



PM-Geoteknik

Stabilitetsutredning Sörgården

Kungälv

Fördjupad stabilitetsutredning

Uppdragsnr: 22153

Bohusgeo AB 2023-11-03

Rev A 2024-09-20

Beställare

Kund: SGI
Kontaktperson: Axel Grahnström
Diarienummer: 6.2-2206-0598
Uppdragsnummer: 10322

Bohusgeo AB

Uppdragsnummer: 22153
Uppdragsledare: Daniel Lindberg
Handläggare: Emil Johansson
Granskning: Mats Falck

Bastionsgatan 26
451 50 Uddevalla
Org.nr. 556601-5243
Tel. vxl. 0522-946 50
bohusgeo.se

Innehållsförteckning

1.	Förord från SGI	2
2.	Uppdrag och syfte	2
3.	Underlag	2
4.	Styrande dokument	3
5.	Befintliga förhållanden	3
5.1.	Mark, vegetation och topografi	3
5.2.	Befintlig byggnation	3
5.3.	Geotekniska förhållanden	4
5.4.	Geohydrologiska förhållanden	5
5.5.	Skred och erosion	6
6.	Släntstabilitet	10
6.1.	Allmänt	10
6.2.	Valda parametrar	10
6.3.	Resultat - befintliga förhållanden	13
6.4.	Resultat - känslighetsanalys	15
6.5.	Åtgärdsförslag	18
7.	Slutsatser och förslag på fortsatta arbeten	19

Bilagor

Rev A	Bilaga 1:1	Översiktsplan
	Bilaga 2:1-2:57	Fotobilaga, erosion- och skredkartering
	Bilaga 3:1-3:12	Portrycksprofiler
	Bilaga 4:1-4:3	Vald erforderlig säkerhetsfaktor
Rev A	Bilaga 5:1-5:5	Vald skjuvhållfasthet och friktionsvinkel
	Bilaga 6:1-6:81	Stabilitetsberäkningar - befintliga förhållanden
	Bilaga 7:1-7:119	Stabilitetsberäkningar - känslighetsanalyser
	Bilaga 8:1-8:25	Stabilitetsberäkningar – förstärkningsåtgärder

1. Förord från SGI

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

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

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

Statens geotekniska institut, Sekretariatet för Göta älv.

2. Uppdrag och syfte

Bohusgeo AB har på uppdrag av SGI utfört en geoteknisk utredning längs delar av Solbergsån i Sörgården, Kungälv kommun.

Uppdragets syfte är att klarlägga stabilitetsförhållandena längs dessa delar av Solbergsån och vid behov föreslå lämpliga stabilitetsförbättrande åtgärder.

Utredningen syftar till att redovisa släntstabilitet för befintliga förhållanden, erosionsförhållanden i Solbergsån samt förslag på lämpliga stabilitetsförbättrande åtgärder.

Under våren 2024 utfördes kompletterande undersökningar och laboratorieförsök i området. Kompletteringen syftade till att erhålla ett bättre underlag för portrycksfördelningen i slänten som helhet samt att undersöka silten och lerans dränerade hållfasthetsegenskaper genom att kompletterande dränerade triaxialförsök utfördes. Val av dimensionerande portryck i slänterna och dränerad hållfasthet i silten och leran har uppdaterats för att ta hänsyn till kompletteringen, och utförda beräkningar har uppdaterats med de nya valen.

3. Underlag

Underlag för de i denna PM redovisade utvärderingarna utgörs av:

- Fält- och laboriearbeten utförda av Bohusgeo AB för projektet. Resultaten finns redovisade i en MUR daterad 2023-09-15, reviderad 2024-07-03, uppdragsnummer 22153.
- Fält- och laboriearbeten utförda av FB Engineering AB. Resultaten finns redovisade i en RGEO daterad 2004-06-23, dokumentnummer 160090-16/04-RAP-001.
- Fördjupad stabilitetsutredning utförda av FB Engineering AB. Resultaten finns redovisade i en Teknisk PM daterad 2004-06-23, dokumentnummer 160090-16/04-PME-001.
- Geotekniska besiktnings utförda av SGI i samband med inträffat skred, utförda 2008-11-23, redovisade i PM 1, daterad 2008-11-23, dokumentnummer 5.6-0811-051.
- Ansökan om statsbidrag till Räddningsverket 2007-08-02, upprättad av Kungälv kommun. Ansökan innehåller en fördjupad insatsrapport om inträffat skred 2006-08-23, upprättad av Räddningstjänsten i Kungälv kommun, SOS ärendenummer 20060823-01168.

Rev A

4. Styrande dokument

Utredningen har utförts i enlighet med tillämpliga delar i dokument förtecknade nedan:

- DGA00XST01-Ritklinjer för tekniskt arbete, Version 6.0, daterad 2022-04-29
- DGA00XST02-Ritklinjer för dokumenthantering, Version 5.0, daterad 2022-04-29
- SGI Vägledning 8, Utredning av släntstabilitet.
- Skredkommissionens rapport 3:95
- TRVINFRA-00230
- SS-EN 1997-1, SS-EN 1997-2
- IEG Rapport 4:2010
- IEG Rapport 6:2008, rev 1
- IEG Rapport 2:2008, rev 3
- IEG Rapport 4:2008, rev 1

5. Befintliga förhållanden

5.1. Mark, vegetation och topografi

Undersökningsområdet längs med Solbergsån utgörs av ett mellan ca 120 och ca 150 m brett område som sträcker sig från ca 260 m nordväst till ca 260 m sydost om Romelandavägen (Väg 625). Undersökningsområdet utgörs i huvudsak av åkermark och ängsmark, men även av tomtmark i dess norra del, samt de i huvudsak träd- och slybevuxna slänterna ned mot Solbergsån. Den meanderformade Solbergsån har gradvis eroderat jordlagren och skapat nuvarande ravin, se Bilaga 1.

Markytan sluttar generellt åt sydost och markytans nivå i områdena kring ravinens släntröner är som högst i områdets nordvästra del, mellan ca +8,5 och ca +9, och minskar därefter åt sydost till mellan ca +4,5 och ca +5,0. Ravinens botten sluttar i samma riktning och bottennivån varierar mellan ca +0,4 och ca +0,7 i nordväst och ca -0,5 och ca -0,2 i sydost. Norr om undersökningsområdet stiger åbotten till mellan ca +1,6 och ca +1,9. Lokalt har djupare delar påträffats i inmätta sektioner i områdets nordvästra del, med bottennivåer ned till ca -0,5. Nivåskillnaden mellan släntröner och åbotten varierar mellan ca 8,5 m i områdets nordvästra del och ca 4,5 m i sydöstra delen.

Slänterna mot ravinen sluttar generellt med en lutning på mellan ca 1:1,5 och ca 1:2,5. I anslutning till ån förekommer ställvis lokalt eroderade partier med mycket brant lutning på mellan ca 2:1 och ca 4:1, ofta i kombination med överhängande jord och bindande vegetation.

5.2. Befintlig byggnation

Befintlig bebyggelse är i huvudsak lokaliserad nordväst om Romelandavägen med undantag av en lantgård belägen sydväst om undersökningsområdet. Byggnaderna utgörs av bostadshus och vidbyggda garage och/eller förråd. Vid Romelandavägens passage över Solbergsån finns en vägbro av betong med anslutande brokoner och glaciser.

