

APRIL 2021
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

IVARSLUND, LILLA EDETS KOMMUN

PM GEOTEKNIK FÖRDJUPAD STABILITETSUTREDNING

38500VPM11



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

APRIL 2021
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

IVARSLUND, LILLA EDETS KOMMUN

PM GEOTEKNIK FÖR DJUPAD STABILITETSUTREDNING

38500VPM11

DIARIENUMMER
6.2-1910-0734

UPPDRAGSNUMMER
19142A/10136

KONTAKTPERSON SGI
Per Nylander

PROJEKTNR.
A206330

DOKUMENTNR.
38500VPM01

VERSION	UTGIVNINGSDATUM	BESKRIVNING	UTARBETAD	GRANSKAD	GODKÄND
1.0	2021-04-30	PM Geoteknik fördjupad stabilitetsutredning	Malin Johansson	Charlotte Junkers	Christina Edström

INNEHÅLL

1	Objekt	8
2	Syfte	9
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	13
6.1	Topografi och ytbeskaffenhet	14
6.2	Befintliga konstruktioner	17
6.3	Tidigare jordskred	18
7	Geotekniska förhållanden	18
7.1	Jordlagerförhållanden	18
7.2	Utvärdering kvicklera	22
7.3	Hydrogeologiska förhållanden	27
8	Valda beräkningsparametrar	29
8.1	Jordmaterialparametrar	30
8.2	Portrycksmodell	36
8.3	Vattenstånd i älven	36

9	Känslighetsanalys	37
9.1	Förändring av portrycksförhållanden	37
9.2	Förändrad geometri till följd av erosion	37
9.3	Reducering av skjuvhållfasthet	38
10	Åtgärder	40
10.1	Tryckbank/erosionsskydd	40
10.2	Avschaktning	40
10.3	Kalkcementpelare	41
11	Gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar	41
12	Beräkningar och resultat	43
12.1	Totalsäkerhetsmetoden	44
12.2	Partialkoefficientmetoden	53
13	Klimatberäkningar	56
14	Föreslagna åtgärder	60
15	Slutsats och rekommendationer	61

BILAGOR

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

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 Ivarslund i Lilla Edets kommun.

Utredningsområdet är beläget på västra sidan om Göta älv ca 5 km söder om Lilla Edet centrum. Området sträcker sig från ca km 38/250 i norr till ca km 39/000 i söder enligt älvens längdmätning, se Figur 1. För planritning med längdmätning hänvisas till MUR Geoteknik.



Figur 1 Översiktsbild, aktuellt område markerat med vitstreckad linje
(kartkälla: eniro.se 2020)

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

Geotekniska fält- och laboratorieundersökningar har utförts av COWI AB under 2020. Resultaten från dessa undersökningar redovisas i:

- > Ivarslund, Lilla Edets kommun, Fördjupad stabilitetsutredning, 38500VRA11, Markteknisk undersökningsrapport (MUR) Geoteknik, Uppdragsnummer COWI A206330, daterad 2021-01-29.

Inom aktuellt område har geotekniska undersökningar utförts tidigare. Undersökningarna redovisas i följande handlingar:

- > SGI (2020) Detaljerad stabilitetsutredning, Ivarslund, Göta Älv, uppdragsnummer 19142, WSP Samhällsbyggnad, daterad 2020-03-26
- > SGI (2011), Göta älvutredningen, GÄU, Delområde 4 (Ström – Skår), Uppdragsnummer 14084, Tyréns AB, daterad 2011-03-31.

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, maj 2020, se Figur 10

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. Eventuella stabilitetshöjande åtgärder har dimensionerats med totalsäkerhetsmetoden och därefter kontrollerats med partialsäkerhetsmetoden enligt direktiv från beställaren, SGI. Om erforderlig säkerhet mot stabilitetsbrott inte har uppnåtts i partialsäkerhetsmetoden har ett alternativt stabilitetshöjande åtgärdsförslag utformats. Detta åtgärdsförslag har även beräknats och redovisats 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 $F_{\text{komb}} = 1,3$ för kombinerad analys. Erforderliga säkerhetsfaktorer för uppdraget motsvarar därmed den övre gränsen av intervallet som anges i IEG Rapport 4:2010.

För partialkoefficientmetoden gäller krav att säkerhetsfaktor F_{EN} (både odränerad- och kombinerad analys) ska överstiga $F_{\text{EN}} = 1,0$ för säkerhetsklass 2 (SK2) och $F_{\text{EN}} = 1,1$ för säkerhetsfaktor 3 (SK3). Erforderliga säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott för partialkoefficientmetoden krävs i IEG Rapport 6:2008. För uppdraget har säkerhetsklass 3 (SK3) tillämpats med avseende på stabilitetsbrott för undergrund av kvicklera.

Vid stabilitetsanalys med partialkoefficientmetoden har dimensionerande värden, X_d , för geotekniska materialparametrar beräknats enligt kapitel 3.4.1 i IEG Rapport 6:2008, rev 1 och ekvationen nedan,

$$X_d = \frac{1}{\gamma_M} \cdot \eta \cdot \bar{X} \text{ där,}$$

$\bar{X}$ = valt värde baserat på härledda värden

γ_M = partialkoefficient (enligt tabell 3.2, kapitel 3.4.1 IEG Rapport 6:2008, rev 1)

η = omräkningsfaktor, värdering av utförd undersökning

För Ivarslund värderas omräkningsfaktorn (η) för skjuvhållfasthet enligt nedanstående fördelning till $\eta = 1,1$ se Tabell 1.

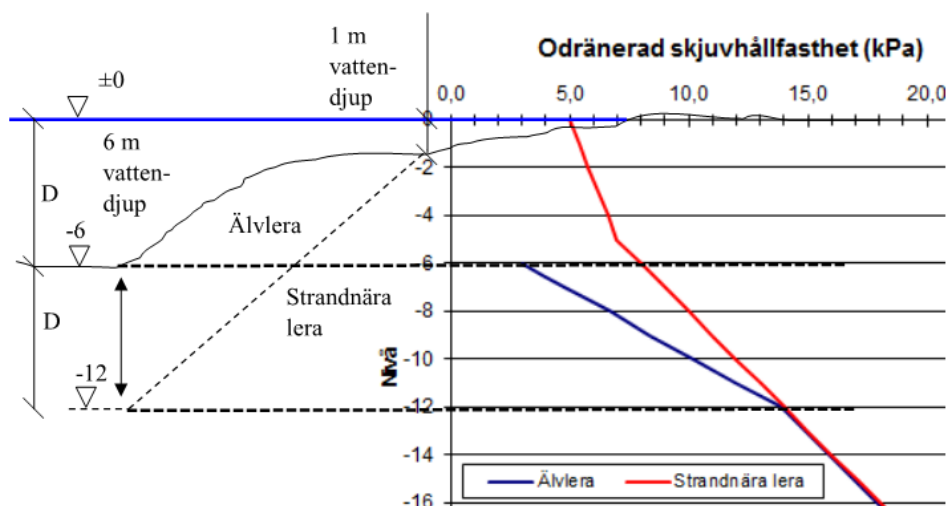
Tabell 1 Sammanställning, omräkningsfaktor (η) skjuvhållfasthet

Delfaktor	Omräkningsfaktor
$\eta_{1,2}$	1,0
η_3	1,1
$\eta_{4,5,6,7}$	1,0

För Ivarslund har vald skjuvhållfasthet valts genom en ingenjörsmässig bedömning där stor tyngdpunkt har lagts på utförda avancerande laboratorieanalyser, så som direkta skjuvförsök och triaxialförsök. Den valda skjuvhållfastheten har nyttjats för både totalsäkerhetsmetoden och partialkoefficientmetoden där omräkningsfaktorn (η) ansatts till $\eta = 1,0$ för att inte övervärdera de avancerande laboratorieanalyserna

Omräkningsfaktorn (η) för densitet har enligt IEG Rapport 6:2008, rev 1 ansatts till $\eta = 1,0$.

I anslutning till Ivarslund 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 rådet på land, se Figur 2.



Figur 2 Skjuvhållfasthetens antagna förändring enligt riktlinjer från SGI.

Lerans dränerade skjuvhållfasthetsparametrar har bedömts empiriskt till $\phi' = 30^\circ$ 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, för det södra delområdet, beräknats enligt:

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

Och genom empiri enligt förhållandet, $K_{0(NC)} = 0,31 + 0,71(W_L - 0,2)$ för det norra området.

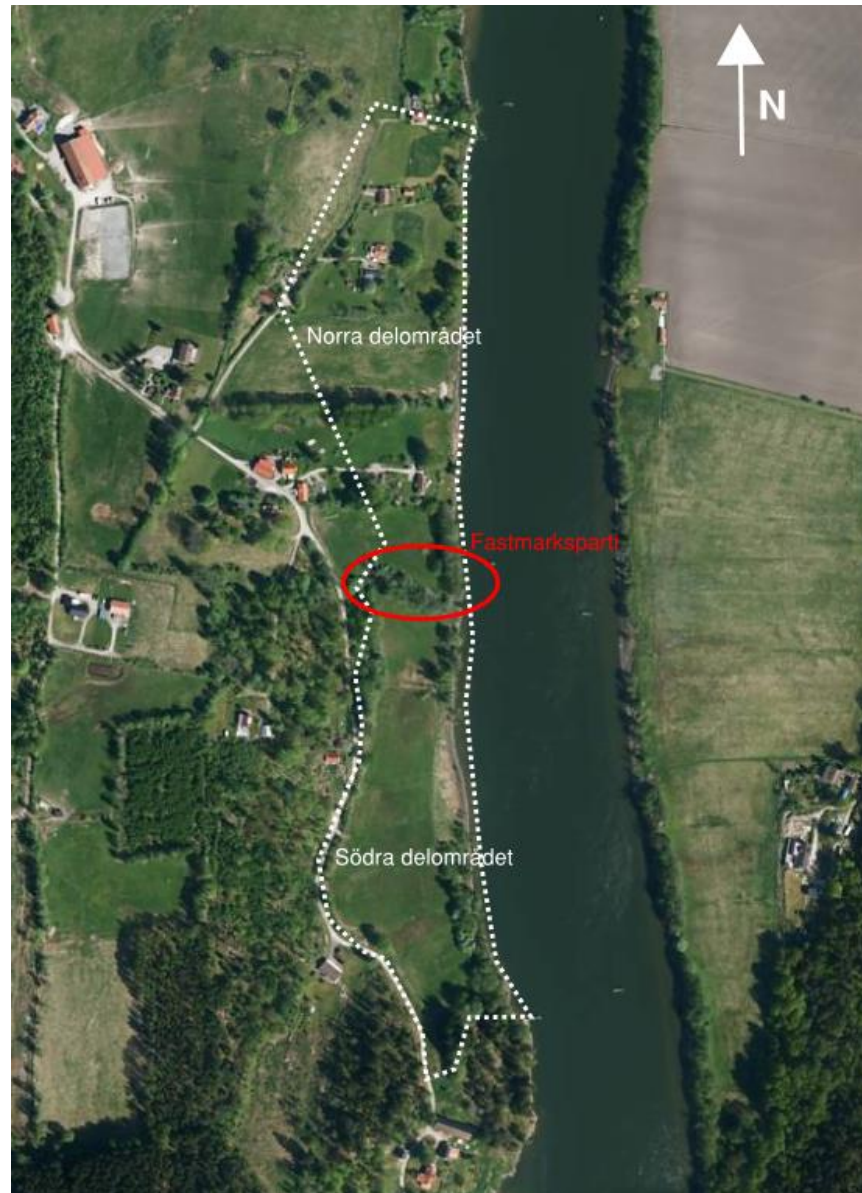
Markytan som använts i stabilitetsberäkningarna är i huvudsak framtagen utifrån resultat av inmätningar. Där inmätning saknas har höjddata från Lantmäteriets WCS-tjänst använts i stället. Bottennivåer i Göta älv har hämtats från batymetrisk mätning från 2018.

Stabilitetsanalysen har utförts med datorprogrammet Geostudio 2020, version 10.2.2.20559, med totalsäkerhetsmetoden för samtliga beräkningsfall samt med partialkoefficientmetoden för kritiska beräkningsfall

6 Befintliga förhållanden

Det aktuella utredningsområdet i Ivarslund består av ett relativt öppet landskap som till stora delar utgörs av ängs- och gräsbevuxen betesmark med gles bebyggelse. Marken närmast Göta älv är i allmänhet bevuxen med träd och sly.

I nedanstående beskrivning och för denna stabilitetsutredning delas utredningsområdet in i två delområden på ömse sidor om ett fastmarksparti, se Figur 3.



Figur 3 Översiktsbild, aktuellt område markerat med vit streckad linje (kartkälla eniro.se)

6.1 Topografi och ytbeskaffenhet

6.1.1 Delområde norr

Det norra delområdet består till största delen av gräsbevuxen ängsmark i anslutning till bostäder med tillhörande gårdsbyggnader och trädgårdar, se Figur 4 och Figur 5. Marken närmast Göta älv är i allmänhet bevuxen med träd och sly.



Figur 4 Ängsmark och bebyggelse i den norra delen av området fotograferat mot väster, längs Göta älv (COWI AB, 2020).



Figur 5 Ängsmark och bebyggelse i den norra delen av området fotograferat mot nordväst (COWI AB, 2020).

Längs strandkanten inom det norra delområdet finns ett erosionsskydd av sprängsten, se Figur 6.



Figur 6 Erosionsskydd i norra delen av området, fotograferat mot söder (COWI AB, 2020).

Markytan inom det norra delområdet lutar mot öster och Göta älv, från ca +20 i väster till ca +0 vid älven. Slänten ner mot älven är jämn med en lutning på ca 1:7.

