



CHALMERS

# Känslighetsanalys av skredet i Småröd, Västra Götalands Län, med avseende på släntstabilitet

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

Max Karlsson

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK  
AVDELNINGEN FÖR GEOLOGI OCH GEOTEKNIK**

---

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2024  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



EXAMENSARBETE ACEX20

# Känslighetsanalys av skredet i Småröd, Västra Götalands Län, med avseende på släntstabilitet

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

Max Karlsson

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2024

Känslighetsanalys av skredet i Småröd, Västra Götalands Län, med avseende på släntstabilitet

*Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

Max Karlsson

© MAX KARLSSON 2024

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för Geologi och geoteknik  
Geoteknik  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Göteborg 2024



Känslighetsanalys av skredet i Småröd, Västra Götalands Län, med avseende på släntstabilitet

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Samhällsbyggnadsteknik*

Max Karlsson

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för Geologi och geoteknik  
Geoteknik  
Chalmers tekniska högskola

## **SAMMANFATTNING**

Onsdag den 20 december, år 2006 inträffade ett stort jordskred i Småröd, beläget mellan Munkedal och Uddevalla kommun. Jordskredet inträffade i samband med utbyggnaden av E6 genom Bohuslän. Västra Götalands län har historiskt sett varit mer utsatt av jordskred än resterande av Sverige, både till antal och omfattning.

Avsikten med detta examensarbete är att göra en känslighetsanalys av ett utlöst jordskred i området, Småröd 2006. Genom att undersöka faktorer som spelat in vid dess uppkomst, identifiering av mänsklig påverkan av stabiliteten vid byggnation väntas detta arbete att kunna öka riskmedvetenheten vid utbyggnad av infrastruktur i skreddrabbade områden och därmed förebygga liknande händelser.

Analysen genomfördes i programvaran GeoStudio 2020, i en vald kritisk sektion i området. Modelleringen speglade byggstadiet och de olika stegen av påfrestning i sektionen vid odränerad samt kombinerad analys, även alternativ projektering analyserades i jämförande syfte. Resultatet från undersökningen gav en indikation på hur stabiliteten i området förändrades under byggnationens framfart. Av resultatet att döma utlöstes skredet av en allt för stor, tillfälligt placerad tryckbank intill den nya E6. Stabiliteten i området var sedan tidigare av kritisk karaktär. Förekomsten av kvicklera i området resulterade i en mycket större utbredning av skredet än vad som initialt utlöstes.

Oaktsamhet och osäkerhet i vilken säkerhetsklass som byggnationen skulle utföras i, verkar ha varit en bidragande faktor till utfallet. Hade skredet kunnat hindrats? Ja, med rätt kunskap om jordens höga sensitivitet och riskerna med allt för hög påfrestning under byggstadiet.

Klimatförändringar visar till det kommande ökande behovet för kunskap och förståelse för hur slänters stabilitet kan upprätthållas vid ökad påfrestning. Forskning visar att den mest bidragande faktorn till ökad instabilitet i slänter kommer vara den ökande mängden nederbörd. Det kan resultera i förhöjt portryck i jorden, men också högre grundvattenflöden. Större flöden kan resultera i en snabbare urlakning av högsensitiv lera, men också ha en större eroderande effekt i åar och floder som har ansetts stabila sedan tidigare.

Nyckelord: Släntstabilitet, jordskred, geoteknik, GeoStudio, Småröd, kvicklera, säkerhetsfaktor, skjuvhållfasthet.

Sensitivity analysis of the landslide in Småröd, Västra Götaland County, with respect to slope stability

*Degree Project in the Engineering Programme  
Civil and Environmental Engineering*

Max Karlsson

Department of Architecture and Civil Engineering  
Division of Geology and Geotechnics  
Geotechnics  
Chalmers University of Technology

## **ABSTRACT**

On December 20, 2006. A large landslide occurred in Småröd, a small region between Uddevalla and Munkedal municipality. The landslide started in connection with the building of new E6 between Oslo and Gothenburg. Västra Götaland county has been more prone to landslides than the rest of Sweden.

The purpose of this project is to make an analysis of the triggered landslide in Småröd 2006. By identification of factors who played a role in its occurrence and identify how the stability was affected by human influence during construction. This work is expected to increase awareness during expansion of infrastructure in landslide-affected areas, and thereby prevent similar ones.

The analyses were made in a software called Geoslope, 2020 in a selected, critical section in the area. The modelling reflected the construction stages in undrained and combined analysis. The results gave an indication of how the stability of the area changed during the construction phase. Judging from the results, the landslide was triggered by an excessively large, temporarily placed bank next to the new E6 when stability in the area already was of critical nature. The presence of quick clay resulted in a much greater spread of the landslide.

Could the landslide have been prevented? Yes, with the right knowledge of the soil's high sensitivity and the risks by placing an excessively high embankment with high stress contribution next to E6 during construction stage.

Climate change shows the increasing need for knowledge and understanding of stability in slopes. How it can be maintained and prevention of failure in a changing climate. Research shows that the most contributing factor to decreased stability in slopes will be the increasing amount of precipitation. This will most likely increase pore pressure in the soil, but also lead to higher groundwater flows. A higher amount of water flow could result in a faster leaching of highly sensitive clay, but also lead to a higher level of erosion in slopes close to streams and rivers that has been considered stable before.

Key words: Slope stability, landslides, geotechnics, GeoStudio, Småröd, quick clay, factor of safety, shear strength

# Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Frågeställningar	2
1.4 Metod	2
1.5 Avgränsningar	3
2 SMÅRÖD	4
2.1 Områdesbeskrivning	4
2.2 Områdets Geologi	5
2.2.1 Berggrund	5
2.2.2 Jordarter	6
3 KVICKLERA – LITTERATURSTUDIE	7
3.1 Bildningssätt	7
3.2 Struktur	7
3.3 Egenskaper	8
3.3.1 Skredutbredning	9
3.4 Identifieringsmetoder	9
3.4.1 Topografiska och geologiska metoder	10
3.4.2 Geofysiska metoder	11
3.4.3 Geotekniska metoder	11
3.5 Geotekniska utmaningar	12
3.5.1 Avlastning pådrivande krafter	13
3.5.2 Ökning mothållande krafter	13
3.5.3 KC-Pelare	13
3.6 Risker	14
3.7 Restriktioner	14
4 SLÄNTSTABILITET	15
4.1 Odränerad och dränerad skjuvhållfasthet	16
4.2 Beräkningsmetoder	17
4.2.1 Direktmetoden [Janbu 1954]	17

4.2.2	Cirkulär cylindrisk glidyta (Limit Equilibrium Metod's)	24
4.2.3	Lamellmetoden	24
4.2.4	Spencer & Morgenstern and Price	27
4.3	GeoStudio 2020	27
4.3.1	General limit equilibrium method	27
5	BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	31
5.1	Jordlagerföljd	31
5.2	Geometri	32
5.3	Odränerade skjuvhållfasthet parametrar	33
5.4	Dränerade skjuvhållfasthet parametrar	34
5.5	Säkerhetsklass	34
5.6	Geoteknisk kategori	36
5.7	Tillvägagångsätt	36
6	RESULTAT	37
6.1	Sammanställda resultat av stabilitetsberäkningar	38
6.2	Ytjordshög/Gamla E6/Taske Å	40
6.3	Ny E6	41
6.3.1	Startskede	41
6.3.2	Installation av KC-Pelare	41
6.3.3	Uppförande av Vägbank	42
6.3.4	Uppförande av Stödbank	42
6.3.5	Överlast till Vägbank	43
6.3.6	Tillfällig Tryckbank Steg 1/5	43
6.3.7	Tillfällig Tryckbank Steg 2/5	44
6.3.8	Tillfällig Tryckbank Steg 3/5	44
6.3.9	Tillfällig Tryckbank Steg 4/5	45
6.3.10	Tillfällig Tryckbank Steg 5/5	45
6.4	Alternativa åtgärder	46
6.4.1	Flytt av Taske Å	46
6.4.2	Lättklinker i vägbank	46
7	DISKUSSION	47
7.1	Säkerhetsfaktorer	47
7.2	Inmätningar och geotekniska undersökningar	49
7.3	Alternativ projektering	49
7.3.1	Flytt av Taske Å	49
7.3.2	Lättklinker	50
7.4	Klimatförändringar	50
8	SLUTSATS	51

9	LITTERATURFÖRTECKNING	52
10	BILAGOR	54
10.1	Startskede	54
10.2	App. Avschaktad matjord	55
10.3	Installation av KC-Pelare	56
10.4	Uppförande av vägbank	57
10.5	Stödbank längs vägbank	58
10.6	Överlast på vägbank	59
10.7	Utläggning av tryckbank 1/5	60
10.8	Utläggning av tryckbank 2/5	61
10.9	Utläggning av tryckbank 3/5	62
10.10	Utläggning av tryckbank 4/5	63
10.11	Utläggning av tryckbank 5/5	64
10.12	Enligt projekterade förhållanden	65
10.13	Enligt utfört förhållande	66
10.14	Projekterat exempel, flytt av Taske å	67
10.15	Projekterat exempel, lättklinker som ersättning	68
10.16	Materialparametrar (Kombinerad Analys)	69
10.17	Materialparametrar (Odränerad Analys)	69

## **Förord**

Detta examensarbete har skrivits i samband med avslutande termin på Samhällsbyggnadsteknik, högskoleingenjörsprogrammet vid Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet motsvarar 15 högskolepoäng och har utförts under vårtermin 2024.

Arbetet har skrivits med anledning av önskad utvecklad förståelse och kunskap kring naturliga slänters stabilitet och hur de påverkas vid exploatering.

Detta arbete har varit riktigt lärorikt och jag har haft möjlighet att fördjupa mig inom ett område jag är väldigt intresserad av. Avslutningsvis vill jag tacka Mats Karlsson, som bidragit med sin tid och kunskap hjälpt mig fullföra detta arbete.

Göteborg, juni 2024  
Max Karlsson





# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Onsdag den 20 december, år 2006 inträffade ett stort jordskred i Småröd, beläget mellan Munkedal och Uddevalla kommun. Jordskredet inträffade i samband med utbyggnaden av E6 genom Bohuslän. E6 är en av Sveriges viktigaste infrastrukturer då den binder samman Göteborgsregionen med Osloregionen (Trafikverket, 2010). Skredet är ett av de största inträffade i Sverige under modern tid som omfattade en yta av 10 hektar (Sveriges Geologiska Undersökning, 2007). Det sista seklet har ett 10-tal omfattande skred förekommit i Västra Götalands län. Skredet i Tuve år 1977, av storleksordning 27 hektar fick förödande konsekvenser. Området var delvis exploaterat vilket förorsakade 9 personers bortgång och 436 personer blev hemlösa (Statens Geotekniska Institut, 2023). Stenungssund, år 2023 av storleksordning 17 ha, vilket orsakade stor förödelse av befintlig, betydande infrastruktur. Enligt MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap har kostnaderna av skredet i Småröd uppskattats till en betydande summa av 519 miljoner kronor (MSB, 2009).

Jordskred är en sammanhängande massa av jord i rörelse. Det uppstår skred när jordens jämnvikt sätts ur spel på något sätt. Det är i huvudsak 3 faktorer som påverkar en jords stabilitet och skredbenägenhet. Det kan uppstå skred vid belastning, minskad motvikt eller förändring av jordens hållfasthetsegenskaper (Statens Geotekniska Institut, 2023). Detta kan förekomma naturligt eller med mänsklig inverkan, entydigt eller i kombination med varandra.

Västra Götalands Län, har historiskt sett varit mer utsatt för jordskred både till antal och omfattning än resterande län i Sverige. Dess geografiska belägenhet är till stor betydelse då närhet till kust och hav skapar en högre risk för naturligt igångsatta skred. Västra Götaland har också på grund av sin geologiska historia en jordlageruppbyggnad som är extra känslig och skredbenägen (Sveriges Geologiska Undersökning, 2007).

Stora delar av länet befinner sig under högsta kustlinjen vilket ökar sannolikheten av förekomst av kvicklera i marken. Klimatet i regionen har också stor betydelse för uppkomsten av skred. Små skred och jordras förekommer oftast i obebyggda områden som ett resultat av naturliga erosionsprocesser, med relativt låg risk att vara en fara för allmänheten. Störningar av jorden sker av liten och stor skala vid exploatering av ny mark. Nybyggnation av industrier, hus och infrastruktur påverkar markens naturliga jämnvikt (Sveriges Geologiska Undersökning, 2023).

För att undvika olyckor och pådrivning till att slänters stabilitet rubbas ställs det krav på hög noggrannhet och försiktighet vid utnyttjande av mark. För att stabilitet i mark och jord ska bibehållas vid utbyggnation av ny infrastruktur är det av yttersta vikt att beakta jordens bildningshistoria samt att geotekniska förutsättningarna för exploatering studeras med noggrannhet (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2008).

## 1.2 Syfte

Slänters stabilitet spelar en avgörande roll vid utbyggnad av ny infrastruktur med avseende på säkerhet för samhället men också för dess funktion.

Avsikten med examensarbetet är att utföra en känslighetsanalys av jordskredet i Småröd 2006 med intresse att identifiera och kvantifiera hur faktorer orsakade av mänsklig aktivitet påverkade stabiliteten i området innan skredtillfället. Förhoppningsvis skall detta arbete i sin tur minska risken för att skred utlösta av oaktsamhet ska uppstå. Fokuset i denna analys kommer att ligga på anbringad extra last i form av schaktmassor och dess inverkan på stabiliteten.

Det är av intresse i denna analys att beakta markens egenskaper, sammansättning och hållfasthet. Geologiska och topografiska förhållanden, jordlagerföljd samt geometri i området där skredet uppstod. Det är också relevant att ta hänsyn till markens hydrogeologiska förhållanden med avseende på grundvattennivå.

## 1.3 Frågeställningar

Vid examensarbetets fullförande förväntas svar på följande frågeställningar:

- Vad föranledde skredet och hur påverkades stabiliteten i området vid byggnation?
- Vad hade förekomsten av kvicklera för effekt i området?
- Hade skredet kunnat undvikas?

## 1.4 Metod

Denna analys med syftet att undersöka de bidragande faktorerna och dess påverkan till jordskredet i Småröd, inleddes med en litteraturstudie av Statens haverikommissions Rapport RO 2009:01, "*Jordskred vid vägbygge E6 i Småröd, Västra Götalands Län, den 20 december 2006*" och Rapport 2007:29 "*Skredet i Småröd, Bohuslän, Geologiska undersökningar*" utfärdad av Sveriges Geologiska Undersökningar.

SHK Rapport RO 2009:01 låg till grund för stor del av de använda materialparametrarna för denna studie men gav också nödvändig information av jordskredets händelseförlopp och utbredning. Områdets geometri och lerans egenskaper uppskattades från SHK:s rapport för att analysen skall kunna motsvara det verkliga fallet. Egenskaper som inte har presenterats i Rapport RO 2009:01 har karakteristiska värden i stället valts med omsorg från Trafikverkets tekniska krav för Geokonstruktioner, mer ingående vilka data det angår presenteras i Kapitel 5, *Beräkningsförutsättningar*.

SGU rapport 2007:29 bidrog till nödvändig förståelse av de geologiska förutsättningarna i området samt bakgrund till dess uppkomst och egenskaper. Ytterligare inläsning och förståelse för hur man kan förutspå områden med

högsensitiva leror så studerades även Statens Geotekniska Instituts vägledning: *"Metodik för kartläggning av kvicklera"*.

Arbetet innefattar en genomgång av de vanligaste beräkningsmetoderna för att analysera slänters stabilitet, dessa återfinns i Kapitel 4.2, Beräkningsmetoder. Stabiliteten i Småröd under byggandet av ny E6 analyserades med hjälp av datorprogrammet GeoStudio 2020. Simuleringarna gjordes i SLOPE/W, grunderna för mjukvarans beräkningsmetoder presenteras mer utförligt i kapitel 4.3 GeoStudio.

Analysen gjordes för byggskedet mellan uppstart och skredtillfället där händelseförloppet har försökts återspeglats enligt uppgifter från Statens haverikommissionens Rapport RO 2009:11. Analys har utförts i kombinerat och odränerat fall för en vald sektion, 7/480 som sedan tidigare bedömts vara av mest ansträngd karaktär.

Jämförelse av resultaten har gjorts gentemot tidigare projekterade stabilitetsförhållanden för sektion 7/480 och med avseende till säkerhetsklass enligt Trafikverkets tekniska krav för Geokonstruktioner.

Två illustrativa exempel på projektering blev gjorda, ett som tog hänsyn till totalstabiliteten i hela dalgången med befintlig placering för Nya E6. Höjddata hämtades från Sveriges Lantbruksuniversitet, tjänst: Geodata Extraction Tool i sektion 7/480 och jordlagren uppskattades som en förlängning av befintlig sektion. Det sista exemplet hade som avsikt att undersöka hur stabiliteten påverkades av ett alternativt sätt att dimensionera vägbanken med lättklinker.

## **1.5 Avgränsningar**

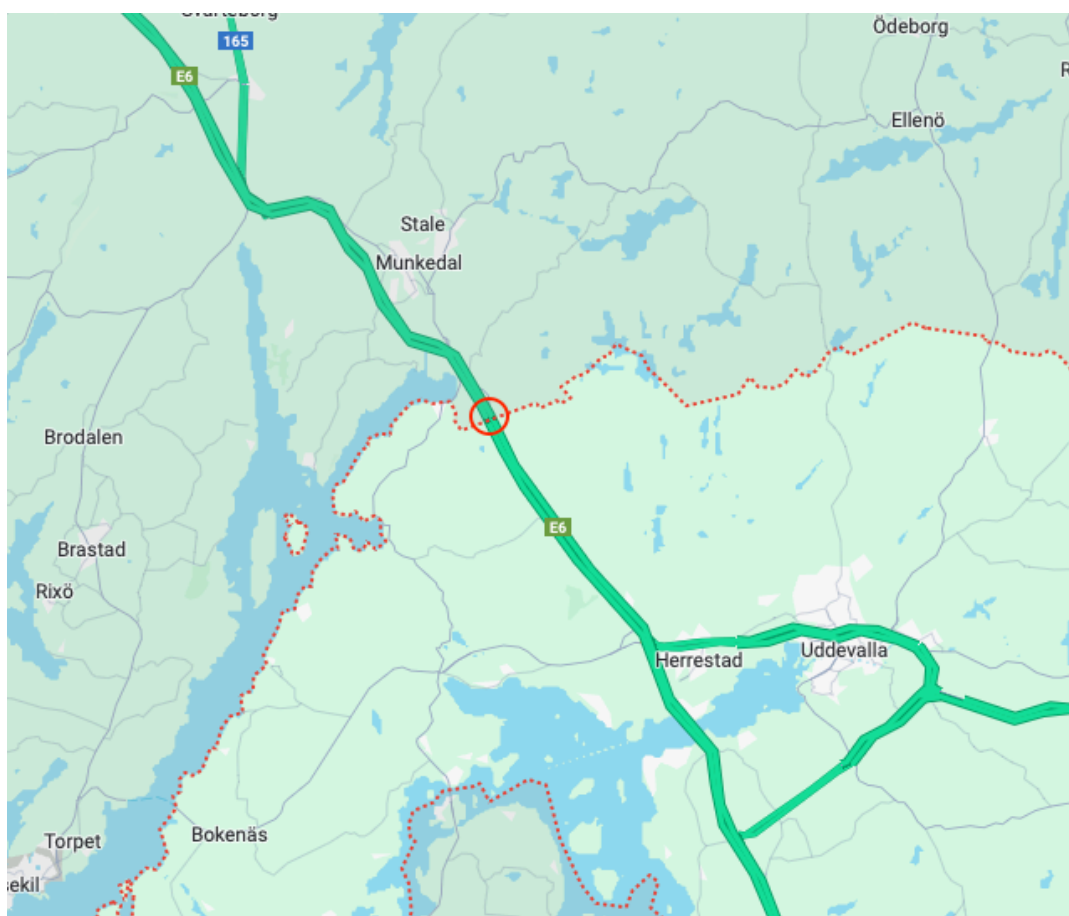
Avgränsningar i denna känslighetsanalys är att ej beakta variation i de ingående parametrarna med avseende på nederbörd, grundvattennivå och andra faktorer som ej kan direkt kopplas till mänsklig aktivitet utförd. Avgränsning är också gjord att enbart studera stabiliteten av en slänt, 7/480. Även valt att utföra analysen med hjälp av endast en programvara. Grundläggande kunskap och möjlighet till val av beräkningsmetod gjorde att valet föll på GeoStudio 2020, SLOPE/W.

## 2 Småröd

### 2.1 Områdesbeskrivning

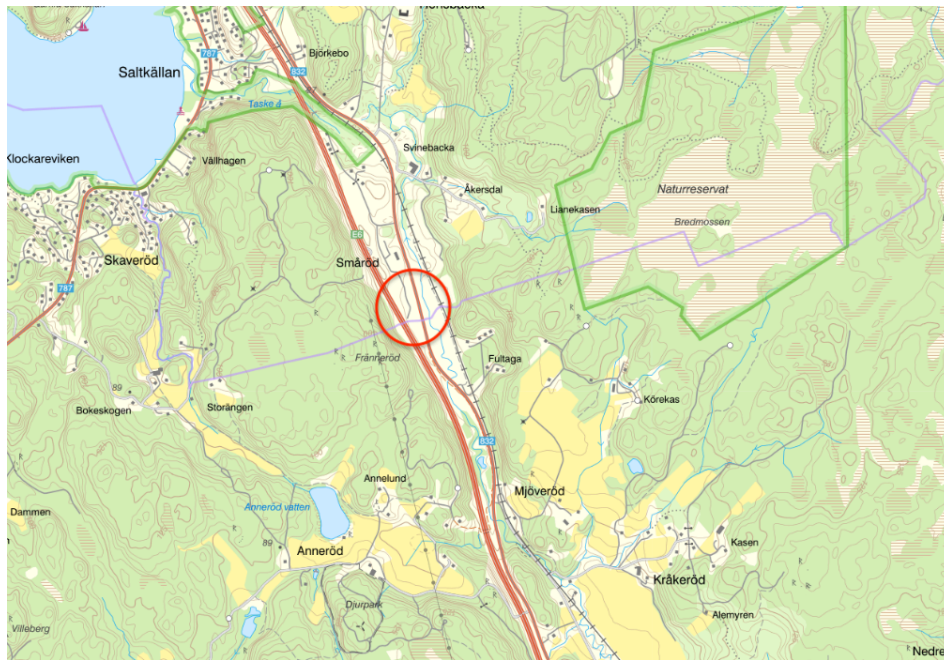
Vid verksamhet som påverkar naturliga slänters stabilitet är det av yttersta vikt att göra grundliga geologiska och geotekniska undersökningar i form av analys och utredning av marken i området. Geologiska undersökningar görs i tidigt skede för att säkerställa markens egenskaper med avseende på jord- berg- och grundvatten. Undersökningen innebär oftast fältarbete, insamling och analys av jordprover och har som avsikt att beskriva de geologiska förhållandena.

Småröd är en bygd mellan Munkedal och Uddevalla kommun belägen i Västra Götalands Län. Skredet omfattade en yta på 10 ha i anslutning till E6. Se Figur 1.



Figur 1 Karta som visar skredområdet och kommungräns mellan Uddevalla och Munkedals kommun (Karta hämtad från Google Maps).

Skredområdet befinner sig på den västra sidan av Taske å, som ligger i Smårödsdalgången med nord - sydlig riktning. Taske å är ca 20 km lång med höjdområden på bägge sidor och tömmer sig i Saltkällefjorden vid orten Saltkällan, se Figur 2.



