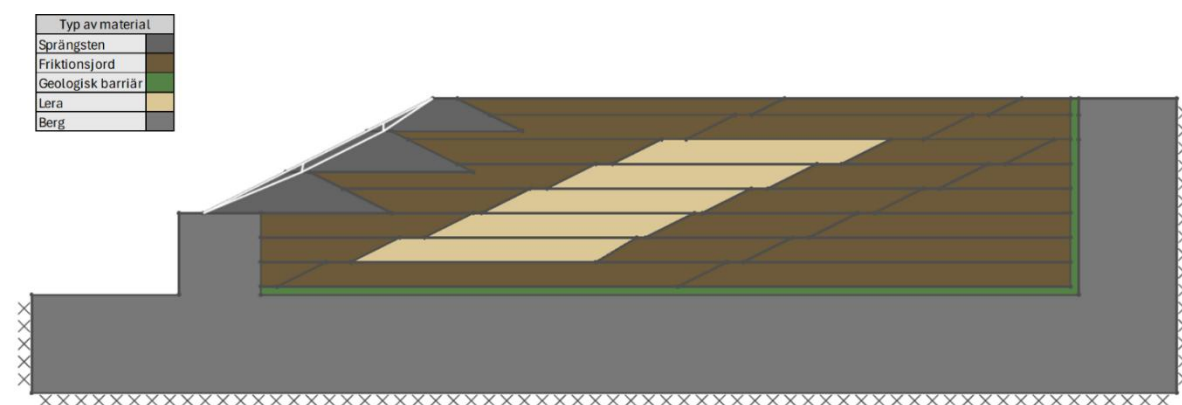
Figur 27. B20-V15 dränerad analys. $SF=1,729$.

Bilaga 9



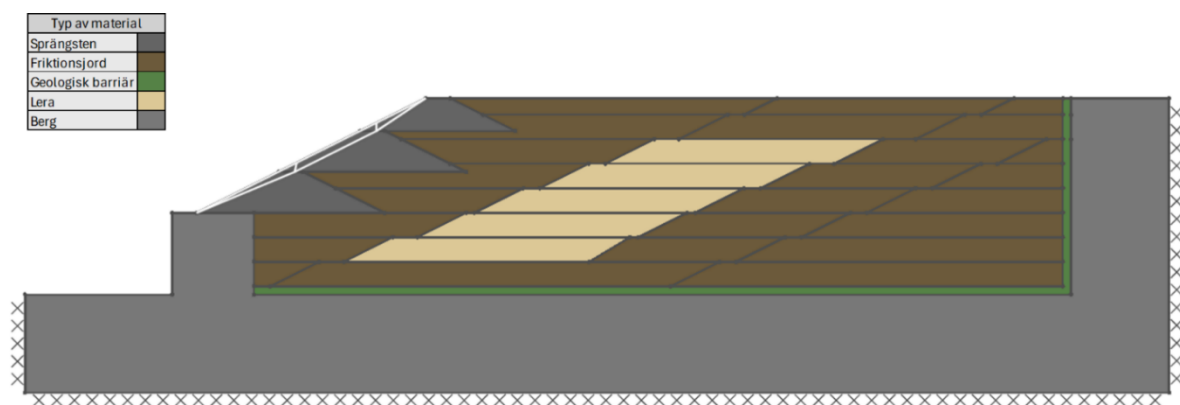
Figur 28. B20-V15 odränerad analys. $SF=0,8618$.

Bilaga 10



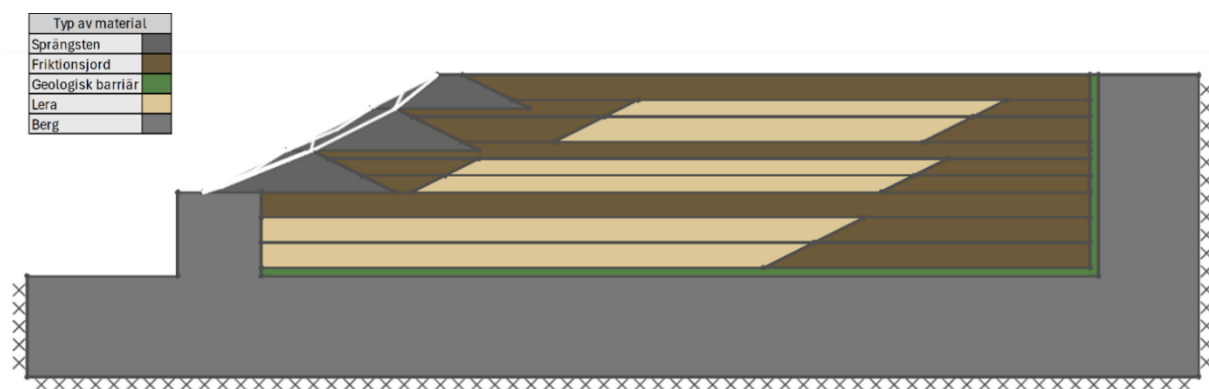
Figur 29. C20 dränerad analys. $SF=1,839$.