Bottennivåer i Göta älv varierar från nivå ca -1 vid strandlinjen till ca -7 vid släntfot och ca -10 mitt i farleden, dvs. 45–55 m ut i älven. Slänten från strandlinjen ner mot älvbotten har huvudsakligen en lutning som varierar mellan ca 1:1,5 och 1:6.

6.1.2 Delområde söder

Det södra delområdet består till största delen av gräsbevuxen ängs- och betesmark med bostadshus i väster i anslutning till ett fastmarksparti. Marken närmast Göta älv är i allmänhet bevuxen med träd och sly, se Figur 7 och Figur 8.



Figur 7 Betesmark vid det södra delområdet fotograferat mot nordväst från andra sidan av Göta älv (COWI AB, 2020).



Figur 8 Betesmark och bostadshus i den södra delen av området. Fotograferat mot norr med Göta älv till höger i bild. Längst bak i bilden syns ett mindre skogsområde (COWI AB, 2020).

Längs strandkanten inom det södra delområdet finns ett erosionsskydd av sprängsten, se Figur 9.



Figur 9 Erosionsskydd i södra delen av området fotograferat mot norr (COWI AB, 2020).

Markytan inom det södra delområdet lutar mot öster och Göta älv, från ca +14 i väster till ca +0 vid älven. Slänten ner mot älven är jämn med en lutning på ca 1:10.

Bottennivåer i Göta älv varierar från nivå ca -1 vid strandlinjen till ca -11 i farleden, dvs. 45–55 m ut i älven. Slänten från strandlinjen ner mot älvbotten har huvudsakligen en lutning som varierar mellan ca 1:1,5 och 1:6.

6.2 Befintliga konstruktioner

Inom utredningsområdet finns det flera fastigheter med bostadshus och gårdsbyggnader. Det finns markförlagda ledningar i anslutning till bostadshus och vägar.

Längs med Göta älv genom hela utredningsområdet finns ett erosionsskydd av sprängsten, se Figur 6 och Figur 9. 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 finns ingen dokumentation av tidigare jordskred inom utredningsområdet, se Figur 10. Tidigare skredärr markeras med lila taggig linje. Vid platsbesök 2020-06-10 observerades inga spår av tidigare jordskred.



Figur 10 Utdrag från SGU:s kartvisare över tidigare jordskred, 2021-01-15, aktuellt område översiktligt markerat med röd linje. Inga tidigare skredärr finns inom utredningsområdet.

7 Geotekniska förhållanden

7.1 Jordlagerförhållanden

I nedanstående beskrivning och för denna stabilitetsutredning delas utredningsområdet in i två delområden på ömse sidor om ett fastmarksparti, se Figur 3. Fastmarkspartiet bedöms dela in området i två geologiska lokaler vilket också utvärderade grundparametrar och skjuvhållfastheter visar.

Nedan beskrivs jordlagerförhållanden övergripande inom respektive delområde. För valda materialparametrar, se kapitel 8 och bilagor. För undersökningresultat hänvisas till MUR Geoteknik enligt kap 3.1.

7.1.1 Delområde norr

Jordlagren består till större delen av lera närmast Göta älv och av en friktionsjordsrygg längre upp i slänten, ca 45 m från Göta älv, se Figur 11. Väster om friktionsjordryggen förekommer åter lera.



Figur 11 Översiktlig uppdelning mellan lerområde och område med friktionsjord.

Inom område med lera utgörs jordlagren överst av organisk jord och därunder av lera som är avsatt på ett friktionsjordlager på berg. Utförda sonderingar visar på en lermäktighet på mellan 1 och 7 m och sonderingarna har stoppat på förmodat block eller berg alternativt mot fast lagrad friktionsjord på mellan 5 och 11 m djup under markytan.

Inom område med friktionsjord utgörs jordlagren överst av organisk jord och därunder av friktionsjord på berg. Mäktigheten av friktionsjorden varierar mellan ca 2 och 12 m enligt utförda sonderingar. Bergets överyta har verifierats med jord-bergsondering i sex undersökningspunkter. Berg har påträffats på mellan ca 7 och 24 m under markytan.

Den organiska jorden utgörs i huvudsak av **mulljord**. Mulljordens tjocklek uppgår till ca 0,2–1,2 m.

Leran är sandig och siltig. I den övre delen har leran i allmänhet utbildad torrskorpa alternativt torrskorpekaraktär, vars tjocklek uppgår till ca 0,5–1,5 m. Leran har en mäktighet mellan ca 1–7 m.

Lerans hållfasthet har bestämts utifrån utvärderade CPTU-sonderingar, vingförsök samt konförsök och direkta skjuvförsök på ostörda lerprover. Lerans korregerade odränerade skjuvhållfasthet varierar mellan ca 10 och 20 kPa. Lerans skjuvhållfasthet klassificeras som mycket låg till låg.

Lerans densitet varierar i allmänhet mellan ca 1,5 och 1,7 t/m³. Den naturliga vattenkvoten har bestämts till ca 43–94 %. Konflytgränsen varierar i huvudsak mellan ca 62 och 81%

Lerans sensitivitet varierar enligt laboratorieanalyser på ostörd provtagning mellan ca 11 och 201, vilket innebär att leran är mellansensitiv till högsensitiv. I undersökningspunkt 20C403 och U04048 är leran mellansensitiv. Högsensitiv lera och kvicklera har endast påträffats i undersökningspunkt NV00143A. Förekomsten av kvicklera har även utvärderats från CPTU-R och trycksonderingar. Utvärderingen tyder på förekomst av kvicklera. En detaljerad beskrivning av utvärderingen och en sammanvägd bedömning av kvickleraförekomst redovisas i kapitel 7.2.

Lerans överkonsolideringsgrad, OCR, har bestämts med CRS-försök på ostörda lerprover i två undersökningspunkter. En av undersökningspunkterna är hämtad från tidigare undersökning. Överkonsolideringsgraden varierar mellan ca 2 och 3, vilket klassificeras som en överkonsoliderad lera.

Friktionsjordryggen utgörs av siltig sand eller sandig lerig silt.

Friktionsjordens mäktighet varierar mellan ca 3 och 10 m. Utförda vikt- och CPT-sonderingar visar att friktionsjordens friktionsvinkel varierar mellan ca 30 och 36° och E-modulen varierar mellan ca 5 och 53 MPa. Den naturliga vattenkvoten har bestämts till ca 11–15 %.

Friktionsjorden under leran är inte närmare undersökt.

7.1.2 Delområde söder

Jordlagren utgörs överst av organisk jord och därunder av lera som är avsatt på ett friktionsjordlager på berg. Utförda sonderingar har en lermäktighet på mellan ca 3 och 20 m och har stoppat på förmodat block eller berg alternativt mot fast lagrad friktionsjord på mellan 2 och 24 m djup under markytan. Bergets överyta har verifierats med jord-bergsondering i sju undersökningspunkter. Berg har påträffats på mellan 4 och 20 m under markytan.

Det södra delområdet avgränsas i norr och söder av fastmarkspartier, samt i väster och sydöst av berg i dagen, se Figur 12.



Figur 12 Södra området avgränsas i norr och söder av fastmark, markerat med röd streckad linje, och i väster och sydöst av berg i dagen, markerad med röd heldragen linje.

Den organiska jorden utgörs i huvudsak av **mulljord**. Mulljordens tjocklek har uppmätts till ca 0,1–0,3 m.

Leran är siltig. I den övre delen har leran i allmänhet utbildad torrskorpa alternativt torrskorpekaraktär, vars tjocklek uppgår till ca 0,5–2,0 m. Längs med älven är leran gyttjig mellan ca 4 och 10 m djup. Leran har en mäktighet mellan ca 3 och 20 m.

Lerans hållfasthet har bestämts utifrån utvärderade CPTU-sonderingar, vingförsök samt konförsök, direkta skjuvförsök och triaxialförsök på ostörda lerprover. Lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet varierar från ca 10–20 kPa närmst under torrskorpan, på nivå ca +7 till +0, till mellan ca 20 och 35 kPa vid underkant lera på nivå ca -8 till -16. Lerans skjuvhållfasthet klassificeras som mycket låg till låg.

Lerans densitet varierar i allmänhet mellan ca 1,5 och 1,7 t/m³. Den naturliga vattenkvoten har bestämts till ca 25–92 %. Konflytgränsen varierar i huvudsak mellan ca 55 och 80%

Lerans sensitivitet varierar enligt laboratorieanalyser på ostörd provtagning mellan ca 20 och 268 vilket innebär att leran är mellansensitiv till högsensitiv och kvick. Högsensitiv lera förekommer i samtliga undersökningspunkter och

kvecklara förekommer i samtliga undersökningspunkter utom U04046. Förekomsten av kvecklara har även utvärderats från CPTU-R och trycksonderingar. Utvärderingen tyder på förekomst av kvecklara i hela området. En detaljerad beskrivning av utvärderingen och en sammanvägd bedömning av kvecklara-förekomst redovisas kapitel 7.2.

Lerans överkonsolideringsgrad, OCR, har bestämts med CRS-försök på ostörda lerprover i sju undersökningspunkter. Tre av undersökningspunkterna är hämtade från tidigare undersökning. Överkonsolideringsgraden varierar mellan ca 1 och 6, vilket klassificeras som en normal- till överkonsoliderad lera.

Friktingsjorden är inte närmare undersökt i det södra delområdet.

7.2 Utvärdering kvecklara

Förekomst av kvecklara har utvärderats från ostörd provtagning tillsammans med CPTU-R och trycksonderingar, se MUR enligt kapitel 3.1.

7.2.1 Delområde norr

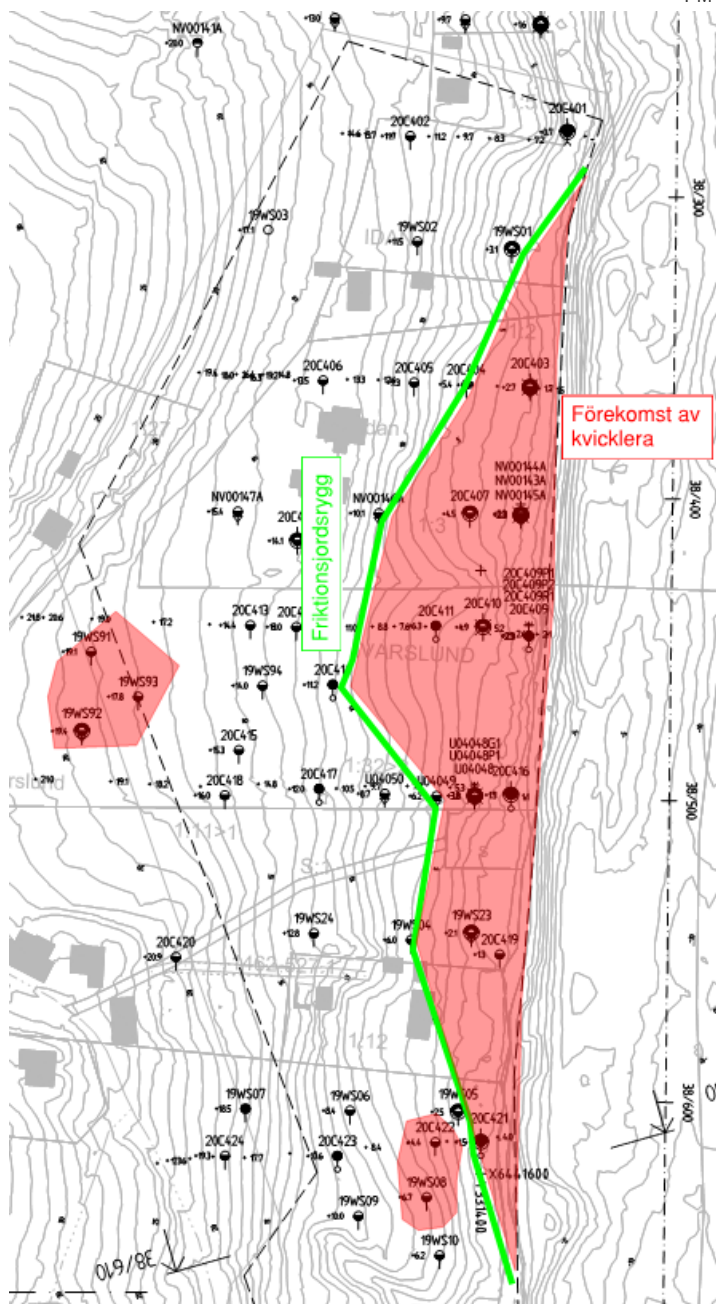
Utvärdering av kvecklara från ostörd provtagning, CPTU-R och trycksonderingar visar inte på en enhetlig utvärdering mellan de olika metoderna.

Laboratorieanalyser på ostörda prov visar på att kvecklara enbart förekommer i anslutning till undersökningspunkt NV00143A. I undersökningspunkt NV00143A är leran högsensitiv på 5 och 6 m djup under markytan. På 6 m djup understiger den omrörda skjuvhållfastheten 0,4 kPa, därvid klassificeras leran som kvick. I undersökningspunkterna 20C403 och U04048G1 är leran mellansensitiv.

