

JANUARI 2021
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

FORSTENA, VÄNERSBORGS KOMMUN

PM GEOTEKNIK DETALJERAD STABILITETSUTREDNING

03150OPM01



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

JANUARI 2021
SGI – DELEGATIONEN FÖR GÖTA ÄLV

FORSTENA, VÄNERSBORGS KOMMUN

PM GEOTEKNIK DETALJERAD STABILITETSUTREDNING

03150OPM01

DIARIENUMMER
1910-0740

UPPDRAGSNUMMER
20070

KONTAKTPERSON SGI
Måns Ryttemäster

PROJEKTNR.
A201067

DOKUMENTNR.
03150OPM01

VERSION	UTGIVNINGSDATUM	BESKRIVNING	UTARBETAD	GRANSKAD	GODKÄND
1.0	2021-01-15	PM Geoteknik detaljerad stabilitetsutredning	Emma Jägryd	Charlotte Junkers	Christina Edström

INNEHÅLL

1	Objekt	8
2	Syfte	8
3	Underlag för utredning	9
3.1	Utförda undersökningar	9
3.2	Övrigt underlag	9
4	Styrande dokument	10
5	Projekteringsanvisningar	10
6	Befintliga förhållanden	12
6.1	Topografi och ytbeskaffenhet	12
6.2	Befintliga konstruktioner	14
7	Geotekniska förhållanden	14
7.1	Jordlagerförhållanden	14
7.2	Utvärdering kvicklera	15
7.3	Hydrogeologiska förhållanden	15
8	Valda beräkningsparametrar	16
8.1	Jordmaterialparametrar	16
8.2	Portrycksmodell	18
8.3	Vattenstånd i älven	18
9	Övriga förutsättningar, stabilitetsanalys	18
9.1	Gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar	18

9.2	Känslighetsanalys	20
9.3	Åtgärder	21
10	Beräkningar och resultat	22
10.1	Totalsäkerhetsmetoden	23
10.2	Partialkoefficientmetoden	25
10.3	Klimatberäkning, geotekniska åtgärder	26
11	Föreslagna åtgärder – motiv	28
12	Slutsats och rekommendationer	30

BILAGOR

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

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 detaljerad geoteknisk stabilitetsutredning vid Forstena i Vänersborgs kommun.

Undersökningsområdet är beläget på östra sidan om Göta älv, ca 5 km söder om Vänersborgs centrala del. Området ligger nordost om Trollhättan-Vänersborgs Flygplats, se Figur 1. Området sträcker sig från km 3/150 i norr till km 4/100 i söder enligt älvens längdmätning.



Figur 1. Översiktssbild, aktuellt område markerat med röd linje (kartkälla: Autodesk AutoCAD Civil 3D)

2 Syfte

Utredningen omfattar en detaljerad geoteknisk utredning, enligt IEG:s Rapport 4:2010. Syftet med den detaljerade 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 lodning 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:

- > Forstena, Vänersborgs kommun, Detaljerad stabilitetsutredning, 03150ORA01, Markteknisk undersökningsrapport (MUR) Geoteknik, Uppdragsnummer COWI A201067, daterad 2021-01-15.

Inom aktuellt område har geotekniska undersökningar utförts tidigare. Relevanta undersökningsresultat har inarbetats i upprättad MUR, se handlingen ovan. Undersökningarna redovisas i sin helhet i följande handling:

- > SGI (2011). Göta älvutredningen, GÄU, Delområde 6 (Intagan – Vargön), Markteknisk undersökningsrapport Geoteknik. Uppdragsnummer 14086. Vectura/BohusGeo, daterad 2011-04-21

3.2 Övrigt underlag

- > Grundkarta erhållen från beställaren, maj 2020
- > Batymetrisk mätning av älvbotten från 2019
- > Höjddata från Lantmäteriets WCS-tjänst, nedladdad 2020
- > Geosuite-databas med tidigare utförda undersökningspunkter erhållen från beställaren, maj 2020

4 Styrande dokument

Som underlag till denna utredning har nedanstående styrande dokument använts.

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

5 Projekteringsanvisningar

Stabilitetsberäkningar har utförts med totalsäkerhetsmetoden. Eventuella stabilitetshöjande åtgärder har dimensionerats med totalsäkerhetsmetoden och därefter kontrollerats med partialkoefficientmetoden enligt bestämmelse från beställaren SGI.

För totalsäkerhetsmetoden ska säkerhetsfaktor (F_{tot}) väljas inom intervallen $F_c \geq 1,7-1,5$ (odränerad analys), $F_{komb} \geq 1,5-1,4$ (kombinerad analys), utifrån en bedömning av områdets gynnsamma och ogynnsamma förhållanden. Erforderliga säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott för totalsäkerhetsmetoden krävs i IEG Rapport 4:2010. Följande säkerhetsfaktorer har valts med hänsyn till listade gynnsamma och ogynnsamma förhållanden i Kapitel 9.1:

- > $F_c \geq 1,6$ (odränerad analys)
- > $F_{komb} \geq 1,45$ (kombinerad analys)

För partialkoefficientmetoden gäller krav att säkerhetsfaktor F_{EN} (både odränerad- och kombinerad analys) ska överstiga $F_{EN} = 1,0$ för säkerhetsklass 2 (SK2) och $F_{EN} = 1,1$ för säkerhetsklass 3 (SK3). Erforderliga säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott krävs i IEG Rapport 6:2008.