Bilaga 11



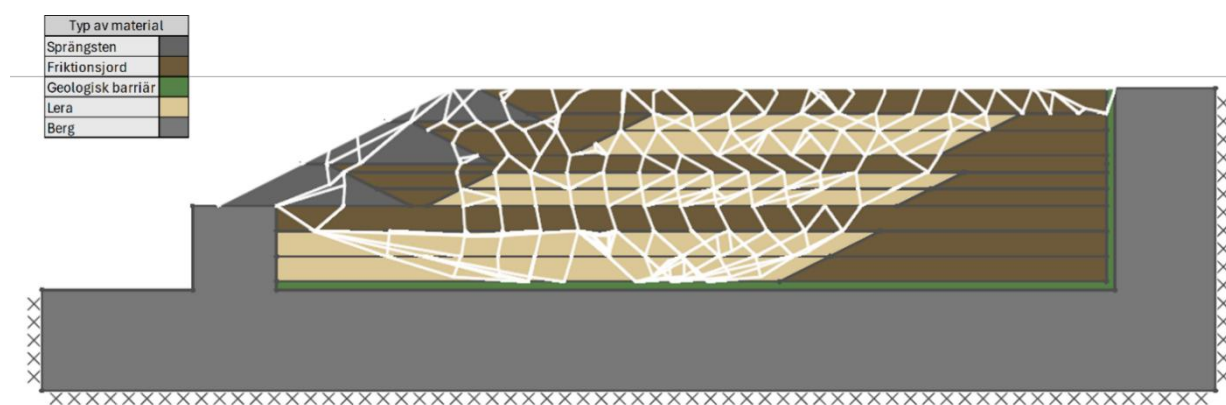
Figur 30. C20 odränerad analys. $SF=1,839$.

Bilaga 12



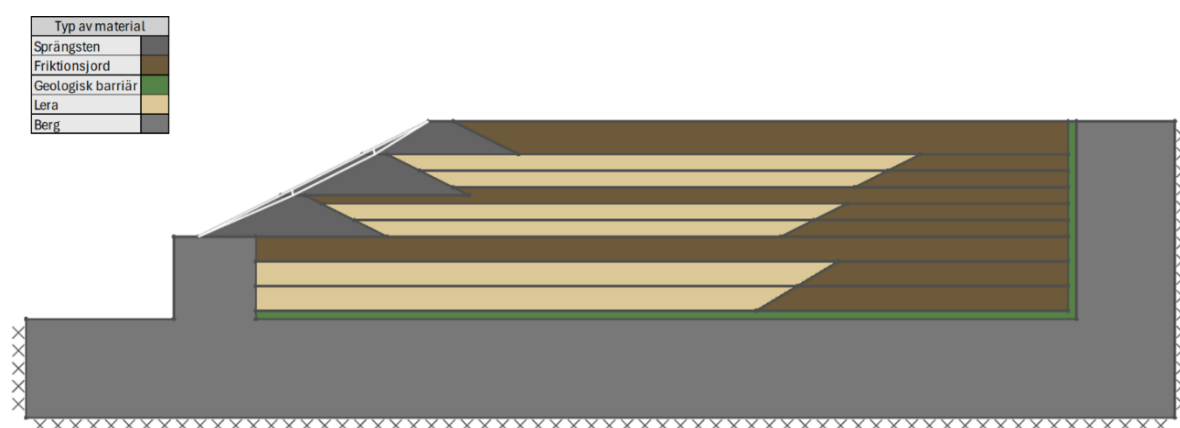
Figur 31. A40 dränerad analys. $SF=1,839$.

Bilaga 13



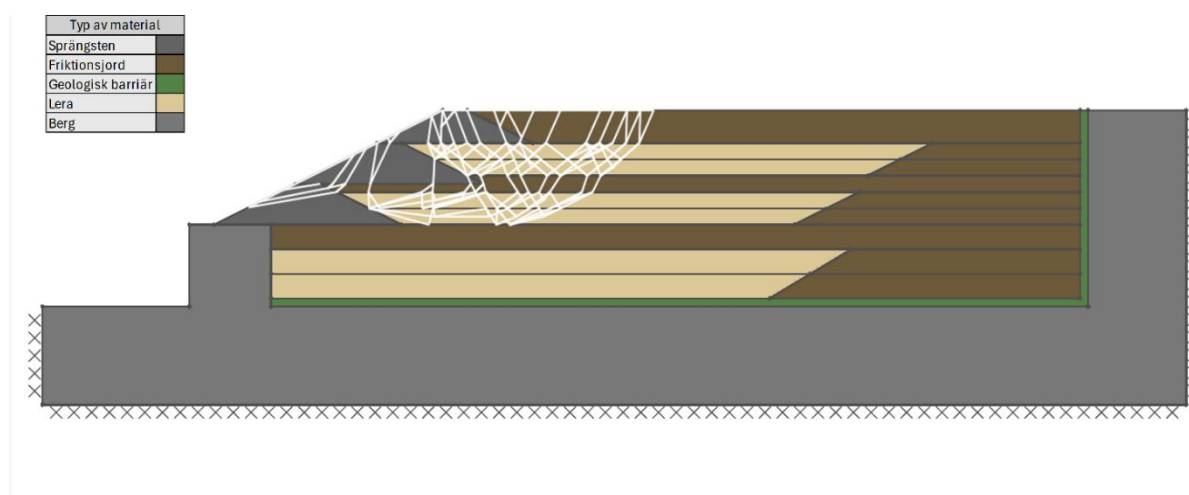
Figur 32. A40 odränerad analys. $SF=1,866$,