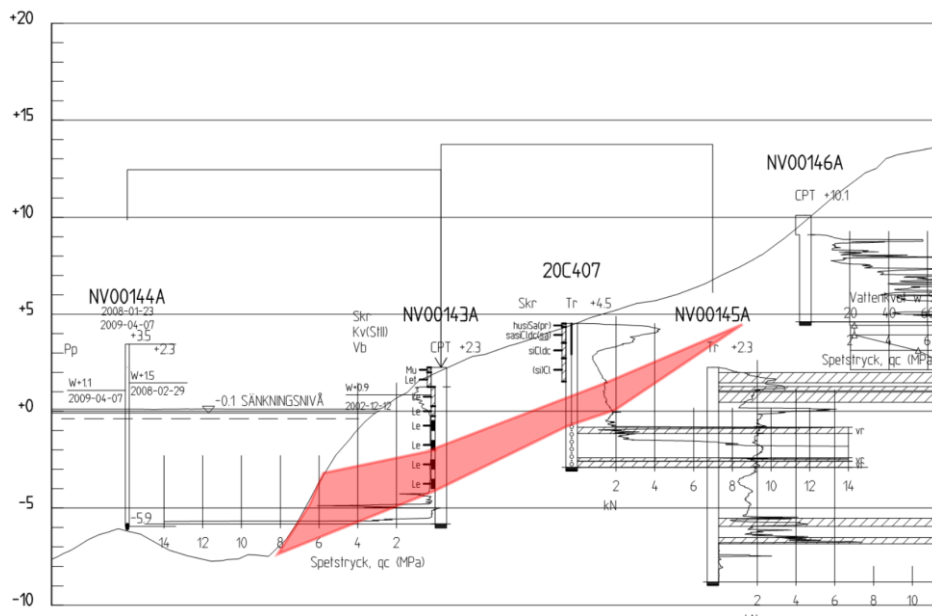
Utvärdering av utförd CPTU-R i undersökningspunkt 20C403 visar på förekomst/förutsättning av kvecklara. CPTU-R redovisar en uppmätt resistivitet mellan 18 och 20 ohm/m.

Utförda trycksonderingar inom hela området med lera visar övergripande på en liten eller obefintlig tillväxt av motståndskraften mot djupet för hela eller delar av jordprofilen.

Utvärdering av kvecklerans utbredning i området skiljer sig åt mellan de olika metoderna. Det kan därför inte uteslutas att det därmed finns förutsättningar för bakåtgripande skred varför kvecklara antas förekomma inom hela området med lera. För bedömd förekomst av kvecklara i plan, se Figur 13, och i sektion se Figur 14.



Figur 13 Översiktsbild över delområde norr, område med förekomst av kvicklera markerat med rött område och nedre gräns för friktsjonsjordsrygg med grön heldragen linje.



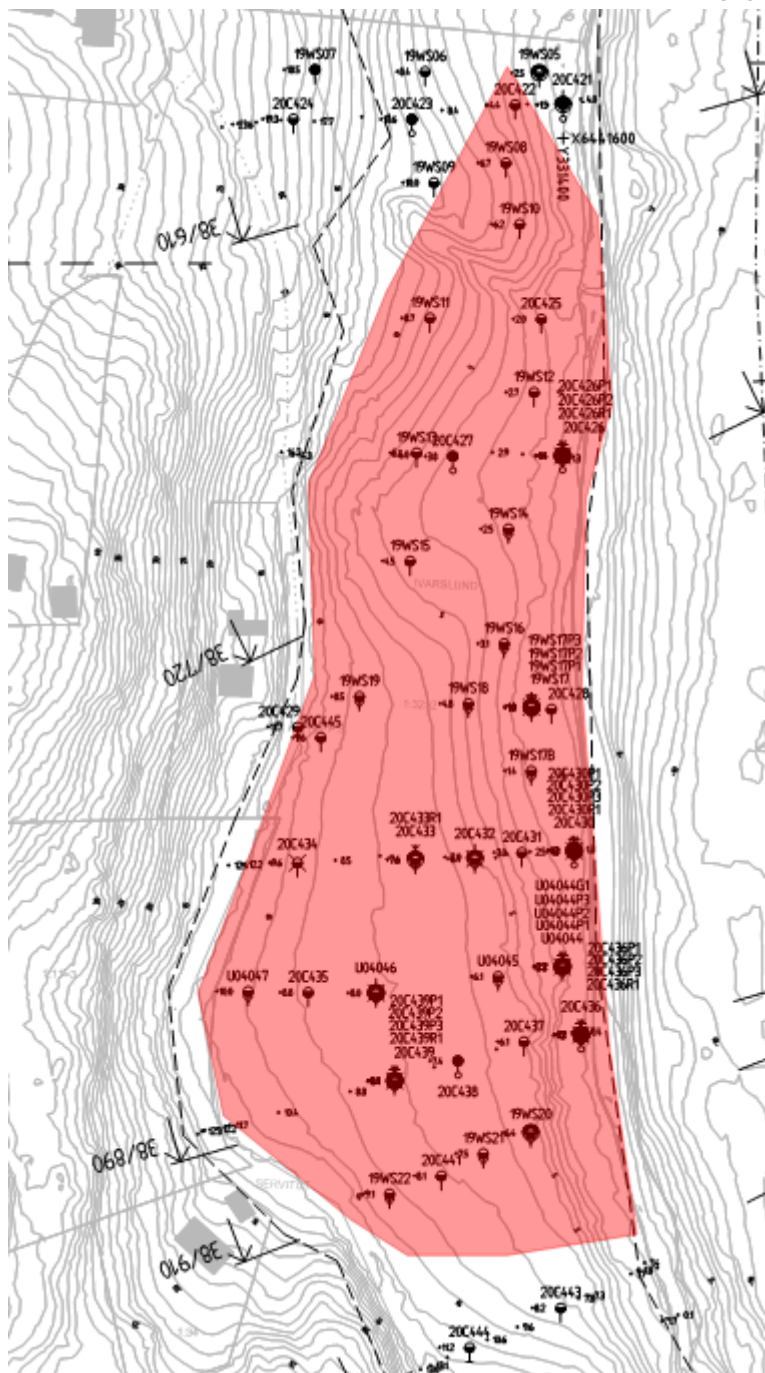
Figur 14 Illustration över bedömd utbredning av kvicklera mot djupet, där området med kvicklera markeras med röd yta. Sektionen redovisas i förställd skala.

7.2.2 Delområde söder

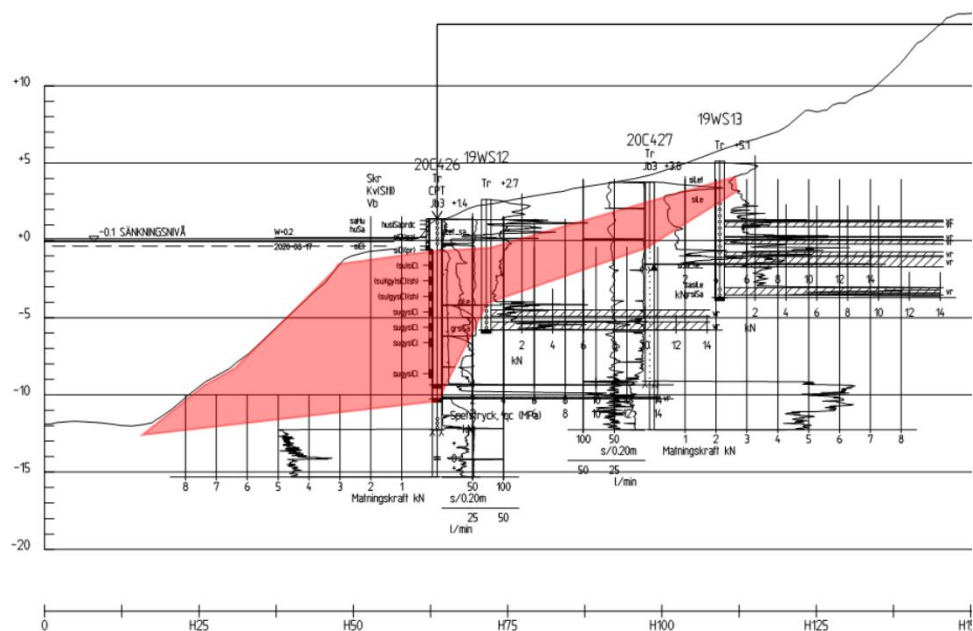
Laboratorieanalyser på ostörda prover visar på en högsensitiv lera i samtliga undersökningspunkter. Kvikklera har generellt påträffats från ca 10 m djup och nedåt, med undantag för undersökningspunkt 20C426 och 19WS17 där kvikklera konstaterats i hela lerprofilen.

Utvärdering av utförda CPTU-R och trycksonderingar visar på förekomst/förutsättning av kvicklera. CPTU-R redovisar en uppmätt resistivitet mellan 5 och 45 ohm/m och trycksonderingarna har en liten eller obefintlig tillväxt av motståndskraften mot djupet.

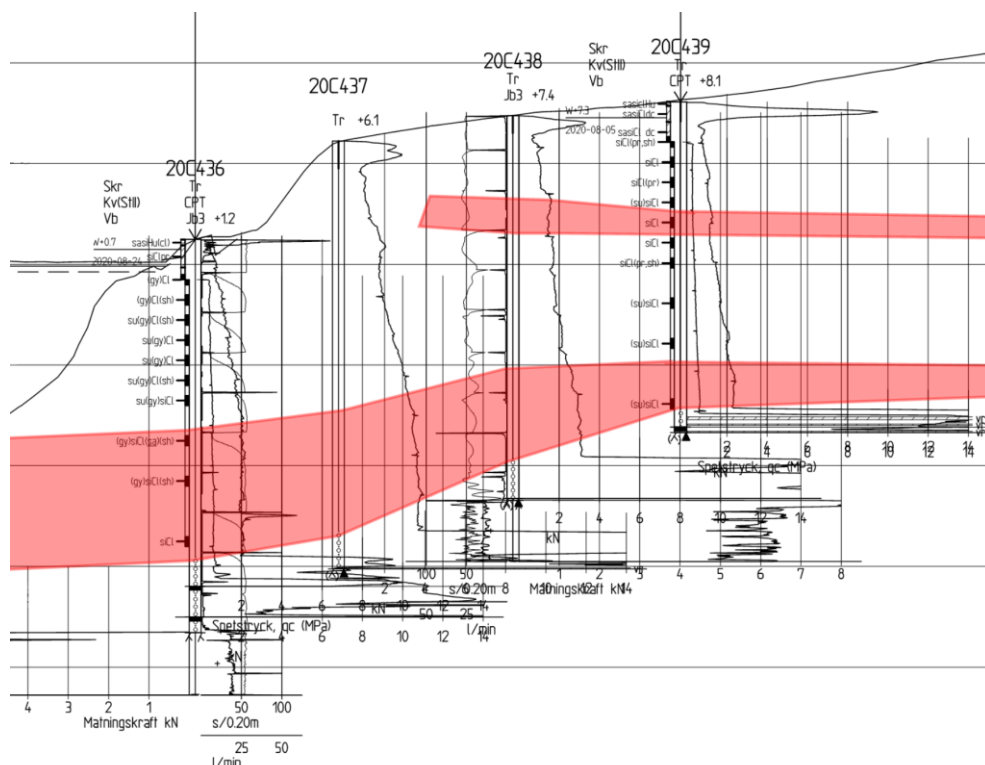
Kvicklera förutsätts antas i hela södra delområdet. Bedömd utbredning av kvicklera mot djupet redovisas i Figur 15 till Figur 17. Kvicklerans utbredning i plan och djupled medför att det finns förutsättningar för bakåtgripande skred.



Figur 15 Översiktsskild över delområde söder, område med förekomst av kvickler markerat med rött område.



Figur 16 Illustration över bedömd utbredning av kvicklera mot djupet, där området med kvicklera markeras med röd yta. Sektionen redovisas i förställd skala.



Figur 17 Illustration över bedömd utbredning av kvicklera mot djupet, där området med kvicklera markeras med röd yta. Sektionen redovisas i förställd skala.

7.3 Hydrogeologiska förhållanden

Sammanställda diagram med mätningar från installerade porttrycksspetsar och grundvattenrör kan ses i Bilaga 4. För sektionsritningar för nu utförda undersökningspunkter hänvisas till Bilaga 10 i MUR Geoteknik enligt kap 3.1.

7.3.1 Delområde norr

Hydrogeologiska undersökningar har vid nu och tidigare utförda geotekniska undersökningar utförts i tre undersökningspunkter; NV00144A, U04048 och 20C409.

I punkt NV00144A (markyta +2,3) har tidigare en porttrycksspets installerats på 8,2 m under befintlig markyta. Mätningar av porttrycket utfördes under 2008 och 2009 och visar på en porttrycksnivå i leran, som motsvarar en fri grundvattenyta ca 0,8–1,2 m under befintlig markyta vilken motsvarar nivå +1,5 till +1,1.

I punkt U04048 (markyta nivå +3,8) har tidigare en porttrycksspets installerats på 4,6 m under befintlig markyta. Mätningar av porttrycket utfördes under 2010 och visar på en porttrycksnivå i leran som motsvarar en fri grundvattenyta mellan 1,2 m under markytan till 0,2 m över markytan vilket motsvarar nivå +3,0 till +4,0. Ett grundvattenrör installerades i friktionsjorden under leran på 5,1 m under befintlig markyta. Mätningar utfördes under 2010 och visar på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri vattenyta från 0 till 0,7 m över markytan, vilket motsvarar nivån +3,8 till 4,5. Porttrycksfördelningen mot djupet är således artesisk.

I punkt 20C409 (markyta nivå +2,3) har två porttrycksspetsar installerats på 2 nivåer i lerlagret, på 3 och 4,5 m djup under befintlig markyta. Porttrycksspetsarna har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under perioden juli år 2020 till januari år 2021. Mätningarna visar på en porttrycksnivå i leran, som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 0,8 och 1,6 m under befintlig markyta, vilket motsvarar nivå +0,6 till +1,4. I samma punkt har ett grundvattenrör installerats i friktionsjorden under leran på 6,5 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts vid fem tillfällen under perioden augusti 2020 till januari 2021 och visar på en trycknivå i friktionsjorden, som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 1,2 och 1,6 m under markytan vilket motsvarar nivå +0,7 till +1,1. Porttrycksfördelningen mot djupet är hydrostatisk, se bilagor enligt ovan.

7.3.2 Delområde söder

Hydrogeologiska undersökningar har vid nu och tidigare utförda geotekniska undersökningar utförts i sju undersökningspunkter; 19WS17, U04044, 20C426, 20C430, 20C433, 20C436 och 20C439.

