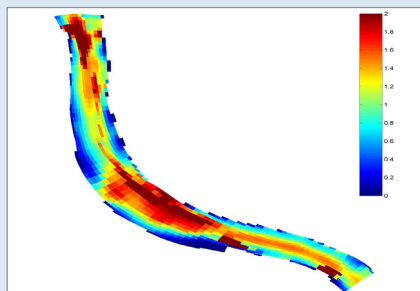


Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat



Slutrapport
Del 2 - Kartläggning

Göta älvutredningen 2009-2011
Slutrapport del 2

Beställning

Statens geotekniska institut (SGI)
581 93 Linköping

SGI Informationstjänsten
Tel: 013-20 18 04
Fax: 013-20 19 14
E-post: info@swedgeo.se

Rapporten finns som PDF på vår
webbplats: www.swedgeo.se

Dnr SGI

6.1-1203-0204

Uppdragsnr SGI

14534

Tryckeri

AJ E-print AB

Foto omslag

© SGI



Statens geotekniska institut

Swedish Geotechnical Institute

Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat

Slutrapport
Del 2 - Kartläggning

Förord

Regeringen gav i ett särskilt regleringsbrev 2008 (M2008/4694/A) ett uppdrag till Statens geotekniska institut (SGI) att utföra en kartering av riskerna för skred längs hela Göta älv med anledning av ett förändrat klimat med ökade flöden i älven. Utredningen har utförts under åren 2009-2011. Tiden för slutredovisning har genom regeringsbeslut (2011-11-17) förlängts till den 30 mars 2012.

Uppdraget har inneburit en samlad riskanalys med beräkningar av sannolikheten för skred och värdering av de konsekvenser som skred kan ge upphov till. Genom att identifiera olika riskområden har en bedömning gjorts av var geotekniska förstärkningsåtgärder kan vara nödvändiga. En översiktlig kostnadsbedömning av de geotekniska delarna av förstärkningsåtgärderna har utförts för områden med höga skredrisker. Vidare presenteras en samlad bedömning av de geotekniska förutsättningarna för ökade flöden i Göta älv.

Utredningen har utförts i huvudsak av medarbetare på SGI. Arbetet har letts av SGI:s ledningsgrupp under ledning av generaldirektör Birgitta Boström. Arbetet har organiserats som ett huvuduppdrag för projektledning samt ett stort antal deluppdrag för metodutveckling och utredning. Till sitt stöd har SGI nyttjat ett antal myndigheter och forskningsinstitutioner, bland annat Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), Sveriges geologiska undersökning (SGU), Chalmers tekniska högskola, Lunds universitet, Universitetet i Stuttgart, Norges geotekniske institutt (NGI), Vattenfall, Sjöfartsverket och Trafikverket. Samtliga kommuner inom Göta älv dalen samt Länsstyrelsen i Västra Götalands län har också medverkat i arbetet i olika skeden. Slutligen har SGI anlitat resurser från ett stort antal konsulter, främst från Göteborgsregionen, för genomförande av utredningsarbetet.

Utredningens resultat och slutsatser presenteras i en slutrapport, *Skredrisker i Göta älv dalen i ett förändrat klimat*. Rapporten består av tre delar:

Slutrapport Del 1 - Samhällskonsekvenser, som innefattar en sammanfattning av uppdraget, skredrisker och konsekvenser för samhället, kostnader för åtgärder samt utredningens förslag till fortsatta aktiviteter. Del 1 vänder sig främst till dem som behöver en samlad beskrivning av de skredrisker som finns i älv dalen, hur dessa kan påverka samhället och vilka åtgärder som behöver vidtas.

Slutrapport Del 2 - Kartläggning, som innefattar en beskrivning av utredningens metodik, inventeringar, undersökningar, beräkningar och analyser. Målgruppen för Del 2 är de som vill fördjupa sig i utredningens genomförande och få mer detaljerade fakta om olika förhållanden i älven som underlag för planering och anpassning till ett förändrat klimat.

Slutrapport Del 3 - Kartor, som innefattar en redovisning av skredriskerna i kartform för olika delar av Göta älv. Del 3 beskriver var skredriskerna förekommer längs älven och vilka områden som berörs. Kartorna innehåller även en klassning av klimatpåverkan längs älven.

Utöver slutrapporten har det detaljerade arbetet med inventering, metodutveckling och analyser redovisats i 34 delrapporter som överlämnades till regeringen 2011-12-21. Rapporterna finns förtecknade i Bilaga och är tillgängliga på SGI:s webbplats: www.swedgeo.se

Redaktörer för *Slutrapport Del 2* har varit Karin Lundström och Bengt Rydell. Textmaterial har lämnats av Yvonne Andersson-Sköld, Per-Evert Bengtsson, Charlotte Cederbom, Stefan Falemo, Gunnel Göransson, Bo Lind, Karin Lundström, Hjördis Löfroth, Håkan Persson, Bengt Rydell, Hanna Tobiasson-Blomén, Marius Tremblay, Helen Åhnberg och Mats Öberg. Teknisk granskning har utförts av Rolf Larsson. Layout har utförts av Elin Sjöstedt och språkgranskning av Per Samuelson och Anders Salomonson.

Linköping i mars 2012

Bo Lind
Tf. generaldirektör

Innehållsförteckning

Göta älvutredningen i korthet	6
1 Uppdraget	11
1.1 Regeringsuppdrag.....	11
1.2 Bakgrund.....	11
1.3 Göta älv och samhället	12
1.4 Skred och ras i älv dalen	14
2 Utredningens genomförande	17
2.1 Omfattning och avgränsning.....	17
2.2 Organisation.....	18
2.3 GIS-plattform och GIS-applikationer	21
3 Dagens och framtida klimat i Göta älvs dalgång.....	25
3.1 Dagens klimat	25
3.2 Klimatförändringar	27
3.3 Havsnivåer i dagens och framtida klimat.....	29
4 Geologi och landformer	31
4.1 Geologiska förhållanden.....	31
4.2 Topografi och landformer.....	38
4.3 Terrängmodell.....	42
5 Geoteknik.....	43
5.1 Utförda fältundersökningar	43
5.2 Utförda laboratorieundersökningar	44
5.3 Metodik för kartering av kvicklera	45
5.4 Geotekniska förhållanden.....	47
6 Yt- och grundvattenförhållanden i dagens och framtida klimat.....	57
6.1 Metodik	57
6.2 Flöden i Göta älv.....	57
6.3 Vattenföring i biflöden längs Göta älv.....	61
6.4 Vattennivåer i Göta älv.....	62
6.5 Grundvattenförhållanden i jordlagren längs Göta älv	63
7 Erosion	71
7.1 Utredningens uppläggning.....	71
7.2 Erosionsprocesser i Göta älv.....	72
7.3 Undersökningar och inventeringar.....	74
7.4 Förändring av bottennivåer	78
7.5 Hydrodynamiska beräkningar	81
7.6 Fartygstrafikens inverkan på erosionen	84
7.7 Sedimenttransport.....	86
7.8 Erosionsförhållanden i dagens klimat	88
7.9 Erosionsförhållanden i framtida klimat.....	91
8 Stabilitetsberäkningar	95
8.1 Beräkningsmetodik i Göta älvutredningen	95
8.2 Stabilitetsförhållanden i dagens situation	99
8.3 Stabilitetsförhållanden i ett framtida klimat.....	102

9	Sannolikhet för skred	105
9.1	<i>Metodik</i>	105
9.2	<i>Tillämpning av metodik för skredsannolikhet inom Göta älvutredningen..</i>	109
9.3	<i>Skredutbredning i områden med högsensitiv lera</i>	112
9.4	<i>Kartering av sannolikhet för skred.....</i>	115
9.5	<i>Effekten av ett förändrat klimat på sannolikhetsklassen.....</i>	117
10	Konsekvensbedömning	121
10.1	<i>Metodik för bedömning av konsekvenser</i>	121
10.2	<i>Exponering och sårbarhet - identifiering av vad som kan drabbas och i vilken omfattning.....</i>	123
10.3	<i>Värdering i monetära termer</i>	123
10.4	<i>Illustration av konsekvensklasser.....</i>	131
10.5	<i>Kartering av konsekvenser i Göta älvdalen.....</i>	133
11	Analys av skredrisker.....	139
11.1	<i>Inledning.....</i>	139
11.2	<i>Tidigare skredriskkarteringar och stabilitetsutredningar</i>	139
11.3	<i>Metodik för riskkartering</i>	141
11.4	<i>Skredrisknivåer.....</i>	142
11.5	<i>Risk för bakåtgripande skred och sekundära effekter</i>	143
11.6	<i>Framtagande av skredrisker i ett förändrat klimat.....</i>	144
11.7	<i>Risker i dagens klimat och i ett förändrat klimat</i>	144
12	Åtgärdsbehov och kostnader	151
12.1	<i>Allmänt</i>	151
12.2	<i>Stabilitetsförbättrande åtgärder, erosionsskydd och invallningar</i>	152
12.3	<i>Underhåll.....</i>	153
12.4	<i>Geotekniska utredningar</i>	153
12.5	<i>Övervakning.....</i>	153
12.6	<i>Totalkostnader.....</i>	154
	Referenser.....	155
	Bilaga	162

Göta älvutredningen i korthet

Uppdrag och bakgrund

Regeringen har gett SGI i uppdrag att utföra en kartering av skredrisker längs Göta älv med anledning av ökade flöden i älven vid ett förändrat klimat.

SGI har utfört uppdraget genom att:

- Genomföra och presentera en samlad analys av skredriskerna längs Göta älv och Nordre älv. Analysen har omfattat insamling av data, beräkning av sannolikheten för skred och värdering av de konsekvenser som skred kan ge upphov till. Riskerna omfattar förhållanden som gäller för dagens klimat och de som kan förväntas gälla år 2100.
- Utföra metodutveckling för att effektivisera och förbättra tidigare framtagna metoder för skredriskanalyser.
- Bedöma var geotekniska förstärkningsåtgärder kan vara nödvändiga samt översiktligt bedöma kostnaderna för dessa.

Utredningens genomförande

Utredningsområdet sträcker sig från kraftverket vid Vargön i Vänersborg till Marieholmsbron i Göteborg samt i Nordre älv från Bohus till Kornhalls färjeläge i Kungälv kommun, totalt en sträcka på ca 100 km motsvarande 200 km strandlinje. Göteborgs stad har parallellt utfört detaljerade stabilitetsutredningar inom det stadsbebyggda området inom Göteborgs kommun och resultaten har använts i SGI:s utredning.

