

SEPTEMBER 2021
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

KÄRRA, LILLA EDETS KOMMUN

PM GEOTEKNIK FÖRDJUPAD STABILITETSUTREDNING

38400OPM01



COWI

ADRESS COWI AB
Skärgårdsgatan 1
Box 12076
402 41 Göteborg
Sverige

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

SEPTEMBER 2021
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

KÄRRA, LILLA EDETS KOMMUN

PM GEOTEKNIK FÖRDJUPAD STABILITETSUTREDNING

38400OPM01

DIARIENUMMER

1910-0732

UPPDRAGSNUMMER

20072

KONTAKTPERSON SGI

Per Nylander

PROJEKTNR.

A206330

DOKUMENTNR.

38400OPM01

VERSION

1.0

UTGIVNINGSDATUM

2021-09-17

BESKRIVNING

PM Geoteknik fördjupad
stabilitetsutredning

UTARBETAD

Vilhelm Berling

GRANSKAD

Charlotte Junkers
& Andreas
Stöllman

GODKÄND

Christina Edström

INNEHÅLL

1	Objekt	8
2	Syfte	8
3	Underlag för utredning	9
3.1	Utförda undersökningar	9
3.2	Övrigt underlag	9
4	Styrande dokument	10
5	Projekteringsanvisningar	10
6	Befintliga förhållanden	11
6.1	Topografi och ytbeskaffenhet	11
6.2	Befintliga konstruktioner	14
6.3	Tidigare jordskred	15
7	Geotekniska förhållanden	16
7.1	Jordlagerförhållanden	16
7.2	Utvärdering högsensitiv silt	17
7.3	Hydrogeologiska förhållanden	19
8	Valda beräkningsparametrar	21
8.1	Jordmaterialparametrar	21
8.2	Portrycksmodell	25
8.3	Vattenstånd i älven	27
8.4	Laster	27

9	Känslighetsanalys	27
9.1	Förändring av portrycksförhållanden	27
9.2	Förändrad geometri till följd av erosion	28
10	Gynnsamma & ogynnsamma förutsättningar	28
11	Beräkningar och resultat	30
11.1	Sektion 38/425O	32
11.2	Sektion 38/675O	33
11.3	Sektion 39/000O	36
12	Slutsats och rekommendationer	38

BILAGOR

Bilaga 1	Sammanställning av valda karakteristiska värden för odränerad skjuvhållfasthet
Bilaga 2	Sammanställning av valda karakteristiska värden för dränerad skjuvhållfasthet
Bilaga 3	Sammanställning av vald tunghet
Bilaga 4	Sammanställning av valda portryck
Bilaga 5	Beräkningsresultat stabilitetsanalys
Bilaga 6	PM – Val av jordmodell
Bilaga 7	Portrycksprognos

Förord

Regeringen har gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att minska risken för skred i Göta älvdalen. För att effektivisera det arbetet inrättades Delegationen för Göta älv år 2018. Delegationens arbete leds och samordnas av SGI och består av representanter från Vänersborgs, Trollhättans, Lilla Edets, Ales, Kungälv och Göteborgs kommuner, Länsstyrelsen Västra Götaland, Länsstyrelsen Värmland, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), Sjöfartsverket, Trafikverket, Vattenfall Vattenkraft AB och SGI.

Inom ramen för Delegationens arbete genomförs detaljerade och fördjupade stabilitetsutredningar för områden som utpekats med hög- eller medelhög skredrisk i Göta älvtutredningen år 2009–2011. Stabilitetsutredningarna utförs av geotekniska konsulter vars uppdrag upphandlas och leds av SGI som är delaktiga i arbetet. I konsulternas uppdrag ingår bland annat att presentera en trolig skjuvhållfasthet samt förslag på genomförbara stabilitetshöjande åtgärder.

Utredningsresultaten ligger till grund för SGI:s fortsatta analysarbete, beräkning av sannolikheten för skred samt planering av eventuella stabilitetshöjande åtgärder.

Sekretariatet till Delegation för Göta älv

1 Objekt

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

Undersökningsområdet är beläget på östra sidan om Göta Älv, ca 5 km söder om Lilla Edets centrum, se Figur 1 för översiktsbild över aktuellt område. Enligt älvens längdmätning sträcker sig området från ca km 38/300 i norr till 39/200 i söder. För planritning med längdmätning hänvisas till MUR Geoteknik.



Figur 1. Översiktsbild, aktuellt område markerat med vit-streckad linje (kartkälla: eniro.se, 2021).

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 älv, se kapitel 3.1 och kapitel 3.2 för detaljerad sammanställning.

3.1 Utförda undersökningar

COWI AB har under 2020 utfört geotekniska fält- och laboratorieundersökningar. Resultaten från dessa undersökningar redovisas i:

- > Kärra, Lilla Edets kommun, Fördjupad stabilitetsutredning, 38400ORA01, Markteknisk undersökningsrapport (MUR) Geoteknik, Uppdragsnummer COWI A206330, daterad 2021-07-08.

Inom det aktuella området har geotekniska utredningar utförts tidigare. Undersökningar redovisas i följande handlingar:

- > Lilla Edets kommun, Kärra 8:2. Till/nybyggnad, Enbostadshus, Geoteknisk undersökning, Markteknisk undersökningsrapport. Uppdragsnummer 19-004. Geo-gruppen AB, daterat 2019-05-31
- > SGI (2010). Göta älvutredningen. Uppdragsnummer 14087. Golder Associates AB/Sweco infrastructure AB, daterat 2010-12-10.

3.2 Övrigt underlag

- > Grundkarta erhållen från beställaren, maj 2020
- > Batymetrisk mätning av älvbotten från 2018
- > Höjddata från Lantmäteriets WCS-tjänst, nedladdad 2020
- > Geosuite-databas med tidigare utförda undersökningspunkter erhållen från beställaren, maj 2020
- > SGU:s kartvisare för jordskred och raviner, november 2020

4 Styrande dokument

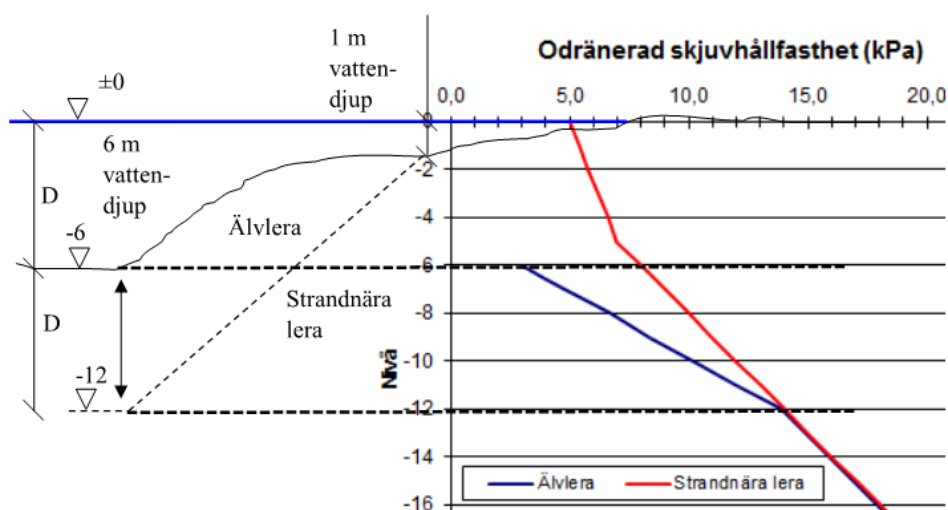
Som underlag till denna utredning har nedanstående styrande dokument använts.

- > 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, Släntar och Bankar.

5 Projekteringsanvisningar

Stabilitetsberäkningar har utförts med totalsäkerhetsmetoden. Erforderliga säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott för totalsäkerhetsmetoden krävs i IEG Rapport 4:2010. Enligt direktiv från beställaren, SGI ska beräknad säkerhetsfaktor (F_{tot}) med totalsäkerhetsmetoden överstiga $F_c = 1,4$ för odränerad analys och $F_{komb} = 1,3$ för kombinerad analys. Erforderliga säkerhetsfaktorer för uppdraget motsvarar därmed den övre gränsen av intervallet som anges i IEG Rapport 4:2010.

I anslutning till Kärrå finns inga geotekniska undersökningar i själva Göta älv. Vald skjuvhållfasthet under Göta älv är utvärderad från empiri enligt direktiv från beställaren, SGI. I beräkningarna ansätts älvlerans hållfasthet omedelbart under älvbotten till 3 kPa och ökar linjärt mot det värde som motsvarar den hållfasthet som råder på land, se Figur 2.



Figur 2 Skjuvhållfasthetens antagna fördelning mot djupet enligt riktlinjer från SGI.

Älvlerans 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 aktiva 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 har höjddata från Lantmäteriets WCS-tjänst använts. Bottennivåer i Göta älv har hämtats från batymetrisk mätning från 2018.

Stabilitetsanalysen har utförts med datorprogrammet Geostudio 2020, version 10.2.2.20559, med totalsäkerhetsmetoden för samtliga beräkningsfall.