I punkt 19WS17 (markyta nivå +1,0) har tidigare porttrycksspetsar installerats på tre nivåer i lerlagret på 3, 7 och 11,5 m djup under markytan. Mätningar av porttrycket har utförts mellan december 2019 och januari 2021. Mätningarna

visar på en porttrycksnivå i leran som motsvarar en fri grundvattenyta ca 0,2 m under markytan till 3,6 m över markytan vilket motsvarar nivå +0,6 till +4,7. Porttrycksfördelningen mot djupet i leran är således oftast artesisk.

I punkt U04044 (markyta nivå +2,2) installerades porttrycksspetsar på tre nivåer i lerlagret på 3, 7 och 16 m djup under befintlig markyta. Mätningar utfördes under 2010. Mätningarna visar på en porttrycksnivå i leran, som motsvarar en fri vattenyta mellan ca 0,7 m under markytan till 1,6 m över vattenytan, vilket motsvarar nivå mellan +1,5 och +3,8. Ett grundvattenrör har installerats under leran i friktionsjorden på 19,1 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts åtta gånger mellan juni till oktober 2010 och visar på en trycknivå i friktionsjorden som motsvarar en fri grundvattenyta mellan 1,4 och 1,9 m över befintlig markyta, vilket motsvarar en nivå på mellan +3,6 och +4,1. Porttrycksfördelningen mot djupet i leran är således oftast artesisk.

I punkt 20C426 (markyta nivå +1,4) har porttrycksspetsar installerats på två nivåer i lerlagret på 5 och 10 m djup under befintlig markyta. Porttrycksspetsarna har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under perioden juli 2020 till januari år 2021. Mätningar visar på en porttrycksnivå som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 0,1 m under markytan och 1,1 m över den befintliga markytan, vilken motsvarar en nivå mellan +1,4 och +2,5. Ett grundvattenrör har installerats under leran i friktionsjorden på 11,6 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts fem gånger under perioden augusti 2020 till januari 2021 och visar på en trycknivå som motsvarar en fri grundvattenyta på ca 0,8 m över den befintliga markytan vilket motsvarar nivå +2,2. Porttrycksfördelningen mot djupet i leran är således artesisk.

I punkt 20C430 (markyta nivå +1,3) har porttrycksspetsar installerats på tre nivåer i lerlagret på 5, 10 och 13,5 m djup under befintlig markyta. Porttrycksspetsarna har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under perioden juli 2020 till januari 2021. Mätningar visar på en porttrycksnivå som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 0,2 och 2,1 m över den befintliga markytan, vilken motsvarar en nivå mellan +1,5 och +3,4. Ett grundvattenrör har installerats under leran i friktionsjorden på 19 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts fem gånger under perioden augusti 2020 till januari 2021 och visar på en trycknivå som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 0,7 och 1,2 m över den befintliga markytan vilket motsvarar nivå mellan +2,0 och +2,5. Porttrycksfördelningen mot djupet i leran är artesisk.

I punkt 20C433 (markyta nivå +7,6) har ett grundvattenrör installerats under leran i friktionsjorden på 17,8 m djup under befintlig markyta. Undersökningspunkten ligger uppe i slänten, ca 50 m från Göta älv. Mätningar har utförts fyra gånger under perioden augusti 2020 till januari 2021 och visar på en trycknivå som motsvarar en fri grundvattenyta mellan 5 och 5,5 m under den befintliga markytan vilket motsvarar nivå mellan +2,1 och 2,6. Grundvattenytan har en lägre trycknivå jämfört med grundvattenrör och porttrycksspetsar installerade närmre Göta älv. Uppmätta värden tyder på en avsänkning mot djupet.

I punkt 20C436 (markyta nivå +1,2) har porttrycksspetsar installerats på tre nivåer i lerlagret på 5, 10 och 15 m djup under befintlig markyta. Porttrycksspetsarna har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under perioden juli 2020 till januari år 2021. Mätningar visar på en porttrycksnivå som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 0,7 och 2,3 m över den befintliga markytan, vilken motsvarar en nivå mellan 2,0 och +3,6. Ett grundvattenrör har installerats under leran i friktionsjorden på 18 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts fyra gånger under perioden augusti till december 2020 och visar på en trycknivå som motsvarar en fri grundvattenyta på mellan 0,6 och 0,9 m över den befintliga markytan vilket motsvarar nivå mellan +1,8 och +2,1. Porttrycksfördelningen mot djupet i leran är således artesisk.

I punkt 20C439 (markyta nivå +8,1) har porttrycksspetsar installerats på tre nivåer i lerlagret på 5, 10 och 15 m djup under befintlig markyta. Undersökningspunkten ligger uppe i slänten, ca 60 m från Göta älv. Porttrycksspetsarna har loggat värden en gång per dygn och stabiliserade värden har uppmätts under perioden juli 2020 till januari 2021. Mätningar i porttrycksspetsarna installerade på 5 och 10 m djup under markytan visar på en porttrycksnivå som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 0,7 och 2,2 m under markytan, vilken motsvarar en nivå mellan +2,0 och +5,9. Mätningar i porttrycksspetsen installerad på 15 m djup under markytan visar på en porttrycksnivå som motsvarar en fri grundvattenyta mellan ca 5,3 och 6,1 m under markytan, vilken motsvarar en nivå mellan +2,0 och +2,8. Ett grundvattenrör har installerats under leran i friktionsjorden på 16,5 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts fem gånger under perioden augusti 2020 till januari 2021 och visar på en trycknivå som motsvarar en fri grundvattenyta på mellan 5,5 och 6,1 m under den befintliga markytan vilket motsvarar nivå mellan +2,0 och +2,6. Avlästa porttrycksnivåer och grundvattenyta visar på en avsänkning mot djupet beräknat mot djup under markytan. Porttrycksmätare installerad på 15 m under markytan och grundvattenröret visar dock på trycknivåer och grundvattenyta som sammanfaller med avläsningar från grundvattenrör och porttrycksspetsar installerade närmre Göta älv.

8 Valda beräkningsparametrar

I nedanstående beskrivning och för denna stabilitetsutredning delas utredningsområdet in i två delområden på ömse sidor om ett fastmarksparti, se Figur 3. För respektive delområde sammanställs valda materialparametrar tillsammans med en övergripande beskrivning av motiv till valda värden. För en fördjupad beskrivning till motiv till valda materialparametrar inom det södra delområdet hänvisas till PM Val av Jordmodell, se Bilaga 6.

8.1 Jordmaterialparametrar

Valda karakteristiska och dimensionerande materialparametrar för jordens hållfasthetsegenskaper och tunghet för respektive delområde framgår av Tabell 2 och Tabell 3 nedan. Valda parametrar för lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet och densitet redovisas även i Bilaga 1 och Bilaga 3, valda värden för friktionsjorden redovisas i Bilaga 2, se även bilageförteckning.

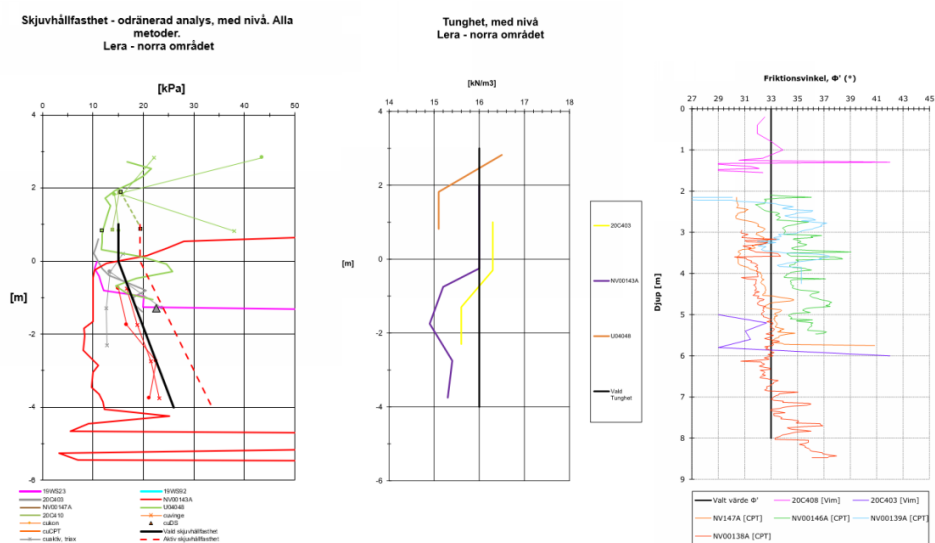
Lerans dränerade skjuvhållfasthet har uppskattats empiriskt med kohesionsintercepten $c'_k = 0,1 \cdot c_{uk}$ och $\Phi'_k = 30^\circ$, se kapitel 6.

8.1.1 Delområde norr

Utvärderade materialparametrar i det norra delområdet visar på viss spridning gällande grundparametrar. Området har relativt små lermäktigheter varav närhet till friktionsjord bedöms påverka materialparametrarna. Valda värden redovisas i Tabell 2 och diagram över skjuvhållfasthet, tunghet och friktionsvinkel mot nivå redovisas i Figur 18, samt Bilaga 1–3.

Utvärderad skjuvhållfasthet från CPT-sonderingen i undersökningspunkt NV00143A skiljer sig kraftigt mot resultaten från vingförsök och konförsök i samma undersökningspunkt samt mot övriga undersökningspunkter i området. Det är svårt att avgöra varför utvärderad skjuvhållfasthet skiljer sig så mycket åt i CPT-sonderingen. Tyvärr saknas viktiga kalibreringsdata varav CPT-sonderingens Conrad-utvärdering inte kan säkerställas. Vid val av skjuvhållfasthet har störst vikt lagts på utförda laboratorieundersökningar.

Densiteten i det norra området har en relativt stor spridning. I samband med stabilitetsberäkningarna har ett värde valts som bedöms vara på säkra sidan.



Figur 18 Diagram över valda värden för det norra området för skjuvhållfasthet, tunghet och friktionsvinkel, för tydligare diagram se Bilaga 1–3.

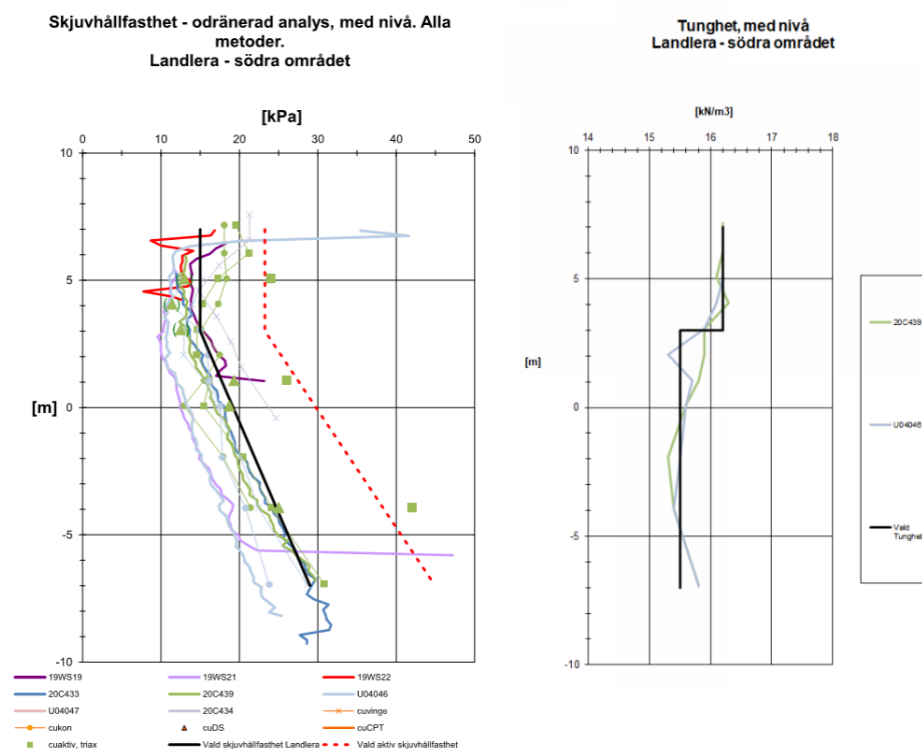
Tabell 2 Karakteristiska och dimensionerande materialparametrar

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter	Dimensionerande parameter
Varierar	Torrskorpelera	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 7 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 30 \text{ kPa}$ $c'_k = 3 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 7 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 20 \text{ kPa}$ $c'_d = 2,3 \text{ kPa}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Varierar	Silt	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_k = 33^\circ$	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_d = 26,5^\circ$
Från +5 till +0,25	Lera 1	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 15 \text{ kPa}$ $c'_k = 1,5 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 10 \text{ kPa}$ $c'_d = 1,2 \text{ kPa}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
+0,25 till ca -9	Lera 2	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 15 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 2,8 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 1,5 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,28 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 10 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 1,9 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 1,2 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,22 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Ca -1,0 till ca -11	Älvlera 1	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 3 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 5,4 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 0,3 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,54 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 1,5 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 3,6 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 0,23 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,42 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Från -7	Älvlera 2	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 3 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 5,4 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 0,3 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,54 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 1,5 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 3,6 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 0,23 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,42 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Varierar	Friktionsjord	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_k = 35^\circ$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_d = 28,3^\circ$

8.1.2 Delområde söder

Utvärderade materialparametrar i det södra delområdet visar på en viss spridning gällande grundparametrar med förutsättning att området delas upp i landlera och strandnära lera. Valda värden redovisas i Tabell 3 och diagram över skjuvhållfasthet, tunghet och friktionsvinkel redovisas i Figur 19 och Figur 20, samt Bilaga 1–3. För en fördjupad beskrivning till motiv till valda materialparametrar hänvisas till PM Val av Jordmodell, se Bilaga 6.

