

Älvmarken, Göta älv

Fördjupad stabilitetsutredning

Dokumenttyp:

Geotekniskt PM

Dokumentnummer:

18900OPM01

Diarienummer/Uppdragsnummer SGI:

6.2-2308-0993/10390



Ändringsförteckning

Ver	Datum	Ändringsbeskrivning	Granskad	Godkänd av

Kund	Statens geotekniska institut
Uppdrag	Älvmarken
Uppdragsnummer Sweco	30065902
Uppdragsledare	AnnLouise Elliot
Upprättad av	Daniel Björn / Henrik Falch
Datum	2024-12-12
Granskad av (datum)	
Dokumentreferens	BD \\segotfs003\projekt\22321\30065902_älvmark en\000\16_text\pm\18900opm01.docx

Innehållsförteckning

1	Uppdrag	6
1.1	Syfte	6
1.2	Styrande dokument	7
1.3	Underlag	7
2	Utförda undersökningar	8
3	Undersökningsområde	8
3.1	Delområdesindelning	8
4	Topografi och markbeskaffenhet	9
5	Geotekniska förhållanden	10
5.1	Norra (18/780O, 18/890O, 18/980O, 19/060OR)	11
5.2	Centrala (19/060OR, 19/150O, 19/260OR)	11
5.3	Södra (19/260OR, 19/340O, 19/410OR)	11
5.4	Älv	12
5.5	Lerans anisotropa egenskaper	12
6	Hydrogeologiska förhållanden	16
6.1	Vattennivå Göta älv	16
6.2	Hydrogeologiska zoner	16
6.3	Portrycksprofil, Norra	17
6.4	Portrycksprofil, Centrala	18
6.5	Portrycksprofil, Söder	19
7	Kartering av kvicklera	20
8	Stabilitetsberäkningar	21
8.1	Krav på säkerhetsfaktor	21
8.2	Valda parametrar	22
8.2.1	Valda materialparametrar, Älv	23
8.2.2	Valda materialparametrar, Norra	23
8.2.3	Valda materialparametrar, Centrala	24
8.2.4	Valda materialparametrar, Södra	25
8.3	Valda portryck	25
8.3.1	Valda portryck, Norra	25
8.3.2	Valda portryck, Centrala	26
8.3.3	Valda portryck, Södra	27
8.4	Valda laster	27
8.5	Beräkningsresultat	28
8.5.1	Beräkningsresultat, Norra	28
8.5.2	Beräkningsresultat, Centrala	29
8.5.3	Beräkningsresultat, Södra	29
9	Utvärdering primära- och sekundära skred	30
10	Känslighetsanalys	30
10.1	Ökade portryck	30
10.2	Erosion	31
11	Åtgärdsförslag	33
12	Sammanfattning	35

Bilagor:

<i>Beteckning</i>		<i>Datum</i>	<i>Rev. datum</i>	<i>Sidor</i>
Bilaga 1	Valda värden	2024-12-12		8
Bilaga 2	Utvärdering tolkad kvicklera	2024-12-12		21
Bilaga 3	Hydrogeologiska förhållanden	2024-12-12		10
Bilaga 4	Utvärdering av erforderlig säkerhetsfaktor	2024-12-12		3
Bilaga 5	Stabilitetsberäkningar, Befintliga förhållanden	2024-12-12		70
Bilaga 6	Stabilitetsberäkningar, Känslighetsanalys portryck	2024-12-12		15
Bilaga 7	Stabilitetsberäkningar, Känslighetsanalys erosion	2024-12-12		24
Bilaga 8	Stabilitetsberäkningar, Åtgärder	2024-12-12		24
Bilaga 9	Stabilitetsberäkningar, Samlade per sektion	2024-12-12		133
Bilaga 10	Valda värden - förkonsolideringstryck	2024-12-12		4

Ritningar:

<i>Beteckning</i>	<i>Typ</i>	<i>Skala/Format</i>	<i>Datum</i>
G-10-1-002	Plan: Delområdesindelning och beräkningssektioner	1:1250 / A1	2024-12-12
G-10-1-003	Plan: Tolkad kvicklera och skredutbredning	1:1250 / A1	2024-12-12
G-10-1-004	Plan: Omfattning åtgärder	1:1250 / A1	2024-12-12

Förord från SGI

Risken för skred längs Göta älv är stor och ökar i och med klimatförändringarna. Regeringen har gett Statens geotekniska institut (SGI) uppdraget att arbeta för att minska risken för ras och skred. Arbetet görs tillsammans med Delegation för Göta älv där representanter från berörda kommuner, myndigheter och organisationer ingår. Delegationen har ett sekretariat på SGI som bistår i administrativa och tekniska frågor.

År 2009–2011 gjordes en översiktlig utredning av skredrisken längs Göta älv. Denna utredning, kallad Göta älvutredningen, pekar ut områden i behov av vidare utredning och utgör ett stöd till bland annat kommuner vid prioritering av områden att arbeta vidare med. Utifrån den översiktliga utredningen går SGI vidare och utför detaljerade och fördjupade stabilitetsutredningar i utvalda områden med hög- eller medelhög skredrisk.

Stabilitetsutredningarna görs av geotekniska konsulter under ledning av SGI. I uppdragen ingår bland annat att presentera en bedömning av skjuvhållfastheten och att ge förslag på lämpliga stabilitetshöjande åtgärder. Utredningsresultaten ligger till grund för SGI:s fortsatta arbete med analys och beräkning av sannolikhet för skred samt för planering av eventuella stabilitetshöjande åtgärder. Allt i syfte att på sikt minska risken för skred i Göta älvdalen.

Statens geotekniska institut, Sekretariatet för Göta älv

1 Uppdrag

På uppdrag av Statens geotekniska institut (SGI) har Sweco Sverige AB utfört fördjupad stabilitetsutredning i området Älvmarken i Trollhättans kommun, se Figur 1. Området, som ligger ca 6 km söder om Trollhättan tätort längs Göta älvs östra strand, utgjorde en del av delområde 7 i Göta älvutredningen.

Uppdraget omfattar fält- och laboratorieundersökningar, stabilitetsberäkningar för befintliga förhållanden och eventuella förstärkningsåtgärder samt kartering av kvicklereutbredning.



Figur 1: Kartöversikt med aktuell plats markerat med röd karthål, Lantmäteriets karttjänst (2024)

1.1 Syfte

Detta PM har till syfte att redovisa geotekniska förhållanden, förutsättningar och antaganden samt resultat av utförda stabilitetsberäkningar. Målet med utredningen är att klargöra om stabiliteten för befintliga förhållanden är tillfredställande enligt gällande krav eller om stabilitetshöjande åtgärder erfordras i området.

Därtill utgör utredningen underlag för att SGI ska kunna göra uppdateringar av skredriskkartan längs Göta älv.

1.2 Styrande dokument

Utredningen har utförts enligt riktlinjer i följande styrande dokument:

- Delegationen för Göta älv 2019, DGA00XST01 Riktlinjer för tekniskt arbete 6.0, Avser stabilitetsutredningar längs Göta älv, Statens geotekniska institut, SGI, Linköping, 2022-04-29.
- Delegationen för Göta Älv 2019, DGA00XST02 Riktlinjer för dokumenthantering 5.0, Avser stabilitetsutredningar längs Göta älv, Statens geotekniska institut, SGI, Linköping, 2022-04-29.
- Skredkommissionen rapport 3:95.
- IEG rapport 4:2010 Tillståndsbedömning/klassificering av naturliga slänter.
- SGI (2023), Utredning av släntstabilitet, Utgåva 1, SGI Vägledning 8, Statens geotekniska institut, (SGI), Linköping.

1.3 Underlag

Följande underlag har tillhandahållits av SGI vilka har använts som underlag för utredningen:

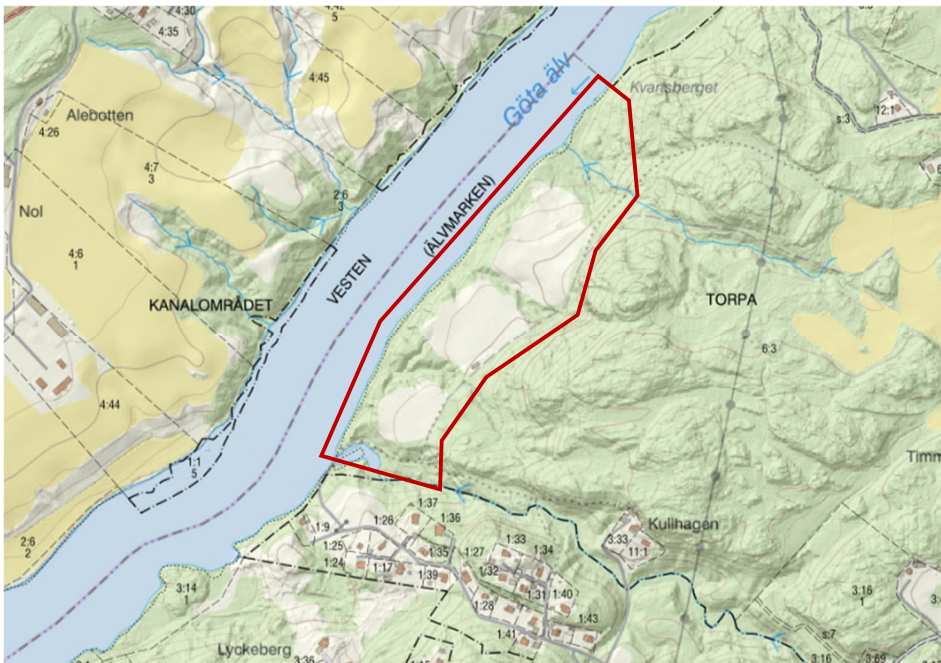
- Göta älvutredningen (GÄU) Delområde 7 Intagan – Lilla Edet, Markteknisk undersökningsrapport/Geoteknik, Daterad 2011-05-16. Diarienummer: 6-1001-0029. Dokumentnummer: 07RA005.
- Göta älvutredningen (GÄU) Delområde 7 Intagan – Lilla Edet, Teknisk PM Geoteknik, Stabilitetsberäkningar. Daterad 2011-05-16. Diarienummer: 6-1001-0029. Dokumentnummer: 07PM001.
- Göta älvutredningen GÄU Delområde 11, Delsträckan Intagan - Ström. Försöksrapport/Fält, Dateras 2010-12-10, Diarienummer: 6 1001-0040. Dokumentnummer: 11RA004.
- Göta älvutredningen - delrapport 32. Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer. Linköping 2011.
- Befintliga undersökningsdata i digitalt format från Göta älvutredningen, delområde 7.
- Bottentopografi från batymetrisk data, sjömätning Göta Älv år 2020 med 1 meters grid i tif-format.
- Höjddata från Lantmäteriets WCS-tjänst år 2022 med 1 meters grid i tif-format.
- Väglinje avseende längdmätning för Göta älv i dwg-format.
- Excelmallar erhållna av SGI för sammanställning av lab. – och fältdata, val av skjuvhållfasthetsfördelning och utvärdering kvicklera CPT och Tr.

2 Utförda undersökningar

Fält- och laboratorieundersökningar utfördes av Sweco Sverige AB respektive SGI:s geotekniklaboratorium från november 2023 till april 2024. Resultaten från undersökningarna presenteras i Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik (MUR), dokumentnummer 18900ORA01.

