



CHALMERS

Klimatförändringars påverkan på släntstabilitet i Göta älvdalen

Kandidatarbete inom Bygg- och Miljöteknik (BMTX01)

PONTUS AHLSTRÖM, CIHAN CORAP, FRIDA NAGY, FILIPPA SPÅNÉR

Sammandrag

Låg släntstabilitet och risk för skred har länge varit ett problem i Göta älvdalen, däribland i området kring Lilla Edet. I framtiden förväntas problematiken att försvåras då ett förändrat klimat kan orsaka ökad nederbörd och erosion av älvbotten. Dessutom dominerar jordlagerföljden i Göta älvdalen av mäktiga lerlager som har kvicka egenskaper. Kvicklera är mycket problematisk då leran kan bidra till omfattande skred. Med detta som bakgrund har rapporten som syfte att undersöka klimatets påverkan på släntstabilitet. Framtidens klimatpåverkan undersöks genom att beräkna säkerhetsfaktorer i SLOPE/W 2016 för en vald slänt i Lilla Edet. Beräkningarna görs både för dagens och framtidens klimat, och sedan jämförs dessa med varandra. Klimatförändringarna för år 2100 beräknas med hjälp av scenarier och modeller som visar att nederbörden i Sverige kan komma att bli mer extrem. Fokus sätts därför på hur ökad nederbörd påverkar grundvattennivåerna och flöden i Göta älv, då högre flöden leder till ökad erosion och förhöjd grundvattennivå ökar de pådrivande krafterna i slänten. Dessa två faktorer bidrar till att sänka släntens stabilitet. Beräkningarna visar att släntstabiliteten redan i dagsläget är låg och att den inte ändras nämnvärt i framtiden. Däremot är osäkerheten kring resultatet stor då påverkan av klimatförändringarna är baserade på möjliga scenarier och inte definitiva fakta. Slutligen rekommenderas åtgärder, såsom avschaktning och underhåll av befintligt erosionsskydd, för att förbättra slänterna kring Lilla Edets stabilitet då säkerhetsfaktorerna redan idag är mycket låga.

Abstract

Failure of natural slopes and the landslide hazard is, and has for a long time been, a problem in the Göta River valley, including the area around Lilla Edet. The problem is expected to worsen in the future due to increasing precipitation and erosion of the riverbed as consequences of climate change. Furthermore, the soil in the area is dominated by thick layers of quick clay, a sort of clay which is prone to cause extensive landslides. The aim of this report is therefore to examine the effects of climate change on slope stability. The impact of future climate change is examined by calculating both present and future safety factor of a slope situated in Lilla Edet. These calculations are executed in the program SLOPE/W 2016. The impacts of climate change for the year 2100 is approximated with models and scenarios which shows that increased and more extreme precipitation is to be expected in Sweden. Because of this, the report's focus is limited to the increased precipitation and its effects to the groundwater levels and the water flow in the Göta River. Increased water flows cause additional erosion of the riverbed and higher levels of groundwater causes an increase of the impelling forces for the slope. Both factors contribute to lowering the safety factor. The calculations show that the chosen slope's stability is already critical, but is not expected to change considerably in the future due to climate change. The results of the calculations are somewhat uncertain because the exact impacts of climate change is based on possible scenarios and not definitive facts. Finally, the report recommends actions which can be implemented to increase the slope stability in the area.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Syfte	1
1.2 Problemformulering	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Metodöversikt.....	2
2. Teoretisk bakgrund	3
2.1 Göta älvdalens geologi.....	3
2.1.1 Berggrund	3
2.1.2 Jordlagerföljd.....	4
2.2 Kwicklera	4
2.2.1 Kwicklerans uppbyggnad	5
2.2.2 Jonsammansättning.....	6
2.2.3 Salturlakning.....	6
2.2.4 Belastningshistorians inverkan på hållfastheten.....	6
2.3 Tidigare skred.....	7
2.3.1 Surteskredet, 1950	7
2.3.2 Götaskredet, 1957.....	7
2.3.3 Tuveskredet, 1977	7
2.4 Klimatförändringar i Sverige	8
2.4.1 Begreppet klimat.....	8
2.4.2 Klimatscenarier.....	8
2.4.3 Nederbörd	10
2.4.4 Vattenflöden och nivåer i Göta älv.....	11
2.4.5 Erosion av älvens botten och slänter	12
2.4.6 Förändring av grundvattennivå.....	12
2.5 Teoretisk bakgrund för skred	13
2.5.1 Typer av skred i kohesionsjordar.....	13
2.5.2 Skredförlopp i kvicklera	14
2.5.3 Utlösningmekanismer för skred i kvicklera	14
2.5.4 Konsekvenser av framtida skred i Göta älvdalen	15
2.6 Beräkningsförutsättningar	15
2.6.1 Geologiska förutsättningar	15
2.6.2 Geometriska förutsättningar	16
2.6.3 Hydrogeologiska förutsättningar	16

2.6.4 Geomekaniska förutsättningar.....	16
2.6.5 Påverkan av yttre belastning.....	18
3. Beräkning i GeoStudio SLOPE/W - 2016	20
3.1 Beräkningsmetod för SLOPE/W - 2016.....	20
3.1.1 Analysmetoder för SLOPE/W	20
3.1.2 Definition av säkerhetsfaktor för geologiska undersökningar.....	21
3.2 Beräkningsresultat erhållet från modellering	21
3.2.1 Sammanställning av resultat.....	21
4. Diskussion och slutsats	24
4.1 Utvärdering och diskussion av resultat	24
4.2 Tankar inför framtiden	25
4.3 Slutsats	25
Referenser	26

Figurförteckning

Figur 1.1 Karta över Västsverige med en förstoring över Lilla Edet.....	2
Figur 2.1 Karta över Göta älvdalens berggrund med tillhörande teckenförklaring	3
Figur 2.2 Jordlagerföljden i genomskärning för två områden i Göta älvdalen.....	4
Figur 2.3 Figur över partikelaggregat för lera avsatt i a) sötvatten och b) saltvatten.	5
Figur 2.4 Karta över Göta älvdalen med områden för tidigare skred.	7
Figur 2.5 Schematisk bild över hur ett klimatscenario är sammansatt.	9
Figur 2.6 Schematisk bild över hur ökade växthusgaser leder till ökad nederbörd.	10
Figur 2.7 Graf över den förväntade havsnivåändringen.	11
Figur 2.8 Erosionsskydd i strandkanten av slänten i sektion 32/760.....	12
Figur 2.9 Schematisk bild över ett släntskred.	13
Figur 2.10 Schematisk bild över ett rotationsskred.	14
Figur 2.11 Övergripande figur över den aktuella slänten.	15
Figur 2.12 Mohr-Colombs ekvation	18
Figur 2.13 Erosion av älvbotten.....	18
Figur 3.1 Beskrivning av vilken skjuvhållfasthet som används för dränerad, odränerad samt kombinerad analys.	20
Figur 3.2 Säkerhetsfaktor för kombinerad analys år 2017.....	22
Figur 3.3 Säkerhetsfaktor för odränerad analys år 2017.....	22
Figur 3.4 Säkerhetsfaktor för kombinerad analys år 2100.....	23
Figur 3.5 Säkerhetsfaktor för odränerad analys år 2100.....	23

Beteckningar

γ	Tunghet	[kN/m ³]
τ_k	Ostörd skjuvhållfasthet	[kPa]
τ_r	Omrörd skjuvhållfasthet	[kPa]
S_t	Sensitivitet	[-]
c	Kohesion	[kPa]
σ_n	Normalspänning	[kPa]
θ	Inre friktionsvinkel	[°]
F	Säkerhetsfaktor	[-]
τ_f	Medelvärde på skjuvhållfasthet längs glidyta	[kPa]
τ_{mob}	Mobiliserad skjuvhållfasthet	[kPa]

1. Inledning

Göta älvdalen är den plats i Sverige som historiskt sett har varit mest utsatt för jordskred. Under 1900-talet har området utsatts för tre stora skred med dödlig utgång och även idag finns det områden kring älven i riskzonen. Ett nytt skred i Göta älvdalen kan komma att få stora konsekvenser för mänsklig säkerhet och befintlig bebyggelse. Skredmassor kan blockera älven och dess viktiga samhällsfunktioner i form av transport samt vattenförsörjning för Västsverige. Med andra ord kan ett nytt skred i Göta älvdalen medföra både fara för allmänheten och stora kostnader för samhället (SGI, 2017). Klimatförändringar är enligt majoriteten av forskare ett faktum. Jordens medeltemperatur tros öka, havsnivån förväntas att stiga och jordens väder väntas bli allt mer extremt (Naturvårdsverket, 2016). För Sveriges del innebär detta att det överlag beräknas bli varmare samt torrare under vår och sommar men att nederbörden beräknas öka jämfört med dagens nivåer under höst och vinter (WWF, 2017) Därför är det inför framtiden viktigt att undersöka om klimatet försämrar släntstabiliteten.

Skredrisken i Göta älvdalen har lett till att det sedan 1950-talet har gjorts geologiska undersökningar och kartläggningar i området huvudsakligen av statens geotekniska institut (SGI). Därför finns omfattande data från tidigare utredningar. För att blicka framåt fokuserar denna rapport på att undersöka framtida klimatförändringars påverkan på släntstabilitet. Rapporten ämnar därför att lägga vikt vid jämförelsen mellan dagens och framtidens släntstabilitet.

1.1 Syfte

Rapporten syftar till att undersöka effekterna av framtida klimatförändringar, främst med fokus på ökad och extrem nederbörd samt hur detta påverkar släntstabiliteten i Göta älvdalen. Den ämnar därför att undersöka den framtida släntstabiliteten år 2100 och jämföra denna med släntstabiliteten i dagens klimat.

1.2 Problemformulering

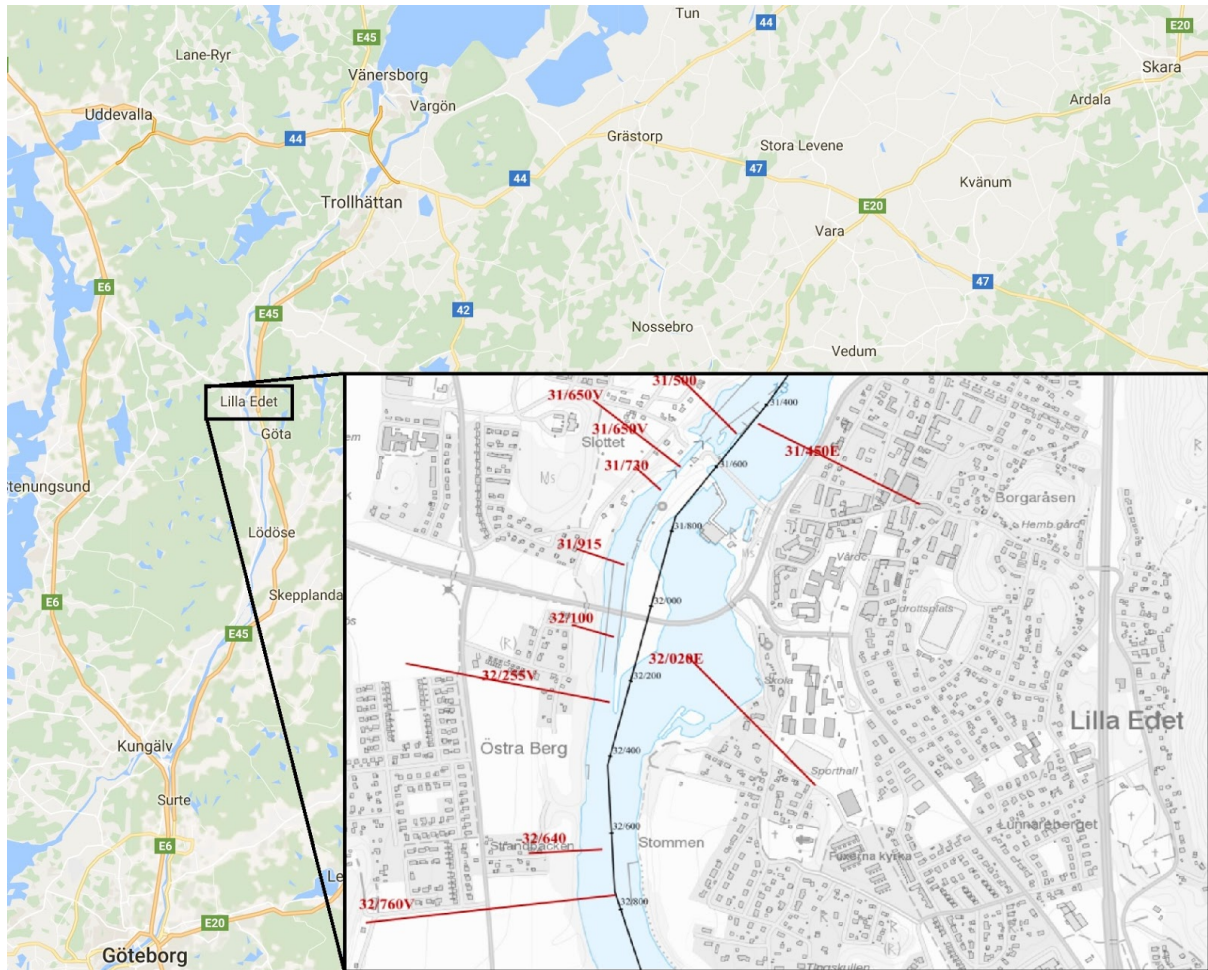
Problemet som närmare undersöks är hur släntstabiliteten i Göta älvdalen kan komma att påverkas av ett framtida förändrat klimat. Hur klimatet kommer att förändras är osäkert, då klimatet både påverkas av naturliga processer samt mänsklig inverkan. Därför undersöks olika tänkbara klimatscenarier som baseras på dessa faktorer. Vid beräkning av den framtida släntstabiliteten behandlas endast det utfall med störst påverkan på släntstabilitet.

