



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



## Vad orsakar skred i kvicklera?

Albin Carrin

Simon Kollberg

Linus Persson

Nematollah Shahrani

Gabriel Öhgren

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Chalmers Tekniska Högskola

Göteborg 2024

Kandidatarbete grupp ACEX11-VT24-33



Kandidatarbete 2024

# Vad orsakar skred i kvicklera

Albin Carrin  
Simon Kollberg  
Linus Persson  
Nematollah Shahrani  
Gabriel Öhgren



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

*Avdelningen för geologi och geoteknik*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2024

Vad orsakar skred i kvicklera?  
What triggers quick clay failures?

Albin Carrin  
Simon Kollberg  
Linus Persson  
Nematollah Shahrani  
Gabriel Öhgren

© ALBIN CARRIN, 2024  
© SIMON KOLLBERG, 2024  
© LINUS PERSSON, 2024  
© NEMATOLLAH SHAHRANI, 2024  
© GABRIEL ÖHGREN, 2024

Handledare: Minna Karstunen  
Examinator: Ayman Abed

Kandidatarbete 2024  
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
*Avdelningen för geologi och geoteknik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2024

Framsida: Foto från kvicklereskredet i Småröd. Foto: Sveriges  
Geotekniska Institut/Carina Hultén

# Sammanfattning

Västsverige och Norge har historiskt varit mycket utsatt för skred i kvicklera. Lerans sensitiva egenskaper utgör inte sällan en utmaning för de som bär ansvar att hantera leran vid exploatering. Effekterna av skreden är bland annat förlust av människoliv, förstörelse av viktig infrastruktur och stora kostnader. Genom årens lopp har metoderna för att förhindra kvicklereskred blivit allt bättre och avancerade, trots detta är skred i kvicklera ett aktuellt problem även idag. Denna rapport består av en ingående undersökning och förklaring av kvicklerans natur och mekanismerna bakom kvicklereskred. Analyser av litteratur och rapporter från tidigare kvicklereskred samt simulering av skredet i Tuve med hjälp av programvaran Geostudio har bidragit till att belysa såväl etiska som geotekniska utmaningar. Genom en sammanställning av analyser och undersökningar är målet med rapporten att i slutändan kunna adressera vad som ligger till grund för utlösandet av kvicklereskred. Rapporten understryker att nederbörd och faktorer relaterade till nederbörden såsom förhöjt porvattentryck är de enskilt viktigaste orsakerna till skred i kvicklera. Andra faktorer relaterade till exploateringen av skredkänsliga områden är i samtliga undersökta skred bidragande orsaker. Rapporten diskuterar även lösningar till problematiken kring kvicklera med utgångspunkt i möjliga stabiliseringsåtgärder, samt framtida förhållningssätt för att undvika mänskligt utlösta skred.

Nyckelord: Geoteknik, Kwicklera, Släntstabilitet, Tuveskredet, Stabiliseringsåtgärder, Hydrogeologi

# Abstract

Historically, the western parts of Sweden and Norway have been particularly vulnerable to landslides in quick clay. The properties of this kind of clay frequently pose a challenge for those responsible for managing the ground and clay at the initiation of exploitation. The effects of the quick clay landslides vary but can occasionally cause loss of human life, destruction of important infrastructure, and in many cases immense costs. Throughout time, the methods for preventing these landslides have become progressively advanced. Despite this, quick clay still causes recurring issues. In this paper, a detailed investigation and explanation regarding the nature and mechanisms of quick clay landslides was conducted. Through analysis of literature and previous reports covering quick clay landslides as well as Geostudio simulations of one particular landslide, challenges of an ethical and geotechnical nature have been highlighted. By compiling these analyses and data, the purpose of this bachelor thesis is ultimately to be able to point out what the main triggers in quick clay landslides usually are. The report's findings indicate that precipitation and other underlying factors correlating to precipitation, such as elevated pore water pressure, are the single most important causes of landslides in quick clay. Other factors related to the exploitation of landslide-prone areas are contributing factors in all investigated landslides. The report also discusses solutions to the issues surrounding quick clay, based on possible stabilisation measures, as well future approaches to avoid human-triggered landslides.

Keywords: Geotechnics, Quick clay, Slope stability, The landslide at Tuve, Stabilisation measures, Hydrogeology

# Innehåll

<b>1 Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1 Inledning	1
1.2 Syfte	3
1.3 Avgränsningar	3
<b>2 Kvikklara och släntstabilitet</b>	<b>4</b>
2.1 Sensitivitet och klassificering av kvikklara	4
2.2 Progressiva skred	5
2.3 Säkerhetsfaktorn	6
2.4 Erosion	6
2.5 Påverkan från klimatförändringar	7
2.6 Stabiliseringsåtgärder	7
2.6.1 Avschaktning	7
2.6.2 Kalkcementpelare	8
2.6.3 Portrycksreglering	8
2.6.4 Jetinjektering	8
2.6.5 Andra stabiliseringsmetoder	8
<b>3 Teori</b>	<b>10</b>
3.1 Hållfasthet	10
3.2 Hydraulisk konduktivitet	11
3.3 SLOPE/W	11
3.4 SEEP/W	14
<b>4 Skredet i Gjerdrum</b>	<b>16</b>
4.1 Skredområde	16
4.2 Skredorsaker	16
<b>5 Skredet i Småröd</b>	<b>17</b>
5.1 Skredområde	17
5.2 Markens geotekniska egenskaper	18
5.3 Nederbörd och vattenförhållande	18
5.4 Byggprojekt nya E6	18
5.5 Säkerhetsbrister	19
<b>6 Skredet i Tuve</b>	<b>20</b>
6.1 Skredområde	20
6.2 Generell jordlagerprofil och geotekniska egenskaper	21
6.3 Omgivningsfaktorer och nederbörd	22
6.4 Skredförlopp	23
6.5 Skredorsaker	24
<b>7 Metod</b>	<b>25</b>
7.1 Geometri och jordprofil	25
7.2 Geofysiska egenskaper	27
7.3 Hydrauliska egenskaper	28
7.4 Nederbörd och grundvattennivå	29
7.5 Applicering av last	30

7.6 Tuve kyrkväg	31
<b>8 Resultat</b>	<b>34</b>
<b>9 Diskussion</b>	<b>41</b>
<b>10 Slutstats</b>	<b>46</b>
<b>11 Referenser</b>	<b>47</b>
<b>Bilagor</b>	<b>52</b>

# 1 Introduktion

Skred i kvicklera och de förödande konsekvenserna som följer är inget nytt, redan år 1648 inträffade ett jordskred i Åkerström strax söder om Trollhättan, där omkring 100 människor beräknas ha avlidit (Järnefors, 1954). I takt med tiden har kännedomen ökat angående problematiken kring kvicklera, idag undersöks områden innan exploatering på ett helt annat sätt än de gjordes förr. Samtidigt medför den ökande nederbörden till följd av klimatförändringar en ökad risk för skred (Åhnberg, 2014). Statens Geotekniska Institut (2022) påpekar att antalet ras och skred kan bli upp till sex gånger fler i framtiden till följd av klimatförändringarna. Enligt Papadopoulou m.fl. (2023) utgör skred orsakade av kvicklera en betydande risk för allmänheten och en omfattande geoteknisk utmaning för konstruktioner som placeras i områden med kvicklera. Betydelsen visas inte minst av skredet som inträffade längs väg E6 i Stenungsund så sent som i september 2023.

Denna rapport består av en litteraturundersökning av kvicklera och dess skredmekanismer, samt en grundlig analys av 3 tidigare skred inklusive skredet i Tuve 1977 och Småröd 2006 på svenska västkusten samt skredet i Gjerdrum, Norge 2020. Skredet i Tuve är även kompletterat med stabilitetsanalys utförd i programvaran Geostudio i syfte att få en förståelse för vilka naturliga aspekter som agerar utlösningsskred. Stabilitetsanalysen på skredet i Tuve blir därmed studien och huvudfokus i denna rapport. Men för att kunna svara på generella frågan vad som utlöser skred i kvicklera har skribenterna valt att även granska skreden i Småröd och Gjerdrum. Vidare diskuteras även potentiella lösningar för att undvika framtida skred i kvicklera i slutet av rapporten.

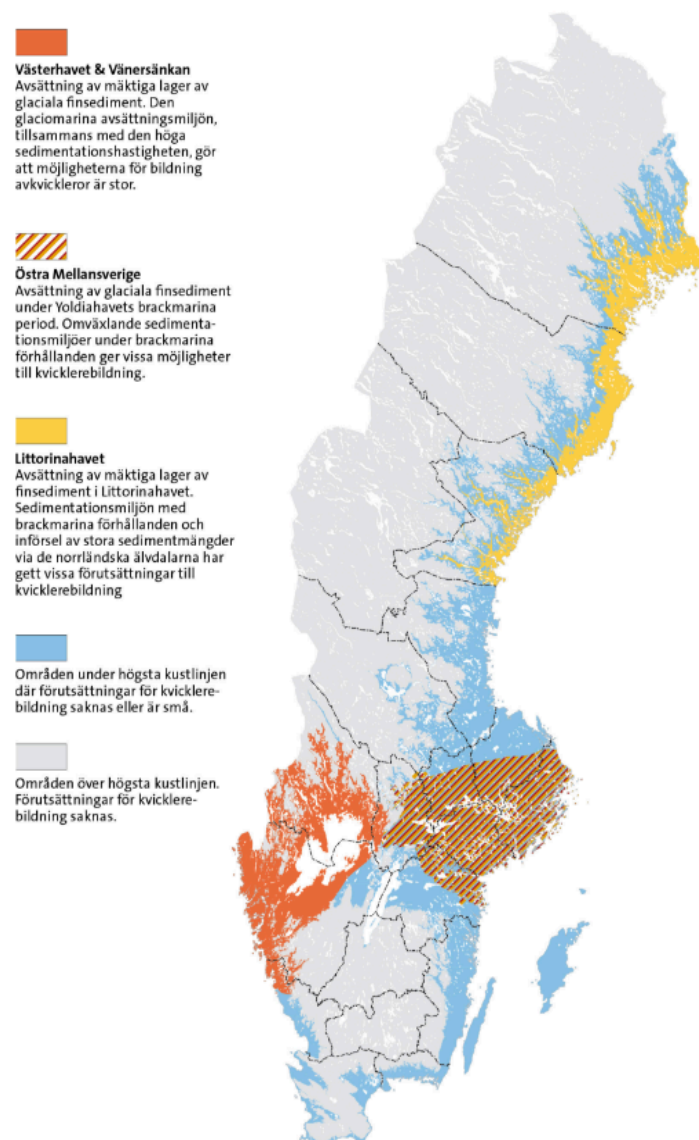
## 1.1 Inledning

Så vad är kvicklera? Hittills finns ingen klar definition för kvicklera och varför den förekommer. Flertalet teorier har fastställts och en allmän konsensus finns för några av dem. Papadopoulou m.fl. (2023) beskriver att kvicklera består av vattenmättade avlagringar av lera- och siltpartiklar. Avlagringarna har haft höga salthalter på grund av deras placering vid marina avsättningsmiljöer. Lerans salthalt är ansvarig för den kemiska bindningen mellan lerpartiklar som utgör lerans stabilitet. Enligt Papadopoulou m.fl. (2023) har, till följd av att den tunga glaciala ismassan gradvis avlägsnats, jordskorpan lyfts vilket i sin tur har resulterat i att sjövattnet infiltrerat jorden och reducerat lerans salthalt. Som konsekvens av saltreduceringen tappar leran sin hållfasthet och skred kan utlösas vid relativt låga tryckpåslag. Enligt Rankka m.fl. (2004) kan kvickleror även avsättas i miljöer med bräckt vatten och sötvatten. Då genom kontakt med organiska föreningar från jordarter som torv och andra humusrika jordar kan det förändra porvattnets jonkoncentration som i sin tur leder till att leran blir kvick. Ytterligare en teori är att mineralitet är en faktor som kan påverka en leras sensitivitet. Torrance, J.K. (2012) menar att leror som har samma mineralistiska uppsättning, medför samma aktivitet för leran. Storleken av lermineralen spelar mindre roll, dock medför variationer i mineralinnehåll även skillnader i sensitivitet.

När ett kvicklereskred inträffar är de direkta konsekvenserna uppenbara. Därutöver följer nästan alltid större bakomliggande ekonomiska konsekvenser och effekter på människorna i området som drabbas av skredet. Ta det stora kvicklereskredet i Tuve 1977 som exempel. Skredet skördade 9 liv och lämnade 40 personer skadade, Hartlén (1984). Hela 65 bostadshus förstördes eller följde med i rasmassorna och ytterligare 86 fastigheter befann sig i riskzonen efter skredet, vilket enligt Hartlén (1984) lämnade 436 personer utan bostad. Gator som förstördes i samband med skredet medförde

trafikstörningar och logistiska problem, samt kostnader för återställande. Brott på el- och VA-ledningar krävde provisoriska lösningar såväl inom skredområdet som inom omgivande grannskap (Hartlén, 1984). Då information angående totalkostnad för restaureringen inte funnits, görs dock antagandet att de ekonomiska konsekvenserna var påtagliga. I samband med byggandet av väg E6 inträffade skredet i Småröd i december 2006 vilket lyckligtvis inte orsakade några dödsfall. Bygget stod färdigt i februari 2007, trots den snabba restaureringen beräknades skredet ändå uppnå en samhällskostnad på 519 miljoner kronor enligt Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB, 2019).

I en rapport skriven av Schoning (2016) och publicerad av Sveriges geologiska undersökning (SGU, 2016) identifierades områden i Sverige utifrån deras geologiska förutsättningar för bildning av kvicklera, se figur 1.1. Bilden visar att stora områden i framför allt västra delar av Sverige har stor potential för bildning av kvicklera, vilket gör problemet till något som inte kan undvikas utan måste adresseras.



Figur 1.1: karta över områden med geologiska förutsättningar för bildning av kvickleror. Hämtad från: © Sveriges geologiska undersökning.

## 1.2 Syfte

Denna rapport syftar till att ge svar på vilka naturliga och mänskligt pådrivande faktorer som står till grund för skred i slänter bestående av eller till del av kvicklera. Vidare syftar även rapporten till att identifiera hur framtida skred kan undvikas.

## 1.3 Avgränsningar

Tre skred utvärderas utifrån tillgänglig litteratur, skreden i Tuve, Småröd och Gjerdrum. Skred utöver de ovan nämnda behandlas inte i rapporten. För att utvärdera släntstabiliteten för skredet i Tuve används datorprogrammet Geostudio. De två programvarorna SLOPE/W och SEEP/W som finns tillgängliga i Geostudio tillämpas för att utvärdera stabilitet för släntens initialt stationära tillstånd samt släntens tidsberoende tillstånd under påverkan från kraftig nederbörd. Släntstabiliteten utvärderas baserat på en 2-dimensionell modell.

## 2 Kvikklara och släntstabilitet

För att kunna besvara ovanstående frågeställning är första steget att förstå mekanismerna bakom kvicklara och vad den har för påverkan på släntstabilitet. Inte minst måste också möjliga lösningar till problemet identifieras. Kapitel 2.1 - 2.6 finns därför i syfte att ge läsaren en grundlig förståelse för de ämnen som rapporten behandlar.

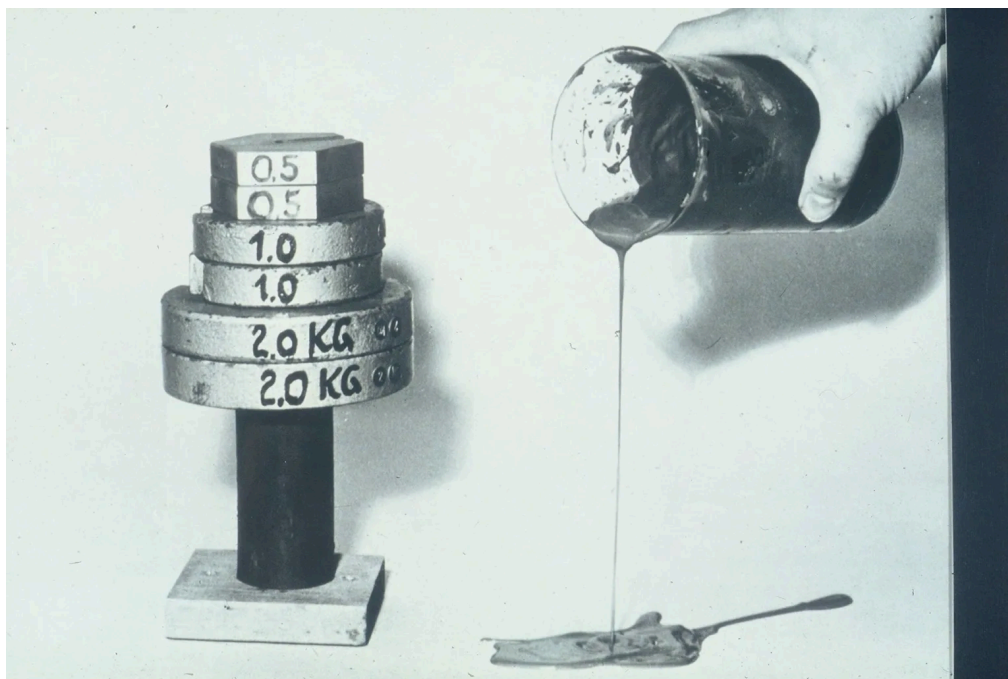
### 2.1 Sensitivitet och klassificering av kvicklara

För att beskriva stabilitet i en jordprofil används ofta begreppet sensitivitet vilket redogörs av Smalley (1976) samt Ching och Phoon (2014) som förändringen av hållfastheten i jord vid störning eller omrörning. Lera som är mycket högsensitiva får benämningen kvicklara. Kvikklara blir ett komplext och farligt problem på grund av förmågan att gå från ett relativt fast material till helt flytande när det blivit utsatt för någon form av störning, se figur 2.1. Enligt Richer m.fl. (2020) är en lera benämnd sensitiv om dess sensitivitet ( $S_t$ ) är större än 1. Ekvation (2.1) beskriver sensitivitet enligt Richer m.fl. (2020).

$$(2.1) S_t = \frac{\text{Odränerad skjuvhållfasthet}}{\text{Odränerad skjuvhållfasthet efter omrörning}}$$

*Ekvation (2.1) beräkning av sensitivitet, hämtad från Richer m.fl. (2020)*

Richer m.fl. (2020) beskriver att definitionen av vilken sensitivitet som krävs för att en lera ska klassificeras som kvick varierar för olika länder. För att en lera ska klassas som kvick i Sverige så krävs en sensitivitet över 50, dessutom en omrörd skjuvhållfasthet mindre än 0,4 kPa. I Norge krävs en sensitivitet över 30 och en omrörd skjuvhållfasthet mindre än 0,5 kPa. En lera med sensitivitet på 30 betyder med andra ord att lerans skjuvhållfasthet blir 30 gånger lägre vid störning eller omrörning. Följaktligen utgör sensitiviteten en väsentlig faktor vid bedömning av jordens hållfasthetsegenskaper och skredpotential.



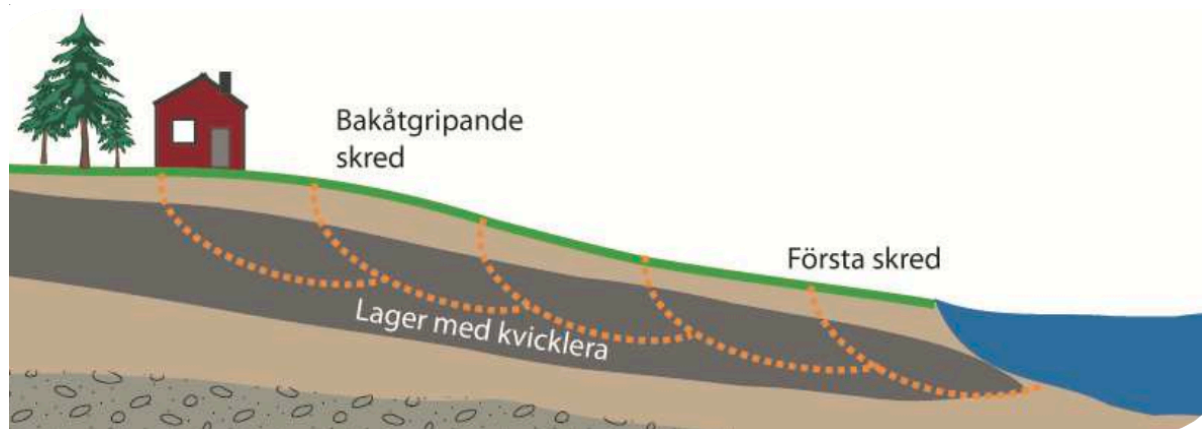
Figur 2.1: Visualisering av kvicklerans hållfasthet före och efter omrörning. Foto: Bo Alte

## 2.2 Progressiva skred

Sensitiv lera kan enligt Richer m.fl. (2020) producera framåtgående och bakåtgående typer av så kallade progressiva skred. Ett progressivt skred har sin grund i initialt mindre skred eller sprickor som utlöser en kedjereaktion för ett omfattande område med till synes hög stabilitet. Det är framförallt de geometriska förändringarna i initialskedet som leder till ett fortlöpande skred. Ett progressivt skred kan fortlöpa inte bara bakåtgripande och framåtgripande utan också kombinerat.

Richer m.fl. (2020) beskriver att en progressiv framåtgripande glidning i sensitiv lera utlöses då hela leran är omformad och flödar ut ur glidområdet. En lång glidyta med försvagad eller ingen hållfasthet orsakad av skjuvdeformationer och omrörning får därav ett ökat porvattentryck, till följd av ett initialt skred i den sensitiva leran.

Richer m.fl. (2020) presenterar även förekomsten av progressivt bakåtgående skred i sensitiv lera. Ett mindre skred sker i botten av slänten. Den kvarstående skredytan får stor lutning och höjd vilket medför ytterligare skred. Nya glidytor bildas successivt uppåt, denna bakåtgående progressiva process fortskrider och lämnar efter sig en skredkrater. Enligt Hartlén (1984) är lerans sensitivitet en avgörande faktor för skredets omfattning. För leror som är lågt sensitiva stannar det bakåtgående skredet när rasmassorna är tillräckligt omfattande för bilda en tryckbank vilken stabiliserar slänten, se figur 2.2 som illustrerar bakåtgripande progressiva skred.



Figur 2.2: Bakåtgripande skred (SGI, 2016)

Det är i regel svårt att förutspå fenomenet med progressiva skred. Den utlösande faktorn till initialt skredet för en sensitiv slänt kan vara relaterad till en mindre och synes oskyldig störning (Richer m.fl., 2020). En metod för att räkna på och tolka utfallen för progressiva skred är att identifiera dragsprickor i en aktiv zons övre jordlager. När dessa sprickor fylls med vatten, troligtvis från nederbörd, så skapas ett tryck i sprickorna som får dem att agera med en hävstångseffekt som sätter jorden i rörelse i en viss riktning. Därmed kan sprickornas riktning vara en indikation på utfallet för ett potentiellt progressivt skred (Bernander, 2007).

## 2.3 Säkerhetsfaktorn

Enligt Kumar m.fl. (2023) är säkerhetsfaktorn för en slänt ett mått på jordens stabilitet, med andra ord är säkerhetsfaktorn förhållandet mellan motståndande och pådrivande krafter för ras eller skred. Säkerhetsfaktorn är beroende av många faktorer som påverkas av jordens geotekniska egenskaper och släntens geometri. I och med komplexitet kring att analysera och identifiera en slänts naturliga säkerhetsfaktor och hur den påverkas av potentiella laster finns ett flertal metoder. De vanligaste metoderna är enligt Kumar m.fl. (2023) *limit equilibrium method (LEM)*, *limit analyses (LA)* och *finite element method (FEM)*, där *LEM* är den mest använda och beprövade metoden, för vidare beskrivning av *LEM*, se kapitel 3.3.

## 2.4 Erosion

Erosion innebär enligt Finnie (1960) att fasta partiklar, såsom jord och berg, nöts ner av vatten över tid. Erosion sker främst där det finns vatten i rörelse, till exempel vid åar och bäckar. Erosionens omfattning beror främst på vattenflödets storlek och hastighet samt det eroderande materialets egenskaper. Erosionen ökar därmed med ett ökat vattenflöde och en ökad vattenhastighet. Vidare rinner ofta vattendrag längs botten av slänter, och material vid släntfoten riskerar därför att erodera. När material längs vattendrag eroderar blir effekten att slänten hyvlas ned och får en brantare lutning längst ner, se figur 2.3. Effekten av erosion innebär att släntens hållfasthet minskar och risken för skred ökar.



Figur 2.3: Erosion vid vattendrag i finkornig jordart. Foto: John, tillstånd enligt Creative Commons

## 2.5 Påverkan från klimatförändringar

Klimatförändringarna som Kandalai m.fl. (2022) beskriver som den långsiktiga förändringen av temperatur-och väderförhållanden har under det senaste århundradet eskalerat. Bland annat på grund av den storskaliga förbränningen av fossila bränslen och användningen av petrokemikaliska produkter. Konsekvenser i form av mer frekventa, intensiva och förorenade regn påverkar jordens geotekniska egenskaper. Ökad nederbörd och vattenföring, leder till ökat porvattentryck och infiltration vilket sänker jordens hållfasthet och bidrar till den salturlakning som ligger till grund för uppkomsten av kvicklera (Kandalai m.fl., 2022, Papadopoulou m.fl., 2023). Dessutom leder det ökade vattenflödet till förhöjd erosion längs vattendragen vilket som ovan nämnt minskar släntstabiliteten (Borelli m.fl., 2020). Uppskattningsvis kommer nederbörden att öka upp till 25% i vissa delar av Sverige (Naturvårdsverket, 2024).

