

JANUARI 2024
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

VATTENVERKET, LILLA EDETS KOMMUN

PM GEOTEKNIK FÖRDJUPAD STABILITETSUTREDNING

31500OPM01



COWI

ADRESS COWI AB
Vikingsgatan 3
Box 12076
402 41 Göteborg
Sverige

TEL 010 850 10 00
FAX 010 850 10 10
WWW cowi.se

JANUARI 2024
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

VATTENVERKET, LILLA EDETS KOMMUN

PM GEOTEKNIK FÖRDJUPAD STABILITETSUTREDNING

31500OPM01

PROJEKTNR.	DOKUMENTNR.	KONTAKTPERSON SGI		DIARIENR. SGI	UPPDRAGSNR. SGI
A227180	31500OPM01	Jimmy Aradi		6.2-2305-0625	10382
VERSION	UTGIVNINGSDATUM	BESKRIVNING	UTARBETAD	GRANSKAD	GODKÄND
1.0	2024-01-19	PM Geoteknik – Fördjupad stabilitetsutredning	Vilhelm Berling	Charlotte Junkers	Eli Martinez Szmyt

INNEHÅLL

1	Objekt	10
2	Syfte	11
3	Underlag för utredning	12
3.1	Utförda undersökningar	12
3.2	Övrigt underlag	13
4	Styrande dokument	14
5	Projekteringsanvisningar	15
6	Befintliga förhållanden	16
6.1	Befintliga konstruktioner	18
6.2	Tidigare jordskred	20
7	Geotekniska förhållanden	21
7.1	Jordlagerförhållanden	21
7.2	Utvärdering kvicklera	24
7.3	Hydrogeologiska förhållanden	26
8	Valda beräkningsparametrar	29
8.1	Allmänt	29
8.2	Jordmaterialparametrar	29
8.3	Anisotropifunktion	32
8.4	Portrycksmodell	34
8.5	Vattenstånd i Göta älv	39

9	Känslighetsanalys	40
9.1	Förändring av portrycksförhållanden	40
9.2	Förändrad geometri till följd av erosion	40
10	Åtgärder	41
10.1	Tryckbank/erosionsskydd	41
10.2	Avschaktning	41
10.3	Kalkcementpelare	41
11	Övriga förutsättningar, stabilitetsanalys	42
12	Beräkningar och resultat	44
12.1	Beräkningssektion 31/390O	45
12.2	Beräkningssektion 31/450O	48
12.3	Beräkningssektion 31/480O	49
12.4	Beräkningssektion 31/515O	50
13	Föreslagna åtgärder	54
14	Bedömd skredutbredning	55
15	Slutsats och rekommendationer	57

BILAGOR

Bilaga 1	Sammanställning av valda karakteristiska värden för odränerad skjuvhållfasthet
Bilaga 2	Sammanställning av vald tunghet
Bilaga 3	Sammanställning av portryck
Bilaga 4	Beräkningsparametrar
Bilaga 5	Beräkningsresultat
Bilaga 6	Val av skjuvhållfasthet

Förord

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 älv dalen.

Statens geotekniska institut, Sekretariatet för Göta älv

1 Objekt

På uppdrag av Statens geotekniska institut (SGI) har COWI AB utfört en geoteknisk utredning vid Kraftverket i Lilla Edets kommun.

Undersökningsområdet är beläget på östra sidan om Göta Älv och sträcker sig genom norra delen av Lilla Edets tätort, se Figur 1 för översiktsbild över området. Området sträcker sig från ca km 31/350 i norr till ca km 31/600 i söder, enligt Göta älvs längdmätning.



Figur 1 Översiktsbild, aktuellt område markerat med röd-streckad linje
(kartkälla: Lantmäteriet, 2023).

2 Syfte

Utredningen omfattar en fördjupad geoteknisk utredning, enligt IEG:s Rapport 4:2010. Syftet med den fördjupade stabilitetsutredningen är att klargöra områdets befintliga stabilitetsförhållanden, utreda behov av eventuella stabilitetshöjande åtgärder samt översiktligt utreda omfattningen av en eventuell åtgärd.

3 Underlag för utredning

Som underlag till denna utredning har nya- och tidigare geotekniska undersökningar nyttjats tillsammans med inmätning av markyta och batymetrisk mätning av Göta älvs botten, se kapitel 3.1 och kapitel 3.2 för detaljerad sammanställning.

3.1 Utförda undersökningar

Geotekniska fält- och laboratorieundersökningar har utförts av COWI AB under 2021–2022. Resultaten från dessa undersökningar redovisas i:

- > Vattenverket, Lilla Edets kommun, 31500ORA01, Markteknisk undersökningsrapport (MUR) Geoteknik, Uppdragsnummer COWI A227180, daterad 2023-10-20.

Inom aktuellt område har geotekniska undersökningar utförts tidigare. I Tabell 1 nedan redovisas en förteckning över tidigare utförda undersökningar, vilka nyttjats i utredningsarbetet. Undersökningarna redovisas i följande handlingar:

Tabell 1. Tidigare utförda undersökningar

Uppdrag	Utförd av	Uppdragsnummer	Datum
Göta älvutredningen, GÄU, 08, Lilla Edet-Alvhem	SGI	14087	2010-12-10
Planområde vid kv Baneret och Vävaren	Göteborgs Förorter	36202221230	1984-12-03
Väg 167 Ljungkile – Lilla Edet, delen genom Lilla Edet	SGI	2-327/39	1982-07-30
Parallellvägen	Göteborgs Förorter	36201070230	1978-05-10
Tillbyggnad av vattenverk på Kv Ljungbacken	Göteborgs Förorter	36201037230	1976-03-12
Planerade byggnader i kv Badhuset och kv Ljungkullen	HSB, Geotekniska avdelningen	5301	1974-01-11

Uppdrag	Utförd av	Uppdrags- nummer	Datum
Planerat parkeringsdäck och bostadshus, inom kv Ljungkullen och kv Badhuset	VIAK AB	65.8707	1973-10-31
Kv. Skarhallen, Lilla Edet	VIAK AB	65.8719	1969-06-30

3.2 Övrigt underlag

- > Grundkarta erhållen från beställaren, maj 2021
- > Kartmaterial erhållet från berörda ledningsägare, juli 2022
- > Batymetrisk mätning av älvbotten från 2018
- > Höjddata från Lantmäteriets WCS-tjänst, nedladdad 2020
- > Geosuite-databas med tidigare utförda undersökningspunkter erhållen från beställaren, maj 2021. **Erhållen databas har i huvudsak nyttjats som stöd i planering av fältundersökningar men har inte utgjort underlag för utvärdering och parametersammanställningar. Här har i stället handlingar enligt kapitel 3.1 använts.**
- > Förstärkningsritningar upprättade av Vattenfall. *Lilla Edets kraftstation, utbyggnad av aggregat 4, vattenvägar*, daterade 1978-07-13/1980-10-28/1980-06-18. Tillhandahållet av Vattenfall 2023-08-23 på mail.
- > SGU:s kartvisare för jordskred och raviner, februari 2023. Ett utsnitt över aktuellt område framgår av Figur 8.

4 Styrande dokument

Som underlag till denna utredning har nedanstående styrande dokument använts.

- > IEG Rapport 4:2010, Tillståndsbedömning/klassificering av naturliga slänter och slänter med befintlig bebyggelse och anläggningar. Vägledning för tillämpning av Skredkommissionens rapporter 3:95 och 2:96 (delar av).
- > IEG Rapport 6:2008 rev. 1, Tillämpningsdokument EN 1997–1 Kapitel 11 och 12, Slänter och Bankar.

5 Projekteringsanvisningar

Stabilitetsberäkningar har utförts med totalsäkerhetsmetoden. Erforderliga säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott för totalsäkerhetsmetoden krävs i IEG Rapport 4:2010. Gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar för stabilitetsberäkning har sammanställts och val av erforderlig säkerhetsfaktor har gjorts i samråd med beställaren SGI.

För Vattenverket har vald skjuvhållfasthet valts genom en ingenjörsmässig bedömning där stor tyngdpunkt har lagts på utförda avancerande laboratorieanalyser, i form av direkta skjuvförsök och odränerade triaxialförsök.

Lerans dränerade skjuvhållfasthetsparametrar har bedömts empiriskt till $\varphi' = 30^\circ$ och $c' = 0,1 \times c_u$ enligt IEG Rapport 4:2010.

Nyttjande av anisotropi har verifierats med triaxialförsök i enlighet med IEG Rapport 4:2010. Förhållandet mellan skjuvhållfastheten i det horisontella skjuvplanet och ett skjuvplan med lutningen α , har beräknats enligt:

$$\frac{\tau_\alpha}{\tau_{hor}} = \frac{K_{0(NC)} + (1 - K_{0(NC)}) \cdot \sin^2(\alpha + 30^\circ)}{0,25 + 0,75 \cdot K_{0(NC)}}$$

Markytan som använts i stabilitetsberäkningarna är i huvudsak framtagen utifrån resultat av inmätningar. Där inmätning saknas eller har bedömts vara osäker har höjddata från Lantmäteriets WCS-tjänst använts i stället. Bottennivåer i Göta älv har hämtats från batymetrisk mätning från 2018.

Stabilitetsanalysen har utförts med datorprogrammet Geostudio 2020, version 10.2.2.20559.

6 Befintliga förhållanden

Utredningsområdet sträcker sig ca 250 m utmed Göta älv. Området utgörs av bebyggd mark med en blandning av en- och flerbostadshus i upp till 4 våningar, verksamhetsbyggnader samt asfaltsbelagda gator och parkeringsytor. Området angränsar i sydväst till Lilla Edets kraftverk, i norr till bostadshus, i söder samt sydost till flerbostadshus och i nordost till en skogsdunge.

Norr om Göta älvbron finns en slänt mellan väg 167 (Brovägen) och bostadshusen, som i södra delen är gräsbevuxen och i norr bevuxen med träd, se Figur 2. Området mellan Göta älv och väg 167, norr om Göta älvbron, utgörs av en smal remsa, som är gräsbevuxen i söder och trädbevuxen i norr.



Figur 2. Område mellan Göta älv och bostadshusen, fotograferat åt norr (COWI AB, 2021).

I den östra delen av området återfinns ställvis berg i dagen, se Figur 3.

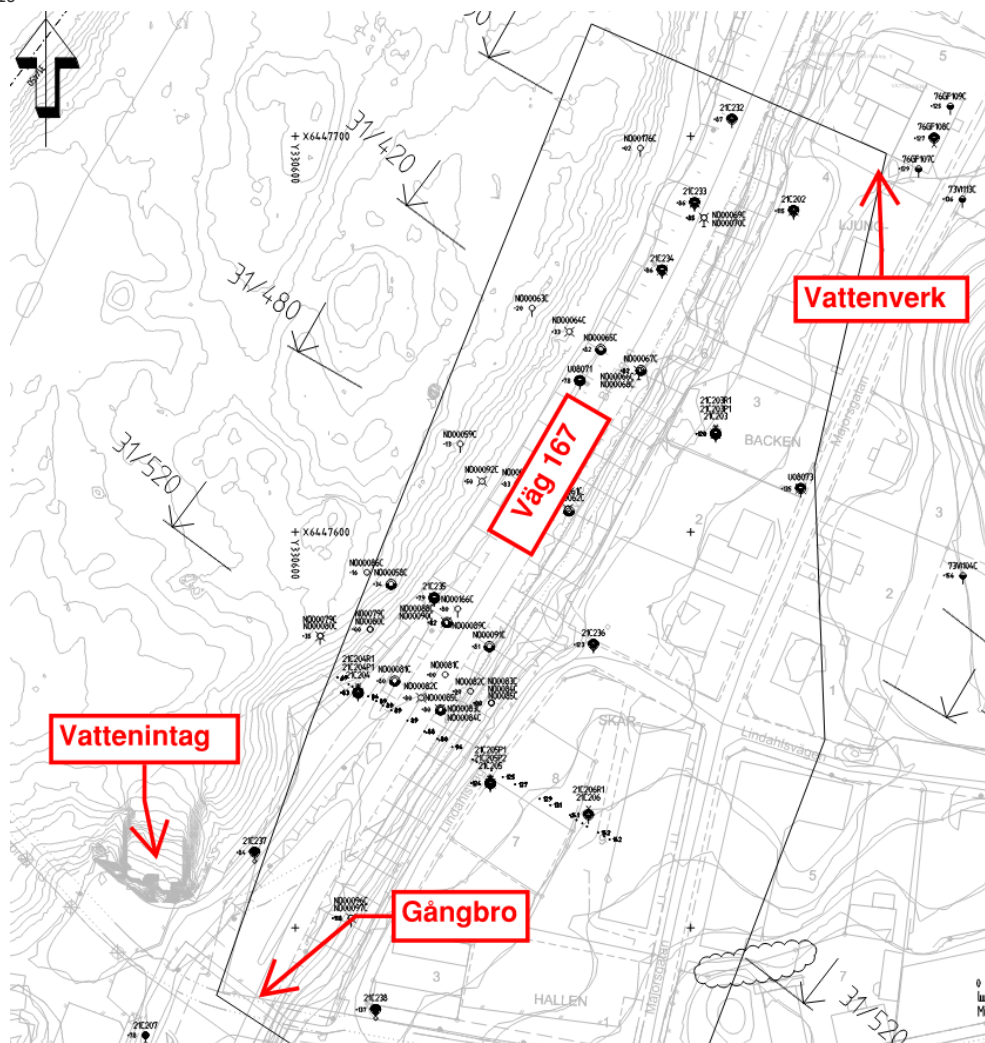


Figur 3. Berg i dagen i områdets sydöstra del (COWI AB, 2021).

I Figur 4 nedan kan topografin i området ses. Markytan inom området faller generellt från öst till väst från nivåer på ca +15 i öster ned till ca +7 vid Göta älv.

Bottennivån i Göta älv varierar i allmänhet mellan ca +1 och -5.
Undervattenslättnens lutning varierar mellan ca 1:1,3 och 1:2.

Väg 167 genomsöker området med en asfaltsyta på ca nivå +9.



Figur 4. Topografisk karta över utredningsområdet. Svart linje markerar utredningsområdet.

6.1 Befintliga konstruktioner

Förutom flera mindre lokalgator går väg 167 (Brovägen) genom området i nord-sydlig riktning utmed Göta älv. Södra delen av området, öster om väg 167 är bebyggt med flerbostadshus och norr därom återfinns två enbostadshus. I nordöstra hörnet av området återfinns Lilla Edets vattenverk. I höjd med Göta Älvbron finns en gångbro över väg 167. I Figur 4 ovan har läget på de mest betydande konstruktionerna markerats i plan. Vid områdets sydvästra hörn finns ett vattenintag till Lilla Edets kraftverk.

Inom området finns flertalet markförlagda ledningar för el, tele, fiber, fjärrvärme och VA. Ledningar återfinns i huvudsak utmed gator och vägar.