Beräkningar genomförs i rapporten med avseende på säkerhetsfaktorer för släntstabilitet. I beräkningarna tas de förändrade förutsättningarna, vilka påverkar släntstabiliteten, med för att ta ut nya säkerhetsfaktorer. De framtida säkerhetsfaktorerna jämförs sedan med de i dagens klimat.

1.3 Avgränsningar

Rapporten avgränsas till att undersöka klimatförändringar vilka sträcker sig fram till år 2100, detta då befintlig information och data sträcker sig hit. Sedan har det största utfallet av klimatpåverkan valts ut för att studeras i beräkningarna. Vidare avgränsas rapporten till att undersöka påverkan på släntstabiliteten i form av erosion, förändrade grundvattennivåer och förändrat flöde i älven till följd av förändrad nederbörd. Detta då dessa parametrar har stor betydelse för stabiliteten. Det finns fler konsekvenser av klimatförändringar som kan påverka släntstabilitet, men dessa behandlas ej i denna rapport.

Rapporten behandlar området kring Lilla Edet vilket geografiskt sett ligger mitt i Göta älvdalen, se figur 1.1. I Lilla Edet begränsas rapporten till en slänt på västra stranden av Göta älv, som i SGI:s kartläggning benämns som sektion 32/760. Sektionen väljs då området kring slänten bedöms vara i riskzonen för ett framtida skred.



Figur 1.1 Karta över Västsverige (Google Maps, u.ä.a) med en förstoring över Lilla Edet där den valda sektionen 32/760 är markerad längst ner t.v. i förstord bild (SGI, u.ä.).

1.4 Metodöversikt

Rapporten utgörs främst av en litteraturstudie där fakta hämtas från vetenskapliga artiklar, kurslitteratur samt avhandlingar, informationsblad och rapporter från statliga institut. Stor vikt läggs vid SGI:s rapporter om släntstabilitet i området och Sveriges meteorologiska och hydrologiska instituts (SMHI) klimatscenarier. För fördjupad bakgrundkunskap görs ett studiebesök på SGI:s Göteborgskontor.

Rapporten består även av utförda beräkningar för säkerhetsfaktorer. Parametrar till beräkning av släntstabilitet erhålls med hjälp av befintlig data samt scenarion och prognoser för framtida klimat. Dessa kommer sedan att vara till grund för de beräkningar som utförs i programmet SLOPE/W 2016, för utförligare beskrivning, se kapitel 3.1.

2. Teoretisk bakgrund

För att utreda framtidens släntstabilitet behövs kunskap inom ett antal områden; geologi, släntens geometri, klimatförändringar i framtiden samt skredmekanismer och förlopp. Med kunskaper inom dessa områden kan beräkningar utföras.

2.1 Göta älvdalens geologi

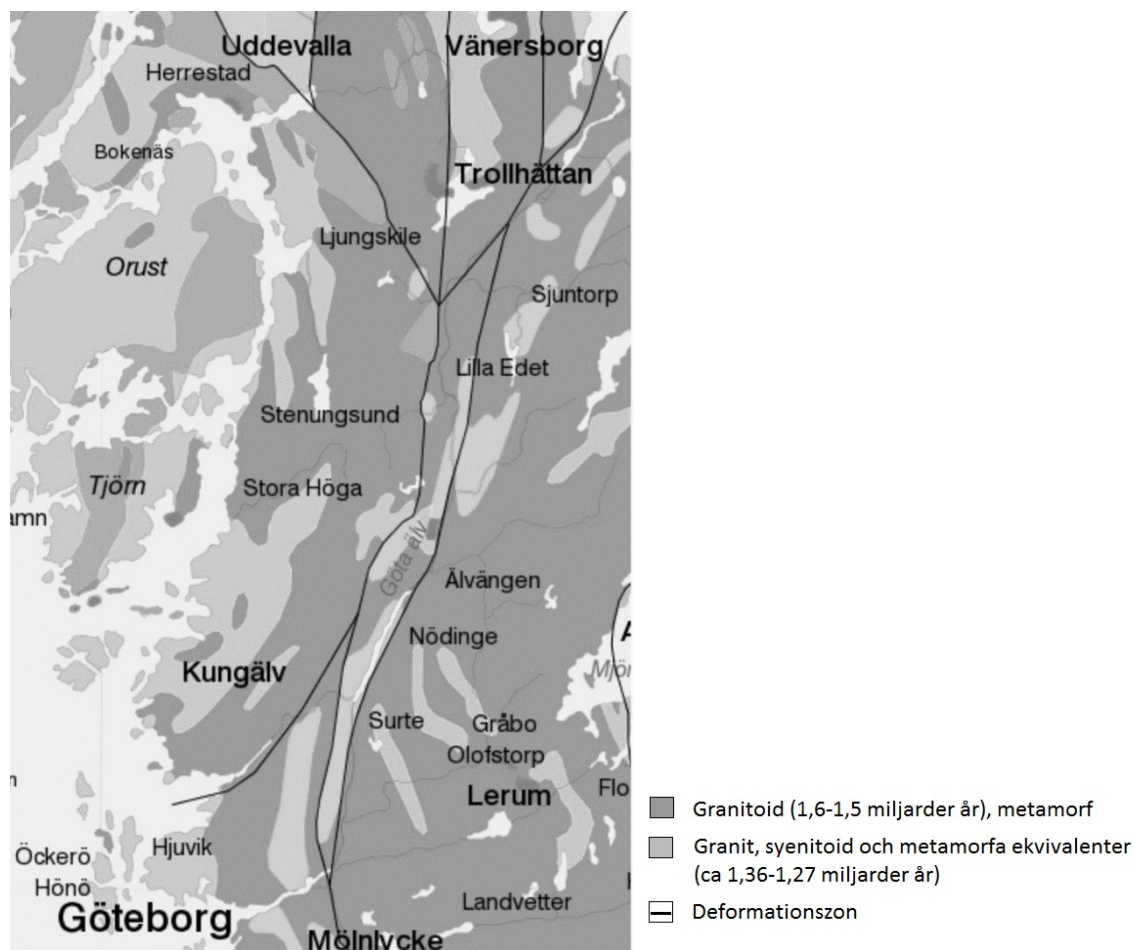
Detta kapitel undersöker hur Göta älvdalen skapades, hur de rådande geologiska förhållandena har uppkommit samt dagens jordlagerföljd.

2.1.1 Berggrund

Berggrunden i Göta älvdalen är en del av den Baltiska urbergsskölden, vilken sträcker sig över stora delar av Sverige, Norge och Finland. I området kring Göta älv består berggrunden främst av granitoida bergarter såsom granit och gnejs. Dessa bildades för omkring 1,5 – 1,6 miljarder år sedan (SGU, u.å.).

Göta älvs dalgång följer till stor del en förkastningszon, orsakad av rörelser i berggrunden, vilken sträcker sig från Vänerbäckenet i norr till Göteborg i söder, se figur 2.1.

Deformationszonen bildades genom att berget har skjuvats i sidled. Skjuvningen har i detta fall gett upphov till ett omfattande spricksystem av brantgående sprickor (SGI, 2012).



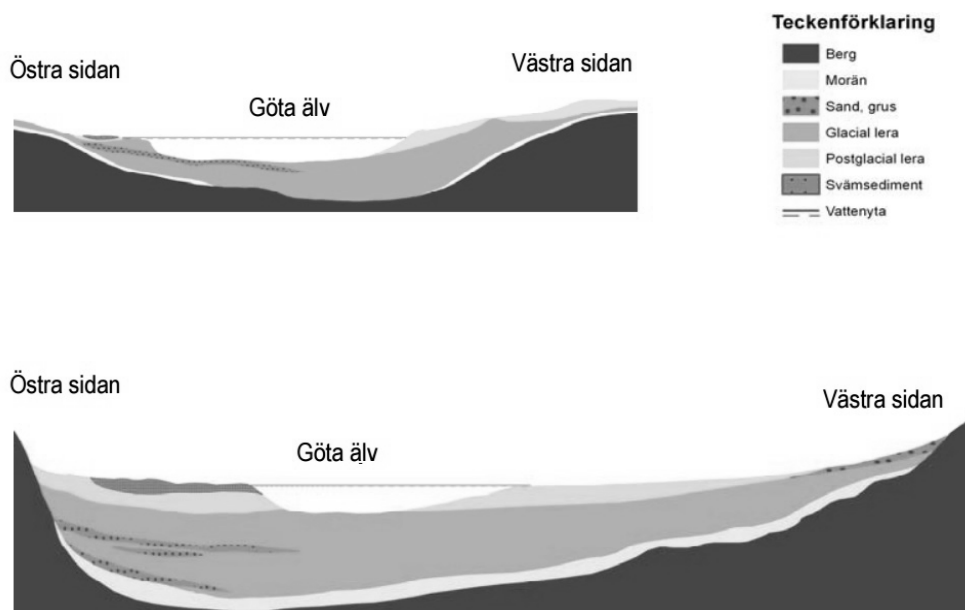
Figur 2.1 Karta över Göta älvdalens berggrund med tillhörande teckenförklaring (SGU, u.å.).

2.1.2 Jordlagerföljd

Göta älvdalens jordlagerföljd och dess historia kan dateras till den senaste istiden som varade i cirka 100 000 år. De sista resterna av inlandsisen smälte bort för omkring 10 000 år sedan, vilket markerade slutet på istiden. Den kilometertjocka isen pressade ner stora delar av Sverige med sin enorma tyngd, vilket även påverkade Göta älvdalen. Då isen smälte skedde en avlastning och en isostatisk landhöjning påbörjades, det vill säga att landmassorna långsamt började att höjas. Under tiden för isavsmältningen låg området kring Göta älv under havsytan och var därmed täckt av öppet hav. Isälvar förde med sig material ut i havet, där sedimenten sedan avsattes i en marin miljö. Dessa avsättningsförhållanden har tillsammans med isostatisk landhöjning gett leran dess speciella egenskaper, som behandlas i kapitel 2.2.

Den glaciala leran har i Göta älvdalen avsatts direkt på berggrund och i vissa fall täcker den ett tunt lager med morän eller grövre sediment såsom isälvsmaterial. Lerlagret är generellt mycket mäktigt, upp mot 100 meter. Ovanpå den glaciala leran återfinns postglaciala avsättningar som varierar över hela området i Göta älvdalen.

I norra delen av Göta älvdalen, övre sektionen i figur 2.2, är den glaciala leran exponerad i botten av älven och längs älvens sidor återfinns glacial lera men även postglaciala sediment såsom svallsediment. Den södra delen av älvdalen, nedre sektionen i figur 2.2, karaktäriseras av att älven skurit sig ner genom de postglaciala avlagringarna och exponerat den glaciala leran längs botten på älven. I den södra delen av dalen är dock de postglaciala sedimenten exponerade längs älvens sidor, till skillnad från den nordligare delen (SGI, 2012).



Figur 2.2 Jordlagerföljden i genomskärning för två områden i Göta älvdalen. Överst i figuren visas en representativ jordlagerföljd för de nordliga områdena och den undre sektionen representerar de sydligare områdena av älvdalen (SGI, 2012).

2.2 Kvikklera

För att förstå hur skred i kvikklera sker och vad som är orsaken till dessa krävs kunskap i lerans uppbyggnad. Därför beskriver detta kapitel lerans historia och varför den fått sina kvicka egenskaper. Den svenska definitionen av en kvicklera är en lera som efter störning

kollapsar och får en låg skjuvhållfasthet. Ytterligare en annan definition är att flytgränsen blir lägre än den naturliga vattenkvoten efter omrörning (Larsson, 2010).

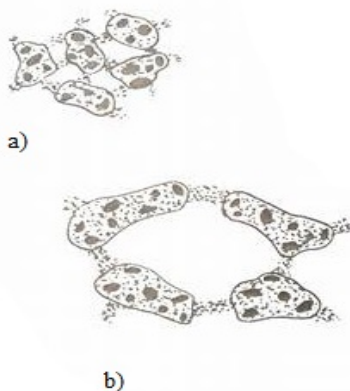
Som tidigare nämnts i avsnitt 2.1.2, förde isälvar från den senaste istiden med sig material till havet. Lerpartiklar avsattes i djupt vatten långt ifrån isen där vattnets hastighet var tillräckligt låg. Mängden avsatta partiklar samt jonkoncentrationen i vattnet påverkade vilken sorts sediment som bildades och vilken uppbyggnad dessa skulle få (Rankka, 2003). För Göta älvdalen har detta inneburit att det avsatts ett mäktigt lager med marin lera där en stor del av leran idag har kvicka egenskaper.