Rev A

Bostadshusen är utförda i ett eller ett och ett halvt plan. Grundläggningsutförandet har inte undersökts i detalj, utan har bedömts utifrån utvändig okulär besiktning. Grundläggningen bedöms vara gjord dels med källare, dels ytligt med grundplatta eller kryppgrund i mark. En sammanställning som visar bedömt grundläggningsutförande redovisas i Bilaga 1. Vägbron bedöms vara grundlagd med pålar. Minsta avstånd från bostadshus och garage/förråd till Solbergsån varierar i huvudsak mellan ca 25 och ca 40 m respektive mellan ca 10 och ca 20 m.

5.3. Geotekniska förhållanden

Undersökningarna har i huvudsak utförts i anslutning till slänkrön längs ravinen. Det totala sonderingsdjupet uppgår i huvudsak till ca 25 m, varefter sonderingarna avbrutits. I två punkter har dock sonderingar utförts till stopp i friktionsjorden på ett djup av ca 36 m i områdets nordvästra del och ca 43 m invid Romelandavägen. Jordlagren under det ca 0,3 m tjocka vegetationsjordslagret av humushaltig silt och sand utgörs av:

- Fastare ytlager av silt och sand
- Organisk silt
- Lera
- Friktionsjord vilande på berg

Det fastare ytlagret utgörs i huvudsak av fraktionerna **silt**, **finsand** och **sand** som ställvis har inslag av växtdelar. Tjockleken varierar i huvudsak mellan ca 1 och ca 3 m. Vattenkvoten har uppmätts till mellan ca 10 och ca 27 %. Friktionsvinkeln utvärderad från utförda CPT-sonderingar varierar mellan ca 31° och ca 36°.

Organisk silt finns generellt till mellan ca 2 och ca 4,5 m under markytan men saknas inom områdets sydöstra del, nedströms sektion 55100VR09. Silten är generellt gyttig och innehåller ställvis även sand, lera och växtdelar. Vattenkvoten och konflytgränsen har uppmätts till mellan ca 35 och ca 63 % respektive mellan ca 35 och ca 40%. Friktionsvinkeln utvärderad från utförda CPT-sonderingar varierar mellan ca 30,5° och ca 33°. Dränerade hållfasthetsparametrar, kohasionsintercept, c' , och friktionsvinkel, ϕ' , har utvärderats från dränerade triaxialförsök till 6,2 kPa respektive 30°, se Bilaga 5.

Silten följs av **lera** med en mäktighet större än ca 20 m. I två utvalda punkter har sonderingarna utförts till lerans underkant och lermäktigheter på upp till mellan ca 32 m och ca 38 m har uppmätts. Leran är i regel siltig. Vattenkvoten har uppmätts till mellan ca 65 och ca 90 % och konflytgränsen till mellan ca 75 och ca 80 %. Vattenkvot och konflytgräns som uppmätts i punkt 23B018, belägen i områdets sydöstra del, är generellt högre än i övriga delar av området. Lerans tunghet har uppmätts till mellan ca 15 kN/m³ och ca 16 kN/m³.

Lerans odränerade skjuvhållfasthet har i fält bestämts genom vingförsök och CPT-sonderingar och på laboratorium genom fallkonförsök, direkta skjuvförsök och triaxialförsök. En empirisk utvärdering med ledning av utförda CRS-försök har även utförts. Generellt ligger skjuvhållfasthetsbestämningarna utförda med CPT och vingförsök klart lägre än de utvärderade från direkta skjuvförsök och empiri baserat på CRS-försök.

Inom huvuddelen av området gäller att den, med hänsyn till konflytgräns och överkonsolideringsgrad, korrigerade skjuvhållfastheten uppgår till mellan ca 15 och ca 30 kPa närmast under silten och därefter ökar mot djupet med mellan ca 1 och ca 2 kPa/m, se Bilaga 5:1. Inom den sydöstra delen är dock den korrigerade skjuvhållfastheten lägre, mellan ca 10 och ca 15 kPa i övre delen av jordprofilen och ökar mot djupet med mellan ca 1 och ca 2 kPa/m, se Bilaga 5:2.

Med ledning av utförda aktiva odränerade triaxialförsök har anisotropa hållfasthetsegenskaper påvisats i leran. De utförda försöken uppvisar god överensstämmelse med empiri baserat på CRS-försök och konflytgräns enligt SGI Vägledning 8.

Rev A

Rev A

Förhållandet mellan aktiv och direkt skjuvhållfasthet har utvärderats till ca 1,4 närmast under det fasta ytlagret för att mot djupet minska till mellan ca 1,3 och ca 1,2.

Dränerade hållfasthetsparametrar kohesionsintercept, c' , och friktionsvinkel, φ' , har utvärderats från utförda dränerade triaxialförsök 6,2 kPa respektive 30°, Bilaga 5.

Sensitiviteten varierar i regel mellan ca 10 och ca 30, men är ställvis högre. Leran bedöms i huvudsak vara mellansensitiv.

För att undersöka lerans konsolideringsegenskaper har kompressionsförsök typ CRS utförts. Leran bedöms generellt vara svagt överkonsoliderad med OCR på mellan ca 1,3 och ca 1,7 i områdets nordvästra del och mellan ca 1,3 och ca 1,4 i dess sydöstra del.

Friktionsjorden under leran har inte undersökts närmare. Sonderingarna har i regel avbrutits innan friktionsjord påträffats eller stoppat ytligt i friktionsjorden.

5.4. Geohydrologiska förhållanden

Rev A

Portrycket i leran har uppmätts i sex punkter med två till fyra spetsar per punkt under perioden februari 2023 till augusti 2024. Mätningar har utförts med fyra timmars mätintervall. Undersökningspunkterna är placerade i anslutning till släntkrön eller vid släntfot.

Uppmätta portryck redovisas i sin helhet i för uppdraget upprättad MUR/Geoteknik. I diagrammen redovisas även uppmätt även dygnsnederbörd för den närmast belägna SMHI station 71510 som ligger i Kärna ca 20 km väster om undersökningsområdet.

En sammanställning av högsta och lägsta uppmätta portrycksnivåer redovisas i Tabell 1 nedan. I Bilaga 3 redovisas i diagram med tryckprofiler för uppmätta portryck tillsammans med hydrostatisk fördelning samt vald dimensionerande portrycksprofil.

Tabell 1. Uppmätta och dimensionerande portryck.

Punkt	Nivå markyta	Spetsnivå	Uppmätt trycknivå [m under markyta]		Uppmätt trycknivå [nivå RH2000]		Dim. trycknivå [nivå RH2000]
			Min.	Max.	Min.	Max.	
23B003	+8,6	+5,8	2,6	2,5	+6,0	+6,1	+7,0
		+3,5	3,4	2,3	+5,2	+6,3	+7,0
		-2,5	3,8	3,3	+4,8	+5,3	+7,0
		-11,6	3,3	2,8	+5,3	+5,8	+7,0
23B011	+6,7	+5,0	1,5	1,2	+5,2	+5,5	+5,8
		+1,5	2,7	2,0	+4,0	+4,7	+5,8
		-4,5	2,0	1,6	+4,7	+5,1	+5,8
		-13,5	2,7	2,3	+4,0	+4,4	+5,8
23B013	+6,3	+1,2	2,4	1,7	+3,9	+4,6	+5,5
		-4,9	2,6	1,9	+3,6	+4,4	+5,5
		-14,0	2,1	1,7	+4,2	+4,6	+5,5
23B018	+4,5	-0,7	2,6	1,5	+1,9	+3,0	+3,9
		-6,8	1,9	1,3	+2,6	+3,2	+4,2
		-15,8	0,9	0,4	+3,6	+4,1	+5,1