3 Undersökningsområde

Aktuellt område är beläget i Trollhättans kommun, ca 6 km söder om Trollhättans tätort, på östra sidan av Göta älv, mellan km 18/700 och km 19/500 enligt längdmätningen från Göta älvutredningen. Området avgränsas av Göta älv i väst samt av höjdpartier med berg i dagen i öst och norr samt en ravin i söder, se Figur 2. Området utgörs av ängar och skog och sankmark och genomkorsas av tre bäckraviner som mynnar ut i Göta älv.



Figur 2: Kartbild med utredningsområdet markerat i rött, Lantmäteriets karttjänst (2024).

3.1 Delområdesindelning

Området har delats in i fyra delområden baserat på geotekniska förhållanden och topografisk karaktär. Dessa områden är:

- Norra (km 18/700–19/060)
- Centrala (km 19/060–19/260)
- Södra (km 19/260–19/500)
- Älv (älvbotten och strandlinjen längs hela sträckan där marknivån $< +11$)

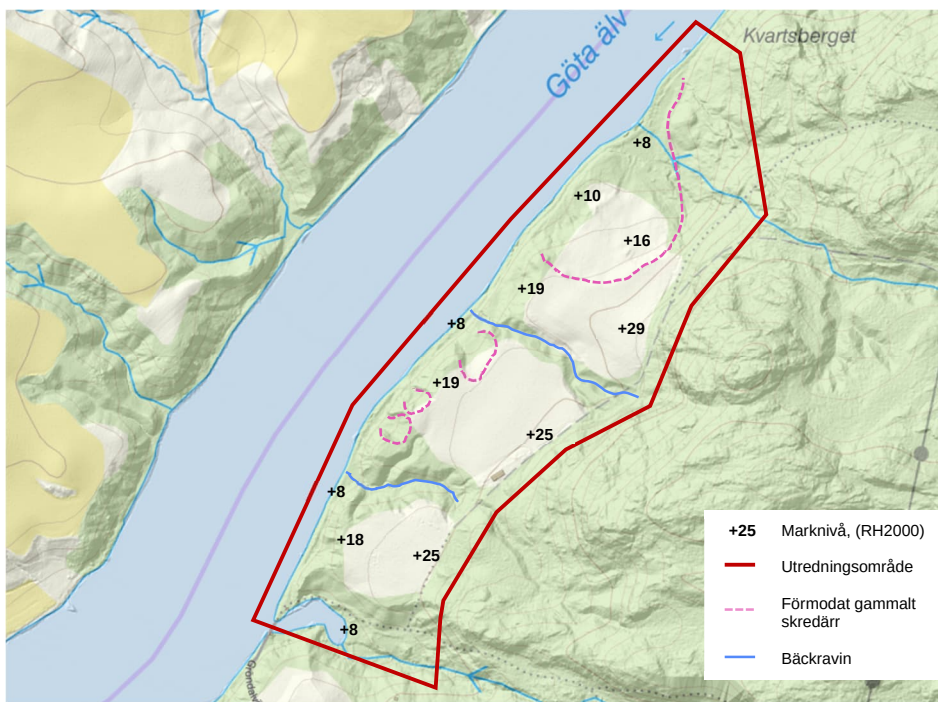
Delområde Norra sträcker sig från områdets norra gräns till den ravin som mynnar ut i älven vid ca km 19/060. Söder om denna ravin ligger delområde Centrala som sträcker sig till den ravin som mynnar ut i älven vid ca km 19/260. Området söder om denna ravin och till utredningsområdets södra gräns, utgör

delområde Södra. Längs hela området finns i väster delområde Älv som innefattas av Göta älv samt strandlinjen där markytan har en lägre nivå än +11. Områdesindelningen i plan redovisas på ritning G-10-1-002.

4 Topografi och markbeskaffenhet

Området utgörs av tre ängar som separeras av de tre bäckravinerna. Ravinerna, och även slänten närmast älven, utgörs av skogsmark med träd och sly och i ravinen i norr, som är den bredaste, finns även sankmark.

Marknivåer inom området varierar generellt mellan ca +8 vid älvstranden till ca +29 i anslutning till partierna med berg i dagen vid områdets östra och norra gränser. Från partierna med berg i dagen sluttar terrängen inledningsvis flackt mot älven med lutning på ca 1:15. Omkring 20–30 meter från strandlinjen är marknivån ca +19 och därifrån ökar lutningen till 1:1–1:3 ner till strandlinjen. I norr finns ett större förmodat gammalt skredärr. Marken lutar här ca 1:7 ner i skredärret varefter marken lutar 1:20 fram till ca 10 meter från strandlinjen. Härifrån lutar marken ca 1:6 ner till älvstranden. Slänterna ner mot ravinerna i området lutar generellt ca 1:2, se Figur 3.

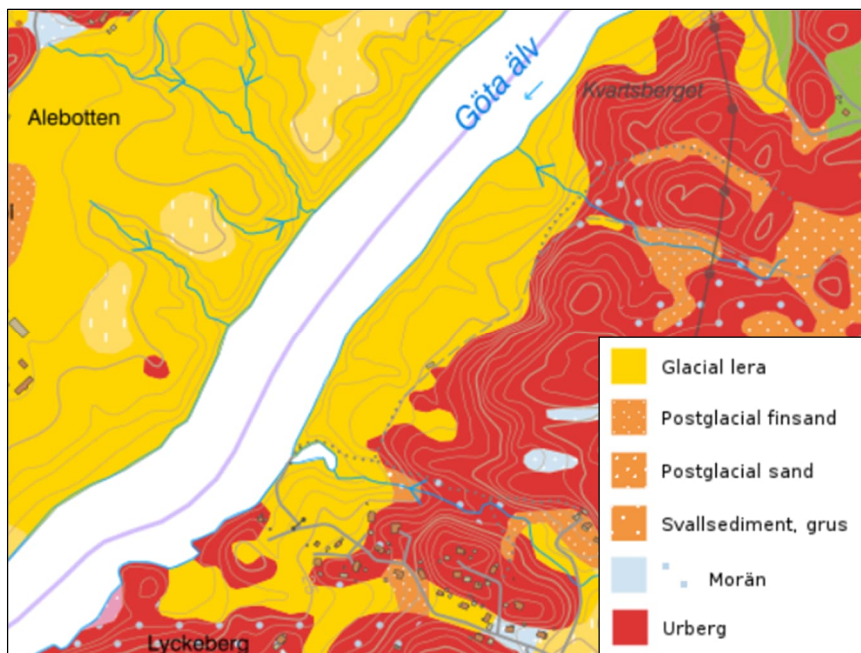


Figur 3: Kartbild från lantmäteriet (2023) visande marknivåns variation inom området samt utbredning av raviner och berg i dagen.

Älvbotten består närmast strandlinjen av en flackt sluttande undervattenshylla med en lutning på ca 1:8 ut till ca 25 meter från strandlinjen. Därifrån sluttar älvbotten brantare ner till djupaste punkten. I höjd med delområde Norra och Centrala, lutar älvbotten ca 1:4 (18/700 till 18/980) och 1:2,5 (18/980 till 19/230) ner till djupaste punkten på nivån ca -5. I höjd med delområde Söder lutar älvbotten också ca 1:2,5 men nivån för älvens djupaste punkt är här något grundare och belägen på nivån ca -3.

5 Geotekniska förhållanden

Undersökningsområdet består mestadels av lermark. Området angränsar till områden med berg i dagen i öster och sydöst. Jordartsförhållandena enligt SGU:s jordartskarta redovisas i Figur 4.



Figur 4: Jordartskarta, SGU:s karttjänst (2024).

Generellt utgörs jordlagerföljden inom området av:

- Mulljord.
- Torrskorpelera.
- Lera.
- Friktionsjord.
- Berg.

Torrskorpeleran har generellt inom området en mäktighet på 1–3 meter och är som störst vid släntröner. Vid älvstranden, i botten på ravinerna samt inom området för det större gamla skredärrat har torrskorpan en mindre mäktighet på 0–1 meter. Övergången från torrskorpa till underliggande lera är på många håll oklar, och leran närmast torrskorpan är relativt fast och har på vissa håll torrskorpekaraktär.

Leran inom området har en mäktighet på 0–29 meter, som generellt ökar från öster till väster, men som även ökar från söder till norr utmed Göta älv.

Friktionsjord finns under leran och även vid markytan i anslutning till viken vid områdets södra ände och i älvbotten i höjd med delområdet Södra. Egenskaper och mäktighet på friktionsjorden har ej utvärderats då samtliga sonderingar nått sitt stopp i friktionsjorden.

Bergnivån har ej undersökts inom ramen för detta uppdrag då det inte är signifikant för uppdragets frågeställning.

5.1 Norra (18/780O, 18/890O, 18/980O, 19/060OR)

I delområde Norra saknas torrskorpeleran inom det gamla skredärret och den anslutande bäckravinen i norr. Mellan det gamla skredärret och ravinen vid delområdets södra gräns återfinns torrskorpelera eller lera med torrskorpekaraktär som har en mäktighet på 1–3 meter.

Leran under torrskorpan är sulfidhaltig och har en mäktighet från 0 meter i öster som ökar mot älven till 16–21 meter vid släntkrön.

Skjuvhållfastheten i leran ökar mot djupet och varierar mellan 19–75 kPa. Tungheten är uppmätt till 16,2–18,2 kN/m³. Lerans vattenkvot och konflytgräns är uppmätta till 25–65 % respektive 33–60 %. Leran är mestadels högsensitiv med uppmätt sensitivitet på 6–514 och bedöms som kvick från ca 5 meters djup i anslutning till det gamla skredärret och norra ravinen. Leran är överkonsoliderad genom hela jordprofilen med OCR på 1,2–7,1. OCR är avtagande med djupet.

5.2 Centrala (19/060OR, 19/150O, 19/260OR)

I delområde Centrala har torrskorpeleran en mäktighet på ca 1–2 meter.

Leran är något sulfidhaltig, delvis siltig, och har i öster en mäktighet på 0 meter som sedan ökar mot älven till ca 29 meter vid släntkrön.

Skjuvhållfastheten i leran ökar mot djupet och varierar mellan 20–93 kPa. Tungheten är uppmätt till 16–18,3 kN/m³. I anslutning till släntkrön avviker skjuvhållfastheten och tungheten från övriga delområden. Skjuvhållfastheten är här hög vid markytan och minskar ner till nivån ca +9 varifrån den ökar i likhet med resten av delområdet. Tungheten är också högre här än i området i övrigt.

Lerans vattenkvot och konflytgräns är i delområdet uppmätta till 36–78 % respektive 33–62 %. Leran är högsensitiv med uppmätt sensitivitet på 4–541 och bedöms som kvick från ca 10 meter djup. Leran är överkonsoliderad över nivå ±0 med OCR på 1,2–4,4. OCR minskar med djupet och under nivå ±0 är leran normalkonsoliderad.

5.3 Södra (19/260OR, 19/340O, 19/410OR)

I delområde Södra är torrskorpeleran siltig och sandig och har mestadels en mäktighet på ca 1,3–3,3 meter. Mäktigheten ökar vid släntkrön och är som minst vid slänkfot vid ravinerna och vid älven.

Leran är något sulfidhaltig och har en mäktighet som varierar mellan 0–19 meter. I anslutning till områdena med berg i dagen i öster är mäktigheten liten, varifrån den snabbt ökar i riktning mot älven till som mest omkring 19 meter, ca 90 meter från släntkrönet mot älven. Försättningsvis mot älven minskar sedan mäktigheten något till ca 14 meter vid släntkrön. Från områdets centrala delar minskar även lerans mäktighet söderut mot viken som avgränsar området i söder, där ingen lera finns och friktionsjorden återfinns på en högre nivå.