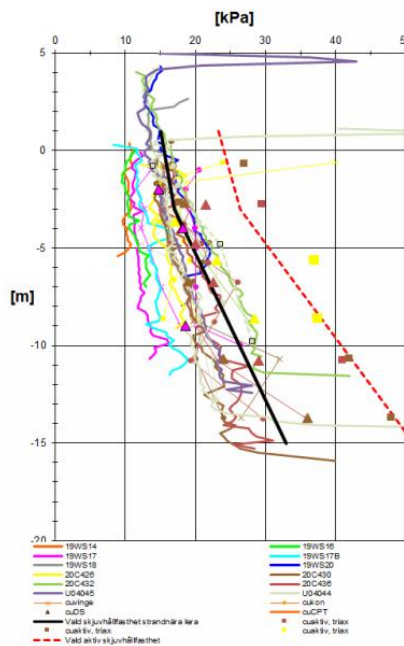
Med hänsyn till CRS-försökens provkvalitet, kurvornas utseende för de direkta skjuvförsöken samt att resultatet ligger under konförsökets bedöms resultaten för undersökningspunkt 20C439 på nivå +5, +4 och +3 ej vara tillförlitliga och har vid val av skjuvhållfasthet satts inom parentes, se Figur 19.



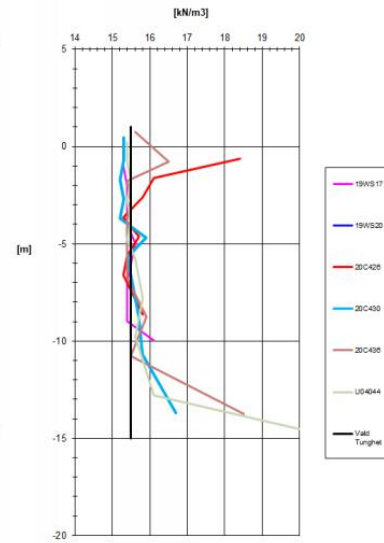
Figur 19 Diagram över valda värden för landlera i det södra området för skjuvhållfasthet och tunghet, för tydligare diagram se Bilaga 1–3.

Med hänsyn till CRS-försökens provkvalitet, kurvornas utseende för de direkta skjuvförsöken samt att resultatet ligger under konförsökets bedöms resultaten, för undersökningspunkt 20C430 på nivå -7, undersökningspunkt 20C436 på nivå -5 och undersökningspunkt 19WS17 samtliga nivåer ej vara tillförlitliga, se Figur 20.

Skjuvhållfasthet - odränerad analys, med nivå. Alla metoder.
Strandnära lera - södra området



Tunghet, med nivå
Strandnära lera - södra området



Figur 20 Diagram över valda värden för strandlera i det södra området för skjuvhållfasthet och tunghet, för tydligare diagram se Bilaga 1–3.

Tabell 3 Karakteristiska och dimensionerande materialparametrar

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter	Dimensionerande parameter
Varierar	Erosionsskydd/ Tryckbank av sprängsten	$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_k = 45^\circ$	$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_d = 37,6^\circ$
Varierar	Torrskorpelera	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 7 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 30 \text{ kPa}$ $c'_k = 3 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 7 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 20 \text{ kPa}$ $c'_d = 2,3 \text{ kPa}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Från ca +10 till +3	Landlera 1	$\gamma = 16,2 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 15 \text{ kPa}$ $c'_k = 1,5 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16,2 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 10 \text{ kPa}$ $c'_d = 1,2 \text{ kPa}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$

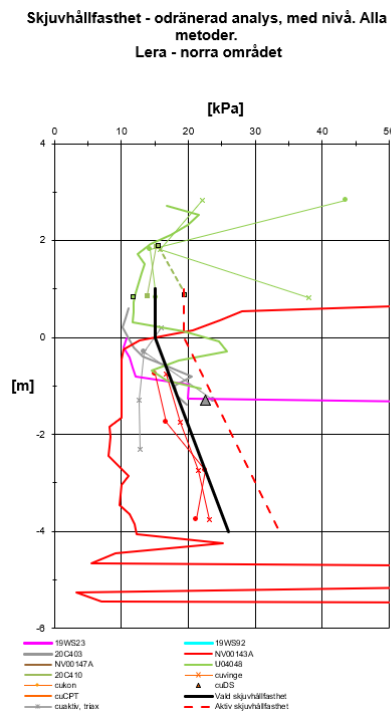
Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter	Dimensionerande parameter
Från +3 till ca -18	Landlera 2	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 15 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 1,4 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 1,5 \text{ kPa}$, $\Delta c'_k = 0,14 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 10 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 0,93 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 1,2 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,11 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Från ca +5 till -3	Strandlera 1	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 15 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 0,5 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 1,5 \text{ kPa}$, $\Delta c'_k = 0,05 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 10 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 0,33 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 1,2 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,04 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Från -3 till ca -22	Strandlera 2	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 1,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 17 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 1,3 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 1,7 \text{ kPa}$, $\Delta c'_k = 0,13 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 11,3 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 0,87 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 1,3 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,1 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Ca -1,0 till ca -15	Älvlera 1	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 3 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 3,6 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 0,3 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,36 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 1,5 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 2,4 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 0,23 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,28 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Från -10,5	Älvlera 2	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 3 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 3,6 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 0,3 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,36 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 1,5 \text{ kPa}$ $\Delta c_{ud} = 2,4 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 0,23 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,28 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Varierar	Friktionsjord	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_k = 35^\circ$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_d = 28,3^\circ$

8.1.3 Anisotropifunktion

Inom det norra delområdet har inga triaxialförsök utförts.

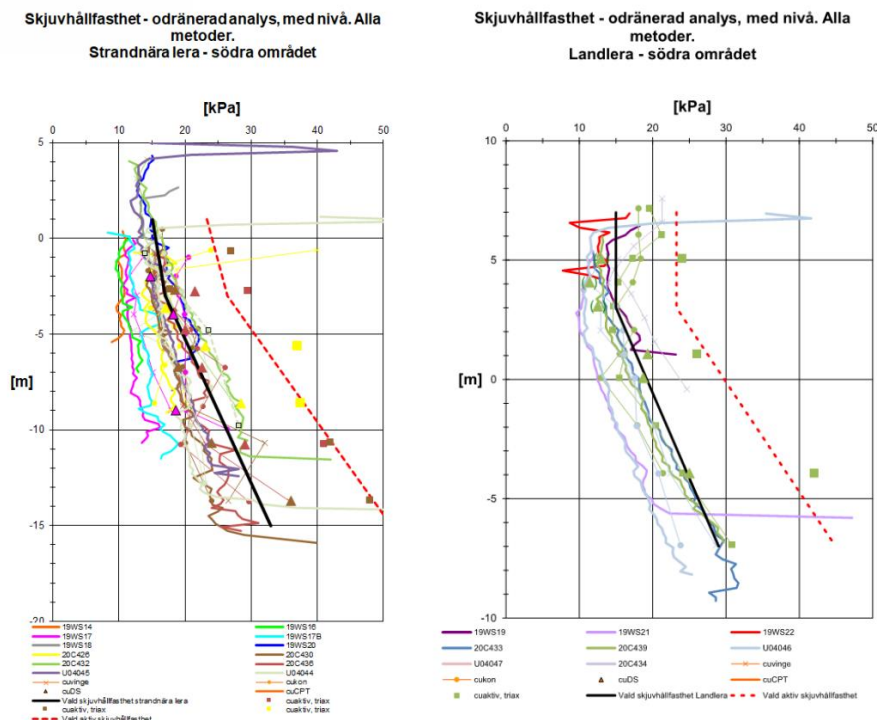
Viljordstryckskoefficienten (K_0) har empiriskt beräknats med konflytgräns till 0,6–0,7. Vid stabilitetsberäkningar har ett försiktigt värde på $K_0 = 0,7$ valts.

Aktiv skjuvhållfasthet har bedömts från K_0 och kvoten mellan aktiv och direkt skjuvhållfasthet. Ett $K_0 = 0,7$ motsvarar en kvot $CuA/CuD = 1,3$. I Figur 21 nedan samt Bilaga 1 redovisas bedömt värde för den aktiva skjuvhållfastheten med röd streckad linje för $K_0 = 0,7$. För befintliga förhållanden är säkerheten mot brott tillfredställande även utan nyttjande av anisotropi.



Figur 21 Bedömd aktiv skjuvhållfasthet i delområde norr, aktiv skjuvhållfasthet redovisas med röd streckad linje

Inom det södra delområdet har triaxialförsök utförts och utifrån förhållandet mellan vald direkt skjuvhållfasthet och vald aktiv skjuvhållfasthet har viljordstryckskoefficienten (K_0) beräknats till 0,53. I Figur 22 nedan samt Bilaga 1 redovisas valda värden för den aktiva skjuvhållfastheten där kvoten $CuA/CuD=1,55$, valt värde redovisas med röd streckad linje. Vald direkt- respektive vald aktiv skjuvhållfasthet framgår av Bilaga 1.



Figur 22 Vald aktiv skjuvhållfasthet i delområde söder valt värde redovisas med röd streckad linje.

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 undersökningspunkter. Vald portrycksfördelning redovisas i Bilaga 4, se bilageförteckning.

Valt portryck för det norra området har valts utifrån grundvattenröret i beräknad sektion samt närmsta portrycksstation. Värdet har valts över maxvärdet för att ta hänsyn till portrycksstationen längre bort från beräknad sektion.

8.3 Vattenstånd i älven

Göta älv är reglerad och slussar finns uppströms Ivarslund. SGI har angivit att sänkingshöjd nedströms ska interpoleras mellan slussen och Älvängen, från nedströms Lilla Edet till Älvängen se Tabell 4. Vidare har SGI angivit att en vattenyta motsvarande sänkingshöjden på nivå -0,1 ska användas i stabilitetsberäkningarna.

Tabell 4 Vattenstånd Göta älv, Nedströms Lille Edets sluss ska nivåerna interpoleras.

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

9 Käslighetsanalys

Käslighetsanalys har utförts för att säkerställa stabilitetsutredningens robusthet och undersöka sårbarheten för förändring av områdets portrycksförhållanden samt förändrad geometri till följd av erosion, och variationer i skjuvhållfasthet. Samtliga käslighetsanalyser beräknas med anisotropi.

9.1 Förändring av portrycksförhållanden

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

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

Gällande långtidsperspektivet och framtida klimatförändringar ses främst längre perioder av torka eller plötsliga skyfall som möjliga företeelser. På västkusten förväntas en 30% ökning av nederbörds mängderna. Vid långa perioder av torka 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 sänkningshöjd. Detta värsta scenario har beaktats i stabilitetsberäkningarna i samband med käslighetsanalysen.

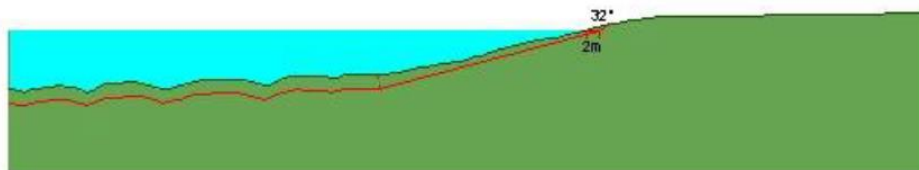
9.2 Förändrad geometri till följd av erosion

Käslighetsanalys har utförts med hänsyn till förändrad geometri av Göta älvs botten på grund av erosion till följd av strömmande vatten eller fartygstrafik. Käslighetsanalysen har utförts genom att befintlig älvbotten har sänkts med 1 och 2 m enligt typsektioner framtagna och tillhandahållna av beställaren, SGI. Det har antagits att ingen erosion sker ovanför Göta älvs dämningshöjd.

För Ivarslund tillämpas typsektioner för slänter utan undervattenshylla med och utan erosionsskydd i vattenbrynet, se Figur 23 och Figur 24.



Figur 23 Typsektion för slänt utan undervattenshylla med erosionsskydd (SGI)



Figur 24 Typsektion för slänt utan undervattenshylla utan erosionsskydd (SGI)

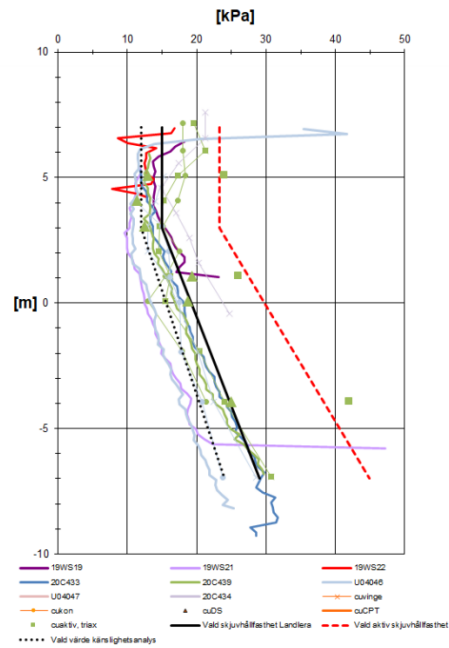
9.3 Reducering av skjuvhållfasthet

Vid sammanställning av härledda värden i det södra delområdet och strandnära lera visade CPTU-sonderingar och vingförsök i undersökningspunkterna 19WS14, 19WS15, 19WS16, 19WS17 och 19WS17B på lägre skjuvhållfasthet än i övriga undersökningspunkter. En känslighetsanalys har utförts för sektionerna i det södra området. Skjuvhållfastheten för lera har i dessa sektioner valts enligt Tabell 5.