Rev A

Rev A

Punkt	Nivå markyta	Spetsnivå	Uppmätt trycknivå [m under markyta]		Uppmätt trycknivå [nivå RH2000]		Dim. trycknivå [nivå RH2000]
			Min.	Max.	Min.	Max.	
23B024	+6,7	+3,9	2,3	2,0	+4,4	+4,7	+5,2
		+1,5	2,9	2,4	+3,8	+4,3	+5,2
		-4,5	2,8	2,4	+3,9	+4,3	+5,2
24B001	+2,1	-3,2	0,6	-0,1	+1,6	+2,2	+2,7
		-9,2	-0,3	-0,9	+2,4	+3,0	+3,5
02FB114	+6,8	-3,2	2,7	2,7	+4,1	+4,1	+5,1
02FB115	+2,1	-2,9	0,4	0,4	+1,7	+1,7	+2,1
		-12,9	-0,3	-0,3	+2,4	+2,4	+3,4
04FB119	+6,9	+1,9	2,8	2,8	+3,9	+3,9	+4,9
		-3,5	3,3	3,3	+3,4	+3,4	+4,9
		-8,1	2,4	2,4	+4,5	+4,5	+4,9

Rev A

Portrycksmätningarna uppvisar små variationer i trycknivå, i regel mellan ca 0,4 och ca 0,7 m. I enstaka fall uppgår variationen till ca 1,0 m.

Under mätperioden har relativt kraftig nederbörd uppmätts i flera perioder. Som mest har denna uppgått till 32 mm/dygn, vilket uppmätts under juli och augusti 2023. Detta har dock endast resulterat i små till måttliga höjningar av portrycket på mellan ca 2 och ca 4 kPa. Det är möjligt att nederbörden har upptagits av växter eller avgått genom avdunstning. En större portrycksökning skulle sannolikt kunna påvisas om motsvarande nederbörd uppkommit under perioden senhöst till tidig vår då grundvattenbildning normalt sker.

Prognos av framtida höga portryck baserat på data från SGU:s grundvattennät har utförts för en portrycksspets inom undersökningsområdet. Närmaste referensrör (Kungälv_10) är beläget i Harestad ca 20 km väster om undersökningsområdet och har använts för prognos. Prognosticerat 200-årsvärde ligger i nivå med högsta uppmätta portryck och prognosmetoden bedöms därmed inte vara relevant.

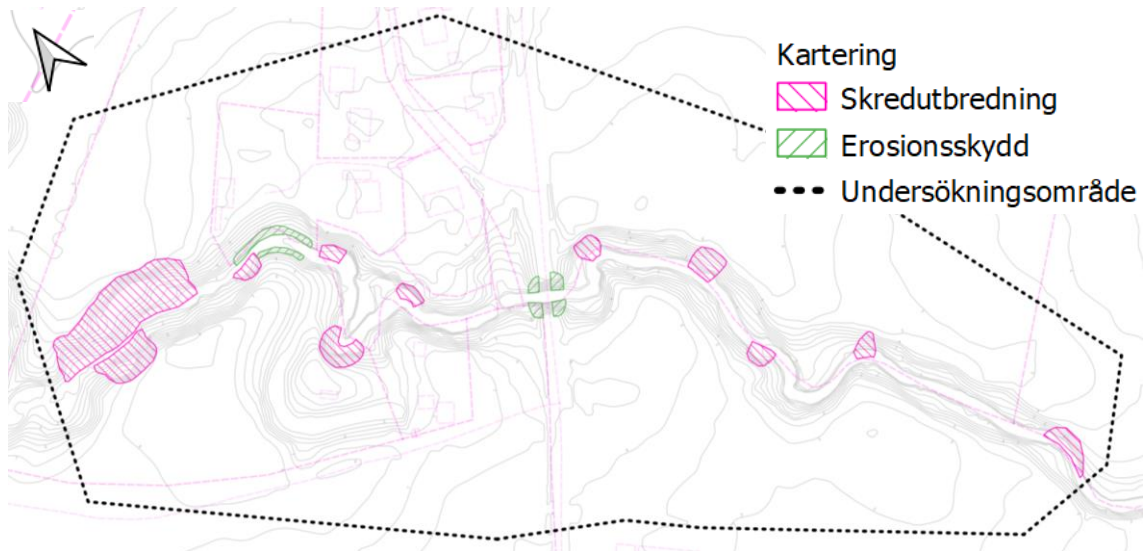
Rev A

Det dimensionerade portrycket har valts mellan ca 0,5 och ca 1,5 m över högsta uppmätta portryck inom slänten. Vid åbotten ansätts dimensionerande portryck med en 0-portrycksnivå i höjd med åbotten och en större än hydrostatisk ökning mot djupet, så att portrycket mot djupet blir detsamma som för motsvarande nivå vid släntrönn.

5.5. Skred och erosion

Enligt underlagshandlingarna har skred inträffat 2006-08-23 vid fastigheten Romelanda-Solberg 4:17 och 2008-11-23 vid fastigheten Romelanda-Solberg 2:9, båda belägna norr om ån inom nordvästra delen av området. I samband med besiktning av samma område i januari 2023 noterades även ett nyare skred vid fastigheten Romelanda-Solberg 2:9, men på södra sidan av ån, se Figur 2 nedan. Vid skredområdet vid fastigheten Romelanda-Solberg 4:17 har förstärkningsåtgärder utförts genom avschaktning och komplettering med erosionsskydd och dräner. Några handlingar som visar projekterad och utförd förstärkning har ej funnits att tillgå.

Längs i princip hela delen av Solbergsån som är belägen inom undersökningsområdet har tecken på erosion och tidigare inträffade skred observerats vilka dokumenterats och redovisas i Bilaga 2 tillsammans med kommenterande text. I områdets nordvästra del har även ett antal större skredärr noterats, vilka mätts in och redovisas på ritning G-10-1-001 i för uppdraget upprättad MUR/Geo samt i Bilaga 2, se översikt i Figur 1 och exempel på skred/ras i Figur 2 och Figur 3 nedan.



Figur 1. Översikt över karterade skreds utbredningar samt observationer av erosionsskydd.



Figur 2. Skredärr som observerats i områdets nordvästra del.

Ett antal tidigare skredområden har även observerats i närheten av bebyggelse, se Figur 3 nedan.



Figur 3. Skred/ras i närheten av bebyggelse.

Tecken på erosion i form av synliga rötter, överhängande vegetation och lutande eller nedfallna träd har observerats längs Solbergsån inom i stort sett hela undersökningsområdet, se exempel i Figur 4 nedan. Endast i en begränsad del inom norra delen av området, där erosionsskydd lagts ut, bedöms inte erosion förekomma. Utlagda erosionsskydd har mätts in och redovisas på ritning G-10-1-001 i för uppdraget upprättad MUR/Geo och i Bilaga 2. I Bilaga 2 redovisas även mindre ras och skred i anslutning till Solbergsån som observerats inom undersökningsområdet.



Figur 4. Exempel på observerade tecken på erosion samt mindre ras/skred i anslutning till ån.

I anslutning till bron över Solbergsån har glaciser uppförts, se Figur 5. Dessa bedöms delvis vara skadade i nedre delen och ger sannolikt inte fullgott erosionsskydd i anslutning till ån. En kompletterande översyn och reparation av dessa rekommenderas.