2.2.1 Kwicklerans uppbyggnad

Lera består av olika sorters partiklar i fast, flytande eller gasform. De fasta partiklarna bildar ett kornskelett som verkar bärande och hålrummen mellan är fyllda av gas, vätska eller bådadera. För marina leror, såsom leran i Göta älvdalen, innehöll porvattnet från början havsvatten och var därmed rikt på salter. Saltet i havsvattnet antas vara detsamma som idag och består då främst utav joner såsom natrium, klorid, kalium, magnesium och sulfater (Rankka, 2003).

Lerpartiklarna i marina leror är vanligtvis negativt laddade och attraherar därmed positiva joner såsom natrium, kalium och magnesium. Dessa joner kan då adsorberas till lerpartiklarna från både por- och havsvattnet. Därför återfinns den största delen av jonerna i leran på ytan av lerpartiklarna och inte i porvattnet efter att jämvikt nåtts (Rankka, 2003).

Leror som avsatts i havet, likt leran i Göta älvdalen, bildar ofta aggregat. Aggregaten är klumpar av lerpartiklar, sammanbundna av länkar. Dessa länkar består oftast av mindre material och aggregaten av större partiklar, se figur 2.3. Stora aggregat bildas då den höga koncentrationen av joner i havet gör att partiklarna hamnar nära varandra på grund av attraherande krafter. Lera sedimenterar utan specifik struktur eller riktning, vilket gör att små aggregat kan sedimentera i en tätare struktur än stora aggregat. De stora aggregaten, det vill säga de avsatta i vatten med hög salthalt, ger således upphov till en luftigare struktur medan de avsatta i sötvatten ger en tätare struktur. Detta gör att hålrummen mellan aggregaten blir större för saltvattenavsatta leror och därmed blir även poralet högre, vilket leder till att leran kan innehålla höga halter vatten (Rankka, 2003).



Figur 2.3 Figur över partikelaggregat för lera avsatt i a) sötvatten och b) saltvatten.

Om jonerna ur en marin lera urlakas kan inte de stora aggregaten efter omrörning återförenas. Detta leder till att lerans vattenhållande förmåga sänks och därmed sänks även flytgränsen för leran. Portalet för en marin lera är som tidigare nämnts stort och leran har följaktligen ett högt vatteninnehåll varvid den efter omrörning bildar en vattning lervälling med många små partiklar vilket drastiskt minskar lerans bärande egenskaper (Dahlin, Leroux, Löfroth, Schälin, & Suer, 2011).

2.2.2 Jonsammansättning

Jonsammansättningen i leran har betydelse för lerans sensitivitet, det vill säga kvoten mellan ostörd och omrörd odränerad skjuvhållfasthet. Hög sensitivitet leder till att leran med större sannolikhet kan utveckla kvicka egenskaper. Den största andelen av joner i en lera består främst av natriumjoner, kaliumjoner, kalciumjoner och magnesiumjoner. Högsensitiva leror har ofta en större andel av natrium- och kaliumjoner, vilka är envärda joner. Envärda joner skapar större repulsiva krafter än tvåvärda joner såsom kalcium och magnesium. Dessa repulsiva krafter förhindrar leran att åter bilda aggregat efter omrörning och ökar därmed lerans sensitivitet. Ökad sensitivitet leder till minskad hållfasthet och större risk för skred (Rankka, 2003).

2.2.3 Salturlakning

Porvattnets kemi är en avgörande faktor för om en lera skall bli kvick eller inte. Om saltet i porvattnet urlakas, det vill säga att saltet bundet till lerpartiklarna löses ut och förs bort av vatten, är risken för att leran blir kvick större (Larsson, 2010). Efter den isostatiska landhöjningen har sötvatten infiltrerat leran och lett till salturlakning. Denna salturlakning kan ge upphov till mycket hög sensitivitet i leran.

Den främsta faktorn för salturlakning är att sötvatten, i form av grundvatten och regnvatten, urlakar leran. När sötvattnet infiltrerar leran kommer det att föra med sig jonerna i porvattnet, då främst natrium och kloridjonerna. När natrium förs bort från porvattnet råder inte längre jämvikt och det natrium som förts med sötvattnet ersätts av de som tidigare varit adsorberade på lerpartiklarna. Vid fortsatt inträngande av sötvatten kommer processen med utbyte av natrium att ske tills dess att jämvikt råder mellan det infiltrerande vattnet och lerpartiklarna. När denna jämvikt för natrium uppstått kommer samma process att ske för kalium- och magnesiumjonerna tills dessa är i jämvikt. Beroende på uppbyggnad och kemisk sammansättning av leran kommer denna process till slut leda till att saltet och jonbindningarna inte längre kan bibehålla stabiliteten. Strukturen för leran blir då känslig för störningar och kallas därefter kvick (Dahlin, Leroux, Löfroth, Schälin, & Suer, 2011). Enligt Göta älvutredningen har leravlagringarna norr om Lilla Edet urlakats nästan fullständigt (Rankka, 2003).

2.2.4 Belastningshistorians inverkan på hållfastheten

Belastningshistorien och åldern på leran är faktorer som påverkar hållfastheten. Vid salturlakning försvinner de krafter som håller ihop leran. Därför kan en urlakad normalkonsoliderad lera, likt den i Göta älvdalen, inte längre hålla uppe last från ovanliggande jord eller annan vikt vilket orsakar sättningar. Dessa sättningar antas ske gradvis naturligt vilket gör att leran i samma takt konsoliderar. När detta sker ”självläker” förkonsolideringstrycket i leran och fortsätter därefter vara normalkonsoliderad. Vid urlakning sänks även flytgränsen men konsolideringen gör att strukturen blir tätare vilket leder till lägre vattenkvot. Dessa processer tar därmed ut varandra och detta leder till att hållfastheten i leran inte förändras avsevärt (Larsson, 2010).

2.3 Tidigare skred

I området kring Göta älvdalen har det skett flera skred det senaste århundradet, där jordlagerföljden och övriga förhållanden liknar de i Lilla Edet. De tre största av dessa har skett i Surte, Göta och Tuve. Skredens geografiska läge ses i figur 2.4.

2.3.1 Surteskredet, 1950

Surte ligger beläget i Göta älvdalen ungefär 15 kilometer norr om Göteborg och år 1950 inträffade det så kallade Surteskredet. Skredet var omfattande, 31 bostadshus fördes med i jordmassorna och en person miste livet. Dessutom blockerades järnvägen och delar av Göta älv av massorna, vilket hindrade både järnvägstrafiken och sjöfarten.

Vad som gav upphov till skredet har inte utretts fullständigt, men kvicklera har återfunnits i skredområdet (Ottosson & Sandberg, 1994).

2.3.2 Götaskredet, 1957

I Göta, 3 kilometer söder om Lilla Edet, skedde det år 1957 det hittills största skredet i modern tid i Sverige. Skredet förde med sig, förutom stora lermassor, delar av en fabrik, kajer och lyftkranar. Skredområdet omfattade 37 hektar och stora ler- och jordmassor rasade ner i älven, vilket medförde stopp i fartygstrafiken under en månads tid och krävde stora muddringsarbeten.

Orsakerna bakom skredet är många, för det första hade kemikalier från fabriken läckt ut och förorenat grundvattnet. Dessa kemikalier hade förändrat lerans geotekniska egenskaper, vilket bland annat minskade lerans skjuvhållfasthet. För det andra var leran i skredområdet kvick på ett flertal platser. Slutligen påverkade även den pågående erosionen av Göta älvs botten släntstabiliteten. Kombinationen av dessa tre faktorer gav förutsättningar för det omfattande skredet (MSB, 2012).

2.3.3 Tuveskredet, 1977

Tuve drabbades år 1977 av ett skred som förde med sig ett flertal fastigheter och bostadshus vilket resulterade i att nio människor omkom. Tuve ligger inte i Göta älvdalen, utan rakt norr



Figur 2.4 Karta över Göta älvdalen med områden för tidigare skred, Surte, Göta och Tuve, inringade samt Lilla Edet som referens (Google Maps, u.å. b)).

om Göteborg, men de geologiska förhållandena är liknande. Jordlagerföljden i Tuve domineras, precis som i Göta älvdalen, av mäktiga lager lera avsatt i samma marina miljö.

Orsaker och utlösande faktorer har länge diskuterats. Genom geotekniska undersökningar och analyser har dessa faktorer kunnat identifieras. Leran i skredområdet var urlakad, vilket medförde en hållfasthetsänkning i leran. Ytterligare en faktor som bidrog var det höga porvattentrycket som uppstått på grund av långvarigt regn (Hartlén, 1984). Slutligen påverkades släntstabiliteten också av exploatering i området (NE, u.å.).

2.4 Klimatförändringar i Sverige

Detta kapitel behandlar innebörden av begreppet klimat samt hur klimatet i Sverige kan komma att förändras. Förklaringar ges på hur klimatscenarier, strålningsdrivningsscenarier samt klimatmodeller förhåller sig till varandra samt vilka faktorer som är nödvändiga att beakta. Syftet med detta kapitel är att ge en överblick på hur klimatet kan komma att förändras i framtiden vid olika stor mänsklig påverkan.

2.4.1 Begreppet klimat

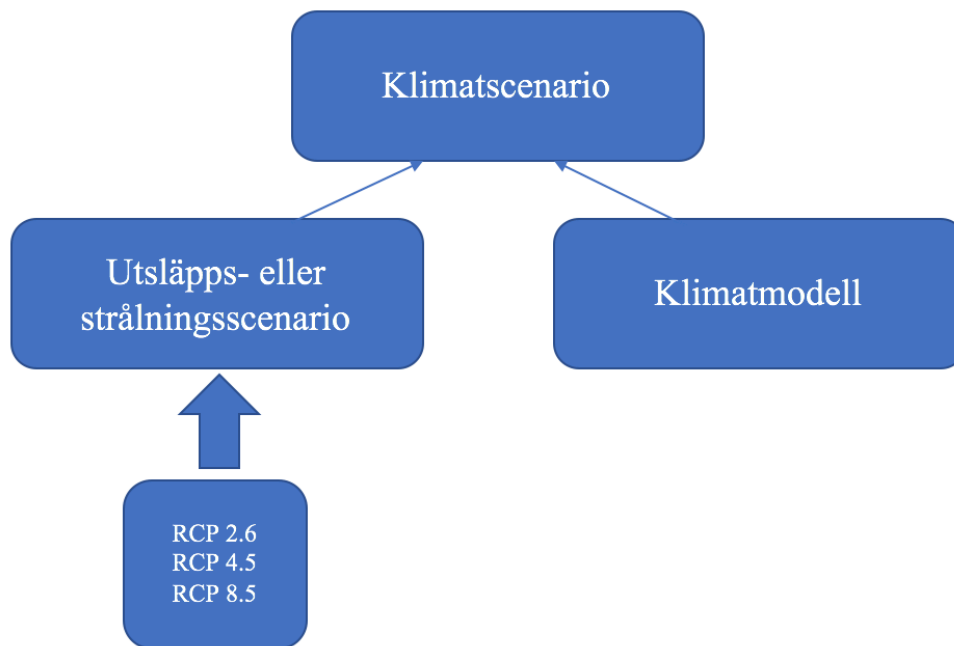
SMHI definierar begreppet klimat som hur vädret varierar över ett visst geografiskt läge och över ett specificerat tidsintervall. Begreppet väder i sig är en sammansättning av olika parametrar som till exempel temperatur, nederbörd och vind. Genom att studera de olika väderparametrarna för ett specifikt geografiskt område under en längre tidsperiod sammanställs klimatet för området (SMHI, 2015).

2.4.2 Klimatscenarier

Ett klimatscenario definieras som en potentiell utveckling av det framtida klimatet (SMHI, 2017). Klimatscenarier används för att bedöma framtida konsekvenser av klimatförändringen samt hur allvarliga dessa kan bli. Genom att sammanställa data från utsläpps- eller strålningsdrivningsscenarier och sätta in dessa i olika klimatmodeller ges ett klimatscenario.