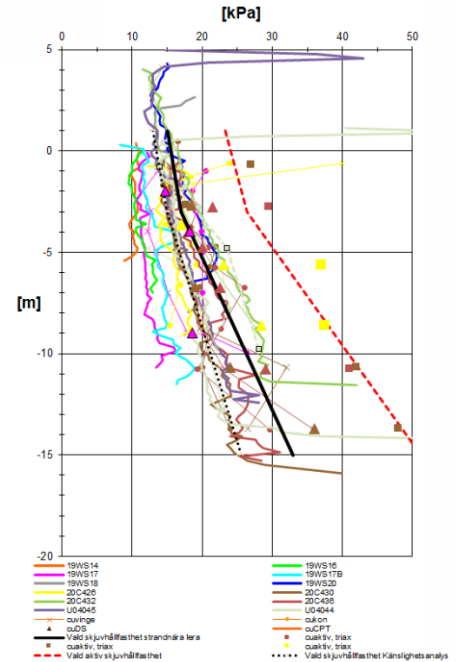
Direkta skjuvförsök i undersökningspunkt 20C439 på nivå +5, +4 och +3 bedöms ej vara tillförlitliga och har vid val av skjuvhållfasthet satts inom parentes. Känslighetsanalys har dock utförts för ländra i det södra delområdet med ansatsen att resultaten från de direkta skjuvförsöken i undersökningspunkt 20C439 är korrekta.

För en översikt över valda värden för känslighetsanalysen se svart prickad linje i Figur 25 samt Bilaga 1. För utförligare förklaring till valda värden se Bilaga 6.

**Skjuvhållfasthet - odränerad analys, med nivå. Alla metoder.
Landlera - södra området**



**Skjuvhållfasthet - odränerad analys, med nivå. Alla metoder.
Strandnära lera - södra området**



Figur 25 Valda värden för känslighetsanalysen visas med svart prickad linje.

Tabell 5 Känslighetsanalys reducerad skjuvhållfasthet

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter
Från ca +10 till +3	Landlera 1 Känslighetsanalys (I beräkningar Landlera 3)	$\gamma = 16,2 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 12 \text{ kPa}$ $c'_k = 1,2 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$
Från +3 till ca -18	Landlera 2 Känslighetsanalys (I beräkningar Landlera 4)	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 12 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 1,2 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 1,2 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,12 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$
Från ca +5 till -3	Strandlera 1 Känslighetsanalys (I beräkningar Strandlera 3)	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 5,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 13 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 0,5 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 1,3 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,05 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter
Från -3 till ca -22	Strandlera 2 Känslighetsanalys (I beräkningar Strandlera 4)	$\gamma = 15,5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 1,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 15 \text{ kPa}$ $\Delta c_{uk} = 0,88 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 1,5 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,088 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$

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 hållfasthetsparametrar.

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 och att utfyllda massor kan innebära erosions uppströms eller nedströms från tryckbanken/erosionsskyddet.

10.2 Avschaktning

Avschaktning innebär att befintliga jordmassor schaktas bort på 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 ofta ett större ingrepp i naturmiljön med röjning av vegetation. Avschaktning under vatten kan leda till grumling.

10.3 Kalkcementpelare

Kalkcementpelare innebär att områdets sammanlagda hållfasthetsparametrar höjs genom att pelare installeras där kalk och cement blandas med befintlig lera.

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.

11 Gynnsamma och 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 6.

Tabell 6 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 Kvicklera
Släntens beständighet	Fungerande erosionsskydd i hela området. Djup och mäktighet okänd, beräkningar utförda utan erosionsskydd. Göta älv är reglerad	
Släntens geometri	Markytans geometri är hämtad utifrån höjddata tillsammans med avvägda sektioner Göta älvs botten är lodad, batymetri	

Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Fältundersökningens innehåll och omfattning	Tätt mellan undersökningspunkter CPTU-R sonderingar är utförda Kvalificerade undersökningar (CPTU-sondering, vingförsök och ostörd provtagning) har utförts.	
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	Homogen jord, inga sammanhängande skikt	Jordlagerföljden består av lera Förekomst av kvicklera Osäkerheter i bestämning av skjuvhållfasthet för en del av det södra delområdet.
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	

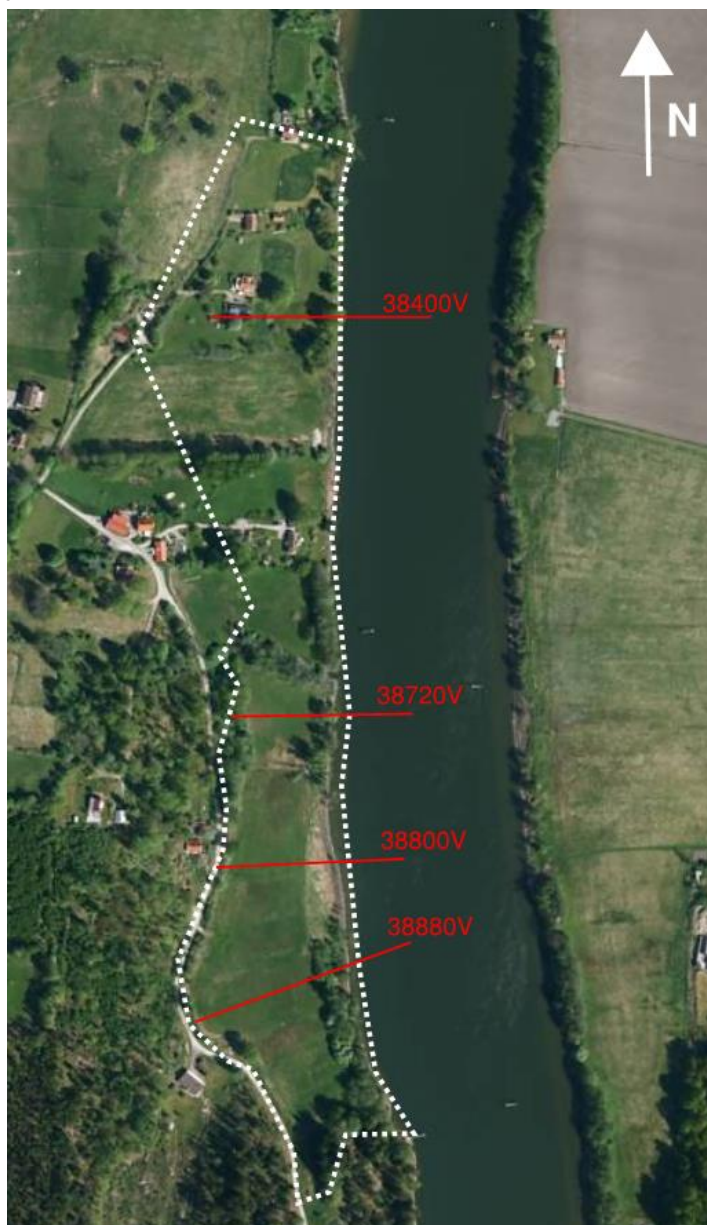
Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Analys- och beräkningsarbetets tillförlitlighet	Stort antal beräknade glidytor Känslighetsanalys utförd Glidytans läge i plan är vald i den farligaste delen av slänten ur stabilitetssynpunkt Tvådimensionell analys	

Förutsättningarna bedöms till övervägande del vara gynnsamma, men det finns kvicklera inom området och därmed finns det risk för bakåtgripande skred med stor omgivningspåverkan.

12 Beräkningar och resultat

Säkerheten mot stabilitetsbrott har kontrollerats i en sektion inom det norra delområdet, i km 38/400V, enligt älvens längdmätning, och i tre sektioner i det södra delområdet, km 38/720V, km 38/800V samt km 38/880V, enligt älvens längdmätning. Beräkningssektionernas läge och utbredning i plan framgår av Figur 26 nedan. Samtliga sektioner följer samma namngivning och numrering. Det betyder att vissa beräkningsnummer saknas för att stämma överens med övriga sektioner, exempelvis beräknas Känslighetsanalys med förhöjt portryck och 2 m bottenerosion som Känslighetsanalys 4 i samtliga sektioner, trots att känslighetsanalys 2 och 3 inte utförts i alla sektioner.

Resultaten från stabilitetsanalysen redovisas uppdelat mellan totalsäkerhetsmetoden och partialsäkerhetsmetoden. Resultaten redovisas för respektive sektion i delområde norr och söder. Under respektive resultattabell ges kommentarer till beräkningsresultaten.



Figur 26 Redovisning av beräkningssektionernas läge och utbredning i plan

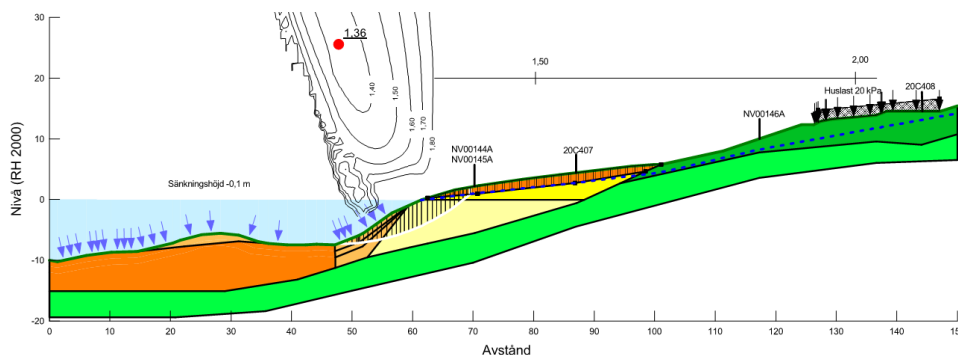
12.1 Totalsäkerhetsmetoden

I Tabell 7 – Tabell 10 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. Beräkningsresultaten redovisas även i Bilaga 5, se bilageförteckning.

För samtliga sektioner redovisas en figur från beräkningarna, i underliggande tabell är aktuell beräkning **understruken och fetmarkerad**.

12.1.1 Sektion 38/400V

Kritiska glidytor i sektion 38/400V är övergripande relativt små och i direkt anslutning till Göta älv. I Figur 27 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 27 Sektion 38/400V delområde norr. Befintliga förhållanden, kombinerad analys, med anisotropi.

Tabell 7 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 38/400 delområde norr, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,4$ och $F_{komb.} \geq 1,3$

Sektion km 38/400V, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,75	1,36	5:1-3
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	1,83	1,36	5:4-6
Känslighetsanalys: Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	1,18	5:7-8
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 1 m Beräkning med anisotropi	1,76	1,25	5:9-11
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Beräkning med anisotropi	1,66	1,17	5:12-14
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	1,04	5:15-16

Beräkningsresultaten för sektion 38/400V visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys. Vidare visar resultaten för kombinerad analys att anisotropi inte har någon nämnvärd effekt på beräknad säkerhetsfaktor för den kritiska glidyten, vilket bedöms bero på att glidyten följer lerans underkant vars lutning är relativt flack samt att det är de dränerade parametrarna som är dimensionerande.

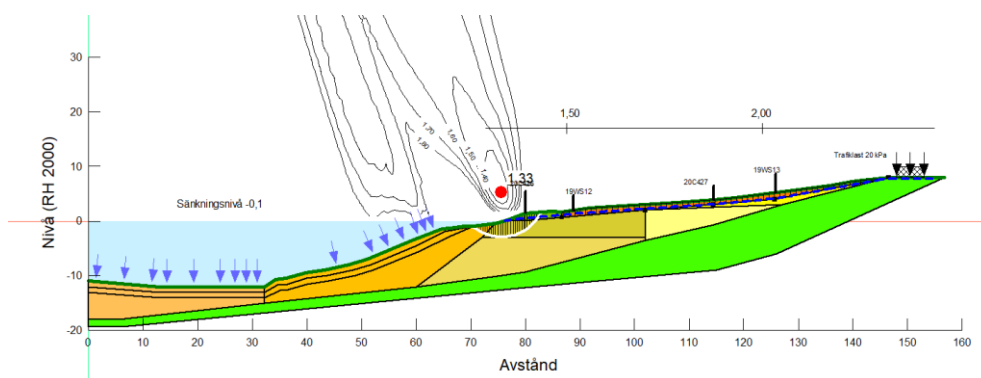
Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottennivån i älven sänks med 1 respektive 2 m på grund av erosion visar att erforderlig säkerhetsfaktor ej längre uppfylls för kombinerad analys.

Känslighetsanalyserna visar att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott är känslig för bottenerosion. Sannolikheten för att älvbotten ska sänkas med 1–2 m på grund av att båttrafik i de grunda vattnen intill aktuell beräkningssektion bedöms som liten, men kan inte uteslutas för en tidsperiod på 80 år fram till år 2100. Det finns även ett befintligt erosionsskydd som förhindrar erosion, utbredningen av erosionsskyddet är okänt och har därför inte använts i beräkningarna.

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

12.1.2 Sektion 38/720V

Kritiska glidytor i sektion 38/720V är övergripande relativt små och i direkt anslutning till Göta älv. I Figur 28 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 28 Sektion 38/720V delområde söder. Befintliga förhållanden, kombinerad analys, med anisotropi.

Tabell 8 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 38/720V delområde söder, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,4$ och $F_{komb.} \geq 1,3$

Sektion km 38/720, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,86	1,33	5:20-22
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	1,96	1,33	5:23-25
Känslighetsanalys: Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	0,92	5:26-27
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 1 m Beräkning med anisotropi	1,93	1,26	5:28-30
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Beräkning med anisotropi	1,92	1,22	5:31-33
Känslighetsanalys: Reducerad skjuvhållfasthet strandnära lera Beräkning med anisotropi	1,74	1,29	5:37-39
Känslighetsanalys: Reducerad skjuvhållfasthet strandnära lera och landlera Beräkning med anisotropi	1,70	1,29	5:34-36
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	0,90	5:40-41

Beräkningsresultaten för sektion 38/720V visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden både med och utan anisotropi. För sektion 38/720V är den kombinerade analysen dimensionerande då samtliga utförda beräkningar för odränerad analys uppfyller erforderliga krav.