Skjuvhållfastheten i leran ökar mot djupet och varierar mellan 24–37 kPa. Tungheten är uppmätt till 15,9–18,4 kN/m³. Lerans vattenkvot och konflytgräns är uppmätta till 35–73 % respektive 39–63 %. Leran är mestadels högsensitiv med uppmätt sensitivitet på 4–392 och bedöms som kvick i delområdets centrala delar från ca 10 m djup. Ingen kvicklera bedöms finnas i jordprofilen vid

slänkrön och mot älven. Leran är överkonsoliderad genom hela jordprofilen med OCR på 1,3–4,8. OCR är minskande med djupet.

5.4 Älv

I delområde Älv finns torrskorpelera i den del som ligger på land. Torrskorpeleran är siltig och har en mäktighet på upp till 1 meter.

Leran är något sulfidhaltig och har en mäktighet på 0–23 meter. Mäktigheten är som störst i norr, 19–23 meter, där det finns lera ner till nivån ca -25. Söderut längs älven minskar mäktigheten och vid km 19/250 finns enbart friktionsjord vid älvens djupare delar ända till undersökningsområdets södra gräns.

Skjuvhållfastheten i leran ökar mot djupet och varierar mellan 27–73 kPa. Närmast älvbotten, ner till ca 1–3 meters djup, är skjuvhållfastheten lokalt lägre, 3 kPa med större ökning mot djupet. Tungheten är uppmätt till 16,2–17,7 kN/m³. Lerans vattenkvot och konflytgräns är uppmätta till 39–69 % respektive 32–68 %. Leran är mestadels högsensitiv med uppmätt sensitivitet på 23–317. Leran bedöms som kvick vid strandlinjen och undervattenshyllan (från ca 2 m djup) i höjd med delområdena Norra och Centrala.

Leran är överkonsoliderad genom hela jordprofilen med OCR på 2,9–16. OCR är minskande med djupet.

5.5 Lerans anisotropa egenskaper

Lerans anisotropa egenskaper har utvärderats för att kunna tillgodoräknas i stabilitetsberäkningarna. Som underlag för utvärderingen har 15 aktiva triaxialförsök fördelade på 5 olika punkter utförts. En sammanställning av försöken redovisas i Tabell 1.

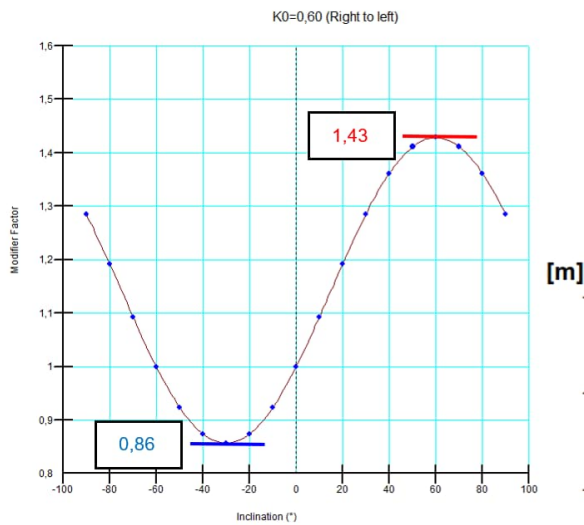
Anisotropieffekten har utvärderats enligt SGI Vägledning 8 som kvoten mellan skjuvhållfastheten (τ_α) vid skjuvning mot en viss vinkel (α°) mot horisontalplanet, och skjuvhållfastheten (τ_{hor}) vid skjuvning mot horisontalplanet ($\alpha=0^\circ$).

Aktiva triaxialförsök antas ge den maximala skjuvhållfastheten vilket motsvarar skjuvhållfastheten vid skjuvning 60° ($\tau_\alpha=60^\circ$) mot horisontalplanet, aktiv skjuvhållfasthet.

Den valda skjuvhållfastheten antas ge en skjuvhållfasthet som motsvarar skjuvhållfastheten mot horisontalplanet, direkt skjuvhållfasthet (τ_{hor}) ($\alpha=0^\circ$).

Från utvärderad anisotropieffekt (τ_α/τ_{hor}) har förhållandet mellan horisontal- och vertikalspänning (K_0) utvärderats enligt Skredkommissionen Rapport 3:95 tabell 5:1. I stabilitetsberäkningarna ökas således skjuvhållfastheten i aktivzonen och minskas i passivzonen beroende på glidyta lutning, se Figur 5 för exempel vid $K_0=0,6$.

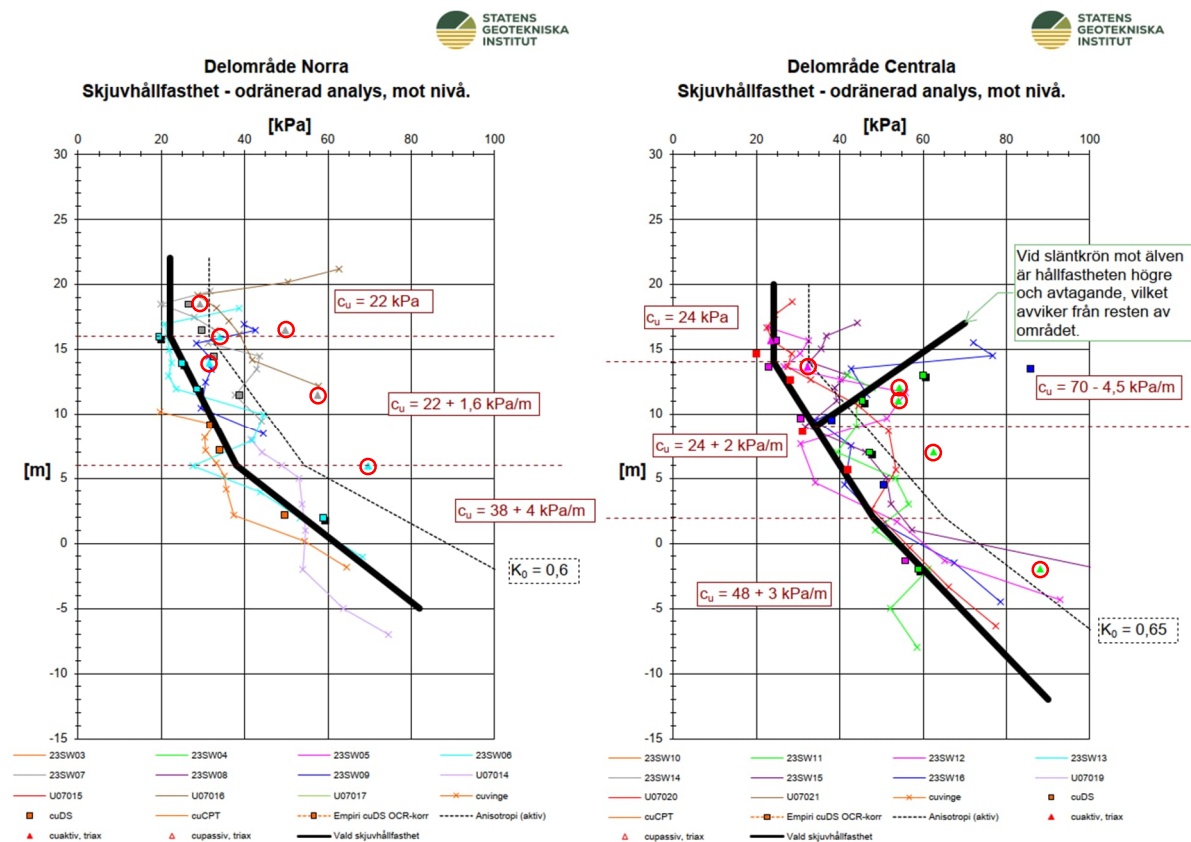
Anisotropieffekten och motsvarande K_0 redovisas i Tabell 1. För en sammanställning av direkt och aktiv skjuvhållfasthet och vald anisotropieffekt (K_0) se Figur 6 och Figur 7, samt Bilaga 1. Anisotropieffekt för respektive delområde har valts grafiskt med stöd av värden enligt Tabell 1.



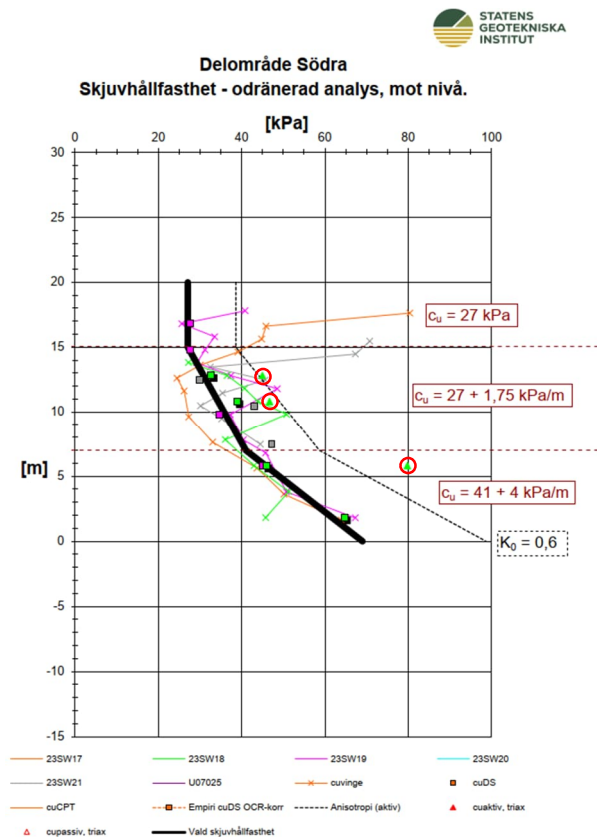
Figur 5: Diagram visande förändring av skjuvhållfasthet till följd av anisotropi vid $K_0=0,6$.

Tabell 1: Sammanställning av utförda triaxialförsök samt resulterande anisotropieffekt och K_0 .

Område	Borrhål	Djup (m)	Skjuvhållfasthet från aktiva triaxialförsök, $\tau_{\alpha=60^\circ}$, [kPa]	Vald skjuvhållfasthet, τ_{hor} , [kPa]	Anisotropieffekt, $\tau_{\alpha=60^\circ} / \tau_{hor}$	K_0
Norra	23SW06	4	34	22	1,55	0,53
Norra	23SW06	6	31,5	25,2	1,25	0,73
Norra	23SW06	14	69,7	38	1,83	0,39
Norra	23SW07	3	29,3	22	1,33	0,67
Norra	23SW07	5	49,8	22	2,26	0,26
Norra	23SW07	10	57,5	29,2	1,97	0,34
Centrala	23SW11	7	54,3	28	1,94	0,35
Centrala	23SW11	8	54,1	30	1,80	0,41
Centrala	23SW11	12	62,5	38	1,64	0,48
Centrala	23SW11	21	88,1	60	1,47	0,57
Centrala	23SW12	6	32,3	25	1,29	0,70
Södra	23SW18	5	45	30,5	1,48	0,57
Södra	23SW18	7	46,7	34	1,37	0,64
Södra	23SW18	12	79,8	45	1,77	0,42



Figur 6: Skjuvhållfasthet för delområde Norra och Centrala med aktiva triaxialförsök markerade med röd ring.



Figur 7: Skjuvhållfasthet för delområde Södra med aktiva triaxialförsök markerade med röd ring.