Säkerhetsklass 3 (SK3) har tillämpats med avseende på stabilitetsbrott för konstruktion på undergrund av kvicklera enligt IEG Rapport 6:2008.

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

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

$\bar{X}$ = valt härlett värde

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

η = omräkningsfaktor, värdering av utförd undersökning

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

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

I anslutning till Forstena finns geotekniska undersökningar inom Göta älv och i direkt anslutning till Göta älv, varav vald skjuvhållfasthet under Göta älv är utvärderad från geotekniska undersökningar.

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

Stabilitetsanalysen har utförts med datorprogrammet Geostudio 2020, version 10.2.2.20559, med totalsäkerhetsmetoden för samtliga beräkningsfall samt med partialkoefficientmetoden för de sektioner som uppfyller kraven samt för åtgärdsförslag.

6 Befintliga förhållanden

6.1 Topografi och ytbeskaffenhet

Det aktuella området är beläget sydost om Göta älv och utgörs av en dammanläggning och åkermark. Dammanläggningen består av en vall som är uppbyggd av sprängsten samt av lermassor från urgrävning av tillhörande dike. Sprängstensvallen är bevuxen med gräs och enstaka träd. Uppe på sprängstensvallen finns det en grusväg, som fungerar som serviceväg, se Figur 2. Markytans nivå på sprängstensvallen varierar mellan ca +39,5 och +41.



Figur 2. Dammanläggningen som utgörs av en sprängstensvall. Fotograferat från väst med Göta älv till vänster i bild (COWI AB, 2020)

Det finns en undervattenshylla närmast strandlinjen där älvbotten ligger på nivån ca +38 till +39. Bottennivåer i Göta älv uppgår till mellan ca +28 och +30. Slänten från undervattenshyllan ner mot älvbotten har huvudsakligen en lutning som varierar mellan ca 1:1,5 och 1:2,5. Detta med undantag för sträckan mellan ca km 3/450 och 3/600, enligt Göta älvs längdmätning, där släntlutningarna ställvis är brantare än 1:1.

Sydost om sprängstensvallen finns det ett dike följt av åkermark, se Figur 3 och Figur 4. Diket är bevuxet med gräs och enstaka träd. Diket är beläget mellan åkermarken och sprängstensvallen och nivån på dikesbotten ligger på ca +37,7. Dikets släntlutningar mot åkermarken och sprängstensvallen ligger med lutning ca 1:2 eller flackare. Markytan på åkermarken är plan och varierar mellan ca +39,2 och +40,7.



Figur 3. Diket fotograferat från väst med sprängstensvallen till vänster i bild (COWI AB, 2020)



Figur 4. Åkermark sydost om sprängstensvallen och diket, fotograferat från väst (COWI AB, 2020)

6.2 Befintliga konstruktioner

Inom området finns det en dammanläggning som utgörs av en sprängstensvall. Dammanläggningen anlades år 1925 och förvaltas av Vattenfall AB.

7 Geotekniska förhållanden

7.1 Jordlagerförhållanden

Jordlagren utgörs av lera som närmast älven överlagras av sprängsten. Leran är avsatt på ett tunt friktionsjordlager på berg. Utförda sonderingar har stoppat mot förmodat block eller berg alternativt mot friktionsjord på mellan ca 10 och 18 m djup under markytan. Tidigare utförda CPT-sonderingar i älven har avbrutits i lera på ca 20 m djup under älvbotten, utan att fast botten nåtts. Vid utförda sonderingar har bergets överyta verifierats i två undersökningspunkter med jord-bergsondering. Utförda jord-bergsonderingar har stoppat på mellan ca 15 och 17 m djup under markytan.

Leran innehåller växtdelar i det övre skiktet ner till ca 6 m under markytan. Mot djupet ökar lerans innehåll av silt. På åkermarken har lera i den övre delen en utbildad torrskorpa vars tjocklek uppgår till ca 1–2 m. Lera har en mäktighet av ca 10–17 m.

Lerans hållfasthet har bestämts utifrån utvärderade CPTU-sonderingar, vingförsök samt konförsök och direkta skjuvförsök på ostörda lerprover. Lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet varierar i undersökningspunkterna utförda i sprängstensvallen, närmast älven, från ca 12–35 kPa under vallen och ner till nivå +35 till ca 30–45 kPa på nivå +23. I undersökningspunkterna utförda på åkermarken varierar lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet från ca 12–30 kPa närmast under torrskorpan och ner till nivå +36, till ca 30–45 kPa på nivå +26. I tidigare utförda undersökningspunkter i älven har skjuvhållfastheten bestämts till ca 12–18 kPa närmast under älvbotten till ca 30–40 kPa på nivå +15. Lerans skjuvhållfasthet klassificeras som mycket låg till medium.