6 Befintliga förhållanden

6.1 Topografi och ytbeskaffenhet

Det aktuella utredningsområdet består till största delen av flack åker- eller ängsmark, se Figur 3. I sydost och söder gränsar området till ett trädbevuxet höjdparti med berg i dagen.



Figur 3. Vy över mark med ängsmark, fotograferat åt norr (COWI AB, 2020).

Utmed älvkanten återfinns en smal remsa med lövträd, bitvis bestående av enstaka träd och bitvis av tätare vegetation, se Figur 5. I den allra östligaste delen av området återfinns berg i dagen, se Figur 4.



Figur 4. Berg i dagen, vy åt öster (COWI AB, 2020).



Figur 5. Strandkant med erosionsskydd, vy åt norr (COWI AB, 2020).

Markytan inom området är till största delen flack med en svag lutning från öst till väst med en nivå mellan ca +7 och +10. Vid älven sluttar markytan brantare ned mot älven till nivån ca +1. Slänten precis ovan strandlinjen har en varierande lutning mellan ca 1:2,5 och 1:6. I sydöstra delen av undersökningsområdet stiger markytan brant upp till nivån ca +25.

Bottennivån för Göta älvs farled ligger på ca -10 och lutningen från strandlinjen ned till älvbotten varierar mellan ca 1:3 och 1:7.

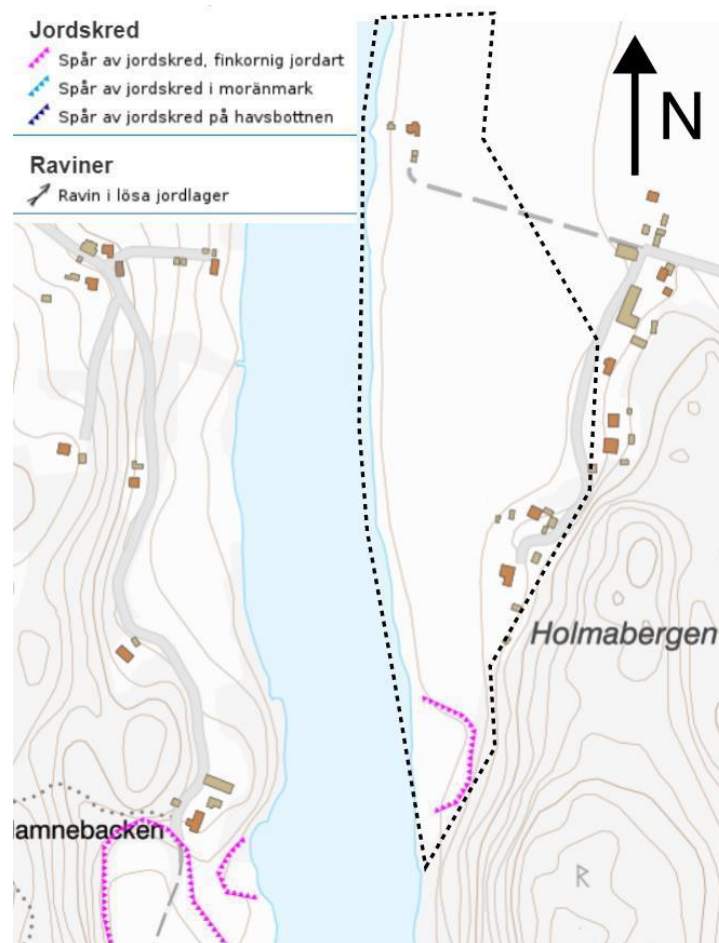
6.2 Befintliga konstruktioner

Inom utredningsområdets östra del finns flertalet fastigheter med bostadshus samt några ekonomibyggnader. Samtliga byggnader i området förutom en fastighet i nordväst är lokaliserade i den allra östligaste delen av området där berg i dagen återfinns. Ledningar finns i anslutning till bostadshusen i området.

Längs med Göta älv, genom hela utredningsområdet finns ett erosionsskydd av sprängsten, se Figur 5. Mäktighet och utbredning av erosionsskyddet mot djupet är okänt. Vid platsbesök 2020-06-10 bedöms erosionsskyddet närmast strandlinjen ha god kvalitet, dock medför grumlighet i Göta älv svårigheter att bedöma erosionsskyddets kvalitet och utbredning under vattenytan.

6.3 Tidigare jordskred

Enligt SGU:s digitala kartvisare över tidigare jordskred finns spår av jordskred i utredningsområdets södra del, se Figur 6. Tidigare skredärr markeras med lila taggig linje.



Figur 6. Utdrag från SGU:s digitala kartvisare över tidigare jordskred med aktuellt område markerat med svartstreckad linje, 2020-11-06.

7 Geotekniska förhållanden

I nedanstående kapitel beskrivs jordlagerförhållanden övergripande. För valda materialparametrar, se kapitel 8 och bilagor. För undersökningsresultat hänvisas till MUR Geoteknik enligt kap 3.1.

7.1 Jordlagerförhållanden

Jordlagren utgörs av mulljord ovan silt som vilar på friktionsjord ovan berg. Ställvis återfinns ett lager med grövre jord i silten. Utförda sonderingar har stoppat mot förmodat block eller berg, alternativt mot friktionsjord på ett djup mellan ca 3,5 och 31 m under markytan. Vid utredningsområdets sydöstra gräns finns fastmarkspartier med berg i dagen.

Mulljordens mäktighet har uppmätts till mellan ca 0,2 och 0,7 m.

Silten är i allmänhet lerig och något gyttjig med en lerhalt som ökar mot djupet. Den översta delen av silten utgörs av ett ca 0,3 till 1 m tjockt siltlager med torrskorpekaraktär ovan ett lager med sandig silt med en mäktighet på ca 0,5 till 2 m. Ned till ca 5 till 10 m djup klassificeras jorden som en silt och nedan detta övergår den till en lerig silt. Siltens totala mäktighet har tolkats till mellan ca 2,5 och 28 m.

De största siltmäktigheterna återfinns utmed älven i den norra delen av utredningsområdet. I allmänhet minskar mäktigheten i riktning mot fastmarkspartierna i östra och södra utkanten av området. I norra delen av området återfinns dock ett område som sträcker sig i nord-sydlig riktning med mindre mäktigheter. Ett lager med grövre jord går att urskilja i silten i de flesta undersökningspunkter där djupet till fast botten eller berg överstiger 17 m. Lagret med grövre material har en mäktighet mellan ca 0,1 och 5 m och återfinns på ett djup mellan ca 15 och 23 m under markytan.

Siltens odränerade direkta skjuvhållfasthet har bestämts utifrån utvärderade CPT-sonderingar, vingförsök samt konförsök och direkta skjuvförsök på ostörda prover. Den aktiva skjuvhållfastheten hos silten har utvärderats från aktiva odränerade triaxialförsök. Dessutom har siltens dränerade hållfasthetsegenskaper utvärderats från aktiva odränerade och dränerade triaxialförsök. Siltens korrigerade odränerade skjuvhållfasthet bedöms variera mellan ca 15 och 55 kPa.

Siltens densitet varierar mellan ca 1,61 och 1,71 t/m³. Den naturliga vattenkvoten har bestämts till mellan ca 50 och 70 %. Konflytgränsen varierar mellan ca 40 och 70 %.

Siltens sensitivitet har vid nu och tidigare utförda geotekniska undersökningar bestämts till mellan ca 20 och 100. Undersökningspunkt 20C629 har högre sensitivitet än övriga undersökningspunkter och klassificeras som högsensitiv och kvick. Bestämning av sensitivitet i övriga undersökningspunkter visar på jorden är mellansensitiv. Se kapitel 7.2 för detaljerad utvärdering av högsensitiv silt i området.

Skikten med **grövre jord** utgörs troligen av mer friktionsjord än övrig silt. Dess egenskaper har ej undersökts. **Fiktionsjorden** under silten har en mäktighet varierande mellan ca 0,1 och 2,7 m. Dess egenskaper har ej undersökts.