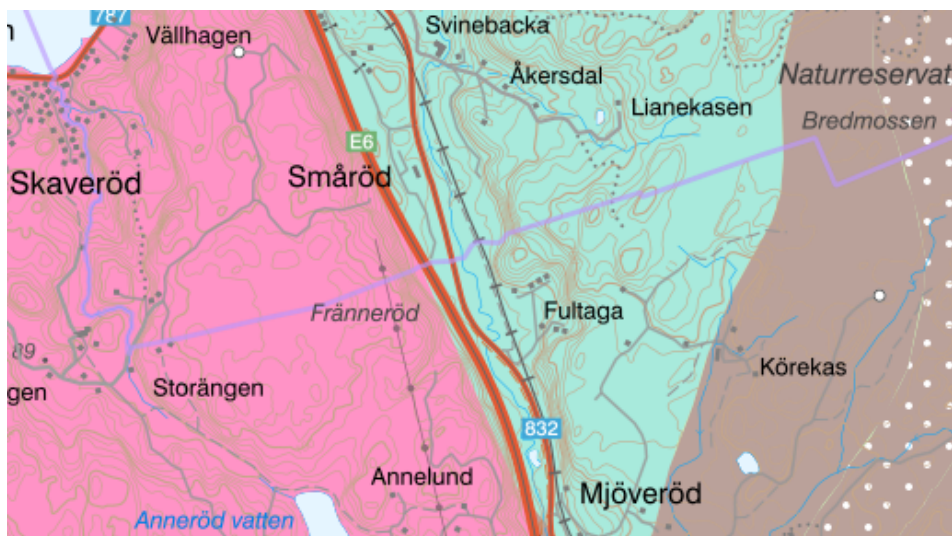
Figur 2 Skredområde, visar dalgång och Taske å (Karta hämtad från Lantmäteriet).

## 2.2 Områdets Geologi

### 2.2.1 Berggrund

Berggrunden i sydvästra Sverige förutspås vara ett resultat från den Svekonorvegiska Orogenen som inträffade för ca 1 milj. år sedan. Den befintliga berggrunden utsattes för högt tryck och hög temperatur efter kollision med en annan kontinent vilket föranledde metamorfos och metamorfa bergarter bildades (Sveriges Geologiska Undersökning, UA).

Enligt Figur 3, består dalgången i Småröd i stort sett av två typer av bergarter. Den västra sidan av dalgången längs med E6 förekommer den magmatiska bergarten granit-pegmatit. Dalgången och den östra sidan består berggrunden av en glimmerrik gnejs (Sveriges Geologiska Undersökning, 2007).



Figur 3 Bergartskarta över aktuellt skredområde [Rosa - Granit-Pegmatit], [Turkos - Gnejs] (Berggrundskarta hämtad från Lantmäteriet).

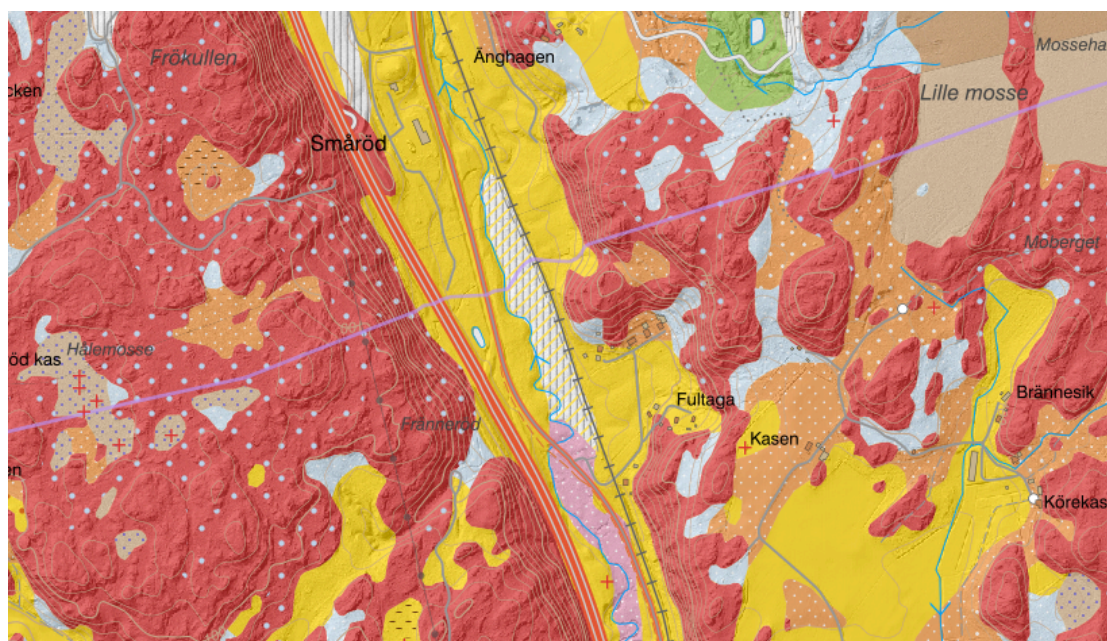
En sprick och krosszon flöjer linjen av kontakt mellan graniten och gnejsen i nord-nordvästlig riktning. Svaghetsstrukturen har medfört en extra betydelsefull vittringsprocess vid dalgångens utbredning.

## 2.2.2 Jordarter

Enligt utredning från Statens Geologiska Undersökning i området visas det att jordens lager består av största del glaciala avlagringar men det finns även förekomst av post-glaciala bildningar (Sveriges Geologiska Undersökning, 2007). Glaciala avlagringar avsattes genom erosion, slipning och nedbrytning av berg och sten vid inlandsisens avsmältning.

Geografin kring Småröd har efter den senaste istiden genomgått stora förändringar. Vid isens avsmältning var stora delar av sydvästra Sverige nedtryckt av isens tyngd under havsytan (Statens Geotekniska Institut, 2003). Småröd befinner sig i en dalgång med platåer av urberg som sticker upp i dagen på varsina sidor vilket framkommer enligt Figur 4. I dalgången dominerar finkorniga sediment som är avsatta i arktisk miljö som efter landhöjningen påträffas ovan havsytan vilket framkallar glacial lera (Sveriges Geologiska Undersökning, 2007).

Dalgångens jordprofil definierades med ett övre lager av matjord vid oexploaterad mark. Lerans mäktighet i dalgången bestod av 1–3 m djup torrskorpa som uppnådde störst djup vid dalsidorna och avtog emot Taske å. Utförda sonderingar visade att djupet av lera med mellanliggande skikt av sand bedömdes uppgå till en mäktighet av 30m djup vid Taske å ned till 8m emot bergets sluttningar. Det påträffades också ett tjockt friktionslager bestående av morän eller isälvs sediment längs sluttningarna i dalgången som fungerar som en akvifär av grundvatten (Sveriges Geologiska Undersökning, 2007).



Figur 4 Jordartskarta över skredområde (Hämtad från Lantmäteriet).

### **3 Kvicklera – Litteraturstudie**

Skredet i Småröd utlöstes av den allt för stora mängd fyllningsmassor som placerades temporärt i anslutning till den östra delen av nybyggnationen för E6. Det initiala skredet utökades i en s.k. progressiv skredprocess. Det innebär att utlösningen av befintligt skred, låg till grund för aktiveringen av nytt. Dalgångens lutning tillsammans med lerans egenskaper bidrog till skredets utbredning vilket resulterade i markskador på ett område av 550 x 280m (Statens haverikommission, 2009). Jordens sensitivitet och benägenhet att bli störd står ofta till grund för ett jordskreds omfattning. Dalgången i Småröd bestod av ett glacialt lerlager som var upp till 30m i tjocklek med tendenser att bete sig kvickt.

En kvicklera är i sig inte av ostabil grund, dess tendens att helt förlora sin hållfasthet och struktur vid störning är den faktor som gör att jordskred i områden med lera av hög sensitivitet ofta blir omfattande (Statens Geotekniska Institut, 2019). Det är vanligt att ett bakåtgripande sekundärskred blir utfallet av ett triggat initialskred.

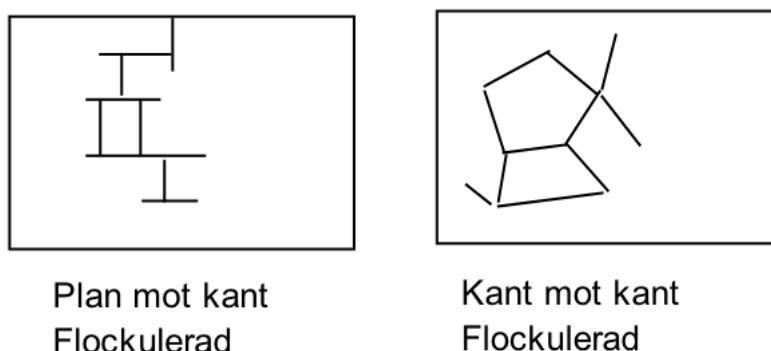
#### **3.1 Bildningsätt**

Kvicklera kräver vissa geologiska förutsättningar för att bildas. Sverige, Norge och Kanada är relativt lika med avseende på historiska geologiska processer och därför är länder med högt förekommande av lera som är av typ hög-sensitiv (Rankka, 2003). Leran i dalgången vid Småröd är glacial och härstammar ifrån senaste inlandsisens retardation. Sedimentation och avsmältning i salt, marin-miljö skapar stor potential för bildning av kvicklera. Kusten längs Västra Götaland samt Bohuslän var under senaste istiden nedpressad under havets nivå (även kallat högsta kustlinjen) och har efter landhöjning och sänkning av havsytans nivå bidragit till att den glaciala leran mött dagens ljus. Landområden som endast har befunnit sig över högsta kustlinjen har inte samma utbredning av glacial lera. Lera avsatt i bräckt och sötvatten har möjlighet att klassificeras som kvick, men inte i samma utsträckning.

#### **3.2 Struktur**

Lera består precis som andra jordarter av fasta partiklar med hålrum fyllda med vatten och/eller gas. De fasta partiklarna är av lermineral och bildar lerans bärande skelett och därmed struktur. Leran får först kvicka tendenser när avlagringarna utsätts för urlakning. Det förekommer vid till exempel infiltration av regnvatten. Ett lermineral har en hög jonbyteskapacitet och är vid kontakt med vatten i ständig reaktion och jonutbyte med omgivningen. Koncentrationen av joner i lerans porutrymme förändras och dem interna krafterna mellan lerpartiklarna förloras vilket kan leda till att leran helt förlorar sin hållfasthet och vid störning kan uppvisa en närmast flytande struktur (Rankka, 2003). Urlakningen påverkar i huvudsak inte lerans initiala struktur och uppbyggnad, utan minskar kraften mellan partiklarna. Därav dess höga känslighet vid omrörning. Gemensamt för saltvattenavsatta leror i Sverige är att leran består av

aggregat med mindre partiklar som länkar ihop dess uppbyggnad och formar den känsliga korthusliknande strukturen, se Figur 5.



Figur 5 Visar till flockulerad partikelbindning, enligt (Rankka, 2003).

### 3.3 Egenskaper

En lera klassificeras beroende på dess *Sensitivitet*,  $S_t$  som är kvoten av en leras odränerade skjuvhållfasthet i orört och i omrört tillstånd, efter fullständig nedbrytning av strukturen (Larsson, 2008).

Leran kategoriseras enligt tabell 1:

Tabell 1 Klassificering beroende av en leras sensitivitet (Larsson, 2008).

Benämning	Sensitivitet
Lågsensitiv	<8
Mellansensitiv	8 - 30
Högsensitiv	> 30

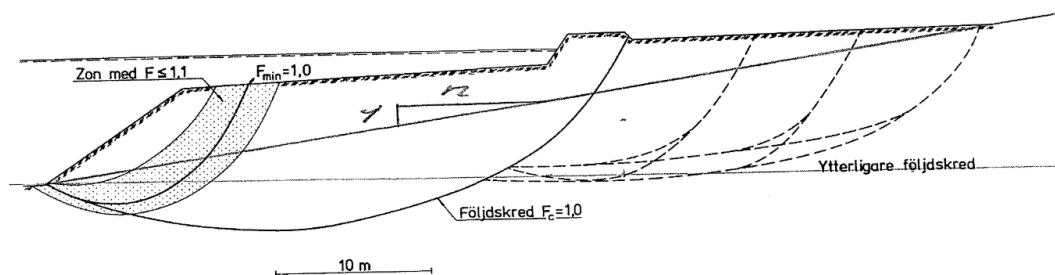
En lera bedöms vara kvick om sensitiviteten överskrider 50, leran ska dessutom ha en skjuvhållfasthet som är mindre än 0.4kPa (Larsson, 2008).

Avsättning i saltvatten gör att porvattnet i leran är av salt karaktär. Urlakningen är en process som avlägsnar ämnen. Det sker naturligt via perkolering av regnvatten, skillnad i hydraulisk gradient som resulterar i en rörelse av grundvatten samt diffusion av salter till områden med lägre koncentration (Rankka, 2003). En lera avsatt i saltvatten är uppbyggd av aggregat som är förenade av länksystem. Urlakningen förändrar inte lerans struktur nödvändigtvis utan krafterna mellan partiklarna. Vid omrörning förstörs strukturen och lerpartiklarna kommer inte kunna återgå till sin förenade struktur. Vid urlakning minskar den vattenbindande förmågan som leran har, porvattnet släpps löst och små partiklar av lera i en flytande vätska framkommer. Detta visar till en nästan obefintlig skjuvhållfasthet i det omrörda stadiet och därmed resulterar i ett ökat värde på lerans sensitivitet.

### 3.3.1 Skredutbredning

Vid massrörelser i områden med högsensitiv lera initieras ofta ett skred av mindre karaktär. Det är som tidigare nämnt ofta i samband med mänsklig påverkan vid exploatering men kan också förekomma av naturliga orsaker som till exempel erosion vid slänt fot av ett strömmande vattendrag. Beroende på vart i slänten ett skred startar så uppkommer det ofta sekundärskred. Det kan räcka med att ett primärskred går genom väldigt tunna lager med kvicklera för att dess konsekvenser ska bli förödande. Dessa kan vara av slag framåtgräpande men också bakåtgräpande. Det är större sannolikhet för att ett skred är framåtgräpande om det initieras högt upp i en slänt. Störning i jorden kan bidra till minskning av skjuvhållfasthet och förflyttandet av massorna, initierar obalans i jämvikten som i sin tur triggar i gång nästa (Statens Geotekniska Institut, 2018).

Vid initiala glidytor vid eller i nära anslutning till en vattenlinje antas en bakåtdrivande skredutbredning. Det finns en schablonmässig metodik utvecklad av Per-Evert Bengtsson. Där man med hjälp av slänthöjd och en faktor  $\eta$ , beroende av lerans sensitivitet kan uppskatta skredets bakåtdrivande utbredning (Åhnberg, o.a., 2011), se Figur 6.



Figur 6 Bedömning av sekundärskred (Åhnberg, o.a., 2011).

Vid risk för framåtgräpande skred används idag traditionella metoder där massorna från förväntat initialskred beaktas som yttre last, utan egen skjuvhållfasthet. Om skredutvecklingen resulterar i glidytor med förekomst av jordlagerskikt med hög sensitivitet försvåras uppskattningen av skredets utveckling och omfattning. Den högsensitiva leran kan vid störning bli av flytande karaktär och flyta i väg över stora områden även vid låg topografisk lutning (Åhnberg, o.a., 2011).

## 3.4 Identifieringsmetoder

Det finns flera olika sätt att förutse förekomsten av kvicklera i ett område. Vanligtvis avgör de historiska geologiska händelserna om ett område riskerar förekomst av kvicklera. Identifieringen av ett områdes risk för kvicklera görs med material från geologiska kartor och tidigare uppkomna skred. Det är ofta ett kostnadseffektivt sätt vid en tidig bedömning. För att bekräfta en förekomst av

eventuell kvicklera och dess klassifikation krävs det geotekniska undersökningar bestående av provtagning och analys för bestämning av lerans sensitivitet (Statens Geotekniska Institut, 2018).

### 3.4.1 Topografiska och geologiska metoder

Om undersökningsområdet är beläget under den högsta linje som havsytan har förekommit och det är avsatt avlagringar av finkorniga jordarter som lera och silt ger det en första indikation på att kvicklera kan förekomma. Förutsättningar att kvicklera ska förekomma finns om området är beläget under högsta kustlinjen. Om de finkorniga avlagringarna är avsatta i salt eller bräckt vatten visar det också till risk för kvicklerans uppkomst. Metoden bör användas initialt för att undersöka om området har varit en lämplig bildningsmiljö. Om förutsättningarna för bildning är bekräftade finns det alternativa fördjupade undersökningsmetoder. Enlig (Statens Geotekniska Institut, 2018; Statens Geotekniska Institut, 2019; Statens Geotekniska Institut, 2018) är dessa faktorer av extra intresse:

- Förekomst av skredärr, med specifik form
- Förekomst av vattenförande skikt, i och under leran
- Ler området ligger i direkt anslutning till isälvsavlagring (ås, delta)
- Närhet till berg/moränsluttning (uppströms)
- Små lermäktigheter
- Uppåtriktad grundvattenströmning (artesiska förhållanden) vid grundvattenmagasin under leran, eller nedåtriktad grundvattenströmning (nedåtriktad gradient). Till exempel vid kuperad terräng eller genomsläppliga lager
- Lerområdets höjd över nuvarande havsytta, högre liggande lerlager har kunnat lakas ur under längre period.

Vid uppfyllande av dessa förutsättningar kan kvicklera förekomma och noggrannare analys vara av intresse. Denna checklista kan ge en bra uppfattning om var placeringen av dem geotekniska undersökningarna bör göras.

Analyser av tidigare skred kan ge ett bekräftande på om skredet har inträffat i närheten av kvicklera. Ärren av befintliga skred visar dess utbredning och delas in i 4 klasser beroende på dess form. Klassificeringen 1, 2, 3 innefattar jordskred som har haft en utbredning som är av form:

1. Brett gående – visar att skredet har skett genom glidning, möjligen kvicklera.
2. Ekvidimensionell – visar att skredet har skett genom flytning, möjligen kvicklera.
3. Långt gående – indikerar till flytning av högsensitiv lera, troligtvis kvick.
4. Flaskhals – troligtvis kvick.

Metoden där skredärr analyseras är begränsande till en initial tidig analys av tidigare jordskred och om dem har uppkommit i närhet av kvicklera. Metoden

dementerar och avfärdar ej, utan endast bekräftar eventuell misstanke om förekomst (Statens Geotekniska Institut, 2018).

### **3.4.2 Geofysiska metoder**

Det finns ett flertal Geofysiska metoder att använda vid utförligare analys av områden med väntad förekomst av kvicklera. Mätningarna innebär att man använder sig av elektrisk ström för att mäta jordens elektriska resistivitet, resultaten ligger till grund för en markprofil där jord med olika egenskaper kan urskiljas. Urlakad lera tenderar att generellt visa ett högre motståndstal.

Mätningen kan göras flygburen, TEM (Transient Elektromagnetisk mätning) men även markburen, ERT (Electrical Resistivity Tomography). TEM-metoden utförs med helikopter på 30 – 50 m höjd över marknivån. Mätningar av resistivitet kan göras för jorddjup på uppemot 100m. Flygburen mätmetod är praktisk vid kartläggning av ytor med stor areal men kan också bli begränsad för utredning vid bostadsområden och längs större vägar på grund av mätinstrument placerad hängandes under helikoptern. Markburen ERT är ett bra komplement där flygförhållandena är begränsade (Statens Geotekniska Institut, 2018).

Undersökningar av markens resistivitet är kostnadskrävande och relativt känsliga av störningar från kraftledningar, kablar och elledningar. Mätningarna kan efter analys ge en god översikt av jordlagerförhållanden samt jorddjup. TEM och ERT-analys är bra alternativ vid kartläggning av områden med kvicklera. För verifiering av kvickhet krävs dock bedömning av lerans sensitivitet med hjälp av geotekniska analys.

### **3.4.3 Geotekniska metoder**

Dem geotekniska metoderna härstammar ifrån analys av befintliga markdata arkiverad. Tidigare undersökningar i närliggande område kan ge goda uppfattningar om potentiell förekomst av kvicklera. Tidigare utförda geotekniska utredningar finns ofta arkiverat hos kommuner och myndigheter och är ett utmärkt tillvägagångssätt för att bilda uppfattning gällande jordens egenskaper.

#### **3.4.3.1 CPT - Sondering**

Cone Penetrating Test (Spetstrycksondering) är en geoteknisk fältundersökningsmetod som avser att bilda en uppfattning om lagerföljder samt jordens egenskaper emot djupet. Metoden innefattar en kraftmätning mot den nedtryckta konformade spetsen. Av CPT-sondering härstammar resultat av portryck, mantelfriktionen mot en hylsa ovanför spetsen samt motståndet i jorden (Sällfors, 2013). Förekomsten av kvicklera visar sig av neddrivningsmotståndet i jorden jämförelsevis mot mantelfriktionen i stängerna vid nedpressning. (Statens Geotekniska Institut, 2018) En spetstrycksondering utförs ofta i andra avseenden än bedömning av kvicklerans eventuella förekomst vilket gör den till en ekonomiskt fördelaktig metod.

Det finns en spetstrycksonderingsmetod som även mäter resistiviteten kontinuerligt vid olika djup. Metoden kallas CPT-R och bör utföras för områden analyserade med TEM eller ERT för jämförelse (Statens Geotekniska Institut, 2018).

### 3.4.3.2 Trycksondering

Mekanisk trycksondering är också en statisk metod där stångens neddrivningskraft registreras. Vid jämna mellanrum dras stängerna upp och vid ny drivning registreras endast stångfriktionen. Förutsättningarna för kvicklera registreras på samma sätt, det uppmätta neddrivningstillståndet, sammanslaget med stängernas tyngd, skall motsvara mantelfriktionen i [kN] längs stängerna. Om lutningen på kurvan för mantelfriktionen längs stängerna mot djupet är mindre än lutningen för 1 [kPa/m] mantelfriktion klassas leran som kvick (Statens Geotekniska Institut, 2018).

### 3.4.3.3 Fallkonsförsök

För att verifiera om en lera är kvick behövs lerans sensitivitet bestämmas. Det görs på laboratorium där lerans skjuvhållfasthet kan mätas. Ett ostört prov tas ur marken med en kolvprovtagare och sedan transporteras med högsta försiktighet för att inte skada provet till laboratoriet. Vid analys mäts lerans odränerade skjuvhållfasthet i både orört och omrört tillstånd. En fallkon placeras med sin spets ovan provet och sedan får falla fritt, vilket ger möjlighet att mäta konens inträngningsdjup. Lerans sensitivitet kan bestämmas enligt ekvation (3.1):

$$S_t = \frac{\text{ostörd skjuvhållfasthet}}{\text{omrörd skjuvhållfasthet}} \quad (3.1)$$

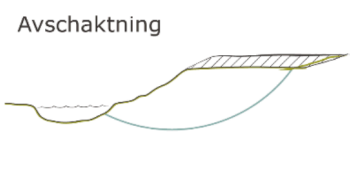
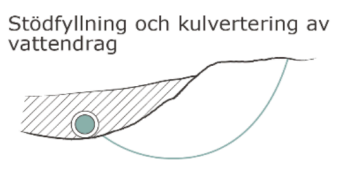
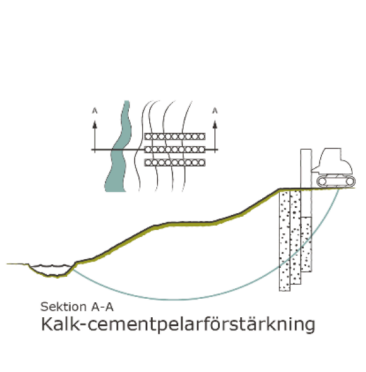
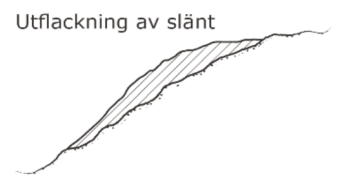
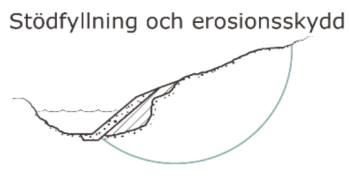
För att sedan klassificeras enligt Tabell 1. Metoden ger ett mått på lerans sensitivitet och dess kvicka egenskaper kan bestämmas (Statens Geotekniska Institut, 2018).