Lerans densitet varierar i allmänhet mellan ca 1,55 och 1,75 t/m³. Den naturliga vattenkvoten har bestämts till ca 50–80 %. Konflytgränsen varierar i huvudsak mellan ca 35 och 60 %.

Lerans sensitivitet varierar enligt laboratorieanalyser på ostörd provtagning mellan ca 30 och 220, vilket innebär att lera är högsensitiv och då den omrörda hållfastheten är lägre än 0,4 kPa klassificeras lera som kvick. Utvärdering av kvicklera har även utförts på CPTU-R och trycksonderingar vilka visar på förekomst av kvicklera. Se kapitel 7.2 för detaljerad beskrivning av utvärdering av kvicklera.

Lerans överkonsolideringsgrad, OCR, har bestämts med CRS-försök på ostörda lerprover i tre undersökningspunkter. En av undersökningspunkterna är hämtad från tidigare undersökning. Överkonsolideringsgraden varierar mellan ca 1,6 och 2,3.

Friktionsjordens mäktighet varierar mellan ca 0,1–0,4 m. Friktionsjordens egenskaper har ej undersökts.

7.2 Utvärdering kvicklera

Förekomst av kvicklera har utvärderats från ostörd provtagning tillsammans med CPTU-R och trycksonderingar.

Laboratorieanalyser på ostörda prov visar på en högsensitiv lera. Mellan djupen 5 och 12 m i undersökningspunkt 20C103 samt 4 och 10 m i undersökningspunkt 20C107 understiger den omrörda hållfastheten 0,4 kPa, därvid klassificeras leran som kvick.

Utvärdering av utförda CPTU-R och trycksonderingar visar på förekomst av kvicklera. CPTU-R redovisar en uppmätt resistivitet mellan 5 och 25 ohm/m och trycksonderingarna har en liten eller obefintlig tillväxt för motståndskraften mot djupet.

Kvicklera förutsätts förekomma i hela området.

7.3 Hydrogeologiska förhållanden

Hydrogeologiska undersökningar har vid nu och tidigare geotekniska undersökningar utförts i fyra undersökningspunkter; 20C103, 20C107, 20C111 och U06211.

I punkt 20C103 har ett grundvattenrör installerats i friktionsjorden under leran på 16,8 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts vid två tillfällen under perioden september till oktober år 2020. Resultaten visar på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri vattenyta ca 0,6 m under markytan vilket motsvarar nivån +39,7.

I punkt 20C107 har ett grundvattenrör installerats i friktionsjorden under leran på 17 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts vid två tillfällen under perioden september till oktober år 2020. Resultaten visar på en trycknivå i friktionsjorden motsvarande en fri vattenyta ca 0,7 m under markytan vilket motsvarar nivån +39,7.

I punkt 20C111 har ett grundvattenrör installerats i friktionsjorden under leran på 18,7 m djup under befintlig markyta. Mätningar har utförts vid två tillfällen under perioden september till oktober år 2020. Resultaten visar på en trycknivå

i friktionsjorden motsvarande en fri vattenyta ca 0,8 m under markytan vilket motsvarar nivån +39,7.

I punkt U06211 har portrycksspetsar installerats på två nivåer, på 3 och 10 m djup under befintlig markyta. Portrycksspetsarna är installerade med BAT-mätare som avläses manuellt. Det finns registrerade mätningar vid fyra tillfällen under perioden juni till augusti år 2010. Mätningarna på 3 och 10 m djup visar på en portrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 1,1-1,4 m under befintlig markyta vilket motsvarar nivån +39,1 till +39,4. Mätningar har även utförts vid två tillfällen under perioden september till oktober år 2020. Mätningarna på 3 m djup visar på en portrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 1,5 m under befintlig markyta vilket motsvarar nivån +39,0. Mätningarna på 10 m djup visar på en portrycksnivå i leran motsvarande en fri grundvattenyta ca 1,3 m under befintlig markyta vilket motsvarar nivån +39,3. Portrycksfördelningen mot djupet i leran är hydrostatisk.

8 Valda beräkningsparametrar

8.1 Jordmaterialparametrar

Valda karakteristiska och dimensionerande beräkningsparametrar för jordens hållfasthetsegenskaper och tunghet framgår av Tabell 2 nedan. Valda parametrar för lerans korregerade odränerade skjuvhållfasthet och densitet redovisas även i bilaga 1 och bilaga 2, se bilageförteckning.

Lerans dränerade skjuvhållfasthet har uppskattats empiriskt med kohasionsintercepten $c'_k = 0,1 \cdot c_{uk}$ och $\Phi'_k = 30^\circ$, se kapitel 5.