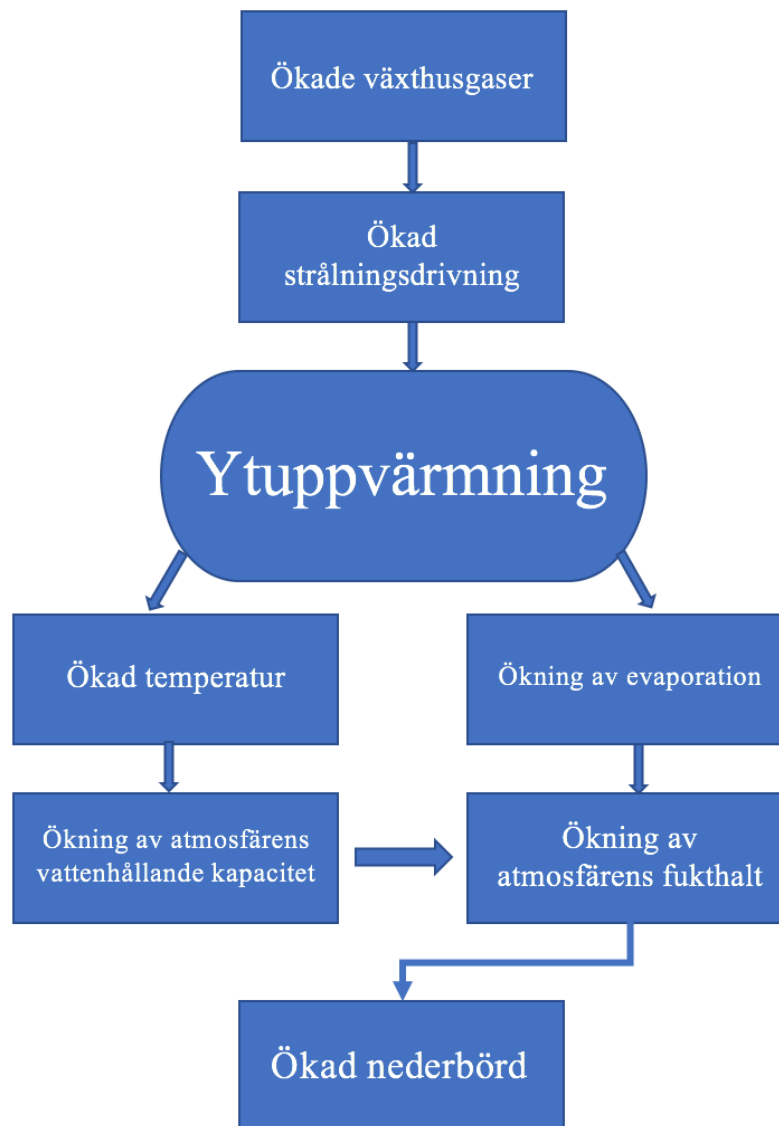
Ett strålningsdrivningsscenario beskriver hur strålningsdrivningen per kvadratmeter (W/m^2) påverkas av ökade utsläpp av växthusgaser. Därmed konkretiserar scenariot hur olika halter av växthusgaser i atmosfären påverkar klimatet (Moss & al., 2010). En form av strålningsdrivningsscenario är RCP, vilket står för Representative Concentration Pathways. De olika RCP-scenarierna behandlar olika utsläppstrender och ger ett värde på den ökade strålningsdrivningen. Scenarion som undersöks i denna rapport är RCP2.6, RCP4.5 samt RCP8.5. Värdena på RCP står för ökningen av strålningsdrivning, exempelvis ökar strålningsdrivningen för RCP8.5 med $8,5 W/m^2$. Valet av RCP2.6, RCP4.5 och RCP8.5 beror på att RCP2.6 motsvarar ambitionerna framtagna i klimatavtalet i Paris medan RCP4.5 räknar med att växthusgasutsläppen kulminerar omkring år 2040 för att sedan minska. RCP8.5 ligger nära de idag uppmätta trenderna i koldioxidutsläpp om inga åtgärder vidtas och utsläppen fortsätter att öka i samma takt som de gör just nu (SMHI, u.å.).

En klimatmodell är, uttryckt i matematiska termer, en förenklad tredimensionell beskrivning av atmosfären. Ur atmosfärens rörelser och bevarande av massa, vatten och energi, kan med hjälp av de matematiska formlerna, klimatologiska variabler såsom vind, nederbörd och temperatur beräknas (SMHI, 2014). Data från strålningsdrivningsscenarierna används i en klimatmodell för att erhålla framtidens klimatologiska variabler och parametrar, det vill säga ett klimatscenario, enligt figur 2.5.



Figur 2.5 Schematisk bild över hur ett klimatscenario är sammansatt.

En ökning av strålningsdrivning leder till en förhöjning av jordens medeltemperatur, vilket kan få flera konsekvenser. En konsekvens av en höjd temperatur är att evaporationen från jordens yta ökar, vilket i sin tur ökar atmosfärens fukthalt. Den högre temperaturen leder även till att luftens vattenhållande förmåga höjs, det vill säga att fukthalten i atmosfären ökar ytterligare. Dessa två faktorer leder till att en större och mer extrem nederbörd kan förväntas för vissa platser på jorden (Trenberth, 1998), se figur 2.6. Vid beräkning av denna förändrade nederbörd används data från det valda strålningsdrivningsscenarioet i en klimatmodell, därmed har ett klimatscenario erhållits.



Figur 2.6 Schematisk bild över hur ökade växthusgaser i atmosfären leder till ökad nederbörd.

För att undersöka hur släntstabiliteten kan påverkas av klimatförändringen är det intressant att undersöka följande konsekvenser av den ökade nederbörden;

- Ökade vattenflöden
- Ökad erosion
- Förhöjda grundvattennivåer

2.4.3 Nederbörd

Ökad nederbörd till följd av klimatförändringar väntas i Göta älvdalen, där den totala nederbörden sett över hela året väntas att öka. Klimatförändringarna innebär vidare en minskning av nederbörd under vår- och sommarmånaderna men en ökning av nederbörd med cirka 30 % år 2100 under höst- och vintermånaderna (Blid & Persson, 2011).

SMHI har sammanställt data för de olika klimatscenarierna, beroende på vilket strålningsdrivningsscenario som använts. Denna data är uppdelad för varje år fram till år 2100 (SMHI, u.å.). För att undvika årsavvikelser tas ett medelvärde av de tio sista åren fram för den undersökta perioden. Från beräkningar för tidsperioden väntas den extrema dygnsnederbörden

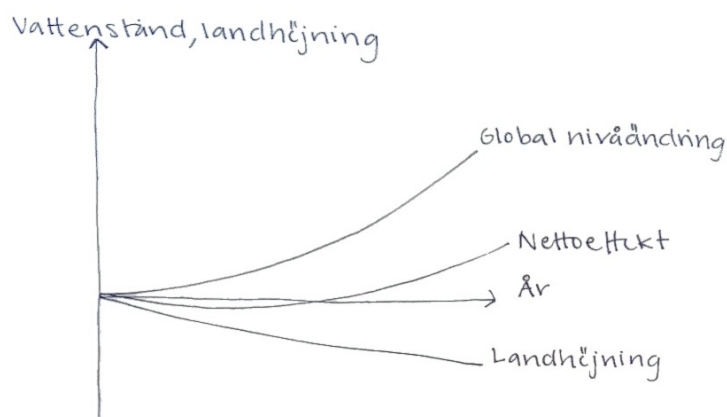
att öka mellan 6 - 26%, beroende på vilket klimatscenario som används, se tabell 1 i bilagor för beräkningar.

Ytterligare en parameter att undersöka är hur den största nederbörden under en sjudagarsperiod kan komma att vara förändrad år 2100. Som tidigare nämnts kan ihållande regn påverka släntstabiliteten, exempelvis i Tuve år 1977 tros detta ha varit en utlösande faktor. Ökningen av det största sjudagarsregnet kan enligt beräkningarna hamna mellan 4 - 19 % jämfört med dagens beroende på vilket klimatscenario som används, se tabell 2 i bilagor för beräkningar.

2.4.4 Vattenflöden och nivåer i Göta älv

Vattenflöden och nivåer i Göta älv beror både av mängden nederbörd i avrinningsområdet samt tappningen av Vänern. Det finns ett antal vattenkraftverk i Göta älv, bland annat i Trollhättan, som är beroende av flödet i älven för att producera elektricitet. Tappningen regleras därför av kraftverken vilka i sin tur måste ta hänsyn till gränsvärden för vattenståndet i Vänern. Gränsvärdena finns till för att skydda området runt Vänern från översvämning vid höga nivåer samt för att tillgodose kraven på lägsta vattennivå i Göta älv med hänsyn till fartygstrafiken (Storkull & et al, 2006). Dessa gränsvärden varierar över årtiderna på grund av den naturliga variationen av nederbörd. Nedströms Vänern, vid Lilla Edet, kommer flödet i älven vid kraftig nederbörd därför att bero av både ökat flöde från maximal tappning samt ökad tillrinning från Göta älvs avrinningsområde. Maxgränsen för tappningen från Vänern väntas inte att ändras eftersom denna är satt för att undvika förhöjd erosion i älven. Detta gör att nivåerna i älven inte väntas öka nämnvärt då tappningen utgör det huvudsakliga flödet (Rydell, Persson, & Biled, 2012).

På grund av väntade höjda havsnivåer kan vattenståndet i älven, nedanför Lilla Edet, år 2100 att vara starkt påverkat av vattenståndet i havet. Detta eftersom vattennivån nedströms Lilla Edet ligger som högst drygt 2 meter över havet. Havsnivåerna väntas vidare att höjas med cirka 1 m fram till år 2100 till följd av klimatförändringarna, men på grund av den isostatiska landhöjningen kommer havsnivån att istället höjas med cirka 0,7 m över dagens nivåer i Västra Götaland, se figur 2.7 (Rydell, Persson, & Biled, 2012).



Figur 2.7 Graf över den förväntade havsnivåändringen samt den isostatiska landhöjningen. Den sammanslagna effekten av dessa visas som nettoeffekt, i detta fall 0,7 m.

Flödet och vattennivån i älven är främst beroende av mängden vatten tappat från Vänern och inte det oreglerade tillflödet från avrinningsområdet nedströms Vänerns utlopp. Regleringen av Vänern styrs av gränsvärdena för vattennivån i sjön och vattenflöden i älven. Således kan klimatpåverkan på älven och dess flöden att kontrolleras, vilket minskar effekten

av klimatförändringarna på flödet och nivåerna i älven (SGI, 2012). Däremot kan längre perioder med både låga och höga flöden väntas i framtiden då nederbörden förväntas vara mer årstidsberoende (Rydell, Persson, & Biled, 2012). Sammanfattningsvis kan varken ett högre maxflöde eller lägre minsta flöde i älven väntas i framtiden vilket gör att vattennivåerna i älven överlag inte ändras.

2.4.5 Erosion av älvens botten och slänter

Tappningen av Väneren kommer i framtiden att vara mer växlande med längre perioder under vintern med höga flöden och längre perioder under sommaren med lägre flöden. Flödet i älven leder till naturlig erodering av älvfåran. Förutom den naturliga eroderingen kommer vattnets svallvågor och omrörning av bottenmaterial från båttrafiken leda till ytterligare erodering. Periodvis kan mycket höga flöden uppkomma i älven på grund av ihållande regn och ökad nederbörd, framför allt under höst och vinter. Detta kan leda till erodering av material i slänterna längs älven även ovanför befintliga erosionsskydd (SGI, 2012). Denna risk bedöms att vara låg då det för den aktuella slänten finns tillräckligt erosionsskydd, se figur 2.8 och denna potentiella erodering bortses därför ifrån i denna rapport.



Figur 2.8 Erosionsskydd i strandkanten av slänten i sektion 32/760 (Bild tagen av författarna).

I beräkningar på släntstabilitet i sektion 32/760 kommer mängden eroderat material att behandlas. På grund av släntens geometri och det faktum att det finns erosionsskydd i strandkanten beräknas endast en erodering av botten i älven att ske (Rydell, Persson, & Biled, 2012). Storleken på erosionen påverkas av flödet i älven. I slänten nedanför fallen i Lilla Edet beräknas eroderingen av material år 2100 vara cirka 1 m om flödena är oförändrade och 2 m om flödena ökar till följd av klimatförändringar (Blied & Rydell, 2012). I de beräkningar vilka behandlas i denna rapport används därför en erodering på 2 meter.

2.4.6 Förändring av grundvattennivå

Mer extremt väder och ökad nederbörd under vintermånaderna till följd av den ökade strålningsdrivningen påverkar bildningen av grundvatten. För grundvattennivån i området kring Göta älv innebär detta att det under sommaren kommer falla mindre nederbörd och dessutom avdunsta mer vatten från marken. Detta väntas minska grundvattennivåerna under sommarmånaderna. Trots ökning av medeltemperaturen under vintermånaderna väntas den ökade mängden nederbörd att överstiga den ökade evaporationen. Under vintern innebär detta att den framtida ökade nederbörden höjer högsta grundvattennivån över dagens högsta nivåer. Resultatet av klimatförändringarna väntas bli att variationerna mellan de högsta och lägsta

grundvattennivåerna över ett år i framtiden kan bli mellan 1,5–3,5 m. Idag är variationsbredden 1–2,5 m därmed ökar intervallet med 0,5 m till år 2100. De rådande geologiska förhållandena i Göta älvdalen samt den ökade nederbörden vintertid leder till att högsta grundvattennivån beräknas att höjas med cirka 0,3 m (Blied & Persson, 2011).