I Norra delområdet är anisotropieffekten (aktivzonen) 25 % till 126 %. Värdena indikerar inte någon tydlig trend avseende förändring mot djup. I område Centrala är anisotropieffekten 29 % till 94 % med en något avtagande trend mot djupet. I område Södra är anisotropieffekten 37 % till 77 % utan tydlig trend avseende förändring mot djup.

6 Hydrogeologiska förhållanden

6.1 Vattennivå Göta älv

Vattenståndet i Göta älv i höjd med området regleras av slussarna i Lilla Edet där dämningshöjden i älven norr om slussarna har nivån +7,6 (HHW) och sänkningshöjden +6,6 (LLW). Medelvattennivån (MW) i Göta älv är i området +7,5. Dessa nivåer gäller även vid det aktuella utredningsområdet.

6.2 Hydrogeologiska zoner

Vid älven och i strandområdet indikerar portrycksmätningar att hydrostatiska portrycksförhållanden råder genom hela jordprofilen med utgångspunkt från vattennivån i älven. Där marknivån ökar inåt land höjs också grundvattenytan och ligger kvar nära markytan. I friktionsjorden under leran bibehålls däremot grundvattentrycket motsvarande älvens nivå inom hela området. Detta gör att portrycksökningen genom leran inåt land blir hydrodynamisk med portrycksökningar som är lägre än hydrostatiska.

Generellt kan grundvatten- och portrycksförhållandena inom landområdet delas in i 4 hydrogeologiska zoner.

Övre akvifär

Närmast markytan, i torrskorpan, finns en övre akvifär där regnvatten infiltrerar. Ytliga skruvprovtagningar i området indikerar en vattennivå i den övre akvifären som ligger ca 1–2 meter under markytan.

Övre akvitard

Leran under torrskorpan utgör en akvitard där hydrodynamiska förhållanden mestadels råder, där vatten från ovanliggande akvifär sakta infiltrerar. Närmast torrskorpan är portrycksökningen generellt hydrostatisk men portrycket övergår snabbt till att öka hydrodynamiskt mot djupet med en portrycksökning på ca 4–7 kPa/m.

Undre akvitard

Där lermäktigheten i området är stor fortsätter portrycket öka jämnt, mindre än hydrostatiskt, ner till lerans underkant. Där lermäktigheten är mindre återfinns en undre akvitard ca 1–4 meter närmast lerans underkant. I den undre akvitarden övergår portrycket till att minska med djupet med upp till 8 kPa/m. Gemensamt för området är att portrycket i de nedre delarna av leran ställer in sig mot grundvattentrycket som råder i friktionsjorden under leran.

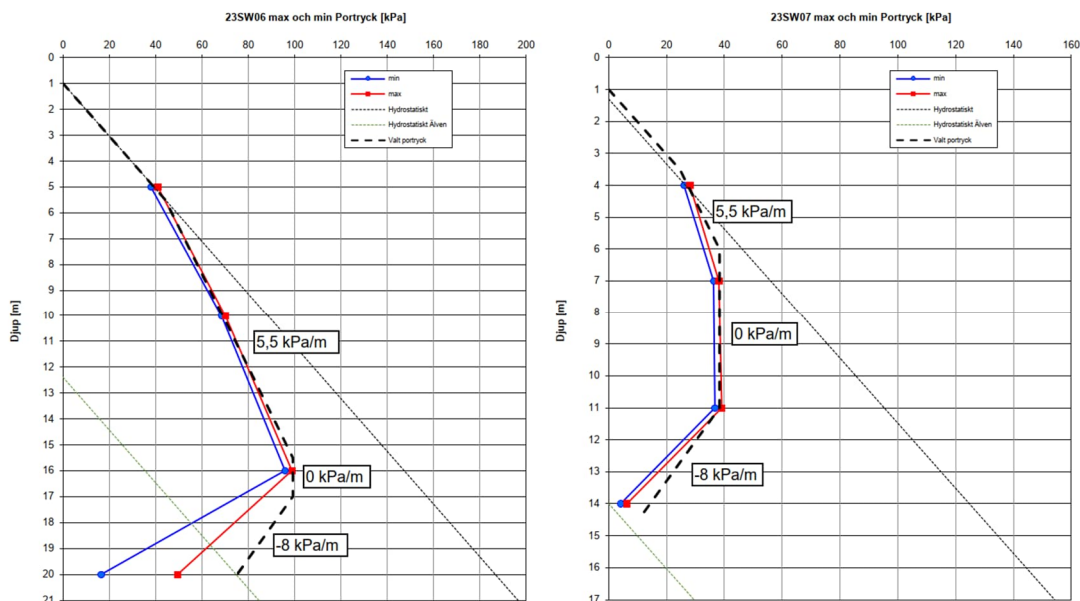
Undre akvifär

Friktionsjorden under leran utgör en undre akvifär där grundvattentrycket är hydrostatiskt från en nivå motsvarande den rådande vattennivån i Göta älv. Den undre akvifären bedöms därmed vara relativt genomsläpplig och stå i direkt kontakt med älven. Kontakten bedöms främst finnas i den södra delen av området där friktionsjord finns direkt i botten av älven.

6.3 Portrycksprofil, Norra

I delområdet Norra finns följande portrycksstationer installerade, se Figur 8 och ritning G-10-2-003 tillhörande MUR (18900ORA01):

- Vid släntrön (23SW06): grundvattenyta ca 1 meter under markytan med hydrostatisk portrycksförändring ner till ca 5,5 meters djup följt av hydrodynamisk portrycksförändring ner till underkant lera.
- Ca 30 meter från släntrön (23SW07): grundvattenyta ca 1 meter under markytan med hydrostatisk portrycksförändring ner till ca 3,5 meters djup följt av hydrodynamisk portrycksförändring ner till underkant lera.



Figur 8: Portrycksprofil för 23SW06 och 23SW07.

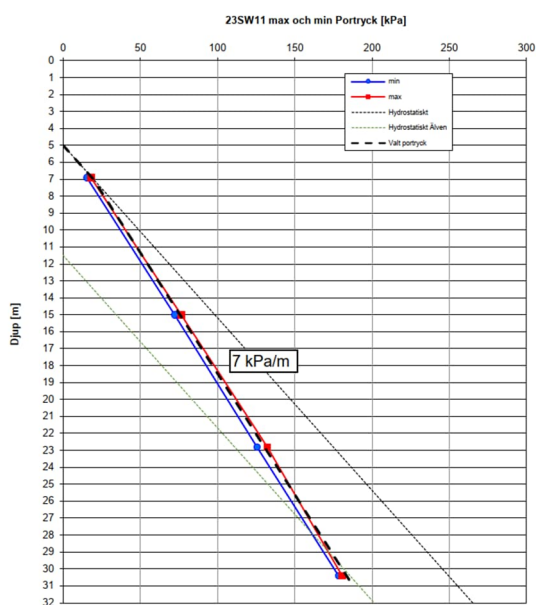
Vid portrycksstationen 23SW06, som är belägen nära släntrön, ligger grundvattenytan ca 1 meter under markytan, vilket sammanfaller med underkant torrskorpelera. Portrycksförhållandena för högsta uppmätta värden i lera är här inledningsvis hydrostatiska till ca 5 meter under markytan. Därunder övergår portrycksförhållandena till hydrodynamiska med en portrycksökning på ca 5,5 kPa/m ner till ca 6 meter från underkant lera. Där under, ner till friktionsjorden, minskar portrycken med omkring 8 kPa/m för att sammanfalla med rådande grundvattentryck i friktionsjorden som motsvarar de hydrostatiska förhållandena som råder i älvområdet, som utgår från älvens medelvattennivå +7,5.

Vid portrycksstationen 23SW07, som är belägen ca 30 meter från släntrön ligger grundvattenytan ca 1 meter under markytan och sammanfaller då även här med underkant torrskorpelera. Portrycksförhållandena för högsta uppmätta värden i lera är inledningsvis hydrostatiska till ca 3,5 meter under markytan. Därunder övergår portrycksförhållandena till hydrodynamiska med en portrycksökning på ca 5,5 kPa/m ner till ca 6 meters djup. Härifrån är portrycken i stort sett konstanta ner till ca 3 meter från underkant lera. Därifrån minskar portrycket ner till friktionsjorden med omkring 8 kPa/m för att sammanfalla med grundvattentrycket i friktionsjorden, vilket motsvarar de hydrostatiska förhållandena som råder i älvområdet.

6.4 Portrycksprofil, Centrala

I delområde Centrala finns följande portrycksstationer installerade, se Figur 9 och ritning G-10-2-005 tillhörande MUR (18900ORA01):

- Vid släntrön (23SW11 och U07019): grundvattenyta ca 5 meter under markytan med hydrodynamisk portrycksförändring (+7 kPa/m) ner till underkant lera.
- Ca 50 m från släntrön (U07020): grundvattenyta ca 1,5 meter under markytan med hydrostatisk portrycksförändring ner till ca 6 meters djup följt av hydrodynamisk portrycksförändring (+5 kPa/m) ner till underkant lera.



Figur 9: Portrycksprofil för 23SW11.

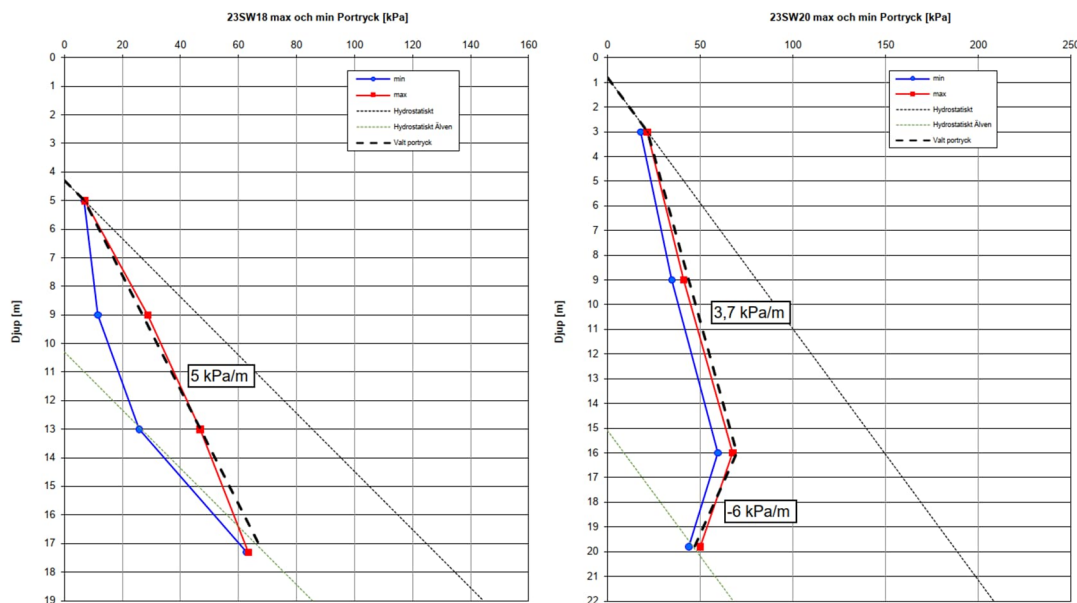
Vid portrycksstationerna som är belägna vid släntrön ligger grundvattenytan ca 5 meter under markytan, vilket är ca 2 meter under torrskorpeleran. Portrycksförhållandena för högsta uppmätta värden i leran är här hydrodynamiska med en portrycksökning på 7 kPa/m ner till underliggande friktionsjord. I friktionsjorden motsvarar grundvattentrycket de hydrostatiska förhållandena som råder i älvområdet som utgår från älvens medelvattennivå +7,5.