Utredningen har övergripande letts av SGI:s ledningsgrupp och en projektledningsgrupp har svarat för den operativa styrningen av utredningen. Utvecklingsarbetet har bedrivits i nio olika specialutredningar som framförallt syftat till metodikutveckling, inventering av tidigare utredningar och analys av klimatförändringar. Utredningsområdet har delats in i totalt 10 olika geografiska delområden längs älven.

Dagens och framtida klimat i Göta älvs dalgång

Dagens klimat och förväntade förändringar av klimatet fram till år 2100 har betydelse för värdering av förhållanden som påverkar stabiliteten hos slänterna längs Göta älv, bland annat erosion, vattennivåer i älven och i havet samt grundvattenförhållanden. Klimatanalysen visar att:

- Årsmedeltemperaturen kan förväntas öka med 4-5° C.
- Nederbörden bedöms öka med 20-30 % fram till år 2100.
- Havets nivå i Göteborg bedöms att öka med cirka 0,15 m till år 2050 och med omkring 0,7 m till år 2100 med hänsyn tagen till landhöjning.

Geologi och landformer

De geologiska förhållanden som främst har betydelse för skred och erosion är jordart, jordlagerföljd, grundvattenförhållanden, jordlagrens bildning och högsta kustlinjens läge i området. Göta älvs dalgång karaktäriseras av följande geologiska och topografiska förhållanden:

- Mäktiga jordlager av lera som överlagrar friktionsjord och berg.
- Skikt av silt och sand i lerlagren är vanligt förekommande.
- Förutsättningar finns för artesiska grundvattenförhållanden.
- I den norra delen av dalgången har älven skurit sig ner djupt i jordlagren och bildat branta och höga strandbrinkar.
- I södra delen av dalgången finns branta undervattenslänter och översvämningso-
råden.

Geoteknik

De geotekniska förhållanden som främst har betydelse från skredsynpunkt är jordens, tunghet, hållfasthet, vatteninnehåll, känslighet för störning samt grundvattennivåer och portryck. Utförda geotekniska fält- och laboratorieundersökningar har använts för att tolka de geotekniska förutsättningarna i dalgången. De geotekniska förhållandena inom älvdalen har studerats genom 2 500 geotekniska fältundersökningar (sondering, provtagning etc.) och 20 000 laboratieförsök. Dessa tillsammans med resultat från tidigare undersökningarna visar att:

- Jordlagerföljden består i huvudsak av torrskorpelera som överlagrar lera med en mäktighet upp till 60 m norr om Lilla Edet och till 50-100 m söder om Lilla Edet.
- Lerans odränerade skjuvhållfasthet är i allmänhet låg till medium men söder om Lilla Edet förekommer även extremt låg skjuvhållfasthet.
- Leran är i huvudsak överkonsoliderad norr om Lilla Edet och normalkonsoliderad söder om Lilla Edet.
- Kvikklera och högsensitiv lera förekommer främst norr om Lilla Edet. Söder därom är leran i huvudsak mellansensitiv men kvikklera förekommer lokalt.

Yt- och grundvattenförhållanden i dagens och framtida klimat

Slänternas stabilitet längs älven påverkas bland annat av höga vattenflöden som kan orsaka erosion, låga vattennivåer som ger mindre mothållande krafter i slänterna och av höga grundvatten- och portryck som minskar hållfastheten. Analyser av dagens förhållanden och för ett framtida klimat visar att:

- Vattenföringen i Göta älv varierar under dygnet beroende på produktion av vattenkraft. Medelvattenföringen är 550 m³/s och maximalt tillåten vattenföring enligt vattendom är 1030 m³/s.
- Klimatförändringar innebär att ökade vattenmängder behöver avledas från Vänern.
- En förändrad årsrytm för tillrinningen till Vänern kan förväntas i framtiden, vilket påverkar flödena i Göta älv. Tillrinningen ökar under vinterhalvåret samtidigt som den minskar under sommaren. Såväl höga som låga tappningar kommer att bli vanligare.
- I områden med mäktiga leravlagringar finns ett övre och ett undre grundvattenmagasin. Under vintrarna fram till år 2100 bedöms de högsta grundvattennivåerna i det övre magasinet förbli tämligen oförändrade, medan de högsta nivåerna i det undre grundvattenmagasinet förväntas öka med omkring 0,3 m. Det innebär att portrycken i leran bedöms öka obetydligt i de ytligaste lagren och öka något på större djup.

Erosion

Erosion i vattendrag orsakas främst av strömmande vatten och av nötning av is mot slänter och bottnar. Erosion kan innebära att lutning och nivåer hos slänter på land samt bottnar och slänter i älven successivt förändras vilket påverkar slänternas stabilitet. Analyser av älvens förutsättningar för erosion visar att:

- Erosionsskydd av sprängsten finns på stora sträckor längs älven. Skyddens omfattning under vattenytan är inte klarlagd.
- Erosion för dagens förhållanden är för större delen av älven mindre än 0,05 m/år. Längs vissa utsatta undervattensslänter är erosionen cirka 0,15 m/år.
- Med samma maximala flöde som enligt vattendomen tillåts i dag kan erosionen år 2100 förväntas uppgå till 0,4-0,5 m i de norra delarna av älven och till 1,0-1,5 m i de södra delarna.
- Framtida klimatförändringar innebär ökade vattenflöden vilket medför ökad erosion. I det fall högre flöden ska avledas genom älven kan erosionen år 2100 totalt komma att uppgå till 0,8-2,0 m i de norra delarna av älven och till 2,0-3,0 m i de södra delarna.

Stabilitetsberäkningar

Beräkningar av stabiliteten har gjorts för dagens och framtida klimatförhållanden. Beräkning av stabiliteten har utförts för dagens förhållanden med totalsäkerhetsfilosofi och med detaljerad utredning enligt Skredkommissionens anvisningar. Såväl odränerad som kombinerad analys har genomförts. För framtida klimatförhållanden har även beaktats förändringar av grundvattennivåer och slänters geometri till följd av erosion. Resultaten från beräkningarna visar att:

- Stabiliteten i dagens klimat är i huvudsak tillfredsställande mellan Vänersborg och Trollhättan. För flera områden på sträckan mellan Trollhättan och Lilla Edet är stabiliteten låg liksom söder om Lilla Edet till norr om Lödöse. Från Lödöse till Älvängen är stabiliteten låg närmast älven men söder därom är stabiliteten tillfredsställande. Mellan Bohus och Marieholm är stabilitetsförhållandena varierande medan stabiliteten längs Nordre älv med några undantag är tillfredsställande.
- Erosionen kommer att påverka stabiliteten fram till år 2100 och säkerhetsfaktorn kan förväntas minska med cirka 4 % om flödet begränsas till bestämmelserna i vattendomen. Om högre flöden till följd av förändrat klimat tillåts i älven kommer säkerhetsfaktorn att minska med upp till 14 %.

Sannolikhet för skred

Sannolikheten för att de pådrivande krafterna i studerade slänter överskrider de mothållande krafterna har statistiskt beräknats med hänsyn till osäkerheten i de ingående parametrarna. Resultat från beräkningar utförda i sektioner har bundits samman med hjälp av resultat från tidigare utredningar, terrängens beskaffenhet och lokal kännedom, varvid en sannolikhetskarta som täcker hela utredningsområdet har tagits fram.

- Ett antal representativa sektioner har valts inom olika geografiska områden, där tolkning från verklig till idealiserad slänt utförts.
- Sannolikheten för skred har uttryckts genom en indelning i fem sannolikhetsklasser med utgångspunkt från brottsannolikhet och säkerhetsfaktor
- Förutsättningarna för bakåtgripande skred i områden med kvicklera har beaktats genom en inom utredningen framtagen metod.

- Förändring av sannolikheten för skred vid ett framtida klimat har analyserats och redovisas genom en indelning i tre klasser.

Konsekvensbedömning

En metod har utvecklats för att bedöma de samhällsekonomiska konsekvenserna av skred. Metoden omfattar att identifiera vad som kan påverkas av ett skred, omfattningen av denna påverkan samt en monetär bedömning av konsekvenserna. Kostnader har beräknats för i områden med yta av 1 ha i ett rutnät som täcker utredningsområdet.

- Det sammanlagda värdet inom varje ruta har beräknats. Därefter har den totala konsekvensen av ett skred beräknats genom att summera samtliga rutor som kan antas bli berörda av skredet.
- Konsekvenser har beskrivits för bebyggelse, människoliv, väg och järnväg, sjöfart, energi- och ledningssystem, VA-system, miljöfarliga verksamheter och förorenade områden samt näringslivet.
- Konsekvenser för skred anges i fem konsekvensklasser och uttrycks i ekonomiska intervall.

Analys av skredrisker

Skredrisken utgörs av en kombination av sannolikhet för skred och konsekvenserna av detta. Skredriskerna har värderats för olika delsträckor längs älven i dagens klimat och i ett framtida förändrad klimat.

Sammanfattningsvis finns de största skredriskerna i **dagens klimat** i följande områden:

- Sträckan från Trollhättan och till Ödegärdet söder om Lilla Edet utgör det största sammanhängande området med höga skredrisker. Inom flera områden finns kvicklara, där ett skred kan leda till sekundära effekter och stor påverkan på älven.
- Gäddebacke, Vänersborgs kommun - område på östra sidan av älven samt en vall som ska skydda bakomliggande områden för översvämning. Åkerström, Trollhättans kommun – område med samlad bebyggelse.
- Lilla Edets tätort - flera områden med hög skredrisk på båda sidor om älven. Förekomst av kvicklara innebär att ett skred kan få stor utbredning.
- Gamla pappers bruket, Lilla Edets kommun – ett stort område med förekomst av kvicklara.
- Älvängens industriområde, Ale kommun – befintligt industriområde med markföroreningar.
- Kärra-Backa, Göteborgs kommun – branta undervattenslänter längs flera sträckor.
- Kungälv – område med näringsverksamhet.

I ett **förändrat klimat** bedöms sannolikheten för skred förändras, vilket kan påverka skredriskerna. Följande förhållanden kan förväntas:

- Mellan Vargön och Åkerström – liten påverkan.

- För området mellan Åkerström och Alvhem – påverkan varierar mellan liten och måttlig.
- Mellan Alvhem och Bohus – måttlig påverkan.
- Mellan Bohus och Marieholm – stor påverkan längs Göteborgsgrenen.
- Längs Nordre älv – måttlig påverkan

Åtgärdsbehov och kostnader

Det finns behov av åtgärder för att minska skredriskerna i älvdalen och dessutom erfordras övervakning av erosionsförlopp och underhåll av befintliga erosionsskydd. Skredriskerna kan minskas genom exempelvis avschaktning och stödfyllning samt utläggning av erosionsskydd.