Tabell 2 Karakteristiska och dimensionerande materialparametrar

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter	Dimensionerande parameter
Varierar	Sprängsten	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_k = 45^\circ$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_d = 37,6^\circ$
Varierar	Torrskorpelera	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 8 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 30 \text{ kPa}$, $c'_k = 3 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 8 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 20 \text{ kPa}$, $c'_d = 2,3 \text{ kPa}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter	Dimensionerande parameter
Mellan ca +38 och +36	Lera 1 Land	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 24 \text{ kPa}$, $c'_k = 2,4 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 16 \text{ kPa}$, $c'_d = 1,8 \text{ kPa}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Mellan +36 och +30	Lera 2 Land	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 24 \text{ kPa}$, $\Delta c_{uk} = 2,4 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 2,4 \text{ kPa}$, $\Delta c'_k = 0,24 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 16 \text{ kPa}$, $\Delta c_{ud} = 1,6 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 1,8 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,18 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Under +30	Lera 3 Land	$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 38,4 \text{ kPa}$, $\Delta c_{uk} = 2,4 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 3,84 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,24 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 25,6 \text{ kPa}$, $\Delta c_{ud} = 1,6 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 2,95 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,18 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Mellan ca +39 och +35	Lera 1 Strandnära	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 20 \text{ kPa}$, $c'_k = 2 \text{ kPa}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 13,3 \text{ kPa}$, $c'_d = 1,5 \text{ kPa}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Mellan +35 och +30	Lera 2 Strandnära	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 20 \text{ kPa}$, $\Delta c_{uk} = 2,1 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 2 \text{ kPa}$, $\Delta c'_k = 0,21 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 13,3 \text{ kPa}$, $\Delta c_{ud} = 1,4 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 1,5 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,16 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
Under +30	Lera 3 Strandnära	$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 30,5 \text{ kPa}$, $\Delta c_{uk} = 2,1 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 3,05 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,21 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 20,3 \text{ kPa}$, $\Delta c_{ud} = 1,4 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 2,3 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,16 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$

Nivå	Jordlager	Karakteristisk parameter	Dimensionerande parameter
Under +36	Älvlera	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{uk} = 8 \text{ kPa}$, $\Delta c_{uk} = 1,4 \text{ kPa/m}$ $c'_k = 0,8 \text{ kPa}$ $\Delta c'_k = 0,14 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 6 \text{ kN/m}^3$ $c_{ud} = 6,5 \text{ kPa}$, $\Delta c_{ud} = 0,93 \text{ kPa/m}$ $c'_d = 0,6 \text{ kPa}$ $\Delta c'_d = 0,11 \text{ kPa/m}$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$
-	Friktionsjord	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_k = 30^\circ$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$ $\Phi'_d = 23,9^\circ$

8.2 Portrycksmodell

Inom området har grundvattennivån antagits ligga i nivå med Göta älvs vattenyta på nivå ca +39,4. Portrycksfördelningen mot djupet har antagits vara hydrostatisk. Vald portrycksfördelning redovisas i bilaga 3, se bilageförteckning.

8.3 Vattenstånd i älven

Göta älv är reglerad och slussar finns både uppströms och nedströms Forstena. SGI har angivit att sänkningshöjd på +39,4 ska användas i beräkningsanalyser.

9 Övriga förutsättningar, stabilitetsanalys

9.1 Gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar

En bedömning av områdets gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar för stabilitetsberäkningar har utförts i samband med val av säkerhetsfaktorer för detaljerad utredning. Bedömningen redovisas i Tabell 3.

Tabell 3 Gynnsamma och ogynnsamma förutsättningar för stabilitetsberäkningar

Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Konsekvenser av skred		Risk för människoliv och ekonomisk skada Risk för bakåtgripande skred Kvicklera
Släntens beständighet	Göta älv är reglerad	Risk för erosion
Släntens geometri	Markytans geometri är hämtad utifrån höjddata tillsammans med avvägda sektioner	
Tidigare förändringar i slänten	Dammanläggning (anlagd år 1925)	
Jordens egenskaper	Relativt liten spridning i hållfasthetsegenskaper Homogen jord, inga sammanhängande skikt	Jordlagerföljden består av lera Hög sensitivitet, kvicklera
Analys- och beräkningsarbetets tillförlitlighet	Stort antal beräknade glidytor Känslighetsanalys utförd Förhållandena är enkla med små variationer i yta och jordlagerföljd Glidyntans läge i plan är vald i den farligaste delen av slänten ur stabilitetssynpunkt Tvådimensionell analys	Kritiska glidyntan omfattar mindre jordvolym
Fältundersökningens innehåll och omfattning	CPTU-R sonderingar är utförda Kvalificerade undersökningar (CPTU-sondering, vingförsök och ostörd provtagning) har utförts.	