Figur 5. Glacis vid bron nordvästra sida. Delvis skadad med synlig bar jord i anslutning till ån.

6. Släntstabilitet

6.1. Allmänt

Släntstabiliteten har beräknats i 13 sektioner, se placering i Bilaga 1. I fyra av sektionerna har släntstabiliteten beräknats på båda sidor om åfåran. Vid redovisning av dessa sektioner har ett suffix lagts till som visar om beräkningen är utförd norr eller söder om åfåran, -N respektive -S.

Stabilitetsberäkningarna har utförts med programvaran GeoStudio 2021.4. Beräkningarna har utförts med cirkulär-cylindriska glidytor med odränerad (c) och kombinerad analys (komb). Beräkningarna är utförda med totalsäkerhetsanalys.

Den utförda undersökningen bedöms uppfylla fördjupad nivå enligt IEG R4:2010.

Erforderliga säkerhetsfaktorer enligt IEG R4:2010 framgår av Tabell 2.

Tabell 2 Erforderliga säkerhetsfaktorer enligt IEG R4:2010

Utredningsnivå	F_c	F_{komb}
Fördjupad utredning, befintlig bebyggelse	$\geq 1,4 - 1,3$	$\geq 1,3 - 1,2$

För att välja erforderliga säkerhetsfaktorer har en värdering gjorts utifrån en sammanställning av gynnsamma och ogynnsamma förhållanden enligt tabell 4.1a-4.1i i IEG Rapport 4:2010. De olika förhållandena viktas efter hur stor påverkan enskilda faktorer har på värdering av erforderlig säkerhetsfaktor. Sammanställningen med bedömda gynnsamma och ogynnsamma förhållanden samt hur dessa viktas redovisas i Bilaga 4. Enligt DGA00XST01 ska dock erforderlig säkerhetsfaktor väljas i den övre delen av intervallet, varför säkerhetsfaktorer valts enligt i Tabell 3 nedan.

Tabell 3 Valda erforderliga säkerhetsfaktorer

Utredningsnivå	F_c	F_{komb}
Fördjupad utredning, befintlig bebyggelse	$\geq 1,35$	$\geq 1,25$

6.2. Valda parametrar

6.2.1. Skjuvhållfasthet

Undersökningsområdet har delats in i två delområden med avseende på vald odränerad skjuvhållfasthet, se Bilaga 1, då den odränerade skjuvhållfastheten generellt är något lägre i sydöstra delen av området än i övriga delar. Vald odränerad skjuvhållfasthet för respektive område redovisas i Bilaga 5, på beräkningarna i Bilaga 6 - Bilaga 8, samt i Tabell 4 och Tabell 5 nedan. I Bilaga 5 redovisas även vald aktiv skjuvhållfasthet baserat på empiri från CRS-försök och utförda odränerade aktiva triaxialförsök, samt dränerad skjuvhållfasthet utvärderad från dränerade triaxialförsök.

Då dränerade triaxialförsök som gått till brott endast utförts i nordvästra delen av undersökningsområdet, och ned till max 6 m djup under markytan, har den dränerade hållfasthet som utvärderats från dessa försök endast tillämpats inom den delen av området. I sydöstra delen av området används empiriska värden för dränerad hållfasthet.

Rev A

Rev A

Tabell 4. Valda jordlagerparametrar för stabilitetsberäkningar i områdets nordvästra del.

Jordlager	Parameter	Karakteristiskt värde
Sand	Tunghet, γ	18 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	10 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	32°
Silt	Tunghet, γ	17,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	9 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	30°
	Kohesionsintercept, c'	6,2 kPa
Lera 1 (5-7 m djup under m.y.)	Tunghet, γ	15,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	5,5 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	30°
	Odränerad skjuvhållfasthet, c_{ud}	20 kPa
	Kohesionsintercept, c'	6,2 kPa
	Aktiv/direkt skjuvhållfasthet, c_{uA}/c_{uD}	1,4
Lera 2 (7-10 m djup under m.y.)	Tunghet, γ	15,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	5,5 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	30°
	Odränerad skjuvhållfasthet, c_{ud}	$20 + 2 \cdot z^A$ kPa
	Kohesionsintercept, c'	6,2 kPa
	Aktiv/direkt skjuvhållfasthet, c_{uA}/c_{uD}	1,3
Lera 3 (>10 m djup under m.y.)	Tunghet, γ	15,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	5,5 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	30°
	Odränerad skjuvhållfasthet, c_{ud}	$20 + 2 \cdot z^A$ kPa
	Kohesionsintercept, c'	$2 + 0,2 \cdot z^A$ kPa
	Aktiv/direkt skjuvhållfasthet, c_{uA}/c_{uD}	1,2

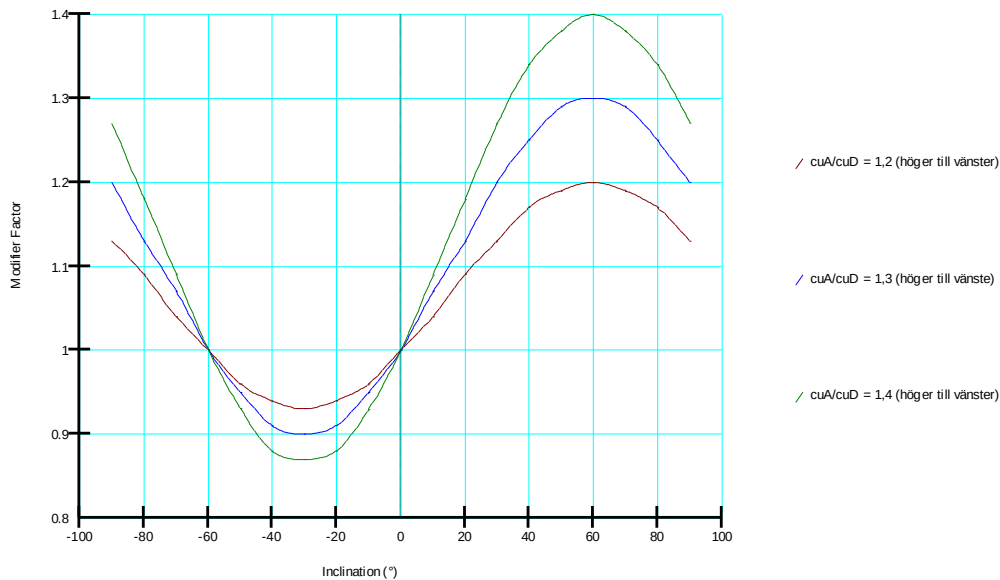
^{A)}z är djupet räknat från nivå +1,0.

Tabell 5. Valda jordlagerparametrar för stabilitetsberäkningar i områdets sydöstra del.