- Kostnaderna för stabilitetsförbättrande åtgärder kan uppskattas till mellan 4000 och 5000 MSEK för skredrisker i dagens klimat och till mellan 5000 och 6000 MSEK i ett framtida klimat.
- Kostnaderna för övervakning och underhåll bedöms uppgå till mellan 6 och 7 MSEK/år för dagens klimatförhållande och till mellan 7 och 9 MSEK/år vid förändrat klimat.

1 Uppdraget

1.1 Regeringsuppdrag

Regeringen gav i ett särskilt regleringsbrev 2008 (M2008/4694/A) ett uppdrag till SGI att utföra en kartering av riskerna för skred längs hela Göta älv med anledning av ett förändrat klimat med ökade flöden i älven. Utredningen har utförts under åren 2009-2011. Tiden för slutredovisning har genom regeringsbeslut (2011-11-17) förlängts till den 30 mars 2012.

I regleringsbrevet gavs följande anvisningar för uppdraget:

”För att kunna möta kommande klimatförändringar och hantera ökade flöden genom Göta älv krävs förbättrad kunskap om stabilitetsförhållandena längs hela Göta älv. Anslagsposten används för att förbättra och ta fram skredanalyser och stabilitetskarteringar längs Göta älv.”

SGI har genomfört uppdraget genom att:

- Genomföra och presentera en samlad analys av skredriskerna längs Göta älv samt delar av Nordre älv. Analysen har innefattat insamling av data, beräkningar av sannolikheten för skred och värdering av de konsekvenser som skred kan ge upphov till. Riskerna omfattar förhållanden som gäller för dagens klimat och de som kan förväntas gälla år 2100.
- Utföra metodutveckling för att effektivisera och förbättra tidigare framtagna metoder för skredriskanalyser.
- Bedöma var geotekniska förstärkningsåtgärder kan vara nödvändiga samt översiktligt bedöma kostnaderna för dessa.

Nya och utvecklade metoder har tagits fram för att förbättra skredriskanalyser och stabilitetsberäkningar, förbättra kunskapen om erosionsprocesserna längs Göta älv, bedöma effekten av klimatförändringar på grundvattenförhållanden, utveckla metodik för kartläggning och hantering av högsensitiv lera (kvicklera) samt konsekvensbedömning. Utredningen har genomförts i samverkan med andra myndigheter, forskningsinstitutioner och nationella och internationella organisationer. Arbetet har inneburit den mest omfattande kartläggningen av skredrisker som utförts i Sverige.

1.2 Bakgrund

Den pågående globala klimatförändringen påverkar förutsättningarna för bebyggelse och infrastruktur på många sätt. Klimat- och sårbarhetsutredningen (2007) lyfte i sitt slutbetänkande fram att riskerna för översvämningar, ras, skred och erosion kommer att öka på många håll i Sverige och att insatser för förebyggande åtgärder är nödvändiga. I utredningens delbetänkande (Klimat- och sårbarhetsutredningen, 2006), som behandlade risker för Mälaren, Hjälmaren och Vänern pekas på behovet av ökad tappning genom Göta älv till följd av ökad tillrinning till Vänern. I ett tidigare regeringsuppdrag har SGI, i en handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat, redovisat att den ökade tappningen kan leda till ökad erosion och därmed ökad skredrisk längs älven (SGI, 2006). I handlingsplanen framgår också att klimatförändringarna leder till förändrade grundvattenförhållanden i jordlagren längs älven, vilket i sin tur leder till att stabiliteten för slänterna längs Göta älv kan försämrans.

Göta älv är en av landets största vattendrag och älvdalen karaktäriseras av en varierande landskapsbild, som har formats genom naturliga erosions- och skredprocesser. Årligen inträffar ett flertal skred av olika storlek längs älven och området tillhör ett av de mest skredfrekventa i landet. De främsta orsakerna till den höga skredfrekvensen i Göta älvdalen är

dess geologiska uppbyggnad med mäktiga och lösa lerlager som en gång avsattes i marin miljö, det varierande flödet i älven som orsakar kraftig erosion samt påverkan från samhällets utbyggnad och verksamheter.

Älven är en viktig transportled som gett förutsättningar för etablering av hamnar, industrier, bebyggelse och infrastruktur. Etableringarna innebär att konsekvenserna av skred i älv-dalen på flera platser blir stora då bebyggelse, industri, vägar, järnvägar, sjöfart, förorenade markområden och vattenintag kan påverkas.

Klimatförändringar innebär att risken för naturolyckor ökar. För att begränsa skadeverningarna och möta de nya förutsättningar som ett förändrat klimat innebär är det nödvändigt att arbeta såväl med att identifiera risker och skydda utsatta områden och befintliga strukturer som att höja kvaliteten i planeringen för framtida bebyggelse och infrastruktur med hänsyn till den nya situationen.

1.3 Göta älv och samhället

Göta älv är en av Sveriges vattenrikaste älvar och har sin största tillrinning från Vänern. Dess avrinningsområde uppgår till cirka 50 000 km², vilket motsvarar cirka en tiondel av Sveriges totala yta och är det i särklass största avrinningsområdet i Sverige (Göta älvs Vattenvårdsförbund, 2005).

Göta älv är från sitt inlopp i Vänersborg till utloppet i Göteborg, cirka 93 km lång, Figur 1-1. Älvens totala fallhöjd är 44 m med dammar och kraftstationer i Vargön, Trollhättan och Lilla Edet. I älvens avrinningsområde finns flera biflöden av vilka Slumpån, Grönån, Lärejån, Säveån och Mölndalsån är de största.

Älven delar sig i två grenar vid Bohus, där grenarna tillsammans med havet omsluter ön Hisingen. Genom den nordliga förgreningen, Nordre älv, rinner den största delen av vattenmängden, cirka 70 %. Den södra förgreningen, som mynnar i Göteborgs hamn, behåller namnet Göta älv, men kallas även Göteborgsgrenen.

Älven är viktig ur många aspekter, som vattentäkt respektive recipient, för kraftproduktion, som farled och för rekreation. Vid kraftverken i Vargön, Trollhättan (Hojum och Ollidan) och Lilla Edet produceras årligen cirka 4-5 % av landets totala vattenkraft, cirka 3 TWh. Invånarna i kommunerna i Trollhättan, Lilla Edet, Ale, Kungälv, Göteborg, Mölndal, Partille och Öckerö är beroende av Göta älv för sin dricksvattenförsörjning. Vidare använder många industrier älven för kyl- eller processvatten och älven är även en viktig transportled för sjöfarten. Viktiga naturvärden finns i och längs älven och bland andra är områdena kring Dössebacka, Marieberg, Fontin och Nordre älv och dess utlopp klassade som naturreservat eller Natura 2000-områden.



Figur 1-1
 Utredningsområde -
 Göta älvutredningen.
 © SGI, Lantmäteriet.

Vattenföringen i älven har främst påverkats genom utbyggnad av en kraftverksdamm i Lilla Edet 1916 och av den så kallade Vänerregleringen, som började tillämpas 1937. Vänerregleringen infördes i syfte att kontrollera vattennivåerna i Vänern och för att på ett effektivt sätt kunna utnyttja älven för kraftproduktion. Regleringen har medfört stora variationer i vattenflödena i älven och såväl lägre som högre vattenföring förekommer jämfört med förhållandena före 1937.

Tappningen vid Vargöns kraftverk är enligt gällande vattendom begränsad till maximalt 1030 m³/s och avsikten med begränsningen är att undvika skador av skred och översvämningar längs älven. Denna bestämmelse gör att Vänerns vattenstånd kan stiga mycket högt under långvarig, hög tillrinning. Göta älvs medelvattenföring är cirka 550 m³/s. Under hösten 2000 och vintern 2001 var vattenståndet i Vänern extremt högt. Länsstyrelsen tog tillfälligt över ansvaret för tappningen från Vänern och ålade Vattenfall att öka tappningen mer än vad vattendomen medgav, tidvis nästan 1200 m³/s.

Sundborg och Norrman (1963) beskriver att vattenståndets förändringar uppströms Lilla Edet har, till följd av den ändrade regleringen, lett till att vågerosion får möjlighet att verka inom ett större och tidigare delvis opåverkat område, vilket i sin tur har lett till en ökad stranderosion och ökad mängd släntskred i området.

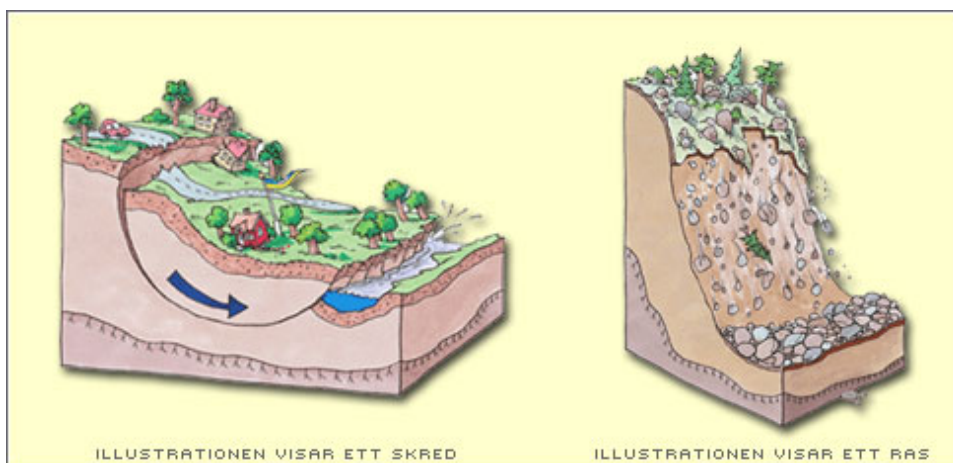
Klimatförändringar väntas leda till ytterligare förändringar rörande tillrinningen till älven. Resultat från hydrologiska beräkningar och klimatmodellering utförda av SMHI (Bergström et al., 2010) visar tydligt att både höga och låga tappningar från Väneren kommer att bli vanligare i framtiden. Detta gäller såväl beräkningar för dagens tappningsstrategi som för en hypotetisk strategi med en betydligt högre maximal tappning. Vilka flöden som i framtiden kommer att avledas i älven beror på hur klimatet kommer att utvecklas och vilka tappningsstrategier som kommer att användas.