Känslighetsanalysen för förhöjt portryck visar att erforderlig säkerhetsfaktor minskar till under 1,0, vilket teoretiskt sett innebär att slänten går till brott. Känslighetsanalysen visar att portrycksförhållandena har stor påverkan.

Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottennivån i älven sänks med 1 respektive 2 m på grund av erosion visar att erforderlig säkerhetsfaktor ej längre uppfylls för kombinerad analys.

Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottennivån i älven sänks med 2 m på grund av erosion i kombination med förhöjt porttryck visar att säkerhetsfaktorn minskar till under 1,0 för den kombinerade analysen, vilket teoretiskt sett innebär att slänten går till brott.

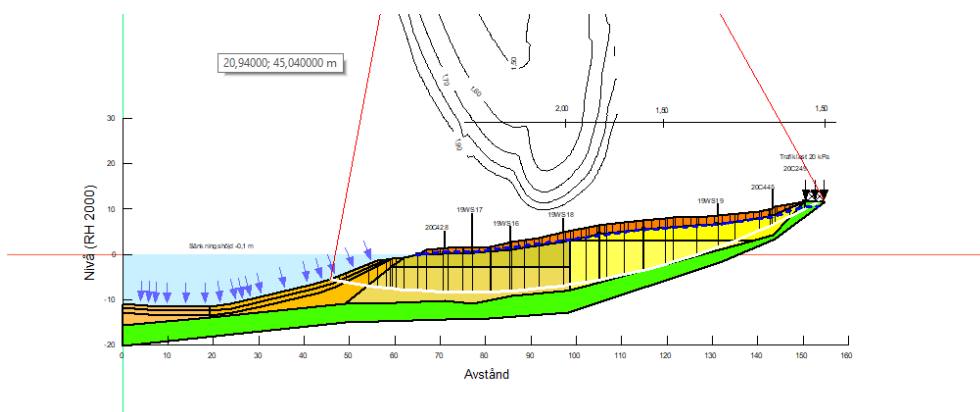
Utförda känslighetsanalyser med reducerad skjuvhållfasthet visar att erforderlig säkerhetsfaktor ej uppfylls för kombinerad analys.

Resultaten för kombinerad analys visar att de kritiska glidyrtorna generellt är ytliga. Det finns ett befintligt erosionsskydd längs med strandlinjen. Utbredningen av erosionsskyddet är okänt och har därför inte använts i beräkningarna.

Som ett konservativt antagande har friktionsjordens överyta i undersökningspunkt 19WS12 inte använts i beräkningarna. Undersökningspunkten ligger ca 20 m norr om beräkningssektionen, och bottenfriktionsjordlagrets överyta i den punkten ligger på ett mindre djup än vad som antagits i beräkningssektionen.

12.1.3 Sektion 38/800V

Kritiska glidytor i sektion 38/800V är övergripande stora och påverkar hela slänten ända bak till fastmarkspartiet. I Figur 29 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 29 Sektion 38/800V delområde söder. Befintliga förhållanden, odränerad analys, med anisotropi.

Tabell 9 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 38/800V delområde söder, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,4$ och $F_{komb.} \geq 1,3$

Sektion km 38/800V, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,31	1,29	5:45-47
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	1,44	1,42	5:48-50
Känslighetsanalys: Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	1,37	5:51-52
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 1 m Beräkning med anisotropi	1,43	1,38	5:53-55
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Beräkning med anisotropi	1,41	1,30	5:56-58
Känslighetsanalys: Reducerad skjuvhållfasthet strandnära lera Beräkning med anisotropi	1,31	1,30	5:59-61
Känslighetsanalys: Reducerad skjuvhållfasthet strandnära lera och landlera Beräkning med anisotropi	1,18	1,18	5:62-64
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	1,18	5:65-66

Beräkningsresultaten för sektion 38/800V visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys med och utan anisotropi och odränerad analys med anisotropi. Erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls ej för odränerad analys utan anisotropi.

*Tabell 10 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 38/880 delområde söder,
rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,4$ och
 $F_{komb.} \geq 1,3$*

Sektion km 38/880V, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,02	1,01	5:70–72
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	1,15	1,13	5:73–74
Känslighetsanalys: Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	1,12	5:76–77
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 1 m Beräkning med anisotropi	1,13	1,11	5:78–80
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Beräkning med anisotropi	1,12	1,08	5:81–83
Känslighetsanalys: Reducerad skjuvhållfasthet strandnära lera Beräkning med anisotropi	0,94	0,92	5:84–86
Känslighetsanalys: Reducerad skjuvhållfasthet strandnära lera och landlera Beräkning med anisotropi	0,93	0,92	5:87–89
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m Höjt portryck med 10 kPa Beräkning med anisotropi	-	0,95	5:90–91
Förstärkt sektion Tryckbank/erosionsskydd i älven med lutning 1:3 samt avschaktning Beräkning med anisotropi	1,40	1,39	5:92–94

Sektion km 38/880V, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Förstärkt sektion Tryckbank/erosionsskydd i älven med lutning 1:3 samt Kalkcementpelare och avschaktning Beräkning med anisotropi	1,63	1,63	5:95-97

Beräkningsresultaten för sektion 38/880V visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ej uppfylls för befintliga förhållanden för både kombinerad och odränerad analys. Vidare visar resultaten att beräkning med anisotropi ökar beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott, dock ej tillräckligt för att uppfylla gällande krav.

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 ej uppfylls för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys.

Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottenivån i älven sänks med 1 m och 2 m på grund av reducerad skjuvhållfasthet samt förhöjt portryck visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ej uppfylls. Vid känslighetsanalyser för reducerad skjuvhållfasthet, samt bottenerosion på 2 m tillsammans med ett förhöjt portryck visar att säkerhetsfaktorn minskar till under 1,0 vilket teoretiskt skulle innebära att slänten går till brott.

Beräkningarna visar att för att uppfylla erforderlig säkerhetsfaktor med totalsäkerhetsanalys kan slänten schaktas av i den pådrivande zonen samt att ett erosionsskydd/tryckbank läggs ut i vattnet.

För att uppfylla erforderlig säkerhetsfaktor med partialkoefficientmetoden visar beräkningarna att slänten i den pådrivande zonen kan schaktas av samt förstärkas med kalkcementpelare. På den mothållande sidan läggs ett erosionsskydd/tryckbank. Förstärkningen är beräknad med totalsäkerhetsmetoden och visar då på en något överförstärkt sektion.

12.2 Partialkoefficientmetoden

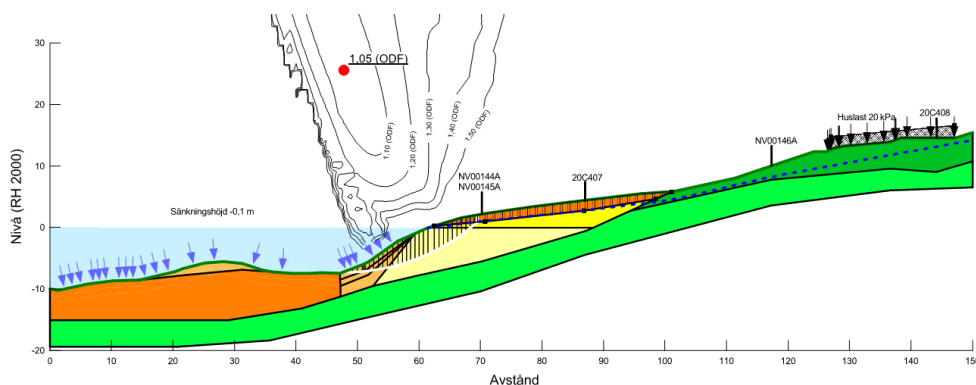
I Tabell 11 – Tabell 14 nedan redovisas resultat för beräkningar med partialkoefficientmetoden. Beräkningar har utförts för befintliga förhållanden. Beräkningsresultaten redovisas även i Bilaga 5, se bilageförteckning.

Resultaten redovisas för respektive sektion i delområde norr och söder. Under respektive resultattabell ges kommentarer till beräkningsresultaten.

I samtliga sektioner finns en figur från beräkningarna, i underliggande tabell är aktuell beräkning **understruken och fetmarkerad**

12.2.1 Sektion 38/400V

Kritiska glidytor i sektion 38/400V är övergripande relativt små och i direkt anslutning till Göta älv. I Figur 31 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 31 Sektion 38/400V delområde norr. Befintliga förhållanden, kombinerad analys, med anisotropi.

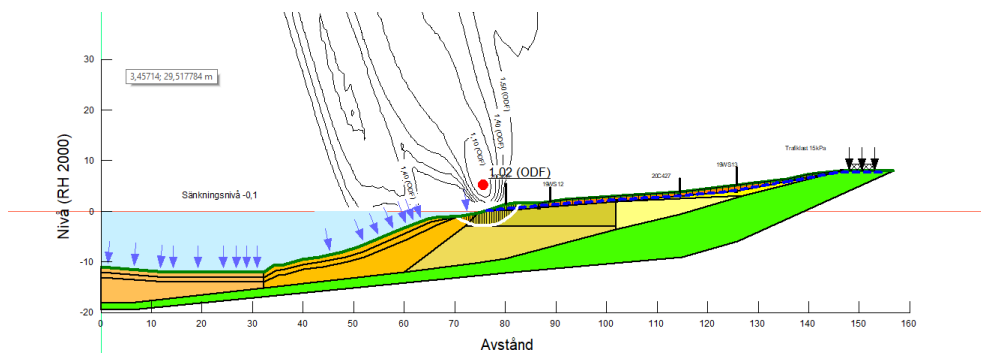
Tabell 11 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion 38/400V delområde norr, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_{EN} \geq 1,1$

Sektion km 38/400V, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,31	<u>1,05</u>	5:17-19
Beräkning med anisotropi			

Beräkningsresultaten med partialkoefficientmetoden visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för odränerad analys, men uppfylls ej för kombinerad analys.

12.2.2 Sektion 38/720V

Kritiska glidytor i sektion 38/720V är övergripande relativt små och i direkt anslutning till Göta älv. I Figur 32 nedan redovisas en representativ glidyta.



Figur 32 Sektion 38/720V delområde söder. Befintliga förhållanden, kombinerad analys, med anisotropi

Tabell 12 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion 38/720V delområde söder, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_{EN} \geq 1,1$

Sektion km 38/720V, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	1,30	1,02	5:42-44
Beräkning med anisotropi			

Beräkningsresultaten med partialkoefficientmetoden visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för odränerad analys, men uppfylls ej för kombinerad analys.

12.2.3 Sektion 38/800V

Kritiska glidytor i sektion 38/800V är övergripande stora och påverkar hela slänten bak till fastmarkspartiet. I Figur 33 nedan redovisas en representativ glidyta.

Tabell 14 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion 38/880V delområde söder,
 rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_{EN} \geq 1,1$

Sektion km 38/880V, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion Beräkning med anisotropi	0,77	0,76	5:98–100
Förstärkt sektion Tryckbank/erosionsskydd i älven med lutning 1:3 samt avschaktning Beräkning med anisotropi	0,94	0,94	5:101–103
Förstärkt sektion Tryckbank/erosionsskydd i älven med lutning 1:3 samt Kalkcementpelare och avschaktning Beräkning med anisotropi	1,12	1,11	5:104–106

Beräkningsresultaten med partialkoefficientmetoden visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ej uppfylls för befintliga förhållanden. Beräkningsresultaten visar att erforderlig säkerhetsfaktor med föreslagen åtgärd med endast avschaktning och tryckbank/erosionsskydd ej är tillräcklig. För att erhålla tillfredställande säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott kan föreslagen åtgärd med tryckbank/erosionsskydd och avschaktning i kombination med kalkcementpelare utföras.

13 Klimatberäkningar

Anläggning av föreslagna åtgärder ger upphov till klimatpåverkan genom utsläpp från transporter, arbetsmaskiner och från framställning av material med mera. För att få en uppfattning om hur stor klimatpåverkan som åtgärden ger upphov till har utsläppen från anläggningsarbetets ingående arbetsmoment uppskattats.

Beräkning av klimatpåverkan har utförts i Trafikverkets webbaserade beräkningsverktyg Klimatkalkyl. Verktöget är utvecklat av Trafikverket för att bedöma storleken på energianvändning och klimatpåverkande utsläpp från byggande, drift och underhåll av infrastruktur. Modellen som används inom verktyget Klimatkalkyl är baserad på metodik för livscykelanalys (LCA) och använder emissionsfaktorer tillsammans med resursschabloner för att beräkna

nyttjande av energi och emissioner av koldioxidekvivalenter (klimatbelastning) från olika byggdelar inom ett projekt. Beräkningarna av klimatpåverkan har utförts i klimatkalkyl version 7.0¹.

Föreslagen åtgärd vid Ivarslund omfattar huvudsakligen en tryckbank samt grundförstärkning med kalk- och cementpelare (kalkcementpelare). Inför grundförstärkningsarbetet sker avschaktning av den aktuella ytan. Framställning av kalkcementpelare är förknippat med relativt stor klimatpåverkan, främst genom CO₂-utsläpp som bildas i kalcineringsprocessen vid framställning av cement. Vidare innebär anläggningsprojekt av den här typen hantering av stora mängder material vilket ger upphov till utsläpp av koldioxid främst genom transportarbete till och från anläggningsplatsen. I Tabell 15 anges vilka poster som använts vid beräkning av klimatpåverkan från åtgärdsförslaget.

Tabell 15 Poster som har använts för beräkning av klimatpåverkan, inklusive mängder och antaget avstånd för transport av material till, respektive från anläggningsplatsen.