Jordlager	Parameter	Karakteristiskt värde
Sand	Tunghet, γ	18 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	10 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	32°
Silt	Tunghet, γ	17,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	9 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	31°
Lera 1 (5-7 m djup under m.y.)	Tunghet, γ	15,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	5,5 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	30°
	Odränerad skjuvhållfasthet, c_{ud}	16 kPa
	Kohesionsintercept, c'	1,6 kPa
	Aktiv/direkt skjuvhållfasthet, c_{uA}/c_{uD}	1,4
Lera 2 (7-10 m djup under m.y.)	Tunghet, γ	15,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	5,5 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	30°
	Odränerad skjuvhållfasthet, c_{ud}	$16 + 2 \cdot z^A$ kPa
	Kohesionsintercept, c'	$1,6 + 0,2 \cdot z^A$ kPa
	Aktiv/direkt skjuvhållfasthet, c_{uA}/c_{uD}	1,3
Lera 3 (>10 m djup under m.y.)	Tunghet, γ	15,5 kN/m ³
	Tunghet under g.v.y., γ'	5,5 kN/m ³
	Friktionsvinkel, φ'_d	30°
	Odränerad skjuvhållfasthet, c_{ud}	$16 + 2 \cdot z^A$ kPa
	Kohesionsintercept, c'	$1,6 + 0,2 \cdot z^A$ kPa
	Aktiv/direkt skjuvhållfasthet, c_{uA}/c_{uD}	1,2

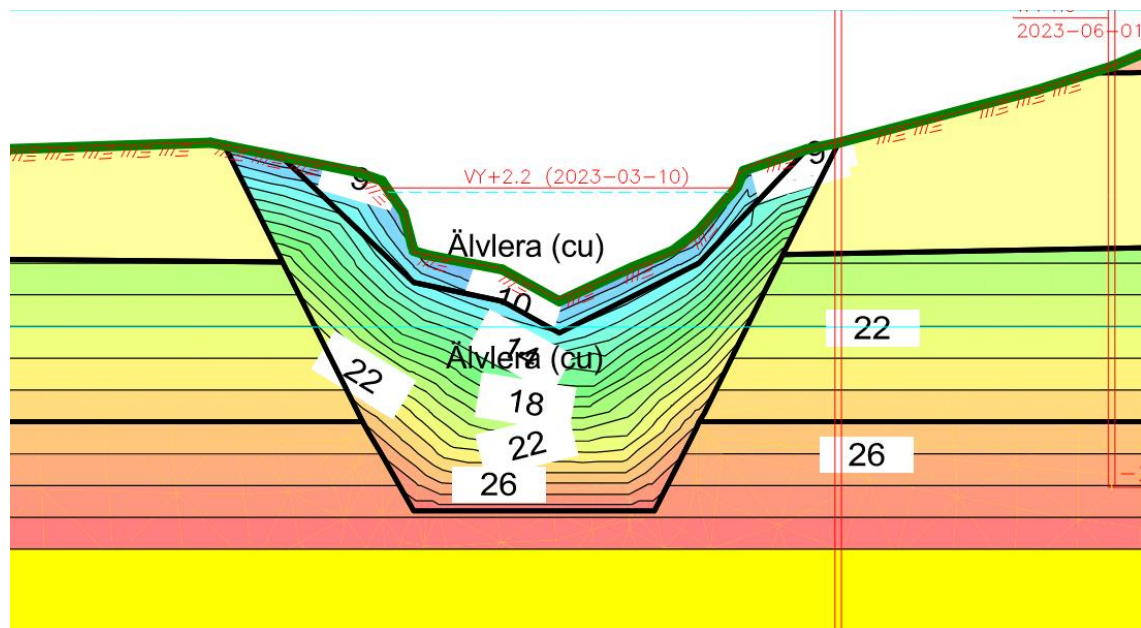
^{A)}z är djupet räknat från nivå -1,0.

Den anisotropi som med hjälp av triaxialförsök påvisats i leran har modellerats i beräkningarna enligt SGI Vägledning 8, där skjuvhållfastheten multipliceras med en faktor som beror av glidytns vinkel mot horisontalplanet, se exempel från beräkningarna i Figur 6 nedan.



Figur 6. Faktor med vilken skjuvhållfastheten multipliceras vid olika vinklar längs glidytn för $c_{uA}/c_{uD} = 1,2, 1,3$ respektive $1,4$.

Skjuvhållfastheten i leran under åfåran, i beräkningarna benämnd "Älvlera", har modellerats genom interpolation mellan skjuvhållfastheten vid åbotten, vilken ansatts till 9 kPa, och skjuvhållfastheter i omgivande lerlager, se exempel i Figur 7 nedan. Älvlerans utbredning har bedömts baserat på den avlastning som åfåran innebär för underliggande lera jämfört med ursprunglig markyta samt bedömd vattennivå i Solbergsån.



Figur 7. Skjuvhållfasthet i leran i åfåran i sektion 55100VR02.

6.2.2.Portryck

Uppmätta och dimensionerande portryck redovisas i Bilaga 3 och Tabell 2. I beräkningarna har högsta uppmätta portryck ansatts för befintliga förhållanden. I samtliga sektioner har känslighetsanalyser utförts där portrycken ökats med ca 10 kPa jämfört med högsta uppmätta, vilket motsvarar dimensionerande portryck, se Bilaga 7. Vid analys av föreslagna förstärkningsåtgärder har dimensionerande portryck ansatts.

6.2.3.Laster

För samtliga byggnader har en permanent karakteristisk last på 10 kPa per våningsplan ansatts i beräkningarna. Vid källargrundläggning har denna antagits ge en avlastningseffekt på 10 kPa. I Bilaga 1 redovisas de olika byggnadernas grundläggning och ansatt karakteristisk last på markytan.

Känslighetsanalyser där en permanent karakteristisk last på 10 kPa ansatts på markytan, för att ta hänsyn till den 0,5 m höjning av markytan, som är vanligt att kommuner tillåter utan marklovsansökan, har utförts i samtliga sektioner.

6.3. Resultat - befintliga förhållanden

Beräknade säkerhetsfaktorer redovisas i Tabell 6 samt på beräkningarna i Bilaga 6. Beräknade glidytor med otillfredsställande säkerhetsfaktor har rödmarkerats.

Tabell 6. Beräknad kritisk säkerhetsfaktor, befintliga förhållanden.

Sektion	Analys	F _c	F _{komb}
55100VR01	55100VR01UTB01 55100VR01KTB01	1,13	1,04
55100VR02	55100VR02UTB01 55100VR02KTB01	1,02	0,72
55100VR03	55100VR03UTB01 55100VR03KTB01	1,11	1,04
55100VR04	55100VR04UTB01 55100VR04KTB01	1,04	0,81
55100VR05	55100VR05UTB01 55100VR05KTB01	1,34	0,96
55100VR06	55100VR06UTB01 55100VR06KTB01	1,29	1,14
55100VR07	55100VR07UTB01 55100VR07KTB01	1,07	0,99
55100VR08	55100VR08UTB01 55100VR08KTB01	1,58	1,33
55100VR09N	55100VR09NUTB01 55100VR09NKTB01	1,15	0,89
55100VR09S	55100VR09SUTB01 55100VR09SKTB01	1,37	1,13
55100VR10N	55100VR10NUTB01 55100VR10NKTB01	1,16	0,91
55100VR10S	55100VR10SUTB01 55100VR10SKTB01	1,38	0,91
55100VR11N	55100VR11NUTB01 55100VR11NKTB01	1,15	0,88
55100VR11S	55100VR11SUTB01 55100VR11SKTB01	1,17	0,94