1.4 Skred och ras i älvdalen

Med skred avses i denna utredning jord som kommer i hastig rörelse och där massorna till en början är sammanhängande. Beroende på skredets karaktär bryts jordmassorna upp på olika sätt till stora flak eller sammanhållna sjok, men kan också bli mer eller mindre flytande, så kallade kvicklereskred.

Ett ras är en massa av sand, grus, sten eller block eller en del av en bergslänt, som kommer i rörelse. De enskilda delarna rör sig fritt i förhållande till varandra. Berg innehåller större och mindre sprickor som kan leda till att stora block loss görs och faller ned.

I Figur 1-2 illustreras begreppen ras och skred.



Figur 1-2
Illustration av skred
och ras i jord.
Illustration: Robert
Källgren.

Den typ av skred som tidigare skett i Göta älvdalen har i huvudsak uppkommit i finkornig jord av lera och silt. I älvdalen finns i anslutning till bergområden också grövre jordar, exempelvis morän och sandiga och grusiga jordar.

Konsekvenserna av skred och ras medför liknande påverkan inom de områden som drabbas. Då problemet för samhället längs Göta älvdalen i huvudsak beror på skred har andra typer av massrörelser inte studerats i utredningen.

Under 1900-talet har två omfattande skred inträffat i älvdalen i vilka människor omkommit; Surteskredet 1950 och Götaskredet 1957. Dessutom har flera andra omfattande skred inträffat som orsakat stora kostnader för samhället.

Skredet vid *Intagan*, som inträffade 1648, är troligen den största kända skredkatastrofen i Sverige. De utglidande lermassorna dämde upp älven varvid älvens vattenyta uppströms höjdes med cirka 10 m. När vattenmassorna bröt sig igenom de uppdämmande massorna uppstod en flodvåg som orsakade stora skador nedströms. Skredets areal uppgick till omkring 27 hektar och olyckan kostade 85 människors liv.

Surteskredet (Jakobson, 1952) inträffade 1950 på Göta älvs östra sida cirka 1400 m söder om Surte kyrka, se Figur 1-3. Stora delar av leran bestod av kvicklera och skredet spred sig bakåt tills det nådde fasta jordlager. Husen inom skredområdet förflyttades 50-150 m. Skredet hade en längd av cirka 600 m och en bredd av 400 m. De utglidna skredmassorna blockerade delar av Göta älv. En person omkom och 31 bostadshus förstördes.

Vid industriområdet i *Göta* (Odenstad, 1958) inträffade ett skred 1957, se Figur 1-4. En stor del av själva fabriksområdet, hela vedgården och åkern på en 500 m lång sträcka norr därom gled ut i älven. Älven krympte till en 30 m bred fåra och elförsörjningen slogs ut. Skredet orsakade en flodvåg som nådde en höjd av cirka 6 m. Tre människor omkom. En av orsakerna till skredet var pågående erosion i älvbotten. Kvicklera förekom på flera ställen inom skredområdet.

1993 inträffade ett skred i *Agnesberg* (Larsson et al., 1994) beläget utmed Göta älvs östra strand, cirka 10 km norr om Göteborgs centrum. Skredet startade som ett undervattensskred i älven och därefter utlöstes ett antal bakåtgripande följskred. Skredområdet kom att sträcka sig 30 m in på land utefter en sträcka av 80 m. Skredet kunde ha fått omfattande konsekvenser om följskreden hade nått ner i den på djupare nivåer liggande kvickleran. E45 och järnvägen samt vattenintaget till Göteborgs stad, beläget cirka 2,5 km nedströms skredplatsen, kunde ha blivit allvarligt drabbade.

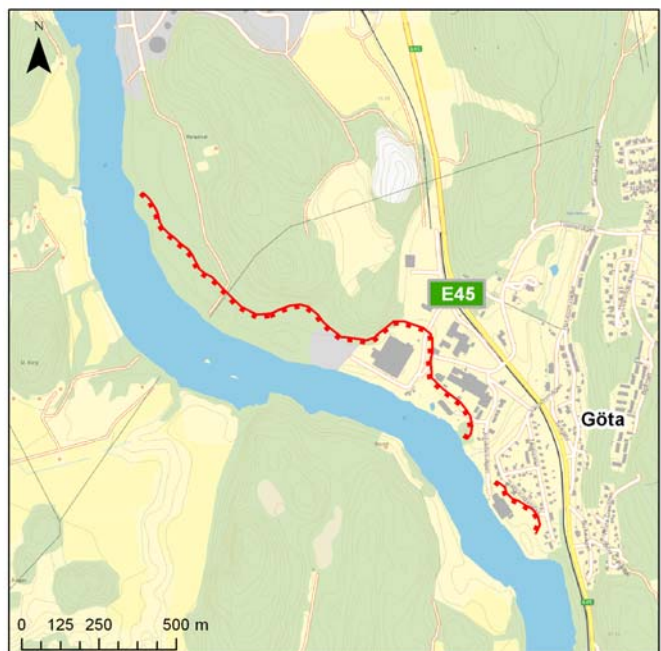
Ballaboskredet (Andersson et al., 1999) inträffade 1996 utmed Göta älvs västra strand cirka 5 km söder om Lilla Edet. Skredet omfattade en 110 m lång sträcka utmed älven och sträckte sig 50-70 m bakåt från älvstranden. När skredmassorna gled ner i älven minskade vattendjupet vid farledskanten från 9-10 m till 4-5 m. Skredområdet domineras av flack lermark, som omges av höjdparter av berg och morän. Kvicklera förekommer på större djup men skredet nådde inte ned i dessa jordlager.



Figur 1-3
Surteskredet 1950.
Bakgrundskarta ©
SGI, Lantmäteriet.
Foto: SGI



Figur 1-4
Götaskredet 1957.
Bakgrundskarta ©
SGI, Lantmäteriet.
Foto: Pressfoto



2 Utredningens genomförande

2.1 Omfattning och avgränsning

Göta älvutredningen omfattar slänterna längs Göta älv från kraftverket vid Vargön i Vänersborg till Marieholmsbron i Göteborg samt slänterna längs Nordre älv från förgreningen av Göta älv vid Bohus till Kornhalls färjeläge i Kungälv kommun. Totalt innebär det en sträcka på cirka 100 km motsvarande 200 km strandlinje. Utredningsområdets bredd avgränsas till de delar som kan beröras av primära och sekundära skred i anslutning till Göta älv. Utredningar av skredrisker i biflöden till älven har begränsats till sträckor i älvens närområde eller där skred kan påverka älvens avbördningsförmåga.

Göteborgs stad har parallellt med SGI:s kartläggning arbetat med detaljerade stabilitetsutredningar inom det stadsbebyggda området. Genom ett samarbetsavtal har resultat från stabilitetsutredningarna i Göteborg utnyttjats också i SGI:s skredriskkartering.

Utredningen har syftat till att analysera hur risken för skred kan påverkas av klimatförändringar, inklusive en ökad tappning från Väneren. För en sådan analys behöver både faran för (eller sannolikheten för) och konsekvensen av skred utredas.

Förutsättningarna för skred beror främst på områdets topografi, geologi, hydrologi och jordlagrens geotekniska egenskaper, men också på de förändringar och påfrestningar som uppstår genom mänsklig aktivitet, till exempel belastningar i form av byggnader. I utredningen har därför en stor del av arbetet omfattat att ta fram och analysera underlag för att kunna beskriva dessa förhållanden. Arbetet har omfattat nya geotekniska fältundersökningar och inventering av tidigare utförda undersökningar. Tekniska beräkningar av faran för skred har utförts för 240 sektioner och tillsammans med resultat från tidigare utredningar presenteras stabilitetsförhållanden längs hela älven. De topografiska förhållandena kan påverkas av exempelvis erosion och därför har förutsättningarna för erosion längs älvens strandbrinkar, bottnar och undervattenslänter kartlagts.

Konsekvensen av ett skred beror på vilka riskobjekt som finns i det potentiella skredområdet samt objektens värden. I detta arbete har ingått att göra en analys av de konsekvenser som kan uppstå och uttrycka dessa, så långt det är möjligt, i monetära termer.

I syfte att förbättra och effektivisera såväl kartläggning av ingående parametrar som metodik för riskbedömning, konstaterades tidigt att det förelåg behov av metodutveckling. Tidigare utredningar samt pågående forskningsarbete indikerade ett antal områden där ny kunskap skulle öka kvalitet och tillförlitlighet hos utredningsresultatet. I Göta älvutredningen påbörjades därför tidigt ett arbete med metodutveckling inom följande områden:

- *Erosion* - beskrivning av och förståelse för erosionprocesser i kohesiva jordar, bestämning av batymetriska förhållanden längs Göta älv, värdering av undersökningsmetoder och beräkningsmodeller samt metodik för uppskattning av erosion.
- *Grundvatten och portryck* - förståelse för områdets geohydrologiska förhållanden och förändringar av dessa orsakade av klimatförändringar.
- *Sensitiv jord* - framtagning av karteringsmetod för förekomsten av lera med hög sensitivitet (och kvicklera) och dess utbredning samt metodik för bedömning av skredutveckling i sensitiv jord.
- *Skredsannolikhet* - framtagning av metodik för beräkning av skredsannolikhet och upprättande av sannolikhetsklasser.
- *Konsekvensbedömning* - metod för identifiering av konsekvenser och värdering av dessa samt upprättande av konsekvensklasser.

- *GIS-redovisning* - utveckling av ett webb-baserat karttittskåp för Göta älvdalen med editeringsmöjligheter i syfte att kunna sammanställa, analysera och presentera data.
- *Klimatanalys* – beskrivning av förändringar i nederbörd och tillrinning i Vänerområdet och de flöden som detta förväntas generera i Göta älv. Klimatscenarierna har bland annat legat till grund för bedömning av förändring av grundvattennivåer och vattenflöden.

Det utvecklingsarbete som knutits till uppdraget har varit behovsstyrt och gett ett direkt stöd i utredningsarbetet. Mycket av arbetet har dessutom som följd effekt gett värdefull kunskap också för andra tillämpningar och andra områden. I samband med utredningen har även framkommit behov av forsknings och utveckling inom flera delområden. SGI har sammanställt dessa behov i en särskilt rapport.

2.2 Organisation

Utredningen har övergripande letts av SGI:s ledningsgrupp samt ett särskilt ledningsutskott, båda under ledning av institutets generaldirektör. En projektledningsgrupp har svarat för den operativa styrningen av utredningen. Utöver uppdragsledare Marius Tremblay har projektledningsgruppen bestått, under olika perioder, av Peter Zackrisson, Lars Andersson, Bo Berggren, Jonas Hedlund, Karin Lundström, Victoria Svahn och Karin Odén (Geosigma AB). Uppdragets organisation framgår av Figur 2-1. Till sin hjälp har utredningen haft interna stödfunktioner inom ekonomi, CAD/GIS och IT.