## 3.5 Geotekniska utmaningar

Lera av kvick karaktär är inte i sig en utlösande faktor till jordskred, men förekomst av högsensitiv lera kan utöka storleken av befintliga skred markant. Kvicklera är väldigt känsligt för inverkan på dess naturliga struktur, som vid påfrestning kan leda till total förlust av dess hållfasthet och styrka. (Knappet & Craig, 2020) En slänt befinner sig oftast i ett jämviktsläge och rubbas av mänskliga faktorn. Det initiala skredet kan där med utökas och få en bakåtdrivande effekt när den omkringliggande jorden utsätts för störning och dess struktur och hållfasthet påverkas. Där av är det extra viktigt att den totala stabiliteten blir i vara tagen och markens förstärks vid behov. Det finns ett antal jordförstärkningsmetoder med stabiliserande effekt att ta i anspråk beroende på omgivande förhållanden, se Figur 7.

- Avlastning/borttagning av pådrivande krafter
- Ökning/säkrande av mothållande krafter

- Förstärkning av slänt

Avlastning/borttagning pådrivande krafter	Ökning/säkrande mothållande krafter	Förstärkning av slänt
<p>Avschaktning</p> 	<p>Stödfyllning och kulvertering av vattendrag</p> 	 <p>Sektion A-A Kalk-cementpelarförstärkning</p>
<p>Utflockning av slänt</p> 	<p>Stödfyllning och erosionsskydd</p> 	

Figur 7 Stabilitetshöjande åtgärder (Skredkommissionen, 1995).

### 3.5.1 Avlastning pådrivande krafter

Avschaktning av en slänt är en metod som har till avsikt att minska de pådrivande krafterna som påverkar en slänts stabilitet. Metoden är simpel att utföra med låga kostnader till följd. Avschaktning av en slänts krön ger störst effekt vid flacka släntlutningar, djupa glidytor och odränerad analys (Skredkommissionen, 1996). Metoden innefattar ofta schaktning med tunga arbetsfordon som påverka stabiliteten i området. Vibration och rörelser kan bidra negativt på jord av hög sensitivitet. Metoden bedöms även vara olämplig i slänter vars stabilitet klassas som otillräcklig med avseende på höga portryck, släntens mothållande krafter minskas då vid avschaktning.

### 3.5.2 Ökning mothållande krafter

Stödfyllning kan placeras vid släntens fot för att öka de mothållande krafterna till släntens stabilitet. Det är vanligt att man kombinerar ovannämnda metod med förstärkningen vid släntfoten. Fyllnadsmassor från avschaktningen nyttjas till utjämningen av slänten. Metoden gör sig lämplig vid djupa glidytor och när stabilitetsproblemen orsakas av höga porvattentryck. Det är viktigt att ta i beaktning tilläggslastens mäktighet i jämförelse mot förkonsolideringstrycket, framför allt i kompressibla jordar där deformationer kan uppstå (Skredkommissionen, 1996).

### 3.5.3 KC-Pelare

Slänter där bank skall påföras och stabiliteten klassificeras som otillfredsställd kan KC-pelare vara aktuell åtgärd för ökad hållfasthet i jorden. Metoden används främst vid finkorniga jordar. Val av bindemedel kan variera beroende på jordart och önskad hållfasthet men utgörs vanligtvis av kalk och cement (Svenska Geotekniska Föreningen, 2003; Trafikverket, 2016). Metoden är en stabiliserande åtgärd där ett roterande blandningsverktyg förs ned i jorden till

önskat djup. Vid uppföring sprutas blandning som binder sig tillsammans med jorden. Vid omrörning blandas jorden till en massa utan i princip någon hållfasthet. Detta ställer krav på tidigare hållfasthetsegenskaper i jorden. Vid installation påförs jorden av vibrationer samt ett förhöjt portryck vilket kan ha betydande konsekvenser för att temporära stabiliteten bibehålls. Den betydande hållfastheten uppnås efter att bindemedlet har reagerat med jorden och porövertrycken har utjämnats (Skredkommissionen, 1996). Vid installation av KC-pelare är det vanligt att tillfälliga stödbankar uppförs under installationen.

### **3.6 Risker**

Även om dessa stabiliserande åtgärder har som avseende att förstärka jorden är det viktigt att dessa utförs med försiktighet under uppförandet. Vid anläggningsarbete utsätts jorden för hög påverkan av vibrationer från transport samt schaktning. Dessa kan indirekt vara en bidragande orsak till initiering av ett skred. Vid påförning av tryckbank förekommer ofta ändtippning från dumper vilket i påfrestning kan jämföras med effekten av bergmassor som rasar (Åhnberg, o.a., 2011).

### **3.7 Restriktioner**

Vid förekomst av högsensitiv lera behövs åtgärder tas vid exploatering av ny mark. Anläggningsarbeten, förstärkningar och byggnation behövs göras i varsamhet och arbetet behövs observeras av sakkunnig. Det är av yttersta vikt att arbetet förhåller sig till restriktionerna vid projektering såväl som byggskedet.

## 4 Släntstabilitet

Släntstabiliteten är beskrivande för hur motståndskraftig en naturlig eller anlagd slänt är mot skred eller ras. Ett brott kan uppstå vertikalt och horisontellt beroende på vilken kraft det är som sätter jordelementet ur jämvikt. Ofta är det en kombination av dessa som sätter en jordmassa i rörelse. Ett brott uppstår när bärighetsförmågan av ett element i jorden är mindre än den påförande lasten. Ett områdes skredbenägenhet är alltså helt avgörande av jordens egenskaper, dess hållfasthet, yttre laster och topografi. I Sverige är det ofta en kombination av naturliga och mänskliga inspel som påverkar en jords skredbenägenhet (Statens Geotekniska Institut, 2023). Stabiliteten för en slänt bedöms ofta av en framräknad faktor av säkerhet där storleken mellan mothållande och de pådrivande krafterna förhåller sig till varandra. Förhållandet av totalsäkerhetsfaktorn definieras av Ekvation (1):

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (3.1)$$

Där

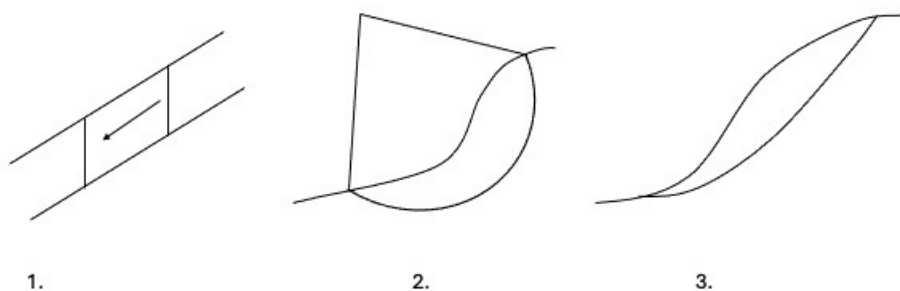
$F$  = Beräknad säkerhetsfaktor

$\tau_f$  = Tillgänglig skjuvhållfasthet

$\tau_{mob}$  = Mobiliserad skjuvspänning

Brott kan förväntas inträffa vid  $F = 1$ . Den säkerhetsfaktor som behövs för att en slänt skall tänkas vara stabil är beroende av jordart, modellosäkerhet, nyttjande av mark samt tänkbara konsekvenser (Statens Geotekniska Institut, 2003).

Vid beräkning av släntstabilitet är det viktigt att skapa sig en geoteknisk modell av den slänt där stabiliteten behöver bedömas. Geometrin av slänten och dess glidyta är av stor betydelse och man brukar skilja på 3 glidytors form, se *Figur 8*.



*Figur 8.1. Plana glidytor, 2. Cirkulär-cylindriska glidytor, 3. Sammansatta glidytor (Författarens egen bild).*

De matematiska analyserna för en slänts stabilitet blir fort av avancerad och tidskrävande karaktär med avseendet på antalet glidytor som behövs kontrolleras för identifieringen av den mest kritiska. Även med datorkraft måste geometrier definieras och jordprofiler skapas. Vid tidigt stadiet i projekteringen av en slänts stabilitet kan det vara aktuellt att använda sig av en överslagsberäkning.

## 4.1 Odränerad och dränerad skjuvhållfasthet

Vid stabilitetsberäkningar av en slänt, oavsett analysens omfattning behöver man ta hänsyn till jordens hållfasthetsegenskaper, den tillgängliga hållfastheten för brott  $\tau_f$  kan beskrivas enligt (Skredkommisionen, 1995) som:

$$\text{Odränerad skjuvhållfasthet: } \tau_f = \tau_{fu} = c_u \quad (3.2)$$

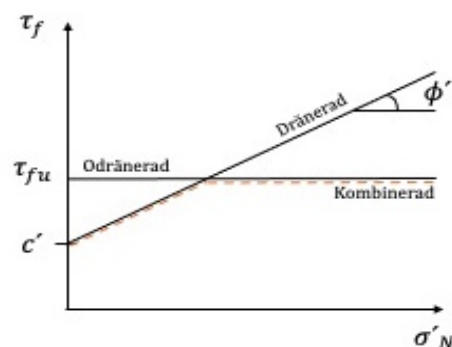
$$\text{Dränerad skjuvhållfasthet: } \tau_f = \tau_{fd} = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (3.3)$$

Dem delas ofta in med avseende på förväntade dräneringsförhållanden i jorden. Jorden delas också in med hänsyn till aktuell jordart. Kohesionsjord är en mycket finkornig jord där hållfastheten är oberoende av närvarande effektivspänningar. ( $\tau_f = \tau_{fu} = c_u$ ). Friktionsjord är av större kornstorlek med en grövre struktur är skjuvhållfasthet proportionell mot effektivspänningen och kan uttryckas med koheciensintercept  $c'$  och en friktionsvinkel  $\phi'$  enligt (ekvation 3.3): ( $\tau_f = \tau_{fd} = c' + \sigma' \tan \phi'$ ) (Skredkommisionen, 1995).

Friktionsjord har allt som oftast så pass hög permeabilitet och kan där av beaktas som ett dränerande material vilket innebär att skjuvhållfasthet bestäms av  $c'$  och  $\phi'$ .

I finare jord som silt och lera behövs både den dränerande och den odränerade skjuvhållfasthet tas hänsyn till. Tidsperspektivet spelar in på val av analys. En lera kan en beaktas som dränerad med hållfastparameterna ( $c'$  och  $\phi'$ ) vid långtids belastning. Även kallat effektivspänningsanalys. Vid korttidsbelastning, där porvattentrycket är okänt används de dränerade hållfastparameterna ( $\tau_{fu}$ , alt.  $c$  och  $\phi$ ), även kallat totalspänningsanalys (Sällfors, 2013).

Materialparametrar väljs med avseende på beräkningsmetod men också med hänsyn till analysmetod. I verkligheten är ofta tillstånden en kombination av båda fallen och speciellt vid LEM används en kombination av dränerat och odränerat fall.



Figur 9 Skjuvhållfasthet som funktion av effektivspänning (Författarens egen bild).

## 4.2 Beräkningsmetoder

### 4.2.1 Direktmetoden [Janbu 1954]

En mycket använd och beprövad metod för att beräkna släntstabilitet är "Direktmetoden". En överslagsberäkning där man tar hjälp utav förutbestämda diagram utvecklad av Janbu (1954). Överslagsmetoden gör sig mest lämpad vid inledande undersökningar samt besiktningar (Skredkommisionen, 1995). Beräkningsmodellen är en mycket förenklad modell men ger ofta en bra uppfattning av säkerhetsfaktorns storlek och dess brott för ett jordelement. Användningen av metoden förutsätter helt dränerad eller helt odränerat fall och kan ej användas vid kombinerad analys.

Användningen av direktmetoden förutsätter ett cirkulärcylindriskt brott och enkla omständigheter.

I direktmetoden beräknas först en term för pådrivande tryck enligt ekvation (3.2)

$$P_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_q \mu_w \mu_t} \quad (3.2)$$

Där:

$\gamma$  – Jordens tunghet,  $[\frac{kN}{m^3}]$

$H$  – Släntens höjd,  $[m]$

$q$  – Utbredd slänt på krön,  $[\frac{kN}{m^2}]$

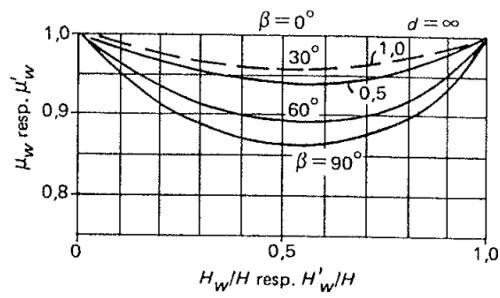
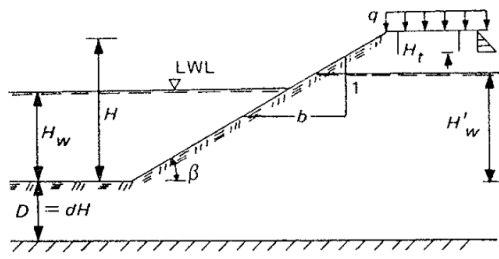
$\gamma_w$  – Vattnets tunghet,  $[\frac{kN}{m^3}]$

$H_w$  – Vattendjup vid släntfot,  $[\frac{kN}{m^2}]$

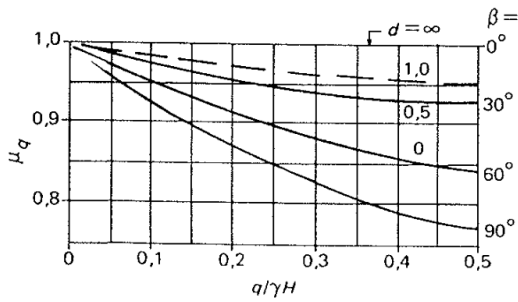
$\mu_q$  – Korrektionsfaktor, yttre last

$\mu_w$  – Korrektionsfaktor, yttre vattenmotstånd

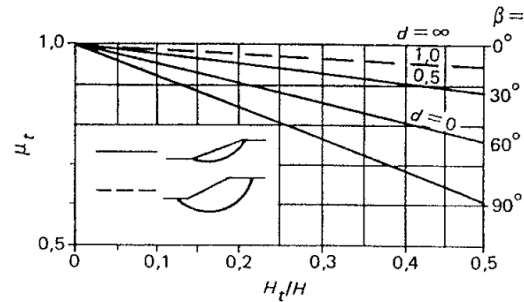
$\mu_q$  – Korrektionsfaktor, vattenfylld spricka



Korrektionsfaktor för yttre ( $\mu_w$ ) resp inre ( $\mu'_w$ ) vattenstånd



Korrektionsfaktor för yttre last  $\mu_q$



Korrektionsfaktor för sprickor i torrskorpan

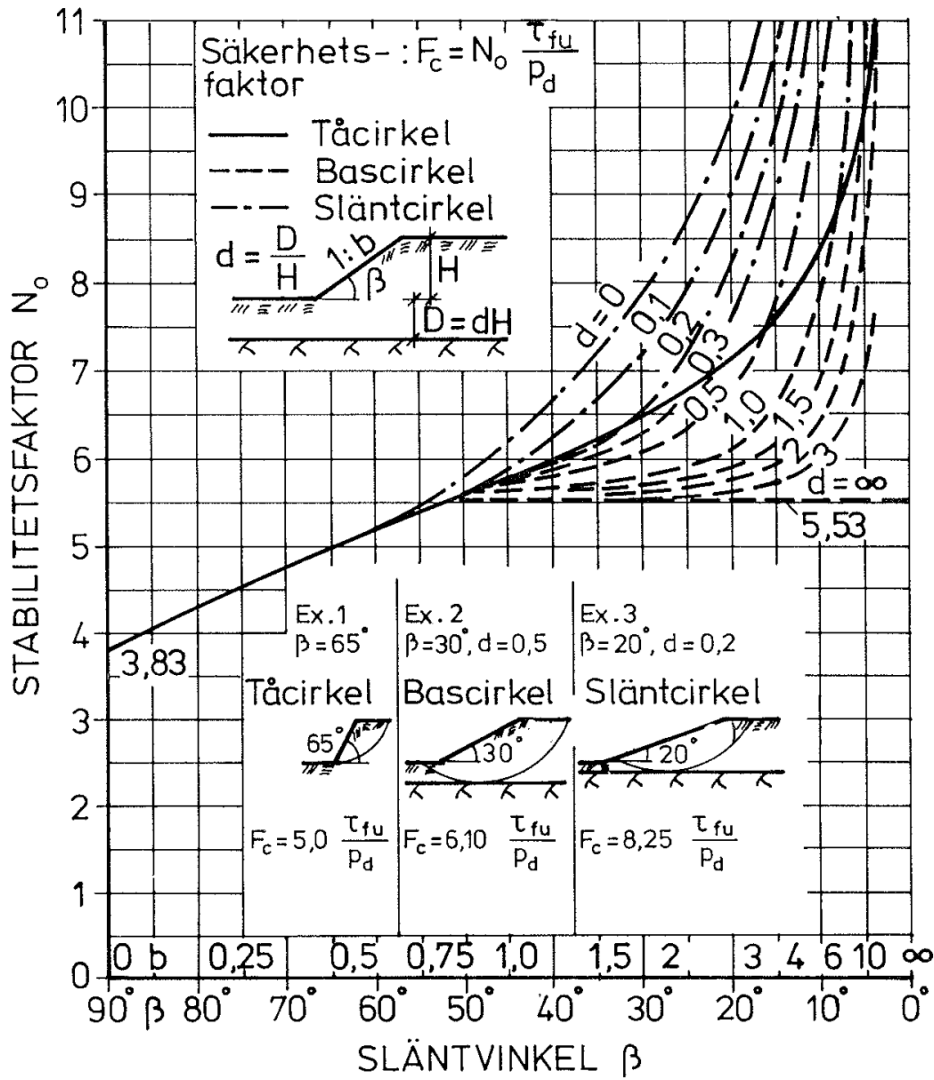
Figur 10 Korrektionsfaktorer för Direktmetoden, hämtad från (Skredkommissionen, 1995).

### - Odränerad analys

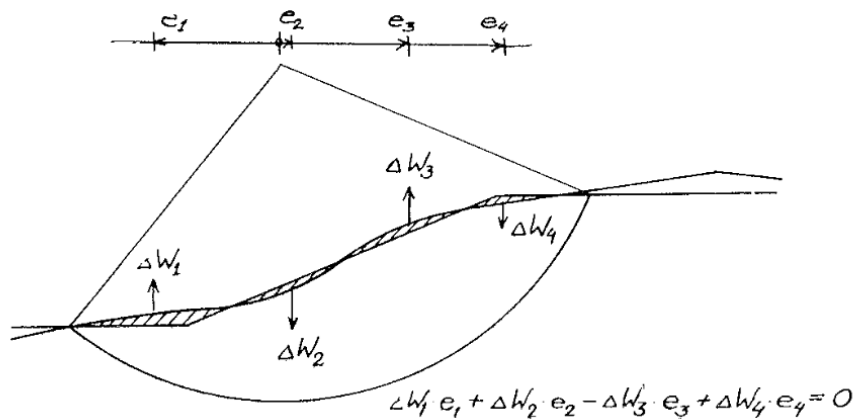
För den odränerade analysen antas jordens skjuvhållfasthet vara konstant med djupet och lika med  $\tau_{fu}$ . Säkerheten för farligaste cirkulär-cylindriska glidyta kan då beräknas enligt:

$$F_c = N_0 \frac{\tau_{fu}}{P_d} \quad (3.3)$$

$N_0$  – *Stabilitetsfaktorn*, plockas ur figur 8 där även den farligaste glidyta typ framgår. Vid förenkling av naturliga slänter är det viktigt att man minskar felkällan så mycket som möjligt och är noggrann med att skärning av slänt ungefärlig mängd som tillagts med avseende på moment, Se Figur 11.



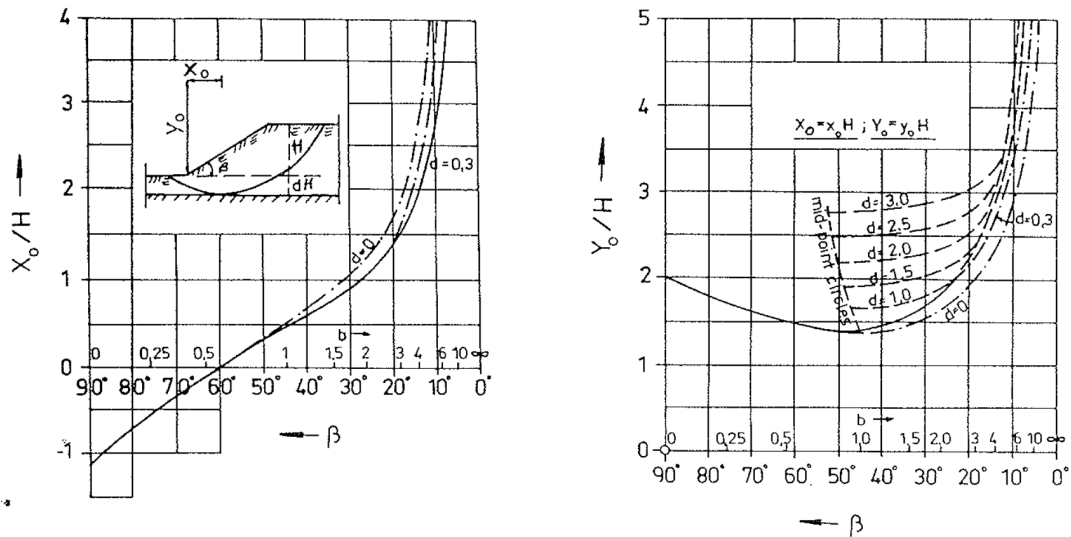
Figur 11 Släntfaktorn ( $N_0$ ) variation med slänthöjd, släntlutning, och djup till fast botten (Skredkommissionen, 1995).



Figur 12 Tillvägagångssätt, förenkling av slänt (Skredkommissionen, 1995).

Det är viktigt att beakta fall där jordens skjuvhållfasthet är inte konstant med djupet utan varierar. Det kan leda till att när man har bestämt cirkelbågens läge,

se, Figur 10 så får man nyttja ett medelvärde av jordens skjuvhållfasthet och beräkna  $F_c$ .



Figur 13 Diagram för att bestämning kritiska glidyttans läge (Skredkommisionen, 1995).