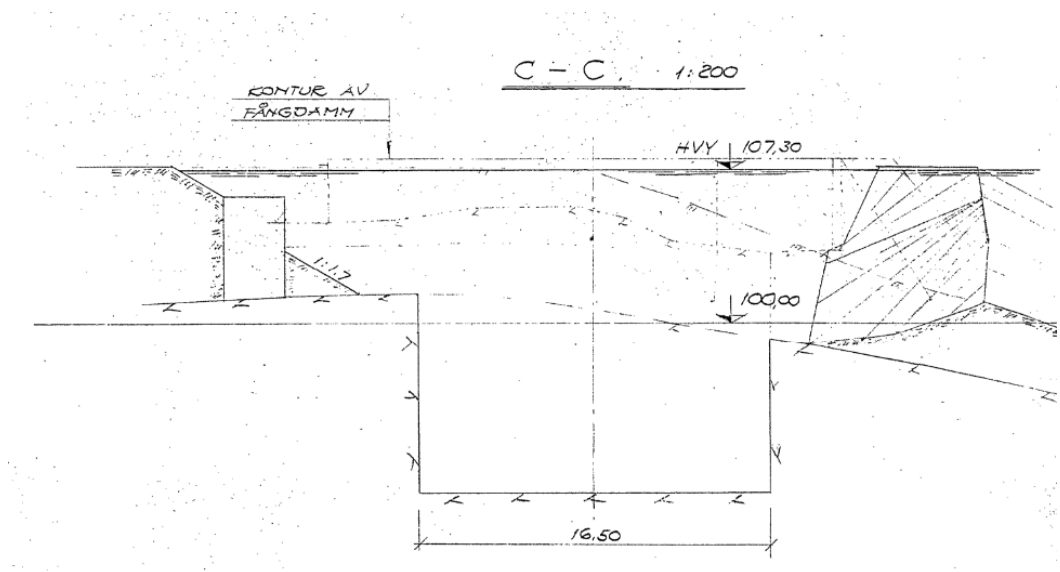
Längs strandlinjen har erosionsskydd i form av sprängsten lagts ut. Vid platsbesök 2021-06-10 bedömdes erosionsskyddet vara intakt utan tecken på pågående erosion, se Figur 5. Dock medför begränsat siktdjup i Göta älv

svårigheter att bedöma erosionsskyddets utbredning och kondition under vattenytan.

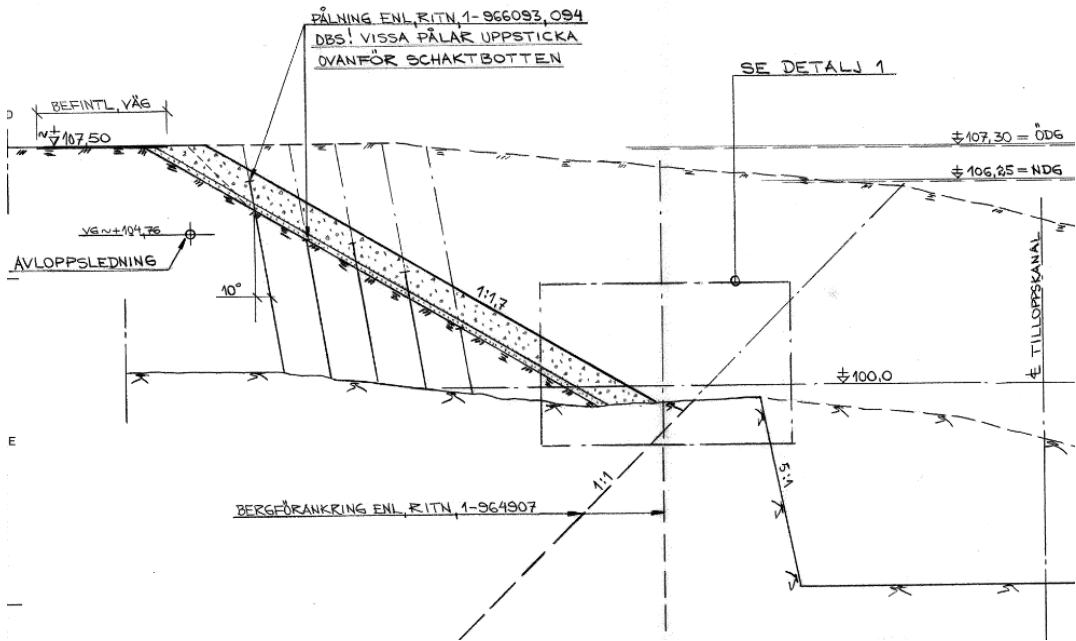


Figur 5. Erosionsskydd i område A (COWI AB, 2021).

Vattenintaget till Lilla Edets kraftverk utgörs av en kanal som övergår i en bergtunnel, där kanalen innefattar en kombination av skärning i berg och jord. Jordslänten närmast intaget är förstärkt med en ca 26 m lång stödmur, se Figur 6. Norr om stödmuren, över en sträcka på ca 24 m är jordslänten förstärkt med pålar i kombination med ett erosionsskydd, se Figur 7.



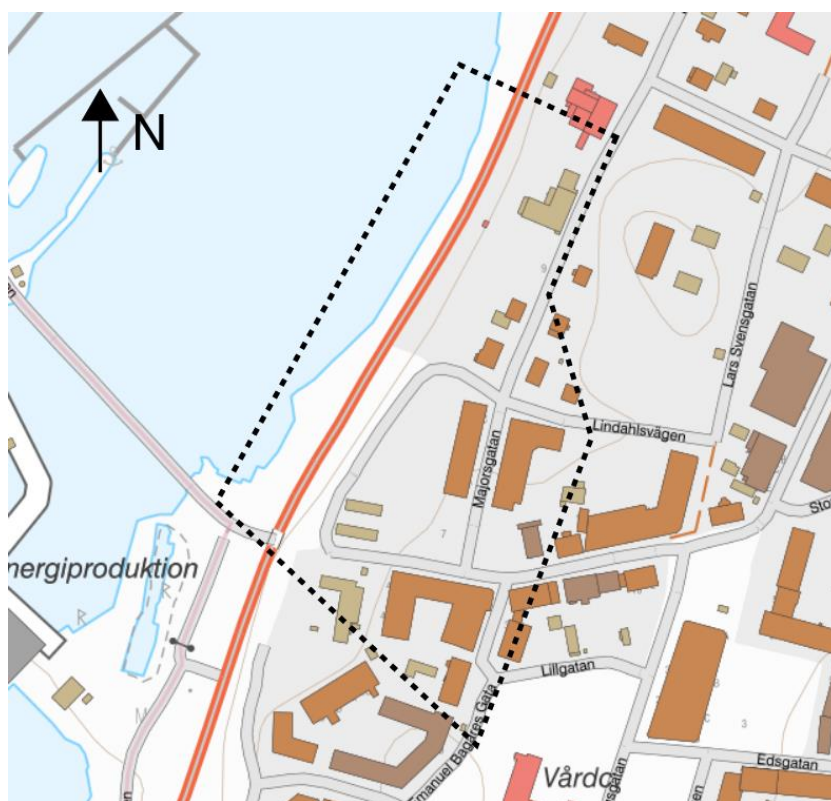
Figur 6. Sektionsritning vatteninlopp, stödmur (Vattenfall, 1978).



Figur 7. Sektionsritning vatteninlopp, pålar och erosionsskydd (Vattenfall, 1978).

6.2 Tidigare jordskred

Enligt SGU:s digitala kartvisare finns inga karterade spår av tidigare jordskred inom utredningsområdet, se Figur 8.

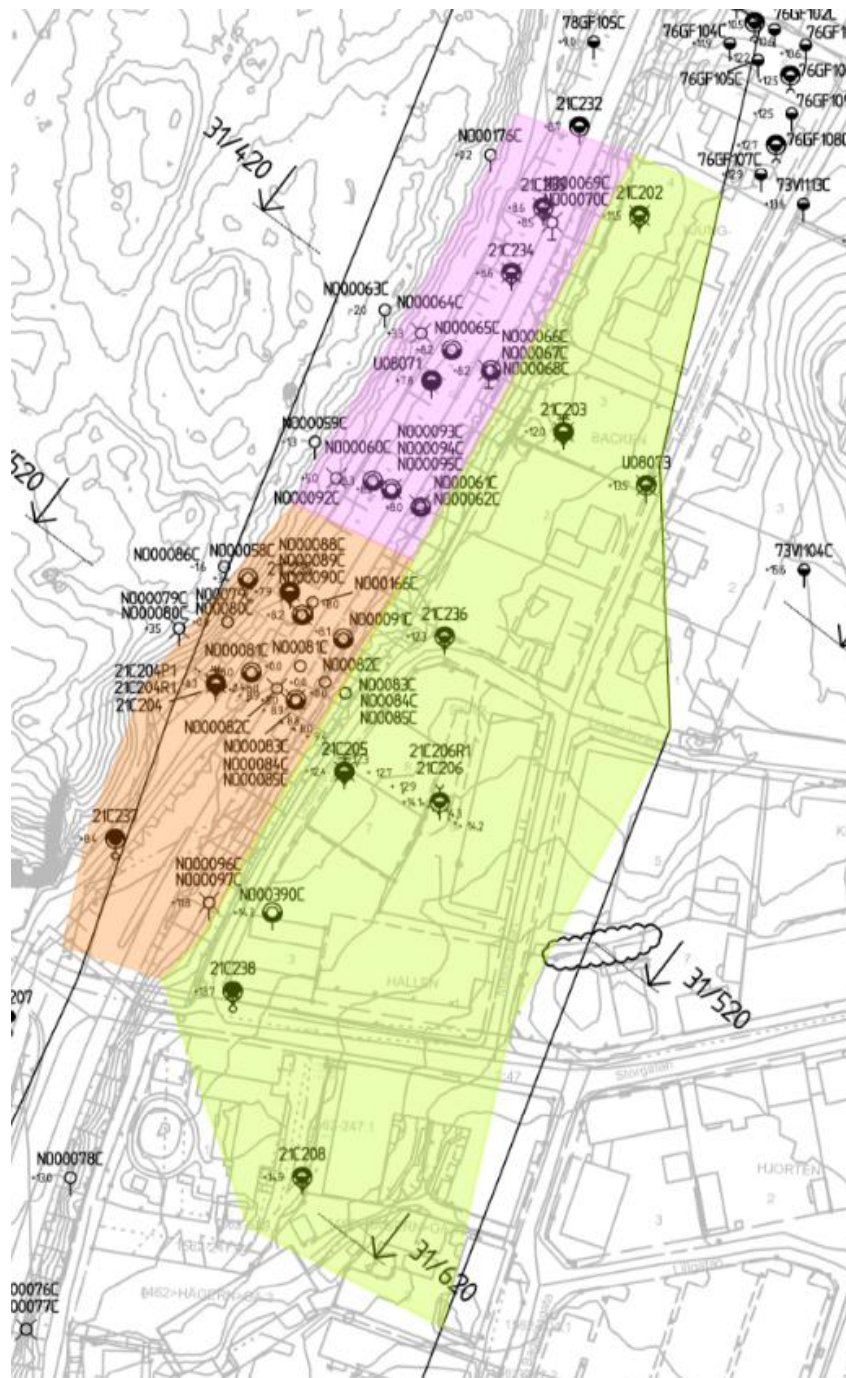


Figur 8. Utsnitt ur SGU:s kartvisare för jordskred och raviner. Aktuellt område är översiktligt markerat med svart-streckad linje (kartkälla: SGU).

7 Geotekniska förhållanden

7.1 Jordlagerförhållanden

I nedanstående beskrivning och för denna stabilitetsutredning delas utredningsområdet in i tre delområden med hänsyn till lerans egenskaper, se Figur 9. Nedan beskrivs jordlagerförhållanden övergripande inom respektive delområde. För valda materialparametrar, se kapitel 8. För undersökningsresultat hänvisas till MUR Geoteknik enligt kap 3.1.



Figur 9. Indelning av leran i delområden.

7.1.1 Strandnära lera norr

Jordlagren i delområdet utgörs av lera som till stor del överlagras av fyllning. Leran underlagras av friktionsjord som är avsatt på berg. Utförda sonderingar har stoppat mot fast botten ca 6–12 m under markytan. Vid utförda sonderingar har bergets överyta ej verifierats.

Fyllningen består av kornstorlekar från lera till block och innehåller ställvis växtdelar och tegel. Mäktigheten har uppmätts till ca 0,5–3 m.

Leran klassificeras ställvis som siltig på djup större än ca 6 m under markytan. På dessa djup är leran även ställvis varvig med siltskikt. I den övre delen har leran en utbildad torrskorpa vars tjocklek uppgår till ca 1–2 m. Ställvis har skikt eller lager av friktionsjord påträffats i lerlagret. Lerans mäktighet har tolkats till ca 2–10 m.

Lerans hållfasthet har bestämts utifrån utvärderade CPT-sonderingar, vingförsök samt konförsök på ostörda lerprover och empiri på CRS-försök. Lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet varierar från ca 10–40 kPa.

Lerans densitet varierar i allmänhet mellan ca 1,5 och 1,9 t/m³. Den naturliga vattenkvoten varierar i huvudsak mellan ca 40–80 % och konflytgränsen mellan ca 25 och 75 %.

Lerans sensitivitet varierar enligt laboratorieanalyser på ostörda jordprover mellan ca 10 och 90, vilket innebär att leran är mellan- till högsensitiv och på enstaka provtagningsnivåer kvick. Förekomsten av kvicklera har även utvärderats från CPTU-R- och trycksonderingar. Utvärderingen tyder på att kvicklera eventuellt förekommer inom delområdet. En detaljerad beskrivning av utvärderingen och en sammanvägd bedömning av förekomst av kvicklera redovisas i kapitel 7.2.

Lerans överkonsolideringsgrad, OCR, har bestämts med CRS-försök på ostörda lerprover i en undersökningspunkt i samband med tidigare utförda undersökningar. Överkonsolideringsgraden har utvärderats till ca 2,5.

Friktionsjorden har en mäktighet på ca 1–2 m och dess egenskaper har ej undersökts.

7.1.2 Strandnära lera syd

Jordlagren i delområdet utgörs av lera som överlagras av fyllning. Leran underlagras av friktionsjord som är avsatt på berg. Utförda sonderingar har stoppat mot fast botten ca 10–14 m under markytan. Vid utförda sonderingar har bergets överyta ej verifierats.

Fyllningen består av kornstorlekar från lera till block och innehåller ställvis tegel och växtdelar. Ställvis förekommer även cellplast. Mäktigheten har uppmätts till ca 2–4 m.

Leran är ställvis siltig, innehållande skal- och växtdelar. I den övre delen har leran en utbildad torrskorpa vars tjocklek uppgår till ca 0,5–1 m. Ställvis har skikt eller lager av friktionsjord påträffats i lerlagret. Lerans mäktighet har tolkats till ca 2–9 m.