Bilaga 14



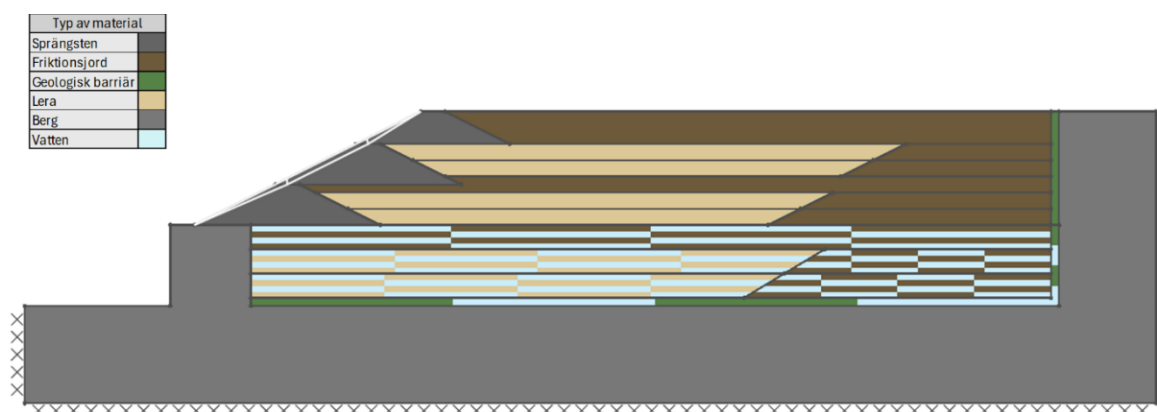
Figur 33. B40 dränerad analys. $SF=1,87$.

Bilaga 15



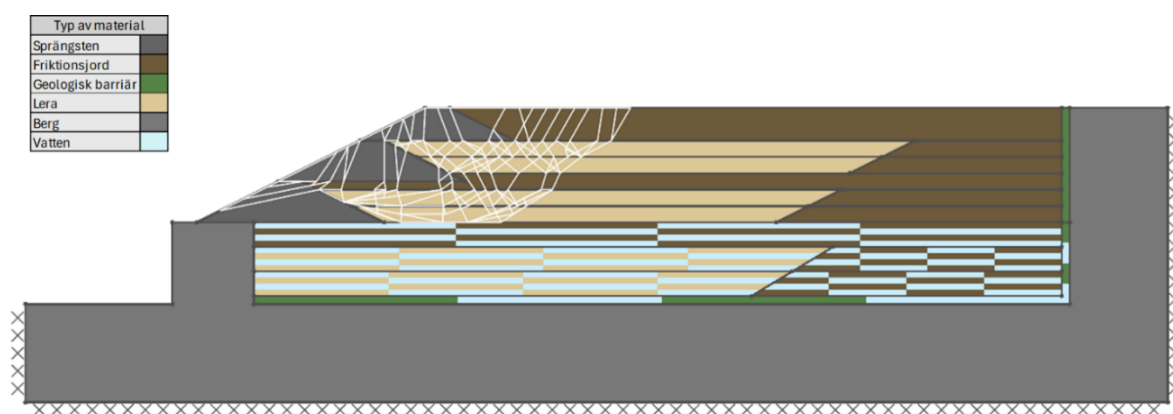
Figur 34. B40 odränerad analys. $SF=1,043$.