- Dränerad analys

Bedömningen av säkerhetsfaktorn vid den dränerade analysen skiljer sig ifrån den odränerade. De kommande diagrammen är endast tillpassade tårcirklar. analysen skiljer sig än den odränerade. Pådrivande tryck beräknas enligt Ekvation 3.4.  $H'_w$  och  $\lambda_{c\phi}$  införs.  $P_e$  och  $\mu'_w$  tas även från, Figur 7.

$$P_e = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H'_w}{\mu'_w} \quad (3.4)$$

$H'_w$  = Inre vattenmotstånd  
 $\mu'_w$  = Korrektionsfaktor, inre vattenmotstånd

$$\lambda_{c\phi} = \frac{P_e \tan \phi'}{c'} \quad (3.5)$$

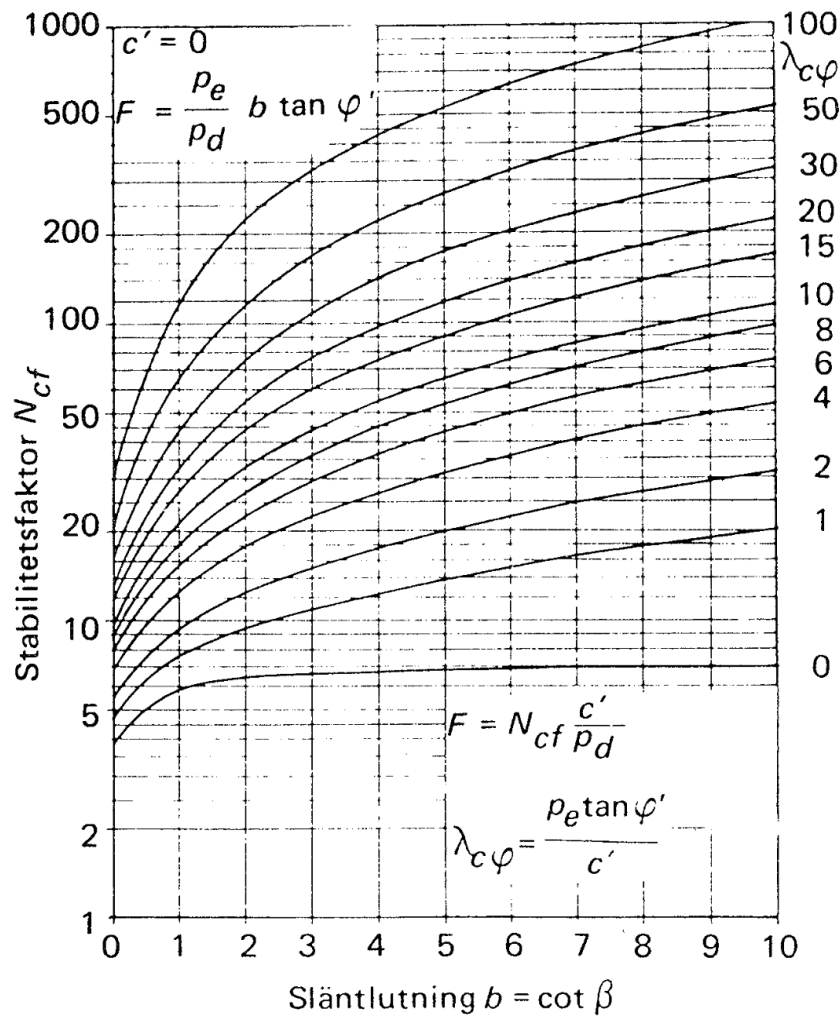
Vid  $c' > 0$  beräknas säkerhetsfaktorn enligt ekv. (3.6)

$$F_{c\phi} = N_{cf} \frac{c'}{P_d} \quad (3.6)$$

Vid  $c' = 0$  beräknas säkerhetsfaktorn enligt ekv. (3.7)

$$F_{c\phi} = \frac{P_e}{P_d} b \tan \phi' \quad (3.7)$$

Stabilitetsfaktorn  $N_{cf}$  hämtas ur Figur 14, och koordinaterna för den kritiska glidytan hämtas ur Figur 15.



Figur 14 Bestämning av  $N_{cf}$  (Skredkommisionen, 1995).



För det dränerade fallet beror den farligaste glidyten på hur stor del av jordens hållfasthet som utgörs av kohesion. Om hållfastheten utgörs av större del friktion mellan kornen, leder det till en grundare glidyta. Utifall  $c' = 0$ , går glidytan i släntens överkant.

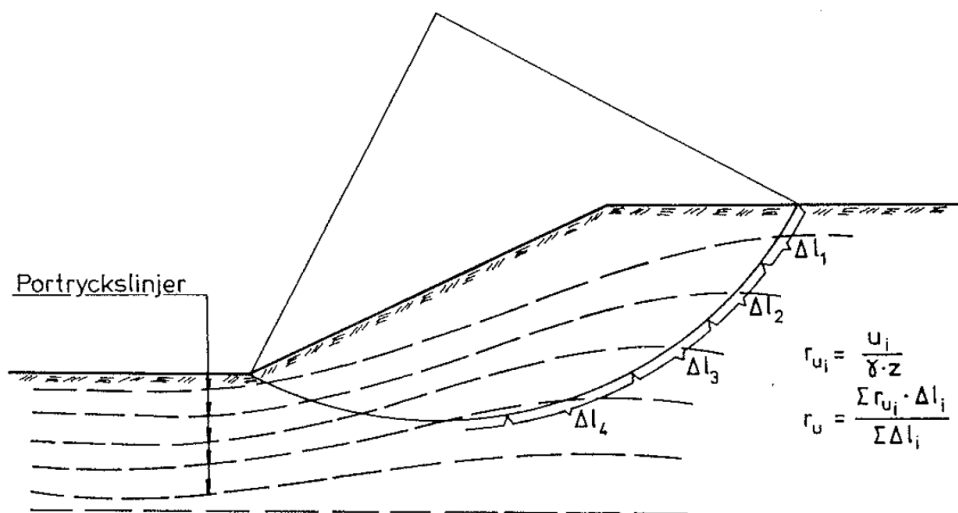
Användandet av diagrammen förutsätter att portrycket i slänten är hydrostatiskt med en horisontell 0-nivå. Det avviker ofta från verkligheten. Detta kan beaktas i slänten genom att efter glidytagens läge har blivit bestämt, delas in i ett antal cirkelsegment och parametern  $r_u = \frac{u}{\gamma z}$  införs och blir bestämt för varje delsegment. Ett medelvärde räknas fram enligt ekvation 3.8.

$$r_u = \frac{\sum r_{ui} \Delta l_i}{\sum \Delta l_i} \quad (3.8)$$

Och där kan parametern  $p_e$  beräknas enligt ekvation (3.9)

$$p_e = (1 - r_u) \gamma H \quad (3.9)$$

Som används vid beräkning av  $\lambda_{c\phi}$ , ekvation (3.5)

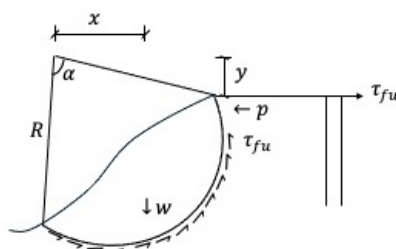


Figur 16 Beräkning av parametern  $r_u$  för en slänt då portrycksfördelningen är känd (Skredkommissionen, 1995).

## 4.2.2 Cirkulär cylindrisk glidyta (Limit Equilibrium Method's)

Janbus metod lämpar sig som tidigare nämnt till en första uppskattning om släntens stabilitet. Metoden är begränsad och idealiserande i antaganden gällande släntens geometri men också hållfasthetsegenskaper. Vid heterogen jordlagerföljd där hållfastheten varierar och vid olika förutsättningar, behövs ytterligare analytiska men också numeriska beräkningar (Skredkommisionen, 1995).

Vid cirkulär cylindriska glidytor i homogen jord där hållfastheten är konstant med djupet, se Figur 17, kan säkerhetsfaktorn beräknas enligt ekvation (3.10). Säkerhetsfaktorn definieras kvoten mellan medelvärdet för jordens hållfasthet och den mobiliserade skjuvspänning (Sällfors, 2013). Säkerhetsfaktorn kan då under odränerade förhållanden beräknas enligt ekvation 3.11.



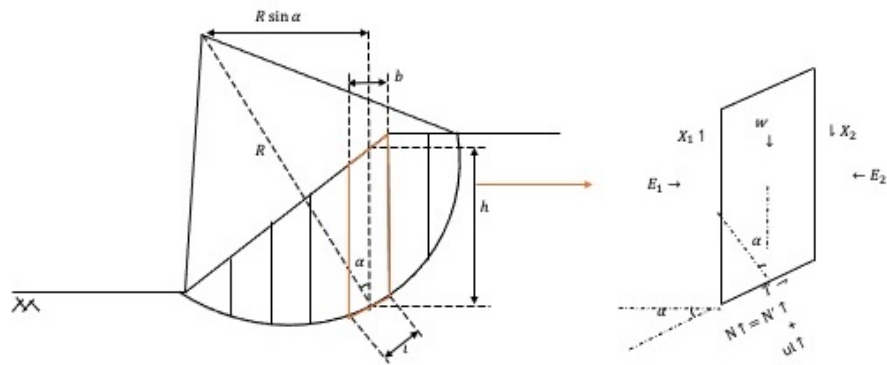
Figur 17 Cirkulär cylindrisk glidyta, odränerad analys. (Författarens egen bild)

$$F_c = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (3.10)$$

$$F_c = \frac{\tau_{fu} * R^2 * \alpha}{(W * x) + (p * y)} \quad (3.11)$$

## 4.2.3 Lamellmetoden

Det är vanligt att jordprofilen som ska beräknas inte är homogen. Det förekommer ofta skillnader i jordens skjuvhållfasthet samt skrymdensitet. När det förekommer svårigheter att beräkna vikten W, samt tyngdpunktens läge för glidytan så kan glidytan delas upp i ett antal lameller (Sällfors, 2013). För varje lamell beräknas kraft och momentjämvikt individuellt för var och en. En indelning kan se ut som enligt Figur 18.



Figur 18 Cirkulär cylindrisk glidkropp, indelade i lameller med angivna krafter (Författarens egen bild).

Där:

$W$  – Totala vikten av lamellen,  $W = \gamma bh$

$N$  – Normalkraften som verkar på lamellens bas, består av 2 komponenter

$N = N' + ul$

$N'$  – Effektiva normalkraften

$ul$  – Porvattentrycket, mittpunkten på basen av lamellen

$T$  – Skjuvkraften som verkar på lamellens bas,  $T = \tau l$

$l$  – Längden på basen

$X_i$  – Skjuvkraften som verkar på lammelen

$E_i$  – Normalkrafter som verkar på lamellens sidor

$R$  – Radie, glidyta

$h$  – Höjd av lamell

$b$  – Bredd av lamell

$\alpha$  – Vinkel mot horisontalplan

$R \sin \alpha$  – Hävarm till lamellen

Lamellmetoden är mycket utbredd metod som är den allra vanligaste att använda vid släntstabilitetsanalyser per dags dato. Lamellmetoden grundar sig på jämvikt, där hållfasthetsegenskaperna i glidytan antogs konstant per lamell, vilket ger underlag till att normalspänningen och skjuvhållfasthet är varierande. Lamellmetoden kan utföras för hand med vissa begränsningar men är väldigt applicerbar och funktionell tillsammans med datorkraft. Det finns flertalet härledningar och förenklingar, vid handberäkning utnyttjas ofta de varianterna med högst grad av antaganden. Det är vanligt att de interlaminära krafterna försummas (Statens Geotekniska Institut, 2023).

Fellenius metod [1936], även kallad *Ordinary Method of Slices*, är en av de första metoderna för beräkning av slänters stabilitet med indelning av lameller (Krahn, 2003). Metoden förutsätter en cirkulär cylindrisk glidyta och att ett antagande krafterna som spelar in mellan lamellerna att vara noll. Beräkningen ger en uppskattad säkerhetsfaktor men som på grund av försummandet av krafter visar sig vara underestimerad med ca 5 – 20% (Knappet & Craig, 2020). Fellenius metod är baserad på momentjämvikt och tar ej hänsyn till krafternas jämvikt. Säkerhetsfaktorn kan där med beräknas, vid effektivspänning analys, parametrarna för  $(c', \phi')$  med Fellenius metod enligt ekvation (3.12):

$$SF = \frac{c'La + \tan \phi' \sum_i N'_i}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \quad (3.12)$$

År 1955 utvecklade Bishop, en metod där han visade hur dem interlaminära normalkrafterna som verkar på lamellens sida kan tas hänsyn till utan antagande om 0. Metoden kallas *Bishop's simplified Method*. Antagandet innebär att normalkrafterna,  $(E_1, E_2)$  är horisontella och av samma storlek enligt:

$$(E_1 - E_2 = 0) \quad (3.13)$$

Bishops förenklade metod baseras även med avseende på momentjämvikt. Problemet är statiskt obestämt och skjuvkrafterna som verkar längs sidorna av lammen, i  $(X_1, X_2)$  bortses ifrån. FS beräknas därför enligt ekvation (3.14):

$$SF = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{c_i' b + (W_i - u_i b) \tan \phi_i' \sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi_i' \tan \alpha_i}{SF}} \quad (3.14)$$

Lösningen av säkerhetsfaktorn kräver iteration men är matematiskt lösbar för hand och lämplig att utnyttja med hjälp av kalkylblad. Metoden erbjuder användaren att ta hänsyn till  $(E_1, E_2)$  vid lösningar. Säkerhetsfaktorn kommer vara underestimerad, men med en gräns som osannolikt kommer överstiga 7% felmarginal (Knappet & Craig, 2020).

Metoder som tar hänsyn till *både* kraft och momentjämvikt går ofta under namnet rigorösa beräkningsmetoder. Metoderna har utvecklats i takt med att beräkningshjälpen från datorer inte är begränsad på samma sätt som på 1960-talet. Nedan följer en tabell där översiktligt visas vilken form av jämvikt som beräkningsmetoderna tar hänsyn till.

Tabell 2 Metoder och dess krafthänsyn (Knappet & Craig, 2020)

Metod	Momentjämvikt	Horisontell kraftjämvikt	Interlaminär Normalkraft (E)	Interlaminär skjuvkraft (X)	Lutning av (X/E) resultant
Fellenius	Ja	Nej	Nej	Nej	Ingen
Bishop's Simplified	Ja	Nej	Ja	Nej	Horisontal
Janbu's Simplified	Nej	Ja	Ja	Nej	Horisontal
Spencer	Ja	Ja	Ja	Ja	Konstant
Morgenstern - Price	Ja	Ja	Ja	Ja	Funktion

## 4.2.4 Spencer & Morgenstern and Price

Spencer's metod och Morgenstern and Price är två rigorösa beräkningsmetoder som är baserade på lamellmetoden, introducerades på sent 1960 tal. De båda metoderna är mycket lämpliga för att analysera släntstabilitet med hjälp av datorkraft. Metoderna tar hänsyn till både moment och kraftjämvikt där interlaminära normalkrafterna  $E_n$  och de interlaminära skjuvkrafterna,  $X_n$  tas hänsyn till.

## 4.3 GeoStudio 2020

GeoStudio är en mjukvara där ett antal olika program med inriktningar har utvecklats för att hjälpa användaren att visualisera och analysera geotekniska modeller. SLOPE/W är den programvara där slänters stabilitet analyseras med avseende på geometri, jordens hållfasthetsegenskaper, portrycksförhållanden, samverkan mellan jord och strukturell förstärkning och pålagd belastning.

Beräkningsmodellen är baserad på Limit Equilibrium Method's och låter användaren modellera geometri för slänten av hand eller via importerade markdata (GeoStudio, 2018). Limit equilibrium avser krafterna som verkar på en kropp, vill vara stationära. Det avser statisk jämvikt,  $\sum M_o = 0$ ,  $\sum F_h = 0$  och  $\sum F_v = 0$ . LEM grundar sig på två viktiga antaganden:

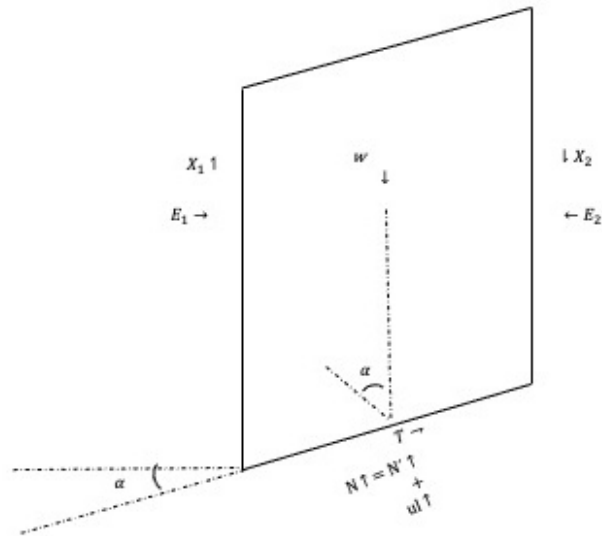
- Säkerhetsfaktorn är konstant längs glidyten
- Varje lamell har samma säkerhetsfaktor

Programmet tillhandahåller en mängd olika alternativ och valmöjligheter för sin analys. SLOPE/W skapar möjligheter för en mer grundläggande analys av stabiliteten av sin slänt. Mjukvaran hittar den mest kritiska glidyten med lägst säkerhetsfaktor med val av jämviktsmetod. Det går lika lätt med Direktmetoden som med en av de mer noggranna, Morgenstern and Price men också Spencer's metod. Med grafisk framföring låter det användaren till högre grad analysera och förutse vad som händer vid en analys mer än en säkerhetsfaktor som resultat. (GeoStudio, 2018). Programmet låter användaren vänligt byta mellan analysmetoder men också beräkningsförutsättningar.

Vid modellering i SLOPE/W finns det olika sätt att grafiskt visa den kritiska glidyten. En mycket användarvänlig metod är "Entry, Exit-metoden" där du markerar lägena där mjukvaran ska söka efter den kritiska glidyten. Du väljer också antalet glidytor programmet ska analysera.

### 4.3.1 General limit equilibrium method

Under 1960-talet utvecklade Morgenstern and Price en metod där det tas hänsyn till både kraftjämvikt och momentjämvikt. Kraftindelningen illustreras i *Figur 19*.



Figur 19 Kraftjämvikt för en lamell (Författarens egen bild).

Metoden omfattar en rad viktiga antagande och baserar sig på samtliga av dem tidigare nämnda beräkningsmetoderna. Grunden för *General limit equilibrium method* baserar sig på att två ekvationer för säkerhetsfaktorn tas fram (Krahn, 2003). Idén om att använda sig av två ekvationer av säkerhetsfaktorn blev presenterad. Den ena ekvationen löser en säkerhetsfaktor för momentjämvikt, ( $F_m$ ) och den andra för kraftjämvikt ( $F_f$ ). Dem interlaminära skjuvkrafterna tas hänsyn till i GLE via ekvation (3.15), som presenterades av Morgenstern and Price (1965).

$$X = E\lambda f(x) \quad (3.15)$$

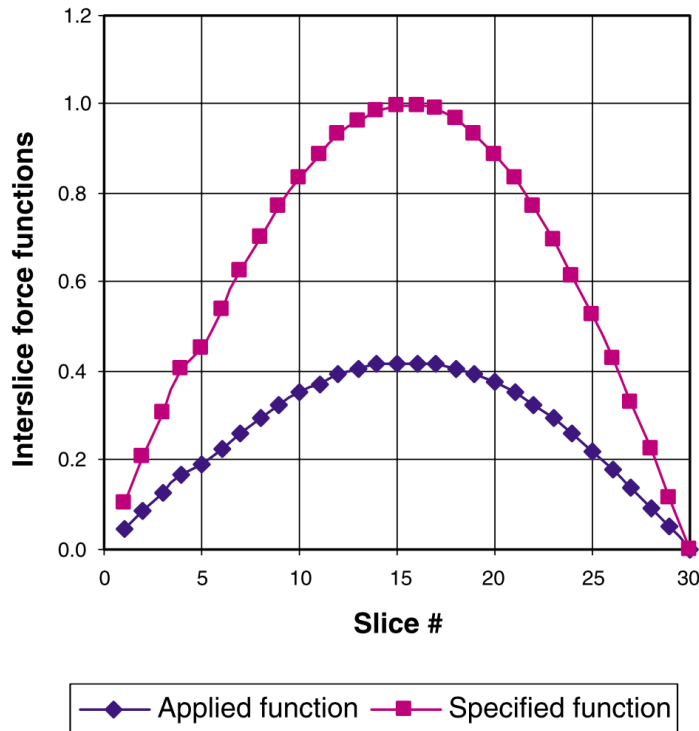
$f(x)$  – funktion

$\lambda$  – Procent av funktionens användning, i decimalform

$E$  – Interlaminär normalkraft

$X$  – Interlaminär skjuvkraft

Ekvation (3.15) visar sambandet mellan normalkrafterna och skjuvkrafterna som verkar mellan lamellerna vilket gör problemet statiskt bestämt. Ekvationen  $f(x)$  är ofta antingen konstant, eller vald till en halv-sinusfunktion (Krahn, 2003). Se Figur 20.



Figur 20 Övre funktion - Specifierad funktion, halv sinusfunktion. Undre funktion - Den som används. Lambda är förhållandet mellan dem. (Krahn, 2003)

Ekvationen för säkerhetsfaktorn med avseende på momentjämvikt, ( $F_m$ ) ges av:

$$F_m = \frac{\Sigma[c'\beta R + (N - u\beta)R \tan \phi']}{\Sigma Wx - \Sigma Nf \pm Dd} \quad (3.16)$$

Och ekvationen för säkerhetsfaktorn med avseende på kraftjämvikt, ( $F_f$ ) ges av:

$$F_f = \frac{\Sigma[c'\beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\Sigma N \sin \alpha - D \cos \omega} \quad (3.17)$$

Där:

$c'$  – Den effektiva kohesionen

$\phi'$  – Den effektiva friktionsvinkeln

$u$  – Porvattentrycket

$N$  – Normalkraften på lamellens bas

$W$  – Lamellens Vikt

$D$  – Last för slänt

$R, \beta, x, f, d, \omega$  – Geometriska parametrar

$\alpha$  – Vinkel av lamellens bas

Normalkraften på lamellens bas förekommer i både ekvation (3.16), samt (3.17).

$N$  beräknas enligt ekvation (3.18):

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (3.18)$$

N kommer alltså vara en funktion av:

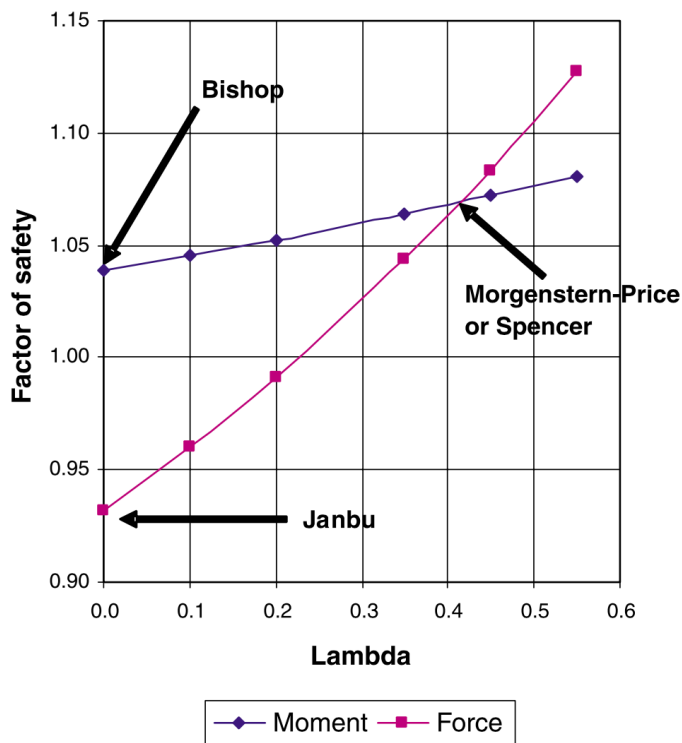
$X_n$  – Interlaminär skjuvkraft

$F_n$  – Säkerhetsfaktor

$W$  – Lamellens vikt

Jordens hållfasthet och geometri

Där  $F = F_m$  i ekvationen för momentjämvikt, och  $F = F_f$  vid beräkning av kraftjämvikt. General limit equilibrium metoden beräknar ett antal olika säkerhetsfaktorer för moment och kraftjämvikt,  $F_m, F_f$ , för olika värden på  $\lambda$ . Funktionerna  $F_m, F_f$  plottas sedan mot  $\lambda$  i en GLE-plot (Krahn, 2003). Se Figur 21.