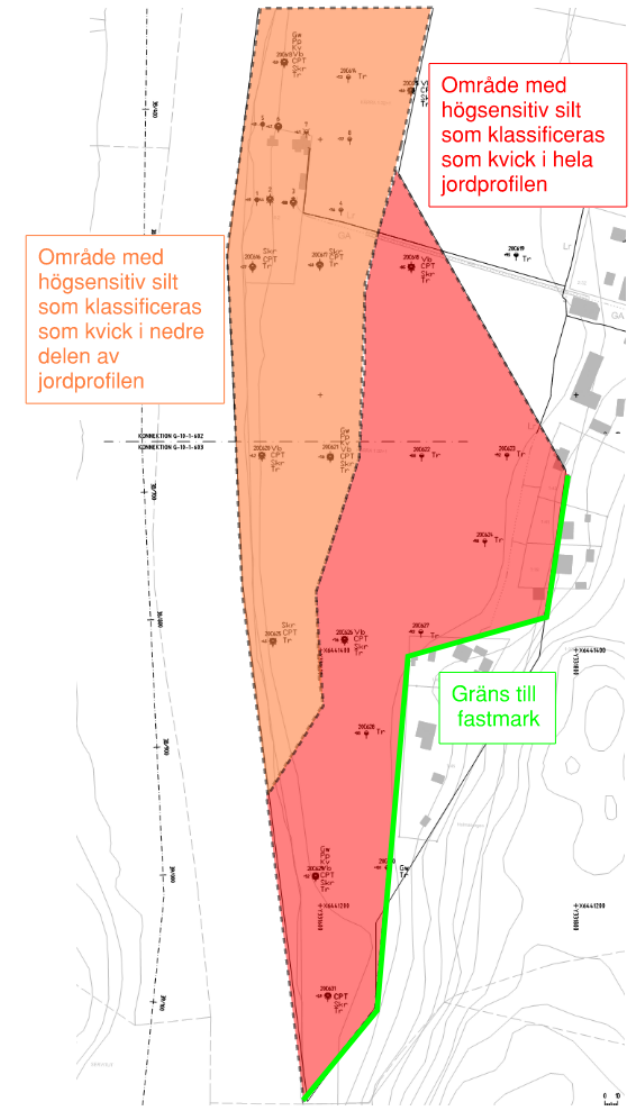
7.2 Utvärdering högsensitiv silt

Förekomst av högsensitiv silt har utvärderats från ostörd provtagning tillsammans med CPTU-R och trycksonderingar. Där den högsensitiva silten har en sensitivitet över 50 och en omrörd odränerad skjuvhållfasthet mindre än 0,4 klassificeras den som kvick.

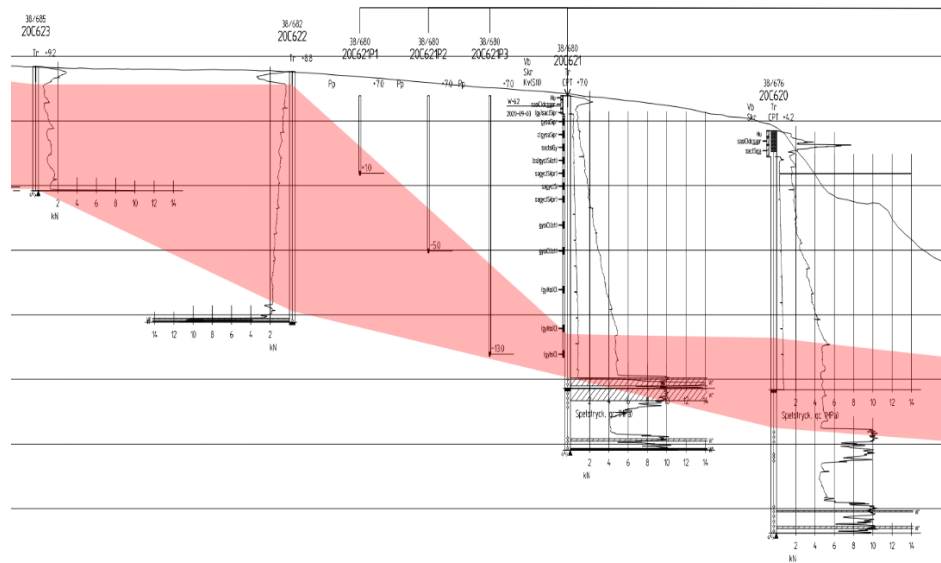
Laboratorieanalys av ostörda prover visar på förekomst av silt som klassificeras som kvick i undersökningspunkt 20C629, belägen i södra delen av undersökningsområdet. Analys av ostörda prover från övriga undersökningspunkter visar inte på förekomst av silt som klassificeras som kvick.

Utvärdering av CPTU-R och trycksondering visar omväxlande på att silt med förutsättningar för att klassificeras som kvick förekommer i hela siltlagret i östra delen av utredningsområdet. I västra delen av området har ställvis den nedre delen av silten utvärderats som kvick. Detta nedre skikt har en mäktighet varierande mellan ca 2 och 8 m. Den allra sydligaste delen har till följd av små jorddjup inte kunnat utvärderats. Se Figur 7 för ungefärlig utbredning i plan av silt som klassificeras som kvick. Bedömd utbredning av högsensitiv silt, som klassificeras som kvick, mot djupet redovisas i Figur 8 och Figur 9. För utvärdering av förekomst av högsensitiv silt i respektive undersökningspunkt, se MUR.

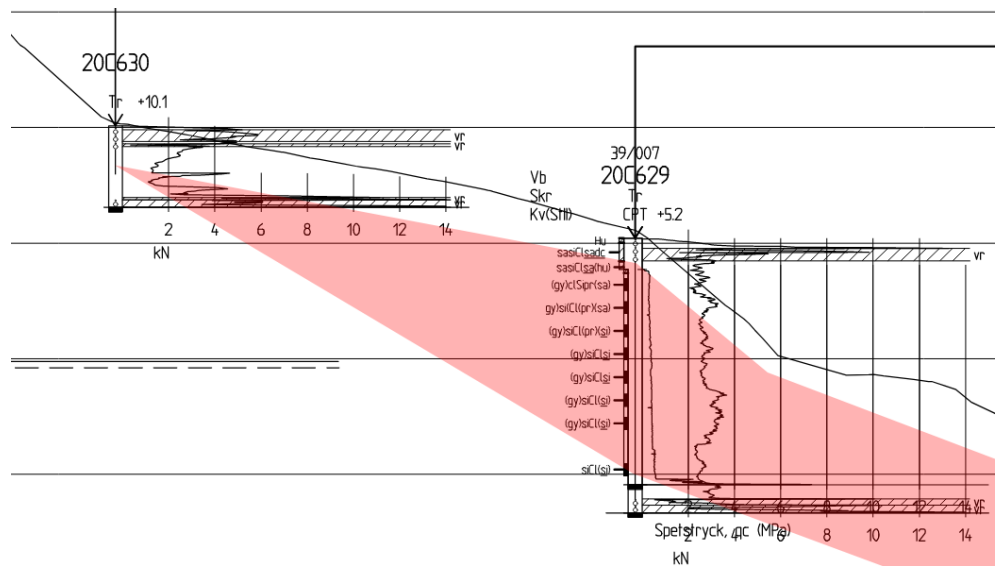
Utbredningen av högsensitiv silt som klassificeras som kvick i plan och mot djup medför att det finns förutsättningar för bakåtgripande skred.



Figur 7. Översiktbild, område med förekomst av högsensitiv silt som klassificeras som kvick är röd- och orangemarkerat.



Figur 8 Illustration över bedömd utbredning av högsensitiv silt som klassificeras som kvick, där området med högsensitiv silt, som klassificeras som kvick, markeras med rött. Sektionen redovisas i förställd skala.



Figur 9 Illustration över bedömd utbredning av högsensitiv silt, som klassificeras som kvick, där området med högsensitiv silt som klassificeras som kvick markeras med rött. Sektionen redovisas i förställd skala.

7.3 Hydrogeologiska förhållanden

Sammanställda diagram med mätningar från installerade porttryckspetsar och grundvattenrör kan ses i Bilaga 4. För sektionsritningar för nu utförda undersökningspunkter hänvisas till Bilaga 11 i MUR Geoteknik enligt kap 3.1.

Hydrogeologiska undersökningar har utförts i fyra undersökningspunkter, 20C613, 20C621, 20C629 och 20C630.

I punkt 20C613 har elektriska portrycksmätare installerats på tre nivåer i silten, 5, 10 och 20 m under markytan. Mätvärden har loggats en gång per dygn under perioden september år 2020 till juni år 2021. Mätningar på 5 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 0,7–2,1 m under markytan. Mätningar på 10 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 1,1–2,2 m under markytan. Mätningar på 20 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 1,4–1,9 m under markytan. De tre nivåerna visar på en i stort sett hydrostatisk portrycksfördelning mot djupet.

I punkt 20C621 har elektriska portrycksmätare installerats på tre nivåer i silten, 6, 12 och 20 m under markytan samt ett grundvattenrör i friktionsjorden under silten, 27,2 m under markytan. Mätvärden har loggats en gång per dygn av portrycksmätarna och mätning i grundvattenröret har utförts vid 5 tillfällen under perioden september år 2020 till juni år 2021. Mätningar på 6 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 0,1–0,7 m under markytan. Mätningar på 12 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 0,8–1,3 m under markytan. Mätningar på 20 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 3,1–3,9 m under markytan. Mätningar i grundvattenröret visar på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 3,6–4,3 m under markytan. Detta innebär en hydrostatisk portrycksfördelning ned till nivåerna 6 och 12 m under markytan, samt ett portryck som är något lägre än hydrostatiskt på nivåerna 20 och 27,2 m under markytan.

I punkt 20C629 har elektriska portrycksmätare installerats på två nivåer, 5 och 10 m under markytan samt ett grundvattenrör i friktionsjorden under silten, 11,8 m under markytan. Mätvärden har loggats en gång per dygn av portrycksmätarna och mätning i grundvattenröret har utförts vid 4 tillfällen under perioden september år 2020 till juni år 2021. Mätningar på 5 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 0,8–1,3 m under markytan. Mätningar på 10 m djup visar på portrycksnivåer motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 0,1–0,7 m ovan markytan. Mätningar i grundvattenröret visar på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 0,8 m under markytan och 0,4 m ovan markytan. Detta innebär en hydrostatisk portrycksfördelning ned till 5 m under markytan och ett portryck något högre än hydrostatiskt på nivåerna 10 och 11,8 m under markytan.