Rev A

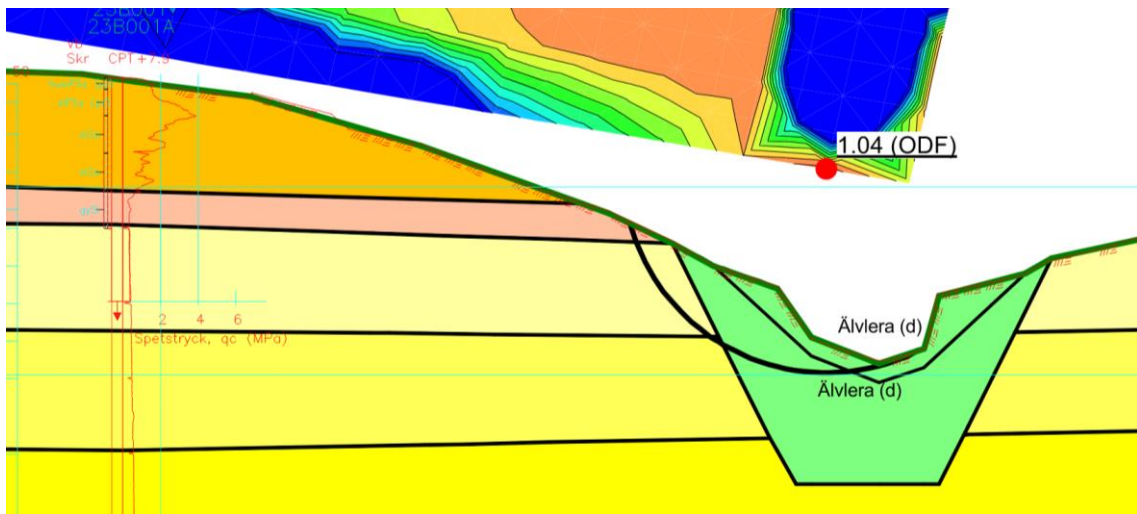
Sektion	Analys	F_c	F_{komb}
55100VR12N	55100VR12NUTB01 55100VR12NKTB01	1,17	1,00
55100VR12S	55100VR12SUTB01 55100VR12SKTB01	1,31	1,06
55100VRK5	55100VRK5UTB01 55100VRK4KTB01	1,25	1,17

Rev A

Rev A

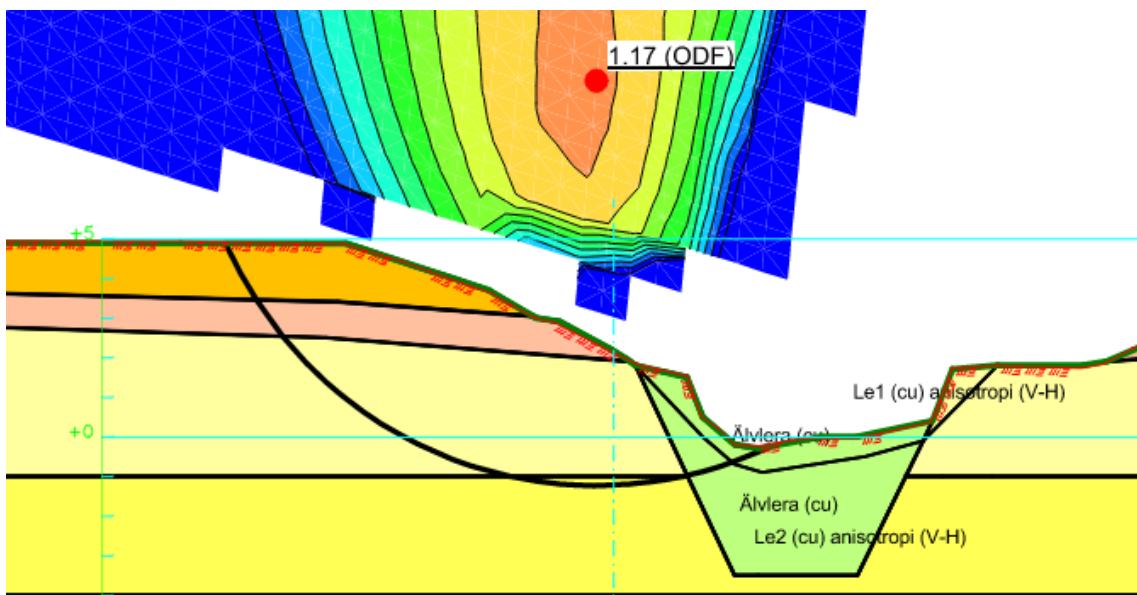
Beräkningarna visar att släntstabiliteten generellt är otillfredsställande inom området. Endast i en sektion, 55100VR08, uppnås erforderlig säkerhetsfaktor i både odränerad och kombinerad analys. I sektioner 55100VR09S och -R10S uppnås erforderlig säkerhetsfaktor vid odränerad analys men vid kombinerad analys förekommer glidytor med otillfredsställande säkerhetsfaktor, se exempel i Figur 8. Denna typ av glidytor med lokala och i huvudsak dränerade brott i direkt anslutning till åfåran utgör de kritiska glidyterna vid kombinerad analys inom majoriteten av undersökningsområdet.

Rev A



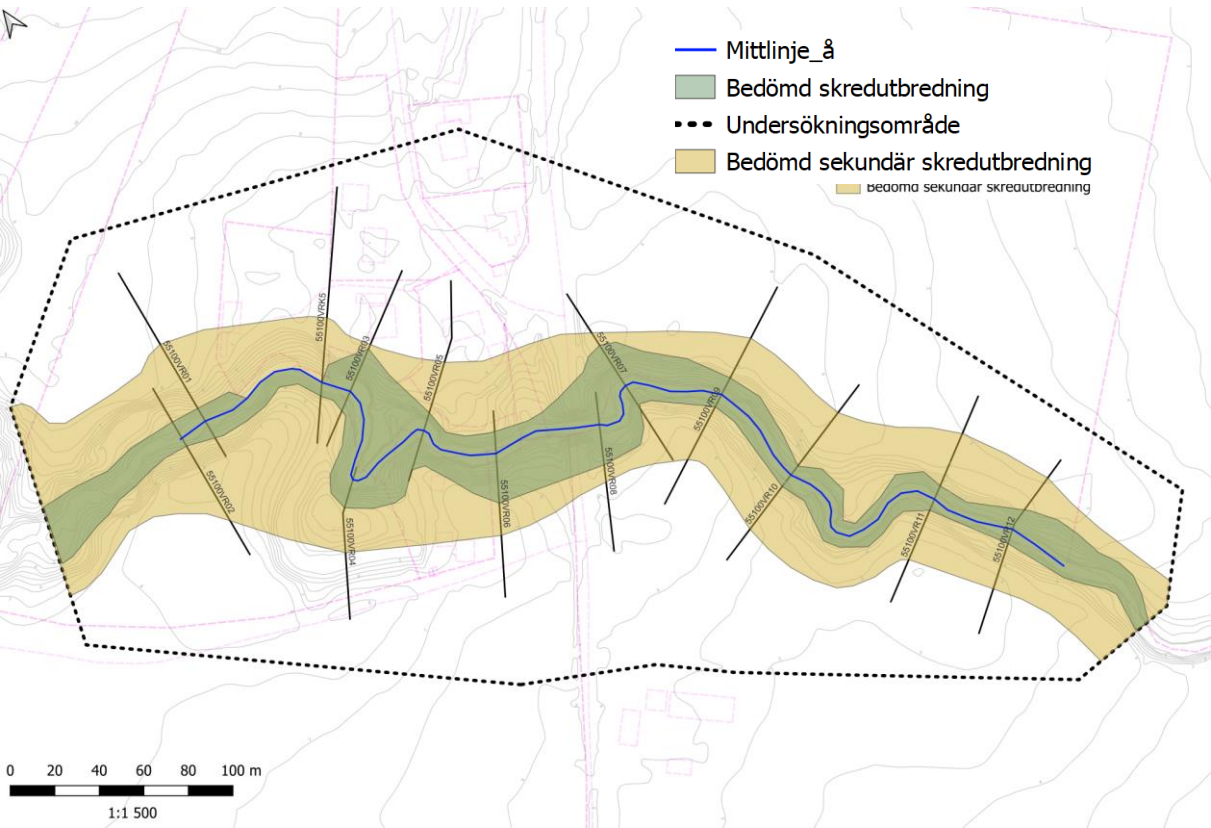
Figur 8. Kritisk glidyta vid kombinerad analys i sektion 55100VR01.