Figur 21 General limit equilibrium plot. Säkerhetsfaktor mot Lambda (Krahn, 2003)

Figur 21 visar också hur säkerhetsfaktorn varierar med avseende på vilken beräkningsmetod som används.  $\lambda$  representerar de interlaminära skjuvkrafterna. Bishop's förenklade metod tar endast hänsyn till momentjämvikt, och vid  $\lambda = 0$  ges säkerhetsfaktorn för momentjämvikt utan avseende på interlaminär skjuvning. Janbu's metod tar endast hänsyn till kraftjämvikt, så vid  $\lambda = 0$  visas säkerhetsfaktorn med avseende på kraftjämvikt, utan hänsyn till interlaminär skjuvning. Figur 21 visar att säkerhetsfaktorn blir underestimerad i båda beräkningsfallen för vald lamell och att Morgenstern and Price's metod hittas vid ett värde på  $\lambda$  där  $F_m = F_f$ .

## 5 Beräkningsförutsättningar

Stabiliseringsberäkningarna i detta arbete har förekommit i en vald sektion av det av mått 550 x 280m stora skredområdet. Det sträckte sig emellan sektion 7/000 – 7/ 550. Vald sektion är 7/480, dels för sin närhet till Taske Å, och för att utbredningen av tryckbanken bedömdes vara av största mäktighet där. Figur 22 visar utvald sektion, före påbörjan av byggnation.



Figur 22 Flygfoto över skredområdet taget innan påbörjan av etapp Småröd - Saltkällan. (Hämtat från Lantmäteriet)

### 5.1 Jordlagerföljd

Modelleringen i GeoStudio baserar som nämnt på tidigare uppmätt data av områdets geotekniska egenskaper. Mätningarna har utförts i projekteringsstadiet med sonderingar samt vingförsök i fält. Det har också tagits prover med skruvprovtagare samt standard kolvprovtagare, dessa har analyserats på laboratorium och har härlett till bestämning av skrymdensitet, vattenkvot, flytgräns och odränerad skjuvhållfasthet. Lerans sensitivitet mättes med fallkonsförsök (Statens haverikommision, 2009). Provtagningen har utförts i närområdet av planerad sträcka för E6 inom en maxdistans av 30 m från vägens mittlinje. Provtagningen härlett till en generell jordlagerprofil enligt, Figur 23.





## 5.4 Dränerade skjuvhållfasthet parametrar

I analysen ansattes lagren med lera till att ha en dränerad skjuvhållfasthet, där kohesioninterceptet ökade med djupet, enligt  $c' = 0.1 * c_u$ , och lerans friktionsvinkel ansattes enligt  $\varphi' = 30^\circ$ .

Vägbank av krossad sprängsten ansågs som dränerad och dess egenskaper sattes för bank av sorterad sprängsten enligt (Trafikverket, 2016) en tungnet 18  $kN/m^3$  och dess friktionsvinkel till  $\varphi' = 38^\circ$ .

Den temporära tryckbanken med ospecificerade fyllnadsmassor och den långsgående banken av matjord finns det vissa osäkerhetsfaktorer kring. Dessa material ansattes till 17  $kN/m^3$  respektive 24  $kN/m^3$  och anses dränerade med en friktionsvinkel på  $\varphi' = 30^\circ$ . En sammanfattning av de använda hållfasthetsparametrarna återfinns i Figur 27.

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Cu-Top of Layer (kPa)	Cu-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C/Cu Ratio	Phi-B (°)	Piezometric Line
■	Friktionsjord	Mohr-Coulomb	20	0	45						0	1
■	Fy (Stödbank)	Mohr-Coulomb	20	0,1	30						0	1
■	Fyllning (Vägbank - Sprängsten)	Mohr-Coulomb	18	0,1	38						0	1
■	Kc-Pelare (Le-1)	Mohr-Coulomb	16,7	1,8	35						0	1
■	Kc-Pelare (Le-2)	Mohr-Coulomb	16,7	2	35						0	1
■	Le-1 (0-2m)	Combined, S=f(depth)	16,7		30	1,8	0	18	0	0,1		1
■	Le-1 (Ny E6)	Mohr-Coulomb	16,7	18	0						0	1
■	Le-2 (2-8m)	Combined, S=f(depth)	16,7		30	1,8	0,05	18	0,5	0,1		1
■	Le-3 (8-20m)	Combined, S=f(depth)	18		30	2,1	0,15	21	1,5	0,1		1
■	Let	Combined, S=f(depth)	18		30	1,8	0	18	0	0,1		1

Figur 27 Materialparametrar för kombinerad analys (Författarens egna bild).

## 5.5 Säkerhetsklass

Säkerhetsfaktorn definieras som tidigare nämnt enligt som kvoten av medelvärdena av jordens skjuvhållfasthet, och den mobiliserade skjuvspänningen längs glidytan som väntas mest kritisk. Baserat på vilken analys som utförs, jordens egenskaper och eventuell förekomst av kvicklera ställs krav på en viss säkerhetsfaktor för brott (Trafikverket, 2016). Kraven delas in i säkerhetsklasser med hänsyn till skadekonsekvens vid brott. (Vägverket, 2004)

Enligt Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner, ställs krav på uppnådd säkerhetsfaktor vid nybyggnation enligt, Tabell 3:

Tabell 3 Lägsta godtagbara värde på säkerhetsfaktor. Tabell hämtad från (Trafikverket, 2016)

Säkerhetsklass	Analysmetod	
	Odränerad, $F_c$	Kombinerad/Dränerad, $F_{komb}/F_\varphi$
1	1,35	1,2
2	1,50	1,3
3	1,65	1,4

Enligt Vägverket, 2004. Ska vald säkerhetsklass av konstruktion motsvara följande skadekonsekvens:

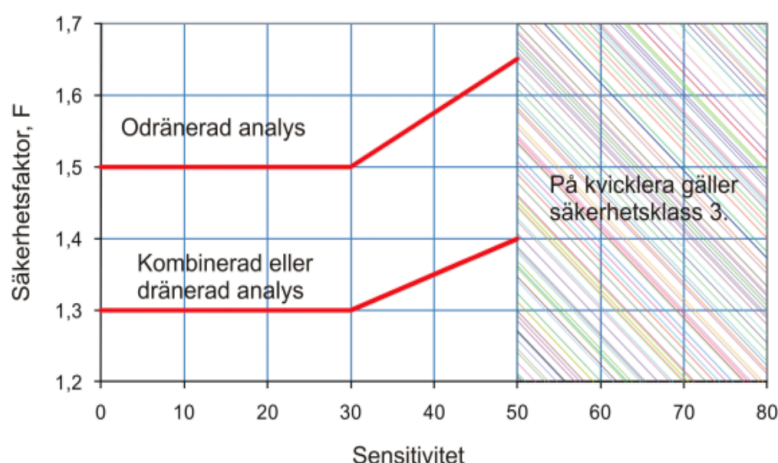
- SK 1 vid låg, liten risk för allvarlig personskada
- SK 2 vid normal, någon risk för allvarlig personskada
- SK 3 vid hög, stor risk för allvarliga personsador

Säkerhetsklasserna tillämpas i bruksskedet med avseende till brott. Riktlinjer för tillämpning av SK i projektering kan härledas enligt Vägverket 2004:

- Säkerhetsklass 1, ytterslänter samt gång- och cykelvägar.
- Säkerhetsklass 2, om konstruktionen inte innefattar nedanstående krav:
- Säkerhetsklass 3:
  - För konstruktion på undergrund där leran bedöms ha kvicka egenskaper.
  - För konstruktion där brott berör samhällsviktig anläggning.

I byggskedet får säkerhetsklass tillämpas till närmast lägre säkerhetsklass motsvarande vad som projekteras för permanentskedet (Vägverket, 2004).

Och för geokonstruktioner på undergrund av lera gäller enligt Trafikverkets tekniska krav, Figur 28:



Figur 28 Lägsta godtagbara värde på säkerhetsfaktor vid undergrund på lera. Diagram hämtat från (Trafikverket, 2016).

Vid bedömning av erforderligt krav på säkerhetsfaktor skiljs det på vilken typ av markkonstruktion samt omfattningen av omkringliggande bebyggelse och dess avsikt. Markområdena delas in i följande kategorier: Bebyggelseområden, avser områden där människor vistas kontinuerligt och huvudledningar för vatten, avlopp och el kan väntas förekomma. Ny exploatering, innefattar byggnader och anläggningar som tillkommer genom planläggning eller prövning (Skredkommisionen, 1995). Befintliga bebyggelseområden, innefattar markområden där tidigare exploatering har utförts. Områden som anses vara av låg betydelse, med låg frekvens av dagsvistelse men ändå är utbyggt kan vara parker, gång- och cykelvägar samt parkeringsplatser, faller inom kategorin "Annan mark". Naturmark avser mark där endast dagsvistelse av fåtal personer väntas. Kravet på uppnådd säkerhetsfaktor minskar vid lägre förväntad vistelse i området.

## 5.6 Geoteknisk kategori

Vid dimensionering väljs geoteknisk kategori av beställare i samråd med geoprojektör där det ställs krav på geotekniskundersökning, kontroll och besiktning som omfattar projektet i fråga. Värderingen av vilken kategori projektet ska utföras i bestäms tidigt, i samband med en översiktlig geoteknisk undersökning och överslagsberäkning (Statens Geotekniska Institut, 2023). Den geotekniska kategorin delas in i tre nivåer och speglar komplexiteten av projektet med avseende på de geotekniska förutsättningarna.

## 5.7 Tillvägagångsätt

För att analysera händelseförloppet innan jordskredet utlöstes har illustrationer utförts av sektion 7/480 med påfrestningar jorden blev utsatt för under byggprocessen, utbyggnad av E6, delsträckan Småröd – Saltkällan. Stabilitetsanalysen är gjord med hjälp av programvaran SLOPE/W, där beräkningsmetod Morgenstern and Price använts. Beräkningar har utförts i ett flertal skeden under byggnadstiden av odränerad och kombinerad analys. Byggnadsförloppet och där med påfrestningar av jorden är ett antagande om hur utbyggnaden ska ha utförts. Dimensioner av påförd last är enligt uppskattningar och minnesbilder av personer som befann sig i området innan skredet. Resultaten av analysen presenteras i form av säkerhetsfaktor tillhörande kritisk glidyta per delmoment i byggskedet. Säkerhetsfaktorerna redovisas i tabell mot uppfylld säkerhetsklass.

## 6 Resultat

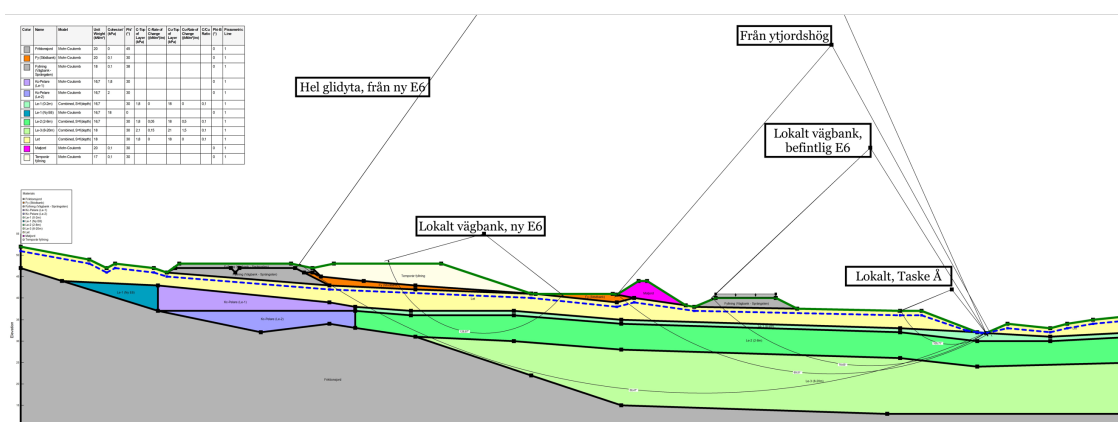
Det har blivit utfört analyser i ett flertal skeden under byggnationen av E6 i sektion 7/480. Dem moment som valts är olika stadium i processen illustrerat i Figur 24 och Figur 25 som bedömts vara av betydande karaktär för stabiliteten i området. Momenten beskrivs nedan:

1. Startskede, ingen påförd belastning, befintlig E6 med trafiklast närvarande
2. Applicering av längsgående bank bestående av avschaktad matjord
3. Installation av KC-pelare under projekterad sträcka för ny E6
4. Uppförande av vägbank, bestående av krossad sprängsten
5. Stödbank utlagd längs med befintlig vägbank väster om befintlig E6
6. Överlast på ny vägbank, avseende att påskynda sättningar
7. 7.1 - 7.5 Tillfällig tryckbank uppförs i delsteg, bestående av ospecificerade fyllnadsmassor öster om ny E6. Moment 7.5 motsvarar sista noterande utförandedel som även motsvarar geometrin i Figur 25.
8. Sektion 7/480, enligt projekterade förhållanden.

För varje moment har 5 stabilitetsanalyser utförts där ansträngt tillstånd bedöms råda. Kritisk glidyta illustreras med utritad cirkelbåge och dess säkerhetsfaktor. Dessa sökta kritiska områdena är snarlika för varje delmoment utfört baserat på förväntad påfrestning av stabilitetsförhållanden. Dem sökta kritiska områdena är:

1. Hel glidyta, från ny E6
2. Lokalt vägbank, från ny E6
3. Från längsgående ytjordshög, väst om gamla E6
4. Från befintlig E6
5. Lokalt Taske Å

Dessa områden, samt ungefärlig placerad glidyta för samtliga moment och områden presenteras med säkerhetsfaktor mot brott enligt Figur 29:



Figur 29 Ungefärlig placering av samtliga glidytor med förklaring (Författarens egen bild).

Resultaten från stabilitetsanalysen presenteras enligt Tabell 4 nedan och urklipp presenteras i Kapitel: Ytjordshög/Gamla E6/Taske Å 6.2 och Ny E6 6.3. Fulltliga analyser från GeoStudio finns bifogat som bilaga med länk i tabell.

## 6.1 Sammanställda resultat av stabilitetsberäkningar

Tabell 4 Sammanställda resultat av släntstabilitetsberäkningar utförda i GeoStudio 2020.

Skede	Bilaga	Beräknad lägsta SF		SK Uppfylld	
		Släntdel	Fc	Fkomb	Fc
1. Innan byggstart	<b>10.1</b>				
	Från nya E6 HG	2,15	2,11	3	3
	Lokal vägbank Ny E6	2,13	2,06	3	3
	Från Ytjordshög	1,24	1,21	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
	Lokalt Taske Å	1,32	1,12	-	-
2. Applicering matjordsbank	<b>10.2</b>				
	Från nya E6 HG	2,04	2,00	3	3
	Lokal vägbank Ny E6	2,11	2,05	3	3
	Från Ytjordshög	1,27	1,24	-	1
	Från Gamla E6	1,25	1,22	-	1
	Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-
3. Installation av KC-Pelare	<b>10.3</b>				
	Från nya E6 HG	2,51	2,02	3	3
	Lokal vägbank Ny E6	4,79	4,68	3	3
	Från Ytjordshög	1,25	1,22	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
	Lokalt Taske Å	1,32	1,12	-	-
4. Uppförande av Vägbank	<b>10.4</b>				
	Från nya E6 HG	1,96	1,94	3	3
	Lokal vägbank Ny E6	1,38	1,34	1	2
	Från Ytjordshög	1,27	1,24	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
	Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-
5. Stödbank till ny Vägbank	<b>10.5</b>				
	Från nya E6 HG	1,73	1,71	3	3
	Lokal vägbank Ny E6	2,17	2,17	3	3
	Från Ytjordshög	1,27	1,24	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
	Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-
6. Överlast till Vägbank	<b>10.6</b>				
	Från nya E6 HG	1,70	1,69	3	3
	Lokal vägbank Ny E6	1,58	1,58	2	3
	Från Ytjordshög	1,27	1,21	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
	Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-

<b>7.1</b> <b>Uppförande</b> <b>av Tryckbank</b> <b>(17kPa) 1/5</b>	<b>10.7</b>				
	Från nya E6 HG	1,57	1,56	2	3
	Lokal vägbank Ny E6	1,61	1,61	2	3
	Från Ytjordshög	1,27	1,24	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-	
<b>7.2</b> <b>Uppförande</b> <b>av Tryckbank</b> <b>(29 kPa) 2/5</b>	<b>10.8</b>				
	Från nya E6 HG	1,51	1,49	2	3
	Lokal vägbank Ny E6	1,53	1,53	2	3
	Från Ytjordshög	1,27	1,24	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-	
<b>7.3</b> <b>Uppförande</b> <b>av Tryckbank</b> <b>(43 kPa) 3/5</b>	<b>10.9</b>				
	Från nya E6 HG	1,41	1,39	1	2
	Lokal vägbank Ny E6	1,22	1,22	-	1
	Från Ytjordshög	1,27	1,21	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-	
<b>7.4</b> <b>Uppförande</b> <b>av Tryckbank</b> <b>(61kPa) 4/5</b>	<b>10.10</b>				
	Från nya E6 HG	1,30	1,28	1	1
	Lokal vägbank Ny E6	1,02	1,02	-	-
	Från Ytjordshög	1,27	1,24	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-	
<b>7.5</b> <b>Uppförande</b> <b>av Tryckbank</b> <b>(75 kPa) 5/5</b>	<b>10.11</b>				
	Från nya E6 HG	1,18	1,17	-	-
	Lokal vägbank Ny E6	0,91	0,91	-	-
	Från Ytjordshög	1,27	1,21	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-	
<b>8. Enligt</b> <b>projekterade</b> <b>förhållanden</b>	<b>10.12</b>				
	Från ny E6 HG	1,74	1,72	3	3
	Lokal vägbank Ny E6	1,78	1,78	3	3
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
Lokalt Taske Å	1,32	1,12	-	1	
<b>9. Enligt</b> <b>utfört</b>	<b>10.13</b>				
	Från nya E6 HG	1,18	1,17	-	-
	Lokal vägbank Ny E6	0,91	0,91	-	-
	Från Ytjordshög	1,27	1,24	-	1
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
Lokalt Taske Å	1,31	1,12	-	-	

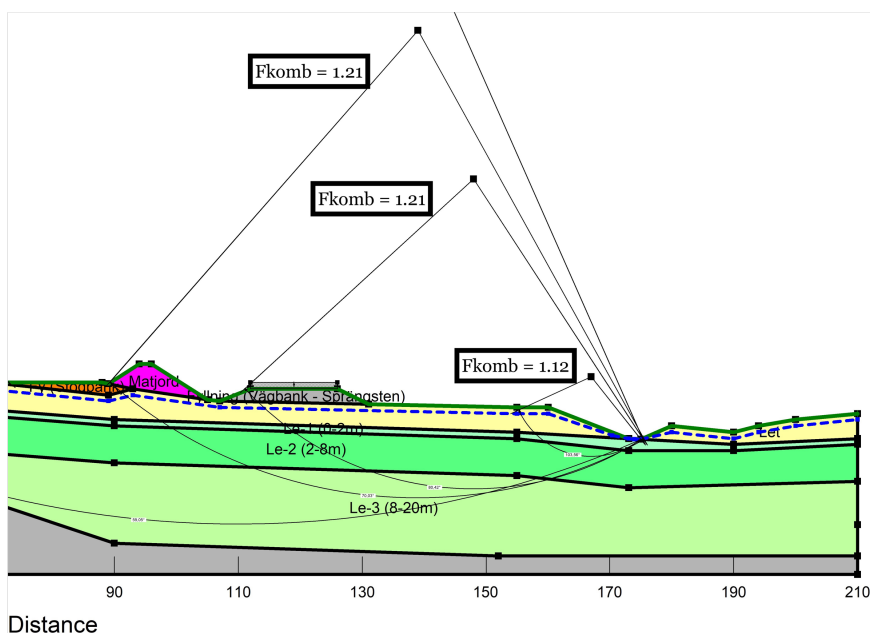
<b>10. Enligt Ex. Flytt av Taske Å</b>	<b>10.14</b>				
	Från nya E6 HG	2,23	2,21	3	3
	Lokalt vägbank Ny E6	1,93	1,92	3	3
	Från Gamla E6	1,57	1,51	2	3
	Lokalt Taske Å	1,61	1,51	2	3
	Östra släntsidan	2,18	2,17	3	3
<b>11. Enligt Ex. Lättklinker i Vägbank</b>	<b>10.15</b>				
	Från nya E6 HG	1,74	1,72	3	3
	Lokalt vägbank Ny E6	1,69	1,65	3	3
	Från Gamla E6	1,24	1,21	-	1
	Lokalt Taske Å	1,32	1,12	-	-

## 6.2 Ytjordshög/Gamla E6/Taske Å

Enligt analys var stabiliteten lokalt kring Taske Å av samma ansträngdhet under tiden för byggnation. Resultat under samtliga analyser visar att beräknad säkerhetsfaktor med kritisk glidyta är:

- Från ytjordshög, Fkomb  $\approx$  1.21
- Från Gamla E6, Fkomb  $\approx$  1.21
- Lokalt Taske Å, Fkomb  $\approx$  1.12

Glidyterna illustreras nedan i Figur 30. Trafiklast är dimensionerad enligt Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner av storlek 20 kPa (Trafikverket, 2016).

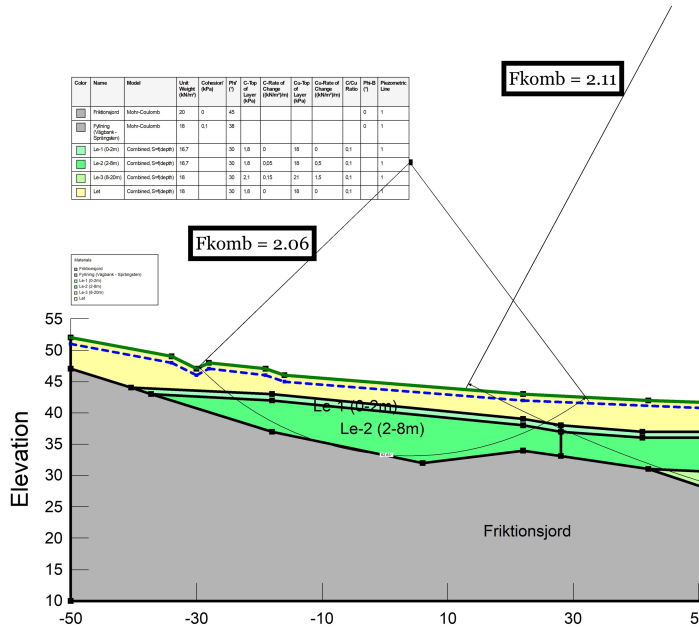


Figur 30 Kritiska glidytor med tillhörande säkerhetsfaktor för kombinerad analys, lokalt Taske Å, Sektion 7/480 (Författarens egen bild).