Lerans hållfasthet i direkt skjuvriktning har bestämts utifrån utvärderade CPT-sonderingar, vingförsök, konförsök samt direkta skjuvförsök på ostörda lerprover och empiri baserade på CRS-försök. Lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet i direkt skjuvriktning varierar mellan ca 10–30 kPa. Dessutom har lerans aktiva skjuvhållfasthet bestämts med odränerade triaxialförsök i samband med denna fördjupade utredning. Lerans odränerade skjuvhållfasthet i aktiv skjuvriktning har utvärderats till ca 30 kPa.

Lerans densitet varierar i allmänhet mellan ca 1,5 och 1,9 t/m³ med en generell ökning mot djupet. Den naturliga vattenkvoten varierar i huvudsak mellan ca 30–90 % och konflytgränsen mellan ca 20 och 80 % med generellt minskande värden mot djupet.

Lerans sensitivitet varierar enligt laboratorieanalyser på ostörda jordprover i huvudsak mellan ca 20 och 50. Leran klassificeras därmed som mellan- till högsensitiv. Arkivpunkt NO00081C avviker dock markant från övriga undersökningspunkter på 7 m djup med en sensitivitet över 200, vilket innebär att leran klassificeras som kvick. Förekomsten av kvicklera har även utvärderats från CPTU-R- och trycksonderingar. Utvärderingen tyder på att kvicklera kan förekomma inom delområdet. En detaljerad beskrivning av utvärderingen och en sammanvägd bedömning av förekomst av kvicklera redovisas i kapitel 7.2.

Lerans överkonsolideringsgrad, OCR, har bestämts med CRS-försök på ostörda lerprover i samband med nu utförda undersökningar. Överkonsolideringsgraden varierar mellan ca 1 och 2,5 med en generell minskning mot djupet.

Friktionsjorden under leran har en mäktighet på ca 1–2 m och dess egenskaper har ej undersökts.

7.1.3 Landlera

Jordlagren i delområdet utgörs av lera som överlagras av fyllning eller humusjord. Leran underlagras av friktionsjord som är avsatt på berg. Utförda sonderingar har stoppat mot fast botten ca 5–13 m under markytan. Vid utförda sonderingar har bergets överyta ej verifierats.

Humusjorden är ställvis siltig och sandig och har en mäktighet på ca 0,3 m.

Fyllningen består av kornstorlekar från lera till block och innehåller ställvis tegel och asfalt. Mäktigheten har uppmätts till ca 0,5–3 m.

Leran är till stor del siltig samt ställvis gyttjig och innehållande skalrester och växtdeklar. I den övre delen har leran en utbildad torrskorpa vars tjocklek uppgår till ca 0,5–2 m. Ställvis har skikt eller lager av friktionsjord påträffats i lerlagret. Lerans mäktighet har tolkats till ca 6–10 m.

Lerans hållfasthet i direkt skjuvriktning har bestämts utifrån utvärderade CPT-sonderingar, vingförsök, konförsök samt direkta skjuvförsök på ostörda lerprover och empiri utifrån CRS-försök. Lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet i direkt skjuvriktning varierar mellan ca 10–40 kPa med en generell ökning mot djupet. Dessutom har lerans aktiva skjuvhållfasthet bestämts med odränerade triaxialförsök i samband med denna fördjupade utredning. Lerans odränerade skjuvhållfasthet i aktiv skjuvriktning varierar mellan ca 35–45 kPa med en ökning mot djupet.

Lerans densitet varierar i allmänhet mellan ca 1,5 och 1,8 t/m³. Den naturliga vattenkvoten varierar i huvudsak mellan ca 40–90 % och konflytgränsen mellan ca 40 och 80 %.

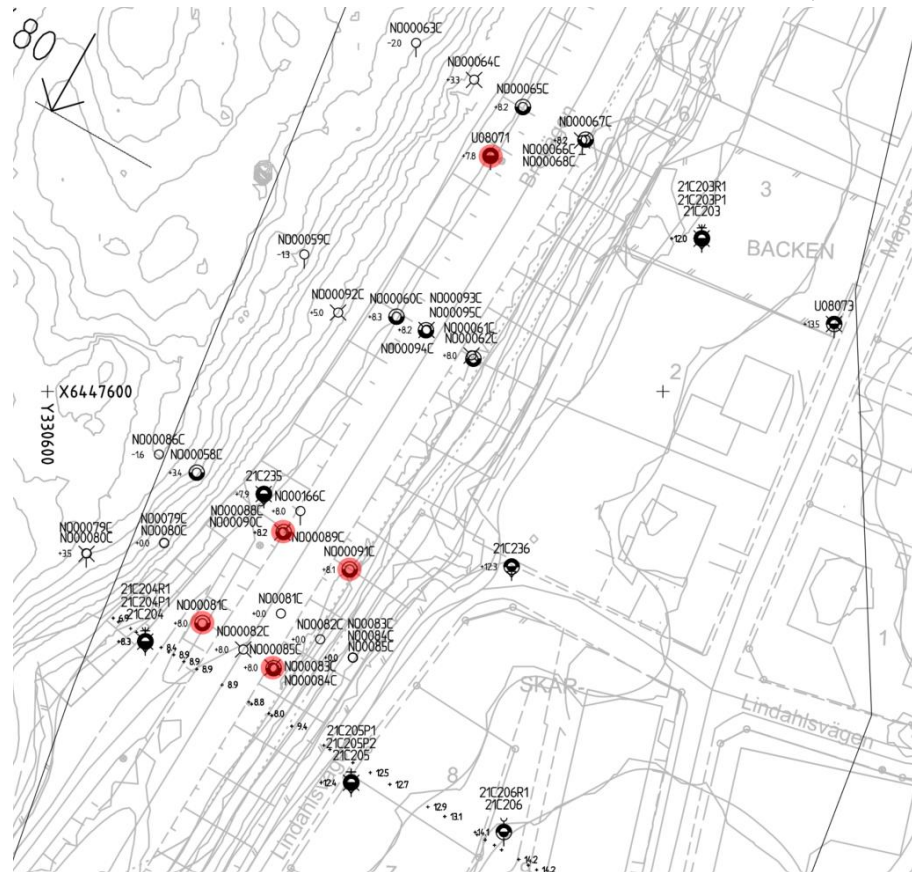
Lerans sensitivitet varierar enligt laboratorieanalyser på ostörda jordprover mellan ca 10 och 50. Leran klassificeras därmed som mellan- till högsensitiv. Förekomsten av kvicklera har även utvärderats från CPTU-R- och trycksonderingar. Utvärderingen tyder på att kvicklera eventuellt förekommer inom delområdet. En detaljerad beskrivning av utvärderingen och en sammanvägd bedömning av förekomst av kvicklera redovisas i kapitel 7.2.

Lerans överkonsolideringsgrad, OCR, har bestämts med CRS-försök på ostörda lerprover i samband med nu utförda undersökningar. Överkonsolideringsgraden varierar mellan ca 1,7 och 2,0.

Friktionsjorden har en mäktighet på ca 0,2–5 m och dess egenskaper har ej undersökts.

7.2 Utvärdering kvicklera

Laboratorieanalyser på ostörda prov visar på en mellan- till högsensitiv lera som på enstaka provtagningsnivåer är kvick. Kvicklera förekommer i undersökningspunkt U08071 på 6, 7, 8 och 9 m djup, i punkt NO00081C på 8 m djup, i punkt NO00084C på 6 och 7 m djup, i punkt NO00089C på 9 m djup och i punkt NO00091C på 6 m djup. För undersökningspunkternas lägen på plan se Figur 10 nedan.

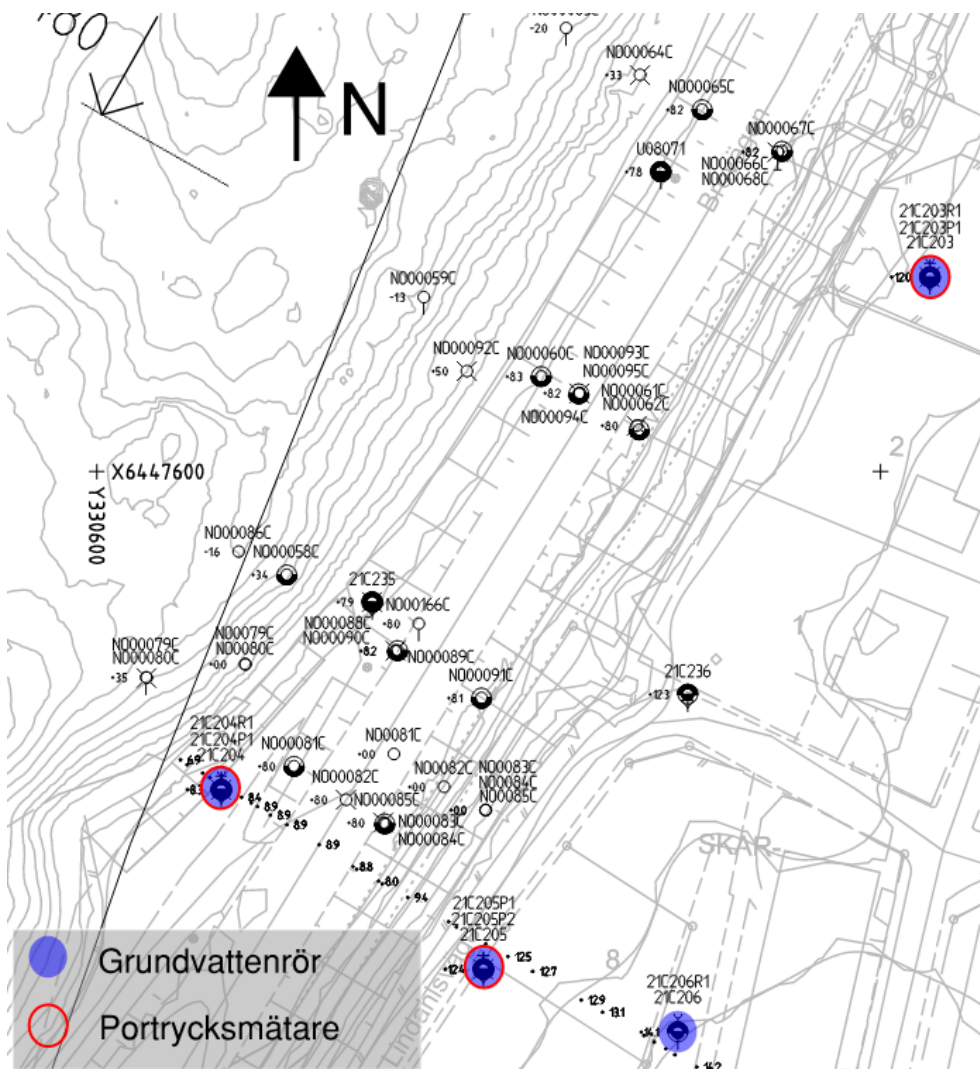


Figur 10. Förekomst av kvicklera i plan. Undersökningspunkter med förekomst av kvicklera utvärderad från ostörd provtagning rödmarkerade.

Utvärdering av utförda CPTU-R-sonderingar visar att resistiviteten överstiger 5 ohm/m i hela jordprofilen i samtliga undersökningspunkter, vilket innebär att förutsättningar för kvicklera finns. Laboratorieanalyser på ostörda prover visar dock att leran endast är kvick på enstaka provtagningsnivåer. Utvärderad mantelfriktion från CPTU-R- och trycksonderingar visar på låg tillväxt mot djupet i delar av lerprofilen, vilket är en indikation på förekomst av kvicklera.

7.3 Hydrogeologiska förhållanden

Planlägen för nu utförda hydrogeologiska undersökningar redovisas i Figur 11 nedan. Diagram med sammanställning av porttryck och grundvattennivåer kan ses i bilaga 3. Vattenståndsnivåer för Göta älv redovisas i kapitel 8.5.



Figur 11. Utförda hydrogeologiska undersökningar inom utredningsområdet.
Undersökningspunkter med grundvattenrör har markerats med blå punkt,
undersökningspunkter med porttrycksspetsar har markerats med röd cirkel.

7.3.1 Strandnära lera norr

Inom delområdet har inga hydrogeologiska undersökningar utförts vare sig vid nu eller tidigare geotekniska undersökningar.

7.3.2 Strandnära lera syd

Hydrogeologiska undersökningar har vid nu utförda geotekniska undersökningar utförts i undersökningspunkt, 21C204.

I undersökningspunkt 21C204 har en porttrycksspets installerats i leran, på 4 m djup under markytan. Dessutom har ett grundvattenrör installerats i friktionsjorden under leran på 13,1 m djup under markytan. Porttrycksspetsen har avlästs en gång per dygn under perioden november 2021 till augusti 2023. Grundvattenröret har mätts vid 9 tillfällen under perioden december 2021 till augusti 2023.

Porttrycksmätningarna på 4 m djup visade på en porttrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 0,2–0,6 m under befintlig markyta, vilket motsvarar nivå +7,8 till +8,2. Mätningarna i grundvattenröret visade på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri grundvattenyta ca 1,0–1,3 m under markytan, vilket motsvarar nivå +7,1 till +7,4. Porttrycksfördelningen mot djupet är således något lägre än hydrostatiskt tryck där grundvattenrörets trycknivå motsvarar Göta älvs trycknivå. Närheten till Göta älv bedöms vara anledningen till de små fluktuationerna i grundvattennivån.

7.3.3 Landlera

Hydrogeologiska undersökningar har vid nu utförda geotekniska undersökningar utförts i undersökningspunkt, 21C203, 21C205 och 21C206.

I undersökningspunkt 21C203 har en porttrycksspets installerats i leran, på 5 m djup under markytan. Dessutom har ett grundvattenrör installerats i friktionsjordsskiktet i leran på 11,6 m djup under markytan. Porttrycksspetsarna har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under perioden september 2022 till augusti 2023. Grundvattenröret har mätts vid 5 tillfällen under perioden oktober 2022 till augusti 2023.

Porttrycksmätningarna på 5 m djup visade på en porttrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 1,5–3,2 m under befintlig markyta vilket motsvarar nivå +8,8 till +10,5. Mätningen i grundvattenröret visade på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri grundvattenyta ca 3,6–4,5 m under markytan vilket motsvarar nivå +7,5 till +8,4.

I undersökningspunkt 21C205 har porttrycksspetsar installerats på två nivåer i leran, på 5 m och 10 m djup under markytan. Porttrycksspetsarna har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under perioden september 2022 till augusti 2023.

Porttrycksmätningarna på 5 m djup visade på en porttrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 1,4–1,9 m under befintlig markyta vilket motsvarar nivå +10,5 till +11,0. Mätningarna på 10 m djup visade på en porttrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 3,7–4,1 m under markytan vilket motsvarar nivå +8,3 till +8,7.

Porttrycksfördelningen mot djupet i undersökningspunkt 21C203 och 21C205 motsvarar hydrostatiskt tryck ned till porttrycksmätarna på 5 m djup och har därunder lägre än hydrostatisk ökning mot djupet. Troligtvis beror detta på att

friktionsjorden under leran har hydraulisk kontakt med Göta älv, då grundvattennivån i friktionsjorden överensstämmer med Göta älvs vattennivå.