Förekomsten av höga halter föroreningar från industriella processer som bland annat kväveoxider och svaveldioxid i nederbörden bidrar enligt Kandalai m.fl. (2022) till en sänkning av pH-värdet i jorden. Försurad jord reducerar jordens lastbärande förmåga och ökar den hydrauliska ledningsförmågan (Kandalai m.fl., 2022).

## 2.6 Stabiliseringsåtgärder

Helle m.fl. (2022) menar att kvicklera antar en vätskeliknande karaktär när den omröres. Följaktligen krävs ofta stabiliseringsåtgärder i marken för bebyggelse i anslutning till högsensitiv jord. Cementbaserade åtgärder är lämpliga, då cement reagerar med vattnet i marken och bildar en gjuten pelare. Den stora nackdelen med cementbaserade stabiliseringsåtgärder är enligt Hov m.fl. (2023) deras negativa påverkan på miljön då produktionen av cement och kalciumoxid genererar stora mängder koldioxidutsläpp. Ekonomisk vinning och klimatpåverkan blir därför viktiga aspekter att se över för att utföra ett så effektivt förebyggande arbete som möjligt. Enligt Helle m.fl. (2022) genomfördes en studie där lönsamheten av stabiliseringsåtgärder jämfördes med den klimatpåverkan respektive metod skulle leda till, mätt i koldioxidekvivalenter (CO<sub>2</sub>-eq). Beslutstagarna ställs inför ett etiskt val där det kan resoneras hur lönsamheten väger över klimatfrågor och framtiden sett till utsläpp av CO<sub>2</sub>-eq (Helle, m fl. 2022). I nedanstående punkter följer beskrivningar av förslag på förstärkningsmetoder för kvicklera.

### 2.6.1 Avschaktning

Enligt von Bahr (2013) är avschaktning en användbar metod för att förhindra skred, främst tack vare dess relativt låga kostnader samt den breda erfarenheten som finns tillgänglig. Vid metoden bortförs markmaterial vanligtvis vid släntrön alternativt minskas släntens lutning. Om en specifik markhöjd behövs, då går metoden ut på att bortföra jordmassor som har låga hållfasthetsegenskaper och hög tunghet och ersätta dessa med material som stabilare och har lägre tunghet, exempelvis cellplast. Metoden leder till att slänten avlastas, lerlagrets tryck från högre belägna ytor minskar. Åtgärden passar bra för sand- eller lerlager nära markytan. Däremot krävs vid djupliggande sand- och lerlager att en stor mängd markmaterial förs bort och ersätts, vilket inte är gynnsamt, varken ur ett ekonomiskt eller miljömässigt perspektiv.

## 2.6.2 Kalkcementpelare

I Skandinavien är enligt Helle m.fl (2022) användningen av kalkcementpelare framträdande för att förbättra jordens hållfasthetsegenskaper. Metoden som utgörs av att pelare drivs ned i jorden betraktas som en effektiv och relativt billig lösning till problemet. Kalkcementpelare är enligt Juvik m.fl (2019) en förstärkningsmetod som fungerar bra i lera, speciellt i lera med låg hållfasthet.

## 2.6.3 Portrycksreglering

Höjning av grundvattennivån leder till en försämrad hållfasthet i jorden (von Bahr, 2013). Följaktligen är portryckssänkning ett sätt att angripa stabilitetsproblem och säkerställa släntens stabilitet. Von Bhar (2013) beskriver hur portrycket kan regleras genom att föra ner rör i marken så att vattnet kan tränga upp genom dessa och ut på markytan. För detta ändamål är det möjligt att tillämpa filterbrunnar, vertikaldränering eller rörbrunnar med pumpsystem. Huvudsyftet med denna åtgärd är att förhindra att ett normalt rådande portryck överskrids, men kan också tillämpas för att sänka de rådande portrycken.

En minskning portrycket kan enligt von Bahr (2013) leda till uttorkning av växtligheten, vilket försämrar växternas förutsättningar och i sin tur kan leda till en lokal minskning av den biologiska mångfalden. Ur ett ekonomiskt perspektiv är åtgärden kostsam eftersom den kräver livslång tillsyn och underhåll, därmed krävs en ansvarig organisation. Dessutom om portrycket understiger det normalt rådande trycket kan metoden medföra sekundära effekter i form av sättningar i omgivande områden vilket måste övervägas noggrant innan dessa åtgärder vidtas.

## 2.6.4 Jetinjektering

Sverino m.fl. (2022) skriver att jetinjektering är en metod där starka cementpelare skapas i jorden genom att jorden eroderas bort med en jetstråle och fylls igen med cement. Jetinjektering ökar hållfastheten i jorden och är mycket lätt att applicera på begränsade ytor samt är en väldigt tidseffektiv metod. Den fungerar även bra i de flesta jordarterna. En nackdel med jetinjektering, bortsett från att det är en cementbaserad stabiliseringsåtgärd, är att det är en väldigt ekonomiskt krävande åtgärd.

## 2.6.5 Andra stabiliseringsmetoder

Avschaktning ger inte en lösning på hur den höga sensitiviteten kan reduceras i kvicklera och porrycksreglering kommer med stora ekonomiska krav och höga risker. Alternativ som framför allt stabiliserar sensitiv jord på ett effektivt sätt är cementbaserade stabiliseringsåtgärder såsom kalkcementpelare och jetinjektering. Men med beaktande av rådande klimatkris är inte cementbaserade metoder långsiktigt hållbara. Hov m.fl. (2023) menar att det existerar stora forskningsambitioner för att reducera klimatpåverkan från jordstabiliseringsindustrin.

Industriella biprodukter skulle kunna vara ett möjligt substitut för kalk- och cementprodukter. Hov m.fl. (2023) presenterade en studie där biokol användes för att stabilisera sensitiv lera. Studien indikerade att biokol gav en låg men viss stabiliserande effekt som varierade mycket för olika typer av lera.

Helle m.fl. (2023) föreslår användning av saltbrunnar installerade i kvicklera för att låta salt över tid migrera in i kvicklereslänten, vilket ska göra leran successivt mindre sensitiv. Saltstabilisering förbättrar dock inte den odränerade skjuvhållfastheten vilket är metodens stora begränsning. Saltbrunnar är inte heller en metod som kan användas direkt utan tar lång tid, vilket gör metoden ineffektiv vid byggnation.

Singh (2010) beskriver hur vegetation kan användas för att stärka jordens stabilitet. Vegetation kan med hjälp av dess rotnätverk tillföra mekanisk stabilitet och därmed öka markens hållfasthet. Rotnätverket bidrar till mekanisk förstärkning och absorberar dessutom vatten i jorden. Enligt von Bahr (2013) är plantering av vegetation ett sätt att sänka porvattentrycket i marken. Vegetationen bidrar till minskat portryck genom att dels absorbera vatten i rötterna och dels genom att blad och gräs fångar upp nederbörd, vilket resulterar i avdunstning och minskar mängden vatten som infiltrerar marken. Användning av vegetation är dock, precis som för saltbrunnar, en relativt ineffektiv metod. Går skredet djupare än rotnätverket ger det ingen stabiliserande effekt (Singh, 2010).

Metoderna som Singh (2010), von Bahr (2013), Helle m.fl. (2023) och Hov m.fl. (2023) presenterar är alla exempel på potentiella lösningar till problemen kopplade till nuvarande stabiliseringsåtgärder. Fler förslag existerar men faktum kvarstår att ingen metod har än så länge lyckats ersätta de enligt Helle m.fl. (2023) och Hov m.fl. (2023) traditionella stabiliseringsmetoderna i Norge och Sverige bestående av cementbaserade produkter.

## 3 Teori

Kapitel 3 presenterar den teoretiska bakgrunden för de fenomen och analyser och som står till grund för utvärderingen av släntstabilitet i detta arbete. I första avsnittet beskrivs mekanismerna bakom hållfasthet i olika jordtyper samt olika metoder för att bestämma jordens hållfasthet. I andra avsnittet diskuteras hydraulisk konduktivitet i jord och dess betydelse för förståelse av vattenrörelser i marken samt för att bedöma skredrisker. Under avsnittet SLOPE/W beskrivs användning av *Limit Equilibrium Method* för stabilitetsanalys genom programvaran Geostudio. I avslutningen beskrivs användning av SEEP/W som ett verktyg för att analysera vattenrörelser och grundvattenförhållande i sluttningar.

### 3.1 Hållfasthet

Markens hållfasthet avgörs enligt Wagner (2013) av dess förmåga att stödja vikten av en konstruktion eller förbli stabil på en sluttning. Markens hållfasthet bestäms också av dess förmåga att motstå skjuvspänningar. Om markens förmåga att motstå skjuvspänningar överskrider, kan förskjutningar uppstå. Enligt Wagner (2013) är hållfastheten i material med grövre kornstorlek som sand eller grus beroende av jordens interna friktionsmotstånd. Grövre jordmaterial är mycket lite påverkade av vatteninnehåll.

Wagner (2013) presenterar även hållfasthetsegenskaperna hos lera och andra material bestående av mycket små partiklar. Dessa marktyper klassificeras som kohesiva jordar där den primära bindningen mellan partiklarna, känd som kohesion, främst utgörs av den kemiska interaktionen mellan partiklar. Påverkan från den interna friktionen är i huvudsak försumbar. Lerans hållfasthet påverkas avsevärt av förändringar i markens vattenkvot. Variationer i vattenkvot kan leda till deformationer och förändring i lerans volym. Då den specifika konsistens som en kohesiv jord antar är starkt korrelerad med dess vattenkvot. Allt eftersom vatten tillsätts materialet, övergår det gradvis från fast till flytande tillstånd. Vattenkvoten då jord övergår från fast till flytande varierar för olika typer av material. Wagner (2013) benämner denna gräns som *liquid limit*, den svenska motsvarigheten benämns konflytgräns av Suer m.fl. (2017).

Vid bestämning av en leras hållfasthet kan flera metoder användas, en metod är så kallade vingförsök. Löfroth (2008) beskriver hur ett vingförsök går till, genom att ett borr först förs ner i marken genom slag eller tryck. När boret når önskat djup sätts boretts vingar i rörelse och roterar i en konstant hastighet vilket orsakar en deformation av leran. Med hjälp av mätning av lerans deformation samt den kraft som krävs för att rotera vingarna kan då en skjuvhållfasthet bestämmas för aktuellt djup. Direkt skjuvförsök är enligt Löfroth (2008) en annan metod för bestämning av skjuvhållfastheten. Denna metod genomförs i labb, där ett cylindriskt prov av jorden utsätts för skjuvkrafter för att därmed kunna bestämma hållfastheten vid det moment då jorden deformeras och förlorar sin hållfasthet.

## 3.2 Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet är enligt Amiri m.fl. (2023) ett mått på ett poröst ämnes förmåga att leda vatten. Värdet av den hydrauliska konduktiviteten bestäms av parametrar som storlek på jordpartiklar, sedimentationsmiljöer och evolutionära aspekter. Utvärdering av jordens hydrauliska konduktivitet ger möjligheter till att bättre förstå och förutsäga hur en jordprofil reagerar vid kraftiga regn och hög bort- eller tillförsel av vatten. Att studera markens hydrauliska konduktivitet ger därför förutsättningar för att identifiera grundvattenflödet i den påverkade jordprofilen.

Hydraulisk konduktivitet är enligt Zhang m.fl (2023) en viktig aspekt för utvärdering av skredrisker då jord med låg konduktivitet ofta resulterar i en större ökning av porvattentrycket vid vatteninfiltration. Material med hög porositet och hydraulisk konduktivitet har en lägre strukturell stabilitet vilket ökar risken stabilitetsrelaterade skred. Olikheter i hydraulisk konduktivitet i olika områden kan leda till att grundvattennivåerna lokalt höjs. Lokala ansamlingar av porvattentryck kan också resultera i markrörelser och skred (Zhang m.fl., 2023).

Schaap m.fl (2001) identifierade skillnaden i hydraulisk konduktivitet mellan olika jordarter baserat på kornstorlek. Lera som är en mycket finkornig jord har en mycket låg hydraulisk konduktivitet. Sand, å andra sidan, har betydligt grövre korn och därmed en högre hydraulisk konduktivitet. Schaap m.fl (2001) antyder därför att ett jordlager bestående av enbart lera har mycket låg konduktivitet. Ju högre kvot av annat material som silt, sand och andra jordarter med grövre kornstorlek, desto högre blir jordlagrets konduktivitet.

## 3.3 SLOPE/W

*Limit equilibrium method (LEM)* utgör den grundläggande teorin bakom den stabilitetsanalys som utförs i Geostudio med hjälp av programvaran Slope/W. Principen kring metoden, som beskrivs av Chen och Morgenstern (1983), kan delas in i följande tre delar.

*Principle of equilibrium* innebär att den jordmassa som är relevant för skred delas in i skivor, varje skiva måste uppfylla minst kriteriet för jämvikt mellan de pådrivande och de mothållande krafterna. Vikten i varje skiva får alltså inte överstiga den kraft som håller skivan på plats.

*Mohr-Coulomb failure criterion:* Jorden antas följa Mohr-Columbs brottkriterium som fastställer att skjuvspänningen vid brott i jord bestäms enligt ekvation (3.1) (Chen och Morgenstern, 1983)

$$(3.1) \quad \tau_f = C' + \sigma_n' \cdot \tan\phi'$$

Ekvation 4.2: Mohr-Columbs brottkriterium hämtad från Chen och Morgenstern (1983)

Där  $\tau_f$  = skjuvspänning vid brott,  $\sigma_n'$  = effektiv normalspänning vid brott,  $\phi'$  = jordens inre friktionsvinkel och  $C'$  = effektiv kohesion. Se figur 3.1.

*The factor of safety* säkerhetsfaktorn definieras som det värde som jordens hållfasthetsparametrar måste reduceras med för att jordmassan ska befinna sig i ett jämviktsläge. Vidare följer därför att ekvation (3.2), (3.3) och (3.4) lyder:

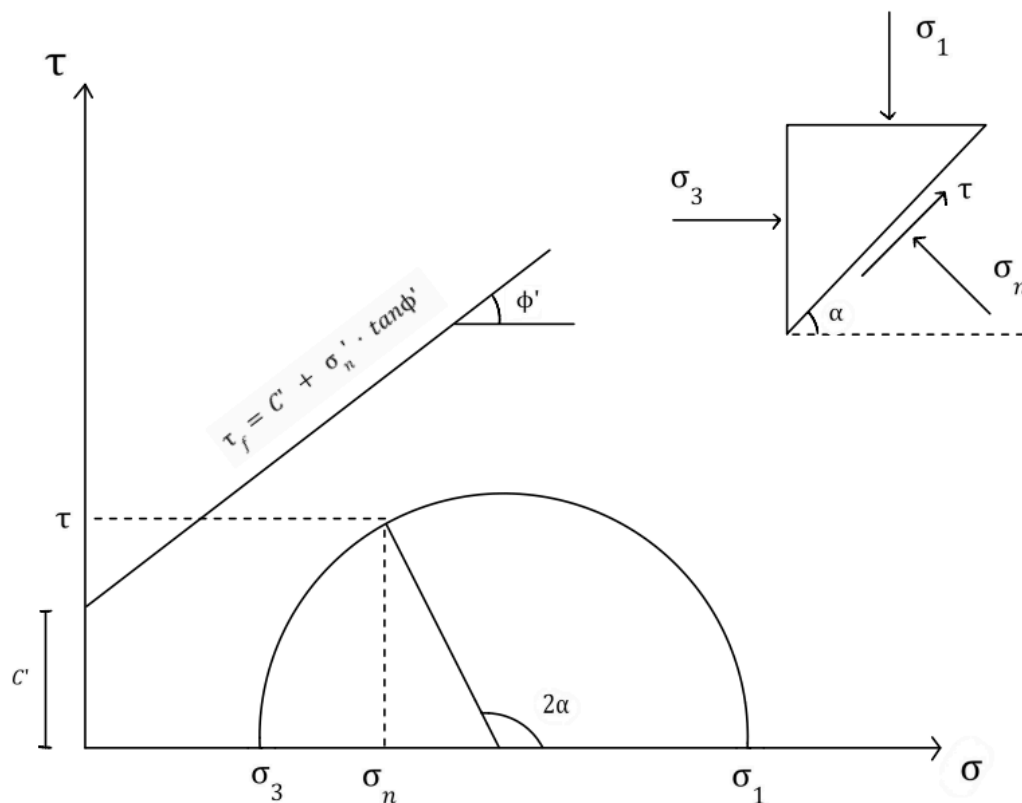
$$(3.2) \quad \tau = C_e' + \sigma_n' \tan\phi_e'$$

$$(3.3) \quad C_e' = \frac{C'}{F}$$

$$(3.4) \quad \tan\phi_e' = \frac{\tan\phi'}{F}$$

Ekvation 3.2.3.3.4: the factor of safety hämtad från Chen och Morgenstern (1983)

Var  $\tau$  = skjuvspänning i jorden vid jämvikt,  $C_e'$  = kohesion i jorden vid jämvikt,  $\phi_e$  = jordens inre friktionsvinkel vid jämvikt och  $F$  = säkerhetsfaktorn. En säkerhetsfaktor över 1 innebär därför teoretiskt sett att det inte kommer uppstå skred, medan en säkerhetsfaktor under 1 gör det (Chen och Morgenstern, 1983).



Figur 3.1: Mohr-Columbs brottkriterium

I denna studie används *limit equilibrium* metoden i SLOPE/W som etablerades av Morgenstern och Price (1965) som bygger på de tre ovanstående principerna. Morgenstern och Price som till skillnad från sina föregångare utvecklade en metod som säkerställer en säkerhetsfaktor utgående från både momentjämvikt och horisontell kraftjämvikt. Se härledning och detaljerad förklaring i Morgenstern och Price (1965). Amin m.fl (2022) presenterar två ekvationer (3.5) och (3.6) för säkerhetsfaktorn utgående från Morgenstern och Price härledning baserat på skivans interna skjuvspänningskrafter, se figur 3.2 för en förenklad modell över stabilitetsprincipen i en slänt enligt Morgenstern och Price (1965).

Säkerhetsfaktor momentjämvikt:

$$(3.5) \quad F_m = \frac{\Sigma[c'\beta R + (N - u\beta)R \tan\phi']}{\Sigma Wx - \Sigma Nf + \Sigma kW \pm \Sigma Df \pm \Sigma Aa}$$

Ekvation 3.5: säkerhetsfaktor momentjämvikt enligt Morgenstern och Price (1965) hämtad från Amin m.fl. (2022)

Säkerhetsfaktor horisontell kraftjämvikt:

$$(3.6) \quad F_f = \frac{\Sigma[c'\beta\cos\alpha + (N - u\beta)\tan\phi'\cos\alpha]}{\Sigma N\sin\alpha + \Sigma kW - \Sigma D\cos\omega \pm \Sigma A}$$

Ekvation 3.6: säkerhetsfaktor horisontell kraftjämvikt enligt Morgenstern och Price (1965) hämtad från Amin m.fl. (2022)

$u$  = porvattentryck.

$N$  = normalkraft vid skivans bas.

$W$  = skivans vikt.

$D$  = potentiell punktlast.

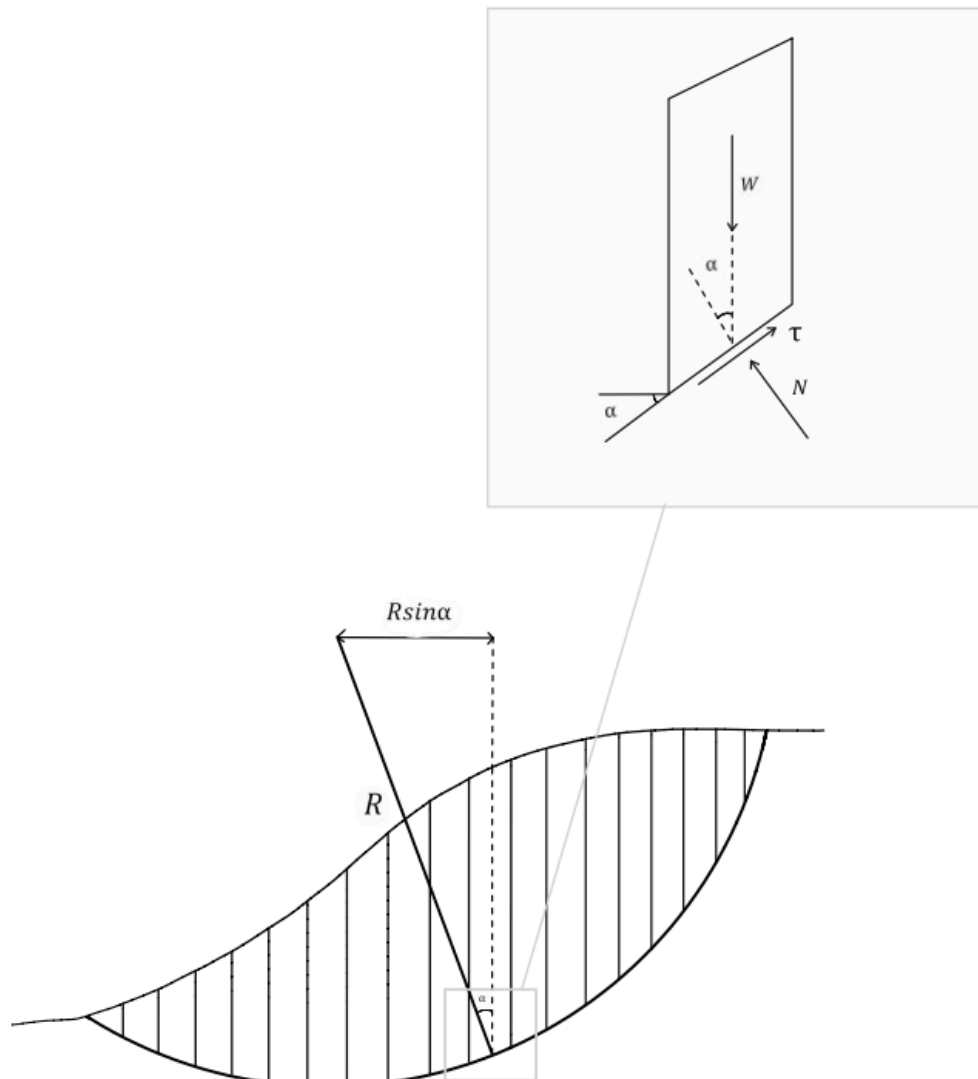
$\alpha$  = lutningen vid skivans bas.

$\omega$  = horisontal vinkeln från punktlasten vilken mäts moturs från den positiva x-axeln.

$A$  = Resultaten av de externa vattenkrafterna.

$kW$  = Den horisontella siesmiska belastningen som appliceras genom centrioden av skivan (inte relevant i denna studie).

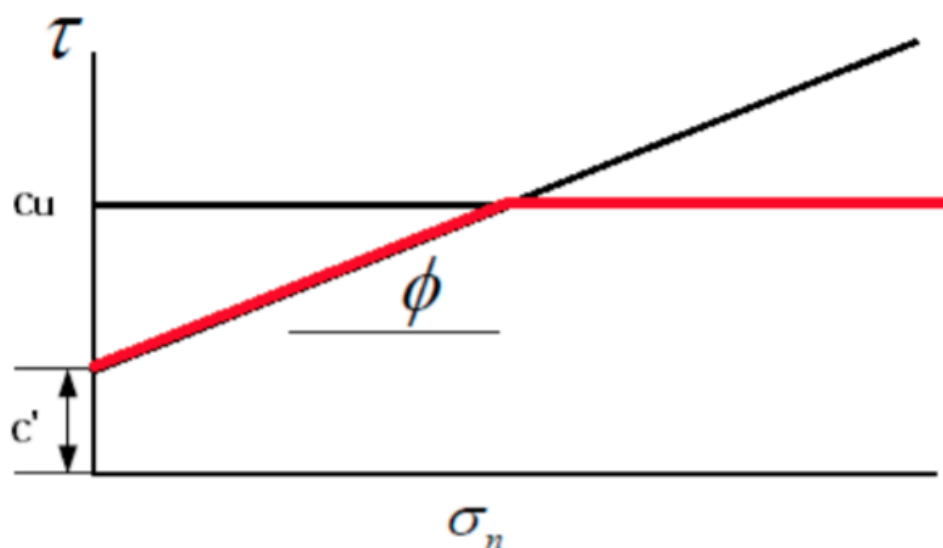
$\beta, R, x, f, d$  = geometriska parametrar beroende av släntens geometri och varje enskild skivas geometri.



Figur 3.2: Förenklad modell för stabilitetsberäkning baserad på Morgenstern och Price limit equilibrium method.

Krahn (2003) beskriver bristerna i *LEM*, metoden har sin största begränsning i att den inte tar hänsyn till förenligheten mellan förskjutning och deformation. Bristerna medför att de lokala variationer för säkerhetsfaktorn som uppstår inte kan beaktas och att den beräknade spänningsfördelningen ofta inte överensstämmer med verkligheten. Metoden beskrivs ändå av Krahn (2003) som ett användbart verktyg under förutsättningar att användaren förstår dess begränsningar och inte förväntar sig att metoden ska ge en bredare analys.

En kombinerad analys är enligt GEO-SLOPE International, Ltd (2015) en metod utvecklad i Skandinavien från observationer av hållfasthetsegenskaper på jorden. Metoden tar fram jordens hållfasthet genom att kombinera den kohesiva parametern  $C'$  och friktionsparametern  $\phi'$  för dränerad jord tills odränerad hållfasthet  $C_u$ , uppfylls, se figur 3.3. Den odränerade skjuvhållfastheten varierar ofta med djupet, kombinerad analys kan användas i SLOPE/W när skjuvhållfastheten varierar genom applicera skjuvhållfasthet enligt funktioner i respektive lager istället för en konstant skjuvhållfastheten.