Bilaga 16



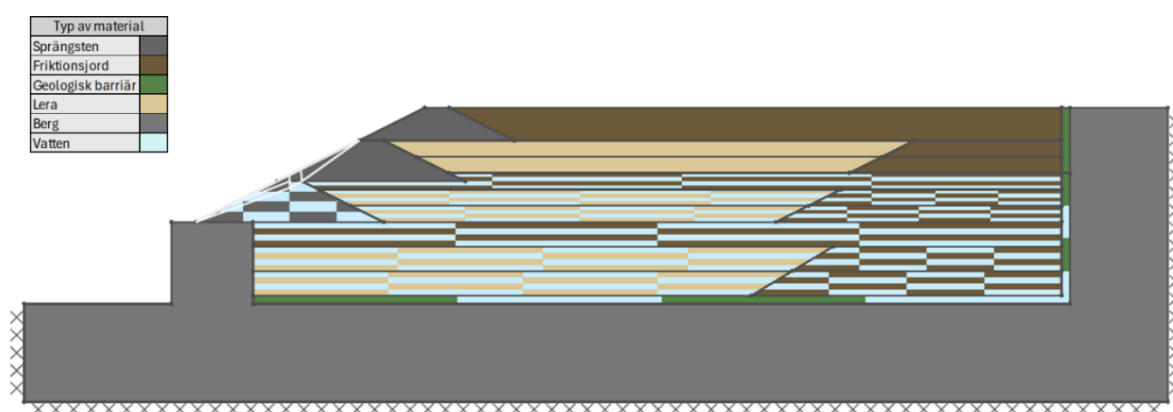
Figur 35. B40-V10 dränerad analys. $SF=1,838$.

Bilaga 17



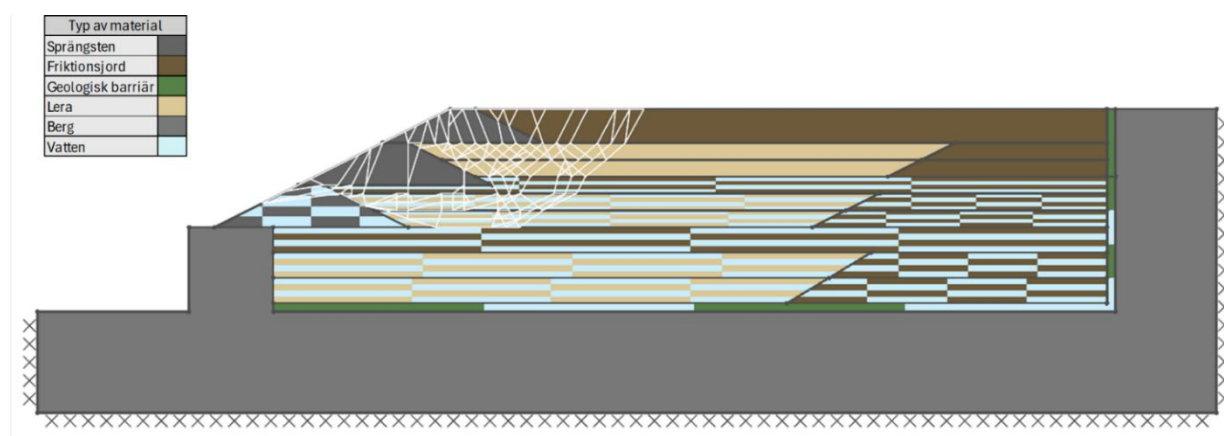
Figur 36. B40-V10 odränerad analys. $SF=1,042$.

Bilaga 18



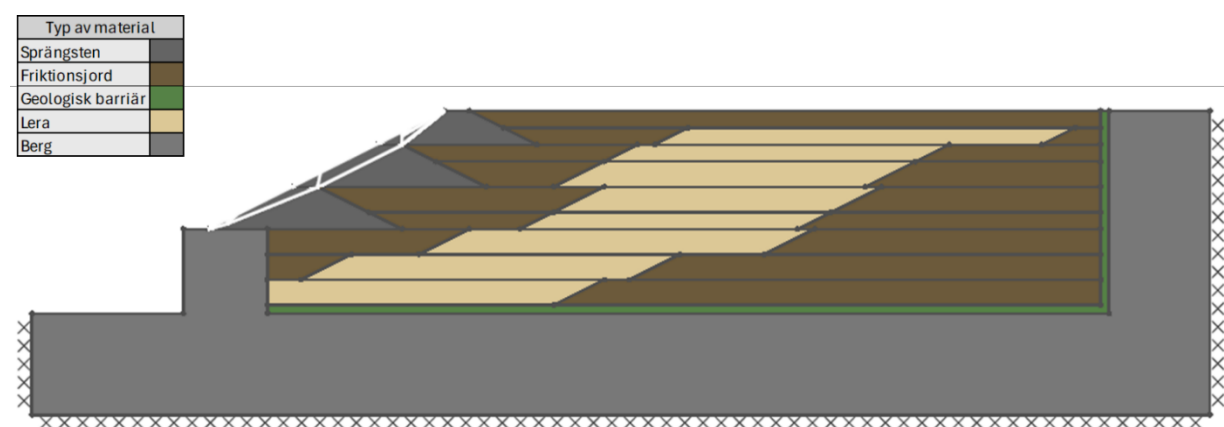
Figur 37. B40-V15 dränerad analys. $SF=1,759$.