I undersökningspunkt 21C206 har ett grundvattenrör installerats i friktionsjorden under leran på 4,9 m djup under markytan. Mätning i grundvattenröret visade på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri grundvattenyta ca 2,9–4,1 m under markytan, vilket motsvarar nivå +9,9 till +11,1.

8 Valda beräkningsparametrar

8.1 Allmänt

För en detaljerad redovisning av lerans geotekniska jordparametrar samt motiv till valda beräkningsparametrar se Bilaga 6 - Val av skjuvhållfasthet.

Lerans dränerade skjuvhållfasthetsparametrar har bedömts empiriskt till $\phi' = 30^\circ$ och $c' = 0,1 \times c_u$ enligt IEG Rapport 4:2010.

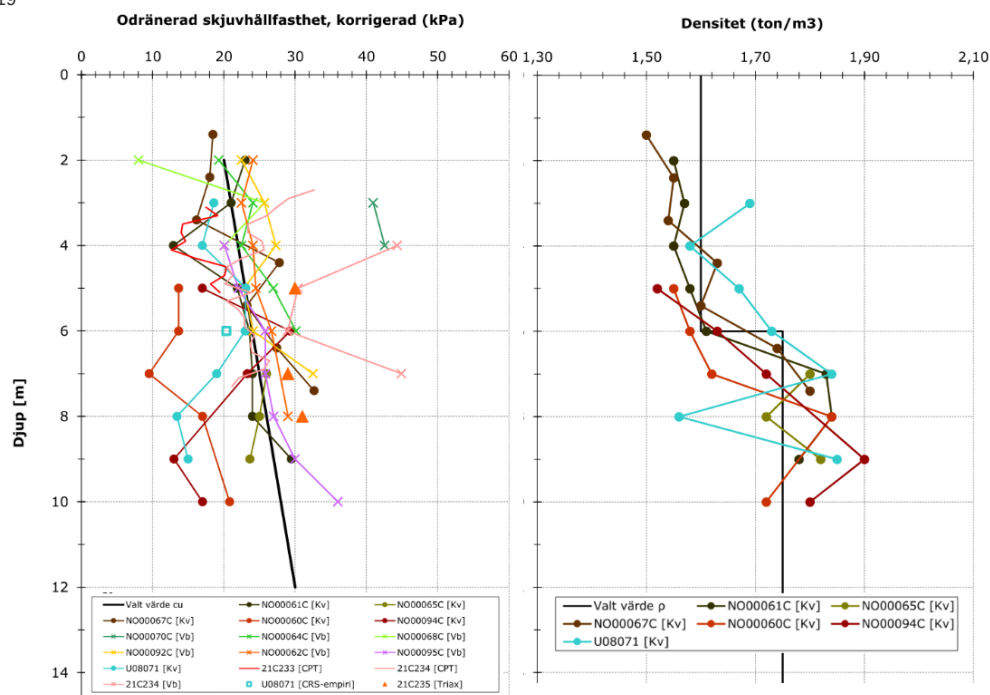
Friktionsjordens egenskaper har bestämts enligt empiriska värden från TK Geo 13.2.

8.2 Jordmaterialparametrar

Valda karakteristiska beräkningsparametrar för jordens hållfasthetsegenskaper och densitet för respektive delområde redovisas i tabellform i Bilaga 4. Valda parametrar för lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet och densitet redovisas även i diagram i Bilaga 1 och Bilaga 2. För dokumentation och beskrivning av framtagna jordmodell, se Bilaga 6.

8.2.1 Strandnära lera norr

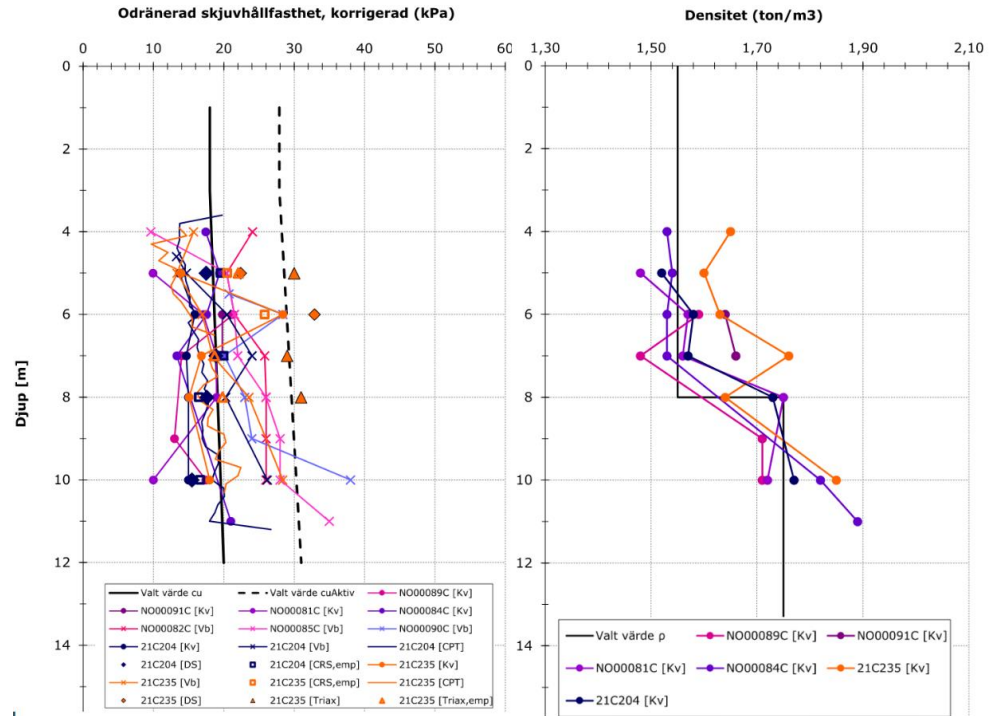
Tabeller med karakteristiska beräkningsparametrar redovisas i Bilaga 4. Vald odränerad skjuvhållfasthet och vald densitet mot djup under markytan redovisas i diagram i Figur 12, samt Bilaga 1 och Bilaga 2.



Figur 12. Diagram med valda värden för skjuvhållfasthet och densitet för strandnära lera norr. Diagrammen redovisas i större skala i Bilaga 1 och Bilaga 2.

8.2.2 Strandnära lera syd

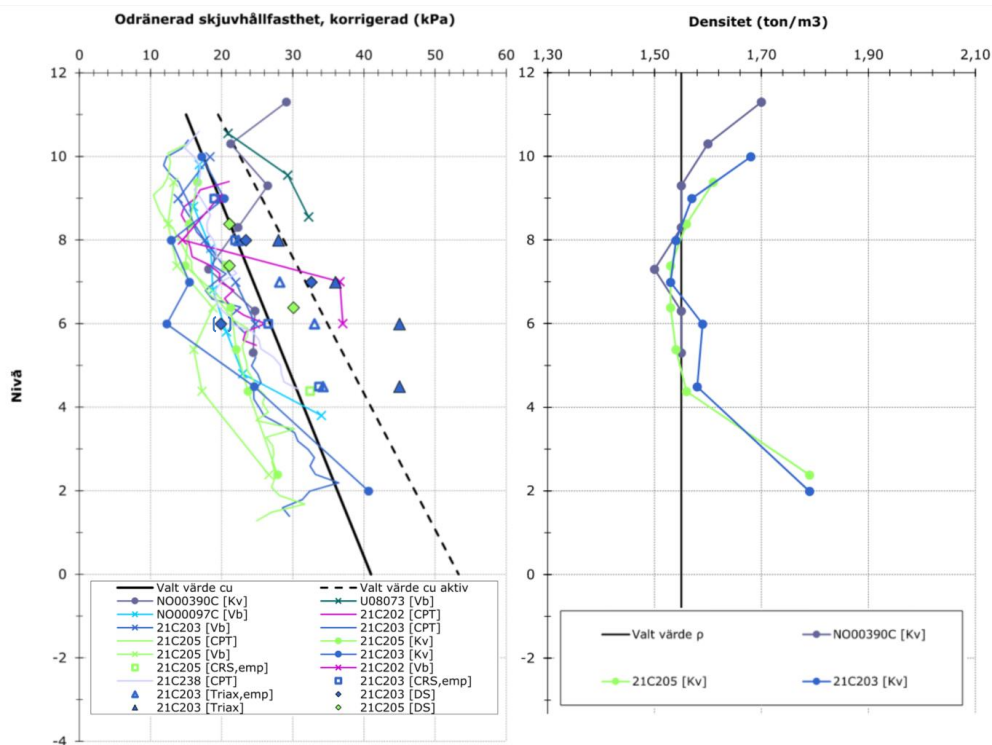
Tabeller med karakteristiska beräkningsparametrar redovisas i Bilaga 4. Vald odränerad skjuvhållfasthet och vald densitet mot djup under markytan redovisas i diagram i Figur 13, samt Bilaga 1 och Bilaga 2.



Figur 13. Diagram med valda värden för skjuvhållfasthet och tunghet för strandnära lera syd. Diagrammen redovisas i större skala i Bilaga 1 och Bilaga 2.

8.2.3 Landlera

Tabeller med karakteristiska beräkningsparametrar redovisas i Bilaga 4. Vald odränerad skjuvhållfasthet och vald densitet mot nivå under markytan redovisas i diagram i Figur 14, samt Bilaga 1 och Bilaga 2.



Figur 14. Diagram med valda värden för skjuvhållfasthet och densitet för landlera. Diagrammen redovisas i större skala i Bilaga 1 och Bilaga 2.

8.3 Anisotropifunktion

För samtliga delområden har ett förhållande mellan den odränerad skjuvhållfasthet i direkt- respektive aktiv skjuvriktning bestämts. Odränerad skjuvhållfasthet i passiv skjuvriktning har bestämts empiriskt baserat på förhållandet mellan skjuvhållfastheten i direkt- och aktiv skjuvriktning.

8.3.1 Strandnära lera norr

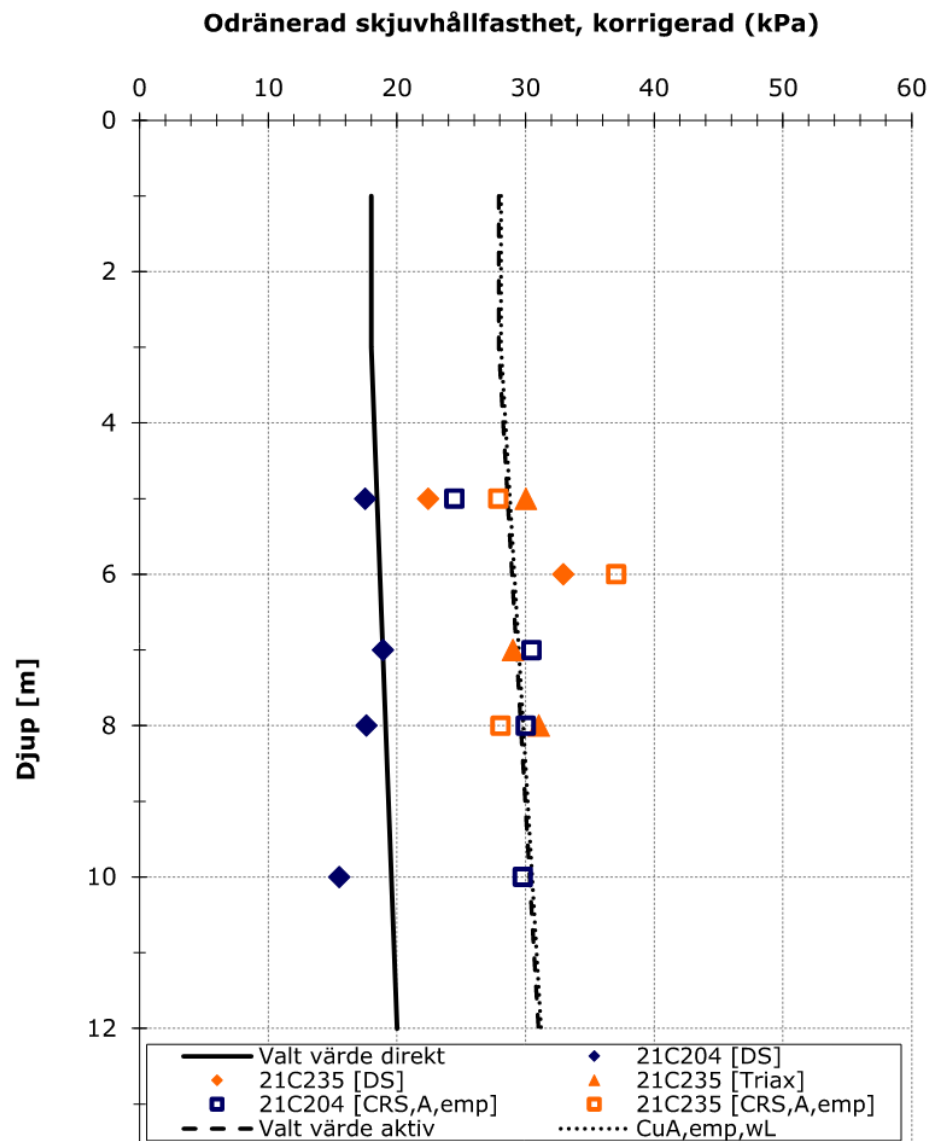
Inom delområde strandnära lera norr har inga triaxialförsök utförts. Stabilitetsberäkningarna har därav utförts utan anisotropieffekt, bortsett från att känslighetsanalys har utförts med empiriskt beräknad anisotropieffekt.

Konflytgränsen har valts till 50 % genom hela lerprofilen, vilket ger ett värde på K_{ONC} som är lika med ca 0,52. Med hjälp av ekvationen som redovisas i kapitel 5 erhålls kvoten mellan den aktiva skjuvhållfastheten och den direkta skjuvhållfastheten till 1,55 för ett skjuvplan med lutningen $\alpha = 60^\circ$.