Förutsättningar	Gynnsamma	Ogynnsamma
Laboratorieundersökningens innehåll och omfattning	Upptagna prover har klassificerats i laboratorium Kvalificerade laboratorieanalyser är utförda i flertalet punkter, CRS-försök och direkta skjuvförsök	
Grundvatten- och portrycksförhållanden	Portrycksmätare är installerade i tidigare utförda undersökningspunkter Begränsade förväntade tryckvariationer	Relativt kort mätserie
Ytvattenförhållanden	Göta älv är reglerad	

För totalsäkerhetsmetoden ska säkerhetsfaktor (F_{tot}) väljas inom intervallen $F_c \geq 1,7$ - $1,5$ (odränerad analys), $F_{\text{komb}} \geq 1,5$ - $1,4$ (kombinerad analys), utifrån en bedömning av områdets gynnsamma och ogynnsamma förhållanden. Övervägande är förutsättningarna gynnsamma, men då det finns kvicklera och förekommer risk för bakåtgripande skred med stor omgivningspåverkan ansätts säkerhetsfaktorerna mitten av de angivna intervallen enligt nedan;

- > $F_c \geq 1,6$ (odränerad analys)
- > $F_{\text{komb}} \geq 1,45$ (kombinerad analys)

9.2 Känslighetsanalys

Känslighetsanalys har utförts för att säkerställa stabilitetsutredningens robusthet och undersöka sårbarheten för förändrad geometri till följd av erosion och variationer i skjuvhållfasthet.

Känslighetsanalys görs ej på förändring av portrycksförhållandena eftersom det ej bedöms påverka stabilitetsförhållandena då den kritiska slänten är belägen under vattenytan i Göta älv.

9.2.1 Förändrad geometri till följd av erosion

Förändrad geometri av Göta älvs botten på grund av erosion till följd av strömmande vatten eller fartygstrafik har utförts genom att ursprungliga nivåer sänks med 1 och 2 meter och genom en anpassning till befintliga nivåer.

För Forstena används en typsektion för en slänt med undervattenshylla och utan erosionsskydd i vattenbrynet, se Figur 5.



Figur 5. Typsektion för slänt med undervattenshylla och utan erosionsskydd i vattenbrynet.

Sänkning av Göta älvs botten har utförts med 1 respektive 2 m. Det har antagits att ingen erosion sker ovanför undervattenshyllans släntkrön. Från släntkrön har släntlutningen anpassats utifrån en triangulär fördelning mot djupet ned till farledens botten, efter erosion. Det har dessutom antagits att ingen förändring av geometrin sker på och ovan undervattenshyllan eller för slänter över vattenytan.

9.2.2 Reducering av skjuvhållfasthet

Vid sammanställning av härledda värden visade CPT-sondering och vingförsök i undersökningspunkt 20C105 på lägre skjuvhållfasthet än i övriga punkter. En känslighetsanalys har utförts för en sektion, i vilken punkten är belägen. Skjuvhållfastheten för strandnära lera har i denna sektion reducerats med 4 kPa i den övre delen av lerprofilen, vilket motsvarar en reduktion av skjuvhållfastheten med 20%.

9.3 Åtgärder

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

9.3.1 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 från mothållande sida. Nackdelen med tryckbank är att det innebär en utfyllnad i Göta älv.

9.3.2 Avschaktning

Avschaktning innebär att befintliga jordmassor schaktas bort på den pådrivande sidan. Avschaktningen kan utföras genom att befintlig slänt flackas ut eller att till exempel en etappschaktning utförs. 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.

9.3.3 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 geometri kan återställas till ursprungsutseendet. Installation av kalkcementpelare är mindre lämpligt i undervattensmiljö då det finns risk för spill av kalk och cement i vattendraget.

10 Beräkningar och resultat

Säkerheten mot stabilitetsbrott har kontrollerats i tre sektioner, i km 3/4000, km 3/5450 och i km 3/7000. Beräkningssektionernas läge och utbredning i plan framgår av Figur 6 nedan.



Figur 6. Redovisning stabilitetssektioner

10.1 Totalsäkerhetsmetoden

I Tabell 4, Tabell 5 och Tabell 6 redovisas resultat för beräkningar med karakteristiska parametrar. Beräkningsresultaten redovisas även i bilaga 4, se bilageförteckning.

Tabell 4 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 3/4000, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,6$ och $F_{komb.} \geq 1,45$

Sektion km 3/4000, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	2,44	1,54	4:1 - 4:4
Känslighetsanalys: Reducerad hållfasthet i strandnära lera baserat på punkt 20C105	1,98	1,44	4:5 - 4:8
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 1 m	2,44	1,39	4:9 - 4:12
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m	2,44	1,29	4:13 - 4:16

Beräkningsresultaten för sektion 034000 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys.

Utförda känslighetsanalyser där skjuvhållfastheten reduceras i strandnära lera baserat på undersökningspunkt 20C105 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med odränerad analys. I kombinerad analys är säkerhetsfaktorn strax under erforderliga krav.