Figur 3.3: Modell visande kriterium för dränerad och odränerad analys (Chalmers, 2024)

### 3.4 SEEP/W

För att förstå hur vattnet rör sig ut och igenom sluttningar samt för att undersöka sannolikhet och risk för skred till följd hydrauliska faktorer är enligt Kiran m.fl. (2014) SEEP/W ett passande verktyg. Det är också den programvara som används i denna rapport. Kiran m.fl. (2014) specificerar att modellen använder finita elementmetoden (FEM) för att simulera en naturlig porvattentrycksfördelning i jorden. SEEP/W är baserad på att vattenflödet genom mättad och omättad jord följer Darcys lag. Numerisk diskretisering (FEM) används för att lösa Darcy's ekvation för flödesförhållanden i två dimensioner, se ekvation (3.7) och (3.8).

$$(3.7) \quad \frac{d}{dx} \left( k_x \frac{dH}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( k_y \frac{dH}{dy} \right) + q = m_w^2 \gamma_w \left( \frac{dH}{dt} \right)$$

Ekvation (3.7) flödet beräknat med seep/w utgående från Darcys ekvation hämtad från Geoslope International Ltd (2012).

$$(3.8) \quad H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y$$

Ekvation (3.8) hydraulisk höjd, hämtad från Geoslope International Ltd (2012).

Där  $k$  är den hydrauliska konduktiviteten,  $H$  är den hydrauliska höjden,  $q$  är det applicerade flödet,  $\gamma_w$  är vattnets enhetsvikt,  $t$  är tiden,  $u_w$  = porvattentryck och  $y$  är höjden.  $m_w$  är lutningen på jord-vatten karakteristiska kurvan vilken representeras av jordens förmåga att absorbera vatten i förhållande till jordens vattenkvot. Jord-vatten karakteristiska kurvan  $m_w$  kan estimeras i SEEP/W med hjälp av det beaktade jordlagrets kornstorleksfördelning. SEEP/W använder därefter *Van Genutchens* estimationsmetod som identifierar hydraulisk konduktivitet med hjälp jord-vatten karakteristiska kurvan och den mättade hydrauliska konduktiviteten. Se Geoslope International Ltd (2012) för härledning och förklaring i detalj.

Enligt Geoslope International Ltd (2012) ligger SEEP/W-modellens begränsningar i att det är en numerisk datamodell. Rörelsen av vatten genom porösa material som jord kan resultera i temperatur-, volym- och ibland även kemiska förändringar. Att inkludera alla parametrar i samma numeriska analys beskrivs som omöjligt då komplexiteten i den matematiska härledningen blir för hög. Vidare belyser Geoslope International Ltd (2012), som tidigare nämnt, att Seep/W endast appliceras under antagandet att allt vatten flödar i enlighet med Darcys lag. I verkliga förhållanden kan vatten beläget nära marknivån potentiellt avdunsta och lämna systemet i form av vattenånga vilket modellen inte tar hänsyn till.

## 4 Skredet i Gjerdrum

Natten den 30 december 2020 inträffade ett större lerskred i utkanten av samhället Ask i Gjerdrums kommun, beläget nordost om Oslo. Skredet inträffade i ett bostadsområde, och fick som konsekvens att nio hus innehållande 31 lägenheter förstördes och stora jordmassor förflyttades. Totalt avled 11 personer till följd av skredet, och över 1000 personer tvingades evakueras från sina hem (Ryan, 2021). I figur 4.1 visas en del av skredet.



Figur 4.1: Skredet i Gjerdrum, vintern 2020. Foto: Tommy Gildseth, tillstånd enligt Creative Commons

### 4.1 Skredområde

Det skreddrabbade området i Gjerdrum bestod av en lutande slänt, till största del bestående av kvicklera (Penna, 2021). Området var bebyggt med ett flertal mindre flerbostadshus, de raserade husen var av liknande modell som de som ses i figur 4.1 ovan. Området ligger i utkanten av samhället Ask och avståndet mellan skredkant och Ask centrum är cirka 700 meter. Området är beläget längs med en enfilig landsväg, riksväg 120 som går längs med skredområdets östra kant. Längs skredområdets västra kant går vattendraget Tistilbekken, till vilken dagvattenledningar från Ask har sitt utlopp. Skredet inträffade den 30 december 2020, efter en period med kraftig nederbörd.

### 4.2 Skredorsaker

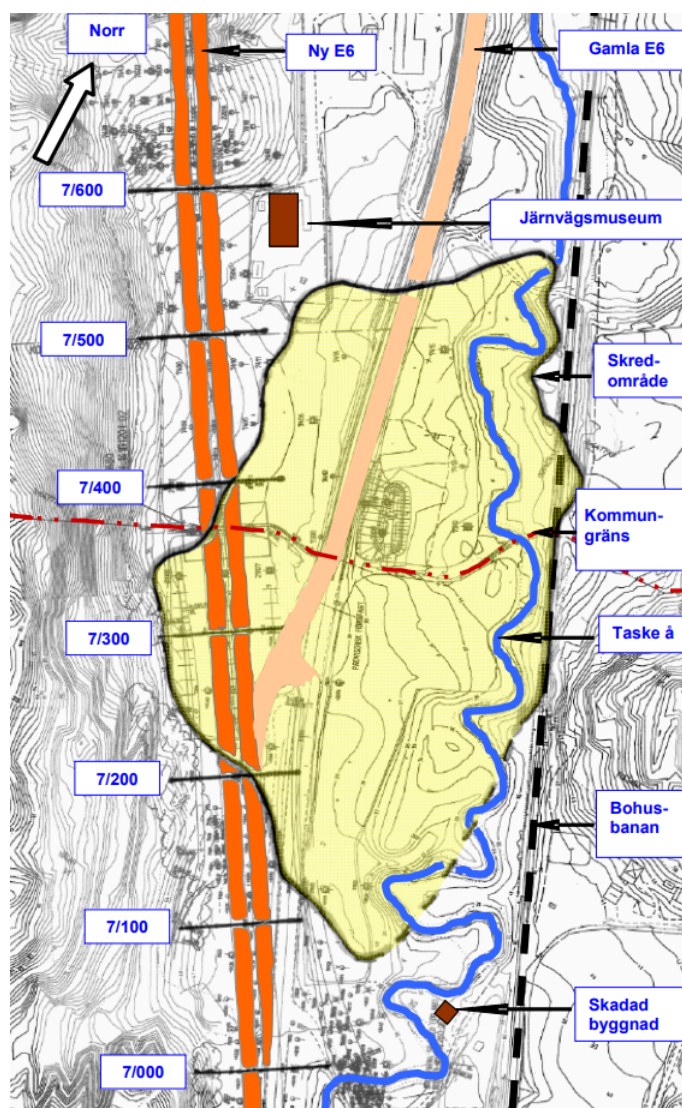
Enligt Penna (2021) var marken där skredet skedde redan innan skredet klassad av Norges Geologiske Undersökelse som en högriskmark för skred. Bebyggelsen medförde att belastningarna på den redan svaga slänten ökade. Det kraftiga regnandet innan skredet anses ha spelat en viktig roll för att utlösa skredet. Nederbörden fick som effekt att porvattenstrycket i marken blev högt, vilket sänkte dess stabilitet. Nederbörden medförde även att vattenflödet i Tistilbekken blev mycket stort, inte minst då dagvatten från Ask släpptes ut i bäcken. Det tunga vattenflödet hade dessutom lätt till betydande erosion längs bäcken under åren innan skredet. Erosionen innebar att släntens hållfasthet sänktes successivt, vilket medförde att släntens motståndskraft inför kraftiga regn reducerades i takt med tiden (Ryan, 2021). Även landsvägen belägen i utkanten av skredområdet kan haft en påverkan på skredet genom vibrationer från trafiken.

## 5 Skredet i Småröd

Statens Haverikommission (SHK) fick i uppdrag att utreda skredolyckan som inträffade i december 2006 i anslutning till Småröd i Munkedals kommun. Skredet ska ha skett i samband med den pågående utbyggnaden av Väg E6 norrut för att sammanfoga Småröd och Saltkällan. SHKs rapport som publicerades 2009 skulle ge svar på, "Vad hände? Varför hände det? Hur undviks att en liknande händelse inträffar?" Skredet granskas i mål om att ge svar på ovanstående frågor utgående från SHK (2009).

### 5.1 Skredområde

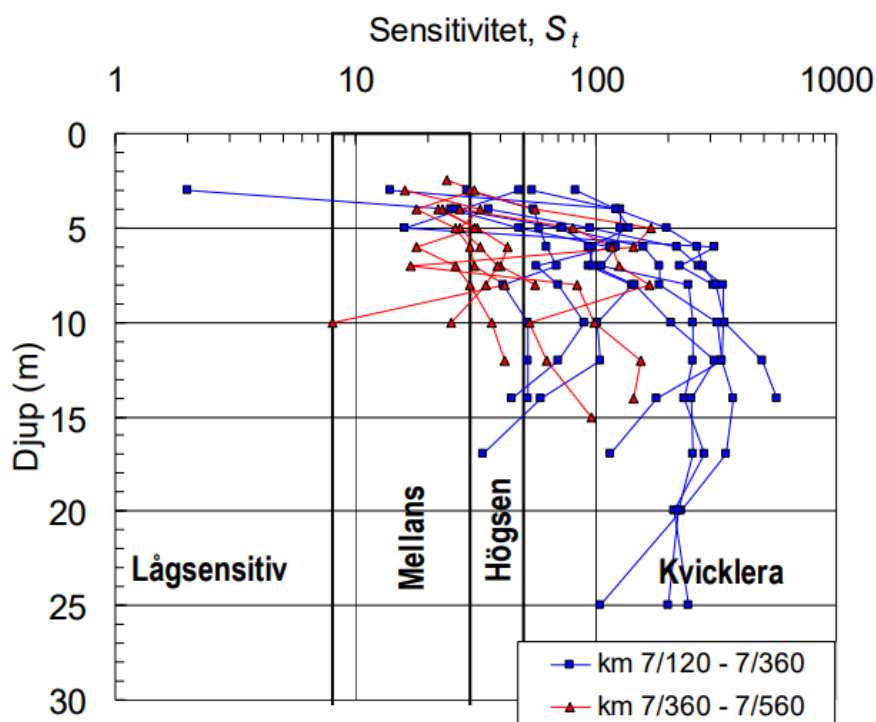
Området beskrivs av SHK (2009) som en begränsad syd-nordlig dalgång genom vilken Taske å rinner. Både väster och öster om ån stiger terrängen kraftigt. Skredet har enligt SHK (2009) följt en snabb och progressiv process till följd av den lutande terrängen och förekomsten av kvicklera i dalgången. SHK (2009) fastslog att skredets riktning i huvudsak var från väst till öst och omfattade hela det gulfärgade området i figur 5.1.



Figur 5.1: Planskiss över skredområdet. Hämtad Från SHK (2009)

## 5.2 Markens geotekniska egenskaper

I Figur 5.2 illustrerar SHK (2009) lerans sensitivitet i förhållande till djup. Mätningen visar att framförallt södra delen, representerad av den blåa linjen i diagrammet, visar en hög grad av sensitivitet. SHK (2009) presenterade porttrycksmätningar som i huvudsak beskriver en hydrostatisk tryckfördelning längs med djupet. Ving och konförsök utförda för att bestämma den odränerade skjuvhållfastheten avslöjade att torrskorpan på den södra sidan var något tunnare än på norra sidan. Dessutom var den södra lerans hållfasthet något svagare under torrskorpan. På stora djup identifierades ingen skillnad i skjuvhållfasthet (SHK, 2009).



Figur 5.2: Sensitivitet i förhållande till djup, hämtad från SHK (2009)

## 5.3 Nederbörd och vattenförhållande

SHK (2009) sammanfattar att det under oktober och december 2006 observerades en ovanligt hög nettonederbörd, vilket definieras som skillnaden mellan den totala nederbörden och den beräknade avdunstningen. Nettonederbörden nådde högsta nivå en vecka innan skredet inträffade. Vattenföringen i Taske å fastställdes inte innan olyckan.

## 5.4 Byggprojekt nya E6

SHK (2009) beskriver hur nya väg E6 byggdes i etapper och det var under etapp Småröd-Saltkällan som skredet inträffade. Vid byggandet av den tidigare etappen Kallsås-Småröd inträffade ett litet skred redan två år innan, i november 2004, vilket resulterade i förändringar i bland annat skogsterräng i området och vattenföringen i Taske å.

I och med jordens högsensitiva egenskaper installerades enligt SHK (2009) kalkcementpelare i augusti 2006. SHK (2009) menar att endast hälften av pelarna specificerade i bygghandlingen drevs ner till fast botten. För att uppnå samma täckningsgrad som i bygghandlingen valde byggherren att använda bredare pelare och större rutnät. Under projekteringen utfördes enligt SHK (2009) stabilitetsberäkningar, utan förstärkningsåtgärder, den beräknade säkerhetsfaktorn fastställdes till  $F = 1,1 - 1,2$ . Med kalkcementpelare som förstärkningsåtgärd uppskattades säkerhetsfaktorn till  $F = 1,6 - 1,7$  vilket skulle uppfyllde kravet för släntens säkerhetsklass. Kravet enligt Trafikverket för väg eller järnvägsverk på kvicklera är säkerhetsklass 3, vilket är den högsta säkerhetsklassen. Se *trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner - TK Geo 13 (2016)* angående krav för dimensionerande säkerhetsklass för väg och järnväg.

SHK (2009) beskriver hur en tryckbank planerades att byggas intill vägen och en temporär deponi av fyllningsmassa skapades i detta ändamål. Otillräcklig dokumentation under byggprocessen hindrade en exakt bestämning av den totala deponivolymen, men den uppskattades vara ca 14 000 m<sup>3</sup> vilket var 45 % mer än volymen för den framtida tryckbanken. Den för tunga belastningen från deponin beskrivs som den utlösande faktorn till skredet, figur 5.3 visar skredområdet med nya E6 till vänster och gamla E6 till höger.



Figur 5.3: Skredet i Småröd, Foto: Per Petersson, hämtad från SHK (2009)

## 5.5 Säkerhetsbrister

Enligt SHK (2009) konstaterades att varken säkerhetsklass 3 eller säkerhetsklass 2 uppfylldes för stabilitetsförhållanden i de relevanta områdena. Vid genomförande av ovanstående förstärkningsåtgärder utfördes otillräckliga kontroller för att verifiera att vägen byggdes i enlighet med säkerhetsklass 3. SHK (2009) antyder också att den fyllningsmassa som deponerades intill vägen blev betydligt större än vad som projekterades för i bygghandlingen, utan att åtgärder vidtogs för att minska överdimensioneringen.

Entreprenörens riskbedömning beskrivs av SHK (2009) som otillräcklig med till exempel avsaknad bedömning av skredbenägenhet till följd av byggnationen. Från byggherren saknas dokumentation och protokoll från kontroller samt dokumentation för hantering av fyllnadsmassor. Risken med den för stora deponin som bildades identifierades därmed aldrig under projektet

## 6 Skredet i Tuve

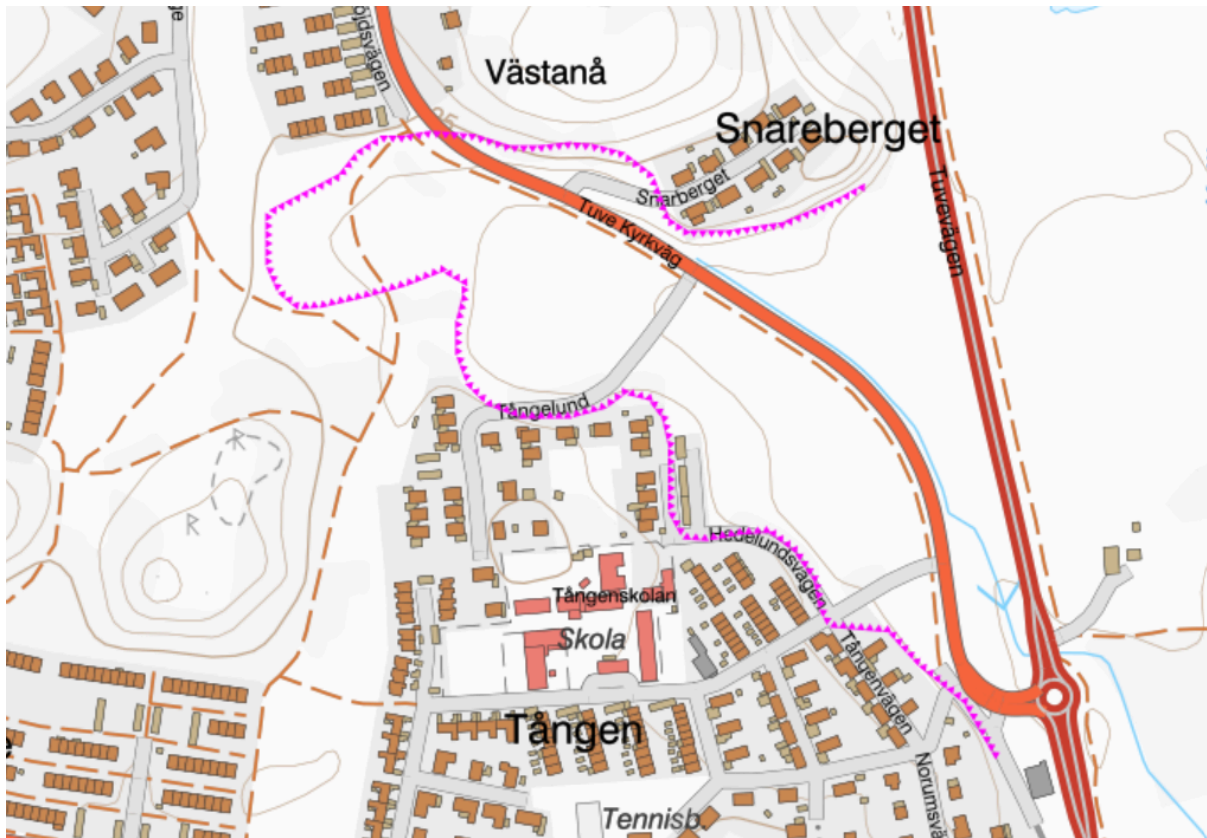
På eftermiddagen den 30 november 1977 inträffade Tuveskredet (Hartlén, 1984). Skredet skedde i ett bostadsområde i Tuve på Hisingen i Göteborg. Konsekvenserna av skredet innebar bland annat att 9 personer avled, 151 fastigheter förstördes eller hamnade i riskzonen efter skredet och drygt 400 personer förlorade sina hem. Skredet är det dödligaste jordskredet i Sverige sedan 1918. I figur 6.1 visas förödelsen efter skredet.



Figur 6.1: Tuveraset. Foto: Åke Hillefors/Göteborgs Naturhistoriska Museum, tillstånd enligt Creative Commons

### 6.1 Skredområde

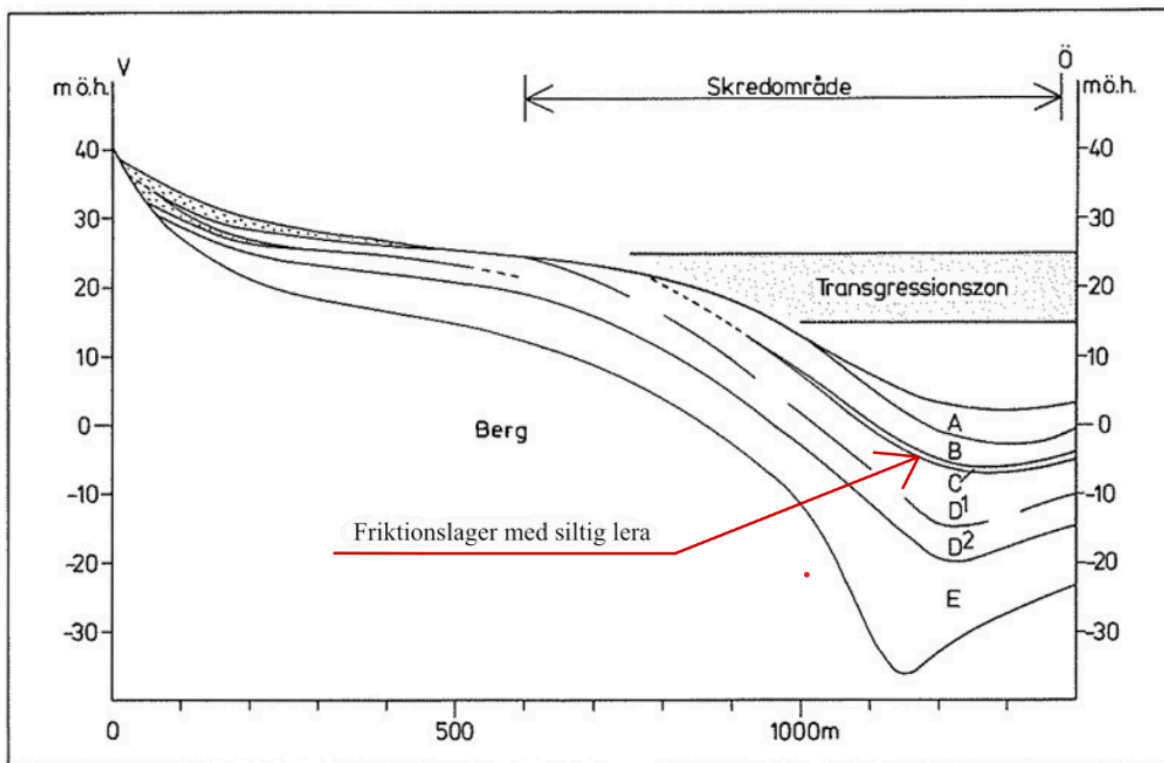
Skredområdet är beläget i Tuve i Göteborgs kommun. Slänten där skredet skedde är svagt lutande ner mot Kvilledalen där Kvillebäcken rinner. Området är lågt beläget, de nedre delarna av dalen ligger enbart några meter över havsnivån (Hartlén, 1984). Skredområdet är orienterat i nordväst-sydostlig riktning. I norra kanten på skredområdet ligger en större kulle, där berget kommer upp i dagen (SGU, Nr 2, 2024.). Även strax söder om skredområdet ligger en mindre kulle med berg vid markytan. Släntens lutning i skredområdet är relativt svag, och varierar över området. Majoriteten av slänten utgörs av en lutning om 1:50 där de partier med kraftigast lutning uppnår 1:25. Släntens totala höjd är lägre än 20 meter (Hartlén, 1984). Figur 6.2 nedan visar skredområdets omfattning, (inom rosa markering).



Figur 6.2: Visar skredområdet i Tuve inom rosa linje. Hämtad från © Sveriges geologiska undersökning, kartvisaren.

## 6.2 Generell jordlagerprofil och geotekniska egenskaper

Få geotekniska undersökningar utfördes i området innan skredet. Visserligen misstänktes släntens stabilitet vara begränsad vid byggnationen av området, vilket innebar att restriktioner om massförflyttning i området var tillsatta (Hartlén, 1984). Figur 6.3 nedan visar den generella jordlagerföljden från skredområdet i Tuve. SGI (Nr 1, 1981) sammanställde utvärderingar gjorda av jordlagerprofilen. Lagerföljden delades in enligt figur 6.3, bokstaven A motsvarar Gyttjelera, B och D, styv lera, C, siltig lera och E varvig lera. I figuren är den siltiga leran markerad med röd pil vilken har väsentligt högre hydraulisk konduktivitet än de övriga lermaterialen (Blomquist och Gustafson, 1981). Friktionslagret med siltig lera står inte i kontakt med jordytan eller andra friktionsmaterial som överlagrar leran, vilket begränsar flödet av vatten till friktionslagret (Blomquist och Gustafson, 1981). Ett friktionslager med högre konduktivitet än övriga lager kan bidra till att höja lerans porvattentryck enligt SGI (Nr 1, 1981), dock är detta särskilt viktigt om friktionslagret är i kontakt med friktionsmaterial på jordytan, vilket inte är fallet för jordlagerföljden enligt figur 6.3.



Figur 6.3: Jordprofil genom skredområdet i Tuve. Hämtad från (Hartlén, 1984)

Grundvattenbildningen i området för skredet är låg (SGU, Nr 1, 2024). Lerlagret vid skredområdet fungerar som ett tätslutande lager, och den grundvattenbildning som sker i området är belägen vid lerans kanter (Hartlén, 1984). Vidare är grundvattenmagasinets storlek liten, vilket medför att det snabbt fylls vid ökad nederbörd, trots markens låga permeabilitet. Konsekvensen av den låga grundvattenmagasineringen blir höga porvattentryck vid kraftig nederbörd (Hartlén, 1984). Friktionslagret i figur 6.3 är inte i kontakt med ytan och bidrar därför inte till en ökad grundvattenbildning (Blomquist och Gustafson, 1981).

### 6.3 Omgivningsfaktorer och nederbörd

Mätningar över nederbörden visar att nederbörds mängden i november 1977 före skredet var mycket högre än normalt för området (Hartlén, 1984). Totalt regnmängd var 120mm i november 1977. Dock har även ännu större regnmängder uppmätts i området, i oktober 1967 var nederbörden 220 mm (Hartlén, 1984). Figur 7.8 i metodkapitlet visar nederbörden i Tuve summerad månadsvis, de streckade staplarna visar nederbörden 1977 och de heldragna visar den normala nederbörden per månad. Av bilden kan konstateras att det år 1977 regnade mer än normalt samtliga månader utom juli och augusti. Regnmängden under januari till april 1977 var nästan dubbelt så stor som normalt.