Utrednings- och utvecklingsarbetet har bedrivits i nio olika specialutredningar som framförallt syftat till metodikutveckling, inventering av tidigare utredningar och analys av klimatförändringar. Ett stort antal medarbetare vid SGI liksom hos externa aktörer har medverkat i utredningsarbetet, vilket framgår av författarna till delrapporterna i Bilaga.

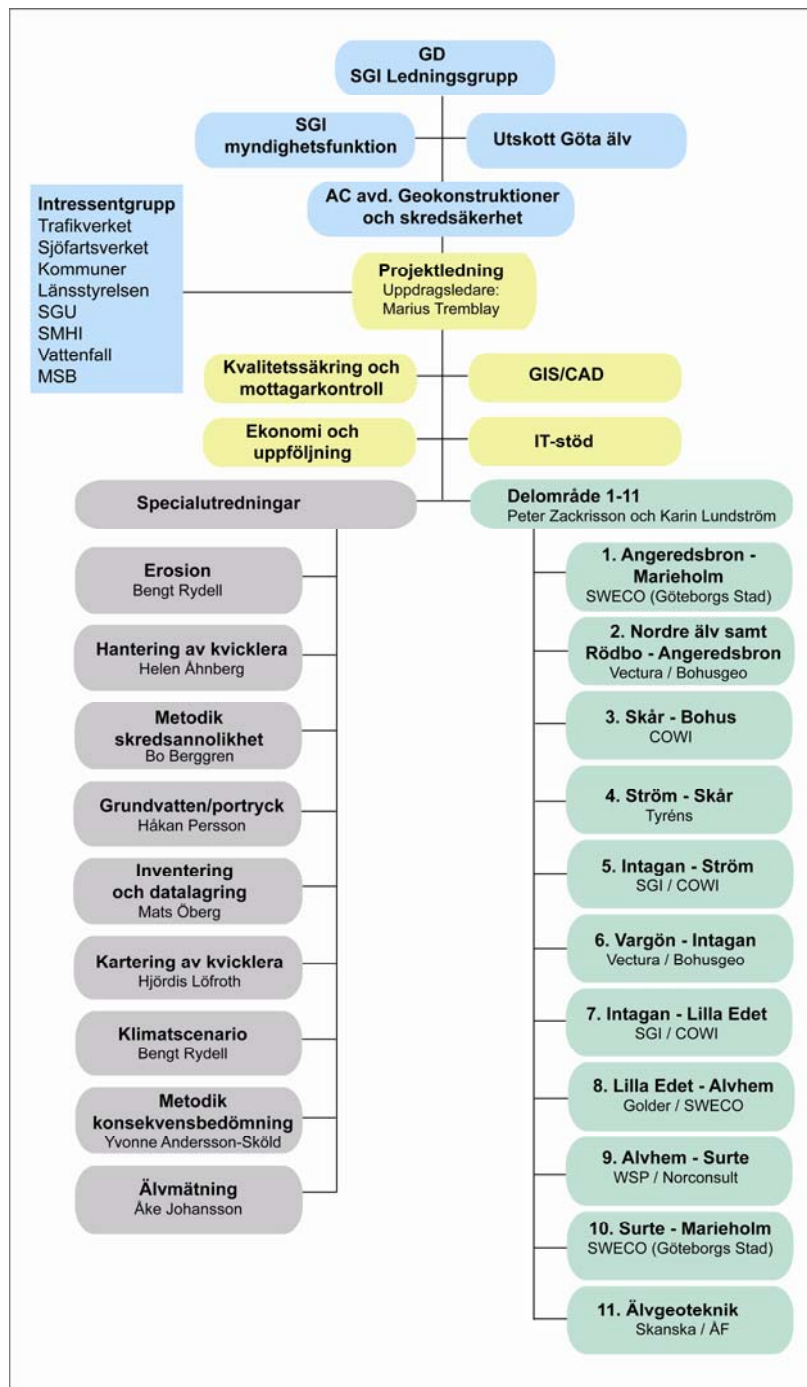
Utredningsområdet har delats in i totalt 10 olika geografiska delområden samt vattenområdena i älven, se Figur 2-2. För att förenkla lokalisering, benämning och hänvisning av utredda sektioner har två hjälplinjer skapats i Göta älv mellan Vargöns kraftverk (längdmätning km 0/000) och Marieholmsbron (längdmätning km 81/000) respektive i Nordre älv mellan Bohus (längdmätning km 100/000) och Kornhalls färjeläge (längdmätning km 111/600).

Till utredningen har knutits en intressentgrupp bestående av representanter från Sjöfartsverket, Trafikverket, Vattenfall, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), Sveriges geologiska undersökning (SGU), Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), Länsstyrelsen i Västra Götalands län samt kommunerna längs älven. Dessutom har en särskild dialog förts med Trafikverket med anledning av pågående investeringar för E45 och Norge-Vänerbanan. Stadsbyggnadskontoret i Göteborgs Stad genomförde under samma period som Göta älvutredningen bedrevs, en omfattande stabilitetskartering inom Göteborgs kommun. SGI och Göteborgs Stad har därför haft ett nära samarbete för att samordna stabilitetsutredningarna längs Göta älv inom kommunen.

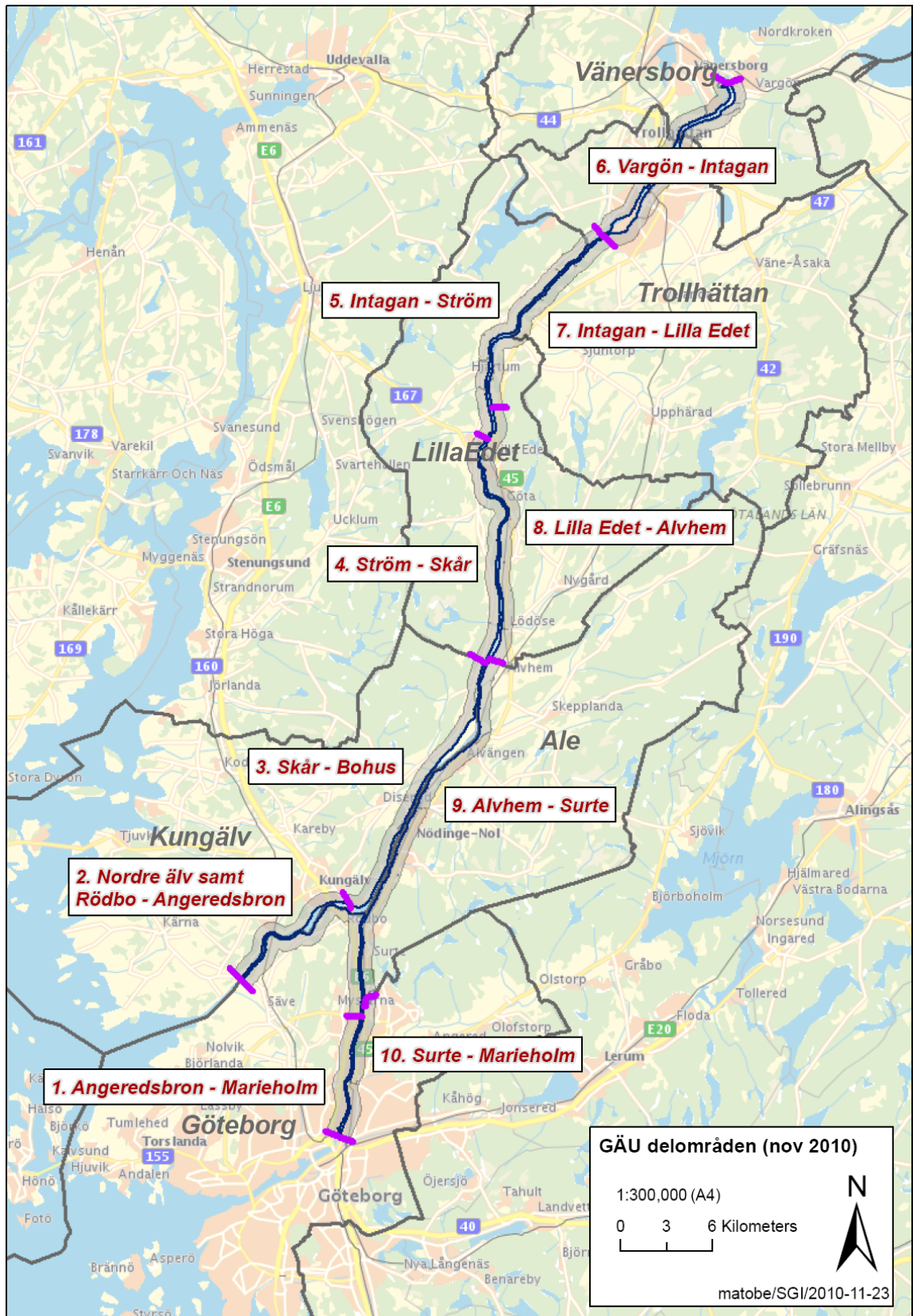
Under 2009 tecknade SGI ramavtal för utförande av geotekniska tjänster med 11 konsultföretag. Avrop från ramavtalet utnyttjades vid fem tillfällen och avtal tecknades med konsulter för sammanlagt nio olika uppdrag. De geotekniska tjänsterna bestod i utförande av geotekniska fältundersökningar på land och i älven, laboratorieundersökningar och stabilitetsberäkningar. Dessutom har andra konsultinsatser genomförts, till exempel för batymetriska mätningar, klimatanalys och delar av GIS-redovisning.

SGI är certifierade enligt ISO 9001 och ISO 14001 och arbetet med utredningen har granskats av interna medarbetare och externa konsulter. Dessutom har följande utförts för att kvalitetsgranska uppdraget:

- För stöd i utvecklingsarbete inom Göta älvutredningen har SGU, Norges geotekniska institutt (NGI), Chalmers tekniska högskola, Lunds universitet, SMHI, Deltares (forsknings- och konsultföretag verksamt i Holland) samt Universitetet i Stuttgart bidragit.
- I arbetet med upphandling och vidare under kvalitetsgranskningen av mätresultat från sammanställning av höjdmodell på land och under älven har Sjöfartsverket gett stöd till SGI.
- En intern kommitté på SGI för kvalitetssäkring och mottagningskontroll har granskat det arbete som utförts av externa konsulter. Granskningen har följt uppställda instruktioner. Avvikelser som framkommit i granskningen har sedan åtgärdats av konsulterna



Figur 2-1
Organisations-
schema för Göta
älvutredningen.