Bilaga 19



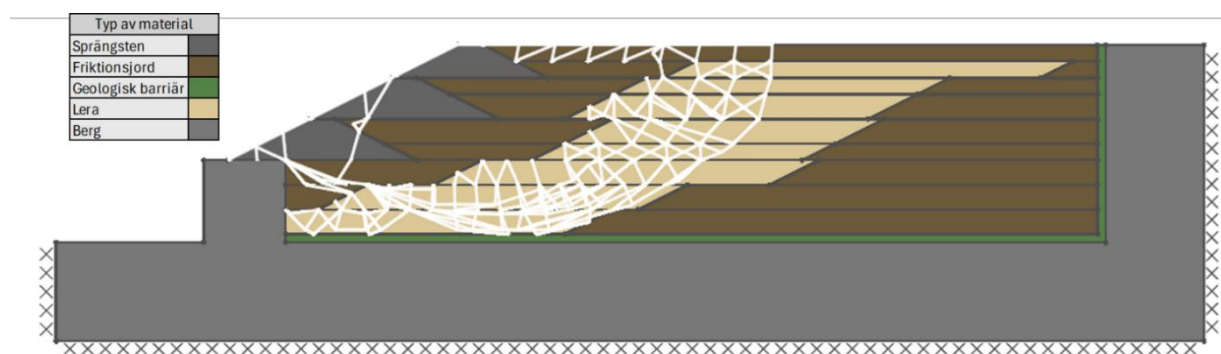
Figur 38. B40-V15 odränerad analys. $SF=0,9867$.

Bilaga 20



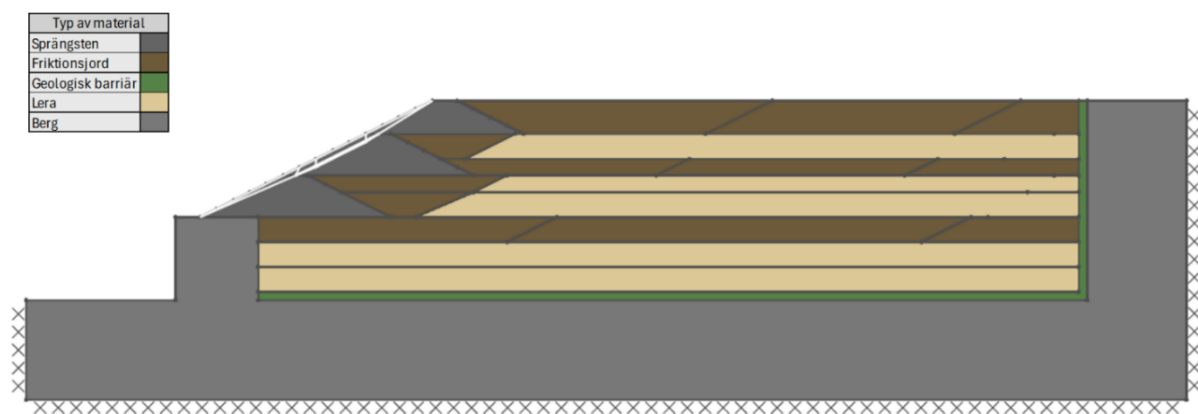
Figur 39. C40 dränerad analys. $SF=1,859$.

Bilaga 21



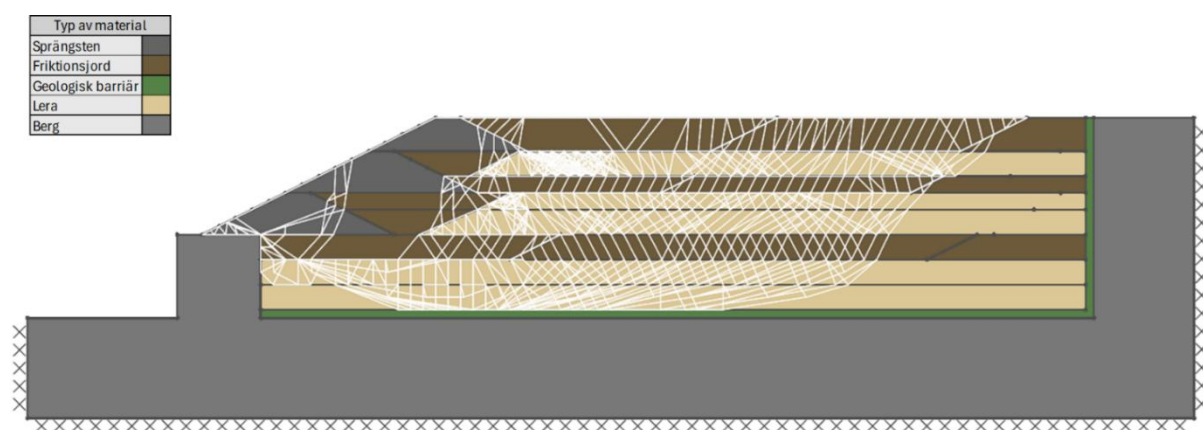
Figur 40. C40 odränerad analys. $SF=1,71$.