Dagvattensystemet utformades vid exploateringen av området på så sätt att dagvattnet skulle släppas ut i Kvillebäcken, öster om skredområdet (Hartlén, 1984). Dagvatten skulle rinna till Kvillebäcken via en bäck i öst/västlig riktning genom skredområdet. Bäckens kulverterades under Tuve kyrkväg. I samband med de stora regnmängderna som föregick skredet inträffade ansamlades vattenmängder på den västliga sidan av Tuve kyrkväg, då kulvertens kapacitet inte räckte till (Hartlén, 1984).

I samband med byggnationen av Tuve centrum, beläget sydväst om skredområdet, anslöts dagvattenssystemet därifrån till Kvillebäcken. Anslutningarna av dagvattenssystemet till Kvillebäcken bidrog till ett ökat flöde, vilket därmed också ökade erosionen längs bäcken. Vittnesuppgifter från tiden innan skredet gör gällande att vattenflödet i Kvillebäcken då var det högsta som någonsin hade noterats i bäcken (Hartlén, 1984).

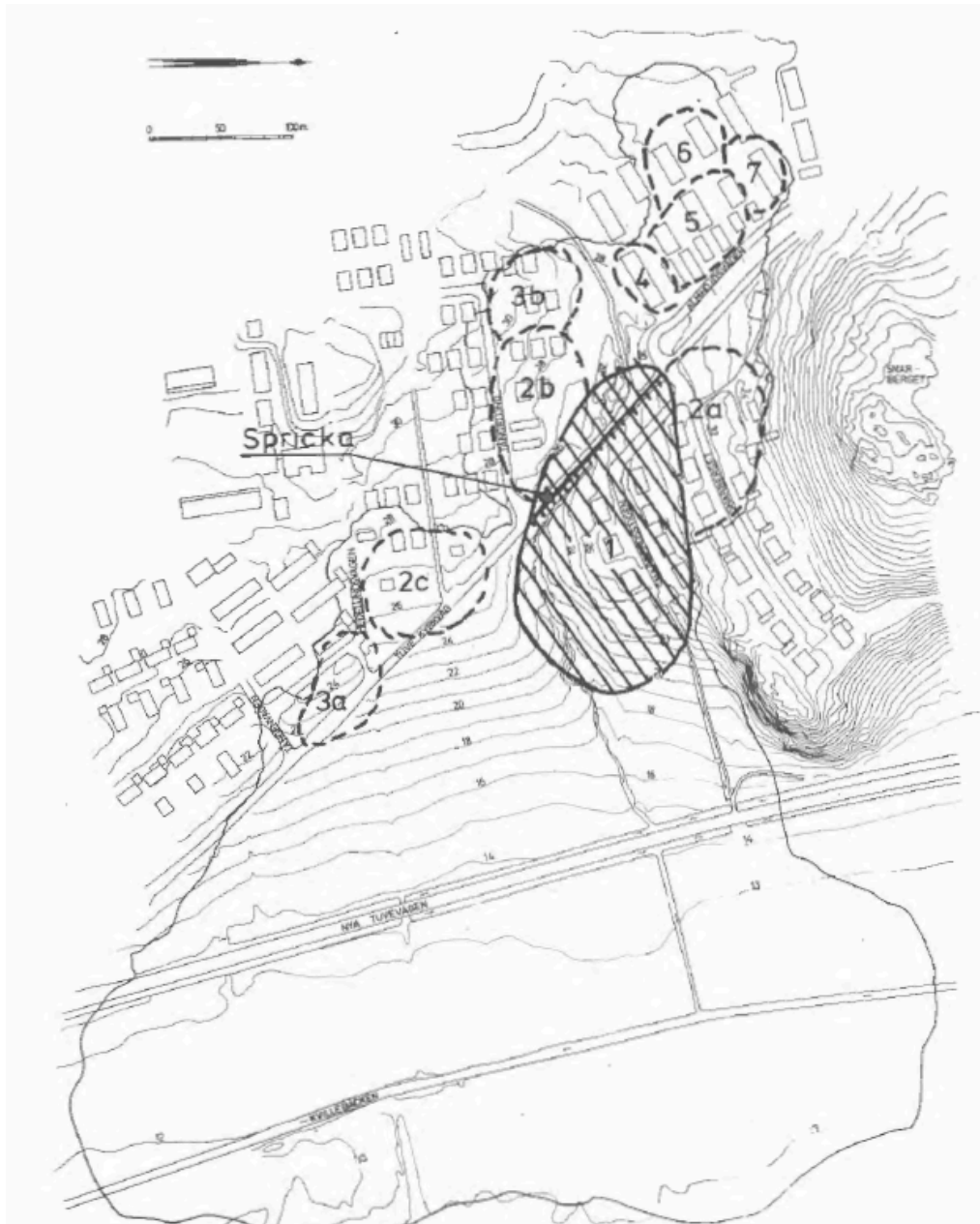
Vidare finns högre belägna områdena i närheten, där markens genomsläpplighet är låg, precis som i skredområdet. Det gör att vattnet från dessa områden rinner ner till skredområdet, vilket ytterligare ökar belastningen och porvattentrycket där (Hartlén, 1984).

Inga porvattentrycksmätningar utförda innan skredet finns tillgängliga. Enligt Hartlén (1984) har porvattentrycket bedömts i efterhand och motsvarat en grundvattennivå belägen två meter ovanför markytan innan skredet. Lokalt inom området har dock porvattentrycket bedömts vara ännu högre, bland annat nedanför Tuve kyrkväg har det bedömts till motsvarande en grundvattennivå fyra meter över marknivån.

Hartlén (1984) beskriver vidare att även byggnation i området kan ha haft en påverkan på släntens stabilitet. Området bebyggdes under senare delen av 1950- och 1960-talet med radhus samt friliggande småhus. Husen byggdes uppe på slänten och fick som effekt att belastningen på slänten ökade. Hartlén (1984) poängterar att lasterna i form av radhus och villor var förhållandevis små, varför enbart byggnationen i sig inte ska ses som den enskilt utlösande faktorn bakom skredet men kan vara en bidragande faktor.

## 6.4 Skredförlopp

Skredet inträffade strax efter 16-tiden onsdagen den 30 november 1977. Vittnesuppgifterna från skredet är få, då tät dimma låg över området och tidpunkten för skredet innebar att få av de boende var hemma (Torstensson, 1982). De första tecknen på skredet som noterades var en långsgående spricka i Tuve kyrkväg på eftermiddagen samma dag som skredet gick (Hartlén, 1984). Det var också den första delen av marken som gled iväg i skredet och är därmed initialskedet. Därefter gick skreden progressivt som ett bakåtgripande skred, där delarna nära första delen av skredet vid Tuve kyrkväg gled iväg först (Hartlén, 1984). Se figur 6.4 nedan för att se ordning och geografi för skredets förlopp. I de områden med låg siffra gick skredet först, och det med högst siffra gick skredet sist. I analyserna efter skredet har det även slagits fast att skredet gick ner till berget och därmed påverkade hela jordlagerföljden (Hartlén, 1984).



Figur 6.4: Skredförlopp och påverkat område (Hartlén, 1984)

## 6.5 Skredorsaker

Hartlén (1984) beskriver att delar av slänten hade en mycket låg säkerhetsfaktor redan innan området exploaterades. Byggnation av husen ökade belastningen på slänten, men belastningen var inte den enskilt viktigaste faktorn bakom skredet. Istället var vattenflödet och det mycket höga porvattentrycket från den kraftiga nederbörden under tiden före skredet de avgörande orsakerna till skredet. Nederbörden medförde att jordens porvattentryck ökade kraftigt, vilket sänkte släntens stabilitet. Vatten ansamlades även på markytan till väster om Tuve kyrkväg på grund av en underdimensionerad kulvert, vilket medförde en ökad belastning på slänten. Initalskredet gick just vid Tuve kyrkväg, varför vattensamlingen ovan vägen kan varit betydelsefull för att utlösa skredet. Långvarig hög nederbördsmängd i kombination med att närliggande områdenas dagvattensystem var kopplade till Kvillebäcken kan även ha lett till ökad erosion vid bäcken vilket bidrar till släntens instabilitet.

## 7 Metod

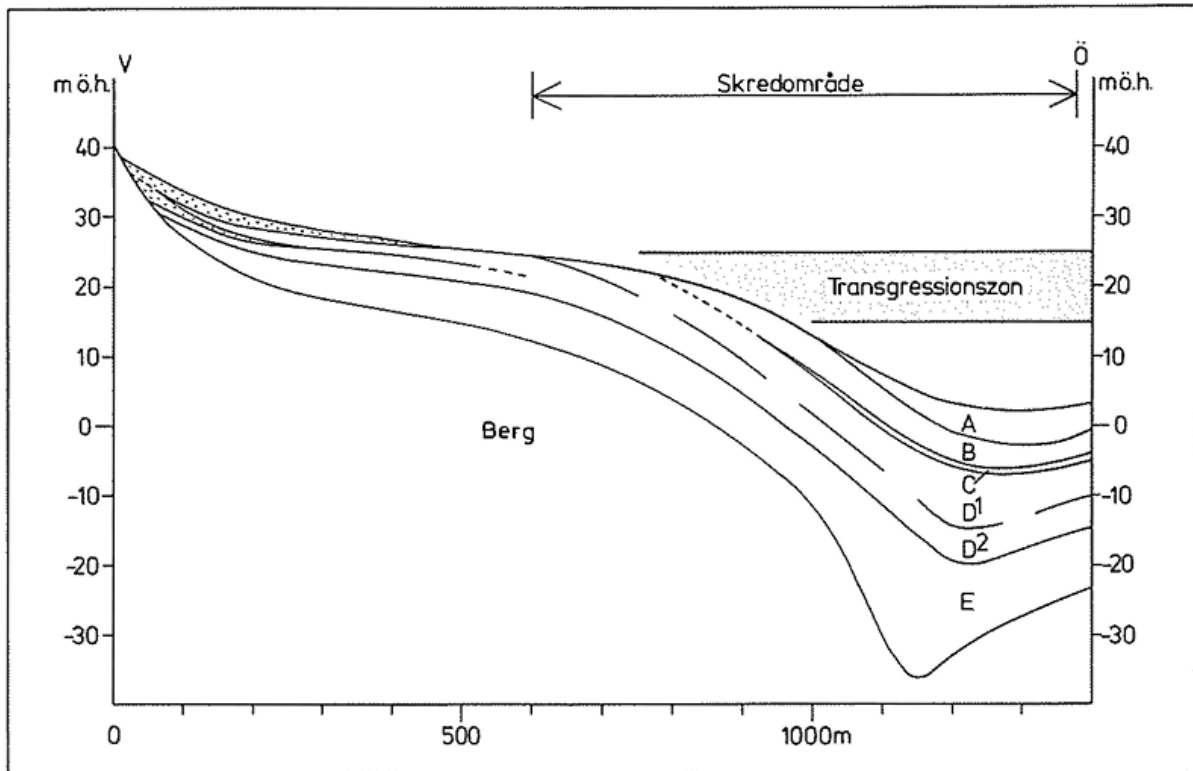
I denna rapport utfördes en undersökning av kvicklereskreden i Tuve, Gjerdrum och Småröd genom att granska litteratur med anknytning till skreden, enligt kapitel 4 - 6. Med hjälp av litteraturen sammanställdes grundläggande geotekniska egenskaper för att förstå bakgrunden till skredens inträffande. Vidare användes rapporter skrivna av statliga myndigheter och institut ihop med vetenskapliga artiklar för att kunna ge en korrekt helhetsbild av händelseförloppet kopplat till varje skred.

Utöver litteraturgranskning har programvaran Geostudio använts för att utvärdera släntstabiliteten för skredet i Tuve. I Geostudio går det att rita upp detaljrika slänter med stor noggrannhet och programmet klarar av att lösa komplexa problem (Salahudeen m.fl., 2023). Geostudio tillämpar programvaran SEEP/W för att beskriva grundvattenflödet samt programvaran SLOPE/W för att utvärdera släntstabilitet. Stabilitetsanalysen utförd i SLOPE/W är baserad på Morgenstern och Price *Limit equilibrium method* i kombinerad analys, se avsnitt 3.3. Grundvattenflödesanalysen i SEEP/W följer antagandet att Darcys lag råder, se avsnitt 3.4.

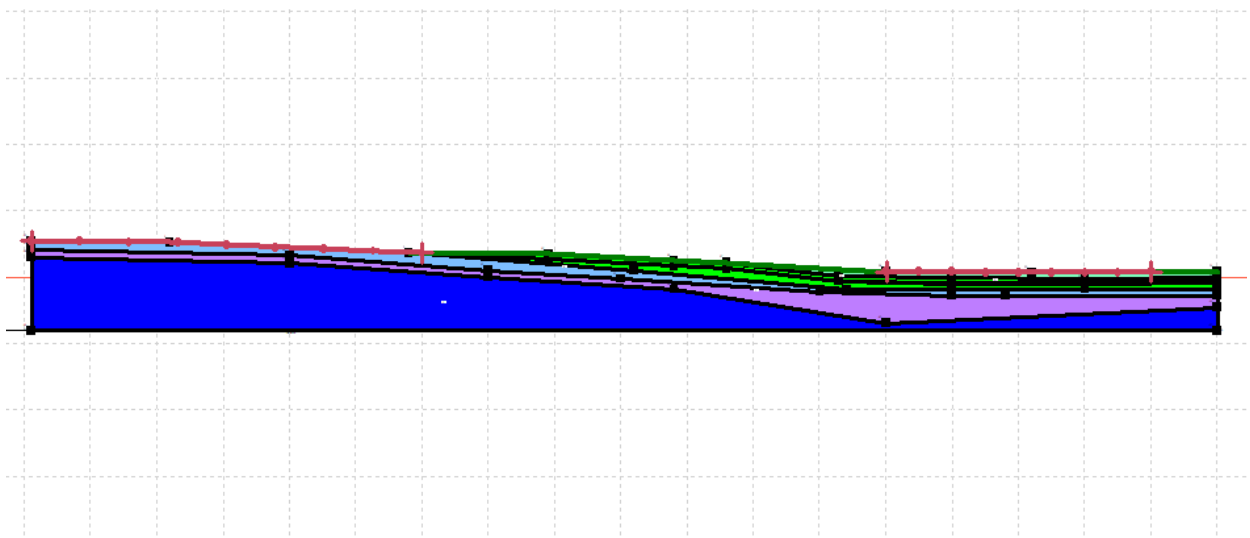
I Geostudio analyserades två olika slänter från Tuveskredet. Dels en övergripande profil som sträcker sig över hela skredområdet i öst- västlig riktning, dels en mindre slänt vid Tuve kyrkväg och nedanför. Denna mindre slänt är nämnd i avsnitt 6.4 som platsen för initialskedet och gav upphov till område 1 i figur 6.4. Se även bilagor 1-5 för ingångsdata till Geostudio för de två analyserna.

### 7.1 Geometri och jordprofil

Geometrin och jorddjup för analysen är hämtade från Tuveskredets slutrapport (Hartlén, 1984). Figur 7.1 nedan visar jordlagerföljden för den längre profilen genom hela skredområdet. Denna analys är i Geostudio geometriskt baserad på jordlagerföljden enligt figur 7.1. I Geostudio har entry/exit range används för att definiera var Geostudio ska räkna säkerhetsfaktorn för glidytor. Entry/exits placering har optimerats för att få med de mest kritiska glidyterna, se rött streck i figur 7.2 för att se entry/exits placering för den längre profilen.



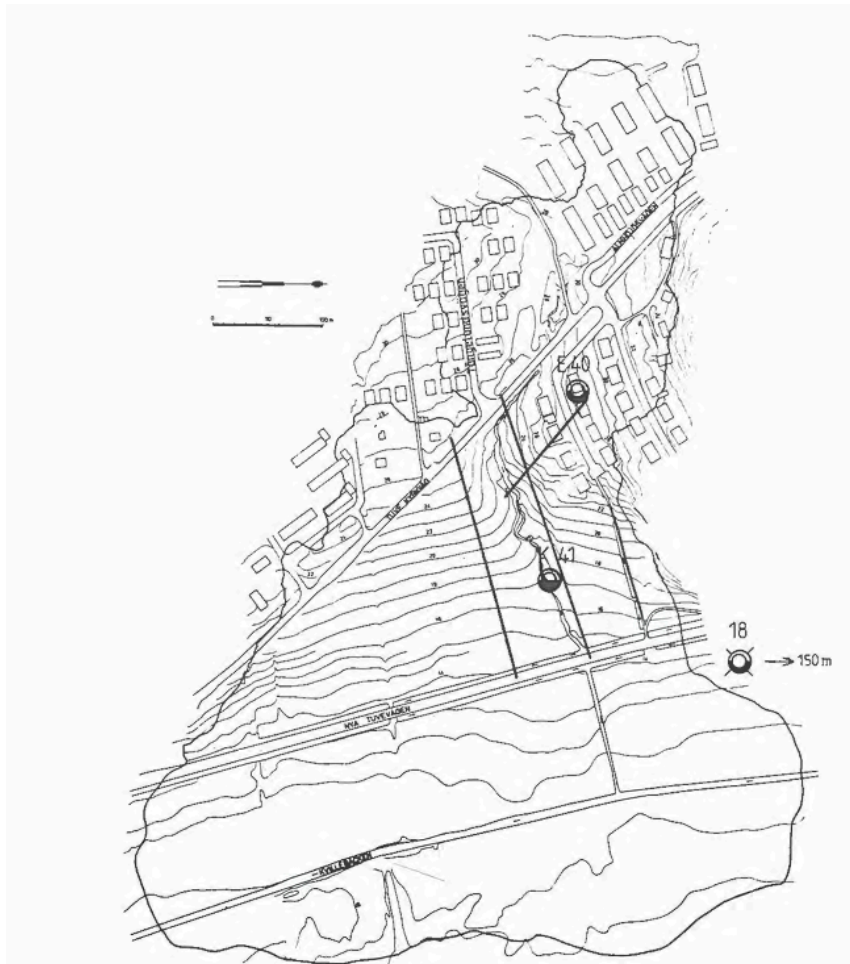
Figur 7.1: Jordlagerföljd i skredområdet i Tuve. hämtad från Hartlén (1984)



Figur 7.2: Modellering av skredet i Geostudio

## 7.2 Geofysiska egenskaper

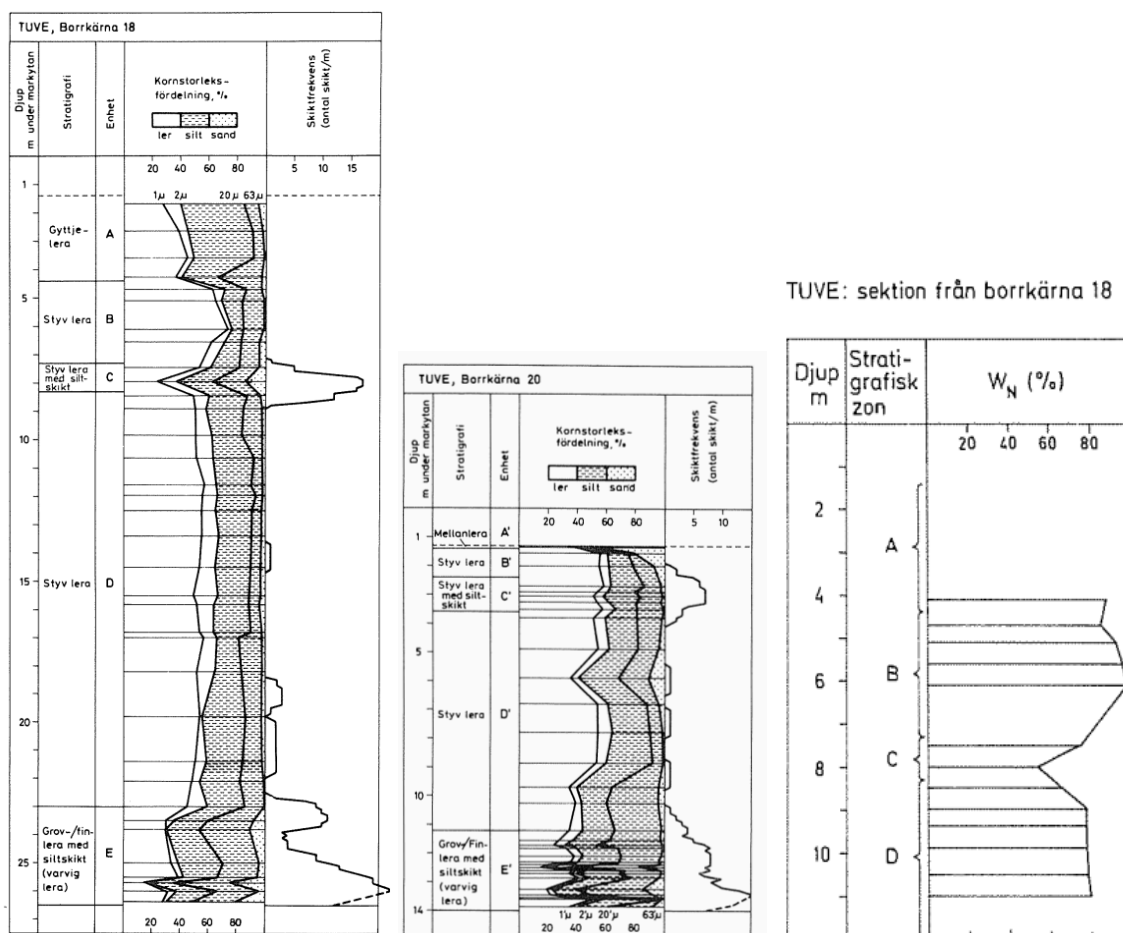
Jordarternas geofysiska egenskaper är hämtade från SGI (Nr 2, 1981). Friktionsvinkeln för de olika jordlagrerna är hämtade från SGI (Nr 2, 1981), se bilaga 2. Lerans odränerade skjuvhållfasthet för den längre profilen är baserad på mätningar från 3 borrhål, se bilaga 1. Mätningarna av den odränerade skjuvhållfastheten är dels från borrhål F40 och K41 som genomfördes år 1965 respektive 1964 vilket var innan området bebyggdes, dels från borrhål 18 där mätningar genomfördes efter skredet. Mätvärdena från de ovanstående borrhålen har lagts i ett diagram och en ingenjörsmässigt antagen trendlinje har dragits för att få den genomsnittliga skjuvhållfastheten, se bilaga 1 och 2. Värdena på lerans densitet kommer från borrhål F40 och K41, utifrån det har det kunnat konstateras att lerans skrymdensitet är konstant med djupet och att tungheten har ett värde på  $16 \text{ kN/m}^3$ . Borrhål F40 och K41 är belägna innanför skredområdet, borrhål 18 strax norr om skredområdet, se figur 7.3.



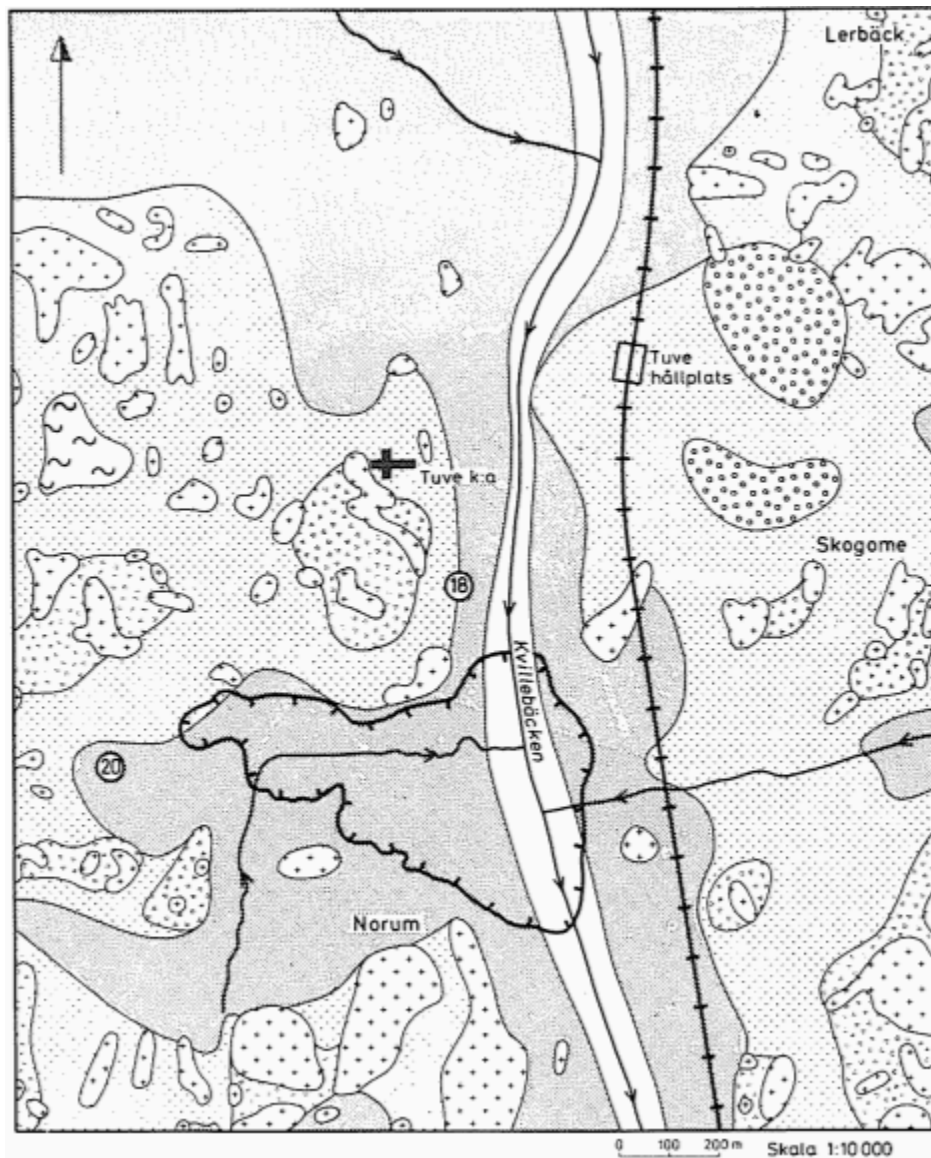
Figur 7.3: Position för borrhål F40, K41 och 18. Hämtad från SGI (Nr 2, 1981)

## 7.3 Hydrauliska egenskaper

Kornstorleksfördelning i Tuve är baserad på borrhål 18 och 20 utvärderade i SGI (1981) se figur 7.4 och 7.5. Mättad konduktivitet är baserat på kornstorleksfördelning och värden hämtade från Larsson (2008). Vattenkvotsfördelning är baserad på figur 7.6. Borrhål 18 och 20 etablerades efter skredet inträffade, borrhäna 18 är beläget cirka 100 meter norr om området och borrhäna 20 är beläget cirka 160 meter väster om skredet, se figur 7.7. Vidare som nämnts i kapitel 4.4 har denna data använts i Geostudio för att estimerera hydraulisk konduktivitet ihop med jord-vatten karaktäristiska kurvan. Värdet för den hydrauliska konduktiviteten i berg kommer från SGU:s karta över hydraulisk konduktivitet i berg (SGU, Nr 3, 2024). Vidare har även *Liquid limit* för vattenkvot används i analysen, datan över *Liquid limit* kommer från Wagner (2013).