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.

Tabell 5. Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 3/5450, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,6$ och $F_{komb.} \geq 1,45$

Sektion km 3/5450, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	2,28	1,11	4:17 - 4:21
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 1 m	2,15	1,00	4:22 - 4:25

Sektion km 3/5450, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m	2,04	0,96	4:25 – 4:29
Förstärkt sektion. Tryckbank/erosionsskydd utlagt i strandlinjen med lutning 1:1,6	1,70	1,49	4:30 – 4:33
Förstärkt sektion. Avschaktning, strandlinjens lutning justeras till 1:1,5	2,26	1,52	4:34 – 4:37

Beräkningsresultaten för sektion 3/5450 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ej uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys.

Utförda känslighetsanalyser för ett framtida scenario där bottennivån i älven sänks med 1 respektive 2 m på grund av erosion visar att erforderlig säkerhetsfaktor sänks ytterligare och ej uppfylls för kombinerad analys. Med en sänkning av älvbotten med 2 m blir säkerhetsfaktorn mindre än ett, vilket teoretiskt sett innebär att slänten går till brott. Känslighetsanalysen visar därmed att erosionsförhållandena har stor påverkan på stabilitetsförhållandena.

För att uppfylla erforderlig säkerhetsfaktor med totalsäkerhetsanalys kan antingen en tryckbank/erosionsskydd läggas ut i strandlinjen med lutning 1:1,6 eller flackare, alternativt kan en avschaktning utföras där strandlinjen flackas ut till lutning på maximalt 1:1,5.

Tabell 6 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 3/7000, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_c \geq 1,6$ och $F_{komb.} \geq 1,45$

Sektion km 3/7000, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	2,65	1,62	4:45 – 4:48
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 1 m	2,53	1,46	4:49 – 4:52
Känslighetsanalys: Älvbotten sänkt med 2 m	2,42	1,36	4:53 – 4:56

Beräkningsresultaten för sektion 037000 visar att erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls för befintliga förhållanden för beräkning med kombinerad analys och odränerad analys.

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

10.2 Partialkoefficientmetoden

I Tabell 7 nedan redovisas resultat för beräkningar med partialkoefficientmetoden i sektion 3/5450. Beräkningar har utförts för befintliga förhållanden och för åtgärdsförslag i kombinerad analys.

Partialkoefficientmetoden har ej nyttjats för odränerad analys då totalsäkerhetsmetoden visar på en säkerhetsfaktor som är större än 2 för befintliga förhållanden. Beräkningsresultaten redovisas även i bilaga 4, se bilageförteckning.

Tabell 7 Beräkningsresultat för stabilitetsanalys i sektion km 3/5450, rödmarkerade värden uppfyller ej krav på erforderlig säkerhetsfaktor, $F_{EN} \geq 1,1$

Sektion km 3/5450, Beskrivning	Odränerad analys	Kombinerad analys	Bilaga:Sida
Befintlig sektion	-	0,85	4:38 – 4:39
Förstärkt sektion. Tryckbank/erosionsskydd utlagt i strandlinjen med lutning 1:1,6	-	1,12	4:40 – 4:41
Förstärkt sektion. Avschaktning, strandlinjens lutning justeras till 1:1,5	-	1,17	4:42 – 4:43

Beräkningsresultaten med partialkoefficientmetoden visar att föreslagna åtgärder utifrån beräkning med totalsäkerhetsanalys är tillräckliga för att uppfylla erforderlig säkerhetsfaktor med partialkoefficientmetoden. För att erhålla tillfredställande säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott kan antingen en tryckbank/erosionsskydd läggas ut i strandlinjen med lutning 1:1,6 alternativt kan en avschaktning utföras där strandlinjen flackas ut till lutning 1:1,5.

10.3 Klimatberäkning, geotekniska åtgärder

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.

För Forstena har klimatpåverkan beräknats för två olika förstärkningsalternativ, dels för tryckbank som även fungerar som erosionsskydd, dels för avschaktning av slänten med utläggning av erosionsskydd. Utöver detta har även ett tredje alternativ utretts, där beräkning utförts för att uppskatta klimatpåverkan då hela området förses med erosionsskydd för att minimera framtida erosion. I Tabell 8 anges vilka poster som använts vid beräkning av klimatpåverkan från de tre åtgärdsalternativen.

Tabell 8 Poster som har använts för beräkning av klimatpåverkan för Alternativ 1-3, inklusive mängder och antaget avstånd för transport av material till, respektive från anläggningsplatsen.