Bilaga 22



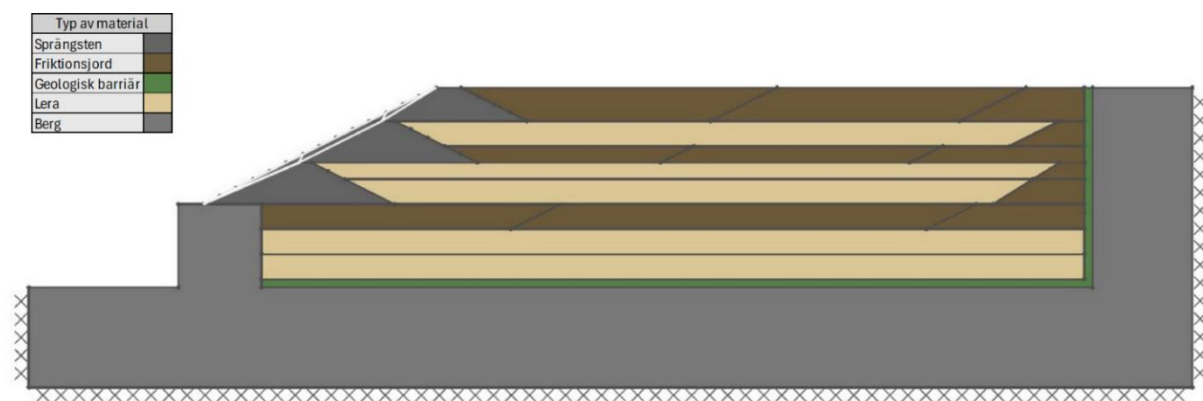
Figur 41. A60 dränerad analys. $SF=1,842$.

Bilaga 23



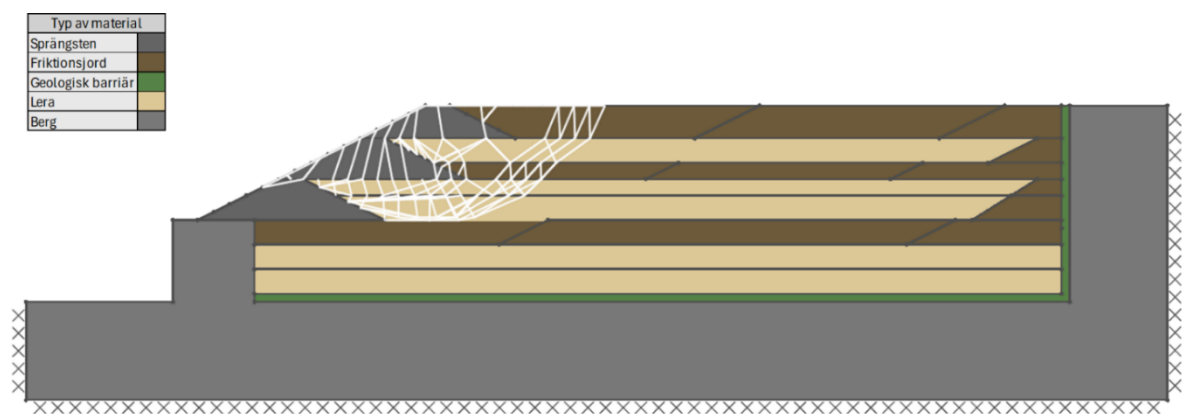
Figur 42. A60 odränerad analys. $SF=1,637$.

Bilaga 24



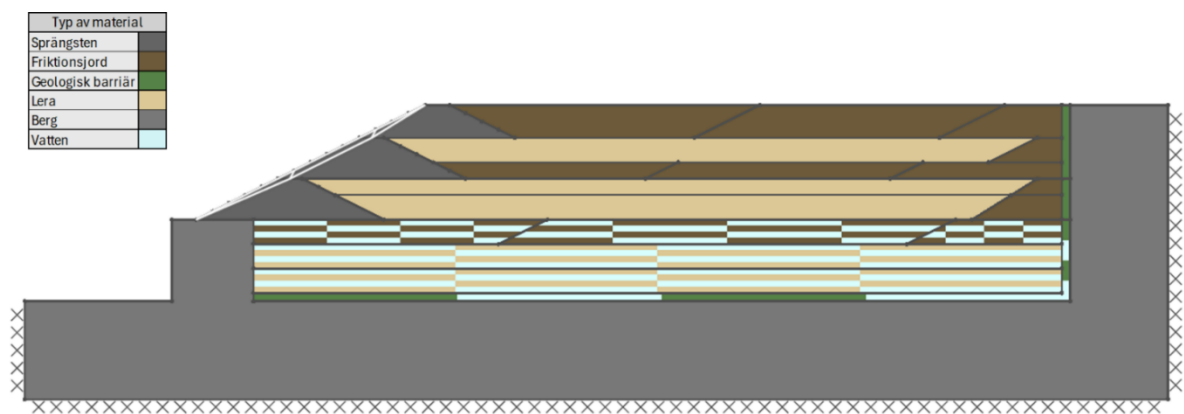
Figur 43. B60 dränerad analys. $SF=1,842$.