Ingående poster i klimatteräkning	Mängder	Antaget avstånd för transport av material
Tryckbank (sprängsten)	14 000 m ³	30 km
Schaktmassor	5 850 m ³	30 km
kalkcementpelare (18 m)	25 300 m ³	-

I

¹ För information om beräkningsmetod för klimatpåverkan hänvisas till Trafikverkets hemsida: <https://www.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/Prognos--och-analysverktyg/Klimatkalkyl/>

Tabell 16 visas beräknad klimatpåverkan från åtgärdsförslaget, vilket uppgår till totalt 3 100 ton CO₂. Som nämnt är utsläppen från användning av kalkcementpelare betydande, här beräknas de till 2 870 ton CO₂ vilket motsvarar hela 92% av de totala utsläppen från åtgärden. Anläggning av tryckbank beräknas medföra 200 ton CO₂ eller 6,5% av utsläppen medan schaktningsarbetet beräknas bidra med, i sammanhanget marginella utsläpp, 40 ton CO₂ (1,3%). Beräknade utsläpp från kalkcementpelare är ett konservativt antagande, då den längsta dimensionen (18 m) av kalkcementpelare har antagits för hela området medan genomsnittslängden för samtliga pelare troligen är kortare. Utsläpp från kalkcementpelare med en genomsnittlig längd på 15 m (volym 21 100 m³) beräknas till 2 385 ton CO₂ vilket skulle medföra 17% lägre klimatpåverkan från kalkcementpelare och cirka 8% lägre klimatpåverkan för projektet i helhet.

Tabell 16 Beräknad klimatpåverkan från geoteknisk åtgärd vid Ivarslund, i ton CO₂-ekvivalenter

	Beräknade utsläpp, ton CO ₂
Tryckbank (sprängsten)	200
Schaktmassor	40
Kalkcementpelare (18 m)	2 870
Utsläpp totalt	3 100

I Tabell 17 visas en mer detaljerad uppdelning av beräknad klimatpåverkan. Här framgår tydligt att det är materialframställningen, i synnerhet av kalkcementpelare, som bidrar med den största klimatpåverkan. Utsläpp från transporter till och från anläggningsplatsen bidrar till 8% av beräknad klimatpåverkan medan utsläpp kopplat till själva anläggningsarbetet, dvs arbetsmaskiner för pålning, schaktning m.m., utgör en mycket liten andel, 3%, av åtgärdens totala klimatpåverkan.

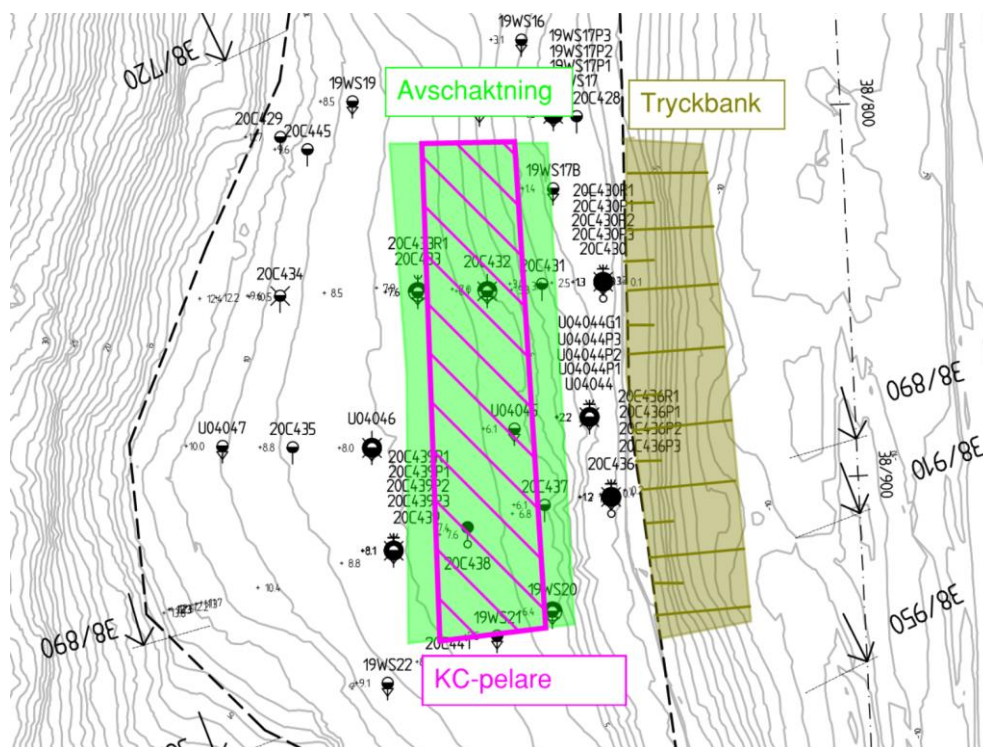
Tabell 17 Beräknad klimatpåverkan, detaljerad uppdelning, i ton CO₂-ekvivalenter

	Utsläpp från material- framställning*	Utsläpp från transport av material	Utsläpp från arbetsmaskiner vid anläggningsplats	Utsläpp totalt
Tryckbank (sprängsten)	100	90	7	200
Schaktmassor	0	34	3	40
Kalkcementpelare (18 m)	2 640	136	92	2 870
Summa utsläpp	2 740	260	102	3100

*Avser utsläpp från framställning av krossmaterial till erosionsskydd

14 Föreslagna åtgärder

För att erhålla tillfredställande säkerhetsfaktor inom det södra delområdet föreslås att undervattensslänten förses med en tryckbank och en avschaktning längre upp i slänten i kombination med installation av kalkcementpelare. I Figur 35 redovisas ungefärlig utbredning av föreslagen åtgärd.



Figur 35 Ungefärlig utbredning av föreslagen åtgärd

Tryckbanken med en lutning på 1:3 eller flackare får även som funktion att utgöra erosionsskydd. På så sett ökas lasten på glidyttans mothållande sida, samtidigt som ytterligare erosion av strandlinjen förhindras.

Tryckbanken bedöms inte påverka farleden i Göta älv då vattendjupet vid sänkningshöjd -0,1 fortfarande är ca 8 m. Tryckbanken går ut ca 20 m, Göta älv är ca 140 m bred och båttrafik förekommer till största delen i mitten av älven.

Med en avschaktning minskas lasten på den pådrivande sidan, avschaktningen har i beräkningarna utförts långa med begränsat djup om 1 m för att åtgärden bättre ska smälta in i landskapet samt att det är enklare att fortsatt använda jordbruksmaskiner inom området jämfört med en djupare schakt.

För att erhålla tillfredställande säkerhetsfaktorer krävs större åtgärder, ovan nämnda förslag i kombination med kalkcementpelare ger mindre synlig påverkan på omgivningen än att endast använda tryckbank och avschaktning. Ytterligare fördel med att ha en lång men grund avschaktning är att det bedöms finnas torrskorpelera kvar som är bättre att utföra arbete på då hållfastheten är högre jämfört med det översta lerlagret.

15 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.

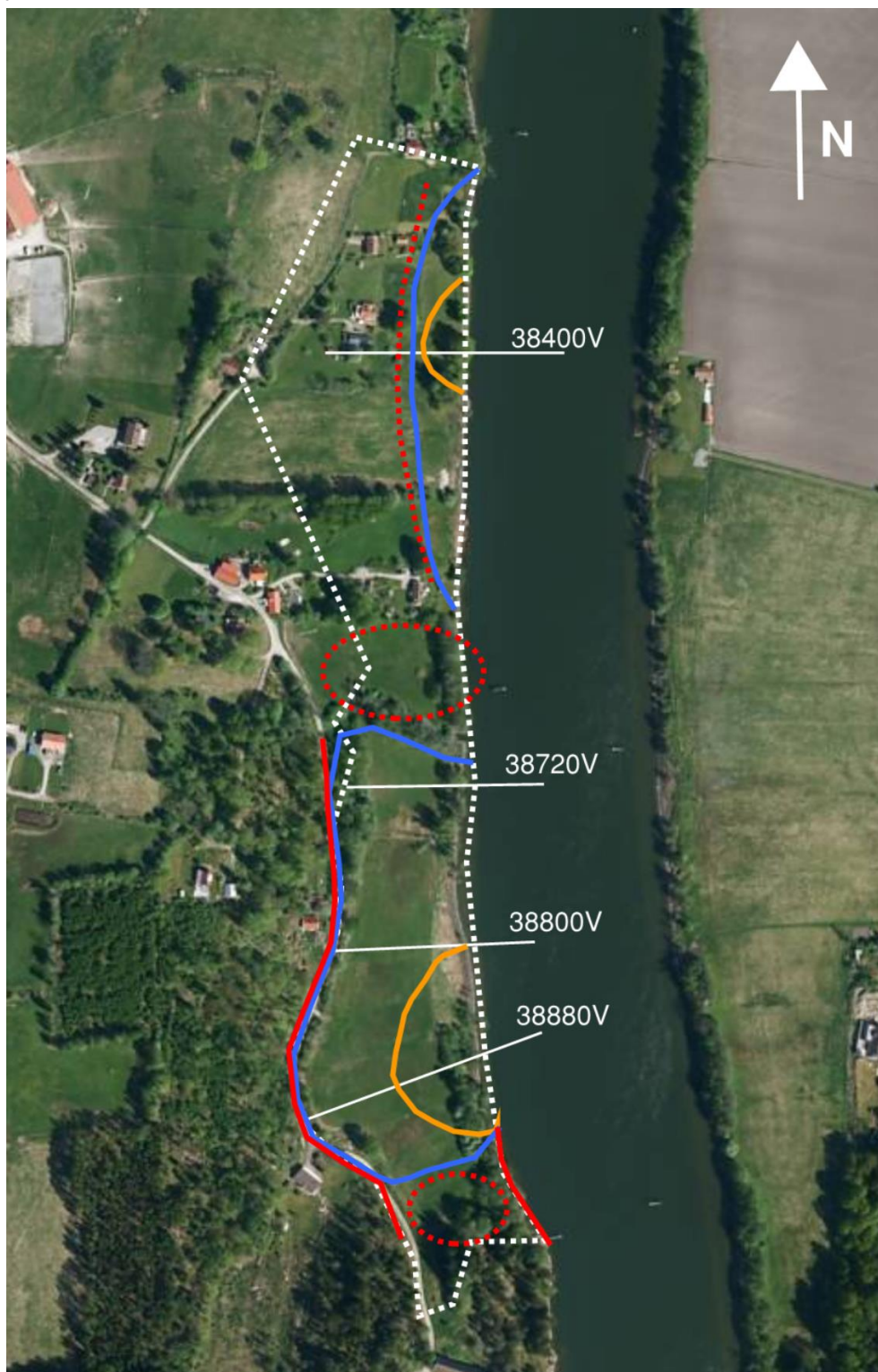
Denna fördjupade stabilitetsutredning visar att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott, för det norra delområdet, ligger över gällande krav för befintliga förhållanden med totalsäkerhetsmetoden. Området är dock känsligt för förändringar av portrycksförhållanden och för erosion av Göta älvs botten. För det norra delområdet föreslås ingen stabilitetshöjande åtgärd.

Denna fördjupade stabilitetsutredning visar att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott, för det södra delområdet, ligger delvis över och delvis under gällande krav och delvis även under det övergripande intervallet² för säkerhetsfaktor i IEG rapport 4:2010. Området är känsligt för förändringar av portrycksförhållanden och för erosion av Göta älvs botten. Föreslagen stabilitetshöjande åtgärd för det södra delområdet är tryckbank/erosionsskydd och avschaktning i kombination med kalkcementpelare för att på så vis öka lasten på glidyttans mothållande sida och minska lasten på den pådrivande sidan, samt höja skjuvhållfastheten i området genom kalkcementpelare.

Innan de stabilitetshöjande åtgärderna detaljprojekteras rekommenderas att SGI, i samband med planerade sannolikhetsberäkningar och skredriskbedömning, värderar erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott eftersom gynnsamma och ogynnsamma förhållanden visar att en lägre säkerhetsfaktor troligtvis skulle kunna nyttjats.

Förekomst av kvicklera och högsensitiv lera innebär att eventuella bakåtgripande skred inte bedöms stanna förrän skredet når fastmark eller berg i dagen. I Figur 36 nedan redovisas översiktligt bedömd primär skredutredning med orange linje och sekundär skredutbredning med blå linje, gränsen för berg med röd linje, och fastmark med röd streckad linje.

² Övergripande intervallet enligt IEG rapport, för en fördjupad utredning, för befintlig bebyggelse och anläggning ska $F_{komb} \geq 1,3-1,2$ och $F_c \geq 1,4-1,3$.



Figur 36 Översiktlig skiss där bedömd primär skredutbredning med orange linje och sekundär skredutbredning med blå linje, gränsen för berg markeras med röd linje och fastmark med röd streckad linje.

För det södra delområdet är kombinerad analys dimensionerande. Inför detaljprojektering av de stabilitetsförbättrande åtgärderna rekommenderas att behov av kompletterande portrycksmätare studeras. Portrycket inom området

varierar och det finns behov av att installera porttrycksstationer längre upp i slänten.

Inför detaljprojektering av de stabilitetsförbättrande åtgärderna rekommenderas även att kompletterande geotekniska fältundersökningar utförs från flötte i Göta älv, för att verifiera jordlagerföljden och materialparametrar, samt inom det södra delområdets norra delar, för att verifiera vald skjuvhållfasthet.

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. När erosionsskyddet är undersökt rekommenderas att stabilitetsförhållandena i undervattensslänten utreds, dvs. att beräkningar utförs för en glidyta från erosionsskyddet i väster mot Göta älvs farled i öster.

Vid detaljprojektering av de stabilitetsförbättrande åtgärderna är det viktigt att de praktiska momenten vid utförande av kalkcementpelare tas i beaktning, så att inga skred sker i samband med installation.

På grund av förekomst av kvicklera och risken för bakåtgripande skred med stor omgivningspåverkan rekommenderas att eventuell detaljprojektering och utförande av stabilitetsförbättrande åtgärder, utförs i Geoteknisk kategori 3 (GK3).