Kritiska glidytor vid odränerad analys omfattar i regel en större jordvolym än motsvarande för kombinerad analys och sträcker sig längre bakom släntrönn, se exempel i Figur 9.



Figur 9. Kritisk glidyta vid odränerad analys i sektion 55100VR12B.

Risk för bakåtgripande skred har bedömts enligt GÄU - delrapport 32. Sensitiviteten i leran överstiger generellt inte 30, vilket ger en n-faktor på som mest ca 7. Utbredningen av området för bakåtgripande skred enligt denna metodik redovisas tillsammans med primär skredutbredning i Figur 10 nedan.



Figur 10. Utbredning av bedömd primär och sekundär skredutbredning, markerade med grön resp. gul skraffering.

6.4. Resultat - känslighetsanalys

De kritiska säkerhetsfaktorer som beräknats för de olika känslighetsanalyserna redovisas i Tabell 7 nedan. Även av procentuell försämring av säkerhetsfaktorn jämfört med kritisk glidyta vid befintliga förhållanden redovisas. Beräkningarna redovisas i sin helhet i Bilaga 7. Känslighetsanalyserna benämns enligt nedan:

- Lastökning 10 kPa, -UTK01, -KTK01
- Portrycksökning 10 kPa, -UTK02, -KTK02
- Erosion 0,5 m i åfåran, -UTK03, -KTK03

Tabell 7. Beräknad kritisk säkerhetsfaktor, känslighetsanalyser.

Sektion	Analys	F _c	ΔF _c [%]	F _{komb}	ΔF _{komb} [%]
55100VR01	55100VR01UTK01	1,09	-4	1,03	-1
	55100VR01KTK01				
	55100VR01UTK02	1,10	-3	0,93	-11
	55100VR01KTK02				
	55100VR01UTK03	1,08	-4	0,96	-8
	55100VR01KTK03				

Rev A

Sektion	Analys	F _c	ΔF _c [%]	F _{komb}	ΔF _{komb} [%]
55100VR02	55100VR02UTK01 55100VR02KTK01	0,97	-5	0,72	0
	55100VR02UTK02 55100VR02KTK02	1,01	-1	0,95	32
	55100VR02UTK03 55100VR02KTK03	0,99	-3	0,95	32
55100VR03	55100VR03UTK01 55100VR03KTK01	1,04	-6	0,98	-6
	55100VR03UTK02 55100VR03KTK02	1,09	-2	0,97	-7
	55100VR03UTK03 55100VR03KTK03	1,05	-5	0,94	-10
55100VR04	55100VR04UTK01 55100VR04KTK01	0,95	-9	0,80	-1
	55100VR04UTK02 55100VR04KTK02	1,03	-1	0,81	0
	55100VR04UTK03 55100VR04KTK03	0,99	-5	0,79	-3
55100VR05	55100VR05UTK01 55100VR05KTK01	1,16	-13	0,93	-3
	55100VR05UTK02 55100VR05KTK02	1,33	-1	0,92	-4
	55100VR05UTK03 55100VR05KTK03	1,27	-5	0,95	-1
55100VR06	55100VR06UTK01 55100VR06KTK01	1,17	-9	1,08	-5
	55100VR06UTK02 55100VR06KTK02	1,28	-1	1,06	-7
	55100VR06UTK03 55100VR06KTK03	1,24	-4	1,09	-4
55100VR07	55100VR07UTK01 55100VR07KTK01	1,02	-5	0,95	-4
	55100VR07UTK02 55100VR07KTK02	1,04	-3	0,90	-9
	55100VR07UTK03 55100VR07KTK03	1,02	-5	0,91	-8
55100VR08	55100VR08UTK01 55100VR08KTK01	1,42	-10	1,31	-2
	55100VR08UTK02 55100VR08KTK02	1,56	-1	1,19	-11
	55100VR08UTK03 55100VR08KTK03	1,50	-5	1,29	-3
55100VR09N	55100VR09NUTK01 55100VR09NKTK01	1,07	-7	0,89	0
	55100VR09NUTK02 55100VR09NKTK02	1,12	-3	0,78	-12
	55100VR09NUTK03 55100VR09NKTK03	1,08	-6	0,81	-9

Sektion	Analys	F _c	ΔF _c [%]	F _{komb}	ΔF _{komb} [%]
55100VR09S	55100VR09SUTK01 55100VR09SKTK01	1,24	-10	1,11	-2
	55100VR09SUTK02 55100VR09SKTK02	1,36	-1	0,97	-14
	55100VR09SUTK03 55100VR09SKTK03	1,28	-7	1,01	-11
55100VR10N	55100VR10NUTK01 55100VR10NKTK01	1,07	-8	0,91	0
	55100VR10NUTK02 55100VR10NKTK02	1,13	-3	0,89	-2
	55100VR10NUTK03 55100VR10NKTK03	1,10	-5	0,86	-6
55100VR10S	55100VR10SUTK01 55100VR10SKTK01	1,18	-15	0,91	0
	55100VR10SUTK02 55100VR10SKTK02	1,38	0	0,77	-15
	55100VR10SUTK03 55100VR10SKTK03	1,28	-7	0,81	-11
55100VR11N	55100VR11NUTK01 55100VR11NKTK01	1,03	-10	0,88	0
	55100VR11NUTK02 55100VR11NKTK02	1,14	-1	0,78	-11
	55100VR11NUTK03 55100VR11NKTK03	1,07	-7	0,77	-13
55100VR11S	55100VR11SUTK01 55100VR11SKTK01	1,04	-11	0,94	0
	55100VR11SUTK02 55100VR11SKTK02	1,16	-1	0,78	-17
	55100VR11SUTK03 55100VR11SKTK03	1,11	-5	0,90	-4
55100VR12N	55100VR12NUTK01 55100VR12NKTK01	1,07	-9	0,97	-3
	55100VR12NUTK02 55100VR12NKTK02	1,15	-2	0,72	-28
	55100VR12NUTK03 55100VR12NKTK03	1,06	-9	0,77	-23
55100VR12S	55100VR12SUTK01 55100VR12SKTK01	1,17	-11	1,06	0
	55100VR12SUTK02 55100VR12SKTK02	1,14	-13	0,87	-18
	55100VR12SUTK03 55100VR12SKTK03	1,22	-7	0,92	-13
55100VRK5	55100VRK5UTK01 55100VRK5KTK01	1,16	-7	1,10	-6
	55100VRK5UTK02 55100VRK5KTK02	1,23	-2	1,02	-13
	55100VRK5UTK03 55100VRK5KTK03	1,20	-4	1,08	-8

De olika typerna av utförda känslighetsanalyser ger olika påverkan på beräkningsresultatet för odränerad respektive kombinerad analys.