8.3.2 Strandnära lera syd

Inom delområde strandnära lera syd har aktiva odränerade triaxialförsök utförts i undersökningspunkt 21C235. Den aktiva skjuvhållfasthetsfördelningen har valts utifrån resultaten av triaxialförsöken, se Figur 15. Kvoten mellan den valda aktiva skjuvhållfastheten och den valda direkta skjuvhållfastheten uppgår till 1,55 för ett skjuvplan med lutningen $\alpha = 60^\circ$. Med hjälp av

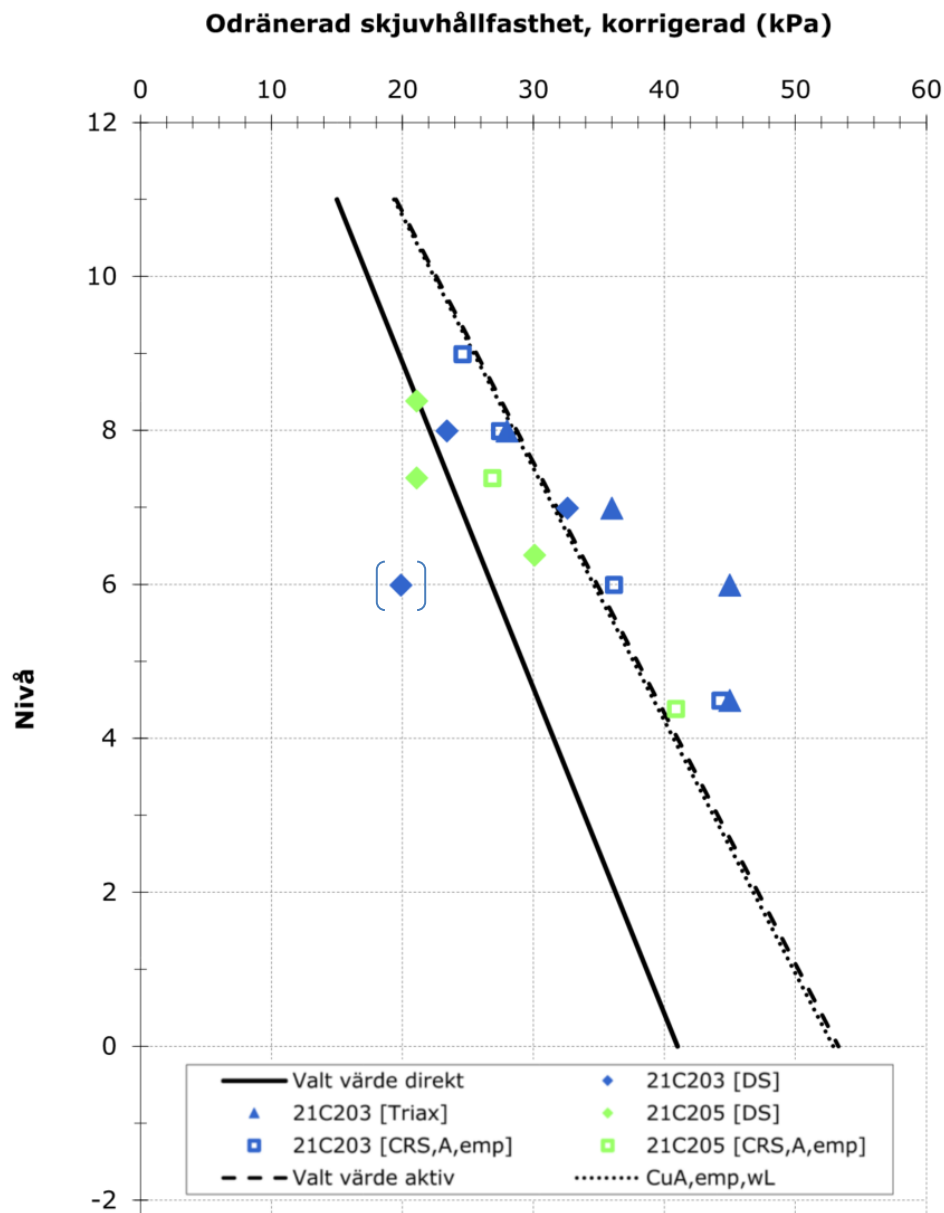
ekvationen som redovisas i kapitel 5 erhålls ett värde på vilojordstryckskoefficienten K_{0NC} på ca 0,56.



Figur 15. Vald direkt och aktiv skjuvhållfasthet för strandnära lera syd.

8.3.3 Landlera

Inom delområde landlera har aktiva odränerade triaxialförsök utförts i undersökningspunkt 21C203. Den aktiva skjuvhållfasthetsfördelningen har valts utifrån resultaten av triaxialförsöken, se Figur 16. Kvoten mellan den valda aktiva skjuvhållfastheten och den valda direkta skjuvhållfastheten uppgår till 1,3 för ett skjuvplan med lutningen $\alpha = 60^\circ$. Med hjälp av ekvationen som redovisas i kapitel 5 erhålls ett värde på vilojordstryckskoefficienten K_{0NC} på ca 0,69.



Figur 16. Vald direkt- och aktiv skjuvhållfasthet för landleira.

8.4 Portrycksmodell

Grundvatten- och portrycksmätningar inom utredningsområdet visar att portrycken följer en hydrostatisk portrycksfördelning mot djupet de översta ca 5 m och har därunder konstaterats ha något lägre än hydrostatisk portrycksökning. Uppmätta grundvattennivåer i friktionsjorden under leran korresponderar i hög utsträckning med Göta älvs medelvattennivå.

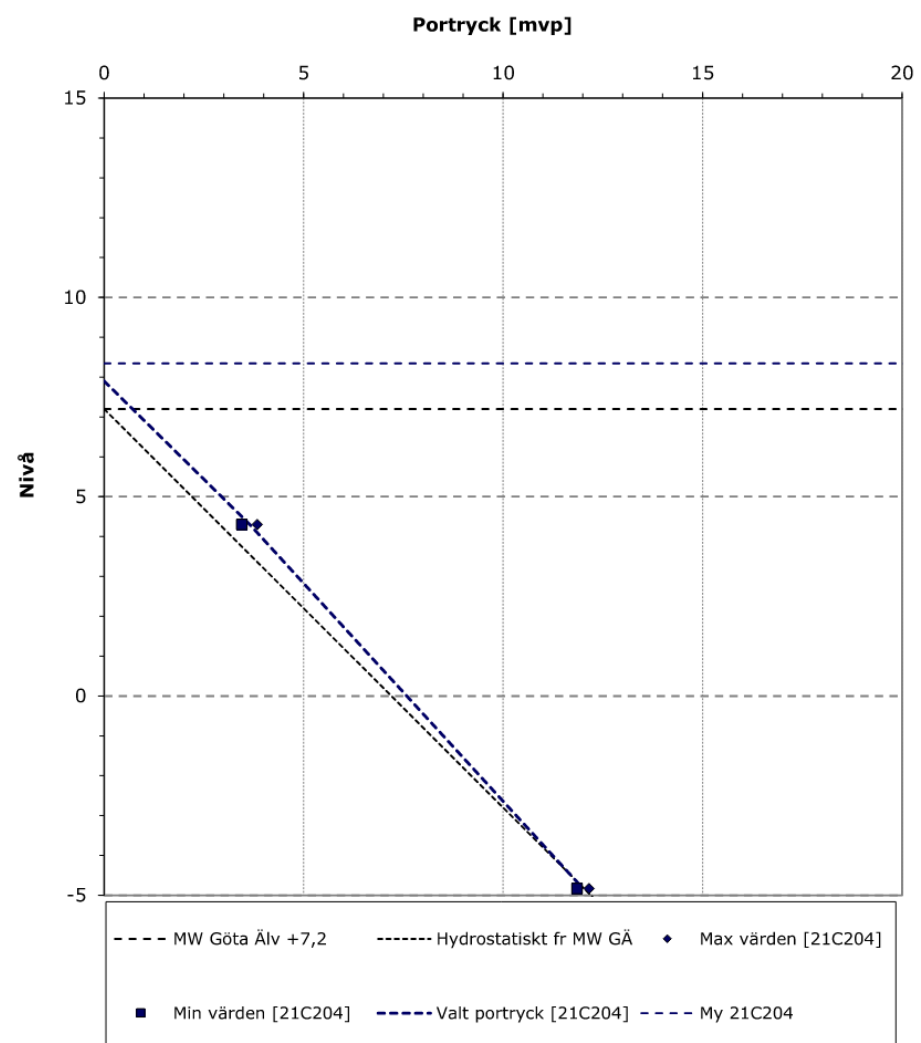
Resultaten av portrycksmätningarna redovisas uppdelat för respektive delområde. Portrycksdiagrammen redovisas även i Bilaga 3. Portrycksmodellen har valts från mätresultat till och med den 20:e april 2023.

8.4.1 Strandnära lera norr

Inom delområde strandnära lera norr har inga hydrogeologiska undersökningar utförts. I stabilitetsberäkningarna har en portrycksfördelning enligt mätningarna i delområde strandnära lera syd använts. Potryckssituationen i de två delområdena bedöms vara likartade då de dels ligger nära Göta älv och därav till stor del korresponderar med vattennivån i älven, dels att slänternas geometrier är snarlika.

8.4.2 Strandnära lera syd

Valt portryck mot nivå för delområde strandnära lera syd redovisas i Figur 17 nedan. Portrycken har valts utifrån maximalt uppmätta portryck.

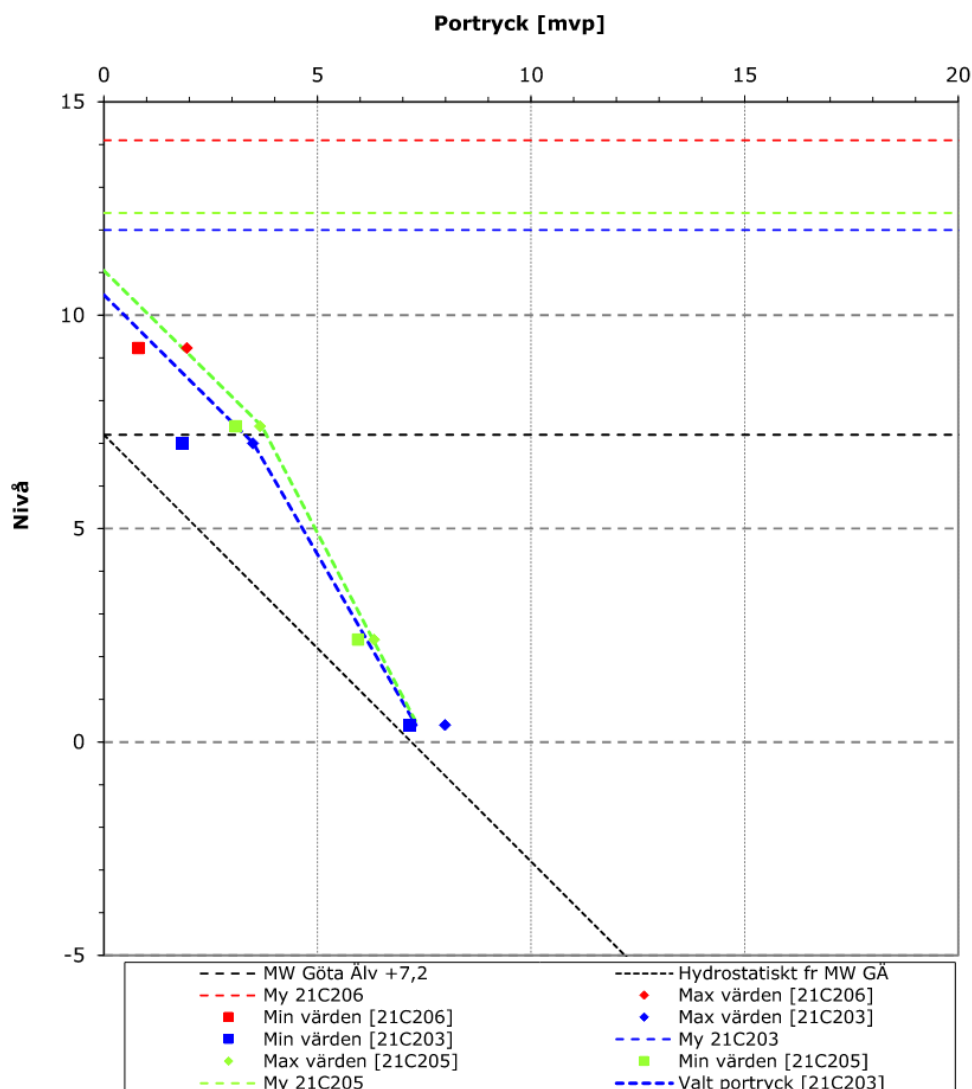


Figur 17. Valt portryck inom delområde strandnära lera syd. Diagrammet redovisas även i Bilaga 3

Ner till ca 5 m djup under markytan är portrycksökningen hydrostatisk. På större djup är ökningen mot djupet något lägre än hydrostatiskt, ca 0,9 kPa/m och ansluter till en trycknivå motsvarande Göta älvs medelvattenstånd.

8.4.3 Landlera

Valt portryck mot nivå för delområde landlera redovisas i Figur 18 nedan.
Portrycken har valts utifrån maximalt uppmätta portryck.

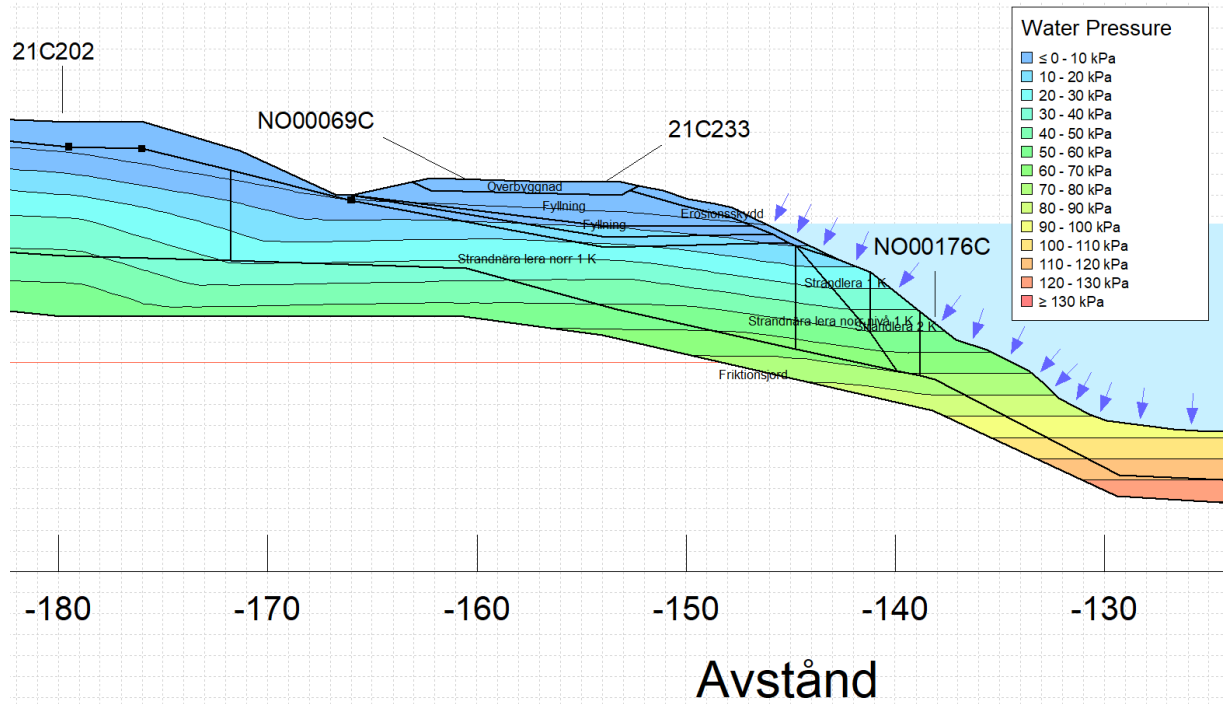


Figur 18. Valt portryck inom delområde strandnära lera syd. Diagrammet redovisas även i Bilaga 3.