Bilaga 25



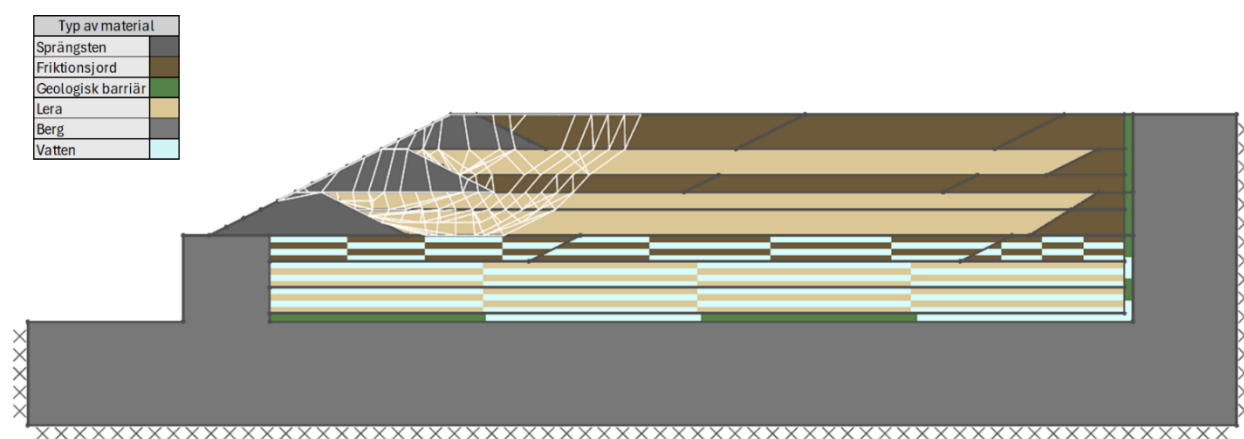
Figur 44. B60 odränerad analys. $SF=0,8106$.

Bilaga 26



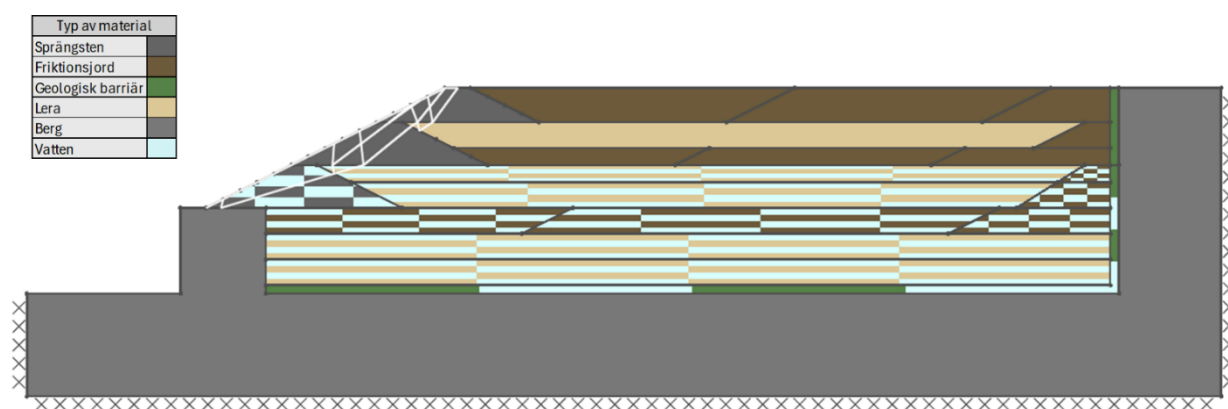
Figur 45. B60-V10 dränerad analys. $SF=1,842$.

Bilaga 27



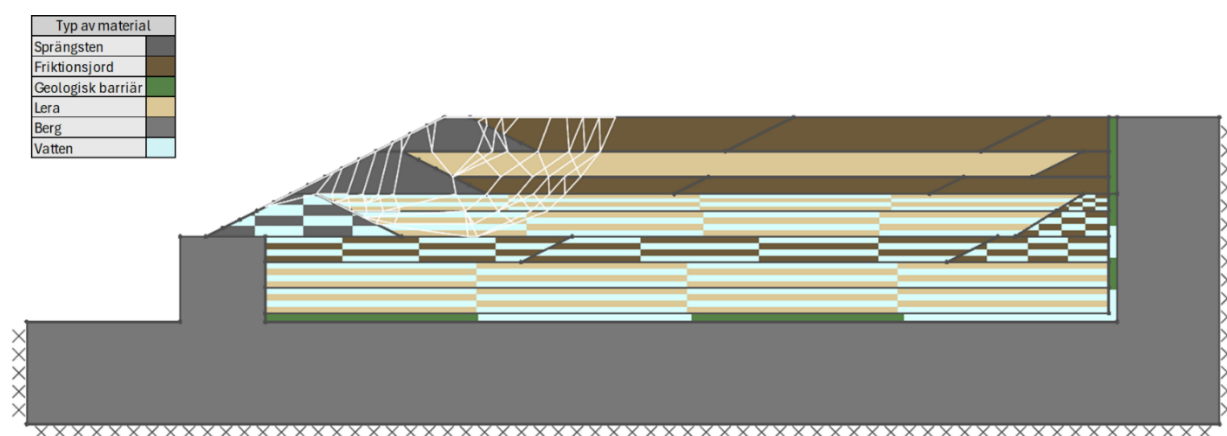
Figur 46. B60-V10 odränerad analys. $SF=0,811$.