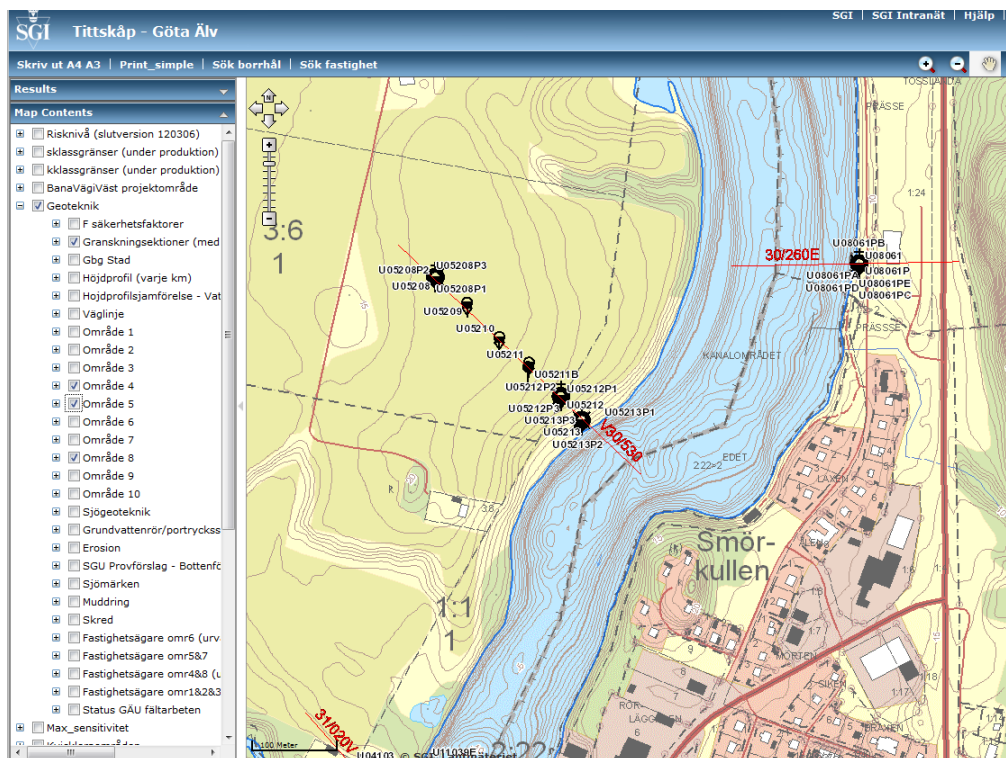
Figur 2-2
Geografiska delområden längs Göta älv dalen.
Bakgrundskarta
© SGI/Lantmäteriet

2.3 GIS-plattform och GIS-applikationer

I Göta älvutredningen har ett stort antal externa underlagsdata samlats in och utnyttjats, exempelvis geologiska förhållanden, fastighetsvärden, befolkningsstatistik, infrastruktur och förekomst av riskobjekt. Under utredningens gång har dessutom en mängd nya data och resultat framtagits. För att hantera den stora mängden data etablerades en GIS-plattform där data lagras i koordinatsystemet SWEREF99TM i plan och i höjdkoordinat-systemet RH2000.

Baserat på den framtagna GIS-plattformen byggdes även ett antal webbaserade GIS-applikationer med möjlighet att på ett lätthanterligt sätt ta del av insamlad och bearbetad data och där det i vissa applikationer skapades möjlighet att editera och redigera data i databasen.

Den enskilt viktigaste GIS-applikationen inom utredningen är det så kallade ”Tittskåp – Göta älv”. Det innehåller närmare hundra lager och hundratusentals geografiska objekt (till exempel punkter, linjer, ytor) med både underlagsdata från andra myndigheter och genererade resultat från utredningen. Exempel på användbara och lättillgängliga presentationer i tittskåpet har varit redovisningen av fältundersökningar i plan med tillhörande korrekt geoteknisk symbol och underliggande och klickningsbara undersökningsresultat. Vidare redovisas säkerhetsfaktorer från stabilitetsberäkningar samt höjdmodell och geologisk karta. Tittskåp – Göta älv har under utredningstiden varit ett mycket värdefullt verktyg och använts för digitaliserad ytrepresentation av stabilitets- och konsekvensklasser. I Figur 2-3 till 2-6 visas exempel på några presentationer av olika data i Tittskåp – Göta älv.

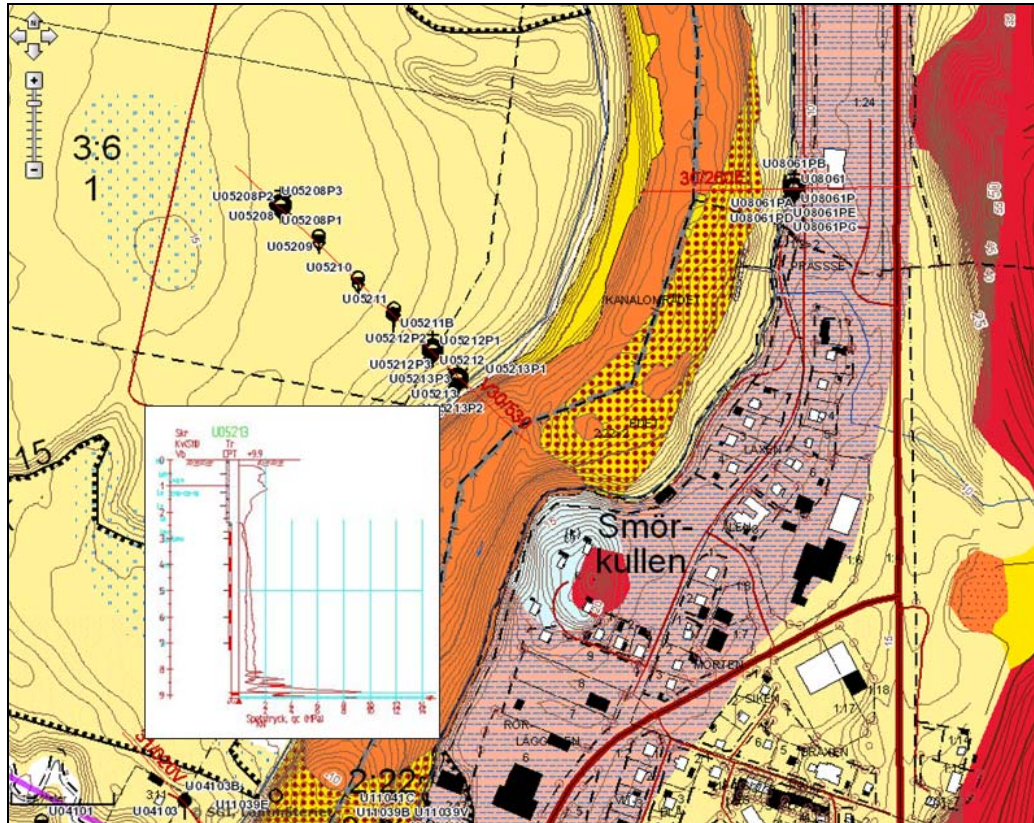


Figur 2-3
Presentation på fastighetskartan av undersökningssektioner, borrhål och höjdkonturlinjer med en meters ekvidistans.
Bakgrundskarta
© SGI/Lantmäteriet.

Figur 2-4

Presentation av jordartskarta inklusive jordartsgeologi i älven, höjdkurvor med en meters ekvidistans, undersökningssektioner samt borrhål och sonderingsdiagram (diagram från Geo-Suïte).

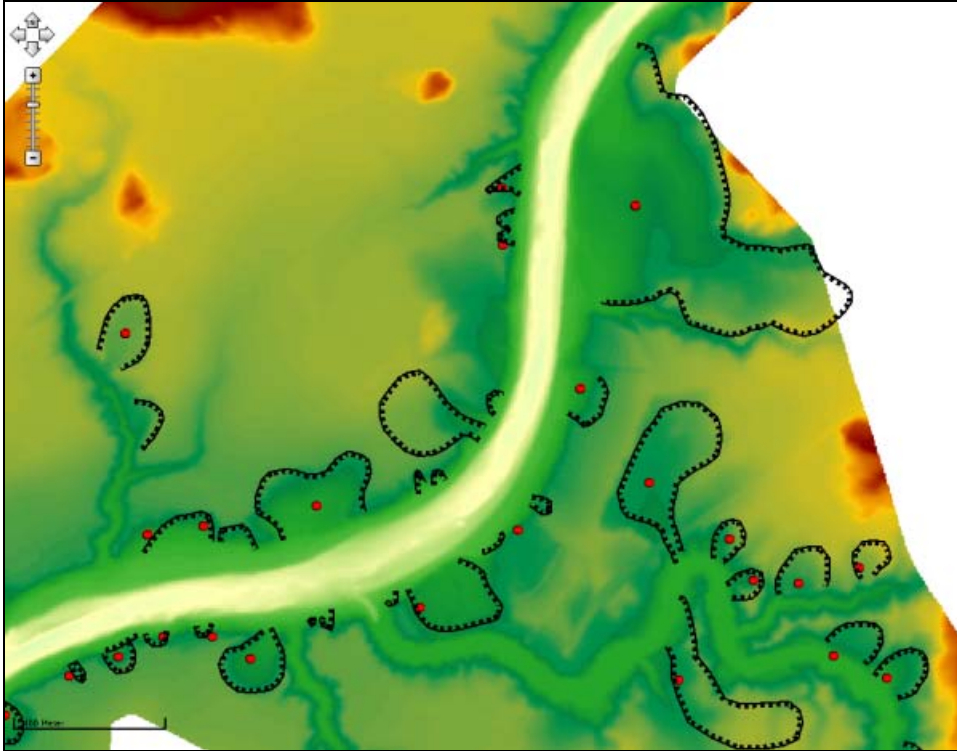
Bakgrundskarta
© SGI/Lantmäteriet

**Figur 2-5**

Presentation av ortofoto med vissa punkter och linjer ur fastighetskartan, höjdkurvor med en meters ekvidistans, borrhäktioner samt foto från GPS-kamera.

Bakgrundskarta
© SGI/Lantmäteriet





Figur 2-6
Presentation av terrängmodell (se vidare avsnitt 4.3) baserad på laserscanning över land och multibeam-ekolodning i älven.