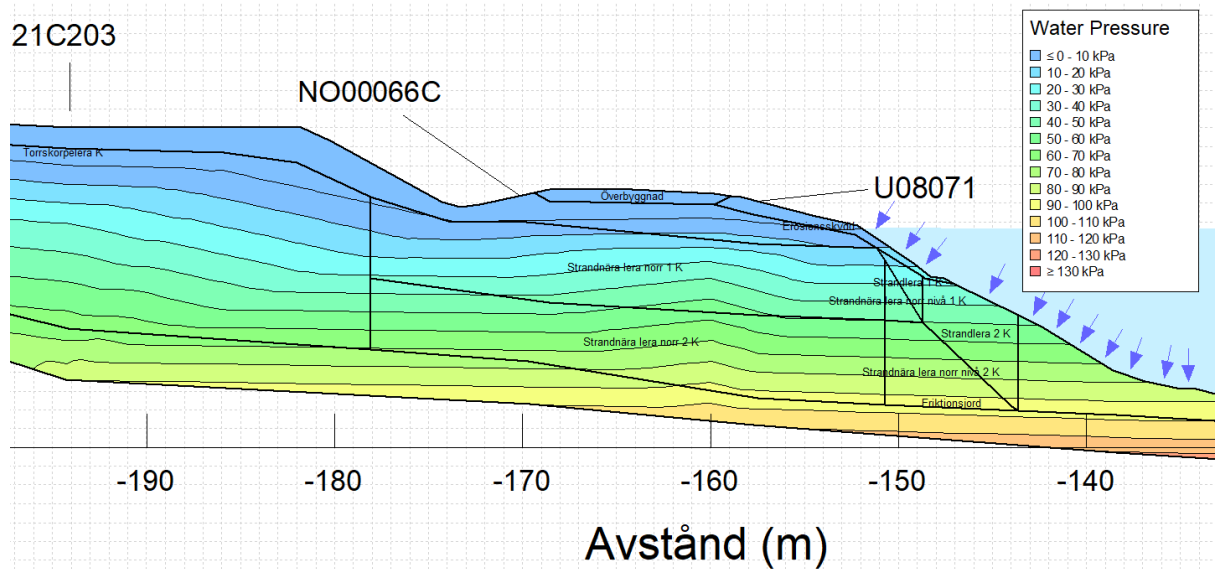
I både undersökningspunkt 21C203 och 21C205 följer valt portryck en hydrostatisk portrycksfördelning ner till ca 5 m djup under markytan. Under detta ökar portrycket mindre än en hydrostatisk portrycksfördelning, ca 0,5–0,6 kPa/m.

8.4.4 Slope/w

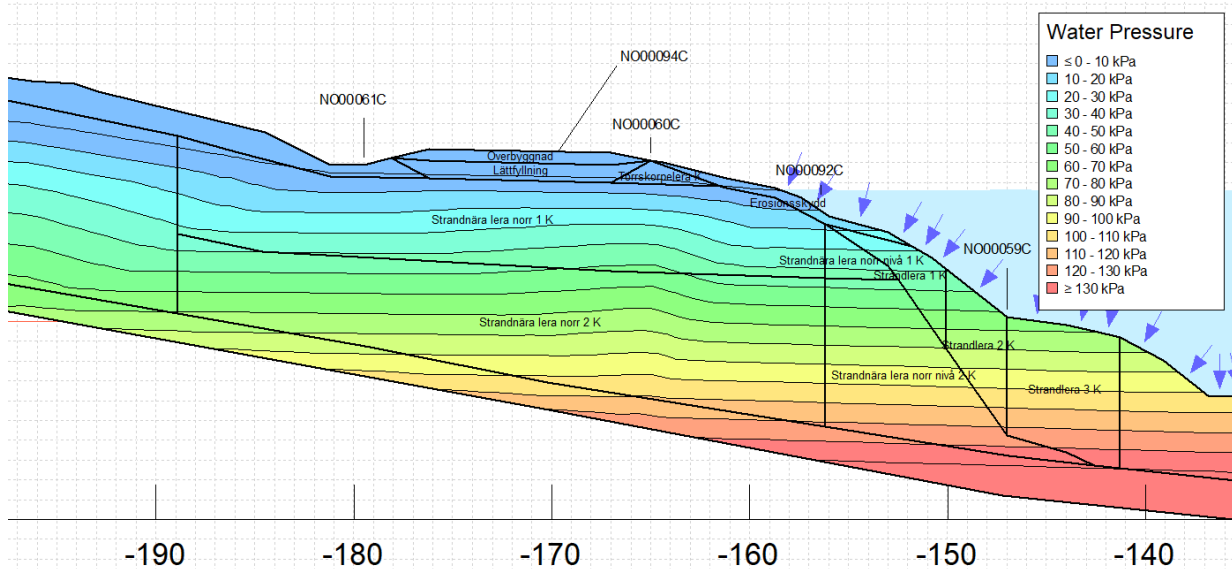
I Figur 19 till Figur 22 redovisas porttrycksisobarer i Slope/w för de beräknade sektionerna.



Figur 19. Porttrycksisobarer i sektion 31/3900.

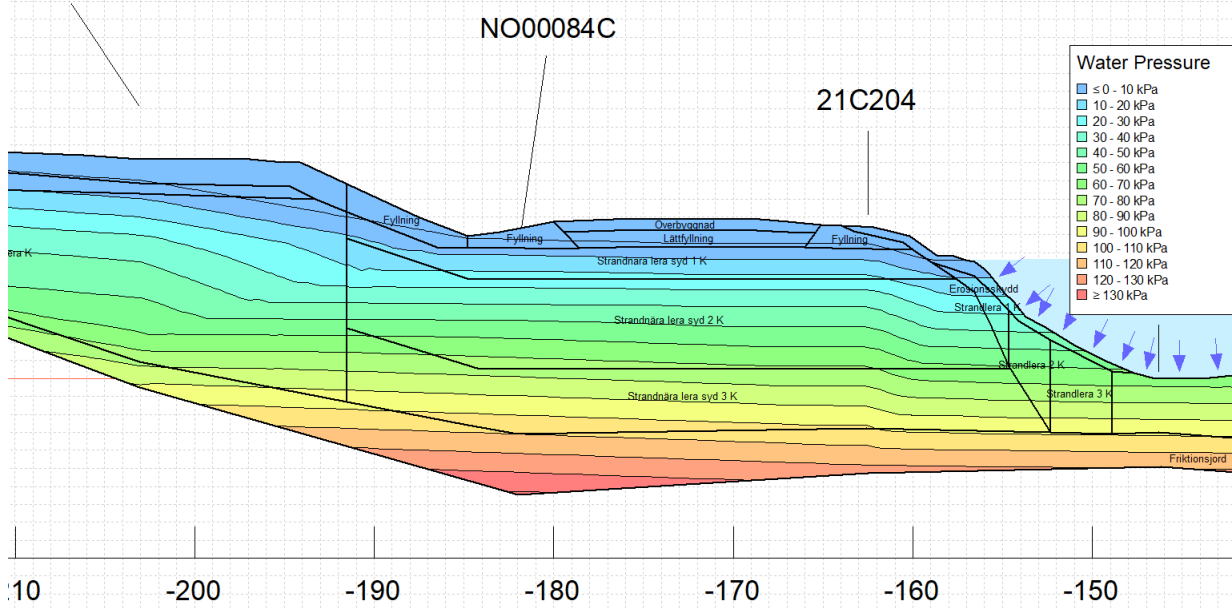


Figur 20. Porttrycksisobarer i sektion 31/4500.



Figur 21. Portrycksisobarer i sektion 31/4800.

21C205



Figur 22. Portrycksisobarer i sektion 31/5150.

8.5 Vattenstånd i Göta älv

Göta älv är reglerad och i anslutning till Vattenverket har SGI angivit följande vattenståndsnivåer, se Tabell 2. Vidare har SGI angivit att en vattenyta motsvarande lägsta lågvatten, LLW på nivå +6,6 ska användas i stabilitetsberäkningarna.

Tabell 2 Vattenstånd i Göta älv.

Referenspunkt	MW	LLW	HHW
Lilla Edet Sluss 6 ÖVY	+7,2	+6,6	+7,5

9 Käslighetsanalys

Käslighetsanalys har utförts för att säkerställa den valda jordmodellens robusthet med fokus på att och undersöka sårbarheten för förändring av områdets portrycksförhållanden och förändrad geometri till följd av erosion.

9.1 Förändring av portrycksförhållanden

Stabilitetsanalysen är utförd med maximalt uppmätta portrycksnivåer. För att hantera eventuella årstidsvariationer, framtida ökande portryckstillstånd på grund av klimatförändringar och kontrollera osäkert val har en käslighetsanalys utförts. Vid käslighetsanalysen har en höjning av områdets portryck med 5 kPa utförts.

Käslighetsanalysen ses som ett konservativt antagande, ur stabilitetssynpunkt det mest ogynnsamma, gällande den totala portryckssituationen i området.

Störst risk för stabilitetsbrott är när marken är helt vattenmättad i slänkrön (till exempel efter ett skyfall), men där Göta älvs vattenyta ändå skulle vara i nivå med lägsta lågvatten, LLW, motsvarande nivå +6,6. Detta värsta scenario har beaktats i stabilitetsberäkningarna i samband med käslighetsanalysen.

9.2 Förändrad geometri till följd av erosion

Käslighetsanalys har utförts med hänsyn till förändrad geometri av Göta älvs botten på grund av erosion till följd av strömmande vatten och fartygstrafik. Käslighetsanalysen har utförts genom att befintlig älvbotten har sänkts med 2 m, enligt typsektioner framtagna och tillhandahållna av beställaren, SGI. Det har antagits att ingen erosion sker ovanför Göta älvs dämningshöjd.

För Vattenverket tillämpas typsektion A1 för en slänt utan undervattenshylla och med erosionsskydd i vattenbrynet, se Figur 23.



Figur 23. Typsektion för slänt utan undervattenshylla och med erosionsskydd i vattenbrynet.

10 Åtgärder

Eventuella stabilitetshöjande åtgärder kan övergripande delas in i tre kategorier, ökning av lasten på den mothållande sidan, sänkning av lasten inom den pådrivande sidan och höjning av jordens sammanlagda hållfasthet.

10.1 Tryckbank/erosionsskydd

Tryckbank innebär att nya massor läggs på den mothållande sidan. Beroende av behovet av tryckbankens storlek kan det handla om ett erosionsskydd eller en större utfyllnad.

Fördelen med tryckbank är att det är en robust åtgärd som kräver mycket lite underhåll och är lämplig om massöverskott föreligger (billiga massor). Som erosionsskydd motverkar åtgärden dessutom att ytterligare jord eroderas bort under erosionsskyddet. Nackdelen med tryckbank/erosionsskydd är att det innebär en utfyllnad i Göta älv, vilket kan innebära ökad erosion uppströms eller nedströms från tryckbanken/erosionsskyddet. Utläggning av tryckbank i älven minskar dess våta area och därmed till viss del möjlig kraftproduktion.

10.2 Avschaktning

Avschaktning innebär att befintliga jordmassor schaktas bort från den pådrivande sidan. Avschaktningen kan utföras till exempel genom att befintlig slänt flackas ut eller att slänten läggs i terrasser. Avschaktningens utseende varierar beroende på släntens utseende och begränsningar från befintligheter.

Fördelen med avschaktning är att det är en robust åtgärd som kräver mycket lite underhåll och är en relativt billig åtgärd. Nackdelen med avschaktning är att det ofta innebär ett större ingrepp i naturmiljön med röjning av vegetation. Avschaktning under vatten kan leda till grumling.

10.3 Kalkcementpelare

Kalkcementpelare används som markförstärkningsmetod genom att pelare installeras, där kalk och cement blandas in i befintlig lera till stora djup (max ca 25 m). Genom samverkan med omgivande jord kan skjuvhållfastheten i jordlagren på så sätt höjas och stabilitetsförhållandena förbättras.

Kalkcementpelare nyttjas när avschaktning och/eller tryckbank inte är genomförbara eller tillräckliga av olika anledningar. Kalkcementpelare är en dyrare åtgärd än både avschaktning och tryckbank men innebär oftast att områdets topografi kan återställas till ursprungsutseendet. Dock bedöms metoden ha betydligt större miljöpåverkan avseende koldioxidutsläpp än avschaktning respektive tryckbank.

11 Övriga förutsättningar, stabilitetsanalys

Stabilitetsberäkningarna har utförts med totalsäkerhetsanalys. I enlighet med IEG Rapport 4:2010 för befintlig bebyggelse och fördjupad utredning, ligger intervallet på erforderlig säkerhetsfaktor på $F_c \geq 1,3-1,4$ (odränerad analys) och $F_{komb} \geq 1,2-1,3$ (kombinerad analys).

En bedömning av områdets gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar för stabilitetsberäkningar har utförts enligt IEG Rapport 4:2010 och syftar till att vara del av förståelsen för rådande stabilitetsförhållanden inom området.

Bedömningen inom utredningsområdet redovisas i Tabell 3.

Tabell 3. Gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar för stabilitetsberäkningar.

Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Konsekvenser av skred		Risk för människoliv och stor ekonomisk skada Risk för bakåt- eller framåtgripande skred Risk för omgivningspåverkan eller sekundär påverkan Kvicklera förekommer på enstaka nivåer
Släntens beständighet	Inga tecken på rörelser God kvalitet på erosionsskydd ovan vattenytan	Avverkade områden Erosionsskyddets kvalitet och utbredning under vattenytan är okänt
Tidigare förändringar i slänten	Utlagda fungerande erosionsskydd ovan och vid vattenytan Göta älv är reglerad	Belastningsökning från väg 167
Jordens egenskaper		Jordlagerföljden består av lera Hög sensitivitet och kvicklera förekommer på enstaka nivåer Stor spridning i bestämda hållfasthetsegenskaper

Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Analys- och beräkningsarbetets tillförlitlighet	Stort antal beräknade glidytor Känslighetsanalys utförd Glidytans läge i plan är vald i den farligaste delen av slänten ur stabilitetssynpunkt Tvådimensionell analys Vald kombination av last, portryck och vattenstånd motsvarar extremvärden.	Förhållandena är komplicerade med stora variationer i topografi Kritiska glidytan omfattar mindre jordvolym där empiri använts
Fältundersökningens innehåll och omfattning	Kvalificerade undersökningar (CPTU-R-sondering, vingförsök samt CRS-, direkta skjuv- och triaxialförsök på ostörda prover) har utförts.	
Släntens geometri	Markytans geometri är hämtad utifrån lantmäteriets laserscanning tillsammans med avvägda sektioner	Lokala branta partier i slänt
Grundvatten- och portrycksförhållanden	Portrycksmätare och grundvattenrör är installerade Begränsade förväntade tryckvariationer	
Ytvattenförhållanden	Göta älv är reglerad – små vattenståndvariationer Karaktäristiskt vattenstånd känt Dränerat längs med väg 167	

Förutsättningarna bedöms till övervägande del vara gynnsamma, men en övervikt av förutsättningarna av störst vikt är ogynnsamma. Därav har en säkerhetsfaktor mitt i intervallet för både odränerad- och kombinerad analys valts. Med hänsyn till förutsättningarna i tabell 3 har följande säkerhetsfaktorer valts:

- > $F_c \geq 1,35$ (odränerad analys)
- > $F_{\text{komb}} \geq 1,25$ (kombinerad analys)

12 Beräkningar och resultat

Säkerheten mot stabilitetsbrott har kontrollerats i totalt fyra sektioner fördelade över aktuellt område enligt följande:

- > Tre sektioner med planläge inom delområde strandnära lera norr och landlera, 31/3900, 31/4500 och 31/4800, beräknade mot Göta älv.
- > En sektion med planläge inom delområde strandnära lera syd och landlera, 31/5150, beräknad mot Göta älv.