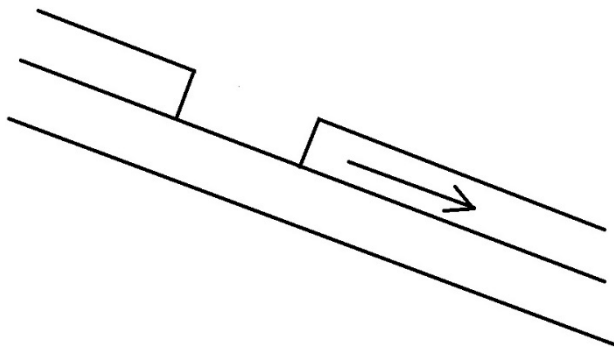
2.5 Teoretisk bakgrund för skred

Massrörelse är en process när material som jord, snö eller berg transporteras nedför en slänt. Rörelsen uppstår när gravitationskrafterna eller andra pådrivande krafter orsakade av lastförändringar blir större än kohesions- och friktionskrafterna som håller massorna på plats. De vanligaste typerna av massrörelser i Sverige är ras, skred samt slamströmmar. För kohesionsjordar, såsom leran i Göta älvdalen, är skred den vanligast förekommande massrörelsen. När ett skred utlöses transporteras en sammanhängande massa material nedför en sluttning vilken kan ha låg lutning men ändå ha för låga kohesions- och friktionskrafter för att hålla massorna på plats (Bell, 1999).

Stabiliteten för en slänt beror på de mothållande och pådrivande krafterna. När de pådrivande krafterna är större än mothållande krafterna går systemet ur jämvikt och ett skred utlöses. Det är sällan endast en variabel som utlöser skred utan är oftast en kombination av flera variabler. Variablerna kallas utlösningmekanismer (Bell, 1999).

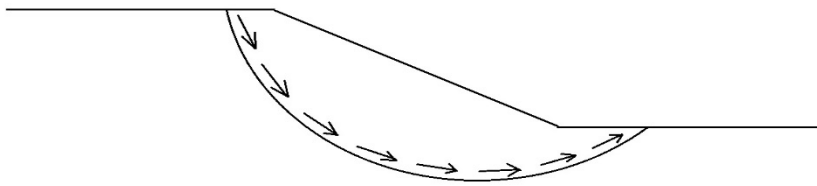
2.5.1 Typer av skred i kohesionsjordar

Skred kan förekomma på två olika sätt, rotationsskred eller släntskred. De två typerna av skred kan båda förekomma i kohesionsjordar. Släntskred sker som en plan glidyta då jordlagrets mäktighet är liten i jämförelse med släntens utsträckning (IVA Skredkommissionen, 1995). Fysikaliska olikheter separerar material med olika egenskaper och glidytor uppstår parallellt med markytan. Dessa kan sedan glida iväg som ett eller flera sammanhängande flak, se figur 2.9 (Torrance, 2012).



Figur 2.9 Schematisk bild över ett släntskred, där översta jordlagret separerar från övriga lager och en plan glidyta skapas.

Rotationsskred innebär att materialet transporteras nedåt genom roterande rörelser utefter en cirkulär-cylindrisk glidyta (NE, 2017). Förutsättningar för att skredet ska ske är att lerlagret är beläget i hela slänten, se figur 2.10. Om lermaterialet från ett rotationsskred har kvicka egenskaper bildas en flytande massa då strukturen i leran kollapsar. Dessa flytande skred kan transportera material upp till flera kilometer (Demers, Leroueuill, J-S, Locat., & Locat, 2014).



Figur 2.10 Schematisk bild över ett rotationsskred. I det mäktiga lerlagret skapas en cirkulär-cylindrisk glidyta.

2.5.2 Skredförlopp i kvicklera

I Sverige sker majoriteten av skred i kvicklera som rotationsskred, där de stegvis sprider sig i flera riktningar samtidigt (Torrance, 2012). Dessa skred sker oftast genom att delar av slänten först långsamt successivt glider ut (Hartlén, 1984). För slänter med kvicklera följs detta av att ett initialscred sedan sker. Initialskredet skapar nya förutsättningar för släntens lutning, höjd och hållfasthet. Beroende på dessa förändringar samt lerans sensitivitet kan sekundärscred snabbt spridas bakåt i olika omfattning. Skredens utsträckning är beroende av lerans sensitivitet och lutningen på slänten (Ramböll, 2013). De sekundära skreden upphör först när massorna från initialscredet och sekundärskreden bildar en tryckbank (Hartlén, 1984). Tryckbanken verkar som en mothållande kraft och stabiliserar därmed slänten.

2.5.3 Utlösningmekanismer för skred i kvicklera

Skred i kvicklera är svåra att förutse och sker ofta oväntat. Utlösande mekanismer för ett sådant skred är erosion, förändringar i grundvattenytans nivå och vattenstånd i närliggande vattendrag, vibrationer samt ändringar i lastförutsättningar (Demers, Leroueil, J-S, Locat., & Locat, 2014). Vibrationer och lastförändringar sker främst på grund av mänsklig påverkan medan erosion och förändringar i vattennivåer kan vara sammankopplade med klimatförändringar eller ske naturligt. Då rapporten fokuserar på klimatförändringar kommer inte den mänskliga påverkan tas i beaktning. De geologiska förutsättningarna för ett potentiellt skred är att topografien i slänten är gynnsam samt att leran har förutsättningar för att bli kvick (IVA Skredkommissionen, 1995).

Om en slänt är belägen nära ett vattendrag minskar stabiliteten på grund av erosion, då erosion minskar de mothållande krafterna för slänten. Dessutom ökar släntlutningen vilket påverkar släntstabiliteten negativt (Hartlén, 1984). I Göta älvdalen pågår en kontinuerlig erosion vilket förr eller senare kommer att leda till skred (IVA Skredkommissionen, 1995).

Släntstabiliteten intill vattendrag försämras vid extrema lågvattenstånd. Slänterna blir särskilt utsatta om vattenståndssänkningen sker snabbt. Vattnet fungerar som en mothållande kraft och vid en sänkning störs systemet och jämvikten rubbas (Hartlén, 1984).

En annan utlösande faktor är kraftig nederbörd och snösmältning. Vatten infiltrerar leran och bidrar till ett ökat portryck samt fyller eventuella sprickor i leran. Detta leder till att grundvattenytan höjs, lerans vattenmättnadsgrad ökar och att torrskorpans densitet ökar. Den ökade densiteten leder till en ökad vikt för torrskorpan vilket verkar som en last på slänten. Detta kan sätta systemet ur jämvikt och på så sätt utlösa ett skred (Hartlén, 1984).

2.5.4 Konsekvenser av framtida skred i Göta älvdalen

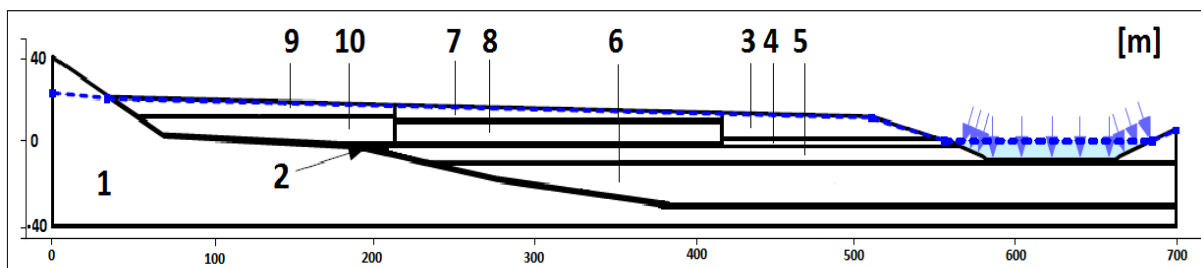
Ett omfattande skred i Göta älvdalen kan i framtiden få förödande konsekvenser för samhällen både upp- och nedströms som visas av de tidigare skreden i området. Vid ett skred frigörs stora jord- och lermassor och dessa skredmassor kan blockera älven samt hindra transporter. Skredmassorna kan även innehålla föroreningar från tidigare industriverksamhet. Dessa föroreningar kan då förorena Göta älv, vilket skulle skapa stora problem med dricksvattnet för kommuner nedströms, där Göta älv är den huvudsakliga dricksvattenkällan. Slutligen kan ett skred orsaka en flodvåg då massorna når älven. Flodvågen kan orsaka översvämning samt skada dammar och annan bebyggelse i närheten. Sammantaget kan ett skred ge upphov till stora samhällskostnader (Pedersen, 2017).

2.6 Beräkningsförutsättningar

För att beräkna släntstabiliteten behövs information om geologiska, geometriska, hydrogeologiska, geomekaniska faktorer samt yttre belastning (Berggren, Alén, Bengtsson, & Falemo, 2011). Dessa förutsättningar utvärderas var för sig, utifrån eventuell klimatpåverkan.

2.6.1 Geologiska förutsättningar

De geologiska parametrarna är jordlager, jordlagers storlek och tunghet. Slänten består som beskrivet i avsnitt 2.1.2 främst utav lera beläget på friktionsmaterial vilket i sin tur är beläget på berg. Leran i slänten har varierande egenskaper och har därför delats upp i åtta olika leror, se figur 2.11 med tillhörande tabell 2.1. För ytterligare materialegenskaper se tabell 3 i bilagor. Enligt H. Pedersen (Pedersen, 2017) beräknas jordlagerföljden i framtiden vara detsamma som idag då jordlagerföljden och jordlagrens storlek inte beräknas att ändras med förändrat klimat. Tungheten för jordlagren kommer i framtiden ha samma värden som idag då detta är materialspecifika och påverkas ej av ett förändrat klimat.



Figur 2.11 Övergripande figur över den aktuella slänten med utmarkerade jordarter samt teckenförklaring i tabell 2.1.

Tabell 1 Teckenförklaring till figur 2.11, med jordlager samt dess tungheter.

Nummer	Typ av jordart	Tunghet γ [kN/m ³]
1	Berggrund	-
2	Friktionsmaterial	22
3	Lera 1	16,4
4	Lera 2	16,2
5	Lera 3	16,2
6	Lera 4	16,8
7	Lera 5	15
8	Lera 6	15
9	Lera 7	15
10	Lera 8	15,8
-----	Grundvattennivå	-

2.6.2 Geometriska förutsättningar

De geometriska parametrarna är nivå för släntkrön och nivå för släntfot. Släntkrönet beräknas vara detsamma i framtiden då klimatet ej beräknas att påverka denna. Nivån för släntfoten kan dock komma att ändras till följd av erosion i vattendraget. För mer ingående detaljer om erosion, se avsnitt 2.6.5.

2.6.3 Hydrogeologiska förutsättningar

De hydrogeologiska parametrarna är portryck och vattenstånd i älven. En effekt av kraftig intensiv nederbörd är att portrycket ökar i de ytligaste jordlagren men detta påverkar ej de djupare lagren i större utsträckning (Blid, 2011). Det högsta portrycket väntas i framtiden att uppmätas under de regnrika månaderna då grundvattennivån stiger. Denna grundvattennivå beräknas att vara höjd med 0,3 m över dagens högsta nivåer, se avsnitt 2.4.6. Vattenståndet i älven beror främst på regleringen av älven och väntas därför ej förändras betydligt i framtiden trots ökad nederbörd.

2.6.4 Geomekaniska förutsättningar

De geomekaniska parametrarna är sensitivitet, odränerad och dränerad skjuvhållfasthet som beror av kohesionen, överlagringstrycket, portrycket och den inre friktionsvinkeln.

Sensitivitet (S_t) beskrivs som kvoten mellan ostörd (τ_k) och omrörd (τ_r) skjuvhållfasthet, enligt nedanstående ekvation 1.

$$S_t = \frac{\tau_k}{\tau_r} \quad (1)$$

Leran klassificeras sedan enligt tabell 2.2 beroende på erhållet värde av sensitivitet. Kvikclera definieras som en lera med ett högre värde på sensitivitet än 50 samt att den har en omrörd skjuvhållfasthet lägre än 0,4 kPa (Rankka, 2003).

Tabell 2.2 Indelning av sensitivitet för lera.

Benämning	Sensitivitet
Lågsensitiv	< 8
Mellansensitiv	8 - 30
Högsensitiv	> 30
Kvikclera	> 50

Undersökningar visar att stora delar av leran i området är högsensitiv med värden mellan 40 och 131 (Ramböll, 2013). Detta gör att hela området klassas som kvickt och leran kommer även i framtiden ha samma sensitivitet då urlakningen anses vara fullbordad.