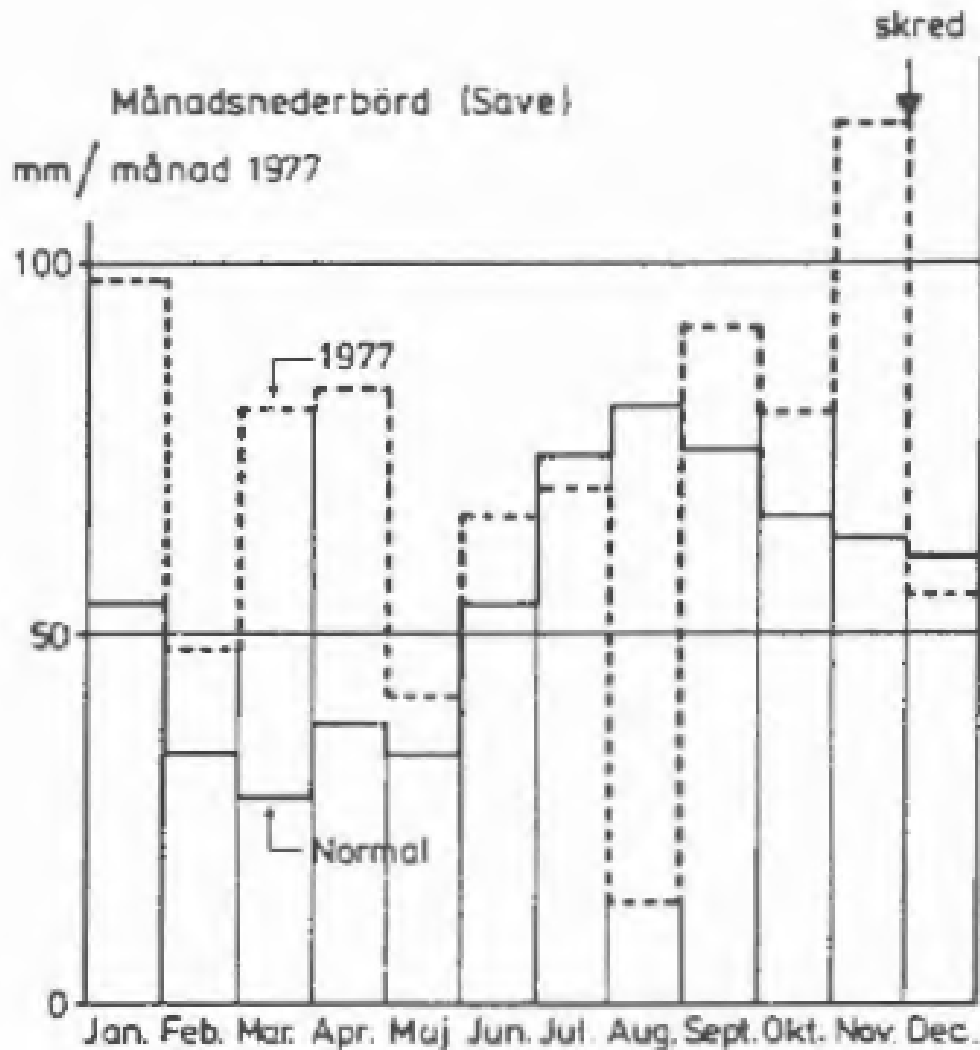
Figur 7.4 Kornstorleksfördelning (SGI, Nr 2, 1981) Figur 7.5: Kornstorleksfördelning (SGI, Nr 2, 1981) Figur 7.6: Vattenkvot (SGI, Nr 2, 1981)



Figur 7.7: Position borrhål 18 och 20 (SGI, Nr 2, 1981)

## 7.4 Nederbörd och grundvattennivå

Nederbörden i Tuve månaderna innan skedet kan ses i figur 7.8. Figuren visar att nederbörden i Tuve var högre än normalt under alla månader 1977 utom juli och augusti (Hartlén, 1984). Under november månad då skredet inträffade var nederbörden ungefär den dubbla jämfört med normalt. Den sammanlagda nederbörden från de 60 sista dagarna innan skredet motsvarar en total nederbörd på 190 mm. Regnet har definierats i Geostudio som konstant över tidsperioden, motsvarande en regnintensitet om  $3,67 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{sek}/\text{m}^2$  över 60 dagar.



Figur 7.8: Månadsnederbörd (mm/månad) för Säve precis norr om Tuve (Hartlén, 1984).

SGU:s kartvisare för brunnar (Nr 1, 2024) sammanställer grundvattennivåer i hela Sverige. Genomsnittlig grundvattennivå för närliggande brunnar till Tuveskredet motsvarar ungefär 8 meters djup. Med tanke på den kraftiga nederbörden under hela 1977 bedömdes grundvattennivån ligga något högre än 8 meter. Därför tillämpades en grundvattennivå på 6 meter som ursprunglig grundvattennivå i Geostudio.

## 7.5 Applicering av last

I och med byggnationen av bostadsområdet tillkom en last i form av vikten av husen, samt markarbeten relaterade till byggnationen av hus och hårdgjorda ytor såsom vägar. Enligt Rogbeck m.fl. (2015) innebär byggnation av hårdgjorda ytor en tillkommande markbelastning på 10-35 kPa och byggnation av hus medför en belastning på mellan 4 och 400 kPa. Som nämnt i kapitel 6.2 fanns restriktioner kring massförflyttningar i samband med byggnationen av området (Hartlén, 1984). Även infrastrukturen i området utformades för en mindre trafik och lätta fordon, därför är en rimlig bedömning att markbelastningen från de hårdgjorda ytorna ligger i den nedre delen av intervallet. Även markbelastningen från husen bör ligga i den nedre delen av intervallen då husen var av få våningar samt på grund av de restriktionerna för massförflyttning som existerade i området. Med en

uppskattning om att en tredjedel av ytan i bostadsområdet antas vara antingen bebyggd eller hårdgjord kan en markbelastning om 3 kN/m<sup>2</sup> antas.

Dock finns stora osäkerheter kring värdet då dokumentation kring massförflyttningar vid byggnationen saknas och vilka exakta markbelastningar som tillkom vid byggnationen är okänt. Därför testas även ett större värde om 15 kN/m<sup>2</sup>, vilket är tänkt som ett högsta möjliga värde för tillkommande markbelastning. 15 kN/m<sup>2</sup> är möjligt ifall massförflyttningarna inte var så små som bestämt och vägar och hus byggts med kraftigare underbyggnationer. Lastförhållanden har applicerats som en 300 meter lång linjelast på den övre delen av slänten, vilket ungefär motsvarar dåvarande bostadsområde. Då denna del av slänten ingår i den större profilen över hela skredområdet är lasten enbart relevant för denna och används inte för sektionen vid Tuve kyrkväg då det inte fanns några byggnader eller annan last som påverkade där. Följaktligen blir lastapplicering en approximation för att utvärdera den inverkan lasten hade på släntstabiliteten. Approximationen blir dock mycket begränsad då detta är en 2D modellering vilket är viktigt att beakta.

## 7.6 Tuve kyrkväg

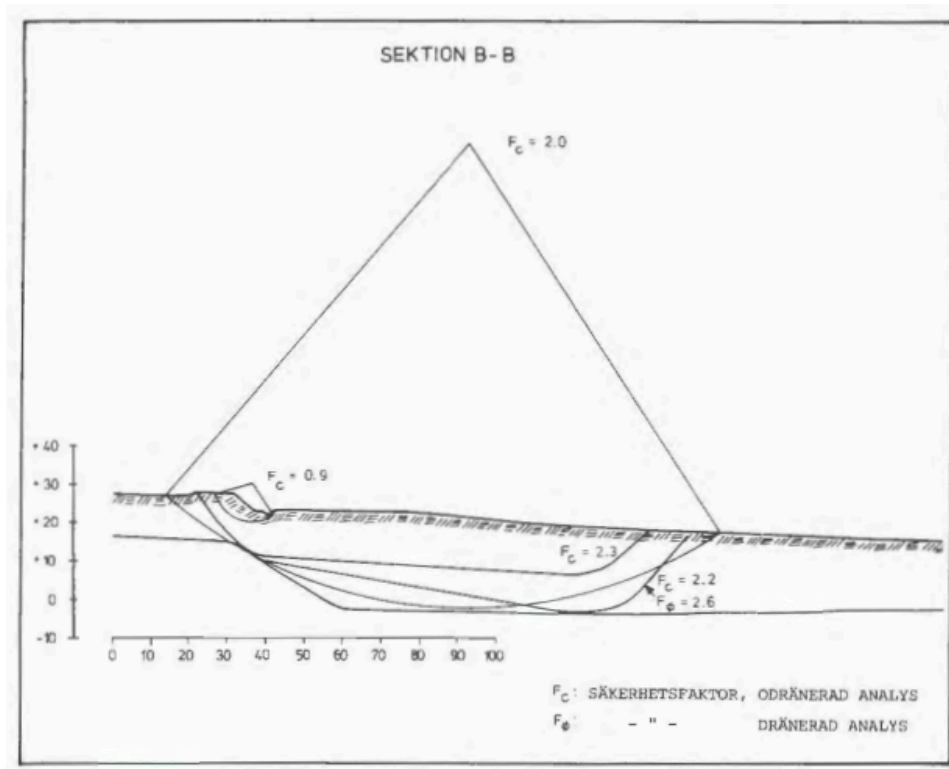
Släntstabiliteten under Tuve kyrkväg är utvärderad på grund av sprickan som enligt Hartlén (1984) är initalskredet och början till det progressiva skred som till slut omfattade hela området beskrivet i kapitel 6.4. För utvärdering är sektion B-B hämtad från Hartlén (1984) använd se figur 7.9 och 7.10 nedan. Sektion B-B är använd på grund av dessa geografiska placering närmast sprickan i Tuve kyrkväg, se även figur 6.4 ovan. Geofysiska egenskaper ihop med vattenkvot hämtade från Hartlén (1984) se bilaga 4-5, i övrigt är metodiken för Tuve kyrkväg densamma som ovan för den generella jordlagerföljden.

Figur 7.10 visar tidigare framtagna säkerhetsfaktorer vilka redan är låga för vissa lokala punkter. Syftet med att skapa en egen analys i Geostudio är att få en förståelse för varför säkerhetsfaktorn initialt var så låg och varför det inte uppstod markrörelser tidigare. Samtidigt syftar analysen till att ge svar på hur den höga nederbörden påverkar släntens stabilitet precis som för den generella jordprofilen. Se figur 7.11 för jordlagerföljd etablerad i Geostudio, röd färg representerar friktionslagret med siltig lera, blå färg representerar berget och ljusgrön representerar lera.

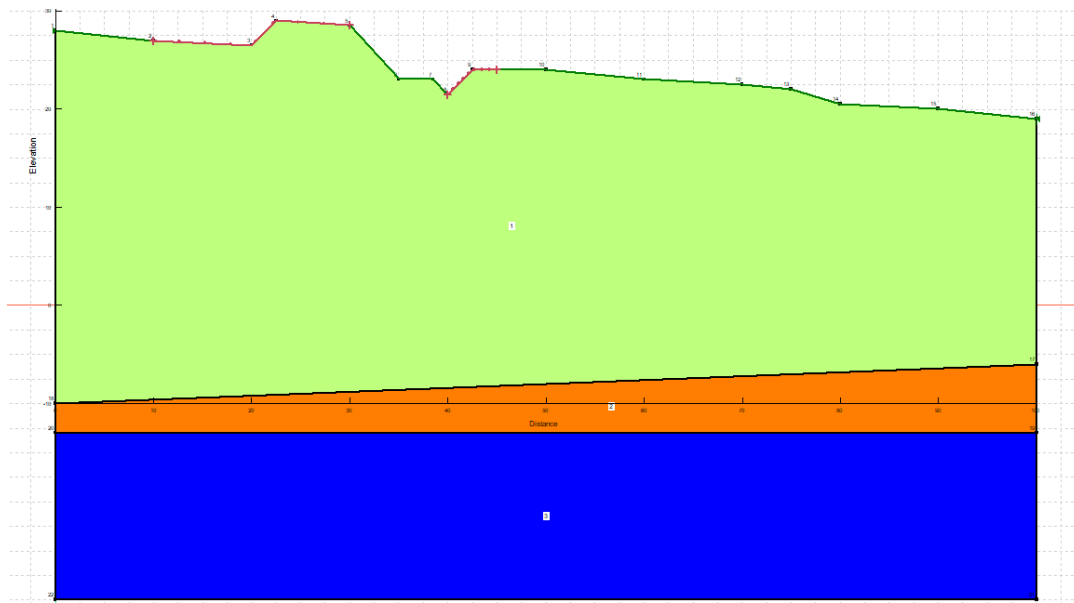
Som nämnt i kapitel 6.3 så bildades stora vattenansamlingar vid sidan av Tuve kyrkväg på grund av en underdimensionerad kulvert som skulle leda dagvatten till Kvillebäcken. För att undersöka vad en vattensamling vid sidan av vägen hade för möjlig påverkan på släntens stabilitet, utfördes en analys med en vattenreservoar vid sidan av vägen. Viktigt att beakta är att denna analys inte exakt speglar verkligheten vid Tuve kyrkväg, dock kan den besvara om denna vattensamling potentiellt kan ha haft påverkan.



Figur 7.9 Geografisk position för Sektioner, A-A, B-B och C-C. Hämtad från (Hartlen, 1984)



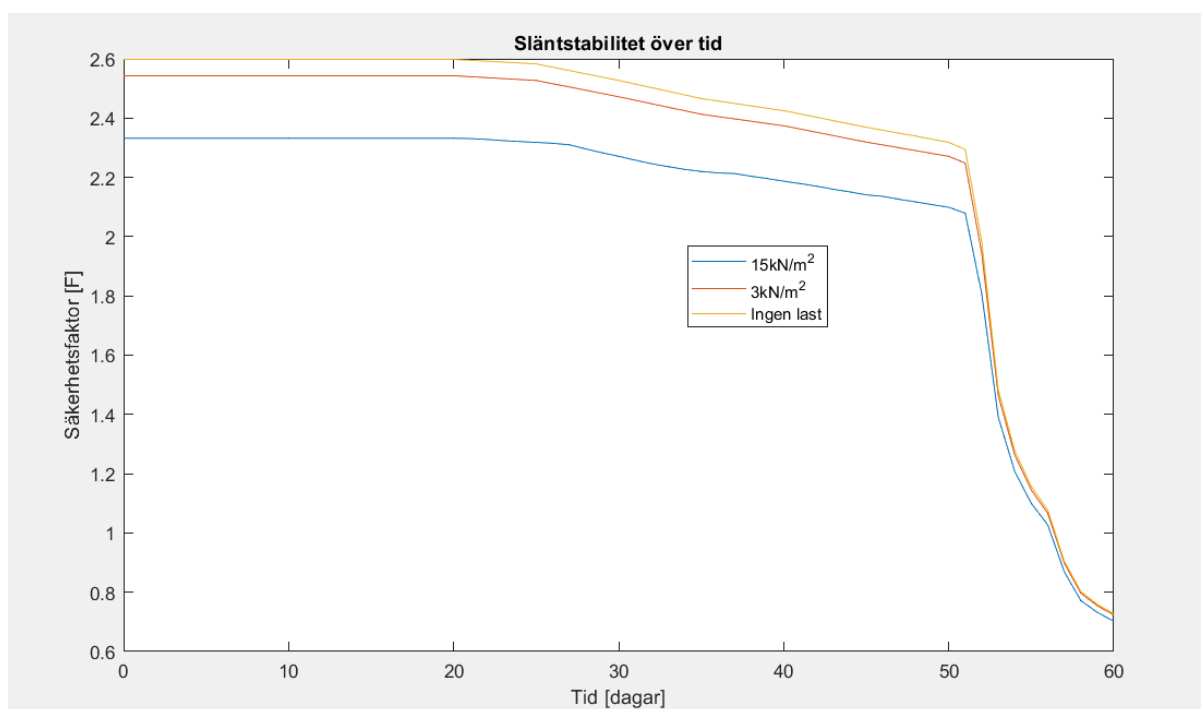
Figur 7.10: Geometrisk profil sektion B-B (Hartlen, 1984)



Figur 7.11 Jordlagerföljd under Tuve kyrkväg, sektion B-B, etablerad i Geostudio

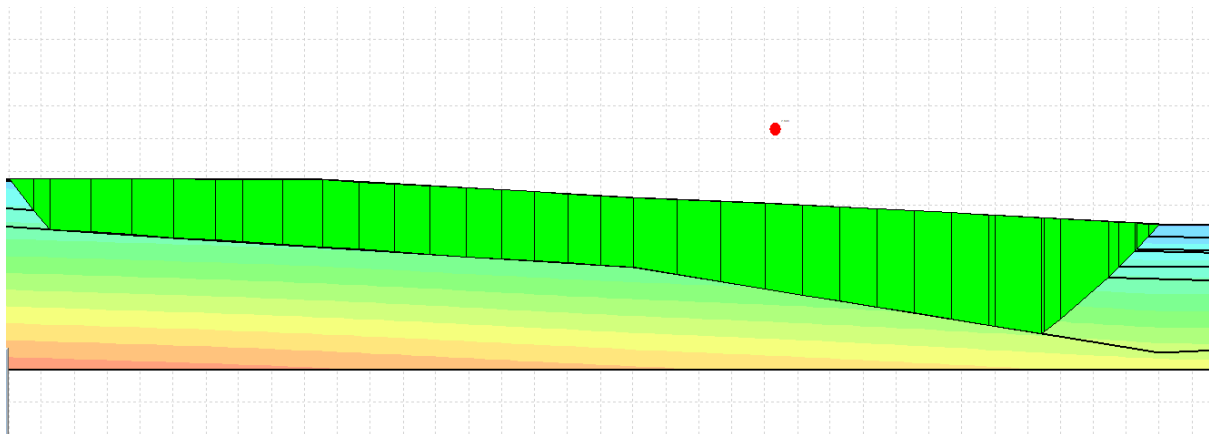
## 8 Resultat

Den geotekniska analysen på släntstabiliteten för den långsträckt profilen genom hela skredområdet i Tuve resulterade i en säkerhetsfaktor på 2,598 för den mest kritiska glidytan om lasten försummas. Medräknas den beräknade lasten om  $3 \text{ kN/m}^2$  genereras säkerhetsfaktorn 2,543 för den mest kritiska glidytan. Säkerhetsfaktorer både med och utan last motsvarar en stabil slänt, jordens skjuvhållfasthet måste reduceras och bli ungefär 2.5 gånger lägre för att skred ska inträffa teoretiskt. Nederbördens påverkan analyserades och resulterade vid konstant oavbruten nederbörd i en säkerhetsfaktor om 0,728 efter 60 dagar. Med last om  $3 \text{ kN/m}^2$  går säkerhetsfaktorn från 2,543 till 0,723 efter 60 dagar. Den initiala säkerhetsfaktorn för slänten med en dimensionerande last om  $15 \text{ kN/m}^2$  blev 2,332 och efter 60 dagar med nederbörd blev säkerhetsfaktorn 0,702. Vidare ska också noteras att säkerhetsfaktorn minskar relativt sakta fram till dag 50, varefter säkerhetsfaktorn minskar kraftigt, se figur 8.1 nedan. Det ska också poängteras att säkerhetsfaktorn blir kritisk för brott, alltså under 1, efter 57 dagar för alla dimensionerande lastförhållandena.

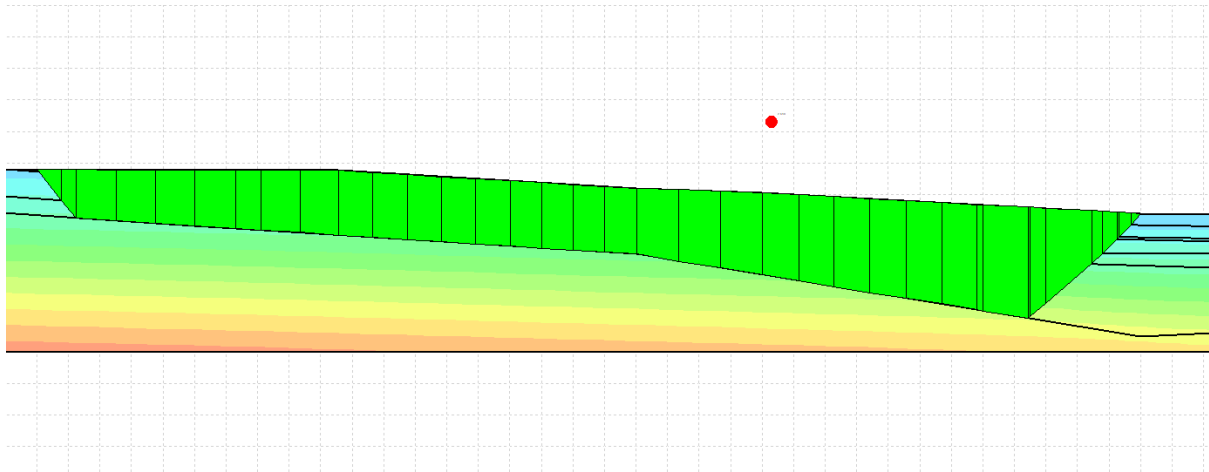


Figur 8.1: Säkerhetsfaktor över tid med olika lastförhållande

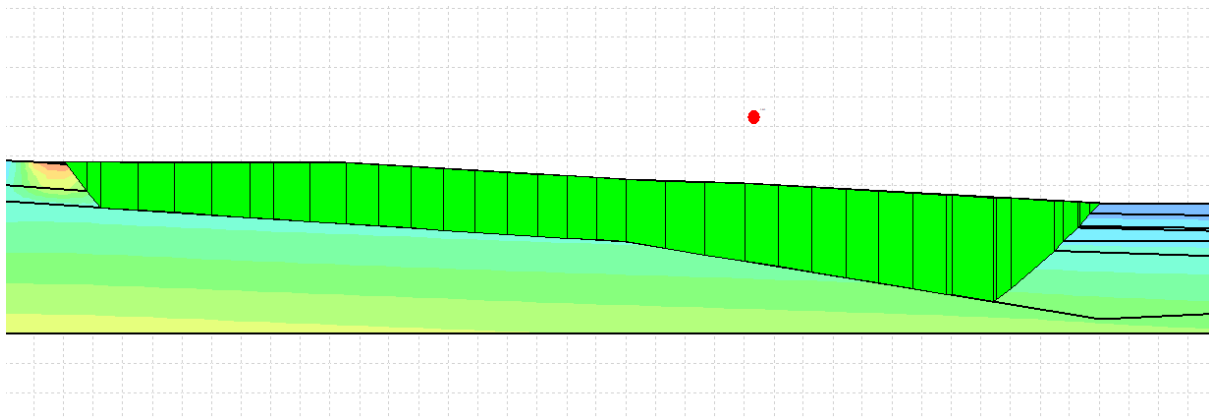
Figur 8.2 - 8.4 nedan presenterar resultat från SLOPE/W då ingen last är applicerad för den långsträckt profilen genom hela skredområdet. Grafen i figur 8.1 visar att en förändring sker runt femtio dagar och stabiliteten i slänten sjunker kraftigt. Därför är figurerna från initial stabilitet, vid femtio dagar och stabilitet vid skred presenterade nedan. Figurer med last är inte presenterade nedan då de figurerna i stort är identiska med och utan last, säkerhetsfaktorn skiljer dock lite, se bilagor 6-14 för fler resultat. Den kritiska glidytan, vilken kan identifieras som de gröna områdena, förändras dessutom inte vid applicering av last. Den kritiska glidytan förblir i stort sett konstant under alla sextio dagar med eller utan last vilket är att förvänta då skredet gick hela vägen ner till berget och tog med sig alla jordlager.