I punkt 20C630 har ett grundvattenrör installerats i friktionsjorden under silten, 3,5 m under markytan. Mätningar har utförts vid 4 tillfällen under perioden september år 2020 till juni år 2021, vilka visar på en trycknivå motsvarande en fri grundvattenyta mellan ca 0,6–1,2 m under markytan.

8 Valda beräkningsparametrar

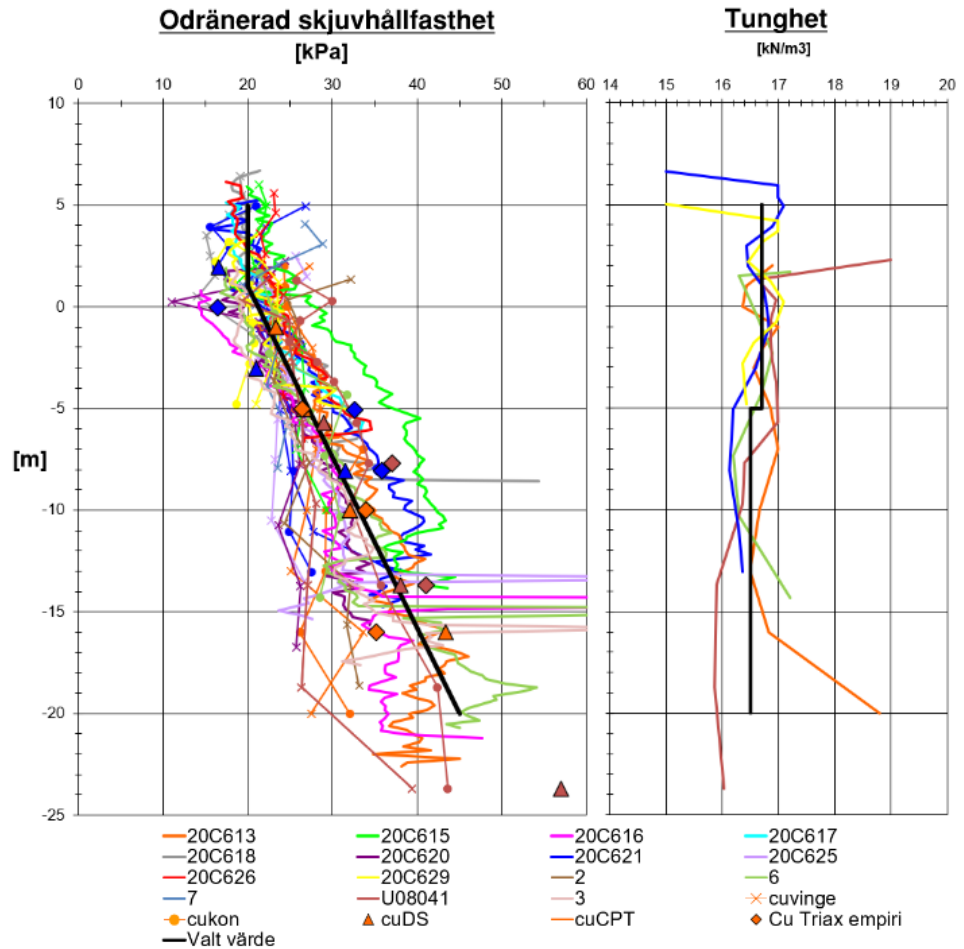
I nedanstående beskrivning sammanställs valda materialparametrar tillsammans med en övergripande beskrivning av motiv till valda värden. För en fördjupad beskrivning till motiv till valda materialparametrar hänvisas till PM Val av Jordmodell, se Bilaga 6.

8.1 Jordmaterialparametrar

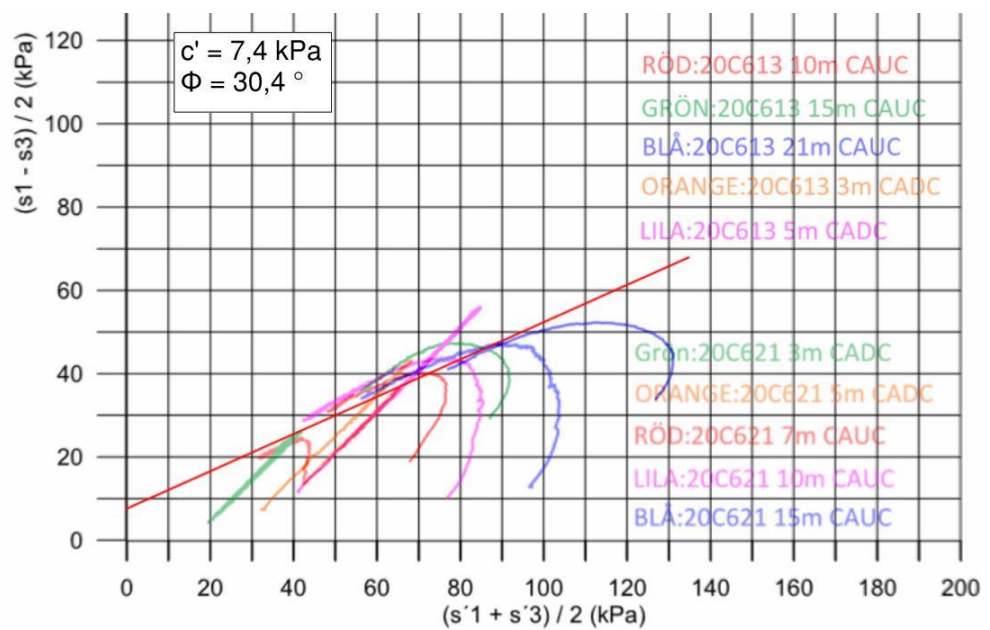
Odränerad skjuvhållfasthet har valts genom en ingenjörsmässig bedömning där stor tyngdpunkt har lagts på utförda kvalificerade laboratorieanalyser, framförallt direkta skjuvförsök och triaxialförsök.

Utvärderade materialparametrar visar på en relativ stor samstämmighet över hela området, vilket innebär att en jordmodell har använts för all silt ovanför strandlinjen. Valda värden redovisas i Tabell 1 och diagram över skjuvhållfasthet, tunghet och friktionsvinkel redovisas i Figur 10 och Figur 11. Valda parametrar för siltens korrigerade odränerade skjuvhållfasthet redovisas i Bilaga 1, valda värden för friktionsvinkel och kohesionsintercept redovisas i Bilaga 2 och densitet redovisas i Bilaga 3.

Utvärderad skjuvhållfasthet från direkta skjuvförsök i undersökningspunkt 20C629 har valts att inte redovisas i Figur 10 till följd av bristande provkvalitet. Se bilaga 6 PM val av jordmodell för resonemang kring provernas kvalitet.



Figur 10. Diagram över vald skjuvhållfasthet och tunghet mot nivå.



Figur 11. Diagram över vald friktionsvinkel och kohesionsintercept.

Tabell 1 Karakteristiska materialparametrar

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter
Varierar	Torrskorpa	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 8 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 30 \text{ kPa}$, $c'_k = 3 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$
Varierar	Sprängsten	$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ $c'_k = 0 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 45^\circ$
Ovan +1	Silt 1	$\gamma = 16,7 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6,7 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 20 \text{ kPa}$, $c'_k = 7,4 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30,4^\circ$
Mellan +1 och -5	Silt 2	$\gamma = 16,7 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6,7 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 20 \text{ kPa}$, $\Delta c_{uk} = 1,2 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 7,4 \text{ kPa}$, $\Phi'_k = 30,4^\circ$
Under -5	Silt 3	$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 27,2 \text{ kPa}$, $\Delta c_{uk} = 1,2 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 7,4 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30,4^\circ$
Varierar	Älvlera	$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = - 1)$ $\Delta c_{uk} = - 1)$ $c'_k = - 1)$ $\Phi'_k = 30^\circ$
Ovan +1	Silt 1 empiri	$\gamma = 16,7 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6,7 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 20 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 1,2 \text{ kPa/m}$