Beräkningssektionernas läge och utbredning i plan framgår av Figur 24 nedan.



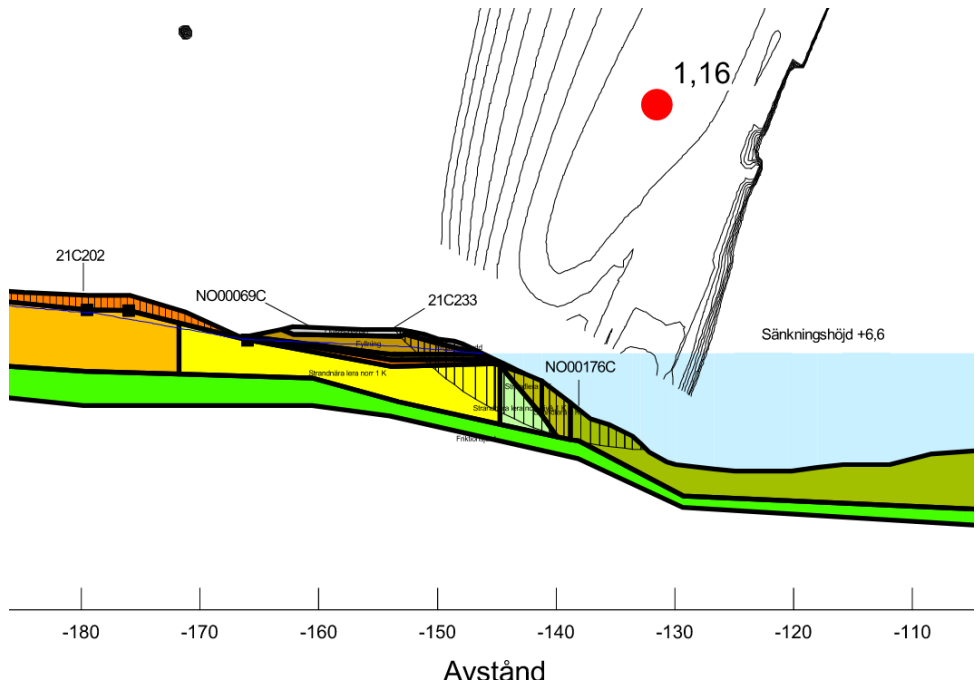
Figur 24. Redovisning av beräkningssektionernas läge i plan markerade med röda pilar.

I Tabell 4 - Tabell 7 nedan redovisas resultat för beräkningar med karakteristiska parametrar. Beräkningar har utförts för befintliga förhållanden med och utan hänsyn till anisotropi. Känslighetsanalyser samt beräkningar för eventuella åtgärdsförslag har utförts med beaktande av anisotropi i för strandnära lera syd och landlera, men inte för strandnära lera norr. Beräkningsresultaten redovisas även i Bilaga 5.

För samtliga sektioner redovisas en representativ glidyta från beräkningarna. I underliggande tabell är resultat från aktuell beräkning **understruken och fetmarkerad**.

12.1 Beräkningssektion 31/3900

Kritiska glidytor i sektion 31/3900 är relativt stora och omfattar slänten ned från väg 167 ned mot Göta älvs botten. I Figur 25 nedan redovisas kritisk glidyta för kombinerad analys.



Figur 25. Sektion 31/3900. Befintliga förhållanden utan anisotropi, kombinerad analys.

Tabell 4 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 31/3900, rödmarkerade värden uppfyller ej erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,35$ och $F_{komb} \geq 1,25$.

Sektion km 31/390, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,29 (OUTB1)	<u>1,16</u> (OKTB1)	5:1–5:2
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	1,39 (OUTB2)	1,16 (OKTB2)	5:3–5:5
Känslighetsanalys 2 m erosion	1,17 (OUTE1)	0,92 (OKTE1)	5:6–5:7
Känslighetsanalys Fyllning med 35° friktionsvinkel	-	1,16 (OKTK1)	5:8
Känslighetsanalys Ingen trafiklast	1,44 (OUTK2)	-	5:9

Sektion km 31/390, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Känslighetsanalys Älvlera från delområde Edet	-	1,13 (OKTK3)	5:10
Känslighetsanalys Minskad mäktighet älvlera	-	1,18 (OKTK4)	5:11
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa	-	1,07 (OKTK5)	5:12
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa och 2 m erosion	-	0,85 (OKTK6)	5:13
Känslighetsanalys Utan friktionsjord Sammanfatt glidyta	-	1,13 (OKTK7)	5:14
Åtgärdsförslag Tryckbank	1,27 (OUTA1)	1,35 (OKTA1)	5:15-5:16
Åtgärdsförslag Kalkcementpelare	1,46 (OUTA2)	1,20/1,24 ¹⁾ (OKTA2)	5:17-5:19
Åtgärdsförslag Avschaktning	1,37 (OUTA3)	1,25 (OKTA3)	5:20-5:22

1) yttlig glidyta/stor glidyta

Beräkningsresultaten för sektion 31/3900 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ej uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys utan anisotropi.

Med beaktande av anisotropi uppfylls erforderlig säkerhetsfaktor för befintliga förhållanden för odränerad analys medan kombinerad analys ej uppfyller kraven. Det skall dock poängteras att anisotropieffekt ej har verifierats med triaxialförsök.

Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar för den kritiska glidytan och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för erosion.

Utförd känslighetsanalys med en högre friktionsvinkel i fyllningen visar att beräknad säkerhetsfaktor ej påverkas för den kritiska glidytan och att

erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således inte vara känslig för fyllningens hållfasthetsegenskaper.

Utförd känslighetsanalys utan trafiklast för odränerad analys visar att beräknad säkerhetsfaktor ökar något för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara måttligt känslig för trafiklast.

Utförd känslighetsanalys med älvlera enligt jordmodell från delområde Edet visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar svagt för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således inte vara känslig för osäkerheter i älvlerans egenskaper.

Utförd känslighetsanalys med en minskad lermäktighet i slänten ned i och i Göta älv visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar mycket lite för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således inte vara känslig för osäkerheterna kring lerans mäktighet under Göta älv.

Utförd känslighetsanalys med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar och ej uppfyller gällande krav. Mot bakgrund av ovanstående bedöms slänten vara något känslig för portrycksökningar.

Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion i kombination med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för erosion i kombination med portrycksökning.

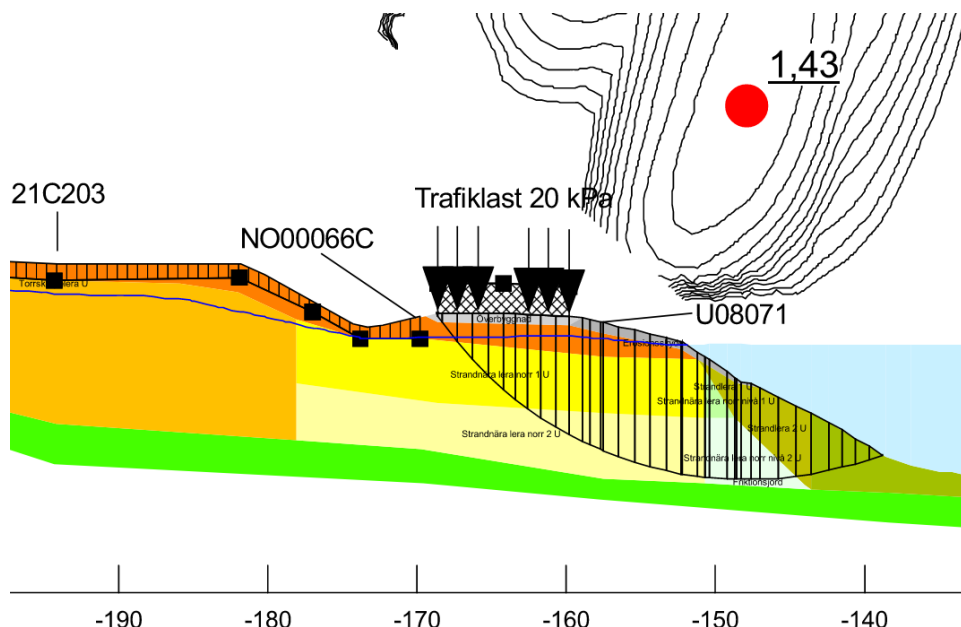
Utförd känslighetsanalys med sammansatt glidyta för kombinerad analys visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar något för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således inte vara känslig för sammansatta glidytor.

För att uppfylla erforderlig säkerhetsfaktor kan slänten mot Göta älv schaktas av alternativt en tryckbank läggas ut på älvbotten.

Beräknat åtgärdsförslag med kalkcementpelare, där pelarna ej installeras nedanför vattenlinjen uppfyller erforderlig säkerhetsfaktor för odränerade analys, men ej för kombinerad analys. Detta till följd av att KC-pelarna inte förbättrar säkerheten för ytliga glidytor i slänten ned i Göta älv.

12.2 Beräkningssektion 31/450O

Kritiska glidytor i sektion 31/450O är relativt stora och omfattar jorden under väg 167 och slänten ned mot och under Göta älv. I Figur 26 nedan redovisas kritisk glidyta för odränerad analys.



Figur 26. Sektion 31/450O. Befintliga förhållanden utan anisotropi, odränerad analys.

Tabell 5. Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 31/450O, rödmarkerade värden uppfyller ej erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,35$ och $F_{komb} \geq 1,25$.

Sektion km 31/450, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,43 (OUTB1)	1,39 (OKTB1)	5:23–5:24
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	1,57 (OUTB2)	1,39 (OKTB2)	5:25–5:26
Känslighetsanalys 2 m erosion	1,27 (OUTE1)	1,10 (OKTE1)	5:27–5:28
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa	-	1,32 (OKTK1)	5:29
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa och 2 m erosion	-	1,05 (OKTK2)	5:30

Beräkningsresultaten för sektion 31/450O visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad respektive odränerad analys med och utan anisotropi.

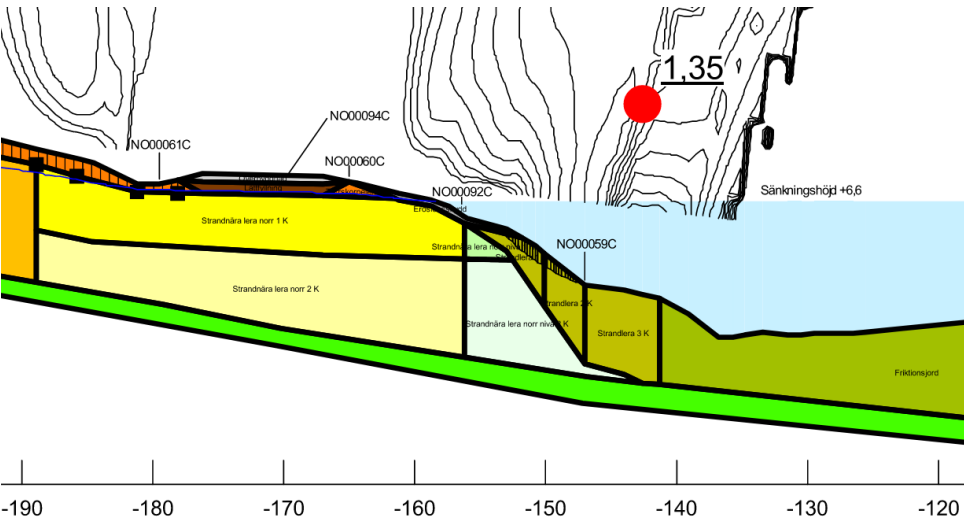
Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för erosion.

Utförd känslighetsanalys med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar, men uppfyller gällande krav. Mot bakgrund av ovanstående bedöms slänten inte vara känslig för portrycksökningar.

Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion i kombination med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för erosion i kombination med portrycksökning.

12.3 Beräkningssektion 31/4800

Kritiska glidytor i sektion 31/4800 är små och omfattar jorden i undervattensslänten ned i Göta älv. I Figur 27 nedan redovisas kritisk glidyta för kombinerad analys.



Figur 27. Sektion 31/4800. Befintliga förhållanden, kombinerad analys.

Tabell 6. Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 31/4800, rödmarkerade värden uppfyller ej erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,35$ och $F_{komb.} \geq 1,25$.

Sektion km 31/480, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,58 (OUTB1)	1,32/1,35 ¹⁾ (OKTB1)	5:31–5:32
Känslighetsanalys 2 m erosion	1,38 (OUTE1)	0,95/1,08 ¹⁾ (OKTE1)	5:34–5:36

Sektion km 31/480, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa	-	1,16 (OKTK1)	5:37
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa och 2 m erosion	-	0,94/1,01 ¹⁾ (OKTK2)	5:38-5:40

1) yttlig glidyta/stor glidyta

Beräkningsresultaten för sektion 31/480O visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad respektive odränerad analys utan anisotropi.