Figur 8.2: SLOPE/W modellering, kritisk glidyta (tid=0 dagar) SF= 2,598

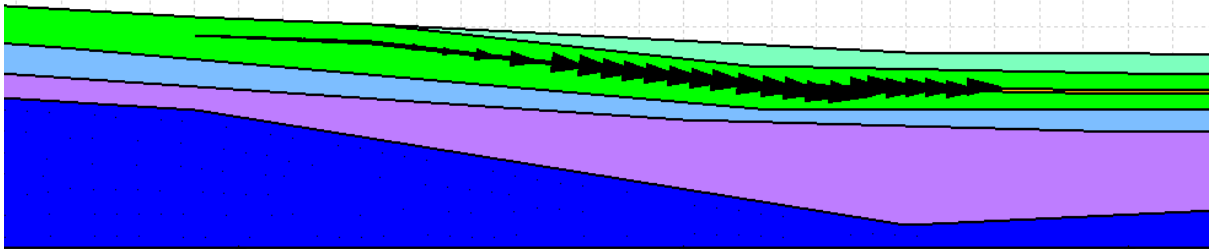


Figur 8.3: SLOPE/W modellering, kritisk glidyta (tid=50 dagar). SF = 2,318

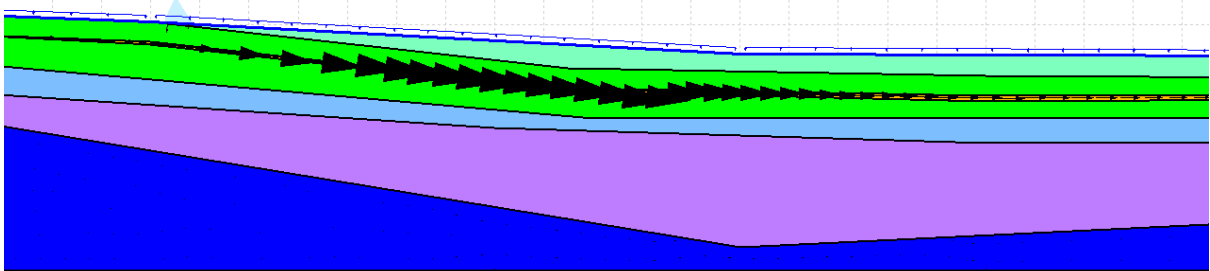


Figur 8.4: SLOPE/W modellering, kritisk glidyta vid skred (tid=57 dagar) SF=0,905

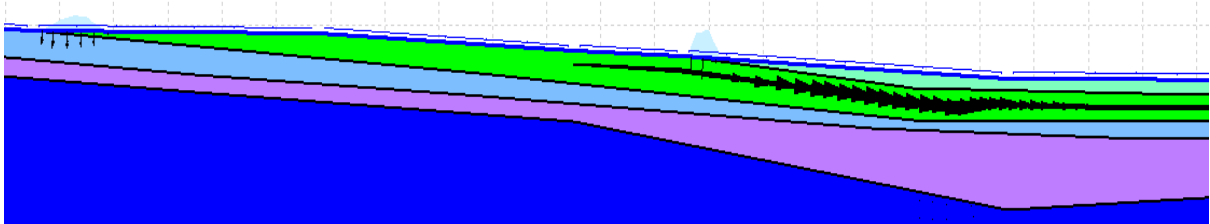
Figur 8.5 - 8.7 nedan presenterar resultat från SEEP/W-modelleringen vilken beskriver grundvattenflödet i släntprofilen vid 0 dagar, vid 26 dagar och 50 dagar enligt nederbördsförhållande beskrivna i kapitel 7.4. Tydligt är att friktionslagret bestående av siltig lera är det klart vattendrivande lagret. Grundvattenflöden genom friktionslagret är bestående och blir något kraftigare över tid. Vidare visar resultatet att efter 26 dagar börjar vatten ansamlas på markytan, se de små "vattentornen" i figur 8.6 och 8.7. Att det bildas vatten på ytan i modellen är rimligt då det ansamlades vatten lokalt ovan mark innan skredet inträffade.



Figur 8.5: SEEP/W modellering, grundvattenflödet (tid=0)

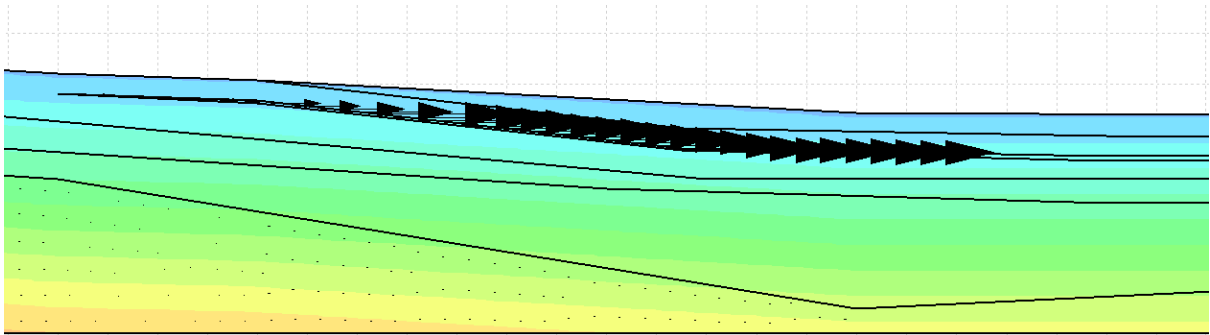


Figur 8.6: SEEP/W modellering, grundvattenflöde (tid=26 dagar)

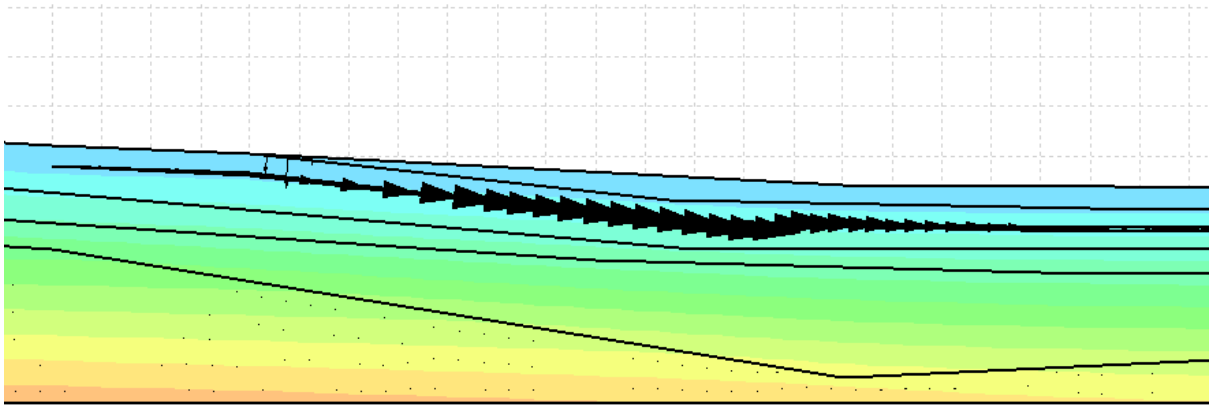


Figur 8.7: SEEP/W modellering, grundvattenflöde (tid=50 dagar)

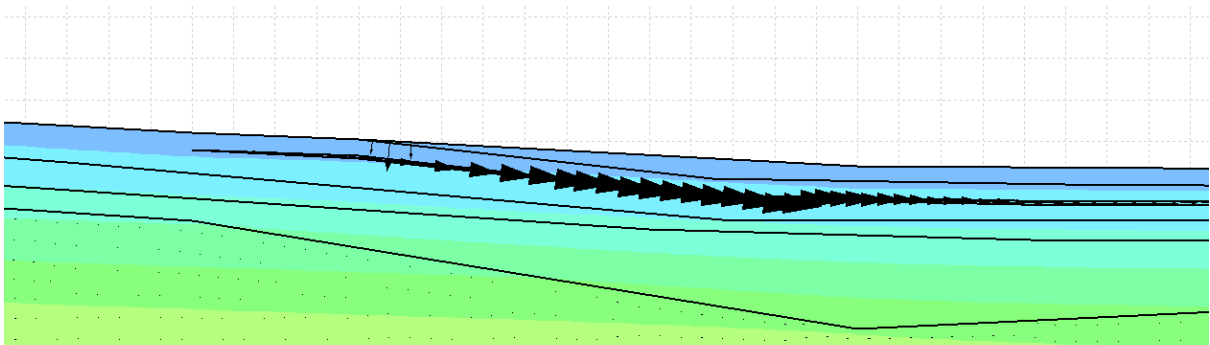
Figur 8.8 - 8.10 visar porvattentrycksförhållande vid 0 dagar, 50 dagar samt vid skred (57 dagar) . Tydligt är att initialt porvattentryck och porvattentryck vid 50 dagar skiljer mycket lite. Efter 50 dagar sker det en förändring och porvattentrycket blir betydligt högre, se skillnaden i färg från figur 8.9 till 8.10.



Figur 8.8: SEEP/W modellering porvattentrycksfördelning (tid=0 dagar)

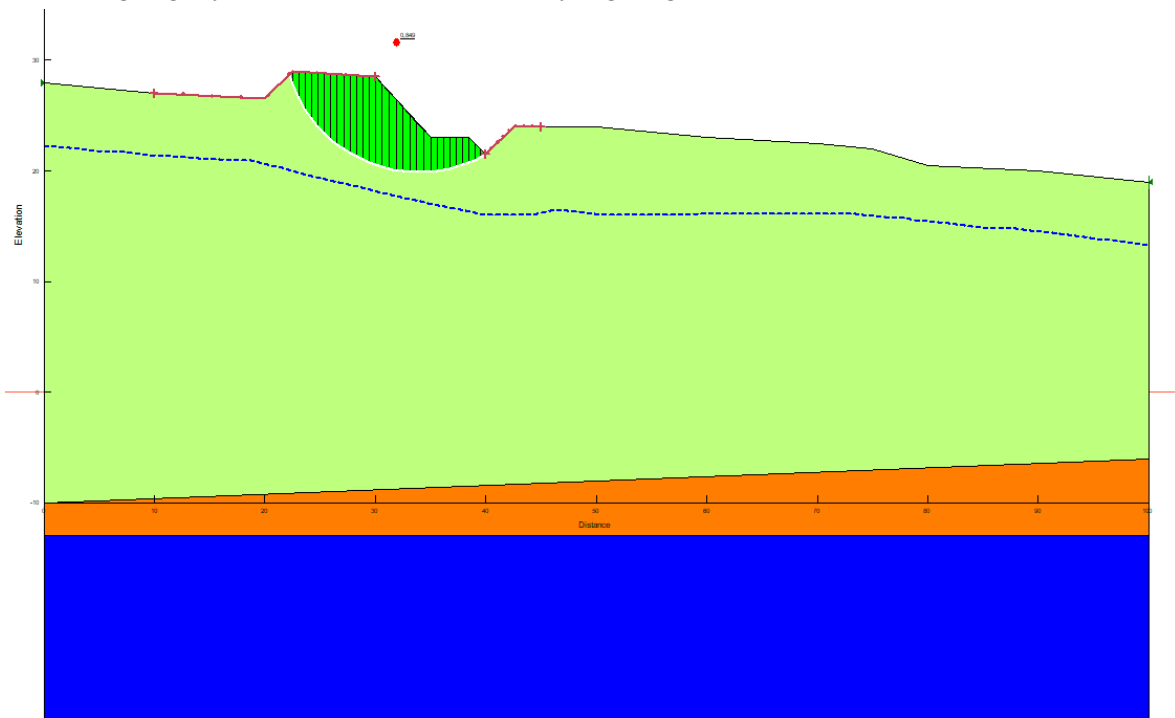


Figur 8.9 : SEEP/W modellering porvattentrycksfördelning (tid=50 dagar)

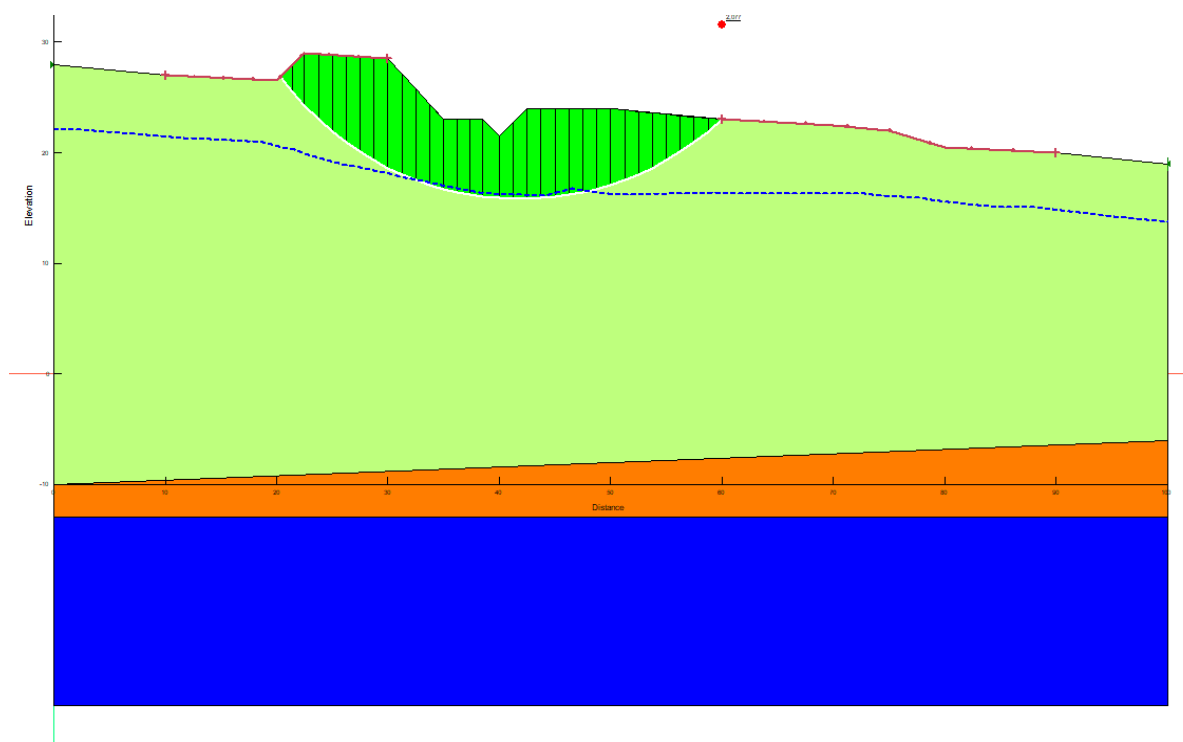


Figur 8.10: SEEP/W modellering porvattentrycksfördelning vid skred (tid = 57 dagar)

För den mindre slänten vid Tuve kyrkväg beräknades den initiala säkerhetsfaktorn till 0,966, vilket innebär att slänten är instabil redan vid initial grundvattennivå. Figur 8.11 visar den kritiska glidyta representerad av det gröna området för den initialt instabila slänten. Figur 8.12 visar resultat för en större antagen glidyta, vilket resulterade i en betydligt högre säkerhetsfaktor SF=2,077

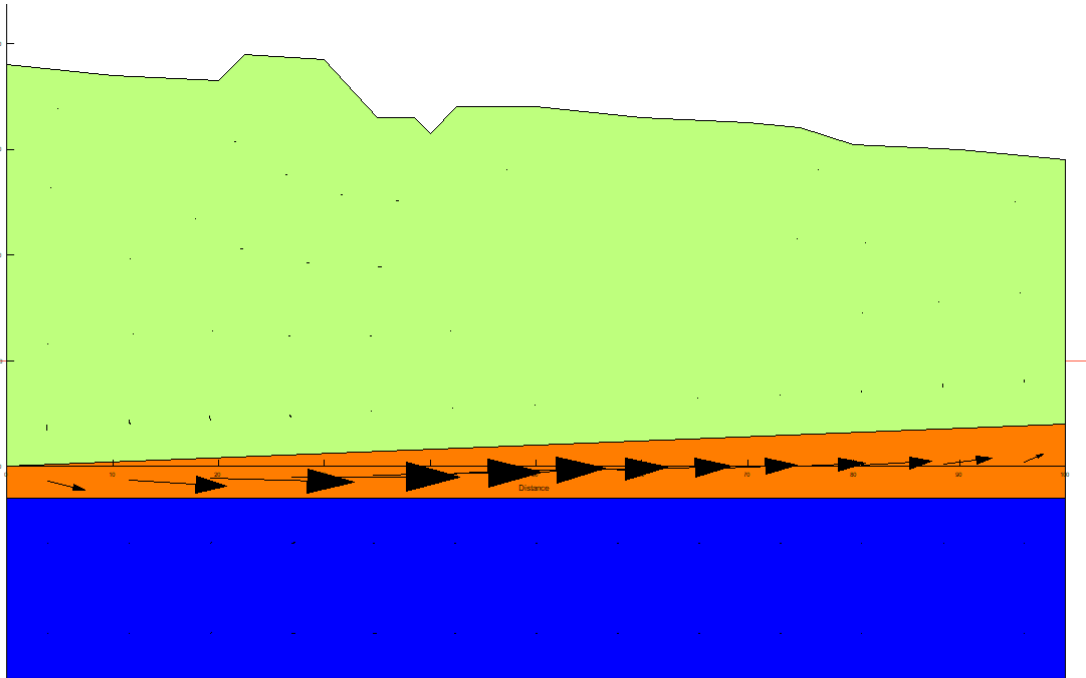


Figur 8.11: SLOPE/W modellering SF=0,966

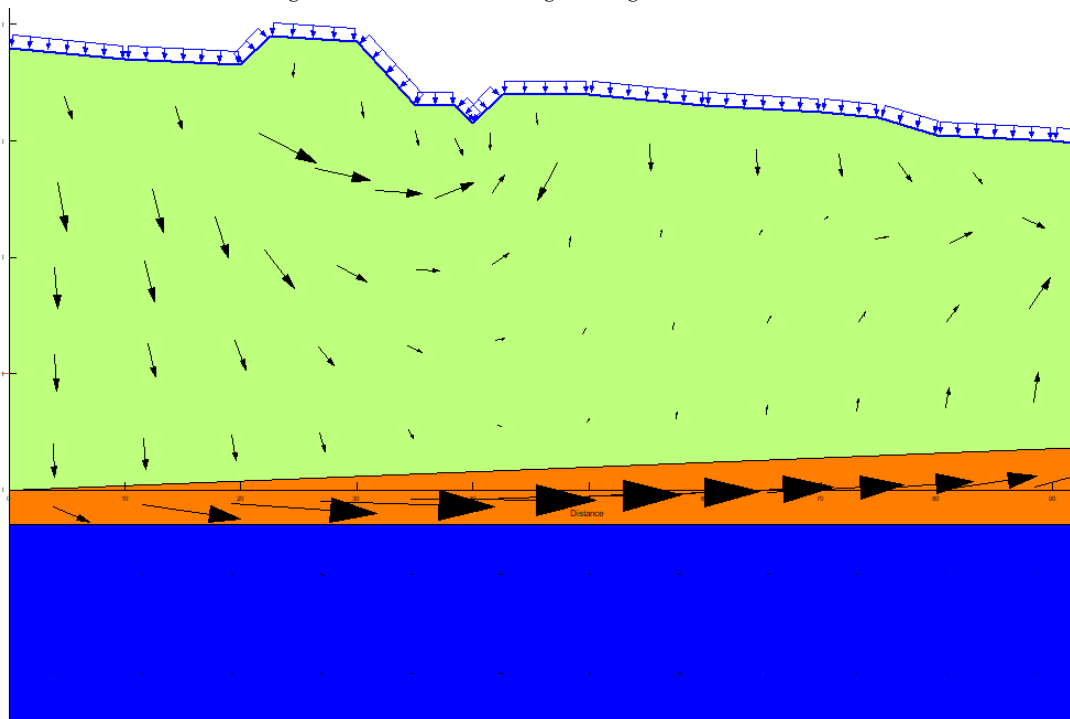


Figur 8.12: SLOPE/W modellering SF =2,077

Figur 8.13 - 8.14 representerar analys i SEEP/W för Tuve kyrkväg vilken visar hur grundvattenflödet är störst i friktionslagret, dock är säkerhetsfaktorn  $SF = 0,966$  oförändrad efter 60 dagar. Det visar att nederbördsförhållandet har enligt analysen inte haft påverkan på släntens stabilitet vid Tuve kyrkväg.

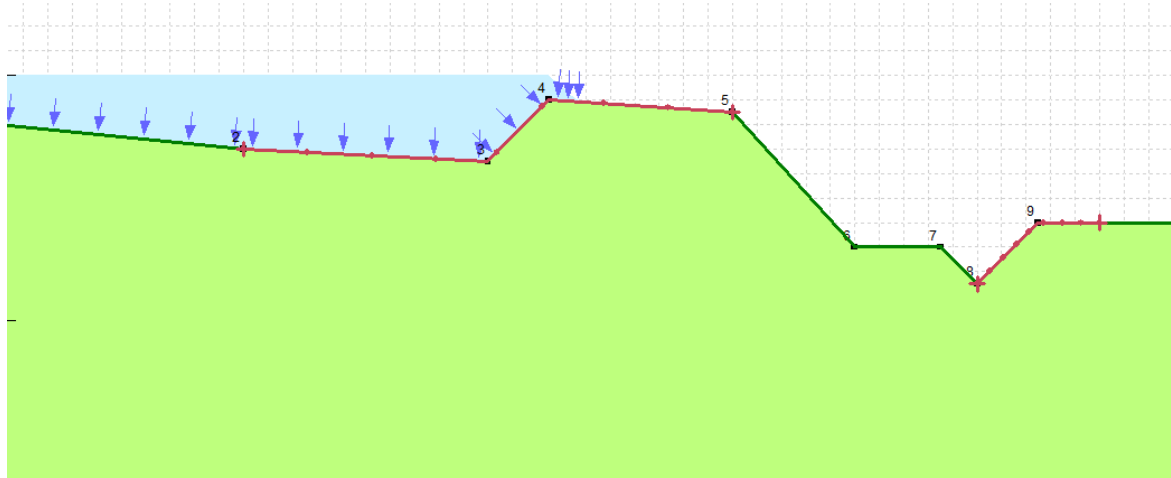


Figur 8.13: SEEP/W modellering, initialt grundvatten tillstånd

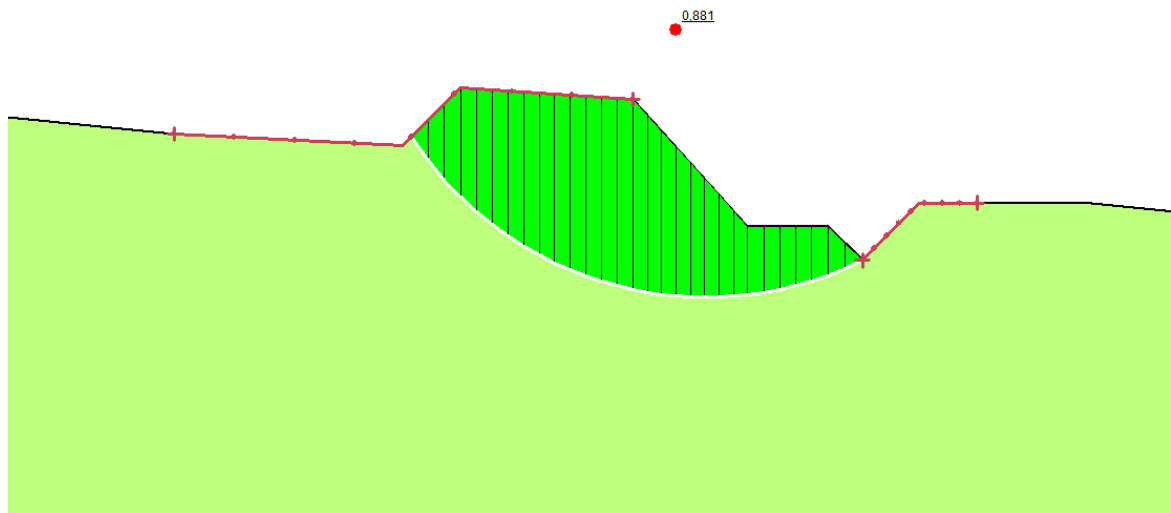


Figur 8.14: SEEP/W modellering, 60 dagars nederbörd

Figur 8.15 och 8.16 visar tillägg av vattenreservoar och kritisk glidyta. Inverkan av vattenreservoar resulterade i en lägre säkerhetsfaktor SF=0,881. Resultaten nedan är inte tidsberoende utan visar inverkar på statisk släntstabilitet.



Figur 8.15: Vattenreservoar i Geostudio



Figur 8.16: Kritisk glidyta efter tillägg av vattenreservoar SF=0,881

## 9 Diskussion

Baserat på de tre undersökta skreden framgår det tydligt att grundvattenförhållandena med tillhörande porvattentryck har spelat en avgörande roll i samtliga händelser. Samtliga skred föregicks av kraftig nederbörd vilket medförde höjda grundvattennivåer och därmed höga porvattentryck. I Tuve identifieras främst höga porvattentryck och översvämmade områden som utlösande faktorer och Gjerdrum erosion över tid. Även i Tuve kan det dock konstateras att erosion har varit en bidragande faktor, och de höga porvattentrycket i Gjerdrum var också nödvändiga för att utlösa skredet. Tillförande last på grund av närvaron av byggnader kan ha bidragit till skreden i Tuve och Gjerdrum men är inte den främsta orsaken till de två skreden. I fallet med skredet i Småröd är inte nederbörden den enskilt mest betydande faktorn, även om kraftig nederbörd med högsta sannolikhet hade betydande påverkan. Mänskliga misstag, såsom överdimensionerad last av schaktmassor, bristande riskhantering och misslyckade stabilitetsåtgärder, kan tillskrivas skredet. Ytterligare en iakttagelse är att marken hos alla de tre områdena hade en känd betydande låg hållfasthet. Trots risken exploaterades samtliga områden, vilket väcker frågan om det anses etiskt rätt att nonchalera faktum och inleda byggen på uppenbart utsatta platser. Ibland väger pengar och simplicitet mer än värdet av att göra det lilla extra för garanterad säkerhet, vilket i vissa fall, som exempelvis i Gjerdrum och Tuve, olyckligtvis slutar i tragedi.