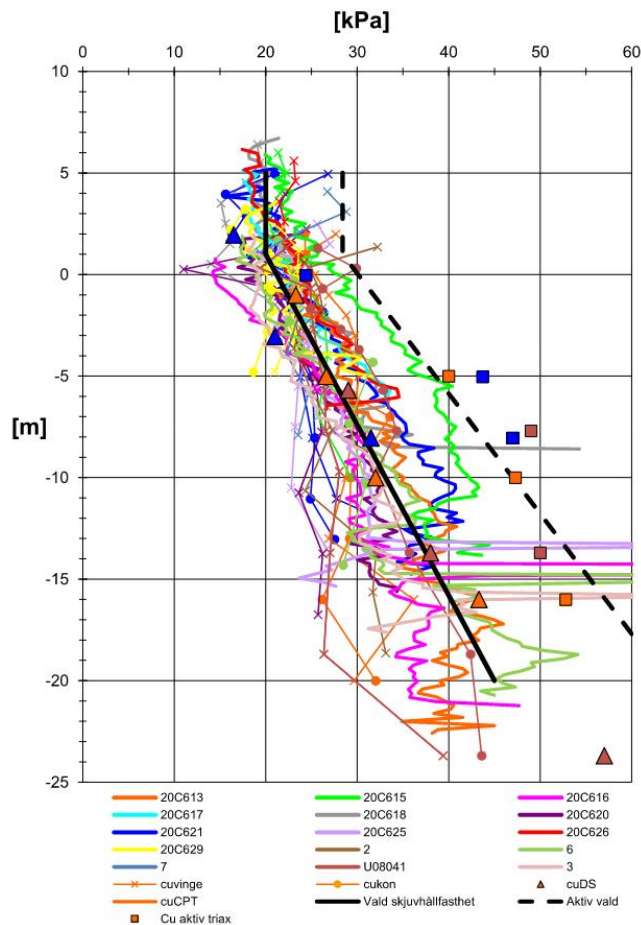
Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter
		$c'_k = 0,1c_{uk}$ $\Phi'_k = 30^\circ$
Mellan +1 och -5	Silt 2 empiri	$\gamma = 16,7 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6,7 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 20 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 1,2 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 0,1c_{uk}$ $\Phi'_k = 30^\circ$
Under -5	Silt 3 empiri	$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 27,2 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 1,2 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 0,1c_{uk}$ $\Phi'_k = 30^\circ$

¹⁾ Varierar beroende på sektionens geometri, se kapitel 5.

8.1.1 Anisotropifunktion

Baserat på utförda aktiva odränerade triaxialförsök har ett förhållande mellan vald direkt skjuvhållfasthet och vald aktiv skjuvhållfasthet bestämts. Förhållandet mellan aktiv och direkt skjuvhållfasthet redovisas i Figur 12 där kvoten $c_{u}^{\text{aktiv}}/c_{u}^{\text{direkt}}$ är vald till 1,42. Detta motsvarar en vilojordtryckskoefficient, K_0 på 0,61. Vid empirisk beräkning av K_0 baserad på konflytgränsen och överkonsolideringsgraden varierar K_0 mellan ca 0,55 och 0,75.

Skjuvhållfasthet - odränerad analys, med nivå. Alla metoder.

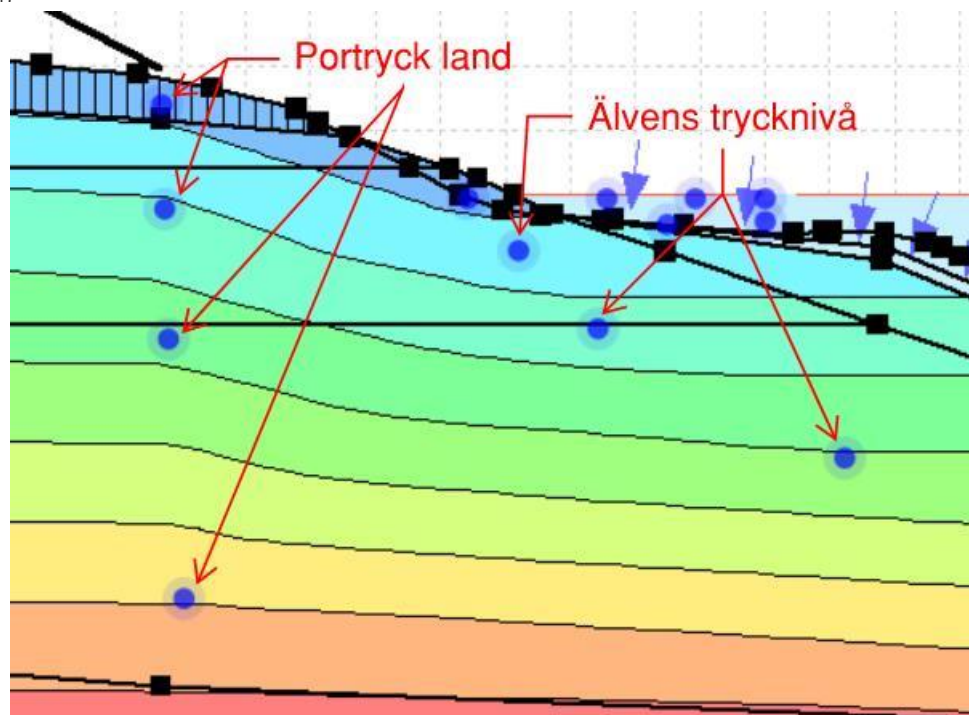


Figur 12. Vald aktiv skjuvhållfasthet mot nivå.

8.2 Portrycksmodell

Inom området närmst älven har grundvattennivån antagits ligga i nivå med Göta älvs vattenyta på nivå ca -0,1. Portrycksfördelningen har valts från avlästa värden i de undersökningspunkter som beskrivs i kapitel 7.3. Valda portrycksfördelningar redovisas i Bilaga 4.

Portrycksmätningar har ej utförts i zonen mellan trycknivån som råder på land och den som råder i älven. Hur kopplingen mellan dessa trycknivåer ser ut har därav antagits. Trycknivån i älven har antagits vara styrande i en större del av jordens mäktighet ju längre ut i älven man kommer, se Figur 13. Mellan dessa punkter har portrycket interpolerats linjärt.



Figur 13. Koppling mellan portryck på land och i älven.

Mellan de valda portrycksfördelningarna och trycknivån i älven har portrycket interpolerats linjärt. För sektionerna 38/4250 och 38/6750 har portrycksfördelningen från undersökningspunkt 20C613 och 20C621 använts, medan portrycksfördelningen från undersökningspunkt 20C629 och 20C630 har använts för sektion 39/0000.

8.3 Vattenstånd i älven

Göta älv är reglerad uppströms Kärra och SGI har angivit att nedre vattenyta ska interpoleras mellan Ströms sluss och Älvängen, se Tabell 1. Den interpolerade nedre vattenytan hamnar på nivån -0,1 vid Kärra, vilket är den vattennivå som ska användas vid stabilitetsberäkningarna.

Tabell 2 Vattenstånd Göta älv, Nedströms Lilla Edets sluss ska nivåerna interpoleras.

Referenspunkt	Nedre vattenyta	Övre vattenyta
Nedströms Lilla Edet Ströms sluss – Sluss 6	Sänkningshöjd +0/-0	Övre gräns +2,2
Älvängen	LLW -0,4	Ej angivet

8.4 Laster

Laster från byggnaderna, på fastigheten i nordvästra delen av området, har tagits hänsyn till vid beräkning av sektion 38/4250. Detta har utförts genom att placera utbredda laster på 10 kPa vid positionen för byggnaderna.

9 Känslighetsanalys

Känslighetsanalys har utförts för att säkerställa stabilitetsutredningens robusthet och undersöka sårbarheten för förändring av områdets portrycksförhållanden samt förändrad geometri till följd av erosion. Samtliga känslighetsanalyser beräknas med anisotropi.

9.1 Förändring av portrycksförhållanden

Stabilitetsanalysen är utförd med maximalt uppmätta portrycksnivåer. För att hantera eventuella årstidsvariationer har en känslighetsanalys utförts. Vid känslighetsanalysen har en höjning av områdets portrycksnivå med 10 kPa utförts.

Portrycksprognos har utförts med chalmersmodellen enligt skredkommissionen rapport 3:95. Prognosen har utförts med SGUs mätstation Lysekil_2 som referensrör. För en återkomsttid på 200 år ger prognosen som högst en grundvattennivå som är drygt 0,2 m högre än den högst uppmätta nivån. Känslighetsanalysen med en höjning av portrycket med 10 kPa är alltså markant högre än den prognosticerade 200-årsnivån och är därav ett mycket konservativt antagande ur stabilitetssynpunkt. Se bilaga 7 för mer detaljer.

Gällande långtidsperspektivet och framtida klimatförändringar ses främst längre perioder av torra eller plötsliga skyfall som möjliga företeelser. På västkusten förväntas en 30% ökning av nederbörds mängderna. Vid långa perioder av torra kommer portrycksnivåerna minska och förbättra stabilitetsförhållandena. Vid plötsliga skyfall kommer den stora vattenmängden troligtvis rinna på markytan eller i Göta älv och inte påverka portrycksnivåerna i större grad. Störst risk för stabilitetsbrott är när marken är helt vattenmättad i slänkrön (t.ex. efter ett skyfall), men där Göta älvs vattenyta ändå skulle vara i nivå med den nedre vattenytan. Detta värsta scenario har beaktats i stabilitetsberäkningarna i samband med känslighetsanalysen.

9.2 Förändrad geometri till följd av erosion

Känslighetsanalys har utförts med hänsyn till förändrad geometri av Göta älvs botten på grund av erosion till följd av strömmande vatten och fartygstrafik. Känslighetsanalysen har utförts genom att befintlig älvbotten har sänkts med 1 och 2 m enligt typsektioner framtagna och tillhandahållna av beställaren, SGI.