Bilaga 28



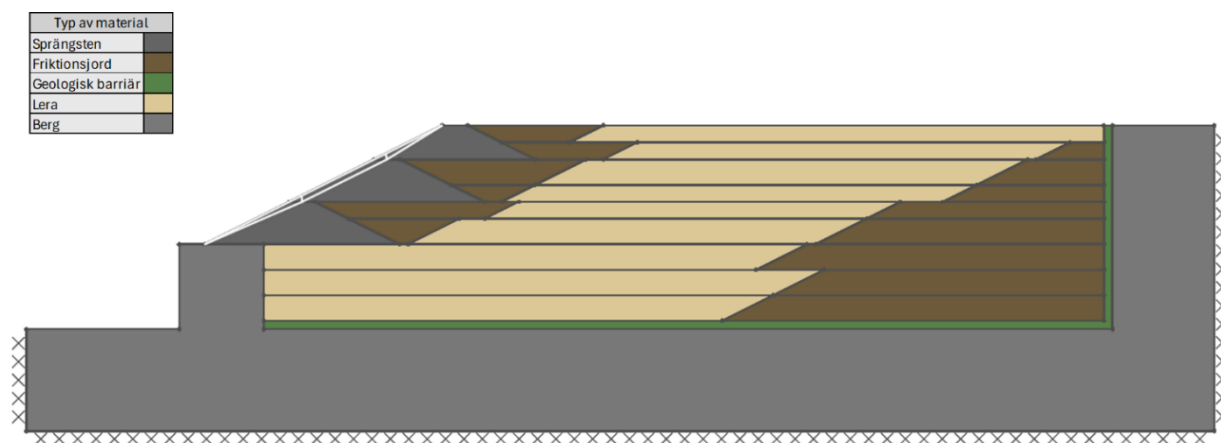
Figur 47. B60-V15 dränerad analys. $SF=1,712$.

Bilaga 29



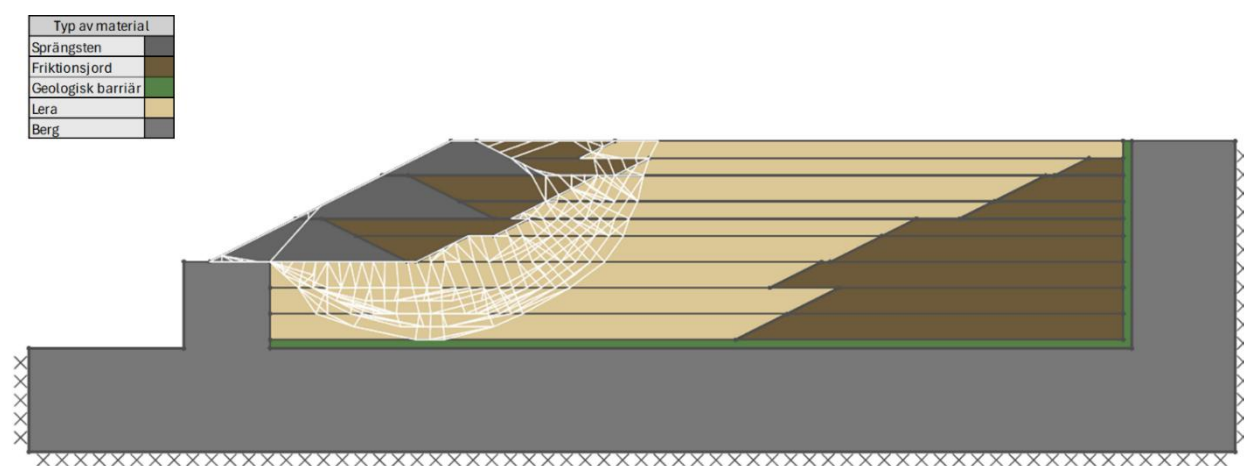
Figur 48. B60-V15 odränerad analys. $SF=0,7988$.

Bilaga 30



Figur 49. C60 dränerad analys. $SF=1,838$.

Bilaga 31



Figur 50. C60 odränerad analys. $SF=0,5628$.



CHALMERS