Skjuvhållfastheten i lera beror på kontaktrycket mellan lerpartiklarna. Det totala trycket beror av ovanliggande laster samt hur dessa fördelas i materialet. För en vattenmättad jord tas, förutom trycket mellan partiklarna, även en del av detta tryck upp av vattentrycket. En förändring av tryck kan leda till en plötslig spänningsförändring och att porvattentrycket i jorden förändras. Precis efter en lastförändring beskrivs tillståndet som odränerat då strömningen av vatten för att uppnå tryckjämvikt inte har hunnit komma igång. När jämvikt uppnåtts beskrivs tillståndet istället som dränerat. Grovkorniga jordar har hög genomsläpplighet och jämvikten uppstår därför snabbt medan finkorniga jordar som lera är täta och jämvikt uppstår först efter en lång tid (SGI, 2007). Därför beräknas skjuvhållfastheten för slänter som odränerade eller dränerade, beroende på vilket material den innehåller. Grovkorniga jordarter räknas som dränerade och finkorniga som odränerade. Ekvationen för dränerad respektive odränerad skiljer sig åt. För att beskriva skjuvhållfastheten används Mohr-Coulombs ekvation 2:

$$\tau = c + \sigma_n * \tan\theta \quad (2)$$

Där:

τ = skjuvhållfasthet

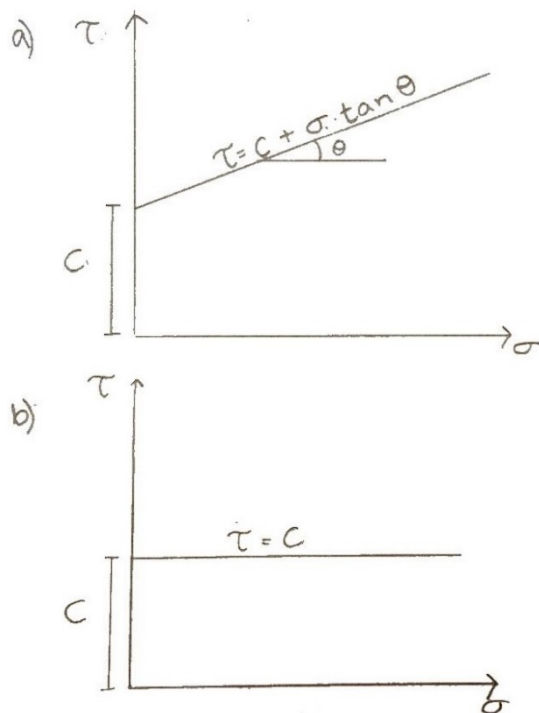
c = kohesion

σ_n = normalspänning

θ = vinkel för inre friktion

Denna ekvation motsvarar en rät linje med skjuvspänning på ena axeln och effektiv normalspänning på den andra, se figur 2.12 a. Lutningen på linjen motsvarar vinkeln för den interna friktionen mellan partiklarna och där linjen korsar skjuvhållfastheten motsvarar värdet för kohesionen (Sällfors, 2013).

För odränerade förhållanden är vinkeln för den interna friktionen noll, och därmed får linjen ingen lutning. Skjuvhållfastheten för jorden beskrivs därför med värdet för kohesionen, c, som antas vara konstant, se figur 2.12 b.



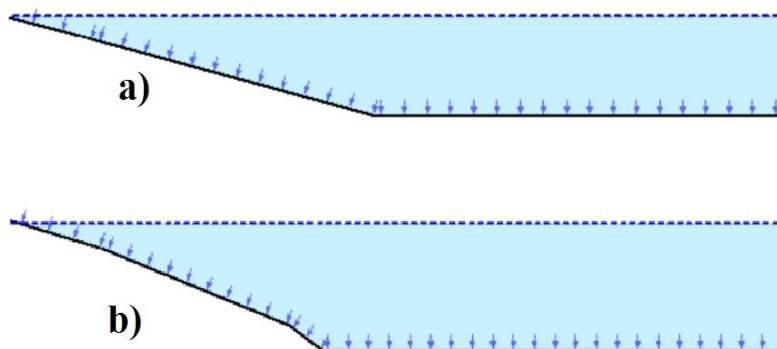
Figur 2.12 Mohr-Colombs ekvation där a) beskriver dränerad skjuvhållfasthet och b) beskriver odränerad skjuvhållfasthet.

Alla de geomekaniska parametrarna, förutom portrycket, anses vara detsamma år 2100. Portrycket väntas öka då trycket i de övre jordlagren kommer att öka till följd av en höjd grundvattennivå. De övriga parametrarna anses vara oförändrade då de är materialspecifika. För de geomekaniska parametrarnas värden i de olika lagren, se tabell 3 i bilagor.

2.6.5 Påverkan av yttre belastning

De yttre belastningarna innefattar ständig och dynamisk last på markytan, erosion i älven och erosion i slänten ovan älvens vattenyta.

Som tidigare nämnts beräknas ingen större erosion av slänten ske ovan älvens vattenyta då erosionsskyddet i strandkanten bedöms vara tillräckligt och underhåll förutsätts i framtiden (Pedersen, 2017). Botten av älven strax nedanför Lilla Edet väntas erodera cirka 2 m då flödena ökar till följd av klimatförändringar. I beräkningarna av släntstabiliteten antas därför 2 m att erodera från älvbotten enligt figur 2.13.



Figur 2.13 Erosion av älvbotten, där a) är hur sektion 32/760 förenklat ser ut i dagläget och b) visar antagandet för sektionen år 2100 då erosion verkat på botten.

I beräkningarna har ingen hänsyn tagits till framtida bebyggelse eller andra yttre laster på slänten. Hus är belägna i närheten av den valda sektionen men då framtida bebyggelse är svårt att förutse samt att de befintliga husen kan komma att stå kvar har detta ingen större betydelse ur ett jämförandeperspektiv mellan nutid och år 2100. Dessutom är husbebyggelse inte en följd av klimatförändringar och är därmed inte innefattad i denna rapport.

3. Beräkning i GeoStudio SLOPE/W - 2016

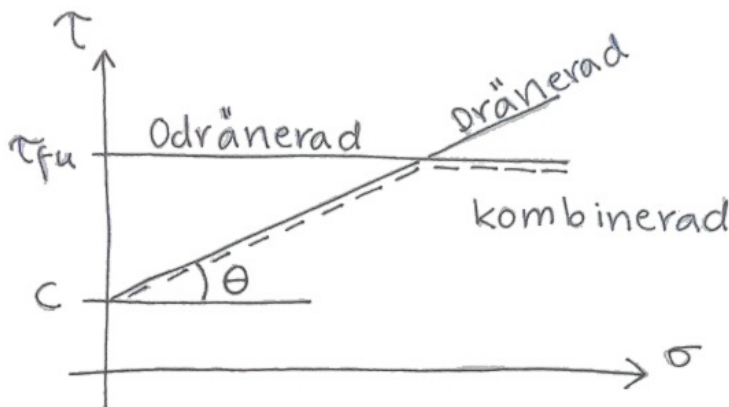
För att utföra släntstabilitetsberäkningar krävs ett antal parametrar samt antaganden om hur dessa väntas förändras i framtiden. Dessa antaganden och prognoser presenteras i avsnitt 2.6, där klimatförändringen har kopplats samman med en konkret förändring av parametrarna. Dagens värden har hämtats från SGI och den befintliga Göta älvutredningen, där även vissa framtidsscenarioer behandlas. För att jämföra släntstabiliteten för dagens klimat och framtiden används programmet SLOPE/W 2016 för att beräkna säkerhetsfaktorer. Följande kapitel behandlar beräkningsmetoden för SLOPE/W, hur den valda slänten är uppbyggd samt erhållna säkerhetsfaktorer.

3.1 Beräkningsmetod för SLOPE/W - 2016

För att utföra en släntstabilitetsanalys har programvaran GeoStudio SLOPE/W - 2016 använts. Detta program kräver att en metod för beräkningarna väljs. I denna rapport används Morgenstern-Price metoden, då denna metod tillgodoser både momentjämvikt och kraftjämvikt i form av en funktion. Den tar också hänsyn till både skjuvspänningar och normalspänningar (GEO-SLOPE International Ltd., 2008). För att beräkna säkerhetsfaktorn för cirkulär-cylindriska glidytor har sökmetoden "Grid and Radius" använts. För att erhålla den lägsta säkerhetsfaktorn görs både en odränerad och kombinerad analys. Efter geotekniska undersökningar för den valda slänten i området finns värden att hämta för nuläget rådande klimat. För alla värden på den befintliga slänten, se tabell 3 i bilagor.

3.1.1 Analysmetoder för SLOPE/W

I beräkningar för en slänt dominerad av kohesionsjord bör det skiljas mellan dränerad, odränerad och kombinerad analys. Vid odränerad analys räknas det med att ingen portrycksutjämning sker medan det vid dränerad räknas med att portrycket har uppnått jämvikt. I kombinerad analys räknas det med att en odränerad slänt kan innehålla dränerande lager, vilket kan leda till en lägre säkerhetsfaktor, se figur 3.1 (SGI, 2007). Eftersom slänten i Lilla Edet består av lera med friktionsmaterial i botten görs både en odränerad och kombinerad analys.



Figur 3.1 Beskrivning av vilken skjuvhållfasthet som används för dränerad, odränerad samt kombinerad analys.

3.1.2 Definition av säkerhetsfaktor för geologiska undersökningar

Säkerhetsfaktorer för geologiska undersökningar beräknas enligt ekvation 3.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (3)$$

Där:

τ_f = medelvärdet av skjuvhållfastheten längs glidytan.

τ_{mob} = den mobiliserande skjuvspänningen, det vill säga spänningen som verkar på slänten.

Säkerhetsfaktorn, F , bör ha ett värde över 1 då slänter med värden under 1 praktiskt sett går till brott. Slänter med värden nära 1 anses därför vara instabila och i riskzonen för skred (Engdahl, o.a., 2005).

Skredkommissionen (IVA Skredkommissionen, 1995) presenterar olika krav för säkerhetsfaktorer beroende på markanvändning för området samt undersökningstyp. I denna rapport ska en fördjupad utredning för befintlig bebyggelse utföras vilket ger minimikraven för slänten. F_{komb} är beteckningen för säkerhetsfaktorn vid en kombinerad analys och F_C vid en odränerad analys.

$$F_{komb} > 1,20 - 1,30$$

$$F_C > 1,30 - 1,40$$

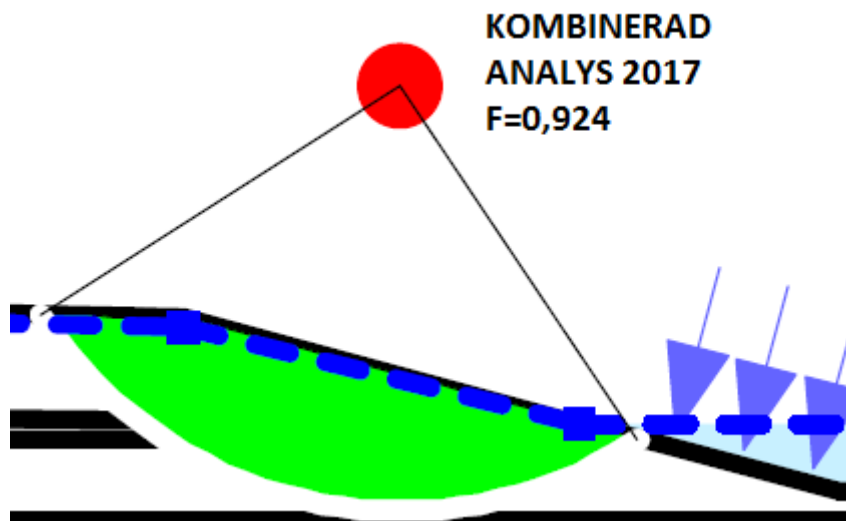
Uppnås inte kraven för säkerhetsfaktorn skall förstärkningsåtgärder vidtas (IVA Skredkommissionen, 1995).

3.2 Beräkningsresultat erhållet från modellering

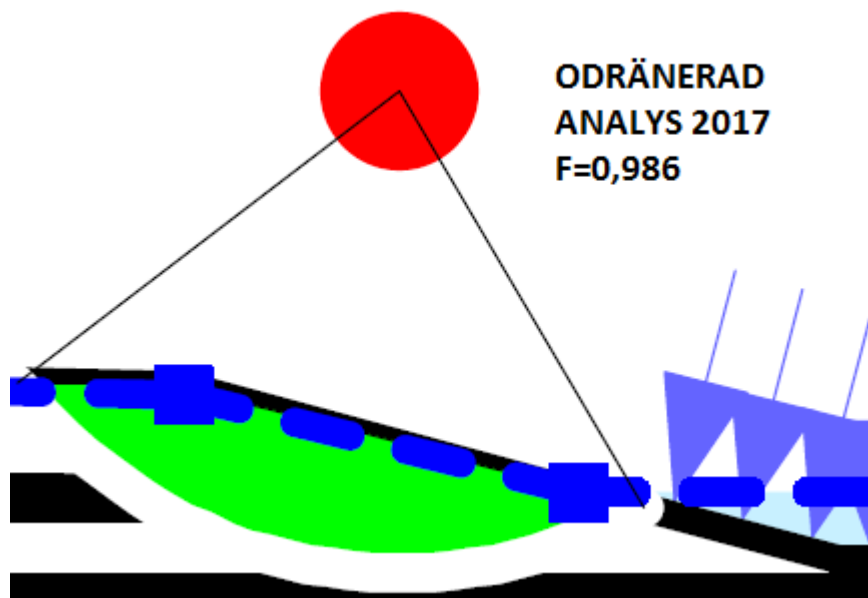
I SLOPE/W 2016 ritas en förenklad modell utifrån värden från SGIs databas av slänten ut med den geologiska jordartsföljden enligt tidigare visad figur 2.11. Som kan utläsas ur figuren är slänten nästan 700 m lång med en höjdskillnad upp till 80 m. Leran i slänten är uppdelad i åtta olika lager på grund av att leran ej är homogen i hela slänten (SGI, 2011) (SGI, 2011).