## 6.3 Ny E6

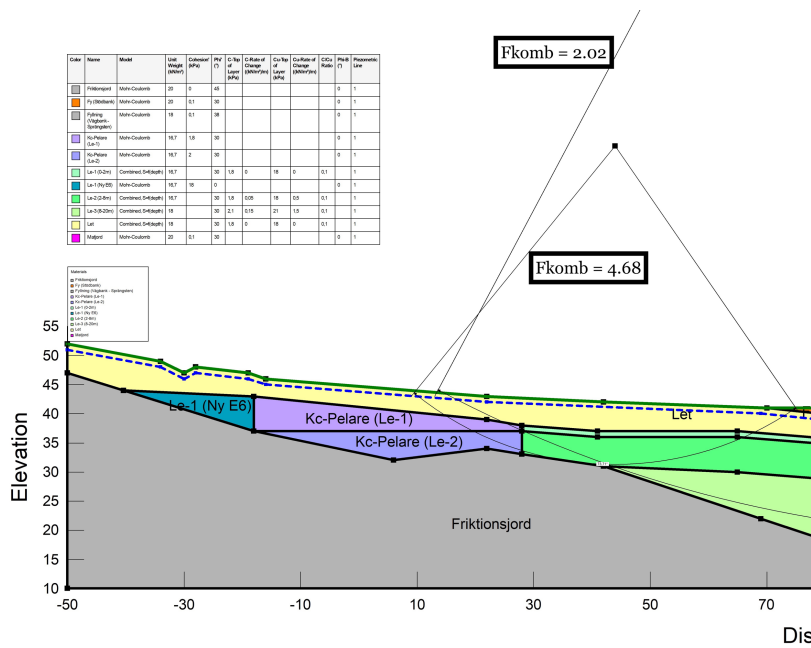
Analysen är utförd i ett antal skeden med antagen ordning för byggprocessen av ny E6.

### 6.3.1 Startskede



Figur 31 Startskede, ingen påförd belastning, befintlig E6 med trafiklast närvarande (Författarens egen bild).

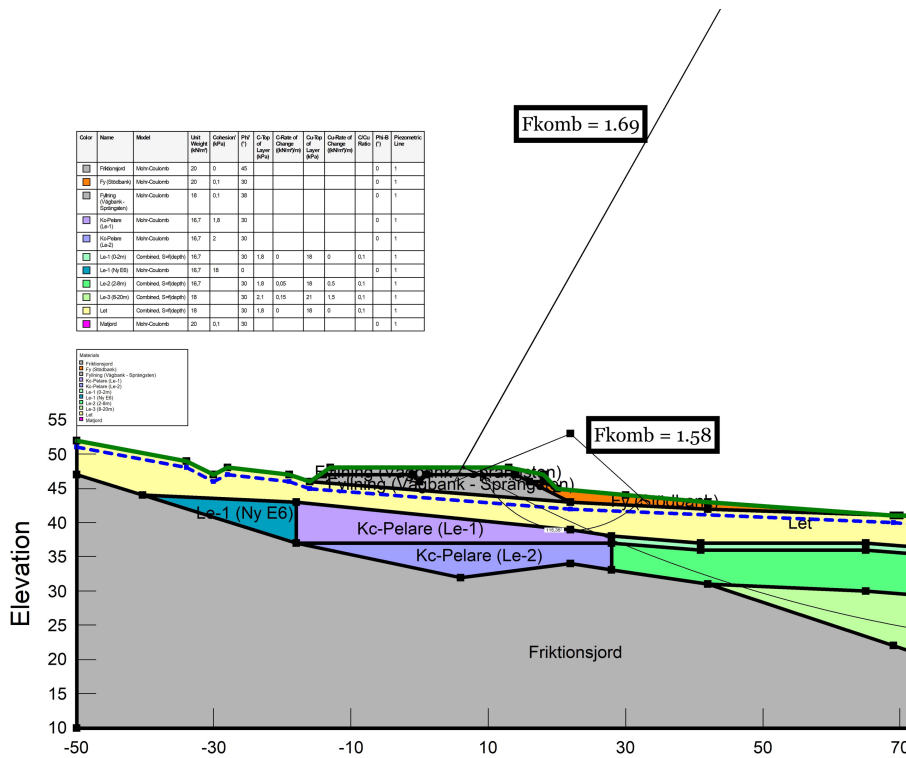
### 6.3.2 Installation av KC-Pelare



Figur 32 Installation av KC-pelare under projekterad sträcka för ny E6 (Författarens egen bild).

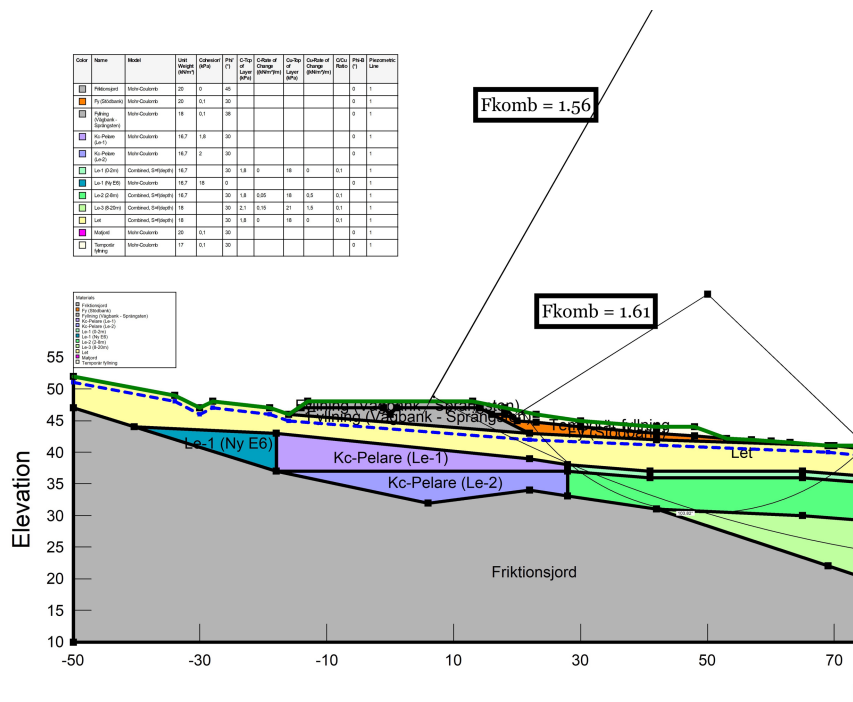


### 6.3.5 Överlast till Vägbank



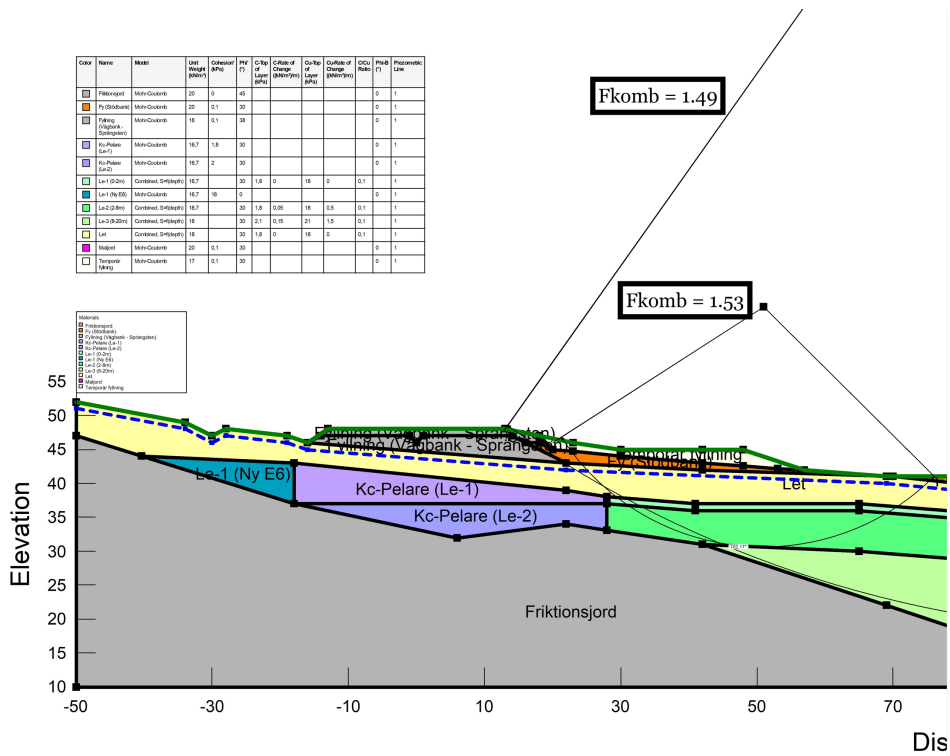
Figur 35 Överlast på ny vägbank, avseende att påskynda sättningar (Författarens egen bild).

### 6.3.6 Tillfällig Tryckbank Steg 1/5



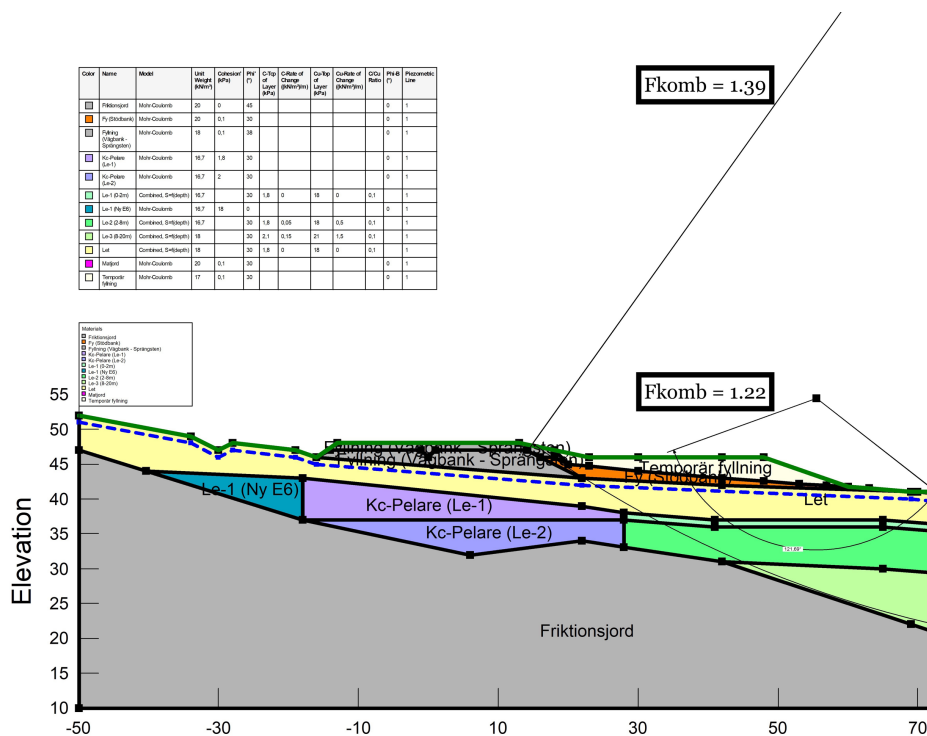
Figur 36 Tillfällig tryckbank uppförs i delsteg 1/5 [17 kPa] (Författarens egen bild).

### 6.3.7 Tillfällig Tryckbank Steg 2/5



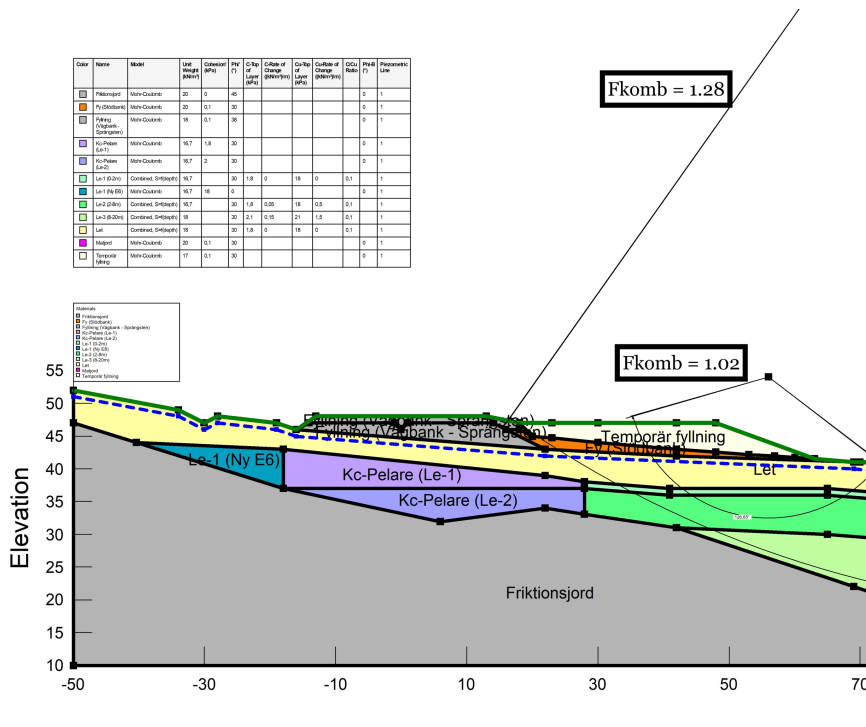
Figur 37 Tillfällig tryckbank uppförs i delsteg 2/5 [29 kPa] (Författarens egen bild).

### 6.3.8 Tillfällig Tryckbank Steg 3/5



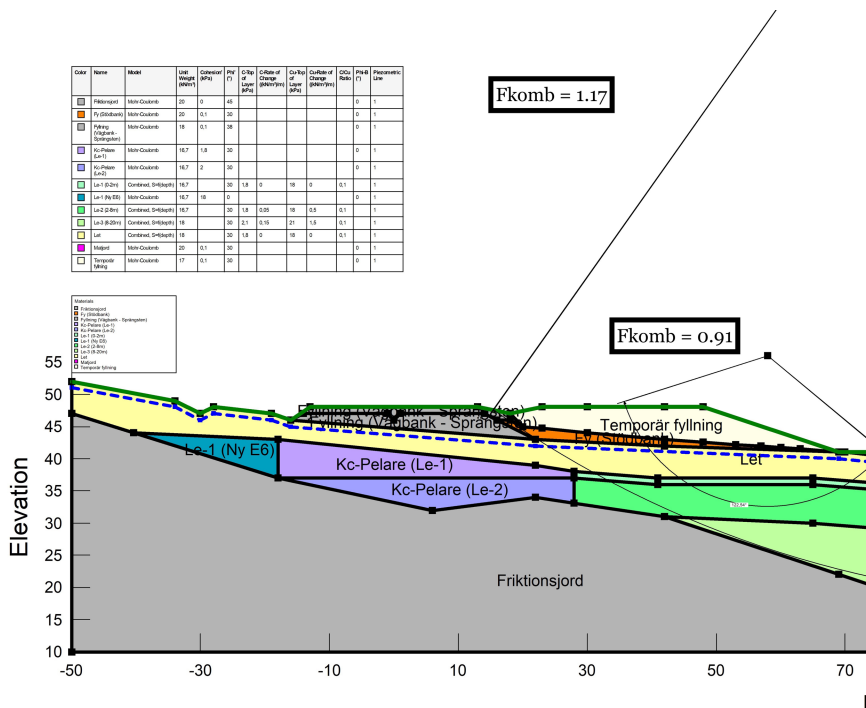
Figur 38 Tillfällig tryckbank uppförs i delsteg 3/5 [43 kPa] (Författarens egen bild).

### 6.3.9 Tillfällig Tryckbank Steg 4/5



Figur 39 Tillfällig tryckbank uppförs i delsteg 4/5 [61 kPa] (Författarens egen bild)

### 6.3.10 Tillfällig Tryckbank Steg 5/5



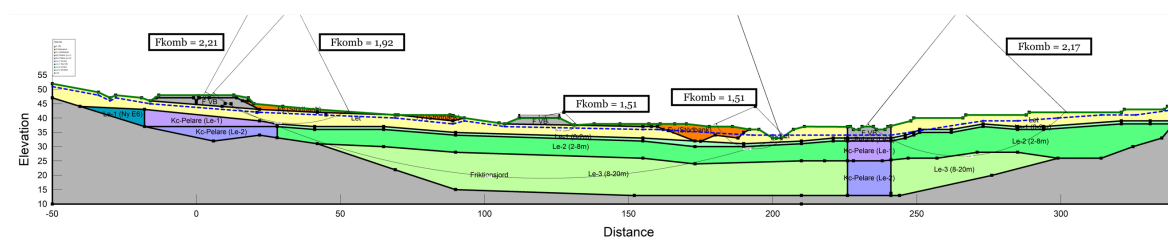
Figur 40 Tillfällig tryckbank uppförs i delsteg 5/5 [75 kPa] (Författarens egen bild).

## 6.4 Alternativa åtgärder

I jämförelsesyfte modellerades ytterligare två sektioner till utbyggandet av ny motorväg. Nya E6 tilläts ha samma geografiska position medan andra parametrar varierade.

### 6.4.1 Flytt av Taske Å

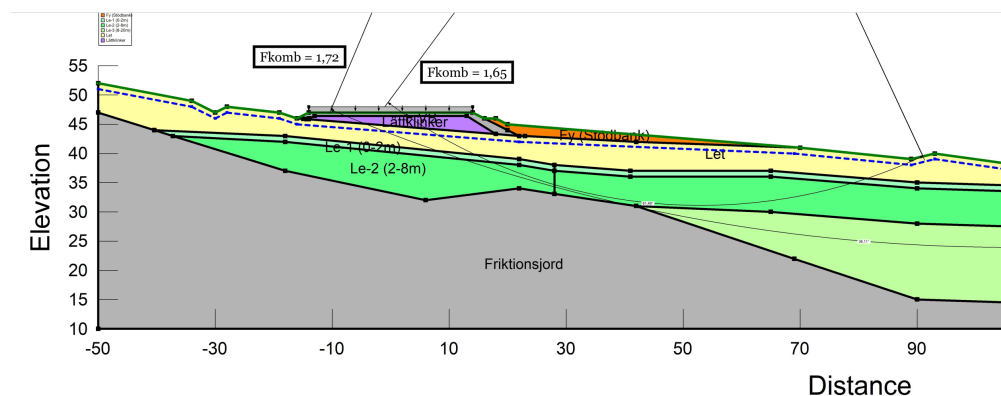
Enligt Figur 41 utfördes en projektering av sektion 7/480 med förändrat läge av Taske Å. Tidigare vattendrag flyttades som förslag ca 30 m österut och fylldes där efter igen av avschaktade massor. Av analysen att döma höjdes stabiliteten i området markant. Lokalt vid ny E6, samt glidytan som sträcker sig över hela området uppnådde en faktor av säkerhet av 2,21 respektive 1,92. Den lokala påfrestningen längs ån tycks åtgärdats och även där ökades stabiliteten. Östra sidan av dalgången kontrollerades även, men utan närmare påverkan av den nya dragningen av Taske Å.



Figur 41 Projekterat exempel. Flytt av Taske Å (Författarens egen bild).

### 6.4.2 Lättklinker i vägbank

Ytterligare ett förslag togs i beaktning, en analys av sektion 7/480, med ursprunglig geometri, utan pelarförstärkt vägbank och ett skifte av fyllnadsmassor med en andel lättklinkermaterial som ersatt krossade sprängsten. Enligt Tabell 4 påverkades inte området lokalt kring Taske Å något nämnvärt utan förändringen uppstod lokalt vid ny vägbank. Se Figur 42.



Figur 42 Projekterat exempel. Lättklinker i vägbank, oförstärkt (Författarens egen bild).

Säkerhetsfaktorn lokalt i vägbank uppgick vid projektering till 1.65, och för hela dalgången till 1.72.

## 7 Diskussion

Följande stabilitetsberäkningar visar till en mycket ansträngd sektion under utbyggnaden av delsträckan Småröd – Saltkällan. Analysen visar till en klar påverkan av släntens stabilitet vid den applicerade tillfälliga tryckbanken.

### 7.1 Säkerhetsfaktorer

Av första anblick att döma är det väldigt få av de beräknade säkerhetsfaktorerna som uppfyller kraven enligt Tabell 3. Resultaten visar till ett initialt väldigt ansträngt läge kring slänten längs Taske Å, befintliga E6 men också ifrån den långsgående banken av matjord. Säkerhetsfaktorn håller sig relativt stabilt under påbyggnaden av ny E6 för både odränerad, samt kombinerad analys och håller sig inom intervallet  $1.12 < F_{\text{komb}} < 1.21$ . Stabiliteten med avseende på yttjordshög samt vägbank uppfyller ej kraven för dagens nivå på säkerhetsfaktor.

Lokalt vid Taske Å uppfylldes enligt analys inte SK1 vid vare sig odränerat eller kombinerat skede.

Med avseende till erosionsrisk som förekommer vid strandkant av åar och bäckar borde släntens geometri och närhet till befintlig E6 givit en klar indikation på att förstärkningsåtgärder längs ån borde vart av yttersta nödvändighet. Ett förändrat flöde av vattenföring i Taske Å, hade med största sannolikhet kunnat orsaka ett initialt skred. Minskad mäktighet av mothållande krafter gemensamt med ett högre vattentryck i marken hade kunnat initierat ett jordskred i området innan påbörjan av utbyggnationen.

I den västra delen av dalgången där utbyggnaden av E6 skulle uppföras, visade analysen ett flertal händelser med betydande påverkan på stabiliteten. Ett initialt läge för den naturliga slänten, med tillhörande säkerhetsfaktor  $F_c/F_{\text{komb}}$  enligt 2.15/2.11 visar till god initial stabilitet. Uppbyggnaden av vägbanken resulterade i följande påverkan av släntens stabilitet:

Installation av KC-Pelarna gjordes av stabilitetshöjande anledning. Det är svårt att förutse vilken negativ effekt som installationen hade på stabiliteten under uppförandet. En förstärkningsåtgärd av kalk- och cementpelare kan leda till förhöjda portrycksnivåer och utgöra en initial störning av högsensitiv lera och därav en sänkning av jordens hållfasthet. Det är av yttersta vikt att vara vaksam och uppmärksamma eventuella förhöjda portryck under installation.

Vägbanken uppfördes på den tidigare förstärkta jorden. Sedan tidigare hade vägbank, av storleksordning  $H > 2\text{m}$  utretts ha en begränsad stabilitet. Förslag för att bibehålla stabiliteten lokalt framkom vara en begränsad stödbank öster om E6. Den begränsade tryckbanken projekterades till 1–3 m, längs hela sträckan Småröd – Saltkällan oberoende av tidigare utlåtanden om att tryckbank borde undvikas. Vägbanken gavs rekommendationer till att bestå av lättfyllning för att totalstabiliteten i området skulle påverkas för mycket. Figur 33 och Figur 34, visar till begränsad stabilitet i VB utan påförd stödbank och utan trafiklast. Tryckbanken orsakade en stigning i SF från 1.32 → 2.17 och föranledde att säkerhetsklass 3 uppnåddes. Totalstabiliteten i området från den nya uppförda

vägbanken, förutom den lokala påfrestningen vid Taske Å kunde anses som stabil, SK-3 uppfylldes och detta skede bedöms vara enligt projekterade förhållanden.

Av utredning att framgå, påfördes ytterligare ospecificerade fyllnadsmassor av osäker mäktighet ovanpå den redan befintliga stödbanken. Analysen utfördes i 5 steg för att bedöma dess inverkan på stabiliteten längs E6. De tillförda massorna avsågs att deponeras tillfälligt och utnyttjas vid senare skede till motsvarande stödbank (Statens haverikommission, 2009). Enligt minnesbilder från arbetsplatsen bedömdes den tillfälliga fyllningen sträcka sig över en sträcka längs vägbanken av 100m och som mest ca 60m ut mot Taske å. De temporära massorna bedömdes uppgå till en nivå som mest 4.5m ovanför ursprungliga marknivå. Störst utbredning av fyllnadsmassorna bedömdes vara i sektion 7/480.

Enligt stabilitetsanalys i Figur 36 - Figur 40 uppfördes under modellering den temporära fyllningen i 5 steg där den tillförda lasten ökade i mäktighet. Sammanställd i Tabell 5.