	Ingående poster i klimatberäkning	Mängder	Antaget avstånd för transport av material
Alternativ 1	Tryckbank/Erosionsskydd del av området (sprängsten)	3 100 m ³	30 km
Alternativ 2	Avschaktning del av området	3 200 m ³	30 km
	Erosionsskydd del av området (sprängsten)	1 400 m ³	30 km
Alternativ 3	Erosionsskydd övriga området (sprängsten)	8 200 m ³	30 km

I Tabell 9 visas beräknad klimatpåverkan från respektive åtgärdsalternativ. Alternativ 1 och 2 beräknas medföra utsläpp av totalt 44 respektive 40 ton CO₂ medan Alternativ 3, som omfattar betydligt större mängder material till erosionsskydd, medför en större klimatpåverkan, 116 ton CO₂. I resultattabellen syns också att transportrelaterade utsläpp utgör en stor del av de totala

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

utsläppen för respektive alternativ. Det avstånd som material och massor behöver transporteras får därför stor betydelse för hur stora utsläppen från åtgärden i helhet blir. I beräkningarna har ett transportavstånd på 30 km antagits. Även framställningen av krossmaterial bidrar till relativt stora utsläpp medan utsläpp kopplat till själva anläggningsarbetet, dvs arbetsmaskiner på plats, utgör mycket liten andel av åtgärdens totala klimatpåverkan.

Tabell 9 Beräknad klimatpåverkan från Alternativ 1-3. i ton CO₂-ekvivalenter.

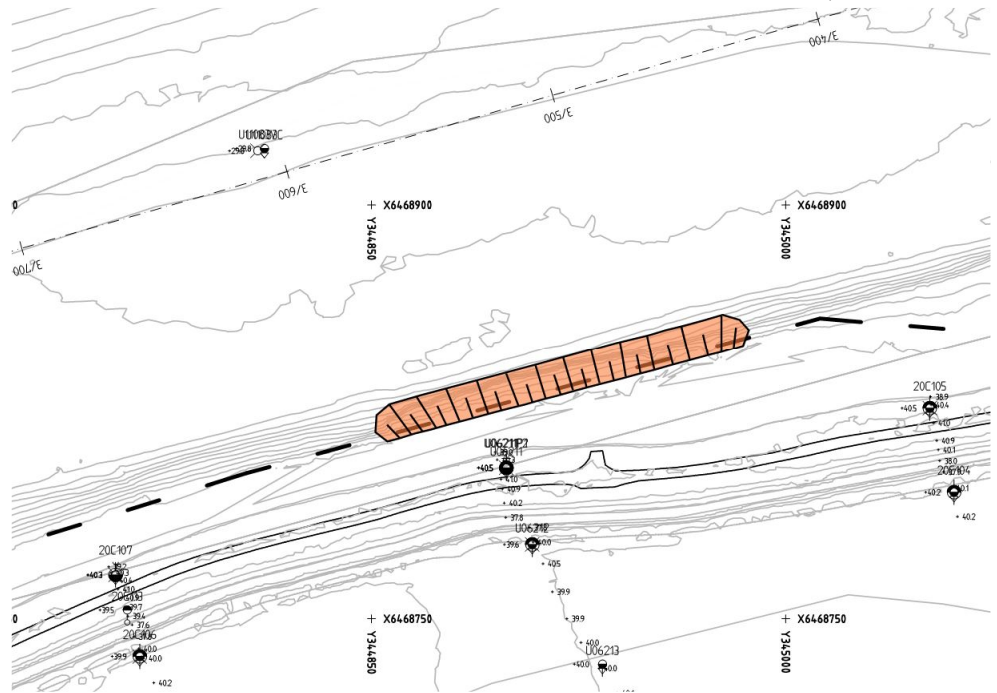
	Utsläpp från transport av material	Utsläpp från material-framställning*	Utsläpp från arbetsmaskin vid anläggningsplats	Utsläpp totalt
Alternativ 1	20 ton	22 ton	2 ton	44 ton
Alternativ 2	27 ton	10 ton	3 ton	40 ton
Alternativ 3	53 ton	59 ton	4 ton	116 ton

**Avser utsläpp från framställning av krossmaterial till erosionsskydd*

För att erhålla tillfredställande säkerhetsfaktor inom området kan antingen en tryckbank/erosionsskydd läggas ut i strandlinjen med lutning 1:1,6 eller flackare, alternativt kan en avschaktning utföras där strandlinjen flackas ut till en lutning på maximalt 1:1,5.

[illegible]

Med en avschaktning, där slänten flackas ut, erhålls en utformning med en släntlutning motsvarande närliggande slänter i km 3/4000 och km 3/7000. På så sätt minskas även lasten på glidyttans pådrivande sida. Ett erosionsskydd kan erfordras i slänten för att minimera risken för fortgående erosion av slänten. I Figur 8 nedan redovisas ungefärlig utbredning av föreslagen avschaktning.