3.2.1 Sammanställning av resultat

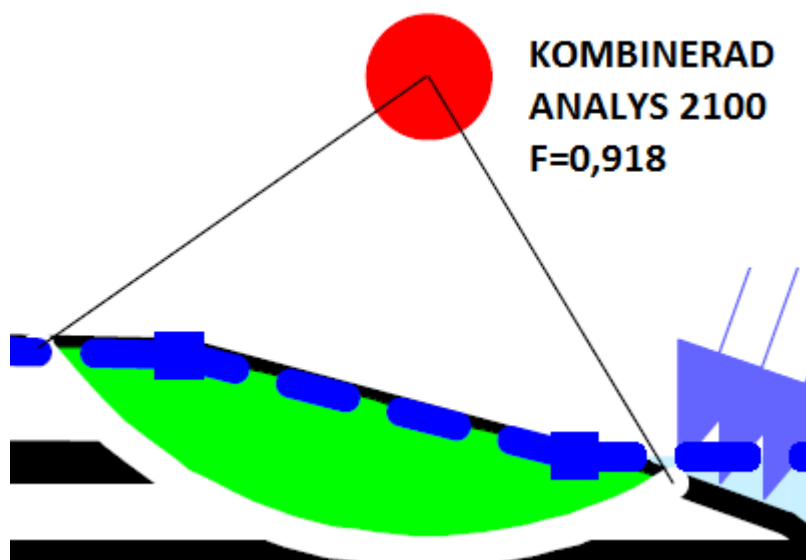
Ur figur 3.2–3.5 nedan utläses säkerhetsfaktorerna med den glidyta som har lägst säkerhetsfaktor för de olika analyserna i dagsläget respektive år 2100. Glidyterna i figur 3.2–3.5 befinner sig i storleksordningen kring 50 m vilket karakteriseras som stora glidytor.



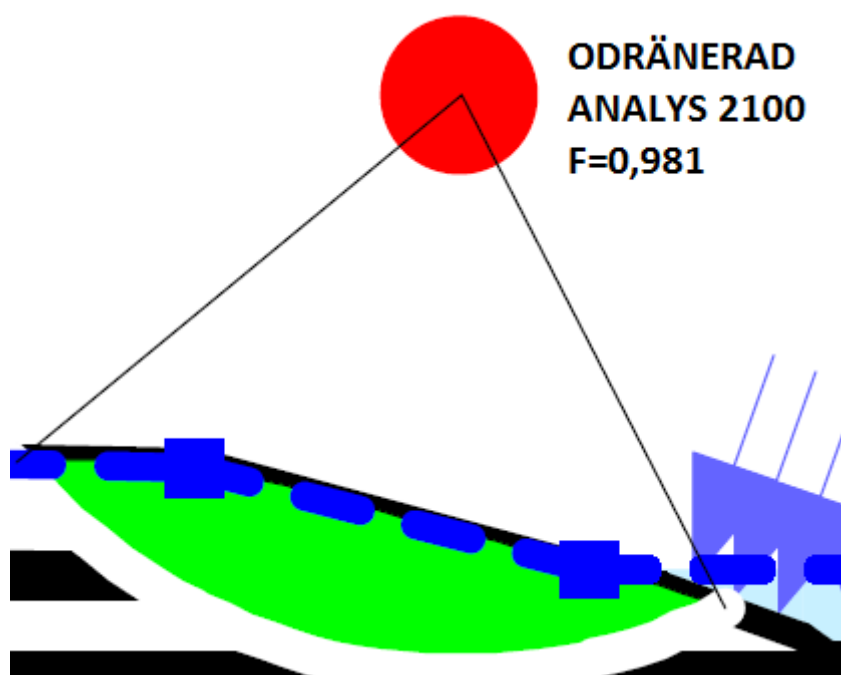
Figur 3.2 Säkerhetsfaktor för kombinerad analys år 2017.



Figur 3.3 Säkerhetsfaktor för odränerad analys år 2017.



Figur 3.4 Säkerhetsfaktor för kombinerad analys år 2100.



Figur 3.5 Säkerhetsfaktor för odränerad analys år 2100.

I tabell 3.1 sammanställs värdena och där utläses det att säkerhetsfaktorn för odränerad analys för dagens klimat är 0,986 och 0,981 för år 2100. Respektive värden för kombinerad analys är 0,924 och 0,918. Det kan även utläsas att både dagens och framtidens värden är lägre än de krav som ställs för en slänt av denna typ, vilka tas upp i 3.1.2.

Tabell 3.1 Sammanställning av säkerhetsfaktorerna samt skredkommisionens krav på säkerhetsfaktorer.

	2017	2100	Krav på säkerhetsfaktor
Odränerad analys	0,986	0,981	1,3 - 1,4
Kombinerad analys	0,924	0,918	1,2 - 1,3

4. Diskussion och slutsats

Detta kapitel ämnar att diskutera validiteten av resultatet erhållet från kapitel 3, diskutera felkällor samt vilka åtgärder som bör vidtas. Avslutningsvis dras en slutsats.

4.1 Utvärdering och diskussion av resultat

Resultatet vilket presenteras i avsnitt 3.2.1 visar att säkerhetsfaktorn redan i dagsläget är lägre än rekommendationen och att den väntas bli knappt märkbart lägre år 2100. Som utläses ur resultatet varierar alltså inte säkerhetsfaktorn märkbart trots att grundvattenytan höjts och erosion har verkat på slänten. Klimatförändringar har således ingen större påverkan på stabiliteten i den valda slänten, trots att vissa parametrar har förändrats. Dessa förändrade parametrar har en mindre påverkan på säkerhetsfaktorn då glidyten är stor. För en stor glidyta har 0,3 m höjd grundvattenyta ingen större inverkan då detta i förhållande till släntens totala massa ger en liten variation. För en mindre slänt kan en ökning på 0,3 m ge en större påverkan, då den förhöjda grundvattenytan verkar som en stor pådrivande kraft på den mindre massan. Små glidytor kan således få lägre säkerhetsfaktorer i framtiden, då grundvattnets påverkan är stor.

Erosionen har heller ingen större inverkan på släntstabiliteten i framtiden. Anledningar till detta är dels att det borteroaderade materialet utgör liten mängd jämfört med släntens glidyta. Dessutom ersätts det borteroaderade materialet av vatten, vilket bidrar med en viss mothållande kraft. Släntens jämvikt bibehålls därför, då det ersättande vattnet har en tunghet inte alltför avvikande från lerans.

Den största risken för skred är i de beräknade glidyterna där säkerhetsfaktorn är lägst men skred kan även ske i mindre glidytor till exempel nära strandkanten. Som tidigare nämnts kan mindre glidytor påverkas mer av förhöjd grundvattennivå och gå till brott. Dessa mindre skred kan verka som initialscred vilket kan leda till omfattande sekundärscred då slänten består av kvicklera. Vad som är osäkert är i vilken omfattning dessa eventuella skred kommer att visa sig. De bakåtskridande skreden kan komma att kunna inkludera hela slänten till bergskant eller endast innefatta ett litet område nära strandkanten. Detta gör att slänter med liknande förutsättningar och geometri är mycket oförutsägbara och den stora risken för omfattande skred innebär en fara för allmänheten.

Enligt beräkningarna är kraven på säkerhetsfaktorerna är i dagsläget inte är uppfyllda. Att säkerhetsfaktorerna har värden under 1,0 innebär att de pådrivande krafterna är större än de mothållande, vilket i sin tur innebär att ett skred redan borde ha skett. Trots att faktorn understiger 1,0 har slänten inte gått till brott än, och detta tyder på att det finns ytterligare parametrar vilka påverkar slänten och dess stabilitet än de som tagits hänsyn till i beräkningarna. Ett exempel på detta är erosionsskyddet i älvstranden. Detta verkar som en mothållande kraft då det är positionerat i den nedre delen av slänten och har en hög tunghet, men erosionsskyddet har ej tagits hänsyn till för beräkningarna utförda i SLOPE/W 2016. Denna förenkling kan bidra till att säkerhetsfaktorn från beräkningarna understiger värdet 1,0, utan att slänten går till brott. Andra orsaker till att värdet understiger 1,0 kan vara sprickor i marken, att torrskorpans hållfasthet underskattas och att beräkningarna för släntstabiliteten utförs med Morgenstern-Price metoden. Denna metod ger ett värde på den säkra sidan, vilken ofta är lägre än det verkliga värdet för slänten. Ytterligare en felkälla är den förenkling av jordlagerprofilen och tolkningen av denna som gjorts. Leran i slänten kan innehålla okända variationer vilka kan leda till felaktigheter vid beräkning av släntstabiliteten som därav ej representerar verkligheten. Dessutom kan prover för beräkning av lerans egenskaper förändras

vid provupptagning ur marken. Därför kan också de framtagna parametrarna skilja sig från de faktiska värdena för leran.

Beräkningarna för vilka säkerhetsfaktorerna är grundade på är antaganden. Dessa antaganden leder till osäkerhet för giltigheten av värdena. De antaganden som gjorts gällande framtidens klimat är spekulativa, då framtida klimat är svårt att förutse. De klimatscenarion som presenteras i rapporten är endast potentiella utvecklingar för klimatet. I de beräkningar som utförts har ett värsta tänkbara scenario med störst ökning av strålningsdrivning använts, det vill säga det scenario med störst negativa konsekvenser. Framtidens klimat kommer även troligtvis inte att följa som det valda scenariot i alla avseenden, då det endast är ett scenario och inte definitiva fakta vilket bidrar till osäkerhet av resultatet.

Rapporten har vidare avgränsat sig till en specifik slänt i området kring Lilla Edet, därför kan slutsatser endast dras för slänter med liknande geometri och förutsättningar. I Göta älvdalen återfinns olika sorters slänter med varierande förutsättningar. Dessa andra slänter kan komma att påverkas annorlunda än den valda slänten av framtidens klimatförändringar.

4.2 Tankar inför framtiden

De låga värdena för säkerhetsfaktorerna visar att åtgärder bör vidtas redan i dagsläget för att förhindra eventuella skred. En aktuell åtgärd, idag eller i framtiden, kan vara att schakta bort jordmassor från de kritiska delarna av slänten för att förhindra initialskred. Genom avlastningen från avschaktningen minskas de pådrivande krafterna och slänten blir mer stabil. Risk finns dock att kvickleran störs vid avschaktning och åtgärden bör därför genomföras med stor varsamhet.

I dagsläget finns erosionsskydd i strandkanten, detta kan dock i framtiden försämrans på grund av nötning och bortforsling till följd av isrörelser vintertid. I beräkningarna har det räknats med att dessa underhålls och därmed sker ingen erosion av strandkanten. Underhåll är en förutsättning för fortsatt säkerhet mot erosion, och därmed även skred, i framtiden.

Vidare forskning på hur klimatförändringar påverkar leror kan vara intressant för att få en djupare förståelse. Mer ingående undersökningar och forskning bör utföras gällande hur parametrarna med avseende på exempelvis kohesion, hållfasthet och friktionsvinkel kan komma att påverkas. I denna rapport har dessa antagits vara oförändrade men belägg för detta har ej erhållits. Det är därför en intressant aspekt att undersöka i framtiden.

4.3 Slutsats

Utifrån litteraturstudie och beräkningar kan ett antal slutsatser dras gällande klimatpåverkan på släntstabilitet i Göta älvdalen. En av slutsatserna är att slänter med liknande förutsättningar och geometri som den undersökta slänten redan i dagsläget har en låg säkerhetsfaktor. Den låga säkerhetsfaktorn samt förekomsten av de mäktiga lagren kvicklera kan resultera i ett omfattande skred. Att säkerhetsfaktorn för denna typ av slänter inte förändras nämnvärt i fram till år 2100, enligt utförda beräkningar, tyder på att de parametrar som förändrats inte har någon större påverkan på släntens stabilitet. Klimatförändringarna kan dock få större påverkan på slänter med annan geometri eller andra förutsättningar. Rapporten kan således inte stärka mer allmänna slutsatser för alla slänter i Göta älvdalen. Slutligen har det framtagna resultatet en stor osäkerhet då framtidens klimat är mycket svårt att förutse. Det scenario som används i beräkningarna grundas på forskning och välmotiverade antaganden men är trots detta endast ett av många möjliga scenarion.