Analysen i Geostudio antyder att den generella släntprofilens stabilitet sjönk på grund av ett högt porvattentryck som konsekvens av kraftig nederbörd. En bidragande faktor till skredet kan ha varit friktionslagret av siltig lera som finns mellan de två mer finkorniga lagren av styv lera i jordprofilen.. Den siltiga leran har betydligt högre hydraulisk konduktivitet än övrig lera. Det större vattenflödet i den siltiga leran som dess högre konduktivitet ger upphov till, se figur 8.5-8.7, kan ha lett till ett ökat porvattentryck uppåt på den styva leran som överlagrar den siltiga vilket givit slänten större benägenhet att röra sig.

Vad som dock motsäger teorin om att friktionslagrets närvaro haft en avgörande betydelse är glidyntans orientering. Figur 8.2-8.4 visar den mest kritiska glidyntan identifierad i Geostudio, figuren visar att friktionslagret inte är orienterat i skredets underkant, utan skredet går hela vägen ner till berg. Skredet påverkade med andra ord samtliga jordlager inklusive friktionslagret. Även analyserad litteratur från Tuveskredet påvisar att skredet gick ända ner till berg. Det ska även poängteras att ett friktionslager har större betydelse om det står i direkt kontakt med ett friktionslager på jordytan, vilket inte är fallet, se kapitel 6.2. Sammanfattningsvis kan friktionslagrets betydelse antas vara relativt liten för den generella jordlagerföljden, även om det kan ha medverkat till högre portryck och lokala differenser i grundvattennivå, vilket i sig sänker släntens stabilitet.

Grafen i figur 8.1 visar att säkerhetsfaktorn sjönk drastiskt efter 50 dagar av nederbörd. Den tydliga skillnaden beror på att porvattentrycket ökade kraftigt kring dessa dagar, vilket figur 8.8, 8.9 och 8.10 visar. Tänkbara anledningar till att porvattentrycket ökade kraftigt efter just 50 dagar av nederbörd kan vara att markens magasineringsförmåga av vatten då var utnyttjad till fullo, varpå vattnet fick större effekt i att öka porvattentrycken, vilket i sin tur kan vara en orsak till att släntens säkerhetsfaktor sjönk så drastiskt. Figur 8.7 visar ansamlingar av vatten på markytan i samband med att porvattentrycken ökade, vilket också kan ha bidragit till att sänka släntens stabilitet. Även litteraturstudien har slagit fast att vittnesuppgifter från dagarna innan skredet gör gällande att vatten ansamlades på markytan.

Analysen i Geostudio visar även att den tillkommande lasten i form av bostadsområdet på slänten hade en påverkan på säkerhetsfaktorn. Dock var påverkan mycket liten i förhållande till påverkan på slänten från nederbördsförhållanden. Sänkningen av säkerhetsfaktorn beroende på lasten var en bråkdel av minskningen av säkerhetsfaktorn beroende på vattenflödet vid en markbelastningen om 3 kN/m<sup>2</sup>. Även om lastens storlek överdrivs till ett högsta möjligt värde om 15 kN/m<sup>2</sup>, motsvarar sänkningen av säkerhetsfaktorn från last bara en åttiondel av sänkningen av säkerhetsfaktorn från vattenflödet. Ovanstående sänkningar av säkerhetsfaktorn för last är vid normala vattenförhållanden. Som synes på figur 8.1 är skillnaden i säkerhetsfaktor mellan simuleringarna med och utan last än mindre efter 60 dagar av hög nederbörd. Sammanfattat indikerar detta på att grundvattenflödet till följd av nederbörden var den enskilt viktigaste skredorsaken till skredet i Tuve snarare än lasten i form av byggnationen.

Resultaten i Geostudio från slänten vid Tuve kyrkväg berättar en egen historia, säkerhetsfaktorn antyder att skred ska ske redan vid initial grundvattennivå, även Hartlén (1984) presenterar en säkerhetsfaktor under 1 i figur 7.10. Varför har inte skred skett tidigare och vad betyder det för den generella jordprofilen och hela skredområdet? Att inte sprickan vid Tuve kyrkväg uppkommit tidigare kan bero på att intilliggande konstruktion och/eller växtlighet och dess rotnätverk kan ha medfört mekanisk hållfasthet, vilket inte har applicerats i Geostudio. Skredslänten är mycket liten och det är möjligt att kringliggande mark bidragit till att stabilisera slänten. Användes en större antagen glidyta så blev säkerhetsfaktorn betydligt högre, se figur 8.11 och 8.12.

SEEP/W resultatet, presenterat i figur 8.13 och 8.14, visar tydliga skillnader konduktivitet mellan leran och friktionslagret med siltig lera, vilket precis med den generella släntprofilen borde öka porvattentrycket betydligt i friktionslagret och ge upphov till markrörelser i leran ovan lagret. Men som beskrivet i resultatet så påverkades inte säkerhetsfaktorn av den stora nederbörden, inte ens efter hela sextio dagar. Även för analysen för Tuve kyrkväg har porvattentrycket förhållit sig hydrostatiskt till djupet. Att friktionslagret har haft låg betydelse för båda profilerna analyserade i Geostudio är mycket förvånande. Med hög sannolikhet har friktionslagret och då dess mycket höga konduktivitet i förhållande till kringliggande material varit en bidragande faktor, med tanke på den teoretiskt presenterade bakgrunden till hållfasthet och hydraulisk konduktivitet i kapitel 3.1 och 3.2.

Den statistiska analysen med inverkan av vattensamlingen vid Tuve kyrkväg, presenterad i figur 8.15 och 8.16, är inte helt tillförlitlig, men ger ändå ett beaktningsvärt resultat. Säkerhetsfaktorn sänktes från 0,966 till 0,881 efter applicering av vattenreservoaren i Geostudio. Resultatet visar att en vattenreservoar vid sidan av slänten bidrar till instabilitet och det är möjligt att vattensamling vid Tuve kyrkväg var den utlösande orsaken till det initiala sprickan. Därefter följde en progressiv bakåtgående process som tillslut tog med sig hela jordlagerföljden. Analysen av den generella jordlagerföljden och jordlagerföljden vid Tuve kyrkväg blir därmed mycket sammanhängande. Sprickan i Tuve kyrkväg till följd av vattensamlingen startade en kedjereaktion för hela slänten som var mycket instabil på grund av det ovan nämnda höga porvattentrycket till följd av nederbördsnivåerna. Detta ger en förklaring till den progressiva skredprocess beskriven i avsnitt 6.4.

Etablerat resultat i detta arbete har begränsningar i att det finns osäkerheter i exakt vilken skjuvhållfasthet jorden hade före skredet. Den använda skjuvhållfastheten i Geostudio är baserad på en trendlinje utifrån 3 olika borrhål. Av dessa två borrhål är borrhål K41 och E40 belägna i området för initialskredet, se figur 6.4 och 7.3. Skjuvhållfastheten för dessa borrhål är relativt lika vid markytan och några meter under, men vid borrhål K41 tillväxer inte skjuvhållfastheten med djupet som den gör i borrhål E40 och B18, se bilaga 1. Därav blir trendlinjen tillväxande med djupet och en

sådan hållfasthet har använts i Geostudio. Skulle istället borrhål K41 utan en tillväxande skjuvhållfasthet vara mer relevant hade en sådan skjuvhållfasthet resulterade i en lägre säkerhetsfaktor i Geostudio. För att kunna säga säkrare vilken skjuvhållfasthet som gäller i området hade fler mätningar från tiden innan skredet behövts.

Framtagna säkerhetsfaktorer för Tuveskredet i programvaran Geostudio begränsas till 2 dimensioner. Kumar m.fl. (2023) beskriver hur 2D-modeller vanligtvis används under antagandet att plan-sträck förhållanden råder. När tvärsnittet förändras längs slutningens horisontella riktning är det antagande ofta felaktigt. Studien av Kumar m.fl. (2023) fann att en säkerhetsfaktor baserad på en 3D-modell resulterade i en något högre säkerhetsfaktor än för 2D-modeller. Vidare ger det incitament att identifiera stabilitetsförhållanden baserade på 3-dimensionella simuleringar för att ge ett mer exakt resultat. SLOPE/W och SEEP/W har även ytterligare begränsningar i sina 2D-modeller vilka nämns i kapitel 4.3 och 4.4. Viktigt är därför att inte stirra sig blint på ovan framtagna säkerhetsfaktorer utan syftet, som tidigare nämnt, är att identifiera skredorsaker. Entreprenörer och byggherrar bör fokusera på de faktorer som potentiellt kan orsaka skred och dimensionera säkerhetsåtgärder efter de hydrologiska, geotekniska och geometriska förutsättningarna för varje enskilt projekt.

Som nämnt i kapitel 2.4 så kommer framtiden till följd av pågående klimatförändring präglas av mer frekventa och intensifierade nederbördsperioder. Denna ökning leder till högre porvattentryck vilket sänker kvicklereslänters stabilitet. Dessutom resulterar en ökning av vattenflöde i närliggande vattendrag, bäckar och älvar till ökad erosion på strandbanken. Ökad nederbörd till följd av klimatförändringar skulle därför i teorin också öka mängden kvicklerskred. I praktiken finns möjligheter att anpassa förstärkningsåtgärder till de nya förhållandena, därmed kan inga slutsatser definieras huruvida frekvensen av kvicklerskred kommer att öka eller inte. Vad som kan sägas med säkerhet är att klimatförändring leder på lång sikt till mer instabila naturligt förekommande slänter.

I dag är ambitionen, inte minst av miljöskäl, att öka befolkningstätheten i många svenska städer. I Göteborgs översiktsplan beskrivs även förtätning som lösningen till hur Göteborgs tillväxt med nya invånare och företag (Göteborgs Stad, 2021). Förtätning av städer innebär att mark som tidigare av någon anledning valts bort för byggnation nu ska bebyggas. Ofta kan osäkra geotekniska markförhållanden vara en orsak till att mark en gång i tiden undveks, vilket innebär att utmaningarna blir större vid byggnation av området idag än tidigare. Även dagens infrastruktur ställer högre krav på geotekniska konstruktioner än förr. Vägar och järnvägar dimensioneras för allt snabbare och tyngre trafik, vilket ställer större krav på minsta kurvradier och högsta tillåtna lutningar (Trafikverket, 2016). Flexibiliteten i valet av linjesträckning blir allt mindre, markområden som egentligen av geotekniska och släntstabilitetsmässiga skäl inte borde användas nu ändå måste exploateras. Det ställer allt högre krav på framförallt geotekniska förstärkningsåtgärder.

Vid val av förstärkningsåtgärder för att minimera risken för kvicklerskred bör metoder som fungerar bra i våtare lera och större flöden av vatten användas. Därav är kalkcementpelare och jetinjektering lämpliga åtgärder. Kalkcementpelaren har som nämnt i kapitel tre förmåga att stärka sin egen hållfasthet med hjälp av vattnet i marken. Cementbaserade förstärkningsåtgärder blir därför mycket fördelaktiga i jordlager bestående av kvicklera. Jetinjektering har som nämnt liknande egenskaper som kalkcementpelare, men den har ytterligare fördelar i form av att metoden är lättare att applicera i olika jordarter. Jetinjektering kommer dock med ett högt pris ekonomiskt, varav olika aspekter får vägas mot varandra vid projektering.

Som nämnt visar resultatet att kraftiga regn och blöta perioder ökar skredbenägenheten. Om konsekvenserna av klimatförändringarna innebär mer och kraftigare nederbörd kommer behovet av förstärkningsåtgärder med användning av cement att öka, vilket påverkar miljö och klimatet negativt. Användningen av cement blir kontraproduktivt, då det påverkar klimatet på sådant sätt att ökad cementanvändning krävs.

Idag finns alternativ till cementbaserade förstärkningsåtgärder, se kapitel 2.6.5, såsom cementsättningsmedel och saltbrunnar. Användandet av mer nyanserade och miljövänliga tekniker har dock flera problem och hinder. Först och främst är teknikerna inte lika beprövade som teknikerna som använder cement. Dessutom innebär de ofta en högre kostnad, vilket resulterar i svåra miljömässiga, ekonomiska och inte minst etiska avväganden vid val av stabiliseringsåtgärd. Alternativkostnaderna för att orsaka utsläpp är mycket svåra för att inte säga omöjliga att beräkna. Kostnaden kan kokas ned till både kostnad för byggnader och infrastruktur vid ett eventuellt skred, samt i sin tur kostnader och lidande vid förlust av eller skador på människor. Vidare blir även de miljömässiga konsekvenserna vid ett skred svåra att analysera och jämföra med miljömässiga konsekvenser av klimatpåverkan genom cementanvändning.

Viktigt är också att jämföra det lokala och globala perspektivet på valet av förstärkningsåtgärd. Användande av en osäkrare förstärkningsåtgärd får effekter på människa, miljö och ekonomi lokalt vid skred. I det större perspektivet orsakar cement koldioxidutsläpp som påverkar klimatet över hela jorden. Den olika skalan på konsekvenser gör det svårt att utvärdera och jämföra för att komma fram till vad som är bäst. Slutligen kan beslutsfattande angående om cementbaserade stabiliseringsmetoder bör användas eller inte vävas ned till prioriteringar kring det lokala eller globala perspektivet. Ska liv och miljö på den globala skalan prioriteras genom minskad klimatpåverkan, eller ska liv, miljö och ekonomi prioriteras lokalt på bekostnad av människor i andra länder genom användande av cementbaserade förstärkningsmetoder?

Med tanke på den tydliga inverkan som höjning av porvattentrycket har på släntstabiliteten blir portrycksreglering ett attraktivt alternativ. Portrycksreglering har som nämnt kapitel 2.6.3 nackdelar i den ekologiska skada som den tillför. Dessutom kräver metoden ett omfattande arbete och ständig reglering och kontroll för att undvika riskerna kopplade till sättningsbenägenhet i kringliggande områden.

I nuläget är det svårt att inte rekommendera cementbaserade stabiliseringsåtgärder då människors säkerhet måste ses som det viktigaste att ta till akt. Dock kräver den rådande klimatkrisen att andra ekologiskt snällare metoder gradvis måste ta över. Statligt organiserade myndigheter och globala organisationer har incitament att finansiera och skynda på forskningsprocessen för att identifiera långsiktigt hållbara metoder som kan ersätta nuvarande stabiliseringsmetoder.

En lösning till problemet med instabila slänter kan etableras utifrån från fler perspektiv än en diskussion rådande vilka stabiliseringsåtgärder som bör appliceras. För samtliga skred är svag riskbedömning i flera fall en faktor till olyckor orsakade av kvicklera. Med andra ord är den mänskliga faktorn mycket avgörande. Vid flertalet fall när det skett jordskred har det varit känt att området är riskfyllt, men rätt åtgärder har inte vidtagits för att stabilisera marken, alternativt har de vidtagna åtgärderna överskattats. Exempel på orsaker till skred där den mänskliga faktorn påverkat är felbedömningen av last och vid skredet i Småröd, bedömningen av Erosionen i bäcken vid skredet i Gjerdrum och dimensioneringen av kulverten under Tuve kyrkväg. I många fall kan valet att överhuvudtaget bygga på en viss plats ifrågasättas. Det finns även tillfällen då ansvariga parter har

missat helhetsbilden och därmed inte sett vad aktivitet på en plats påverkar en annan närbelägen. En missad helhetsbedömning exemplifieras i dagvattenhantering för både Gjerdrum och Tuve där dagvattenflöden från olika utgångspunkter medförde att flöden i bäckar och vattendrag ökade drastiskt efter byggnationen av områdena vilket medförde erosion och instabilare slänter.

Ovanstående stycke ger svar på vilka mänskliga misslyckanden som har påverkat eller ligger till grund för skreden som behandlats i rapporten. För att inte fokusera för mycket på problemet förser också stycket en insikt i vad som måste göras för att undvika mänskligt pådrivna skred framöver. Kritiskt är därför att genomföra noggranna geotekniska studier och riskbedömningar före exploatering, genom att till exempel undersöka markens sammansättning, lutning, vattenhalt och andra faktorer som kan påverka släntstabiliteten. Vidare är det också av vikt att se till att dagvattensystem, infrastruktur, vägar, byggnader och andra konstruktioner är korrekt dimensionerade för att motstå påfrestningar från potentiellt höga nederbördsnivåer och geotekniska risker. Regelbunden kontroll av byggarbetsplatser och redan exploaterade områden som består av eller till del av kvicklera behövs. Kontroller skulle kunna inkludera hydrologiska kontroller, eventuella förändringar i landskapet, erosionskontroller, stabiliseringsberäkningar samt kontroller av dagvattensystem i anslutning till skredkänsliga områden. Främja öppen kommunikation och samarbete mellan olika parter, inklusive byggherrar, kommuner och geotekniska experter för att säkerställa att en helhetsbild beaktas och att lämpliga åtgärder vidtas för att minimera risken för skred. De ovanstående aspekterna kan även kompletteras med skärpta lagar och regler. Inte minst måste ansvariga parter utbildas om farorna med kvicklera, vikten av korrekt geoteknisk bedömning och åtgärder för att förhindra skred.

## 10 Slutstats

Oavsett mänsklig eller naturlig initial katalysator, indikerar resultatet att den mest avgörande faktorn för skred i kvicklera är mängden av vatten i marken, ofta till följd av kraftig långvarig nederbörd. Med regninfiltration över en längre tidsperiod, förbrukas markens kapacitet att magasinera grundvatten vilket leder till att porvattentrycket höjs och sänker släntens säkerhetsfaktor signifikant. Skredet i Tuve hade även en tydligt progressiv process kantat av ett initialt skred och höga porvattentryck i hela området. Utöver de hydrauliska förhållandena identifieras erosion ihop med mänskliga misslyckanden som avgörande faktorer. Byggnation utan tillräckliga säkerhetsbedömningar, bristfälliga stabiliseringsåtgärder samt underdimensionerad infrastruktur och dagvattensystem är ofta bidragande orsaker och potentiellt utlösande faktorer. Behovet av stabiliseringsåtgärder ökar i takt med en ökad nederbörd till följd av klimatförändringarna ihop med urbanisering och utveckling av högeffektiv infrastruktur. De effektivaste stabiliseringsmetoderna är cementbaserade och därmed klimatmässigt ohållbara, vilket skapar svåra miljömässiga, ekonomiska och etiska avväganden vid exploatering av skredkänsliga områden. För att undvika framtida skred behövs ökad kunskap om kvicklerans påverkan på släntstabiliteten, samt ökad hänsyn och fler åtgärder för att undvika onödiga risker i områden med känd skredrisk till följd av kvicklereförekomst.

# 11 Referenser

Amin, M. N., Ashfaq, M., Mujtaba, H., Ehsan, S., Khan, K., Faraz, M. I. (2022). Computer-Aided Slope Stability Analysis of a Landslide—A Case Study of Jhika Gali Landslide in Pakistan. *Sustainability*, 14(20), 12954. <https://doi.org/10.3390/su142012954>

Amiri, V., Li, P., Shukla, S. (2023). Estimation of hydraulic conductivity and porosity of a heterogeneous porous aquifer by combining transition probability geostatistical simulation, geophysical survey, and pumping test data. *Environment, Development & Sustainability*, 25(8), 7713–7736. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02368-6>

Bernander, S. (2007) *Analys av progressiva skred utförda av Con-Geo*. Luleå tekniska universitet. [https://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?faces-redirect=true&aq2=%5B%5B%5D%5D&af=%5B%5D&searchType=SIMPLE&sortOrder2=title\\_sort\\_asc&query=&language=sv&pid=diva2%3A997423&aq=%5B%5B%5D%5D&sf=all&aqe=%5B%5D&sortOrder=author\\_sort\\_asc&onlyFullText=false&noOfRows=50&dswid=-2040](https://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?faces-redirect=true&aq2=%5B%5B%5D%5D&af=%5B%5D&searchType=SIMPLE&sortOrder2=title_sort_asc&query=&language=sv&pid=diva2%3A997423&aq=%5B%5B%5D%5D&sf=all&aqe=%5B%5D&sortOrder=author_sort_asc&onlyFullText=false&noOfRows=50&dswid=-2040)

Blomquist, T., & Gustafson, G. (1981). *Tuveskredet Hydrogeologi*. Statens Geotekniska Institut. <https://sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r11c.pdf>

Borelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>

Chen, Z. Y., & Morgenstern, N. R. (1983). Extensions to the generalized method of slices for stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(1), 104–119. <https://doi.org/10.1139/t83-010>

Ching, J., & Phoon, K.-K. (2014). Transformations and correlations among some clay parameters — the global database. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 663–685. Doi:10.1139/cgj-2013-0262

Finne, I. (1960). Erosion of surfaces by solid particles. *Shell Development Company*, 3(2), 87–103. Doi: 10.1016/0043-1648(60)90055-7

GEO-SLOPE International Ltd. (2012). *Seepage Modeling with SEEP/W, An engineering methodology march 2012 edition*. <https://ottegroup.com/wp-content/uploads/2021/02/seep-modeling-June2015.pdf>

GEO-SLOPE International Ltd. (2015). *Stability Modeling with SLOPE/W, An engineering methodology june 2015 edition*. <https://downloads.geoslope.com/geostudioresources/books/11/2/SLOPE%20Modeling.pdf>

Göteborgs Stad. (2021). *Översiktsplan för Göteborg*. [https://www4.goteborg.se/prod/intraservice/namndhandlingar/SamrumPortal.nsf/81A110EE19CEF670C1258695005138C7/\\$File/Bilaga%201%20Ny%20OP%20forslag%20granskning.pdf?OpenElement](https://www4.goteborg.se/prod/intraservice/namndhandlingar/SamrumPortal.nsf/81A110EE19CEF670C1258695005138C7/$File/Bilaga%201%20Ny%20OP%20forslag%20granskning.pdf?OpenElement)

Hartlén, J. (1984). *Tuveskredet Slutrapport*. Statens Geotekniska Institut.  
<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r11a.pdf>

Helle, T. E., Kvennas, M., Hamel, B., Strand, S., Svano, G., Bache, B., Gylland, A., Haugen, E., Sætre, C., Wiig, T., & Horn, A. (2022). Potassium chloride wells used as quick-clay landslide mitigation: installation procedures, cost-benefit analysis, and recommendations for design. *Canadian Geotechnical Journal*, 59, 1660–1678. [dx.doi.org/10.1139/cgj-2021-0230](https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0230)

Hov, S., Paniagua, P., Sætre, C., Long, M., Cornelissen, G., & Ritter, S. (2023). Stabilisation of Soft Clay, Quick Clay and Peat by Industrial By-Products and Biochars. *Applied Sciences*, 13, 9048.  
<https://doi.org/10.3390/app13169048>

Juvik, E. S., Solås, L. A., Koa, I. K., Bache, B. K., & Hove, S. E. (2019). Results from ground improvement with lime-cement columns in quick and sensitive clay on the E6 Trondheim-Melhus [Paper presentation]. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings, Volume 2019-September, Reykjavik (Iceland).

Järnefors, B. (1954). *Skredet vid intagan år 1648*. Sveriges Geologiska undersökning

Kandalai, S., Nithin, J. J., & Patel, A. (2023). Effects of Climate Change on Geotechnical Infrastructures — state of the art. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 16878–16904.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-24788-7>

Kiran, P. A., Netra, P. B., Ranjan, K. D., & Ryuichi, Y. (2014). Seepage and slope stability modelling of rainfall-induced slope failures in topographic hollows. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 721–746. Doi: 10.1080/19475705.2014.954150

Krahn, J. (2003). The 2001 R.M Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 643–660. Doi: 10.1139/T03-024

Kumar, S., Choudhary, S. S., & Burman, A. (2023). The effect of slope height and angle on the safety factor and modes of failure of 3D slopes analysis using limit equilibrium method. *Benif-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 12, 84.  
<https://doi.org/10.1186/s43088-023-00423-3>

Länsstyrelsen i Västra Götalands Län (2013). *Konsekvenser på naturvärden av skred-, erosions- och översvämningsåtgärder*. [https://catalog.lansstyrelsen.se/store/13/resource/2013\\_49](https://catalog.lansstyrelsen.se/store/13/resource/2013_49)

Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Statens Geotekniska Institut.  
<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>

Löfroth, H. (2008). *Undrained shear strength in clay slopes - Influence of stress conditions A model and field test study* [Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola].  
<https://eds.p.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=1&sid=a997bc1c-3823-4506-8928-090024968e08%40redis&bdata=JnNpdGU9ZWRzLWxpdmUmc2NvcGU9c2l0ZQ%3d%3d#AN=clpc.oai.edge.chalmers.folio.ebsco.com.fs00001000.cec0f0e6.25d9.44b9.9ee6.40678d9d28fc&db=cat09075a>

Morganstern, N. R., & Price, V. E. (1965). THE ANALYSIS OF THE STABILITY OF GENERAL SLIP SURFACES. *Géotechnique*, 15(1), 79–93. <https://doi.org/10.7939/R3JS9HF63>

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. (2019). *Analys av samhällsekonomisk kostnad : skredet vid E6 i Småröd, 2006*. <https://rib.msb.se/filer/pdf/25606.pdf>

Naturvårdsverket. (2024). *Klimatförändringarnas effekter i Sverige*. <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatforandringar/klimatet-i-framtiden/effekter-i-sverige/>

Papadopoulou, M., Malehmir, A., Markovic, M., & Berglund, J. (2023). High-resolution P- and S-wavefield seismic investigations of a quick-clay site in southwest of Sweden. *Near surface geophysics*, 21(6), 458–472. <https://doi.org/10.1002/nsg.12269>

Penna, I., & Solberg, I. L. (2021). *Landscape changes and bedrock reconstruction in Gjerdrum area. Methodological approach and main results*. Norges Geologiske Undersøkelse, NGU. <https://www.ngu.no/publikasjon/landscape-changes-and-bedrock-reconstruction-gjerdrum-area-methodological-approach-and>

Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V., & Dahlin, T. (2004). *Quick clay in Sweden*. Statens Geotekniska Institut. <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r65.pdf>

#### Overview of Retrogressive Landslide Risk Analysis in Sensitive Clay Slope

Richer, B., Saeidi, A., Boivin, M., & Rouleau, A. (2020) Overview of Retrogressive Landslide Risk Analysis in Sensitive Clay Slope. *Geosciences* 10(8), 279; <https://doi.org/10.3390/geosciences10080279>

Rogbeck, Y., Bertilsson, R., Hedfors, J., Hågeryd, A. C., Helgesson, H., & Kiilsgaard, R. (2015). *Geokalkyl för bebyggelse i tidiga skeden*. Statens Geotekniska Institut. <https://gis.swedgeo.se/dokument/geokalkyl/SGI-P16.pdf>

Ryan, I., Riekeles, H.. (2021). *Årsakene til vikkleireskredet i Gjerdrum 2020*. Olje- og Energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/contentassets/3dadc8f7fad94608861163fa524023c0/no/pdfs/arsakene-til-kvikkleireskredet-i-gjerdrum-2020.pdf>

Salahudeen, A. B. G., & Yisa, L. (2023). Settlement, slope stability, and seepage analysis by numerical modeling method and their application in practice. *Nigerian Journal of Technology*, 42(3), 306–314. <https://doi.org/10.4314/njt.v42i3.2>

Schaap, M. G., Leij, F. J., & Van Genuchten, M. T. H. (2001). ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 163–176. Doi: 10.1016/S0022-1694(01)00466-8

Schoning, K. (2016). *Saltvattenavsatta leror i Sverige med potential för att bilda kvicklera*. Sveriges Geologiska Undersökning (SGU).