Vid portrycksstationen som ligger 50 meter inåt land från släntrön ligger grundvattenytan ca 1,5 meter under markytan och sammanfaller här med underkant torrskorpelera. Portrycksförhållandena för högsta uppmätta värden genom leran är här inledningsvis hydrostatiska till ca 4 meter under grundvattenytan. Därunder övergår portrycksförhållandena till hydrodynamiska med en portrycksökning på ca 5 kPa/m ner till underliggande friktionsjord. I friktionsjorden motsvarar grundvattentrycket de hydrostatiska förhållandena som råder i älvområdet.

6.5 Portrycksprofil, Söder

I delområde Söder finns följande portrycksstationer installerade, se Figur 10 och ritning G-10-2-007 tillhörande MUR (18900ORA01):

- Vid slänkrön (23SW18): grundvattenyta ca 4,5 meter under markytan med hydrostatisk portrycksförändring ner till ca 5 meters djup följt av hydrodynamisk portrycksförändring (+5 kPa/m) ner till underkant lera.
- Ca 80 meter från slänkrön (23SW20): grundvattenyta ca 1 meter under markytan med hydrostatisk portrycksförändring ner till ca 3 meters djup följt av hydrodynamisk portrycksförändring ner till underkant lera.



Figur 10: Portrycksprofil för 23SW18 och 23SW20.

Vid portrycksstationen 23SW18, som är belägen vid slänkrön ligger grundvattenytan ca 4,5 meter under markytan vilket är ca 1,5 meter under torrskorpeleran. Portrycksförhållandena för högsta uppmätta värden genom leran är här hydrodynamiska med en portrycksökning på 5 kPa/m ner till underliggande friktionsjord. I friktionsjorden motsvarar grundvattentrycket de hydrostatiska förhållandena som råder i älvområdet som utgår från älvens medelvattennivå +7,5.

Vid portrycksstationen 23SW20, som ligger 80 meter inåt land från slänkrön ligger grundvattenytan ca 1 meter under markytan och sammanfaller här med underkant torrskorpelera. Portrycksförhållandena för högsta uppmätta värden genom leran är här inledningsvis hydrostatiska till ca 2 meter under grundvattenytan. Därunder övergår portrycksförhållandena till hydrodynamiska med en portrycksökning på ca 3,7 kPa/m ner till ca 4,5 meter från underkant lera. Härifrån, ner till underliggande friktionsjord, minskar portrycken med omkring 6 kPa/m för att sammanfalla med grundvattentrycket i friktionsjorden som motsvarar de hydrostatiska förhållandena som råder i älvområdet.

7 Kartering av kvicklera

Kartering av kvicklera har utförts enligt SGI:s Excel-verktyg "Utvärderingsark kvicklera CPT och Tr". Förekomst av kvicklera utvärderas baserat på laboratorieförsök på ostörda prover, utförda vingförsök samt registrerad resistivitet samt empiriska samband avseende mantelfriktion vid utförda CPTU-R-sonderingar. Resultaten från resistivitetmätning med CPTU-R ger inte förekomst av kvicklera utan visar endast på om förutsättningar för uppkomst av kvicklera finns.

Resistivitetmätningarna visar erfarenhetsmässigt att det finns förutsättning för högsensitiv- eller kvicklera när resistiviteten är högre än 5 ohm/m. Med hänvisning till detta visar resistivitetmätningarna att förutsättningarna för kvicklera finns genomgående i hela området.

Tolkningen av kvicklera baserat på mantelfriktionen från CPTU-R-sonderingarna visar på god samstämmighet med de ostörda provtagningarna, se Bilaga 2.

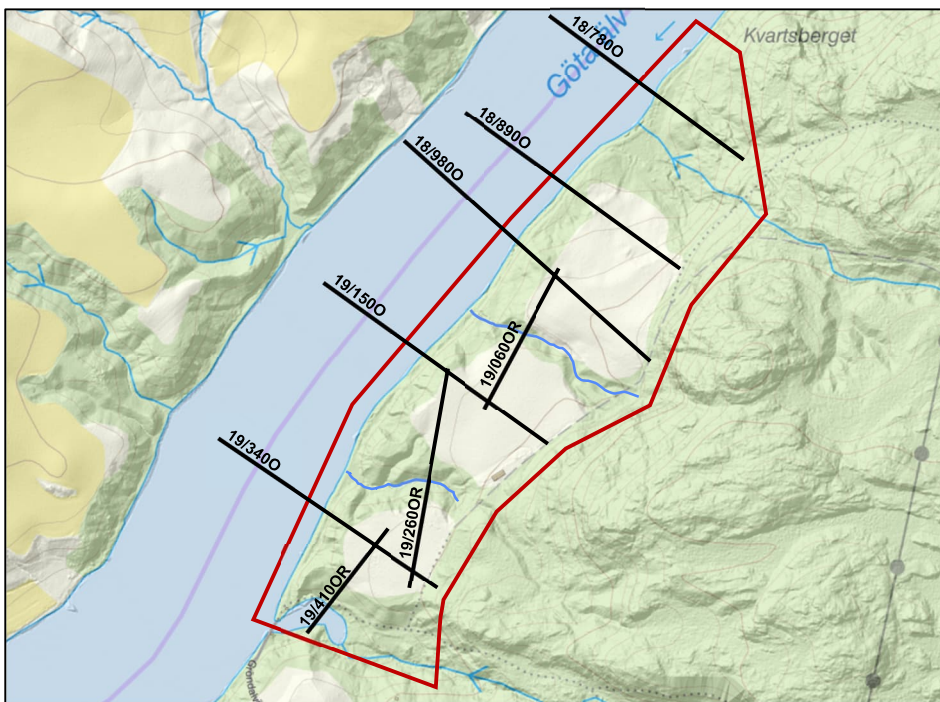
De omrörda vingförsök som utförts underskattar sensitiviteten kraftigt, och har dålig samstämmighet med ostörd provtagning. De uppmätta värdena för sensitiviteten är generellt 10–25, vilket motsvarar en medelsensitiv lera.

Sammantaget visar underlagen att det inom området finns två större områden med tolkad kvicklera och två mindre områden utan kvicklera, (se ritning G-10-1-003). Den tolkade kvickleran återfinns i ett sammanhängande lager i delområde Norra, inom området för det gamla skredärret, samt i hela delområde Centrala och stora delar av delområde Södra. Kwickleran finns i lerprofilens undre del och mäktigheten varierar mellan 9–14 meter för delområde Norra och 6–19 meter för delområde Centrala och Södra. Gemensamt inom hela området är att kvicklerans underkant mestadels sammanfaller med lerans underkant, men att nivån för kvicklerans överkant varierar inom området. Detta bedöms bero på att kvicklerans utbildats underifrån med olika utbredning upp genom lerprofilen. Tidigare utförda undersökningar som gjorts i älven visar att leran här är högsensitiv men inte uppfyller kriterierna för kvicklera med avseende på omrörd skjuvhållfasthet. Övergången i plan från kvicklera till endast högsensitiv lera är osäker, men undervattenshyllan bedöms bestå av kvicklera medan slänten ner mot djupfåran bedöms som endast högsensitiv. Den tolkade kvicklerans utbredning redovisas i sektion i stabilitetsberäkningarna (se Bilaga 5 till 9).

8 Stabilitetsberäkningar

Stabilitetsberäkningar har för befintliga förhållanden utförts enligt IEG Rapport 4:2010 "Tillståndsbedömning/klassificering av naturliga slänter och slänter med befintlig bebyggelse och anläggningar". Beräkningarna är fördelade på 8 sektioner utförda med odränerad och kombinerad analys enligt totalsäkerhetsmetoden, se Figur 11.

Stabilitetsberäkningarna är utförda med programmet Geostudio SLOPE/W 2023.1.2, version 23.1.2.11.



Figur 11: Översiktsbild över beräknade sektioner (karta från Lantmäteriets karttjänst, 2024).

8.1 Krav på säkerhetsfaktor

Stabilitetsutredningen uppfyller nivån fördjupad utredning och då gäller följande krav på totalsäkerhetsfaktor enligt tabell 4.2 i IEG rapport 4:2010:

$$F_c \geq 1,4 - 1,3$$

$$F_{\text{komb}} \geq 1,3 - 1,2$$

Inom ovanstående intervall bedöms erforderlig säkerhetsfaktor utifrån gynnsamma och ogynnsamma förhållandena baserat på faktorer enligt tabell 4.1a-e i IEG Rapport 4:2010. Är förhållandena övervägande gynnsamma kan således en lägre säkerhetsfaktor väljas inom angivet intervall än vid ogynnsamma förhållanden.

Utförd utvärdering av relevanta faktorer för val av erforderlig säkerhetsfaktor framgår av Bilaga 4.

Sammantaget har mycket geotekniska undersökningar och avancerade lab-försök utförts vilket normalt sett gör att erforderlig säkerhetsfaktor kan väljas lägre inom angivet intervall. Dock förekommer kvicklera i stora delar av området

vilket gör att även mindre skred kan utlösa stora sekundära skred med stora konsekvenser som följd. Därför har erforderlig säkerhetsfaktor valts i mitten av intervallet:

$$F_c \geq 1,35$$

$$F_{\text{komb}} \geq 1,25$$

8.2 Valda parametrar

Vid sammanställning av jordmodell har jordparametrarnas förhållande både mot djup och nivå analyserats. Mot nivå ger en bättre samstämmighet för landområdena (delområde Norra, Centrala och Södra) medan mot djup ger en bättre samstämmighet för området under älven och i strandlinjen (delområde Älv). Parameterval för stabilitetsberäkningarna har därför gjorts utifrån denna uppdelning inom området.

Generellt är samstämmigheten mellan parametrar framtagna med olika metoder god även om viss spridning finns i vissa delar. Vid val av skjuvhållfasthet har störst vikt lagts vid direkta skjuvförsök och vingförsöken. I området överensstämmer dock även vingförsök och konförsök relativt bra. En sammanställning av härledda värden samt valda värden inom respektive delområde redovisas i Bilaga 1.

Lerans anisotropa egenskaper har endast beaktats för delområdena Norra, Centrala och Södra. För delområde Älv har inga nya triaxialförsök utförts och de tidigare utförda försöken gav spridda resultat och undersökningspunkterna finns mestadels vid den motsatta sidan av älven. Tidigare utförda passiva triaxialförsök visade på högre värden än den direkta skjuvhållfastheten, men till följd av undersökningarnas placering har detta inte beaktats. Anisotropi har ansatts i älvleran motsvarande den på land vilket medför att skjuvhållfastheten minskar i passivszon vilket då är på säkra sidan.

En sammanställning av valda parametrar som använts inom samtliga delområden redovisas i Tabell 2.

Tabell 2: Sammanställning av valda materialparametrar för samtliga delområden.

Jordlager	Materialegenskaper	Valda värden
Torrskorpelera	Tunghet, γ	17,5 kN/m ³
	Effektiv tunghet under GW, γ'	7,5 kN/m ³
	Odränerad skjuvhållfasthet, c_u	30 kPa
	Inre friktionsvinkel, ϕ'	30 grader
	Kohesionsintercept, c'	3 kPa
Erosionsskydd	Tunghet, γ	18 kN/m ³
	Effektiv tunghet under GW, γ'	10 kN/m ³
	Friktionsvinkel	42 grader
Friktionsjord	Tunghet, γ	18 kN/m ³
	Effektiv tunghet under GW, γ'	10 kN/m ³
	Friktionsvinkel	38 grader

Beräkningarna har utförts med uppsprucken torrskorpa som antagits att till hälften vara fylld med vatten, vilket i praktiken innebär att den odränerade skjuvhållfastheten är 0 kPa.