För Kärra tillämpas typsektionen för slänter utan undervattenshylla med erosionsskydd i vattenbrynet, se Figur 14.



Figur 14 Typsektion för slänt utan undervattenshylla med erosionsskydd (SGI).

10 Gynnsamma & ogynnsamma förutsättningar

En bedömning av områdets gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar för stabilitetsberäkningar har utförts enligt IEG Rapport 4:2010 och syftar till att vara del av tolkningen för rådande stabilitetsförhållanden inom området. Bedömningen redovisas i Tabell 3.

Tabell 3 Gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar för stabilitetsberäkningar

Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Konsekvenser av skred	Få tvärgående vattendrag med utlopp i Göta älv	Risk för människoliv och ekonomisk skada Risk för bakåtgripande skred Högsensitiv silt som klassificeras som kvick
Släntens beständighet	Fungerande erosionskydd i hela området. Djup och mäktighet okänd, beräkningar utförda utan erosionskydd. Göta älv är reglerad	
Släntens geometri	Göta älvs botten är lodad, batymetri	Glest avvägt ovan strandlinje Lokala branta partier
Fältundersökningens innehåll och omfattning	Tätt mellan undersökningspunkter CPTU-R sonderingar är utförda Kvalificerade undersökningar (CPTU-sondering, vingförsök och ostörd provtagning) har utförts.	Svårt att utföra undersökningar längs strandlinjen pga. träd, branta partier och erosionskydd. Jordmaterialparametrar är inte undersökta under älvbotten.
Laboratorieundersökningens innehåll och omfattning	Upptagna prover har klassificerats i laboratorium Kvalificerade laboratorieanalyser är utförda i flertalet punkter, CRS-försök, direkta skjuvförsök och triaxialförsök	
Jordens egenskaper	Liten spridning på skjuvhållfasthetsparametrar	Jordlagerföljden består av kohesionsjord Förekomst av högsensitiv silt som klassificeras som kvick

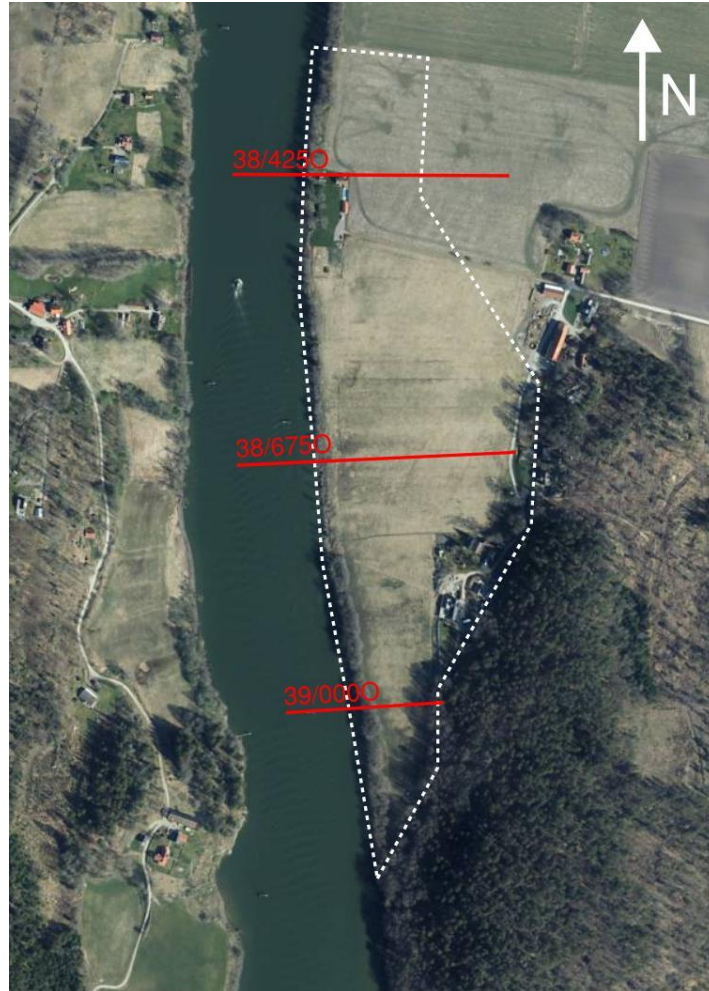
Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Grundvatten- och portrycksförhållanden	Flera portrycksstationer är installerade i området Automatiskt loggande portrycksmätare i flera undersökningspunkter Känslighetsanalys är utförd för förhöjda portrycksnivåer.	Relativt kort mätserie Varierande portryckssituation inom området
Ytvattenförhållanden	Göta älv är reglerad	
Analys- och beräkningsarbetets tillförlitlighet	Stort antal beräknade glidytor Känslighetsanalys utförd Glidyntans läge i plan är vald i den farligaste delen av slänten ur stabilitetssynpunkt Tvådimensionell analys Samtidigt valda ogynnsammaste extremvärden för last, portryck och vattenstånd	Kritisk glidyta omfattar mindre jordvolym utan hållfasthetsbestämmelser

Förutsättningarna bedöms till övervägande del vara gynnsamma, men det finns högsensitiv silt, som klassificeras som kvick, inom området och därmed finns det risk för bakåtgripande skred med stor omgivningspåverkan.

Även det faktum att små glidytor, som går genom området närmast strandlinjen som ej har kunnat undersökas, till viss del är kritiska innebär något mindre gynnsamma förutsättningar.

11 Beräkningar och resultat

Säkerheten mot stabilitetsbrott har kontrollerats i tre sektioner inom utredningsområdet. Beräkningssektionernas läge och utbredning i plan framgår av Figur 15 nedan. Samtliga sektioner följer samma namngivning och numrering.



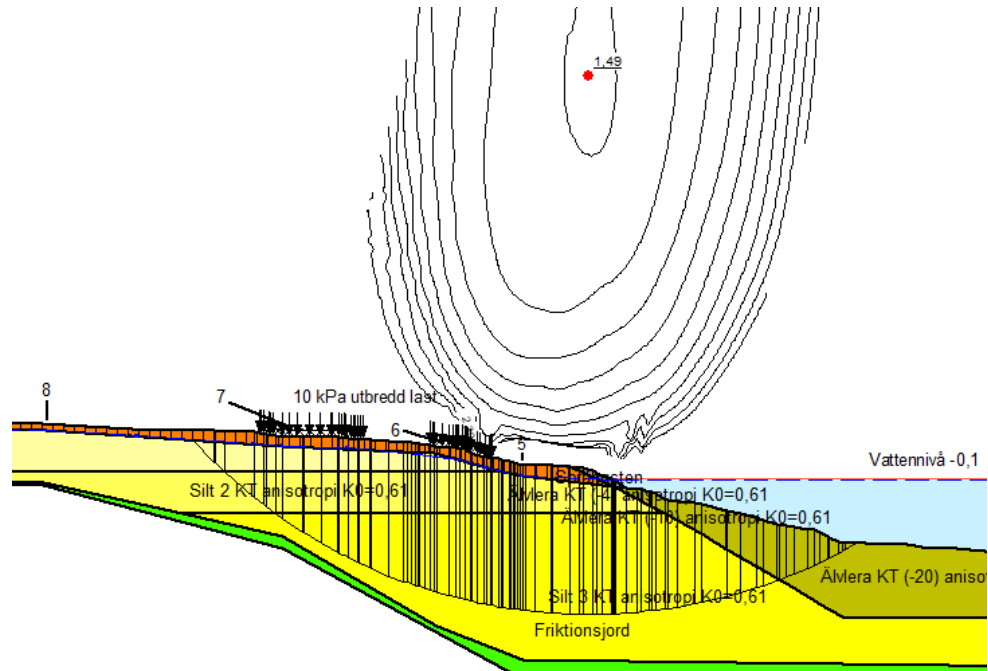
Figur 15. Redovisning av beräkningssektionernas läge och utbredning i plan.

I Tabell 4 - Tabell 6 nedan redovisas resultat för beräkningar med karakteristiska parametrar. Beräkningar har utförts för befintliga förhållanden med och utan hänsyn till anisotropi. Känslighetsanalyser har utförts med beaktande av anisotropi. Beräkningsresultaten redovisas även i Bilaga 5,

För samtliga sektioner redovisas en eller flera figurer från beräkningarna, i underliggande tabell är aktuella beräkningar **understrukna och fetmarkerade.**

11.1 Sektion 38/4250

Kritiska glidytor i sektion 38/4250 är relativt stora och passerar genom större delen av jordprofilen. I Figur 16 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 16 Sektion 38/4250. Befintliga förhållanden, kombinerad analys, dränerade parametrar från triaxialförsök, med anisotropi.