Tabell 5 Säkerhetsfaktor, påförd tillfällig last. Sektion 7/480.

Skede	≈ Last [kPa]	Beräknade lägsta säkerhetsfaktor		Säkerhetsklass Uppfylld	
		Fc	Fkomb	Fc	Fkomb
<b>1.5</b>	17				
Från nya E6 HG		1,57	1,56	2	3
Lokalt vägbank Ny E6		1,61	1,61	2	3
<b>2.5</b>	29				
Från nya E6 HG		1,51	1,49	2	3
Lokalt vägbank Ny E6		1,53	1,53	2	3
<b>3.5</b>	43				
Från nya E6 HG		1,41	1,39	1	2
Lokalt vägbank Ny E6		1,22	1,22	-	1
<b>4.5</b>	61				
Från nya E6 HG		1,30	1,28	1	1
Lokalt vägbank Ny E6		1,02	1,02	-	-
<b>5.5</b>	75				
Från nya E6 HG		1,18	1,17	-	-
Lokalt vägbank Ny E6		0,91	0,91	-	-

Den beräknade utbredda lasten är en uppskattning gjord på materialets tunghet samt geometri. Även om dessa resultat är baserade på ett uppskattat händelseförlopp, en geometri utifrån minnesbilder ifrån byggskedet så tror jag att det kan spegla vad som hände i Småröd i december 2006. Enligt analys var hela sektion 7/480 under kritisk påfrestning, men brott uppstod med största sannolikhet i den temporära fyllningen placerad längs E6. Glidytan som troligtvis uppstod vid brott återfinns i Figur 39 där säkerhetsfaktorn Fkomb ≈ 1.

## 7.2 Inmätningar och geotekniska undersökningar

Enligt Statens Haverikommission utfördes kompletterande geotekniska undersökningar i området 10 månader efter skredet utlöstes. I jämförelse mot befintliga data inhämtat under projektering fanns ingen information som avvek nämnvärt. Mätvärden ifrån tidigt stadie ansågs giltiga och rimligt valda. De överensstämde enligt tidigare utförda CPTU-trycksonderingar.

Portrycket i området ansågs öka linjärt med djupet och vara av hydrostatisk karaktär. På vissa nivåer tycktes det uppmärksammas ett visst artesiskt portryck, vilket visade till en förhöjd portrycksnivå, 10% över hydrostatiskt. Detta har inte tagits hänsyn till i ovanstående analys, men kan ha haft inverkan i Småröd. Permeabla skikt av till exempel friktionsjord med ovanstående täta skikt av lågpermeabla jordar kan ha en minskande effekt på jordens dränerade skjuvhållfasthet. Förhöjt portryck minskar effektivspänningen och indirekt slänters stabilitet.

Vid installation av KC-pelare uppmärksammades förhöjd portrycksnivå, ovan gränsvärde. Vilket gav ett avbrott i pelarinstallationen. Dess inverkan kan ha haft en störande effekt på den högsensitiv leran i området. Enligt SHK har portrycks förändringarna i området varit av så pass begränsad nivå att dess effekt ej kunnat initierat ett skred, men skall kunna haft påverkan av dess utbredning (Statens haverikommission, 2009).

## 7.3 Alternativ projektering

Två förslag på förstärkande åtgärder för sektion 7/480 vid byggnation på högsensitiv lera analyserades. Det projekterades ett exempel där de topografiska förhållandena i dalgången förändrades och Taske Å fylldes upp av schaktmassor och flyttades öster ut. Det projekterades även ett exempel där de topografiska förhållandena bevarades, men uppbyggnaden i vägbanken skiljdes åt.

### 7.3.1 Flytt av Taske Å

Från de tidigare analyserna uppmärksammades att marken kring gamla E6 var av hög påfrestning men också att samtliga av de kritiska glidyterna från nya E6 gick upp i Taske Å. Enligt Figur 41 visar dessa förändringar en förbättring av stabiliteten. Området vid Ny E6, samt totalstabiliteten förändras till det positiva. De kritiska glidyterna uppfyller med råge Trafikverkets krav för Säkerhetsklass 3. Kring gamla E6 och lokalt vid Taske Å, fanns det redan innan påbörjan av byggnation förutsättningar för att ett skred skulle initieras. Dess redan branta släntväggar med erosionsrisk vid släntfot utgav en övergripande risk för ett initialskred och även goda förutsättningar för bakåtgripande sekundärskred. Det ska dock tas hänsyn till processen för att få godkänd flytt av Taske Å. Det är i sig ingen teknisk utmaning men arbetet räknas som en omfattande vattenverksamhet och behöver i samråd med Länsstyrelsen få godkänt förslag och tillstånd från Mark- och miljödomstolen. Naturvärdet i befintliga Taske Å kan

tänkas vara av sin vikt att bevara, en förändring av dess linjeföring hade med största sannolikhet haft en negativ påverkan på dess natur och kulturella värde.

### 7.3.2 Lättklinker

Enligt resultatet i Figur 42 visar sig det projekterade exemplet kunna vara ett aktuellt alternativ vid nybyggnad av E6. Förslaget innefattade en uppbyggnad av vägbank med ett lättviktsmaterial som kan vara ett bra alternativ där marken är känslig för påverkan. Enligt analys kunde det uppnås godkänd standard med tänkta dimensioner utan installation av KC-pelare. Alternativet påverkade inte stabiliteten nämnvärt lokalt vid Taske Å, men projektering kunde utföras enligt godkänd säkerhetsklass 3 för banken och sektionen som hel glidyta. Enligt projektering ersattes 65% av bankens fyllnadsmaterial med lättklinker. Det innefattar en viktminskning, men också en mindre påfrestning av underliggande jord med ca 50%. Projekteringen utfördes enligt rekommenderade dimensioner från Vägverkets publikation 1986:78. Att ersätta del av vägbankens material med lättklinker ökade stabiliteten enligt analys lokalt i banken till en säkerhetsfaktor av  $F_{komb} = 1.65$  och för hel glidyta,  $F_{komb} = 1.72$ . Att undgå installation av KC-pelare hade undgått eventuell störning på leran högsensitiv karaktär.

## 7.4 Klimatförändringar

Med avseende på naturliga slänters stabilitet så väntas förändringar i klimatet frekvensen av jordskred. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap beskriver i rapporten *Klimatförändringar, skred och ras – Slutrapport* hur samhället måste börja anpassa sig till förändrat klimat. En tidshorisont på 70–100 år diskuteras, kombinerade effekter av extremväder, höga temperaturer och ökad nederbörd väntas öka frekvensen för jordskred markant. Förändringar i klimatet kan komma att påverka stabiliteten i naturliga slänter internt och externt. De interna faktorerna kopplas till effekter som har en minskande effekt på jordens skjuvhållfasthet. De externa effekterna innefattar de som ökar skjuvspänningen i jorden (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2008).

Att klimatförändringarna väntas bidra till väderfenomen av extrem karaktär är ingen hemlighet, även om dess frekvens av återkommande inte ökar så kommer med största sannolikhet att dess mäktighet öka. Sedan tidigare avsnitt är det känt vilken effekt hög grundvattennivå och högt portryck har på slänters stabilitet. Vid ökad mängd vatten i jorden, från förhöjd grundvattenyta, eller vid ökat portryck kommer resultera i en minskning i spänningarna som bärs upp av jordens kornskelett (Hultén, o.a., 2005).

Ökad mängd nederbörd leder troligtvis till förhöjda flöden i åar och vattendrag. I ovanstående analys skulle ett ökat flöde kunna anses förödande i Taske Å på grund av de sen tidigare ansträngda förhållandena. En flödesökning med en förhöjd eroderande effekt kan räcka för att minska släntens mothållande kraft och utlösa ett primärskred. Förhöjda grundvattennivåer och ökad strömningshastighet kan ha en påskyndande effekt på urlakningen av saltvattenavsatta leror.

## 8 Slutsats

I den här rapporten har det gjorts en känslighetsanalys av jordskredet i Småröd 2006. Syftet med denna analys var att sätta fingret på vad som föranledde skredet och hur stabiliteten i området påverkades vid byggnation av ny motorväg. Av analys att döma återspeglades en mycket kritisk sektion under byggfasen, 7/480. Stabiliteten kring gamla E6 och Taske Å var sedan tidigare känslig mot påverkan av externa faktorer. Vid utförandet av ny motorväg visades en oförsiktighet med avseende på placering av schaktade massor som var planerade för framtida bruk. En allt för stor mängd placerades under redan ansträngda förhållanden med undergrund av högsensitiv lera, vilket bedöms vara den utlösande faktorn till skredet. Vetskapen om lerans skedbenägenhet var sedan tidigare känd och borde ha tagits större hänsyn till.

Om skredet hade kunnat undvikas? Ja, med största sannolikhet. Fyllnadsmassor placerades där restriktioner borde varit gällande.

Denna analys visar till ett behov av noggrannhet både vid projektering som i utförandestadiet. Stabiliteten är av yttersta vikt att upprätthålla för samhällsfunktionalitet, och för liv och hälsa. Studien visar att det finns behov för ökad kompetens och fortsatta studier inom området, speciellt med avseende på den förutspådda ökningen i antal, men också i områden som sedan tidigare har ansetts vara av stabil karaktär. För att minska riskerna för ett initialt jordskred vid förändringar av naturliga slänters geometri är medvetenhet och förståelse av konsekvenser två förhållandevis enkla åtgärder att ta och förhoppnings kan denna analys bidra till något av delarna.

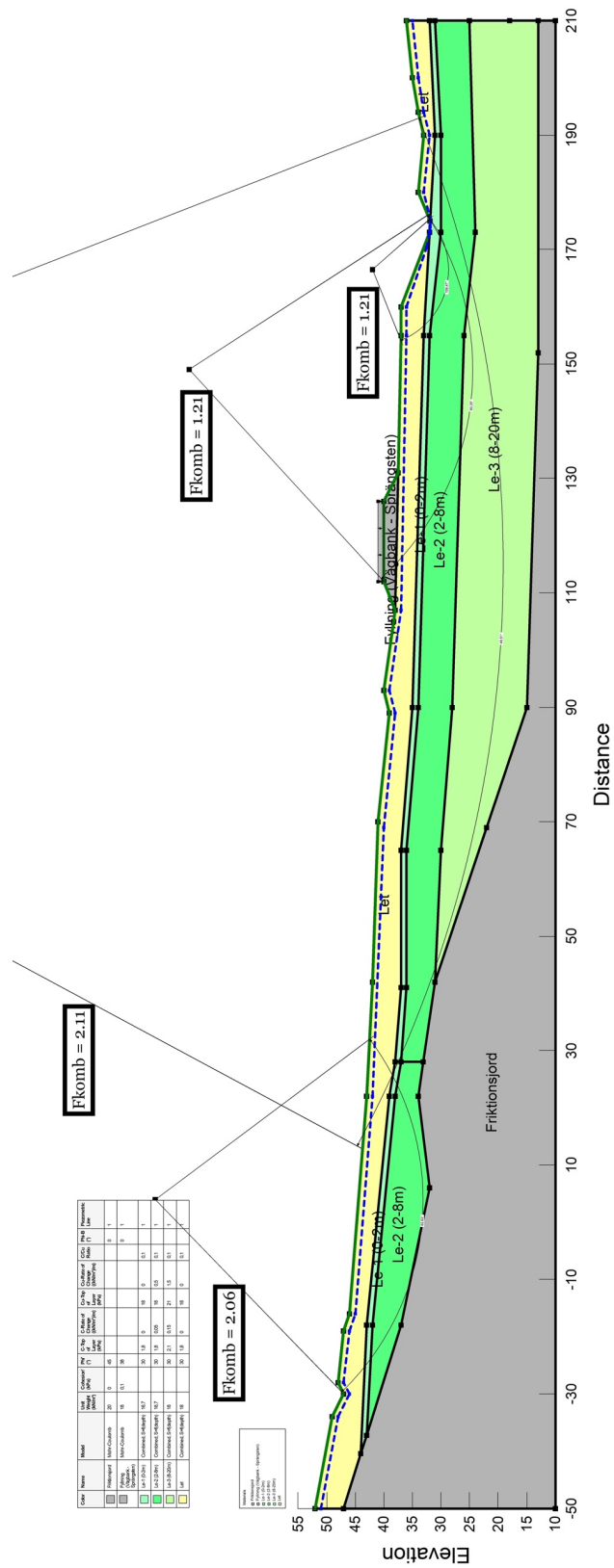
## 9 Litteraturförteckning

- Åhnberg, H., Larsson, R., Bengtsson, P.-E., Lundström, K., Löfroth, H., & Tremblay, M. (2011). *Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv*. Linköping.
- GeoStudio. (2018). *Stability Modeling with Geostudio*. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd.
- Hultén, C., Olsson, M., Rankka, K., Svahn, V., Odén, K., & Engdahl, M. (2005). *Släntstabilitet i jord*. Linköping: SGI.
- Knappet, J., & Craig, R. (2020). Craig's Soil Mechanics. i J. Knappet, & R. Craig, *Craig's Soil Mechanics* (ss. 542-543). Taylor Francis.
- Krahn, J. (2003). The limits of limit equilibrium analyses. *The 2001 R.M. Hardy Lecture*: , ss. 643-659.
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Linköping: Statens Geotekniska Institut.
- MSB. (2009). *Analys av samhällsekonomisk kostnad - Skredet vid E6 i Småröd, 2006*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. (2008). *Klimatförändringar, skred och ras*. Karlstad.
- Rankka, K. (2003). *Kvicklera – bildning och egenskaper*. Linköping : Statens Geotekniska Institut.
- Sällfors, G. (2013). *Geoteknik*. Göteborg: Cremona Förlag.
- SGI. (2018). *Metodik för kartläggning av kvicklera - vägledning*. Linköping: Statens Geotekniska Institut.
- SGI. (2018). *Statens Geotekniska Institut*. Hämtat från Vägledning metoder vid kartläggning av kvicklera: <https://www.sgi.se/sv/samhallsplanering-sakerhet/kartlaggning-av-kvicklera/vagledning-metoder-kartlaggning-kvicklera/#Oversiktlig>
- SGI. (2019). *Statens Geotekniska Institut*. Hämtat från Hur påverkar kvicklera skred: <https://www.sgi.se/sv/samhallsplanering-sakerhet/kartlaggning-av-kvicklera/vagledning/vagledning-kartlaggning-kvicklera/>
- Skredkommisionen. (1995). *Rapport 3:95 - Anvisningar för släntstabilitetsutredningar*. Linköping: Skredkommisionen.
- Skredkommisionen. (1996). *Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter*. Linköping.
- Statens Geotekniska Institut. (2003). *Handledning i jordartsklassificering för mindre markvärmesystem*. Linköping: Statens Geotekniska Institut.
- Statens Geotekniska Institut. (2023). *SGI Vägledning 8, Utredning av släntstabilitet*. Linköping: Statens Geotekniska Institut.
- Statens Geotekniska Institut. (2023). *Statens Geotekniska Institut*. Hämtat från Tuve: <https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/ras--skred-och-slamstrommar/intraffade-rasskred-och-ovriga-jordroresler/tuve/>
- Statens haverikommission. (2009). *Jordskred vid vägbygge E6 i Småröd, Ö län, den 20 december 2006*. Karlstad: Statens haverikommission.
- Svenska Geotekniska föreningen. (den 23 02 2003). *Svenska Geotekniska föreningen*. Hämtat från SGF Metodblad - Jordförstärkningsmetoder: <https://svenskageotekniskaforeningen.se/kunskapsbank/sgf-metodblad-jordforstarkning/>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2007). *Skredet i Småröd, Bohuslän Geologiska undersökningar*. Göteborg.

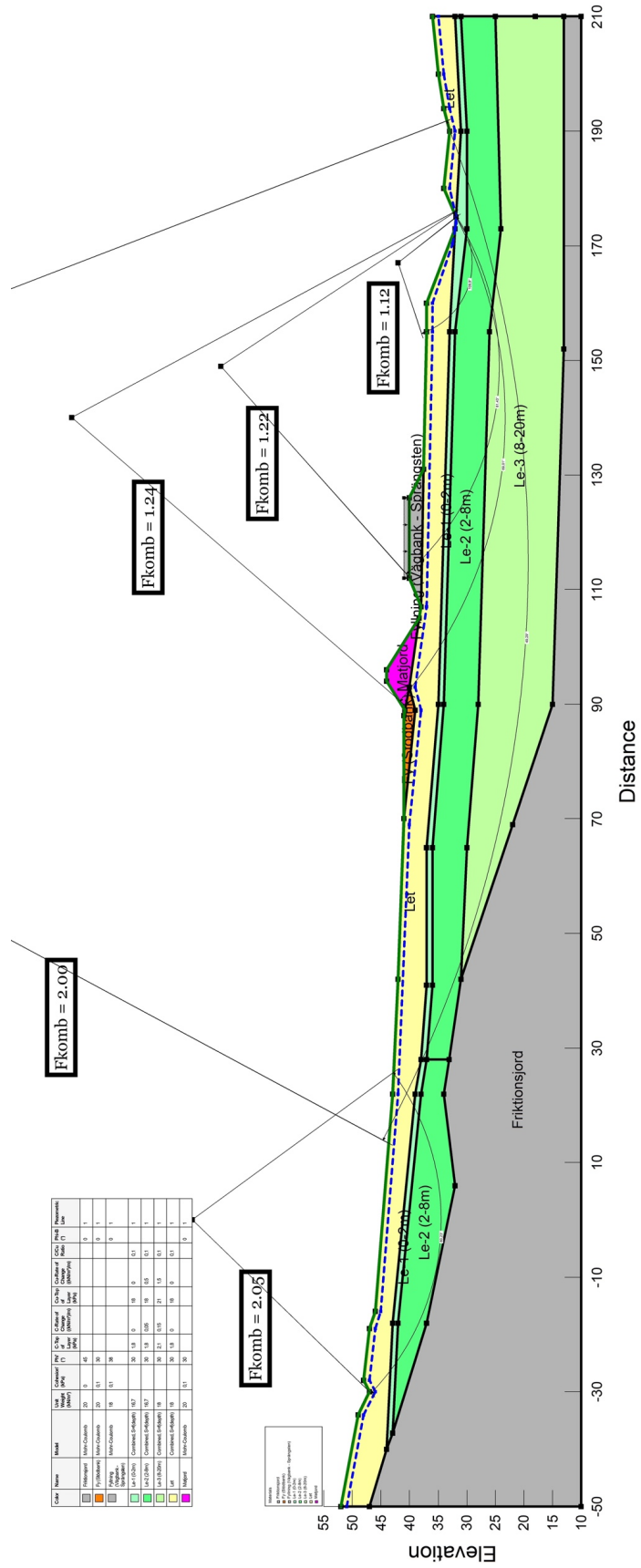
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2007). *Skredet i Småröd, Bohuslän. Geologiska undersökningar*. Göteborg: Sveriges Geologiska Undersökning.
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2023). *Sveriges Geologiska Undersökning*. Hämtat från Skredrisken påverkas av landhöjning, klimatförändringar och mänsklig aktivitet: <https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/skredrisken-paverkas-av-landhojning-klimatforandringar-och-mansklig-aktivitet/>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (UA). *Sveriges Geologiska Undersökning*. Hämtat från Sveriges Berggrund - Hur var och när?: <https://www.sgu.se/globalassets/produkter/publikationer/tidigare/sveriges-berggrund---hur-var-och-nar?.pdf>
- Trafikverket. (2010). *Trafikverket*. Hämtat från E6 genom Bohuslän: <https://web.archive.org/web/20100806124509/http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Vastra-Gotaland/E6-genom-Bohuslan/>
- Trafikverket. (2016). *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner-TK Geo 13*. Trafikverket.
- Vägverket. (1986). *Lättklinker som lättfyllning i vägbankar*.
- Vägverket. (2004). *ATB VÄG 2004 - Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktion*. Vägverket. Hämtat från ATB VÄG 2004.