8.2.1 Valda materialparametrar, Älv

För sammanställning av valda materialparametrar för delområde Älv, se Tabell 3.

Tabell 3: Sammanställning av valda materialparametrar för delområdet Älv.

Jordlager	Materialegenskaper	Valda värden
Lera 01A (älv) (på land)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0 (passivzon)	17 kN/m ³ 7 kN/m ³ 26,7+2,1d kPa 30 grader 2,67+0,21 kPa 0,6
Lera 01B (älv) (älvbotten)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0 (passivzon)	17 kN/m ³ 7 kN/m ³ 3+10d kPa 30 grader 0,3+1 kPa 0,6
Lera 02 (älv) (från 3 m djup)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0 (passivzon)	17 kN/m ³ 7 kN/m ³ 33+2,1d kPa 30 grader 3,3+0,21 kPa 0,6

8.2.2 Valda materialparametrar, Norra

För sammanställning av valda materialparametrar för delområde Norra, se Tabell 4.

Tabell 4: Sammanställning av valda materialparametrar för delområdet Norra.

Jordlager	Materialegenskaper	Valda värden
Lera 03 (norra)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	17,5 kN/m ³ 7,5 kN/m ³ 22 kPa 30 grader 2,2 kPa 0,6
Lera 04 (norra) (från nivå +16)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	16,6 kN/m ³ 6,6 kN/m ³ 22+1,6d kPa 30 grader 2,2+0,16d kPa 0,6
Lera 05 (norra) (från nivå +6)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	17,5 kN/m ³ 7,5 kN/m ³ 38+4d kPa 30 grader 3,8+0,4 kPa 0,6

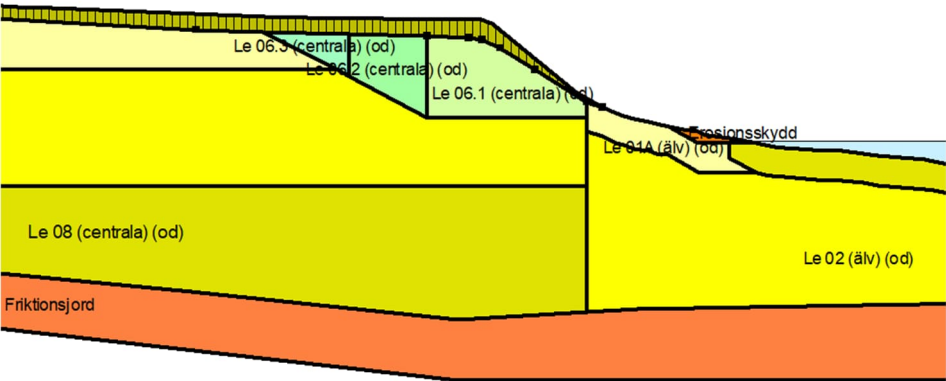
8.2.3 Valda materialparametrar, Centrala

För sammanställning av valda materialparametrar för delområde Centrala, se Tabell 5.

Tabell 5: Sammanställning av valda materialparametrar för delområdet Centrala.

Jordlager	Materialegenskaper	Valda värden
Lera 06 (centrala)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	16,6 kN/m ³ 6,6 kN/m ³ 24 kPa 30 grader 2,4 kPa 0,65
Lera 06.1 (centrala) (zon vid slänkrön, ner till nivå +9)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	17,6 kN/m ³ 7,6 kN/m ³ 70-4,5d kPa 30 grader 7-0,45d kPa 0,65
Lera 07 (centrala) (från nivå +14)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	16,6 kN/m ³ 6,6 kN/m ³ 24+2d kPa 30 grader 2,4+0,2d kPa 0,65
Lera 08 (centrala) (från nivå +2)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	17,4 kN/m ³ 7,4 kN/m ³ 48+3d kPa 30 grader 4,8+0,3d kPa 0,65

Lera 6.1 är en lokal indelning vid slänkrön där skjuvhållfasthet och tunghet avviker från delområdet i övrigt, se Figur 12. Lera 6.2 och 6.3 i figuren syftar till en successiv övergång i horisontalled till lerans parametrar i övriga området. Kontrollberäkning har även utförts utan den särskilda zonen vid slänkrön.



Figur 12: Urklipp från beräkningsmodellen för sektion 19/1500 som visar indelning och övergång för parameterval.

8.2.4 Valda materialparametrar, Södra

För sammanställning av valda materialparametrar för delområde Södra, se Tabell 6.

Tabell 6: Sammanställning av valde materialparametrar för delområdet Södra.

Jordlager	Materialegenskaper	Valda värden
Lera 09 (södra)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	16,6 kN/m ³ 6,6 kN/m ³ 27 kPa 30 grader 2,7 kPa 0,6
Lera 10 (södra) (från nivå +15)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	16,6 kN/m ³ 6,6 kN/m ³ 27+1,75d kPa 30 grader 2,7+0,175d kPa 0,6
Lera 11 (södra) (från nivå +7)	Tunghet, γ Effektiv tunghet under GW, γ' Odränerad skjuvhållfasthet, c_u Inre friktionsvinkel, ϕ' Kohesionsintercept, c' Anisotropi, K_0	17 kN/m ³ 7 kN/m ³ 41+4d kPa 30 grader 4,1+0,4d kPa 0,6

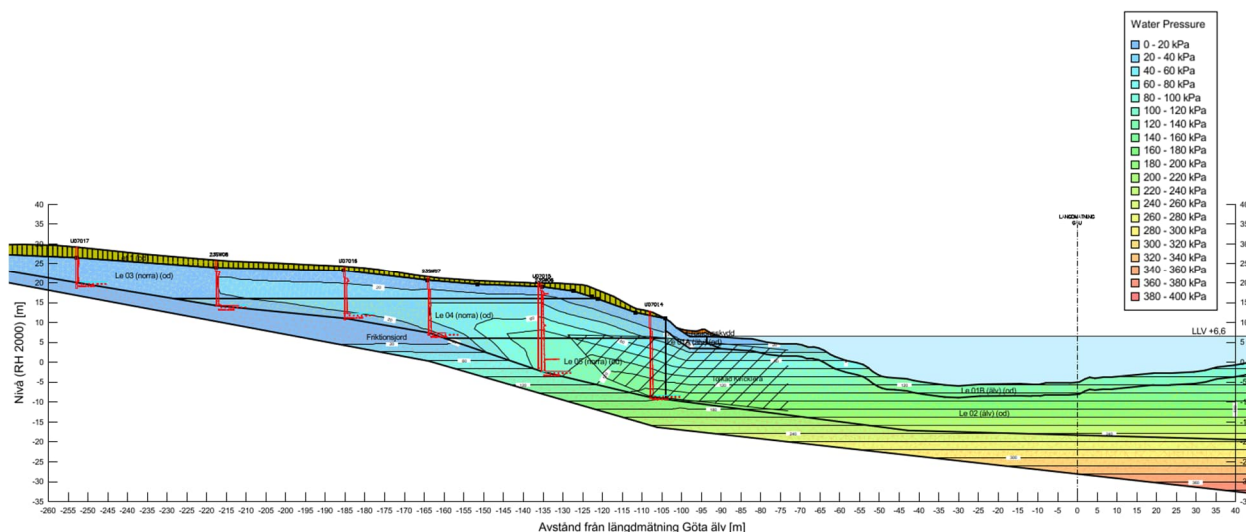
8.3 Valda portryck

I anslutning till älven har en fri vattennivå antagits till +6,6, vilket representerar sänkingsgränsen vid Lilla Edets kraftverk, med en hydrostatisk portrycksökning under älvbotten. Resultatet av utvärderade portrycksförhållanden redovisas i sin helhet i Bilaga 3.

8.3.1 Valda portryck, Norra

Där torrskorpa förekommer inom delområdet antas grundvattenytan sammanfalla med underkant torrskorpa. I sektion 18/890O antas grundvattenytan sammanfalla med markytan. I sektion 18/780O antas grundvattenytan vara svagt ökande med avståndet från älven. Detta då ingen information finns här avseende grundvattenytans läge.

Hydrostatiskt portryck motsvarande det som råder under älven har valts för friktionsjorden under leran. Portrycksökningen genom leran med djupet har valts till hydrostatiskt ner till 2–4 meter under grundvattenytan följt av 5,5 kPa/m genom huvuddelen av leran. Där lermåktigheten är liten har en portrycksminskning valts för leran i anslutning till friktionsjorden för att portrycket ska sammanfalla med det som råder i friktionsjorden. Portrycksmodellen som använts i sektion 18/980O redovisas i Figur 13 nedan.

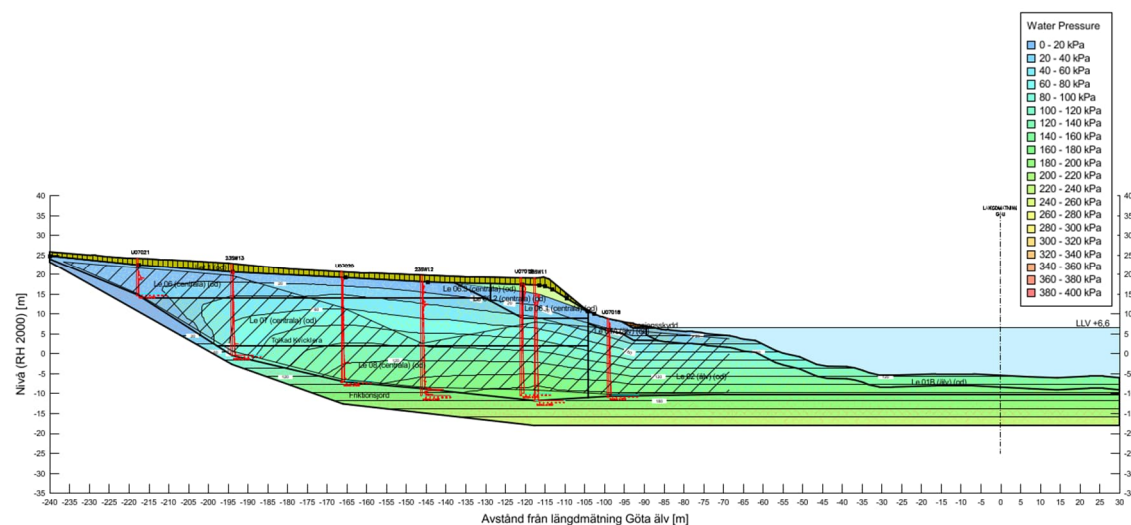


Figur 13: Portrycksmodell för stabilitetsberäkningarna i sektion 18/980O (skrafferad yta visar bedömd kvicklera)

8.3.2 Valda portryck, Centrala

Generellt inom delområdet antas grundvattenytan sammanfalla med underkant torrskorpa. Undantaget är i anslutning till släntkrön mot älven där grundvattenytan har valts till att ligga något lägre än underkant torrskorpa.

Hydrostatiskt portryck motsvarande det som råder under älven har valts för friktionsjorden under leran. Portrycksökningen genom leran med djupet har valts till 7 kPa/m genom hela lerprofilen i anslutning till släntkrön. Med större avstånd från släntkrön övergår portrycksökningen till att vara hydrostatisk ner till ca 4 meter under grundvattenytan, som följs av 4,7 kPa/m genom resten av lerprofilen. Där lermäktigheten är liten har en portrycksminskning valts för leran i anslutning till friktionsjorden för att portrycket ska sammanfalla med det som råder i friktionsjorden. Portrycksmodellen som använts i sektion 19/150O redovisas i Figur 14 nedan.