3 Dagens och framtida klimat i Göta älvs dalgång

I detta kapitel redovisas dagens klimat i Göta älvdalen och förväntade förändringar av klimatet fram till år 2100. Klimatet i Göta älvdalen och dess tillrinningsområde har betydelse för värdering av förhållanden som påverkar stabiliteten hos slänterna längs Göta älv, bland annat erosion, vattennivåer i älven och i havet samt grundvattenförhållanden.

Klimatet i Göta älvdalen och dess tillrinningsområde påverkar stabiliteten hos slänterna längs Göta älv genom att nederbörden har en direkt inverkan på grundvattenförhållandena i slänterna. Slänter påverkas även av förändrad lufttemperatur genom att, till exempel, högre temperatur leder till kraftigare avdunstning, minskad markfuktighet samt utveckling av sprickor i lerans torrskorpa.

Vattenflödena i älven och dess biflöden har även betydelse för erosion av bottnar och slänter, vilket i sin tur påverkar slänternas stabilitet. Vattenflödet i älven styrs av den nederbördsmängd som faller i dess avrinningsområde, vilket omfattar Väneren och stora delar av Västra Götalands och Värmlands län med en yta av drygt 50 000 km². Vattenflödet i Göta älv är reglerat, men hänsyn måste tas såväl till nivåerna i Väneren som i Göta älv. Därför kan inte alla ojämnheter i tillrinningen jämnas ut. Exempelvis måste ett stort flöde tappas genom Göta älv för att begränsa de högsta vattennivåerna i Väneren vid långvarig kraftig tillrinning.

Stabiliteten för slänterna invid älven påverkas också av vattennivån i älven genom att vattenmassan utgör en stabiliserande och mothållande kraft på slänterna. Eftersom Göta älv är förbunden med havet har havsnivån betydelse för vattennivån i älven söder om Lilla Edet. Havsnivån, i sin tur, kommer att öka som en följd av den globala uppvärmningen.

Som underlag för Göta älvutredningen har SMHI utfört en utredning om framtida klimatförhållanden i Göta älvdalen (Bergström et al., 2011). Vänerens framtida nivåer och tappningar till älven har även studerats i en utredning för bland andra länsstyrelserna i Västra Götalands och Värmlands län (Bergström et al., 2010). Med utgångspunkt från dessa utredningar redovisas i detta kapitel en sammanställning av de meteorologiska förhållanden som har betydelse för släntstabiliteten i älvdalen. Dagens och framtida flöden i Göta älv och dess biflöden samt grundvattenförhållandena redovisas i kapitel 6 *Yt- och grundvattenförhållanden i dagens och framtida klimat*.

3.1 Dagens klimat

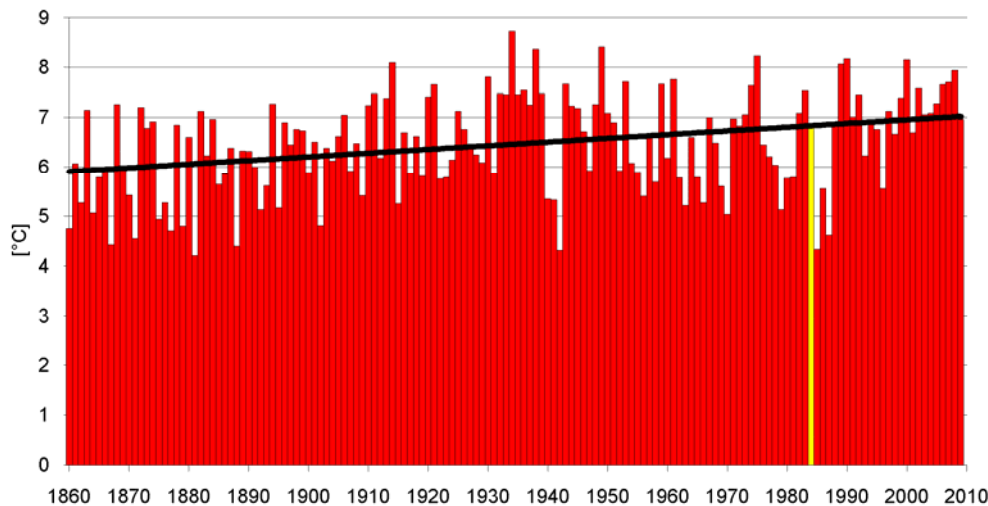
Temperaturerna i Göta älvdalen är till följd av närheten till västerhavet högre under vintern och lägre under sommaren i jämförelse med områden längre österut i landet. Månadsmedeltemperaturen under referensperioden 1961-1990 var som lägst omkring -2° C och uppmättes under januari och februari månad. Som högst var den omkring 17° C och inföll i juli (SMHI, 2011).

Närheten till västerhavet medför också större nederbördsmängder än i östra Sverige. Medel-nederbörden var under samma referensperiod omkring 800-900 mm/år (SMHI, 2011). Den mesta nederbörden föll under senhösten med uppemot 100 mm/månad under september till november. Februari till maj var generellt de torraste månaderna med runt 50 mm/månad. Antalet dagar med snötäcke under referensperioden var omkring 50-60 dagar/år och under dessa dagar föll omkring 15 % av årsnederbörden som snö (Västra Götaland, 2003 och SMHI, 2011).

Långvariga mätningar av temperatur och nederbörd i Sverige har sedan 1860 genomförts av SMHI. Mätningarna visar att såväl temperatur som nederbörd har ökat under den period som mätningarna har pågått. I Figur 3-1 och Figur 3-2 redovisas den långsiktiga utvecklingen av luftens årsmedeltemperatur respektive årsnederbörd uppmätt vid SMHI:s station i Vänersborg.

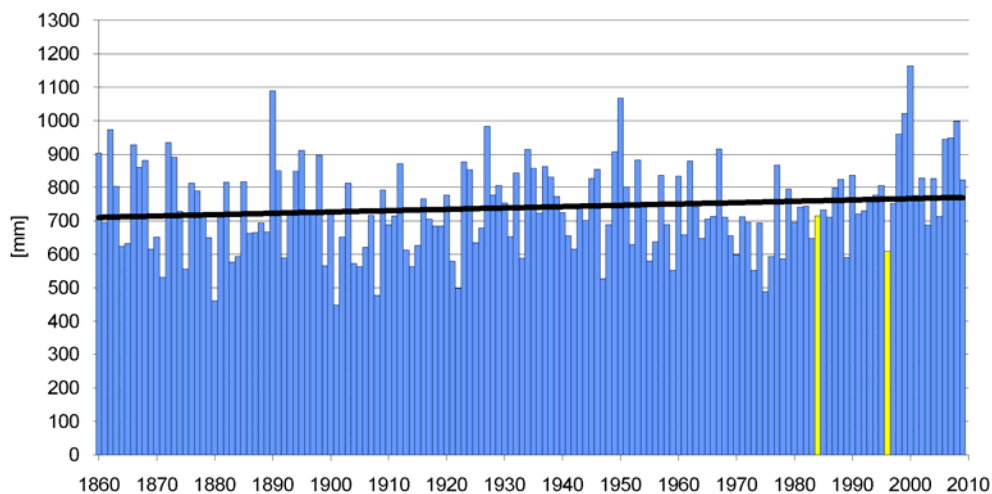
Figur 3-1

Den långsiktiga utvecklingen av luftens årsmedeltemperatur uppmätt vid SMHI:s station i Vänersborg. Dataluckor som fyllts i med hjälp av interpolation av observationer från Skara är markerade med avvikande färg. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden (Bergström et al., 2011).

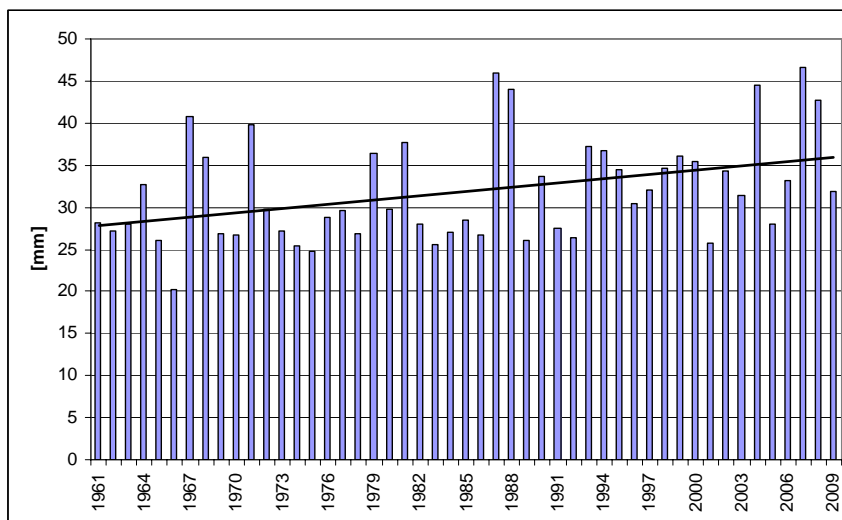


Figur 3-2

Den långsiktiga utvecklingen av årsnederbörden uppmätt vid SMHI:s station i Vänersborg. Dataluckor som fyllts i med hjälp av interpolation av observationer från Skara är markerade med avvikande färg. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden (Bergström et al., 2011).



I Figur 3-3 visas den långsiktiga utvecklingen av den mest extrema nederbörden i Västra Götalands län. Redovisningen är baserad på SMHI:s klimatdatabas för tillämpning av hydrologisk modellering, den så kallade PTHBV-databasen. Databasen täcker hela Sverige i ett 4 x 4 km rutnät. Figuren visar medelvärdet över regionen av årets högsta värde för varje beräkningsruta. Den är inte helt jämförbar med tidigare redovisade observationer baserade på direkta avläsningar vid mätstationer. Av figuren framgår att det varit en ökning av nivån på de mest extrema regnen sedan början av 1960-talet.



Figur 3-3
Den långsiktiga utvecklingen av den mest extrema nederbörden i Västra Götalands län. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden (Bergström et al., 2011).

3.2 Klimatförändringar

Den klimatanalys som utförts inom Göta älvutredningen (Bergström et al., 2011) baseras på ett stort antal klimatscenarier som beräknats med regionala klimatmodeller, av vilka de flesta ingår i det europeiska ENSEMBLES-projektet. I klimatanalysen redovisas framtida nederbörd och temperatur samt framtida förändringar i tillrinning. Utifrån dessa förändrade tillrinningar har beräknats förekomst av låga och höga flöden i Göta älv. Dessutom redovisas framtida förändring av markfuktighet i Vänerns närområde, vilken tillsammans med nederbördsförändringar använts vid bedömningen av den framtida grundvattensituationen, se vidare kapitel 6. En sammanställning har också gjorts av flera internationella studier som prognosticerar förändringen av den globala havsnivån fram till år 2100.