Rev A

Rev A

Lastökning på markytan ger generellt störst påverkan vid odränerad analys, med minskning av säkerhetsfaktorn med mellan ca 5 och ca 15%. Detta förklaras troligen med att den kritiska glidytan vid odränerad analys av befintliga förhållanden sträcker sig bakom släntröner, vilket den kritiska glidytan vid kombinerad analys sällan gör. Vid kombinerad analys är motsvarande minskning generellt endast mellan 0 och ca 6%, vilket indikerar att kritisk glidytan i huvudsak är densamma som för befintliga förhållanden.

Desto större påverkan på säkerhetsfaktorn vid kombinerad analys erhålls om porttrycket ökas med 10 kPa, vilket generellt ger en minskning på mellan ca 5 och ca 15 % i områdets nordvästra del och mellan ca 5 och ca 30 % i den sydöstra. För små glidytor invid åfåran är brotten i huvudsak dränerade, och då ökat porttryck innebär lägre effektivspänning så minskar jordens skjuvhållfasthet vilket leder till lägre säkerhetsfaktor. Skillnaden mellan de båda delområdena förklaras i huvudsak av att den dränerade skjuvhållfastheten i nordvästra delen av undersökningsområdet modelleras med ett betydligt högre kohesionsintercept, c' , med ledning av utförda dränerade triaxialförsök. Detta gör att skjuvhållfastheten vid låga effektivspänningar blir betydligt högre än i den sydöstra delen av området, där dränerade triaxialförsök ej utförts.

Erosion med 0,5 m i åbotten ger en minskning med generellt mellan ca 3 och ca 10% vid odränerad analys och ca 4 och ca 23 % vid kombinerad analys, då mothållet minskar för de kritiska glidytor som erhållits vid både odränerad och kombinerad analys.

6.5. Åtgärdsförslag

Förslag på förstärkningsåtgärder har analyserats i sex utvalda sektioner, se Bilaga 8. Beräknad säkerhetsfaktor redovisas i Tabell 8 nedan, samt på beräkningssektionerna i Bilaga 8 tillsammans med föreslagen åtgärds utbredning i sektion. Föreslagna åtgärder utgörs i huvudsak av höjning av åbotten och utläggande av erosionsskydd, ställvis i kombination med avschaktning av släntröner. Överslagsberäkningar av mängder för fyllning av erosionsskydd och höjning av åbotten har beräknats till ca 6900 m³ och mängden avschaktning till ca 3800 m³.

De högre dränerade hållfasthetsvärden som kan tillgodoräknas från utförda dränerade triaxialförsök har resulterat i en minskad fyllning och avschaktning på ca 400 m³ resp. 1700 m³, jämfört med tidigare beräkningar där empiriska värden på dränerad skjuvhållfasthet ansattes.

Rev A

Tabell 8. Beräknad kritisk säkerhetsfaktor, åtgärdsförslag.

Sektion	Analys	F _c	F _{komb}
55100VR01	55100VR01UTA01 55100VR01KTA01	1,37	1,26
55100VR02	55100VR02UTA01 55100VR02KTA01	1,35	1,36
55100VR05	55100VR05UTA01 55100VR05KTA01	1,48	1,29
55100VR06	55100VR06UTA01 55100VR06KTA01	1,36	1,25
55100VR09N	55100VR09NUTA01 55100VR09NKTA01	1,50	1,26
55100VR09S	55100VR09SUTA01 55100VR09SKTA01	1,50	1,35
55100VR11N	55100VR11NUTA01 55100VR11NKTA01	1,36	1,30
55100VR11S	55100VR11SUTA01 55100VR11SKTA01	1,38	1,29

Rev A

Höjningen av åbotten är som störst vid undersökningsområdets nordvästra gräns med fyllning på 1,3 m, se sektion 55100VR02 i Bilaga 8:2. Höjningen av åbotten minskar till mellan ca 0,5 och ca 1,0 m vid sektion 55100VR05 och vidare till undersökningsområdets sydöstra gräns. Ån kan ha högt biologiskt skyddsvärde, vilket brukar medföra krav på att använda naturgrus som fyllnadsmaterial i åbotten och slänter.

Fyllningens slänter utförs med släntlutning 1:2, vilket bedöms var lämpligt att utföra med naturgrus. Fyllningen föreslås utföras med bergkrossmaterial i grövre fraktion närmast befintlig botten och med ett minst 0,5 m tjockt lager av naturgrus, sten och block, preliminärt i fraktion 0-300 mm, upp till blivande ny åbotten. Beroende på strömningshastigheten, som behöver utredas vidare, kan större fraktioner krävas.

Rev A

Den föreslagna fyllningen kommer medföra att vattennivån i ån kommer höjas längs den aktuella sträckan. Även delen av ån uppströms undersökningsområdet kommer sannolikt påverkas av höjd vattenyta med åtföljande påverkan av flödes- och erosionsförhållandena. För att inte orsaka uppdämning med stillastående vatten som följd, vilket kan försämra för naturvärden i bäckfåran, kan höjning av åbotten krävas även norr om området. Om höjning av åbotten upp till sektion 55100VR18 utförs bedöms åtgärden inte orsaka stillastående vatten i större omfattning än dagens förhållanden. Bottenhöjning utanför undersökningsområdet har inte inkluderats vid överslagsberäkning av mängd fyllning ovan, då det inte utgör en stabilitetsförbättrande åtgärd för undersökningsområdet.

Avschaktning föreslås från undersökningsområdets nordvästra gräns ned till sektion 55100VR10, ca 100 m sydost om Romelandavägen. Avschaktningens utbredning i plan är mellan ca 10 och ca 15 m och djupet varierar mellan ca 0,5 och ca 2 m.

7. Slutsatser och förslag på fortsatta arbeten

Rev A

Släntstabiliteten är otillfredsställande i samtliga undersökta sektioner och stabilitetsförbättrande åtgärder erfordras inom i stort sett hela undersökningsområdet. Förstärkningsförslaget kommer ge en långsiktig förbättring av stabilitets- och erosionsförhållandena inom undersökningsområdet. Förstärkningsarbetet bedöms kunna utföras i etapper på ett förhållandevis säkert sätt med succesiv utfyllnad. Maskiner och transporter bedöms kunna ske via tillfälliga vägar i anslutning till ån. Prövning av åtgärdens lämplighet enligt Miljöbalken kommer sannolikt att krävas. Eftersom fördjupad utredningsnivå föreligger kan övervägas om åtgärdernas omfattning bör utformas utifrån procentuell förbättring av släntstabiliteten, med syfte att ytterligare minimera åtgärdernas omfattning.

I områdets nordvästra del utfördes kompletterande dränerade triaxialförsök i silten och leran, vilka möjliggjorde att en högre dränerad skjuvhållfasthet ansattes. Detta möjliggjorde en reduktion av föreslagna åtgärder inom nordvästra området med ca 10 % för mängden erosionsskydd och ca 40 % för mängden avschaktning. Troligtvis kan föreslagna åtgärder i områdets sydöstra del reduceras om dränerade triaxialförsök utförs även här.

I samband med projektering av förstärkningsåtgärder behöver en kompletterande hydrologisk utredning utföras för att klarlägga strömningsförhållandena i ån före och efter åtgärd. Kompletterande inmätning av geometrin i slänter och åbotten krävs både inom och upp- och nedströms undersökningsområdet, med syfte att klarlägga att tillräckligt utrymme och fall finns samt som underlag för hydrologiska beräkningar av vattenströmningen.