Figur 8. Ungefärlig utbredning av erforderlig avschaktning

12 Slutsats och rekommendationer

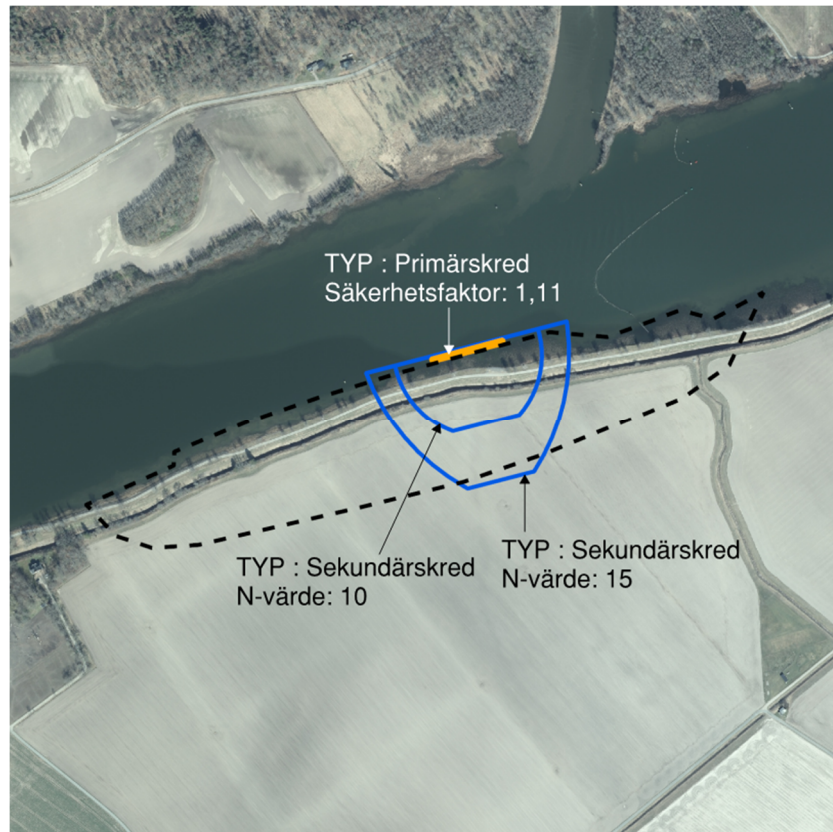
Stabilitetsutredning med totalsäkerhetsmetoden baseras på grundtanken att ju mer information som finns inom ett område, desto lägre krav på beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott erfordras. Erforderlig säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott varierar inom ett intervall där gynnsamma och ogynnsamma förhållanden vägs ihop för att välja en objektspecifik säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott.

Denna detaljerade stabilitetsutredning visar att beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott uppfylls i sektion km 3/4000 och i km 3/7000. Däremot uppfylls beräknad säkerhetsfaktor mot stabilitetsbrott ej i sektion km 3/5450 i kombinerad analys. Området inom vilket stabilitetshöjande åtgärder bedöms erfordras för att säkerställa befintliga förhållanden avgränsas till en undervattensslänt mellan ca km 3/450 och km 3/600, enligt Göta älvs längdmätning. För att erhålla tillfredställande säkerhetsfaktor inom området kan antingen en tryckbank/erosionsskydd läggas ut i strandlinjen med lutning 1:1,6 eller flackare, alternativt kan en avschaktning utföras där strandlinjen flackas ut till en lutning på maximalt 1:1,5. Om åtgärden avschaktning väljs rekommenderas att erosionsskydd läggs i slänten för att förhindra fortgående erosion.

Inför val av stabilitetsförbättrande åtgärderna rekommenderas att kompletterande geotekniska fältundersökningar utförs från flotte. Kompletterande fältundersökningar bör utföras för att verifiera jordlagerföljden och fastställa huruvida jordlagren utgörs av lera eller fastmark. Detta för att säkerställa behovet av stabilitetshöjande åtgärder, samt för att kunna välja lämplig förstärkningsåtgärd.

Området är känsligt för förändringar/erosion längs Göta älvs botten. För att säkerställa framtida stabilitetsförhållanden kan det bli aktuellt att lägga ut erosionsskydd i slänten inom hela delområdet.

Förekomst av kvicklera och högsensitiv lera innebär risk för utbildandet av bakåtgripande skred vid ett initialt skred. En bedömning av skredutbredning för sekundära skred har utförts enligt SGI Varia 638 (2012) och SGI GÄU-delrapport 32 (2011). Sensitiviteten bedöms vara ca 100 och faktorn n sätts därmed till att variera mellan 10 och 15 vilket ger en skredutbredning på ca 100-180 m från släntfot, se Figur 9. Vid kolvprovtagning i undersökningspunkt 20C103 har sensitiviteten på enstaka djup uppmätts till mer än 200 och därmed finns risk för att sekundära skred inte stannar förrän lösmarken övergår till fastmark eller berg i dagen. Avståndet till fastmarksområden uppgår till mer än 2 km, vilket innebär en mycket stor omgivningspåverkan vid utbildandet av sekundära skred.



Figur 9. Uppskattad utbredning i plan av eventuella primär- och sekundärskred