Tabell 4 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion 38/4250, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,4$ och $F_{komb} \geq 1,3$

Sektion km 38/4250, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys 1 ¹⁾	Kombinerad analys 2 ²⁾	Bilaga:Sida
Befintlig sektion Utan anisotropi	1,39	1,39	1,38	5:2-5:6
Befintlig sektion Med anisotropi	1,5	1,49	1,48	5:7-5:11
Känslighetsanalys Med anisotropi Höjt portryck med 10 kPa	-	1,48	1,47	5:12-5:15
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 1 m	1,45	1,44	1,42	5:16-5:25
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 2m	1,42	1,41	1,39	5:25-5:29

Sektion km 38/4250, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys 1 ¹⁾	Kombinerad analys 2 ²⁾	Bilaga:Sida
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 2 m Höjt portryck med 10 kPa	-	1,39	1,38	5:15-5:16

¹⁾ Analys med: $\Phi=30,4^\circ$, $c'=7,4$ kPa

²⁾ Analys med: $\Phi=30^\circ$, $c'=0,1c_u$

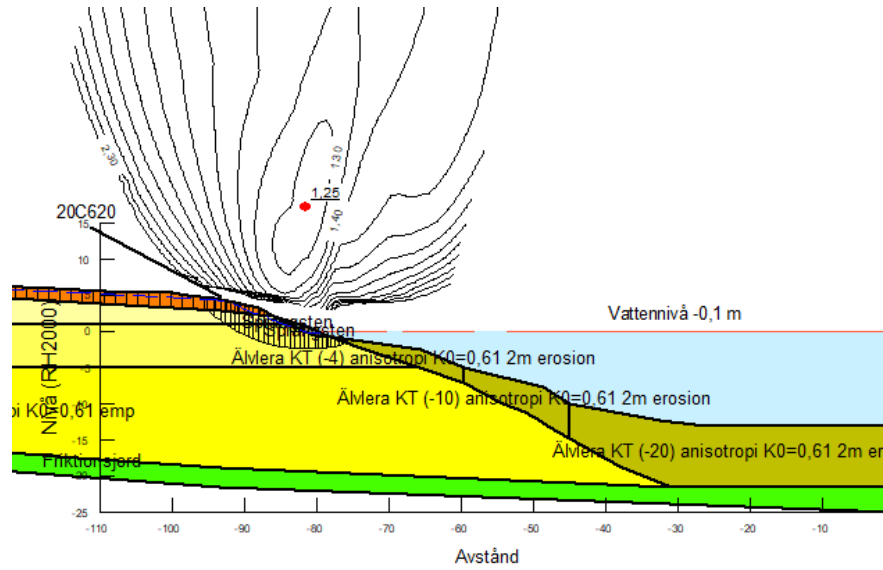
Beräkningsresultaten för sektion 38/4250 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys med anisotropi, samt för kombinerad analys utan anisotropi. Odränerad analys utan anisotropi för befintliga förhållanden resulterar i en säkerhetsfaktor under kravet.

Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottennivån i älven sänks med 1 respektive 2 m på grund av erosion visar att erforderlig säkerhetsfaktor uppfylls för kombinerad analys. Det innebär att sektionen inte är särskilt känslig för framtida erosion.

Utförd känslighetsanalys där portrycket höjts med 10 kPa visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden. Utförd känslighetsanalys där portrycket höjs med 10 kPa i kombination med 2 m bottererosion visar att erforderliga säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott uppfylls.

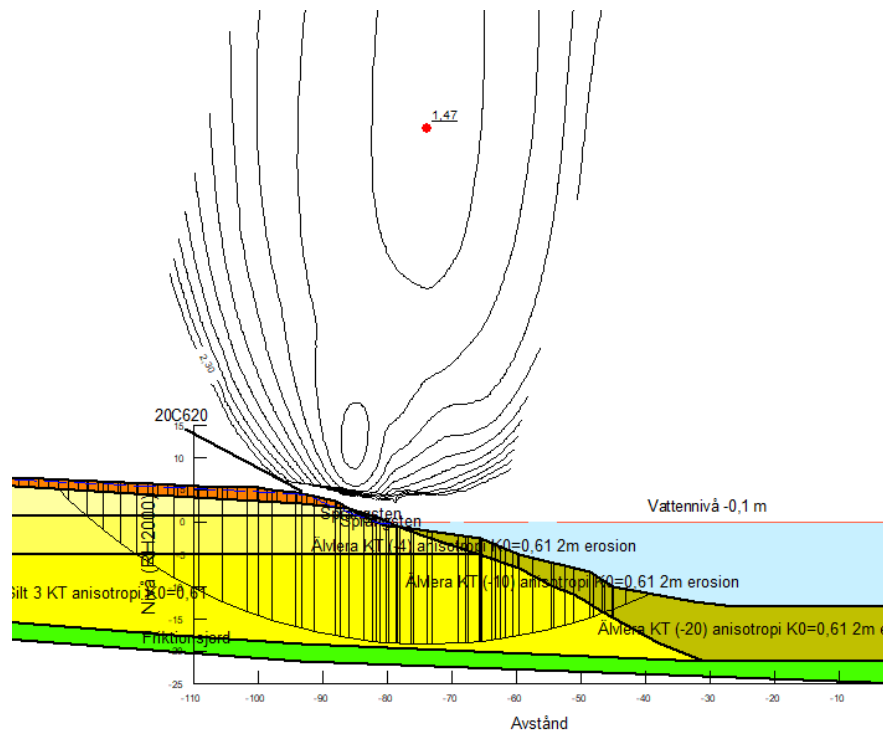
11.2 Sektion 38/6750

Kritiska glidytor i sektion 38/6750 är relativt små vid kombinerad analys med användning av empiriskt bestämda dränerade parametrar. I Figur 17 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 17 Sektion 36/6750. Känslighetsanalys; 2 m erosion & höjt portryck, kombinerad analys, med anisotropi, dränerade parametrar baserade på empiri.

Vid odränerad analys och kombinerad analys med användning av dränerade parametrar utvärderade från triaxialförsök är glidytor stora och passerar genom större delen av jordprofilen. I Figur 18 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 18 Sektion 38/6750. Känslighetsanalys; 2 m erosion & höjt portryck, kombinerad analys, med anisotropi, dränerade parametrar baserade på triaxialförsök.

Tabell 5 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 38/675, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,4$ och $F_{komb} \geq 1,3$

Sektion km 38/6750, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys 1 ¹⁾	Kombinerad analys 2 ²⁾	Bilaga:Sida
Befintlig sektion Utan anisotropi	1,46	1,45	1,4	5:30-5:34
Befintlig sektion Med anisotropi	1,58	1,56	1,43	5:35-5:39
Känslighetsanalys Med anisotropi Höjt portryck med 10 kPa	-	1,48	1,26	5:40-5:43
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 1 m	1,54	1,52	1,42	5:44-5:48
Känslighetsanalys Erosion 2m	1,5	1,48	1,41	5:49-5:53
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 2 m Höjt portryck med 10 kPa	-	<u>1,47</u>	<u>1,25</u>	5:54-5:57

¹⁾ Analys med: $\Phi=30,4^\circ$, $c'=7,4$ kPa

²⁾ Analys med: $\Phi=30^\circ$, $c'=0,1c_u$

Beräkningsresultaten för sektion 38/6250 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden både med och utan anisotropi.

Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottennivån i älven sänks med 1 respektive 2 m på grund av erosion visar att erforderlig säkerhetsfaktor uppfylls för kombinerad analys. Det innebär att sektionen inte är särskilt känslig för framtida erosion.

Utförd känslighetsanalys där portrycket höjts med 10 kPa visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden vid beräkning med dränerade parametrar utvärderade från triaxialförsök, men erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls inte för befintliga förhållanden vid beräkning med empiriskt utvärderade dränerade parametrar.

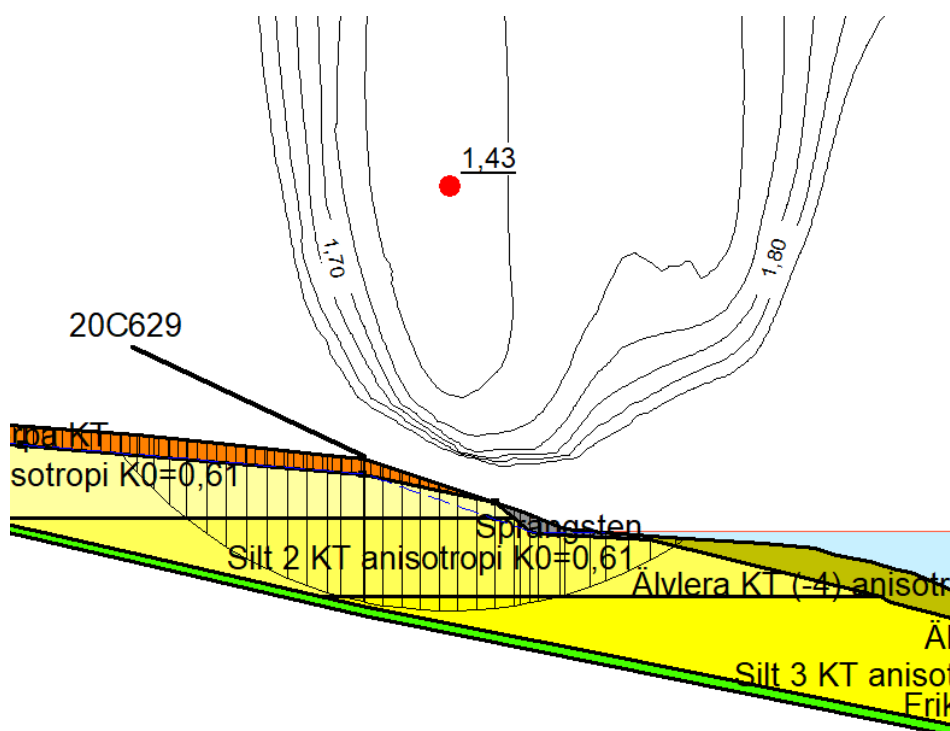
Utförd känslighetsanalys där portrycket höjs med 10 kPa i kombination med 2 m bottenerosion visar att erforderliga säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott uppfylls vid beräkning med dränerade parametrar utvärderade från

triaxialförsök, medan erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott inte uppfylls vid beräkning med empiriskt utvärderade dränerade parametrar.