Referenser

- Bell, F. (1999). *Geological hazards: their assessment, avoidance and mitigation*. University of Natal, Department of Geology and Applied Geology. London and New York: Routledge. Retrieved from http://w3.ualg.pt/~lnunes/Textosdeapoio/Disciplinas/Avaliacao%20de%20Risco/GEOLOGICAL%20HAZARDS%20-%20Bell,%202002%20-%20Riscos%20Naturais%20_DM.pdf
- Berggren, B., Alén, C., Bengtsson, P.-E., & Falemo, S. (2011). *Metodbeskrivning sannolikhet för skred: Kvantitativ beräkningsmodell*. Linköping: SGI. Retrieved from http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_28.pdf
- Blied, L. (2011). *Studie av porttryckens påverkan från nederbörd och vattenståndsvariation i tre slänter längs Göta älv*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI. Retrieved from http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_10.pdf
- Blied, L., & Persson, H. (2011). *Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älv dalen till följd av förändrat klimat*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI. Retrieved from http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_delrapport_9.pdf
- Blied, L., & Rydell, B. (2012). *Beräkningsförutsättningar för erosion vid stabilitetsanalys*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI. Retrieved from <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v624-2.pdf>
- Dahlin, T., Leroux, V., Löfroth, H., Schälin, D., & Suer, P. (2011). *Quick clay mapping by resistivity*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI.
- Demers, D., Leroueil, S., J-S, L., Locat, A., & Locat, J. (2014). *Landslides in Sensitive Clays - From Geosciences to Risk Management*. New York: Springer.
- Engdahl, M., Hultén, C., Odén, K., Olsson, M., Rankka, K., & Svahn, V. (2005). *Släntstabilitet i jord*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI. Retrieved from <http://www.lansstyrelsen.se/norrboten/SiteCollectionDocuments/Sv/miljo-och-klimat/Anpassning%20till%20f%C3%B6r%C3%A4ndrat%20klimat/Bebyggelse,%20byggnader%20och%20industrier/SI%C3%A4ntstabilitet%20i%20jord%20SGI-V560-1.pdf>
- GEO-SLOPE International Ltd. (2008). *Stability Modeling with SLOPE/W 2007 version*. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd.
- Google Maps. (u.å. b)). *Google Maps*. Retrieved 03 03, 2017, from Google: <https://www.google.se/maps/@57.908046,11.9020702,10.35z>
- Google Maps. (u.å. a)). *Google Maps*. Retrieved 05 08, 2017, from Google: <https://www.google.se/maps/@58.0237311,12.5162235,9.56z>
- Hartlén, J. (1984). *Tuveskredet - slutrapport*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI.
- IVA Skredkommissionen. (1995). *Anvisningar för släntstabilitetsutredningar*. Linköping: SGI. Retrieved from http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/ovrigt/pdf/skredk_r3-95.pdf
- Larsson, R. (2010). *Inverkan av förändringar i porvattnets kemi – främst salturlakning – på naturliga lerans geotekniska egenskaper*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI.
- Moss, R. H., & al., e. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756. doi:10.1038/nature08823
- MSB. (2012). *Götaskredet 1957*. Retrieved 03 12, 2017, from Myndigheten för samhällsskydd och beredskap:

<http://ndb.msb.se/ViewCase.aspx?id=98&l=SV&xMax=351705&xMin=311705&yMax=6464256&yMin=6424256>

- Naturvårdsverket. (2016). *Klimatet i framtiden*. Retrieved 02 01, 2017, from Naturvårdsverket:
<http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Klimatet-i-framtiden/>
- NE. (2017). *Cylinderskred*. Retrieved 04 28, 2017, from Nationalencyklopedin:
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/cylinderskred>
- NE. (u.å.). *Tuveskredet*. Retrieved 05 04, 2017, from Nationalencyklopedin:
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/tuve/tuveskredet>
- Ottosson, E., & Sandberg, H. (1994). *Agnesbergsskredet - skredförebyggande åtgärder*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI.
- Pedersen, H. (2017, 04 05). Studiebesök. (A. P., C. C., N. F., & S. F., Interviewers)
- Ramböll. (2013). *Västra älvstranden, fördjupad utredning - Södra delområdet*. Göteborg: Ramböll. Retrieved from
<http://www.lillaedet.se/download/18.105fa4fe14fb4f7c53a227/F%C3%B6rdjupad+utredning+s%C3%B6dra+delomr%C3%A5det.pdf>
- Rankka, K. (2003). *Kvicklera - bildning och egenskaper*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI.
- Rydell, B., Persson, H., & Biled, L. (2012). *Klimat-effekt på vattennivåer, erosion och grundvattenförhållanden i Göta älv*. Linköping: SGI. Retrieved from
<http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v624-1.pdf>
- SGI. (2007). *Deponiers stabilitet - Vägledning för beräkning*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI. Retrieved from <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i19.pdf>
- SGI. (2011). *Kombinerad analys, befintliga förhållanden*. Retrieved 03 01, 2017, from Statens Geotekniska Institut:
http://gis.swedgeo.se/dokument/gau_stabilitetsberakningar/pdf/berakningar/Bilaga%2010.8.2.pdf
- SGI. (2011). *Odränerad analys, befintliga förhållanden*. Retrieved 03 01, 2017, from Statens Geotekniska Institut:
http://gis.swedgeo.se/dokument/gau_stabilitetsberakningar/pdf/berakningar/Bilaga%2010.8.2.pdf
- SGI. (2012). *Skredrisker i Göta älv dalen i ett förändrat klimat*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI.
- SGI. (2012). *Skredrisker i Göta älv dalen i ett förändrat klimat*. Statens Geotekniska Institut. Linköping: SGI. Retrieved from http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/gota-alvutredningen/gau_slutrapport_del1.pdf
- SGI. (2017). *Skredrisk Göta älv*. Retrieved 01 29, 2017, from Statens geotekniska institut:
<http://www.swedgeo.se/sv/samhallsplanering--sakerhet/skredriskutredningar/gota-alv/>
- SGI. (u.å.). *Utförda borrhål och stabilitetsutredningar*. Retrieved 05 06, 2017, from Statens Geotekniska Institut: http://gis.swedgeo.se/borrhål_gotaalv/#
- SGU. (u.å.). *Karta över berggrunden i Göta älv dalen*. Retrieved 02 23, 2017, from Statens Geologiska Undersökning: <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-berggrund-1-miljon.html>

- SGU. (u.å.). *Sveriges berggrund*. Retrieved 02 23, 2017, from Statens geologiska undersökning: <http://www.sgu.se/om-geologi/berg/sveriges-berggrund/>
- SMHI. (2014). *Vad är en klimatmodell?* Retrieved 03 25, 2017, from Sveriges Meteorologiska & Hydrologiska Institut: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/vagledning-klimatscenarioer/vad-ar-en-klimatmodell-1.80272>
- SMHI. (2015). *Klimat omfattar mer än väder*. Retrieved 03 20, 2017, from Sveriges Meteorologiska & Hydrologiska Institut: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/klimat-omfattar-mer-an-vader-1.639>
- SMHI. (2017). *Vad är ett klimatscenario?* Retrieved 02 21, 2017, from Sveriges Meteorologiska & Hydrologiska Institut: <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/vagledning-klimatscenarioer/vad-ar-ett-klimatscenario-1.80267>
- SMHI. (u.å.). *Ladda ner scenariodata*. Retrieved 04 04, 2017, from Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/ladda-ner-scenariodata?area=swe&sc=rcp26&var=n7max&seas=ar&dnr=0&sp=sv>
- SMHI. (u.å.). *Om analysen*. Retrieved 03 23, 2017, from Sveriges Meteorologiska & Hydrologiska Institut: <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/klimatscenarioer/haag.html#i2c>
- Storkull, L., & et al. (2006). *Fakta om Göta älv: En beskrivning av Göta älv och dess omgivning 2005*. Göteborg: Göta älvs vattenvårdsförbund. Retrieved from http://www.vattenorganisationer.se/gotaalv/downloads/33/FaktaomGotaalv2005slutversion_tr_yck07.pdf
- Sällfors, G. (2013). *Geoteknik*. Göteborg: Cremona förlag.
- Torrance, J. K. (2012). Landslides in quick clay. In J. e. Clague, *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press. Retrieved from <https://books.google.se/books?id=VtN7BwAAQBAJ&pg=PA83&dq=J.+kenneth+torrance&hl=sv&sa=X&ved=0ahUKEwjDsuLx-eTTAhUDD5oKHWOTAWwQ6AEIMTAB#v=onepage&q=J.%20kenneth%20torrance&f=false>
- Trenberth, K. (1998). Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*(42), 327-339. doi:doi 10.1023/A:1005488920935
- WWF. (2017). *Så påverkas Sverige när temperaturen stiger*. Retrieved 01 31, 2017, from World wildlife fund: <http://www.wwf.se/wwfs-arbete/klimat/earth-hour/klimatforandringar-i-sverige/1624614-sa-paverkas-sverige-nar-temperaturen-stiger>

Bilagor

Tabell 1. Beräknat medelvärde av förändringen i största dygnsnederbörd i procent för åren 2090-2100 jämfört med normalperioden 1961-1990 samt indata för beräkningen. Tal inom parentes visar hur många klimatmodeller jämfört med resten av värdena i kolumnen som använts för just det värdet (SMHI, u.å.).

År	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
2090	9,06	5,44	24,52
2091	31,65	8,18	27,09
2092	-3,81	3,40	27,22
2093	4,37	19,29	6,62
2094	10,16	16,33	17,36
2095	-0,22	4,26	34,56
2096	14,08	9,2	39,43
2097	-4,63	20,37	24,49
2098	0,72	12,33	20,31
2099	1,04	11,95 (8/9)	29,46
2100	5,45 (2/3)	18,38 (8/9)	35,98 (8/9)
Beräknat medelvärde:	6,17	11,74	26,09

Tabell 2. Beräknat medelvärde för förändring i procent av årets största nederbörd under en 7 dagars period mellan 2090-2100 jämfört med normalperioden 1961-1990 samt indata för beräkningen (SMHI, u.å.).

År	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
2090	13,44	6,19	13,04
2091	19,14	6,34	19,15
2092	-2,08	5,16	18,66
2093	6,01	8,26	8,04
2094	1,43	10,82	12,46
2095	0,55	3,90	29,01
2096	7,62	7,12	24,08
2097	3,15	21,09	27,09
2098	-11,65	18,11	19,11
2099	4,67	14,04 (8/9)	22,29
2100	2,28 (2/3)	13,08 (8/9)	18,61 (8/9)
Beräknat medelvärde:	4,05	10,37	19,23

Tabell 3. Beskrivning av materialdata för alla jordlager i sektion 32/760 (SGI, 2011) (SGI, 2011).

Kombinerad	Odränerad
<p>Torrskorpa Model: Combined, $S=f(\text{depth})$ Unit Weight: 18 kN/m³ Phi: 30 ° C-Top of Layer: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Top of Layer: 30 kPa Cu-Rate of Change: 0 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1</p>	<p>Torrskorpa Model: $S=f(\text{depth})$ Unit Weight: 18 kN/m³ C-Top of Layer: 30 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Limiting C: 0 kPa</p>
<p>Strandskoning Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Unit Wt. Above Water Table: 18 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 40 ° Phi-B: 0</p>	<p>Strandskoning Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Unit Wt. Above Water Table: 18 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 40 ° Phi-B: 0 °</p>
<p>Lera 1, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.4 kN/m³ Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 22 kPa Cu-Rate of Change: 0 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 11 m</p>	<p>Lera 1, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.4 kN/m³ C-Datum: 22 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 11 m</p>
<p>Lera 2, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.2 kN/m³ Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 22 kPa Cu-Rate of Change: 0 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 2 m</p>	<p>Lera 2, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.2 kN/m³ C-Datum: 22 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 2 m</p>
<p>Lera 3, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.2 kN/m³ Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 22 kPa</p>	<p>Lera 3, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.2 kN/m³ C-Datum: 22 kPa C-Rate of Change: 1.4 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 0 m</p>

<p>Cu-Rate of Change: 1.4 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 0 m</p>	
<p>Lera 4, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.8 kN/m³ Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 22 kPa Cu-Rate of Change: 1.4 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 0 m</p>	<p>Lera 4, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 16.8 kN/m³ C-Datum: 22 kPa C-Rate of Change: 1.4 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 0 m</p>
<p>Lera 5, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15 kN/m³ Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 14 kPa Cu-Rate of Change: 0 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 15 m</p>	<p>Lera 5, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15 kN/m³ C-Datum: 14 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 15 m</p>
<p>Lera 6, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15 kN/m³ Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 14 kPa Cu-Rate of Change: 1.6 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 5 m</p>	<p>Lera 6, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15 kN/m³ C-Datum: 14 kPa C-Rate of Change: 1.6 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 5 m</p>
<p>Lera 7, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15 kN/m³ Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 14 kPa Cu-Rate of Change: 0 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 20 m</p>	<p>Lera 7, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15 kN/m³ C-Datum: 14 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 20 m</p>
<p>Lera 8, kombinerad Model: Combined, $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15.8 kN/m³</p>	<p>Lera 8, odränerad Model: $S=f(\text{datum})$ Unit Weight: 15.8 kN/m³</p>

Phi: 30 ° C-Datum: 0 kPa C-Rate of Change: 0 kPa/m Cu-Datum: 14 kPa Cu-Rate of Change: 1.5 kPa/m C/Cu Ratio: 0.1 Elevation: 12 m	C-Datum: 14 kPa C-Rate of Change: 1.5 kPa/m Limiting C: 0 kPa Elevation: 12 m
Friktionsjord Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 22 kN/m ³ Unit Wt. Above Water Table: 20 kN/m ³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Phi-B: 0 °	Friktionsjord Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 22 kN/m ³ Unit Wt. Above Water Table: 20 kN/m ³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Phi-B: 0 °
Berggrund Model: Bedrock (Impenetrable)	Berggrund Model: Bedrock (Impenetrable)