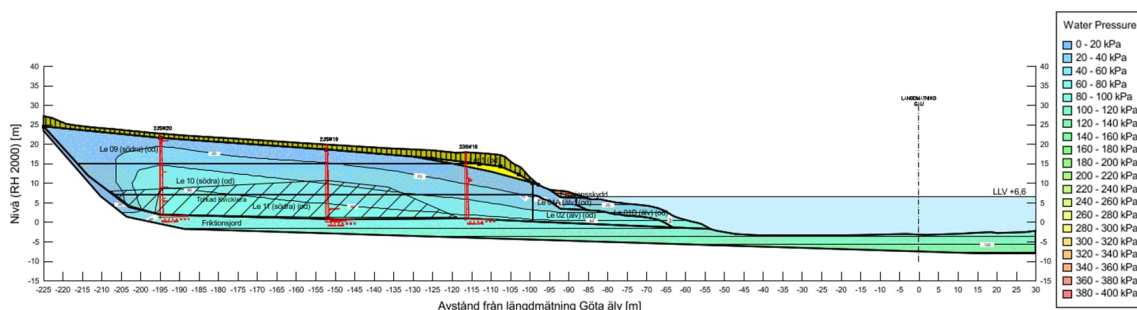


Figur 14: Portrycksmodell för stabilitetsberäkningarna i sektion 19/150O (skrafferad yta visar bedömd kvicklera).

8.3.3 Valda portryck, Södra

Generellt inom delområdet antas grundvattenytan sammanfalla med underkant torrskorpa. Undantaget är i anslutning till slänkrön mot älven där grundvattenytan har valts till att ligga något lägre än underkant torrskorpa.

Hydrostatiskt portryck motsvarande det som råder under älven har valts för friktionsjorden under leran. Portrycksökningen genom leran med djupet har valts till 5 kPa/m genom hela lerprofilen i anslutning till slänkrön. Med större avstånd från slänkrön övergår portrycksökningen till att vara hydrostatisk ner till ca 2 meter under grundvattenytan, som följs av 3,7 kPa/m genom resten av lerprofilen. Där lermäktigheten är liten har en portrycksminskning valts för leran i anslutning till friktionsjorden för att portrycket ska sammanfalla med det som råder i friktionsjorden. Portrycksmodellen som använts i sektion 19/3400O redovisas i Figur 15 nedan.



Figur 15: Portrycksmodell för stabilitetsberäkningarna i sektion 19/3400O (skrafferad yta visar bedömd kvicklera).

8.4 Valda laster

Då inga byggnader eller anläggningar finns i området har inga lastar medtagits i beräkningarna.

8.5 Beräkningsresultat

Nedan följer en sammanställning av resultaten från utförda beräkningar för befintliga förhållanden för respektive delområde. Beräkningsresultaten i sin helhet redovisas i Bilaga 5 (En sammanställning av beräkningsresultaten per sektion som inkluderar känslighetsanalyser och åtgärder redovisas i Bilaga 9).

8.5.1 Beräkningsresultat, Norra

En sammanställning av beräkningsresultaten för befintliga förhållanden inom delområde Norra redovisas i Tabell 7.

Tabell 7: Sammanställning av resultaten från utförda stabilitetsberäkningar i delområde Norra.

Sektion/Fall	Beskrivning	Säkerhetsfaktor
18780OUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	1,73
18780OKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	1,57
18890OUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	3,24
18890OKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	1,93
18980OUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	1,26
18980OKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	1,14
19060ORUTB02	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$. Norra ravinslätten.	1,80
19060ORKTB02	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$. Norra ravinslätten.	1,43

Av beräknade sektioner i delområde Norra är det endast sektion 18/980O, odränerad- och kombinerad analys, som inte uppnår erforderlig säkerhetsfaktor för befintliga förhållanden.

Kritiska glidytor för sektion 18/980O, både odränerad- och kombinerad analys, skär lera som tolkats som kvicklera. Detta innebär att vid ett skred kan sekundära skred uppkomma, se kap 9.

Vid sektionen längst i norr (18/780) kunde inga geotekniska fältundersökningar utföras på grund av att området är otillgängligt, dock finns undersökningar sedan tidigare i älven. I sektionen har samma geotekniska förhållanden antagits som i övriga delområdet då älvpunkterna styrker detta. Vid utformning av beräkningssektionen med avseende på djup till fastbotten på land har punkter som ligger längre söder ut använts. Valda djup bedöms vara betydligt större än de verkliga förhållandena då berg i dagen finns i direkt anslutning norr om sektionen. Dessa konservativa antaganden sammanvägt med betryggande framräknade säkerhetsfaktorer gör att sektionen bedöms vara tillfredställande.

8.5.2 Beräkningsresultat, Centrala

En sammanställning av beräkningsresultaten för befintliga förhållanden inom delområde Centrala redovisas i Tabell 8.

Tabell 8: Sammanställning av resultaten från utförda stabilitetsberäkningar i delområde Centrala.

Sektion/Fall	Beskrivning	Säkerhetsfaktor
19060ORUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Södra ravinslätten.	2,07
19060ORKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Södra ravinslätten.	1,28
19150OUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv).	1,15
19150OKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv).	1,06
19150OUTO01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Utan särskild zon vid släntröen.	1,18
19150OKTO01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Utan särskild zon vid släntröen.	1,05
19260ORUTB02	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Norra ravinslätten.	1,81
19260ORKTB02	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Norra ravinslätten.	1,56

Av beräknade sektioner i delområde Centralt uppnås inte erforderlig säkerhetsfaktor i sektion 19/150O, varken för odränerad- och kombinerad analys, för befintliga förhållanden.

Kritiska glidytor för sektion 19/150O, både odränerad- och kombinerad analys, skär lera som tolkats som kvicklera. Detta innebär att vid ett skred kan mer omfattande sekundära skred uppkomma, se kap 9.

8.5.3 Beräkningsresultat, Södra

En sammanställning av beräkningsresultaten för befintliga förhållanden inom delområde Södra redovisas i Tabell 9.

Tabell 9: Sammanställning av resultaten från utförda stabilitetsberäkningar i delområde Södra.

Sektion/Fall	Beskrivning	Säkerhetsfaktor
19260ORUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$. Södra ravinslätten.	1,62
19260ORKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$. Södra ravinslätten.	1,47
19340OUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	1,40
19340OKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$.	1,09
19410ORUTB01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$. Norra ravinslätten.	2,03
19410ORKTB01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,6$. Norra ravinslätten.	1,91

Av beräknade sektioner i delområde Södra uppnås inte erforderlig säkerhetsfaktor i sektion 19/340O där det enbart är den kombinerade analysen som inte uppfyller säkerhetskraven.

Kritiska glidytor för sektion 19/340O skär inte lera som tolkats som kvicklera vilket innebär att sekundär skredutbredning inte bedöms som trolig.

9 Utvärdering primära- och sekundära skred

Utvärdering av primär skredutbredning omfattar utbredningen av de största glidyterna som inte uppfyller ställda stabilitetskrav och grundas på resultat från både kombinerad analys ($F < 1,25$) och odränerad analys ($F < 1,35$), se ritning G-10-1-003.

Sekundär skredutbredning har utvärderats enligt Metodik 1 i bilaga till Göta älvutredningen - delrapport 32 (2011). Metodiken bygger på att en begränsningslinje dras bakåt från släntfot vid det primära skredet. Begränsningslinjen har en lutning på 1:n där n är beroende av sensitiviteten i leran. För högre sensitivitet än 100 dras begränsningslinjen med lutning 1:15 och vid högre sensitivitet än 200 bedöms hela kvicklereområdet inkluderas inom det sekundära skredområdet.

Av beräknade primära skred som ej uppnår erforderlig säkerhetsfaktor är det sektion 18/9800 och 19/1500 som skär igenom kvicklera. I sektion 18/9800 är kvicklerans utbredning begränsad till släntområdet och därför bedöms inga sekundära bakåtgripande skred kunna uppkomma. Eventuellt skulle framåtgripande skred kunna uppstå vid undervattenshyllan i älven ned mot djupfåran, men det är oklart hur långt ut i älven kvickleran sträcker sig. Beroende på hur långt i sidled åt söder dessa sekundära skred skulle uppkomma, kan ytterligare sekundära skred utlösas som kommer att påverka även delområde Centrala.

I sektion 19/1500 inom delområde Centrala överstiger sensitiviteten 200 och därmed bedöms en sekundär skredutbredning kunna omfatta hela kvicklereområdets utbredning bakåt från Göta älv. Detta skulle då inkludera, förutom hela delområde Centrala, även en stor del av delområde Södra. Eftersom glidytan för primära skredet går djupare än ravinbotten bedöms ravinen inte begränsa utbredningen av en sekundär skredutveckling. Även i denna del skulle undervattenshyllan i älven kunna omfattas av framåtgripande sekundära skred.

10 Känslighetsanalys

För att undersöka hur säkerheten mot skred påverkas av ökade portrycksnivåer och erosion har känslighetsanalyser utförts.

10.1 Ökade portryck

Enligt "Riktlinjer för tekniskt arbete" ska känslighetsanalys utföras avseende förhöjt portryck med 10 kPa genom hela lerlagret. Från de sektioner där beräkningar utförts för befintliga förhållanden har 3 sektioner valts ut för känslighetsanalys avseende portrycksökning.

Då grundvattenytan genomgående i området ligger nära markytan har portrycksökningen modellerats genom en ökning med ca 10 kPa genom hela portrycksprofilen, där grundvattenytan legat kvar på befintlig nivå.

En sammanställning av resultaten från känslighetsanalysen redovisas i Tabell 10, där även förändring jämfört med säkerhetsfaktorn för kritisk glidyta vid befintliga förhållanden anges. Beräkningsresultaten redovisas i sin helhet i

Bilaga 6 där även säkerhetsfaktor för samma glidyta för befintliga förhållande redovisas.

Tabell 10: Sammanställning av resultaten från känslighetsanalys avseende höjda portryck.

Sektion/Fall	Beskrivning	Säkerhetsfaktor	Befintliga förhållanden	Förändring (%)
18980OUTK01	Odränerad analys. Ökning av portryck med 10 kPa.	1,26	1,26	0
18980OKTK01	Kombinerad analys. Ökning av portryck med 10 kPa.	1,10	1,14	-3,5
19150OUTK01	Odränerad analys. Ökning av portryck med 10 kPa.	1,15	1,15	0
19150OKTK01	Kombinerad analys. Ökning av portryck med 10 kPa.	1,00	1,06	-5,7
19340OUTK01	Odränerad analys. Ökning av portryck med 10 kPa.	1,40	1,40	0
19340OKTK01	Kombinerad analys. Ökning av portryck med 10 kPa.	1,08	1,09	-0,9

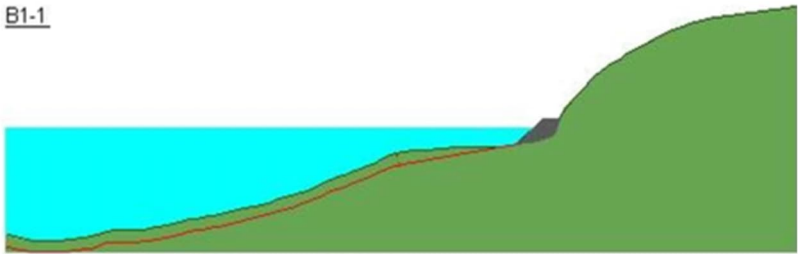
Känslighetsanalysen visar att en ökning av portrycket i leran med 10 kPa ger i de olika sektionerna en sänkning av säkerhetsfaktorn med 1–6 % vid kombinerad analys medan det inte har någon påverkan vid odränerad analys, då det inte finns friktionsjord i de kritiska glidyterna. Den relativt låga minskningen av säkerhetsfaktorn bedöms bero på att portrycken i området är lägre än hydrostatiskt för befintliga förhållanden.