<https://www.sgu.se/globalassets/produkter/publikationer/tidigare/saltvattenavsatta-leror-i-sverige-med-potential-for-att-bilda-kvicklerasgu-rapport-2016-08.pdf>

Severino, A., Wahrhaftig, H., Tiutkin, O., Gubashova, V., & Neduzha, L. (2022). Effective Jet-Grouting Application for Improving the State of Deformation of Landmarks. *Buildings*, 12, 368.

<https://doi.org/10.3390/buildings12030368>

Singh, A. K. (2010). Bioengineering techniques of slope stabilization and landslide mitigation. *Disaster Prevention and Management*, 19(3), 384–397. <https://doi.org/10.1108/09653561011052547>

Smalley, I. (1976). Factors relating to the landslide process in Canadian quickclays. *Earth Surface Processes*, 1(2), 163–172. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010206>

Statens Geotekniska Institut. (1981). Nr 1, *Tuveskredet Geologi*.

<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r11b.pdf>

Statens Geotekniska Institut. (1981). Nr 2, *Tuveskredet 1988-11-30 Inlägg om skredets orsaker*.

<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r10.pdf>

Statens Geotekniska Institut. (2018). *Geoteknisk stabilitetsutredning i jord*.

<https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/ras--skred-och-slamstrommar/fran-inventering-till-atgard/stabilitetsutredning/>

Statens Geotekniska Institut. (2003). *Kvicklera – bildning och egenskaper*.

<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v526-rev1.pdf>

Statens Geotekniska Institut. (2022). *Klimatförändringen ger fler ras och skred*.

<https://press.sgi.se/posts/pressreleases/klimatforandringen-ger-fler-ras-och-skred>

Statens haverikommission. (2009). *Jordskred vid vägbygge E6 i Småröd, O län, den 20 december 2006*.

<https://www.havkom.se/utredningar/vaegtrafik-oevrigt/ro-200901-2-6-mb-jordskred-vid-vaegbygge-e6-i-smarod-o-laen-den-20-december-2006>

Suer, P., Holmén, M., Burman, F. (2017) *Mätosäkerhet vid SGI:s geotekniska laboratorium – Konflytgräns*. Statens geotekniska institut, SGI, Linköping.

<https://www.sgi.se/globalassets/laboratorium/matosakerhet-geotekniklab/matosakerhet-konflytgrans-171026.pdf>

Sveriges Geologiska Undersökning. (2024). Nr 1, *Brunnar*.

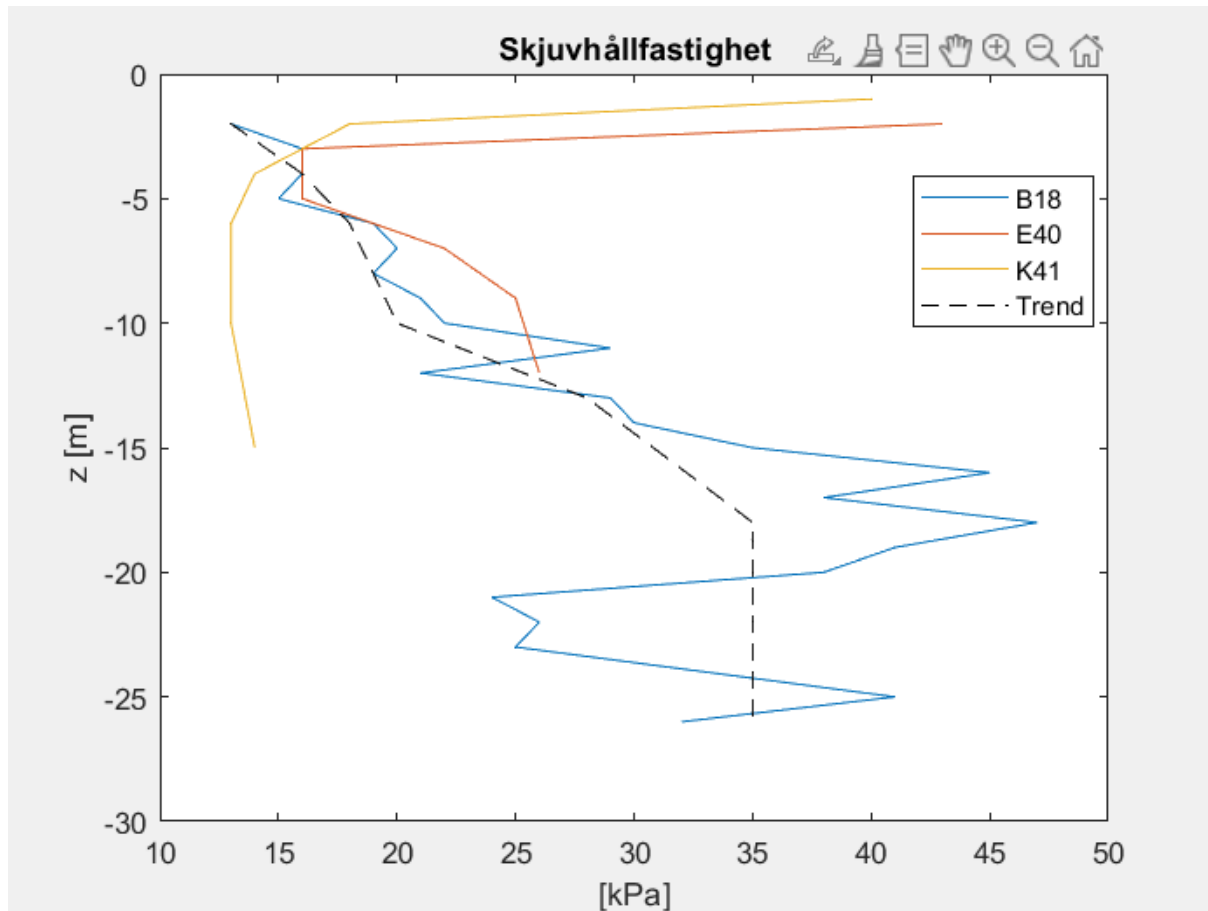
<https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar.html>

Sveriges Geologiska Undersökning. (2024). Nr 2, *Jordarter 1:25000 - 1:100000*.

<https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-25-100.html?zoom=-1022929.2256064517,6147843.525797051,2202677.2256064517,7622046.474202949>

- Sveriges Geologiska Undersökning. (2024). Nr 3, *Hydraulisk konduktivitet i berg*.  
<https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-hydraulisk-konduktivitet.html?zoom=-1022929.2256064517,6147843.525797051,2202677.2256064517,7622046.474202949>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2017). *Skredrisker i ett förändrad klimat-Säveån. Del2: Metodik för kartläggning*. Statens geotekniska institut,  
<https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/sgi-publikation/sgi-p38-1.pdf>
- Torrance, J. K. (2013). Landslides in quick clay. *Cambridge University Press*.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511740367.009>
- Torstensson, B. A. (1982). The landslide at Tuve. *Ground engineering*, 15(2), 15-18, 21-24.  
<https://cdn.ca.emap.com/wp-content/uploads/sites/13/1982/03/GE-March-1982-The-landslide-at-Tuve.pdf>
- Trafikverket. (2016). *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner-TK Geo 13 Version 2*.  
[https://tekniskhandbok.goteborg.se/Arkiv/2016-1/\\_site/Content/File/2BE\\_1\\_TK%20Geo%2013%20Trafikverkets%20tekniska%20krav%20f%C3%B6r%20geokonstruktioner\\_2015-12.pdf](https://tekniskhandbok.goteborg.se/Arkiv/2016-1/_site/Content/File/2BE_1_TK%20Geo%2013%20Trafikverkets%20tekniska%20krav%20f%C3%B6r%20geokonstruktioner_2015-12.pdf)
- von Bahr, C. (2013). *Konsekvenser på naturvärden av skred-, erosions- och översvänningsåtgärder*.  
[https://catalog.lansstyrelsen.se/store/13/resource/2013\\_49](https://catalog.lansstyrelsen.se/store/13/resource/2013_49)
- Wagner, J.-F. (2013). Chapter 9 - Mechanical properties in clays and clay minerals. *Developments in clay science*, 5, 347–381. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0>
- Åhnberg, H., Löfroth, H., & Lundström, K. (2014). Management of quick clay areas in slope stability investigations – the göta river valley. *Advances in Natural and Technology Hazards Research*, 36, 383–394. Doi: 10.1007/978-94-007-7079-9\_30

# Bilagor



Bilaga 1: Skjuvhållfasthet i förhållande till djup för generell jordprofil.

Material	Tunghet (kN/m <sup>3</sup> )	Odränerad skjuvhållfasthet (kPa)	Friktionsvinkel (grader)
Gyttjlera (A)	16	13	17
Styv lera 1 (B)	16	$17+1,5*z$	17
Siltig lera (C)	16	$25+1,1*z$	30
Styv lera 2 (D)	16	$32+0,75*z$	17
Varvig lera (E)	16	35	17
Berg	Bedrock (Impenetrable)	Ej applicerbart	Ej applicerbart

Bilaga 2: Tabell för generella jordlagerföljdens geofysiska egenskaper applicerade i Geostudio.

Material	Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Vattenkvot vid mättnadstillstånd [%]	Kornstorlek i diameter när 10% av kornen passerar [mm]	Kornstorlek i diameter när 60% av kornen passerar [mm]
Gyttjelera (A)	$9 \cdot 10^{-9}$	82	0,001	0,002
Styv lera 1(B)	$5 \cdot 10^{-9}$	82	0,001	0,002
Siltig lera (C)	$6 \cdot 10^{-6}$	64	0,001	0,003
Styv lera 2 (D)	$5 \cdot 10^{-9}$	79	0,001	0,002
Varvig lera (E)	$1 \cdot 10^{-8}$	55	0,001	0,015
Berg	$1 \cdot 10^{-7}$	5	Ej applicerbart	Ej applicerbart

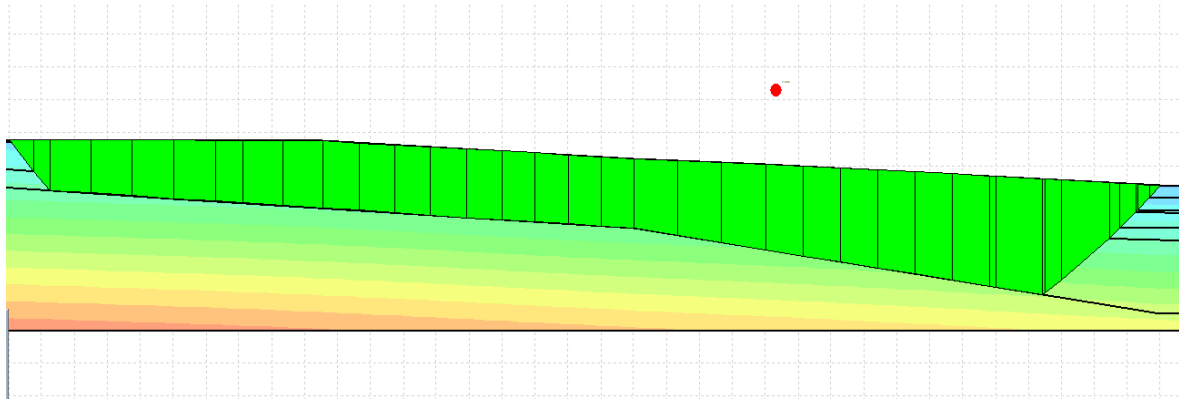
Bilaga 3: Hydrogeologiska egenskaper för den generella jordlagerföljden

Material	Tunghet (kN/m <sup>3</sup> )	Odärnerad skjuvhållfasthet (kPa)	Friktionsvinkel (grader)
Lera	16	$15 + 1,3 \cdot z$	17
Siltig lera	16	10	30
Berg	Bedrock (Impenetrable)	Ej applicerbart	Ej applicerbart

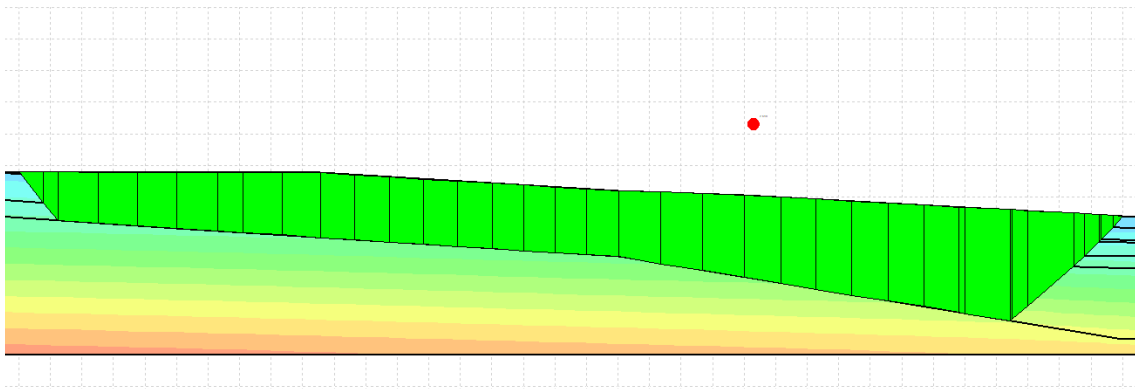
Bilaga 4: Tabell för jordlagerföljden under Tuve kyrkvägs geofysiska egenskaper applicerade i Geostudio.

Material	Hydraulisk konduktivitet [m/s]	Vattenkvot vid mättnadstillstånd [%]	Kornstorlek i diameter när 10% av kornen passerar [mm]	Kornstorlek i diameter när 60% av kornen passerar [mm]
Lera	$5 \cdot 10^{-9}$	82	0,001	0,002
Siltig lera	$6 \cdot 10^{-6}$	64	0,001	0,003
Berg	$1 \cdot 10^{-7}$	5	Ej applicerbart	Ej applicerbart

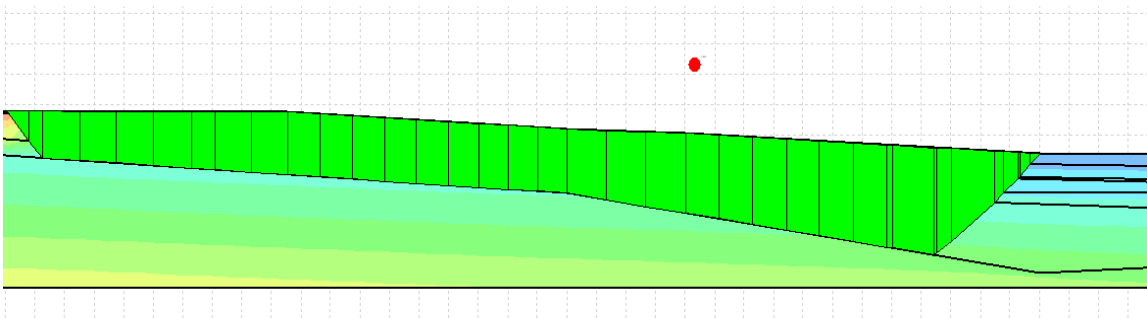
Bilaga 5: Hydrogeologiska egenskaper för jordlagerföljd under Tuve kyrkväg



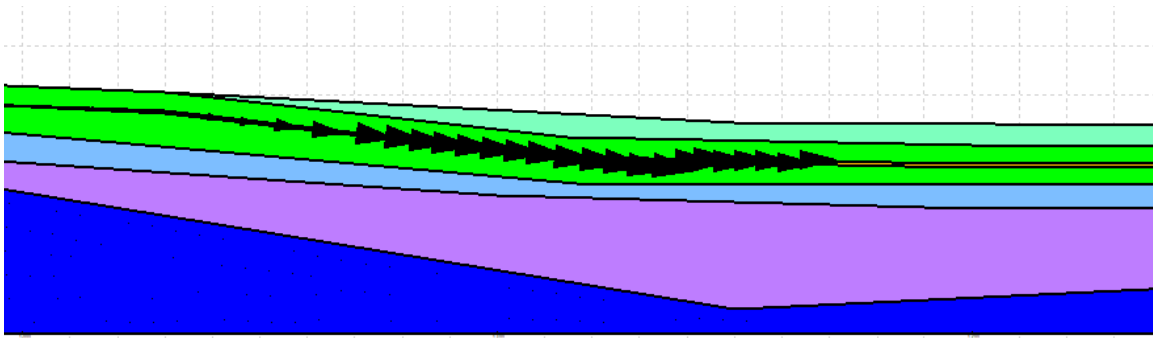
Bilaga 6: SLOPE/W modellering, kritisk glidyta, last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=0 dagar) SF=2,332



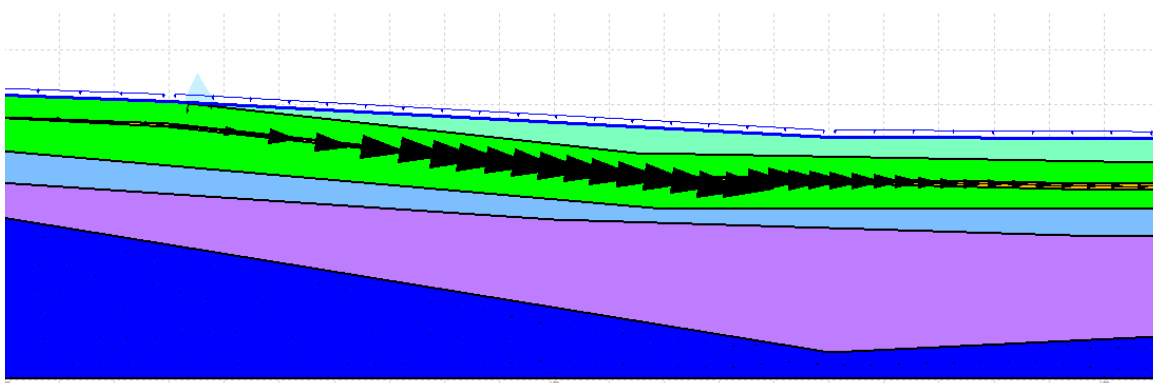
Bilaga 7: SLOPE/W modellering, kritisk glidyta vid , last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=50 dagar) SF=2,099



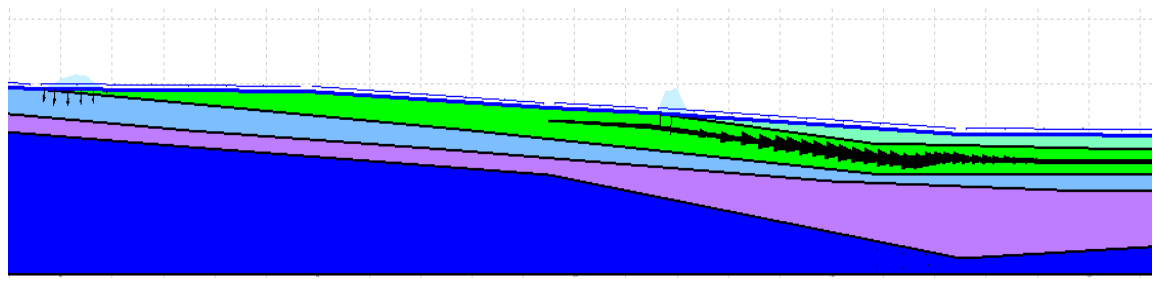
Bilaga 8: SLOPE/W modellering, kritisk glidyta vid skred, last om 15 KN/m<sup>2</sup> (tid=57 dagar) SF=0,869



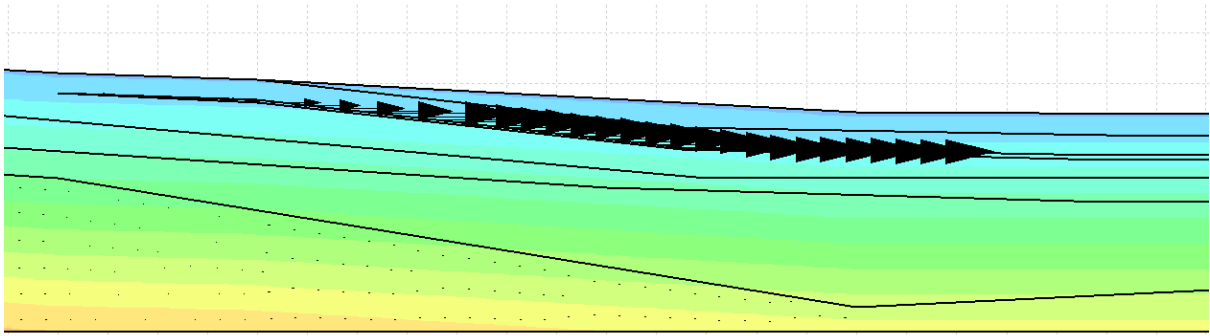
Bilaga 9: SEEP/W modellering, grundvattenflöde, last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=0 dagar)



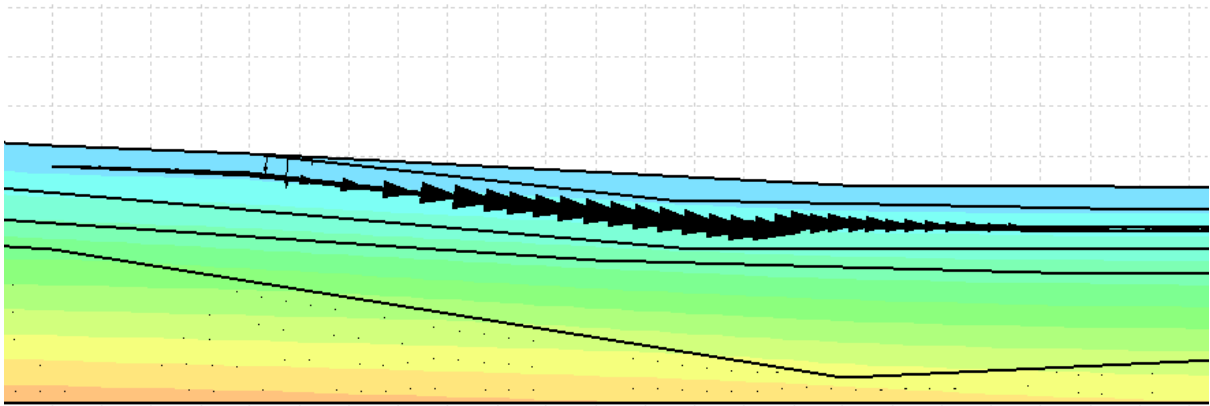
Bilaga 10: SEEP/W modellering, grundvattenflöde, last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=26 dagar)



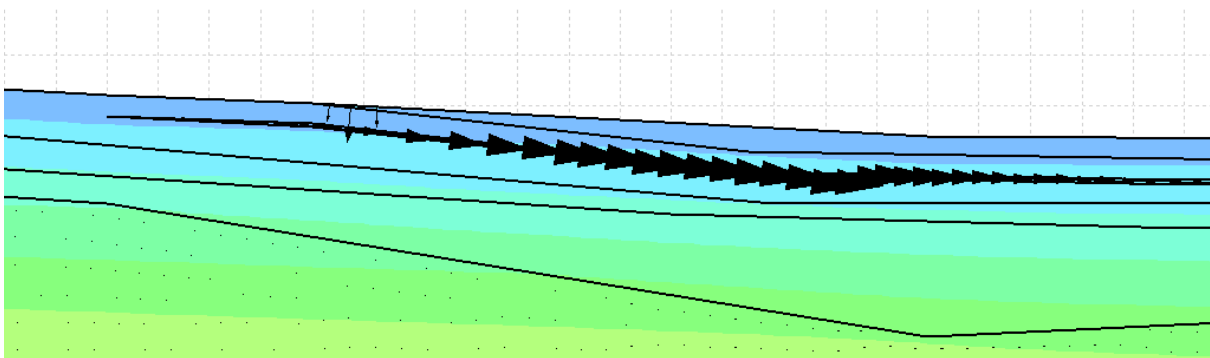
Bilaga 11: SEEP/W modellering, grundvattenflöde, last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=50 dagar)



*Bilaga 12: SEEP/W modellering, porvattentrycksfördelning, last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=0 dagar)*



*Bilaga 13: SEEP/W modellering, porvattentrycksfördelning, last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=50 dagar)*



*Bilaga 14: SEEP/W modellering, porvattentrycksfördelning, last om 15 kN/m<sup>2</sup> (tid=57 dagar)*