En känslighetsanalys där portrycket höjts med 10 kPa är på säkra sidan i förhållande till utförd portrycksprognos. Det prognosticerade 200-årsvärdet visar på en ökning av portrycket med ca 1 kPa för de portrycksstationer som är representativa för sektionen.

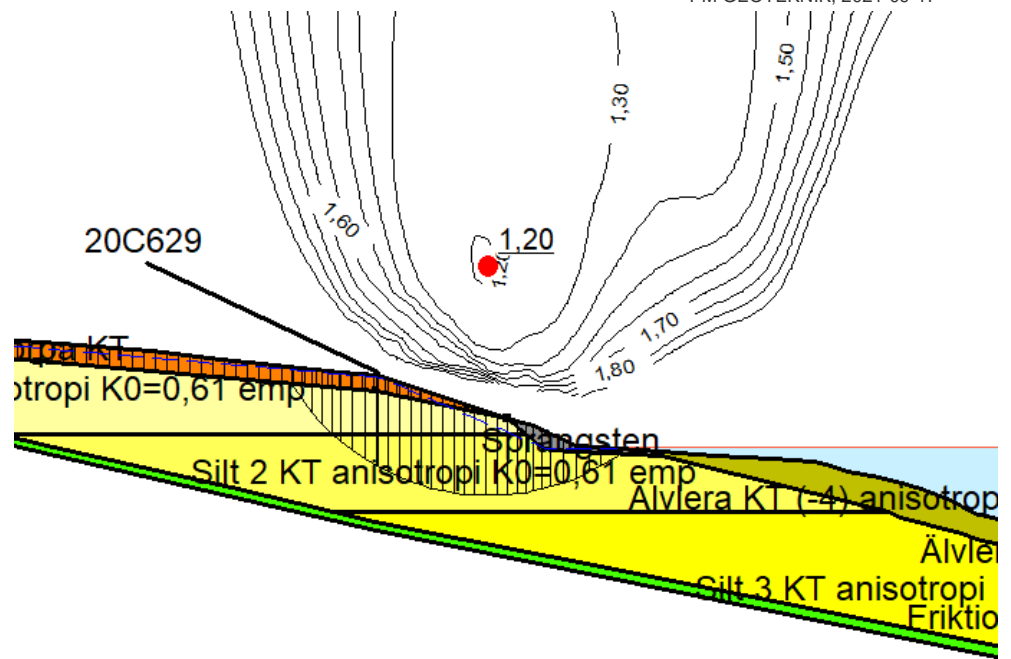
11.3 Sektion 39/0000

Kritiska glidytor i sektion 39/0000 är övergripande stora och går genom större delen av jordprofilen. I Figur 19 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 19 Sektion 39/0000. Befintliga förhållanden, kombinerad analys, med anisotropi, dränerade parametrar baserade på triaxialförsök.

Känslighetsanalys med kombinerad analys med höjt portryck med 10 kPa och användande av empiriskt utvärderade dränerade parametrar resulterar i markant mindre glidytor. I Figur 20 nedan redovisas en glidyta representativ för detta fall.



Figur 20. Sektion 39/0000. Känslighetsanalys; höjt portryck, kombinerad analys, med anisotropi, dränerade parametrar baserade på empiri.

Tabell 6. Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion 39/000, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,4$ och $F_{komb} \geq 1,3$

Sektion km 39/0000, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys 1 ¹⁾	Kombinerad analys 2 ²⁾	Bilaga:Sida
Befintlig sektion Utan anisotropi	1,37	1,34	1,25	5:58-5:62
Befintlig sektion Med anisotropi	1,48	1,43	1,32	5:63-5:67
Känslighetsanalys Med anisotropi Höjt portryck med 10 kPa	-	1,34	1,20	5:68-5:71
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 1 m	1,47	1,42	1,31	5:72-5:76
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 2m	1,47	1,4	1,31	5:77-5:81
Känslighetsanalys Med anisotropi Erosion 2 m Höjt portryck med 10 kPa	-	1,29	1,17	5:82-5:85

¹⁾ Analys med: $\Phi=30,4^\circ$, $c'=7,4$ kPa

2) Analys med: $\Phi=30^\circ$, $c'=0,1c_u$

Beräkningsresultaten för sektion 39/0000 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad- och odränerad analys med anisotropi, samt för kombinerad analys utan anisotropi med dränerade parametrar från triaxialförsök. Erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls ej för odränerad analys utan anisotropi eller för kombinerad analys utan anisotropi med empiriskt utvärderade dränerade parametrar.

Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottenivån i älven sänks med 1 m och 2 m på grund av erosion, men att idag befintlig markyta och laster kvarstår, visar att erforderlig säkerhetsfaktor uppfylls för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys.

Utförda känslighetsanalyser med förhöjt portryck visar att erforderlig säkerhetsfaktor uppfylls för kombinerad analys med dränerade parametrar utvärderade från triaxialförsök, men uppfylls ej för kombinerad analys med empiriskt utvärderade dränerade parametrar. Utförda känslighetsanalyser med kombinationen förhöjt portryck och bottererosion på 2 m visar dock att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls.

12 Slutsats och rekommendationer

Stabilitetsutredning med totalsäkerhetsmetoden baseras på grundtanken att ju mer information som finns inom ett område, desto lägre krav på beräknad säkerhetsfaktor då det normalt innebär en säkrare bedömning av geotekniska förutsättningar och stabilitetsberäkningar. 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 den övre gränsen av intervallet för fördjupad stabilitetsutredning enligt anvisningar från beställaren, SGI.

Denna fördjupade stabilitetsutredning visar att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ligger över gällande krav för befintliga förhållanden med totalsäkerhetsmetoden. Utredningen visar dock att säkerheten mot stabilitetsbrott i stora delar av området är känsligt för portrycksförändringar, då utförda känslighetsanalyser med förhöjt portryck i sektion 38/6750 och 39/0000 resulterar i säkerhetsfaktorer som ej uppfyller kraven.

Osäkerhet finns också kring hur portrycksfördelningen ser ut i slänten ner mot Göta älv, då portrycket i stabilitetsberäkningarna baseras på mätningar ovan slänkrön och nivån på älvens nedre vattenyta. Slänten ner mot Göta älv är bevuxen med träd och ställvis brant, varav området är svåråtkomligt med

borrbandvagn. Det innebär att kopplingen mellan trycknivån i älven och den ovan släntkrön är okänd och stabilitetsanalysen bygger på en bedömd portrycksnivå i slänten.

Vid känslighetsanalys med förhöjda portryck är påverkan även mycket stor av huruvida de dränerade parametrarna utvärderas empiriskt eller från triaxialförsök. De triaxialförsök som ligger till grund för de dränerade parametrarna är till största del från nivåer som ligger djupare än de små kritiska glidytor, vilket medför en viss osäkerhet i hur representativ utvärderingen av de dränerade parametrarna är för dessa ytliga glidytor.

Trots att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott i totalsäkerhetsmetoden är tillfredställande för befintliga förhållanden rekommenderas vidare utredning i delområde Kärra på grund av områdets känslighet mot förändringar av portryck och relativt litet underlag av dränerade triaxialförsök.

I samband med den kompletterande utredningen rekommenderas att portrycksmätningar, trots svårframkomligheten, utförs i slänten ner mot Göta älv i sektion 38/6750 och 39/0000 för att klargöra om den antagna portrycksfördelningen är rimlig.

I samband med den kompletterande utredningen bör även fler dränerade triaxialförsök utföras. Syftet med de dränerade triaxialförsöken är att öka underlaget vid bestämmande av dränerade materialparametrar och för att verifiera om valda värden är representativa genom hela jordprofilen. Inga dränerade triaxialförsök har utförts på prover från södra delen av området, vilket bör vara fokus vid eventuell komplettering.

Utbredning och kondition av befintligt erosionsskydd under vattenytan är okänt och svårt att bestämma genom okulärbesiktning från markytan. Det rekommenderas att erosionsskyddets kondition, utbredning och mäktighet verifieras med hjälp av dykare.