10.2 Erosion

Från sektionerna där beräkningar utförts för befintliga förhållanden har de tre sektioner som inte uppnår erforderlig säkerhetsfaktor valts ut för känslighetsanalys avseende erosion, med en förändrad geometri av älvbotten som följd.

Känslighetsanalysen har utförts enligt "Riktlinjer för tekniskt arbete 6.0, DGA00XST01" där 4 olika modeller ges som alternativ för tänkbar geometrisk förändring beroende på om erosionsskydd finns och om det finns en undervattenshylla i anslutning till strandlinjen eller inte. För aktuella befintliga förhållande bedöms modell B1-1 som mest tillämpbar av dessa alternativ, där erosion med 1 och 2 meter sänkning av älvbotten har beräknats, se Figur 16.

B1-1



Exempel från sträckan Trollhättan - Lilla Edet

Figur 16 Typsektion B1-1 avseende geometriförändring genom erosion enligt DGA00XST01, "Riktlinjer för tekniskt arbete".

En sammanställning av resultaten från känslighetsanalysen redovisas i Tabell 11. Beräkningsresultaten redovisas i sin helhet i Bilaga 7.

Tabell 11: Sammanställning av resultaten från känslighetsanalysen avseende erosion.

Sektion/Fall	Beskrivning	Säkerhetsfaktor	Befintliga förhållanden	Förändring (%)
18980OUTE01	Odränerad analys. 1 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,26	1,26	0
18980OKTE01	Kombinerad analys. 1 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,14	1,14	0
18980OUTE02	Odränerad analys. 2 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,26	1,26	0
18980OKTE02	Kombinerad analys. 2 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,14	1,14	0
19150OUTE01	Odränerad analys. 1 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,15	1,15	0
19150OKTE01	Kombinerad analys. 1 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,06	1,06	0
19150OUTE02	Odränerad analys. 2 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,15	1,15	0
19150OKTE02	Kombinerad analys. 2 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,06	1,06	0
19340OUTE01	Odränerad analys. 1 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,39	1,40	-0,7
19340OKTE01	Kombinerad analys. 1 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,09	1,09	0
19340OUTE02	Odränerad analys. 2 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,39	1,40	-0,7
19340OKTE01	Kombinerad analys. 2 m erosion av älvbotten (fall B1-1).	1,09	1,09	0

Känslighetsanalysen visar att en ändring av geometrin med 1 respektive 2 meter erosion i älvbotten endast ger en marginell sänkning av säkerhetsfaktorn med ca 0–1 %. Detta beror främst på att de flesta glidytor som inte uppnår erforderlig säkerhetsfaktor vid befintliga förhållanden endast berör slänten ovan strandlinjen, och därmed inte påverkas av en förändrad geometri av älvbotten. Samtidigt visar känslighetsanalysen att erosion i älven inte har sådan påverkan att nya kritiska glidytor uppstår.

11 Åtgärdsförslag

Möjliga åtgärder som behandlats tidigare inom Göta älvutredningen är avschaktning, stödfyllning samt utökande av erosionsskydd. För denna utredning har åtgärder med avschaktning och tryckbank undersökts med omfattning så att ställda säkerhetskrav uppfylls i de kritiska delarna. De olika åtgärderna har behandlats separat. Inga beräkningar är därmed utförda för kombinationer av flera åtgärder. För omfattning av åtgärderna i plan och sektion se ritning G-10-1-004 respektive Bilaga 8.

Beräkningar med åtgärder har utförts för samtliga sektioner där erforderlig säkerhetsfaktor ej uppnåtts för befintliga förhållanden.

En sammanställning av resultaten från beräkningar med åtgärder redovisas i Tabell 12. Beräkningsresultaten redovisas i sin helhet i Bilaga 8.

Tabell 12: Sammanställning av beräkningsresultaten med åtgärder.

Sektion/Fall	Beskrivning	Säkerhetsfaktor
18980OUTA01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Avschaktning ner till nivå +17,5, 8 m in från slänten.	1,39
18980OKTA01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Avschaktning ner till nivå +17,5, 8 m in från slänten.	1,25
18980OUTA02	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Tryckbank upp till nivå +11, 6 m ut från slänten.	1,35
18980OKTA02	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Tryckbank upp till nivå +11, 6 m ut från slänten.	1,27
19150OUTA01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Avschaktning ner till nivå +18, 20 m in från bef. slänt, till nivå +16,5, 5 m in från bef. slänt samt utflackning av slänt till lutning 1:7.	1,38
19150OKTA01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Avschaktning ner till nivå +18, 20 m in från bef. slänt, till nivå +16,5, 5 m in från bef. slänt samt utflackning av slänt till lutning 1:7.	1,26
19150OUTA02	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Tryckbank upp till nivå +11,2, 15,8 m ut från slänten.	1,38
19150OKTA02	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,65$ (Centrala), 0,60 (Älv). Tryckbank upp till nivå +11,2, 15,8 m ut från slänten.	1,27
19340OUTA01	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Avschaktning med utflackning av slänt till lutning 1:6.	1,47
19340OKTA01	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Avschaktning med utflackning av slänt till lutning 1:6.	1,27
19340OUTA02	Odränerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Tryckbank för utflackning av slänt till lutning 1:6.	1,38
19340OKTA02	Kombinerad analys. Anisotropi: $K_0=0,60$. Tryckbank för utflackning av slänt till lutning 1:6.	1,28

Genomgående inom området bedöms avschaktning vara den mest kostnadseffektiva åtgärden. I större delen av området innebär detta endast att en mindre avschaktning vid släntrön och/eller utflackning av slänten behöver utföras för att erforderlig säkerhetsfaktor ska uppnås. Åtgärd med tryckbank innebär mestadels att en större mängd massor behövde lägga ut på land i anslutning släntfot för att uppnå samma resultat.

I delområde Norra (18/980O) uppnås ej erforderlig säkerhetsfaktor vid befintliga förhållanden i vare sig odränerad- eller kombinerad analys. Med avschaktning krävs att ett område 8 meter från släntkrön behöver avschaktas ned till nivå +17,5 för att erforderlig säkerhetsfaktor ska uppnås. För tryckbank som åtgärds metod krävs fyllning upp till nivå +11 vid släntfot, 6 meter ut från slänten, för att erforderlig säkerhetsfaktor ska uppnås.

I delområde Centrala (19/150O) uppnås ej erforderlig säkerhetsfaktor vid befintliga förhållanden i vare sig odränerad- eller kombinerad analys. De kritiska glidyterna för de olika analyserna skiljer sig åt kraftigt där den kombinerade analysens kritiska glidyta går förhållandevis nära markytan och bara berör jorden närmast släntkrön, medan den odränerade analysens kritiska glidyta startar längre ifrån släntkrön och då berör en större jordvolym.

För avschaktning som åtgärd innebär detta att en djup schakt nära släntkrön (5 meter) tillsammans med en utfläckning av slänten (1:7) behövs för att erforderlig säkerhetsfaktor ska uppnås för kombinerad analys. Men för att även erforderlig säkerhetsfaktor ska uppnås vid odränerad analys krävs därtill en grundare schakt med utbredning 20 meter från släntkrön.

En tryckbank behöver vara hög nära släntfot för att säkerställa att erforderlig säkerhetsfaktor uppnås vid kombinerad analys samt breda ut sig förbi befintligt erosionsskydd ut i älven för att erforderlig säkerhetsfaktor för kritiska glidytor i odränerad analys ska uppnås.

I delområde Södra (19/340O) uppnås inte erforderlig säkerhetsfaktor i kombinerad analys. Därtill är kritisk glidyta mycket nära markytan och berör endast torrskorpan. Åtgärder som krävs för att erforderlig säkerhetsfaktor ska uppnås för området, behöver därmed endast göra slänten flackare. Detta oavsett vilken åtgärds metod som väljs.

12 Sammanfattning

Det aktuella utredningsområdet som utgörs av lera begränsas av en distinkt höjdrygg i öster och norr med berg i dagen. I området finns tre partier med ängsmark där slänt mot älven är brant. Området korsas av tre raviner samt begränsas av en mindre vik i söder. I älven finns en undervattenshylla ca 25 meter ut i älven.

I norr finns ett större skredärr (sannolikt kvicklereskred) och i de branta partierna mot älven finns flertalet ytliga skredärr.

Grundvatten- och portrycksförhållandena är komplex med lägre portryck än hydrostatiskt. Detta bedöms bero på att den underliggande friktionsjorden står i direkt kontakt med älven och grundvattentrycket har en trycknivå motsvarande älvens vattenyta i hela området, vilket medför att portrycket sänks av i leran och ansluter till detta tryck i lerprofilens underkant. Hur avsänkningen ser ut i profil styrs av lerans mäktighet.

Erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,35$ och $F_{komb} \geq 1,25$, uppnås i samtliga av de 8 beräknade sektionerna förutom 18/980O, 19/150O och 19/340O. De tre sektionerna som inte har tillfredställande säkerhet har branta slänter ner mot älven och är placerade i mitten av var och en av de tre ängarna. Lägst framräknade säkerhetsfaktorer har erhållits för den mittersta ängen, sektion 19/150O, med $F_c = 1,15$ och $F_{komb} = 1,06$. De kritiska glidyterna går genom kvicklera i sektionerna 18/980O och 19/150O. Skredutbredningen för den södra ängen berör därför bara slänten och ca 30 meter in från släntkrönet. För den norra ängen är kvickleran begränsad till släntområdet och eventuella sekundära skred bedöms endast bli framåtgripande mot undervattenshyllan i älven. För den mittersta ängen skulle ett sekundärt kvicklereskred kunna påverka ett stort område ända upp till berg i dagen i öster.

Känslighetsanalyser visar att både förhöjda portryck och erosion i älven, var för sig, har en relativt liten inverkan för områdets stabilitetsförhållande. En ökning av portrycket i leran på 10 kPa ger översiktligt en sänkning av säkerhetsfaktorn med 1–6% vid kombinerad analys. Den relativt låga minskningen bedöms bero på att portrycken i området är lägre än hydrostatiskt för befintliga förhållanden. Erosion i älven har en mindre inverkan på säkerhetsfaktorn med en sänkning på mindre än 1%. Detta beror främst på att de flesta glidyter som ej uppnår erforderlig säkerhetsfaktor vid befintliga förhållanden endast berör slänten ovan strandlinjen och därmed inte påverkas av erosion i älvbotten. Samtidigt visar känslighetsanalysen att erosion i älven inte heller har sådan påverkan att ny kritiska glidyter uppstår.

Omfattning av förstärkningsåtgärder har undersökts med enbart avschaktning alternativt enbart tryckbank. Åtgärderna har getts en omfattning så att ställda stabilitetskrav uppfylls. Genomgående inom området bedöms avschaktning vara den mest kostnadseffektiva åtgärden. I merparten av området innebar detta endast en mindre avschaktning vid släntkrön och/eller utflackning av slänten behöver utföras för att erforderliga säkerhetsfaktor ska uppnås.