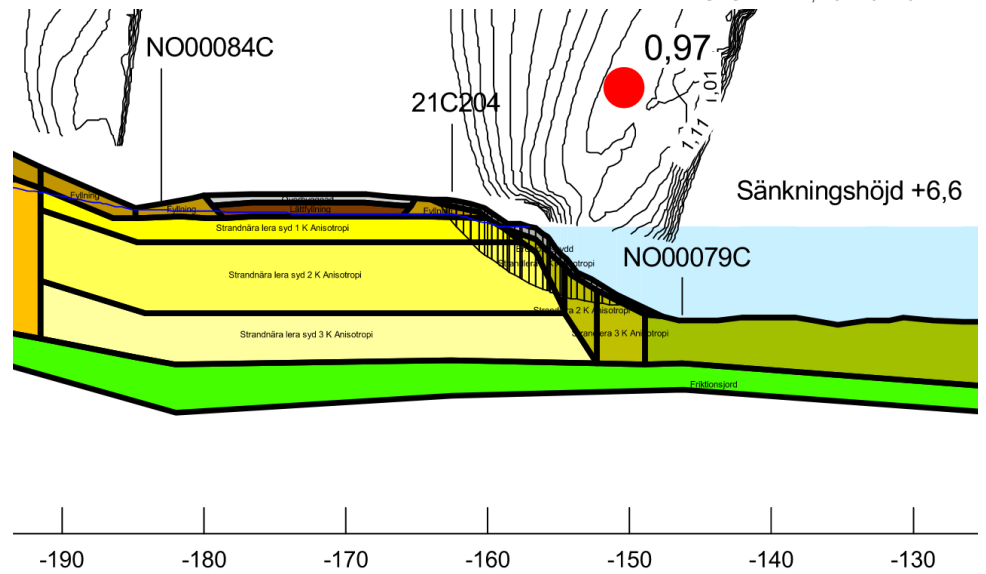
Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar för den kritiska glidytan och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls för kombinerad analys. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för erosion.

Utförd känslighetsanalys med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar, men uppfyller gällande krav. Mot bakgrund av ovanstående bedöms slänten inte vara känslig för portrycksökningar.

Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion i kombination med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar för den kritiska glidytan och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för erosion i kombination med portrycksökning.

12.4 Beräkningssektion 31/515O

Kritiska glidytor i sektion 31/515O är relativt små och omfattar jorden slänten ned i Göta älv väster om väg 167. I Figur 28 nedan redovisas kritisk glidyta för befintliga förhållanden för kombinerad analys med anisotropi.



Figur 28. Sektion 31/515O. Befintliga förhållanden med anisotropi, kombinerad analys.

Tabell 7. Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 31/515O, rödmarkerade värden uppfyller ej erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,35$ och $F_{komb.} \geq 1,25$.

Sektion km 31/515, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,10 (OUTB1)	0,95 (OKTB1)	5:41–5:42
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	1,34 (OUTB2)	0,97 (OKTB2)	5:43–5:45
Känslighetsanalys 2 m erosion	1,25 (OUTE1)	0,90 (OKTE1)	5:46-5:47
Känslighetsanalys Högre dränerad hållfasthet lera	-	1,47 (OKTK1)	5:48
Känslighetsanalys Älvlera från delområde Edet	-	0,98 (OKTK2)	5:49
Känslighetsanalys Medelvattenstånd Göta älv	-	1,09 (OKTK3)	5:50
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa	-	0,87 (OKTK4)	5:51
Känslighetsanalys Höjt portryck med 5 kPa och 2 m erosion	-	0,81 (OKTK5)	5:52

Sektion km 31/515, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Åtgärdsförslag Tryckbank och liten avschaktning	1,54 (OUTA1)	1,30 (OKTA1)	5:53–5:54
Åtgärdsförslag Avschaktning	1,41 (OUTA2)	1,26 (OKTA2)	5:55–5:56
Åtgärdsförslag Kalkcementpelare	1,51 (OUTA3)	1,20 (OKTA3)	5:57–5:59

Beräkningsresultaten för sektion 31/515O visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ej uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys med och utan anisotropi.

Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar svagt för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara måttligt känslig för erosion.

Utförd känslighetsanalys med högre dränerad hållfasthet i leran visar att beräknad säkerhetsfaktor ökar markant och att erforderlig säkerhetsfaktor uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för lerans dränerade hållfastegenskaper.

Utförd känslighetsanalys med älvlera enligt jordmodell från delområde Edet visar att beräknad säkerhetsfaktor ökar mycket lite för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således inte vara känslig för osäkerheter i älvlerans egenskaper.

Utförd känslighetsanalys med medelvattenstånd i Göta älv visar att beräknad säkerhetsfaktor ökar svagt för den kritiska glidyten, men att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således inte vara känslig för vattenståndet i Göta älv.

Utförd känslighetsanalys med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar och ej uppfyller gällande krav. Mot bakgrund av ovanstående bedöms slänten vara något känslig för portrycksökningar.

Utförd känslighetsanalys för ett framtida scenario där bottennivån i Göta älv sänks med 2 m på grund av erosion i kombination med 5 kPa högre portryck visar att beräknad säkerhetsfaktor minskar för den kritiska glidyten och att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls. Beräkningssektionen bedöms således vara känslig för erosion i kombination med portrycksökning.

För att uppfylla erforderlig säkerhetsfaktor kan slänten mot Göta älv schaktas av alternativt en tryckbank läggas ut på älvbotten.

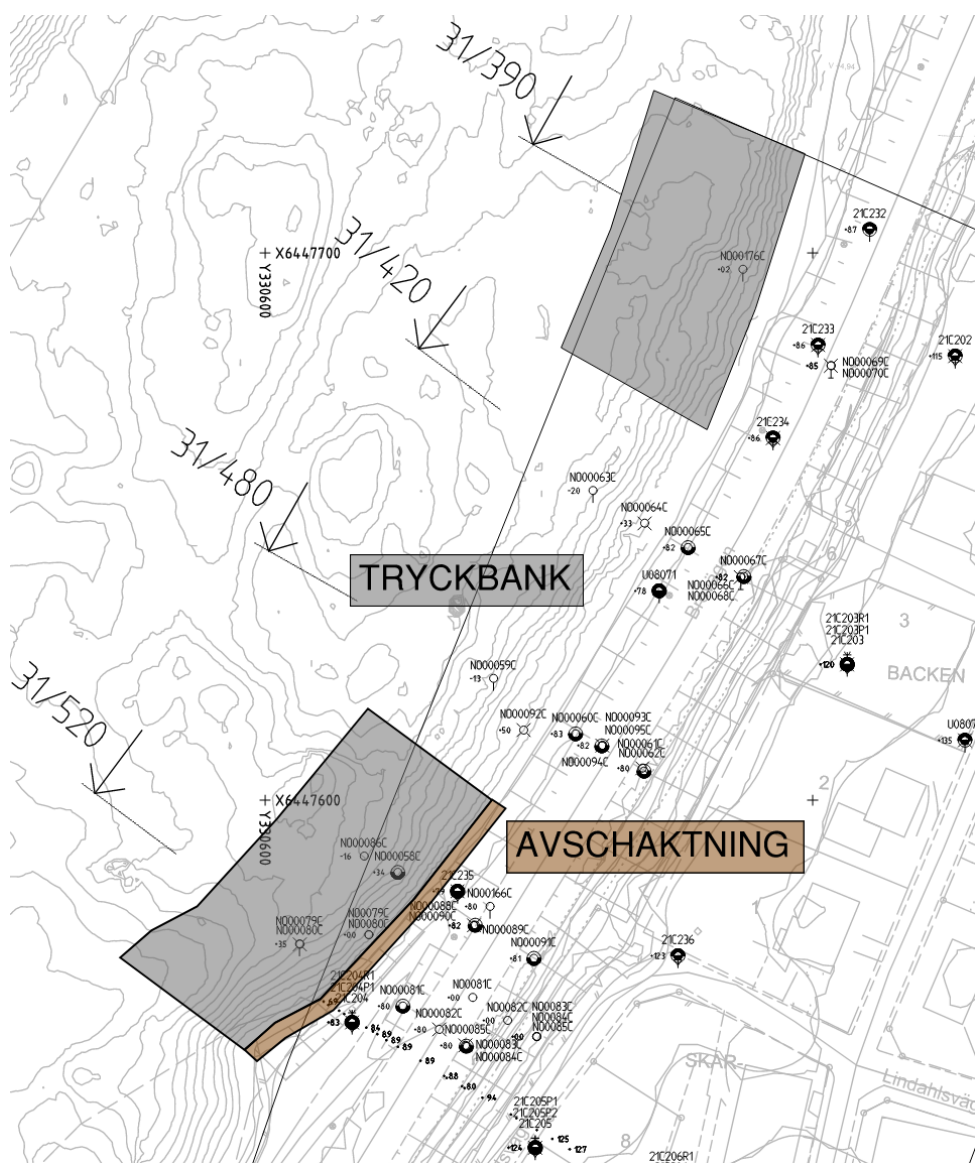
Beräknat åtgärdsförslag med kalkcementpelare, där pelarna ej installeras nedanför vattenlinjen uppfyller erforderlig säkerhetsfaktor för odränerade analys, men ej för kombinerad analys. Detta till följd av att KC-pelarna inte förbättrar säkerheten för ytliga glidytor i slänten ned i Göta älv.

13 Föreslagna åtgärder

För att erhålla tillfredställande säkerhetsfaktor för de nordligaste och sydligaste delarna av utredningsområdet föreslås utläggning av tryckbankar i Göta älv, i kombination med en mindre avschaktning i södra delen.

I norra delen av området föreslås en tryckbank läggas ut längs en sträcka av ca 50 m med en bredd på ca 30 m. I den södra delen av området föreslås en tryckbank läggas ut, samt en avschaktning utföras längs en sträcka av ca 65 m, med en bredd på tryckbanken på ca 28 m och en bredd på avschaktningen på ca 3 m.

I Figur 29 redovisas ungefärlig utbredning av föreslagna åtgärder i plan.



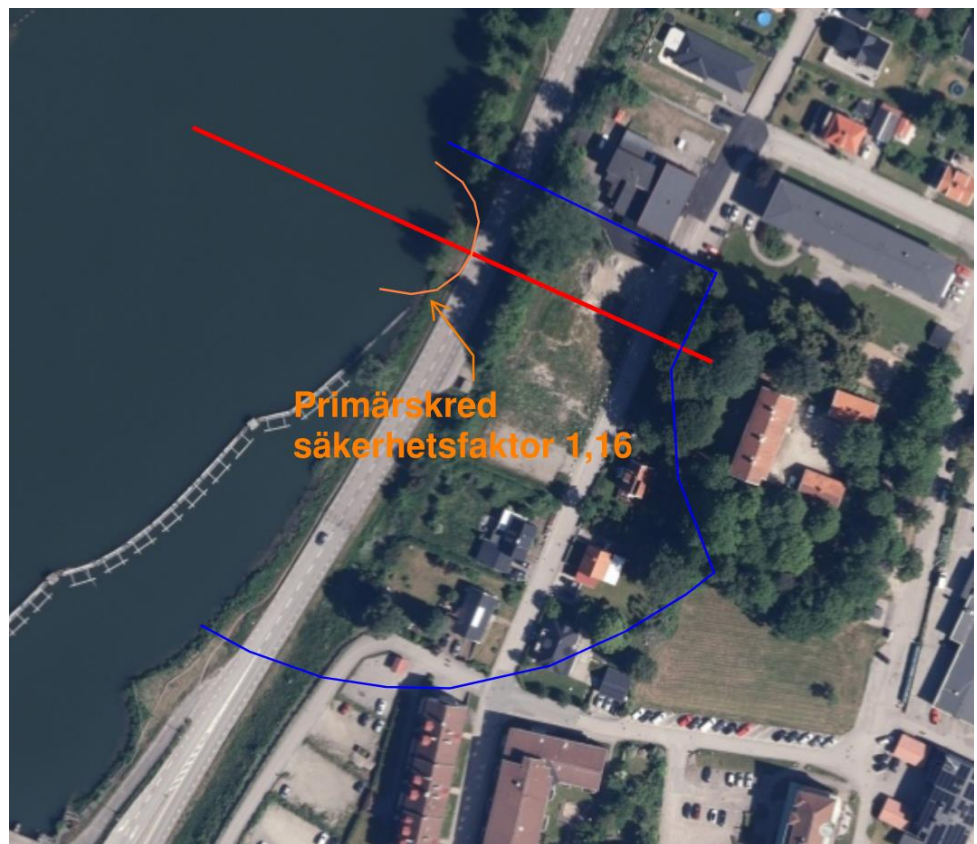
Figur 29. Ungefärlig utbredning av föreslagna åtgärder. Tryckbank markerad med grå polygon och avschaktning med brun polygon

14 Bedömd skredutbredning

Förekomst av kvicklera och högsensitiv lera innebär risk för bakåtgripande skred om ett initialt skred skulle inträffa. En bedömning av skredutbredning för sekundära skred har utförts enligt SGI Varia 638 (2012) och SGI GÄU-delrapport 32 (2011).

Sensitiviteten inom området närmast bedömda primärscred i sektion km 31/3900 och 31/5150 uppgår till ca 10–90.

I Figur 30 nedan redovisas översiktligt sekundär skredutbredning för sektion km 31/3900 med blå linje och primär skredutredning med orange linje. Potentiella sekundärscred avgränsas av fastmark i norr och öster.



Figur 30. Uppskattad utbredning i plan av eventuella primärscred (orange) och sekundärscred (blått) för skred i sektion km 31/3900. (Kartkälla: minkarta.lantmateriet.se 2023).

I Figur 31 nedan redovisas översiktligt sekundär skredutbredning för sektion km 31/5150 med blå linje och primär skredutredning med orange linje. Potentiella sekundärskred avgränsas söderut av den förstärka delen av vattenintaget till Lilla Edets kraftverk.



Figur 31. Uppskattad utbredning i plan av eventuella primärskred (orange) och sekundärskred (blått) för skred i sektion km 31/5150. (Kartkälla: minkarta.lantmateriet.se 2023).

15 Slutsats och rekommendationer

Stabilitetsutredning med totalsäkerhetsmetoden baseras på grundtanken att ju mer information som finns inom ett område, desto lägre krav erfordras på beräknad säkerhetsfaktor. I IEG Rapport 4:2010 anges säkerhetsfaktorer, för olika utredningsskeden, som ett intervall där gynnsamma och ogynnsamma förhållanden vägs ihop till en objektspecifik säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott. Erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott för denna utredning motsvarar mitten av intervallet.

Denna fördjupade stabilitetsutredning visar att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott i den centrala delen av området, km 31/4500 och km 31/4800, uppfyller gällande krav för befintliga förhållanden med totalsäkerhetsmetoden.

Stabilitetsutredning visar vidare att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott i den nordligaste och sydligaste delen av området, km 31/3900, 31/5150, ej uppfyller krav för befintliga förhållanden. Föreslagen stabilitetshöjande åtgärd i dessa områden är utläggning av tryckbank i Göta älv, som ökar lasten på den mothållande sidan. Tryckbanken ska byggas upp av ej erosionskänsligt material, vilket innebär att den även kommer fungera som erosionsskydd.

De mest kritiska glidyterna i området är för kombinerad analys där större delen av brottytan utgörs av dränerat brott. Därav är de dränerade hållfasthetsparametrarna av stor vikt, vilka i denna utredning bestämts empiriskt. Utförande av avancerade laboratorieförsök för att bestämma de dränerade hållfasthetsparametrarna skulle kunna resultera i högre dränerad hållfasthet, vilket skulle begränsa omfattningen på åtgärdsförslagen.

Området bedöms vara känsligt för erosion av Göta älvs botten. Det är därav av stor vikt att befintliga erosionsskydd fortlöpande underhålls för att bibehålla sin funktion.