# 10 Bilagor

## 10.1 Startskede

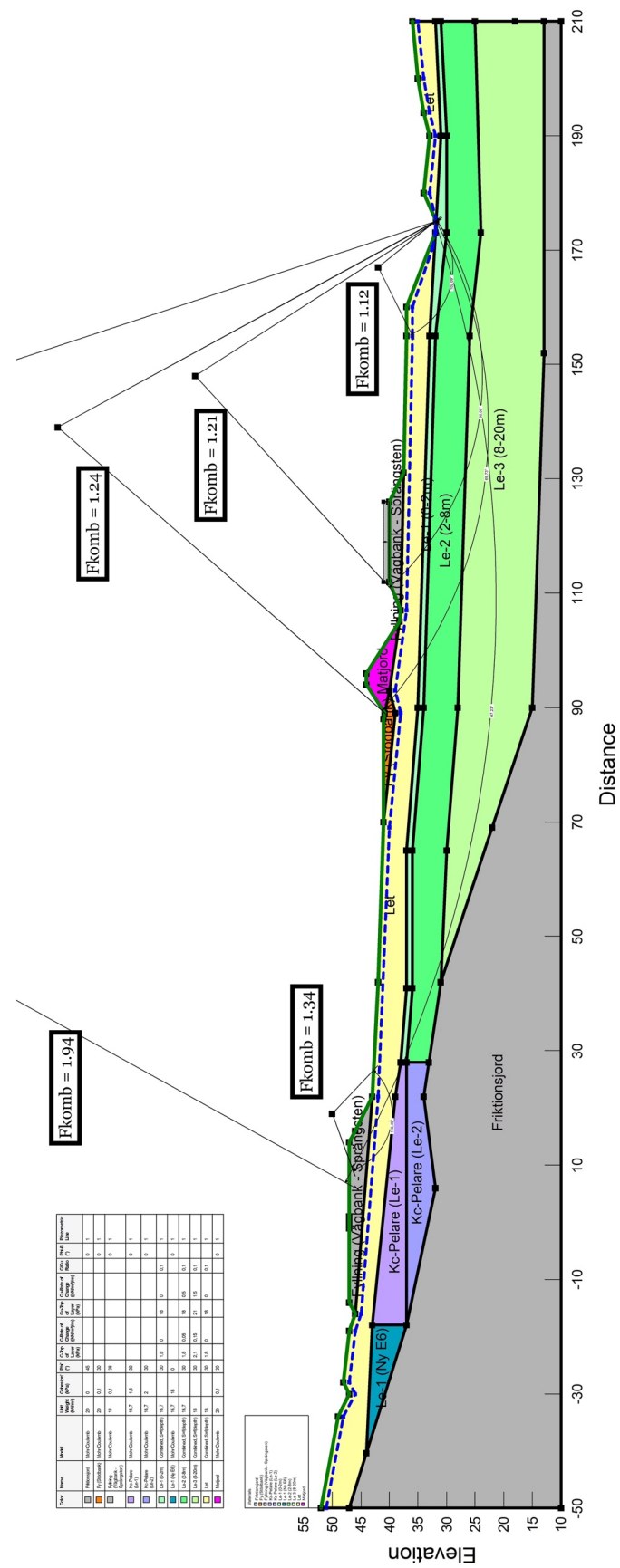


## 10.2 App. Avschaktad matjord



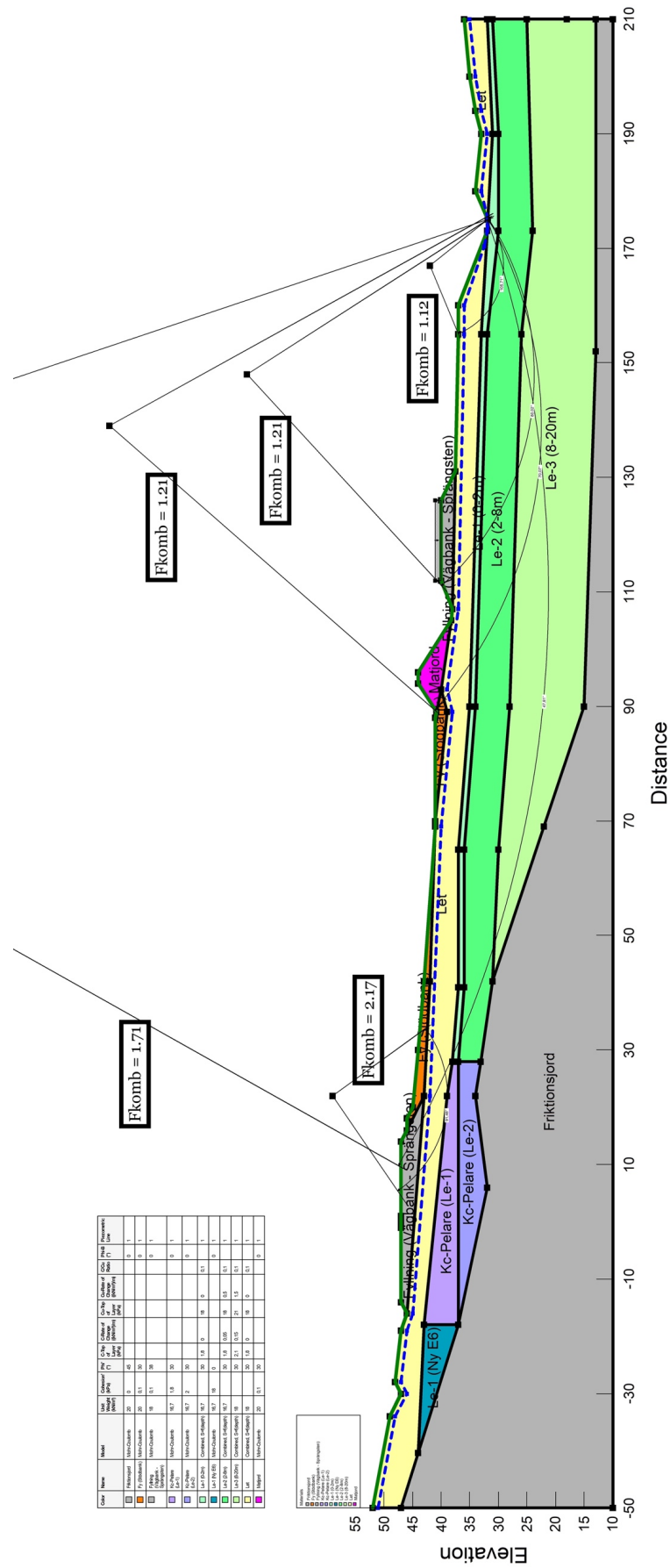


# 10.4 Uppförande av vägbank

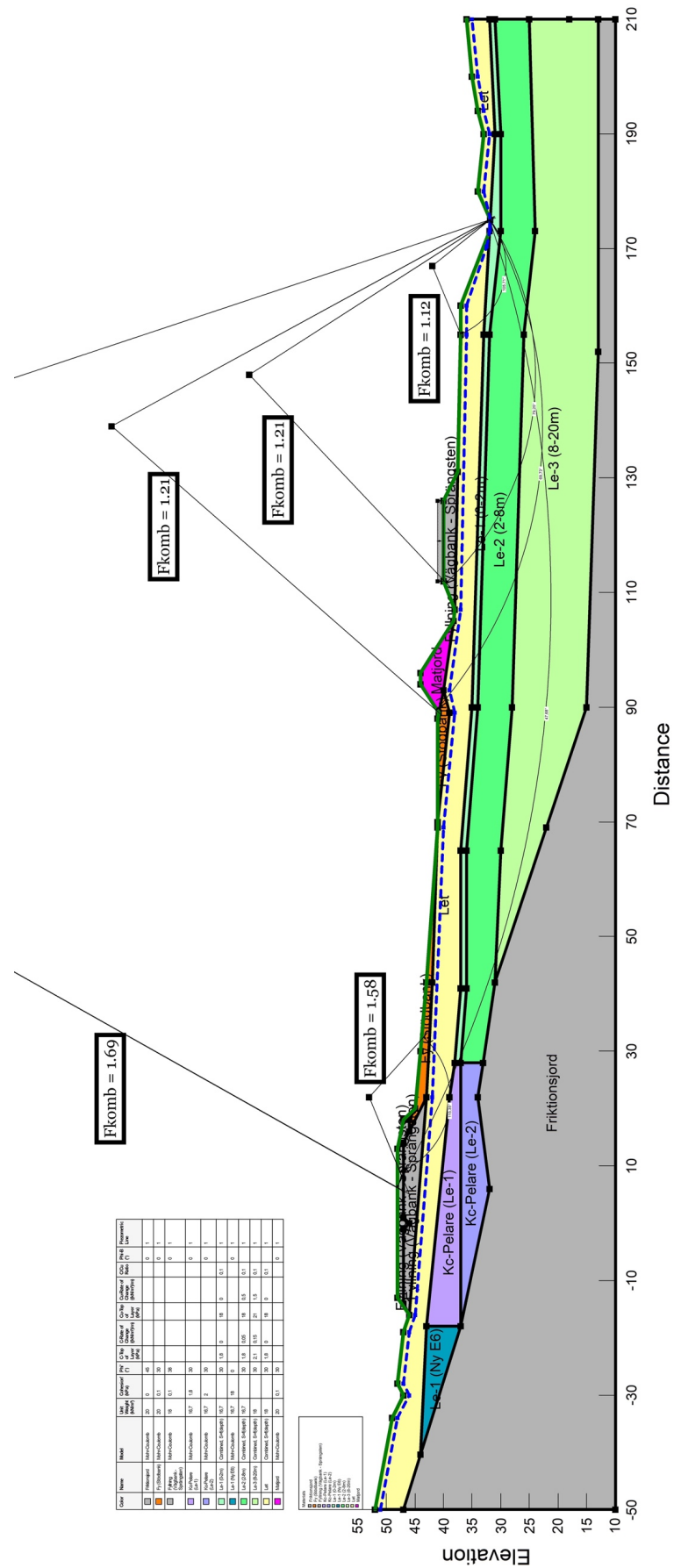


Code	Name	Material	Height (m)	Width (m)	Volume (m³)	Weight (t)	Cost (SEK)	Notes
1	Matjord	Matjord	0.5	1.0	0.5	0.5	100	
2	Spårbank	Spårbank	1.0	1.0	1.0	1.0	200	
3	Spårbank - Spårbanksten	Spårbank - Spårbanksten	1.0	1.0	1.0	1.0	300	
4	Le-1 (Ny E6)	Le-1 (Ny E6)	1.0	1.0	1.0	1.0	150	
5	Le-2 (2-8m)	Le-2 (2-8m)	1.0	1.0	1.0	1.0	150	
6	Le-3 (8-20m)	Le-3 (8-20m)	1.0	1.0	1.0	1.0	150	
7	Friktionsjord	Friktionsjord	1.0	1.0	1.0	1.0	150	
8	Kc-Pelare (Le-1)	Kc-Pelare (Le-1)	1.0	1.0	1.0	1.0	150	
9	Kc-Pelare (Le-2)	Kc-Pelare (Le-2)	1.0	1.0	1.0	1.0	150	
10	Other	Other	1.0	1.0	1.0	1.0	150	

# 10.5 Stödbank längs vägbank



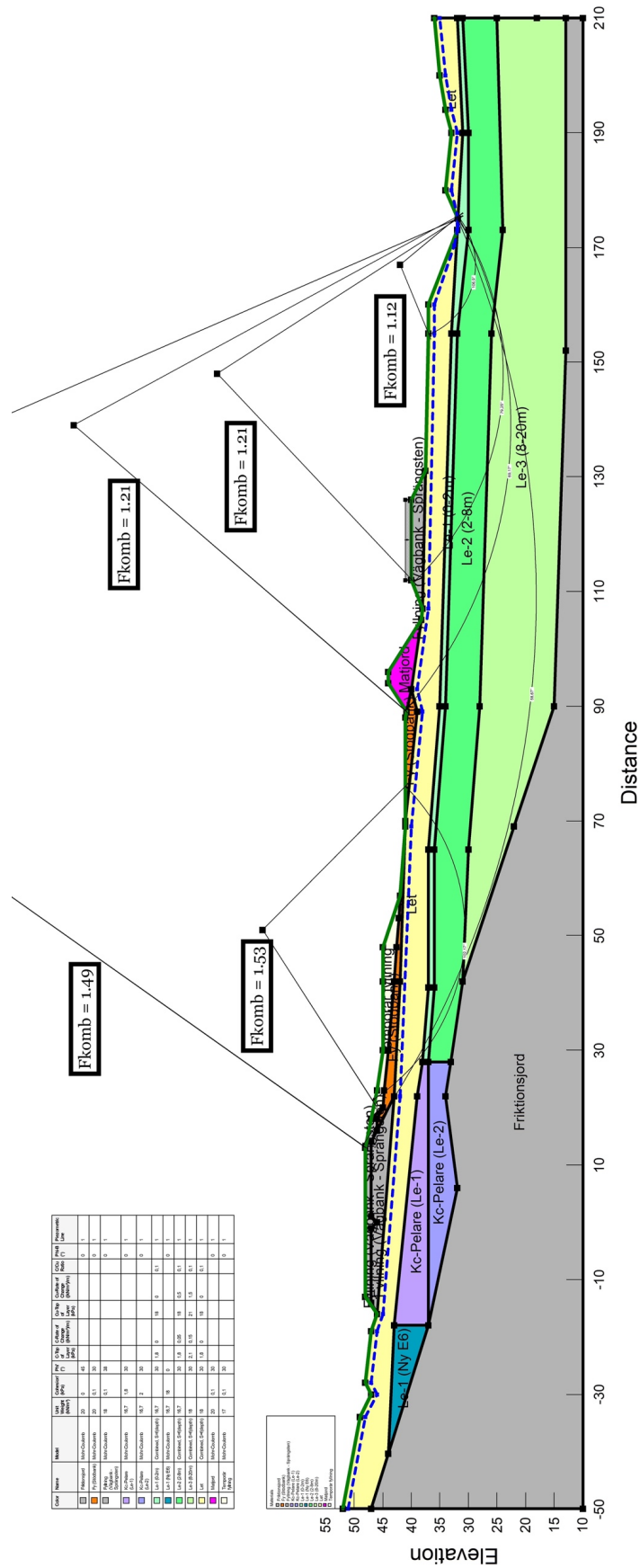
# 10.6 Överlast på vägbank



Code	Name	Material	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m³)	Internal Friction Angle (°)	Cohesion (kPa)	Water Content (%)	Shrinkage (%)	Swelling (%)	Permeability (m/s)	Remarks
1	Asfalt	Asfalt	0.05	24	0	0	0	0	0	0	
2	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
3	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
4	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
5	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
6	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
7	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
8	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
9	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
10	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
11	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
12	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
13	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
14	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
15	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
16	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
17	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
18	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
19	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
20	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
21	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
22	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
23	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
24	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
25	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
26	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
27	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
28	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
29	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
30	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
31	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
32	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
33	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
34	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
35	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
36	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
37	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
38	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
39	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
40	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
41	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
42	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
43	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
44	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
45	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
46	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
47	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
48	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
49	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
50	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
51	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
52	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
53	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
54	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	
55	Grus	Grus	0.15	18	35	0	0	0	0	0	

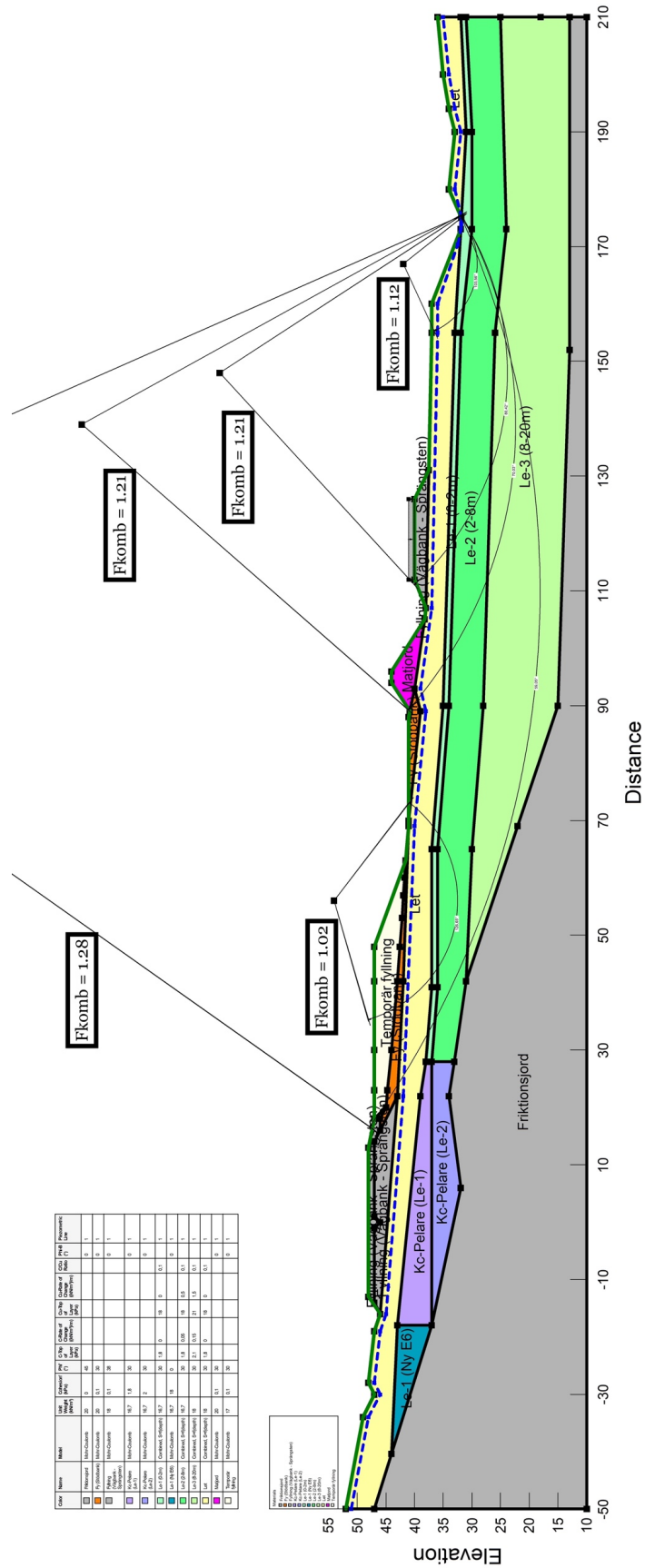


# 10.8 Utlægning av tryckbank 2/5

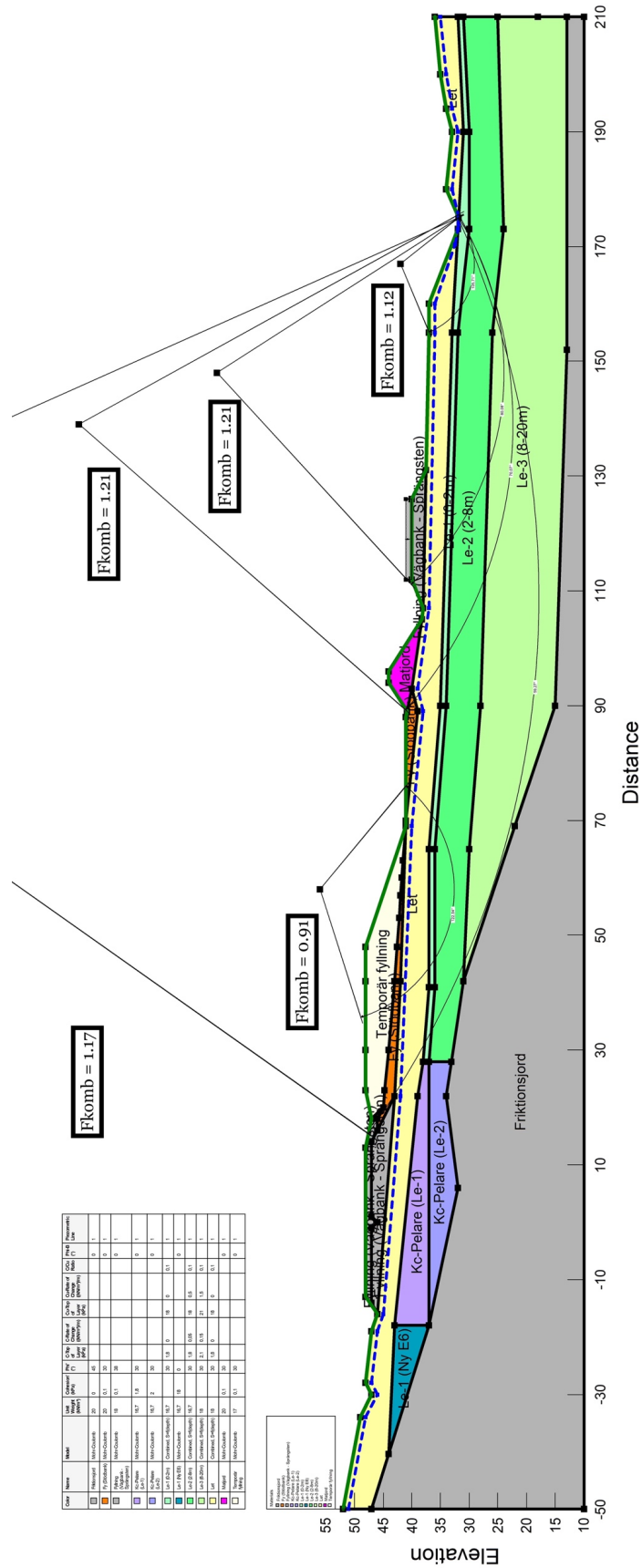




# 10.10 Utläggning av tryckbank 4/5

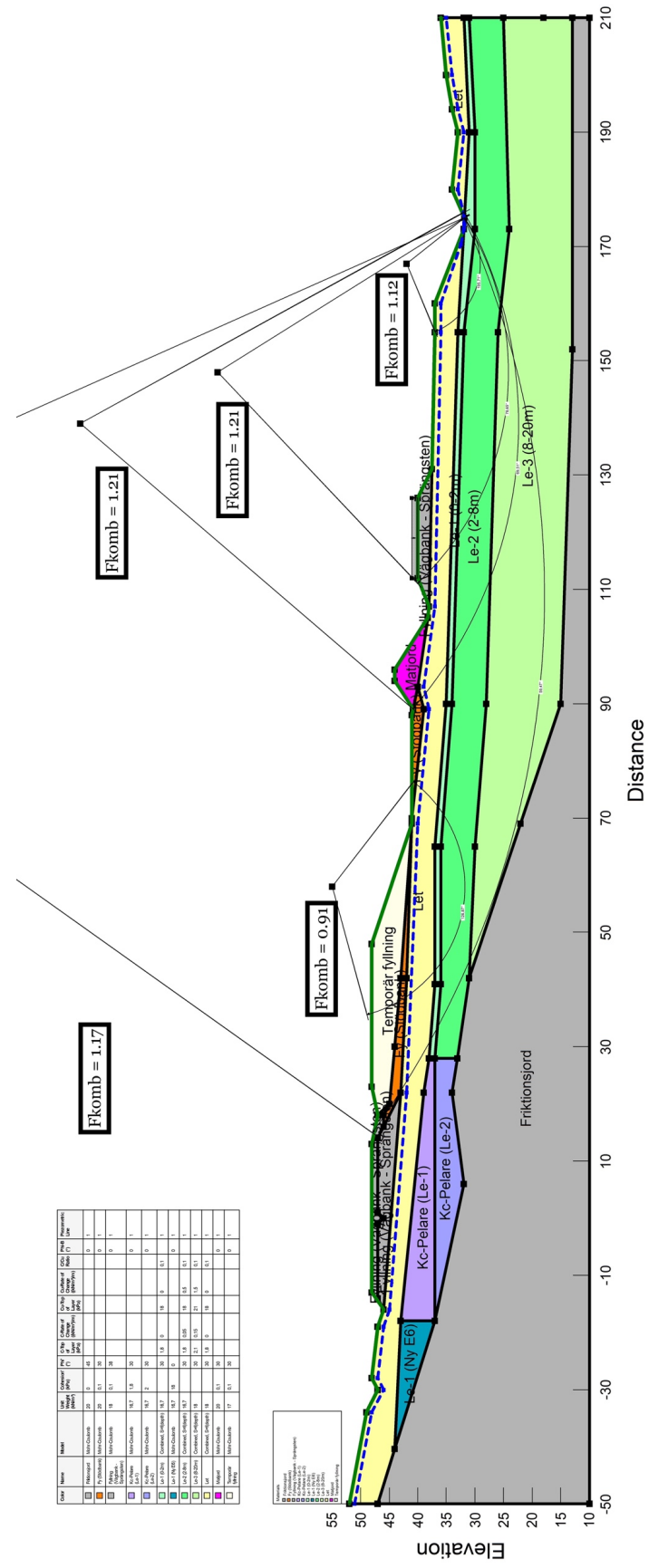


# 10.11 Utläggning av tryckbank 5/5





# 10.13 Enligt utfört förhållande







## 10.16 Materialparametrar (Kombinerad Analys)

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	Cu-Top of Layer (kPa)	Cu-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C/Cu Ratio	Phi-B (°)	Piezometric Line
■	Friktionsjord	Mohr-Coulomb	20	0	45						0	1
■	Fy (Stödbank)	Mohr-Coulomb	20	0,1	30						0	1
■	Fyllning (Vägbank - Sprängsten)	Mohr-Coulomb	18	0,1	38						0	1
■	Kc-Pelare (Le-1)	Mohr-Coulomb	16,7	1,8	35						0	1
■	Kc-Pelare (Le-2)	Mohr-Coulomb	16,7	2	35						0	1
■	Le-1 (0-2m)	Combined, S=f(depth)	16,7		30	1,8	0	18	0	0,1		1
■	Le-1 (Ny E6)	Mohr-Coulomb	16,7	18	0						0	1
■	Le-2 (2-8m)	Combined, S=f(depth)	16,7		30	1,8	0,05	18	0,5	0,1		1
■	Le-3 (8-20m)	Combined, S=f(depth)	18		30	2,1	0,15	21	1,5	0,1		1
■	Let	Combined, S=f(depth)	18		30	1,8	0	18	0	0,1		1

## 10.17 Materialparametrar (Odränerad Analys)

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	C-Top of Layer (kPa)	C-Rate of Change ((kN/m <sup>2</sup> )/m)	C-Maximum (kPa)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)	Piezometric Line
■	Friktionsjord	Mohr-Coulomb	20				0	45	0	1
■	Fy (Stödbank)	Mohr-Coulomb	20				0,1	30	0	1
■	Fyllning (Vägbank - Sprängsten)	Mohr-Coulomb	18				0,1	38	0	1
■	Kc-Pelare (Le-1)	Mohr-Coulomb	16,7				1,8	35	0	1
■	Kc-Pelare (Le-2)	Mohr-Coulomb	16,7				2	35	0	1
■	Le-1 (0-2m)	Mohr-Coulomb	16,7				18	0	0	1
■	Le-1 (Ny E6)	Mohr-Coulomb	16,7				18	0	0	1
■	Le-2 (2-8m)	S=f(depth)	16,7	18	0,5	21				1
■	Le-3 (8-20m)	S=f(depth)	18	21	1,5	54				1
■	Let	Mohr-Coulomb	18				18	0	0	1
■	Matjord	Mohr-Coulomb	20				0,1	30	0	1



**CHALMERS**