Generellt gäller att bedömningarna av framtida klimatförhållanden ofta är förknippade med stora osäkerheter. Spridningen i resultaten för de enskilda klimatscenarierna och de olika klimatmodellerna blir större ju längre in i framtiden man blickar. De storleksordningar och värden som anges i detta kapitel är typvärden eller medelvärden från de aktuella klimatanalyserna. Eftersom osäkerheten kan vara stor, måste de nedan angivna värdena användas med försiktighet.

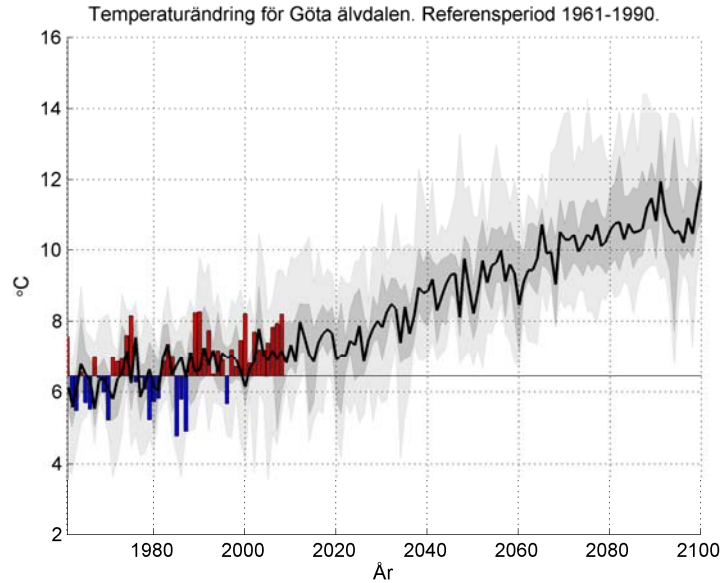
Temperatur och nederbörd i ett förändrat klimat

Meteorologiska mätningar och analyser visar att det varit en ökning av såväl nederbörd som temperatur i Göta älvdalen under det senaste århundradet. För extrem nederbörd gäller detta för de senaste 50 åren, men tiden dessförinnan har inte analyserats.

Med utgångspunkt från klimatscenarierna har den framtida temperatur- och nederbördsutvecklingen i Göta älvdalen beräknats. För Göta älvs tillrinningsområde väntas klimatet förändras i huvudsak på ett liknande sätt som i älvdalen. Av Figur 3-4 framgår att **årsmedeltemperaturen** förväntas öka med 4-5°C vid seklets slut jämfört med dagens förhållanden (referensperiod 1961-1990). Ökningen förväntas bli störst under vintern och minst under sommaren.

Figur 3-4

Den framtida beräknade temperaturutvecklingen i Göta älvdalen för hela året baserad på 16 klimat-scenarier. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75 % percentilen, medianvärdet (svart linje), 25 % percentilen och minimivärdet av årsmedeltemperaturen från samtliga klimatberäkningar. Referensperiodens medelvärde visas med en horisontell linje (Bergström et al., 2011).

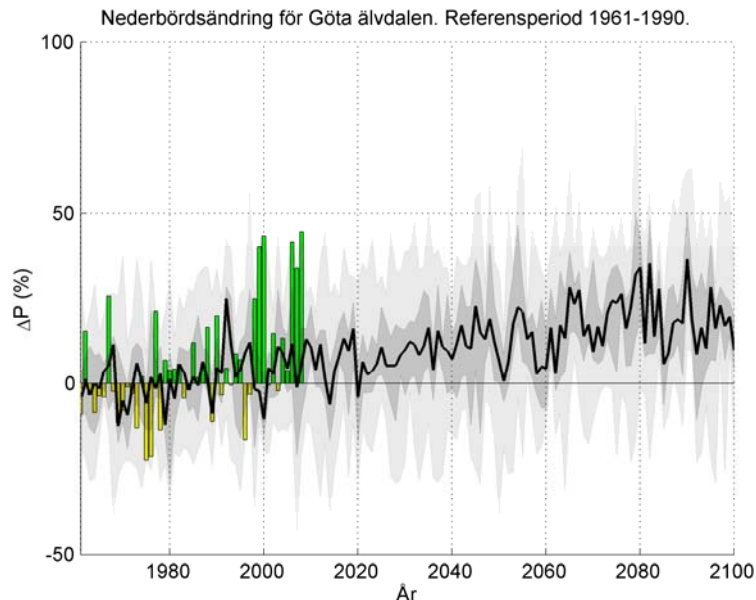


Som framgår av Figur 3-5 kan en gradvis ökning av **årsnederbörden** förväntas i Göta älvdalen under de kommande 90 åren med 20-30 % högre nederbörd vid seklets slut jämfört med dagens förhållanden (referensperiod 1961-1990). Nederbörden ökar mest under vintern men resultaten har stor spridning. Det bör också noteras att under samma tid visar klimatberäkningarna att årsmedeltemperaturen ökar med 4-5°C, vilket innebär att även avdunstningen ökar.

Nederbörden i Göta älvs tillrinningsområde väntas framöver att öka under vintern och minska under sommaren, medan den under vår och höst inte förändras i någon större utsträckning.

Figur 3-5

Den framtida beräknade nederbördsutvecklingen i Göta älvdalen för hela året baserat på 16 klimat-scenarier. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75 % percentilen, medianvärdet (svart linje), 25 % percentilen och minimivärdet av årsnederbörden från samtliga klimatberäkningar (Bergström et al., 2011).



När det gäller förändring av tillfällena med extrem dygnsnederbörd är det rimligt att för Göta älvdalen tills vidare räkna med att den framtida ökningen sker linjärt, vilket skulle innebära en ungefärlig ökning med 10 % till mitten av seklet och med 20 % till 2100 för en återkomsttid av 100 år.

3.3 Havsnivåer i dagens och framtida klimat

Havets nivå vid utloppet av Göta älv har mätts under lång tid och karakteristiska värden för hög-, medel- och lågvattennivåer har sammanställts för Göta älvutredningen av Bergström et al. (2011).

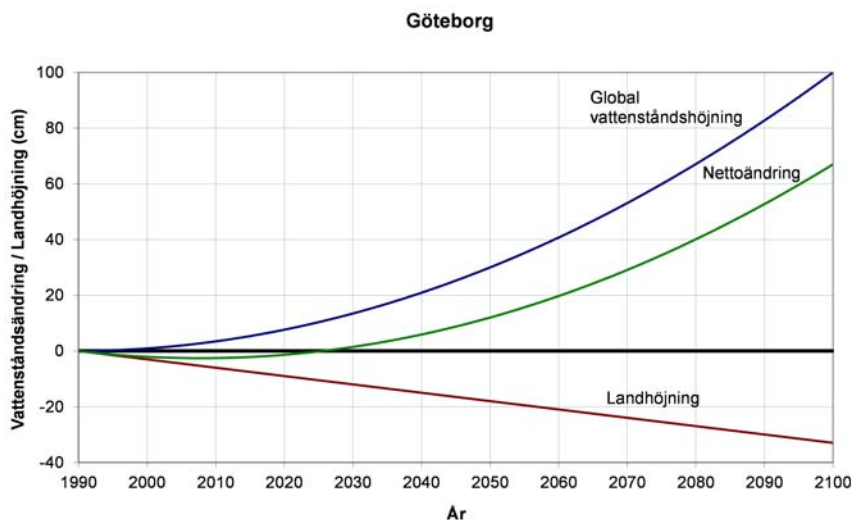
Vattennivåerna i havet påverkar vattenstånden söder om Lilla Edet och därmed möjligheterna att tappa vatten från Väneren. Till följd av landhöjningen förändras hela tiden förhållandet mellan land och havsnivå. Den globala havsnivån stiger för närvarande med nästan samma belopp som landhöjningen i Göteborg, det vill säga med cirka 3 mm/år.

Den globala uppvärmningens påverkan på havets framtida nivå beror av flera förhållanden. De viktigaste är den termiska expansionen (vattnets utvidgning vid uppvärmning) och bidrag från smältande glaciärer och de stora landisarna på Grönland och Antarktis. Men det finns stora lokala skillnader, som beror på ändrade salthaltsförhållanden, ändringar i det lokala vindklimatet, ändrade gravitationsfält när de stora isarna smälter och till och med ändrade landhöjnings- och landsänkingsförhållanden när belastningen på jordskorpan förändras om trycket från de stora isarna minskar. Oftast har de mest extrema vattennivåerna störst lokal betydelse och påverkas kraftigt av förändrad frekvens, intensitet och riktning hos stormar.

Framtida havsnivåer redovisades av den internationella klimatpanelen IPCC (IPCC, 2007) som i sitt arbete utgick från den då tillgängliga klimatforskningen. Därefter har flera vetenskapliga artiklar publicerats som betonar risken för att isavsmältningen kan komma att ske snabbare och att världshavet kan komma att stiga mer än vad som tidigare antagits. Sammanställningar och bedömningar av framtida havsnivåer för specifika regioner har också redovisats.

Det bör observeras att de flesta uppskattningar som förekommer om framtida havsnivåer bygger på IPCC:s utsläppsscenarioer. Det innebär att effekterna av eventuella utsläpps begränsningar till följd av internationella avtal inte medräknats. I det fall utsläpp av växthusgaser kan begränsas minskar ökningen av havsnivåns stigning, men på grund av klimatsystemets stora tröghet upphör den inte helt.

I klimatanalysen för Göta älv har en genomgång gjorts av flera internationella studier och det har konstaterats att bedömningarna av havets framtida nivåer varierar avsevärt samt att de regionala skillnaderna är stora. Den bedömning som gjorts är att havets nivå kommer att öka med cirka 0,3 m till år 2050 och omkring en meter till år 2100 (Bergström et al., 2011). Genom landhöjningen kommer effekten i Göteborg att reduceras till cirka 0,15 m respektive cirka 0,7 m enligt Figur 3-6.



Figur 3-6
Nettohöjning av havet i Göteborg fram till 2100 under antagande av en global havsnivåhöjning på 0,3 m till år 2050 respektive 1 meter till år 2100 räknat från referensåret 1990. (Bergström et al., 2011).

Kortvariga extrema vattenstånd är oftast kopplade till stormar. Befintliga regionala klimatscenarier ger inte någon entydig bild av hur dessa utvecklas. Det innebär att det inte finns något underlag för rekommendationer om hur hänsyn ska tas till ändrad stormintensitet eller stormfrekvens och därmed sammanhängande höga vattennivåer i ett framtida klimat i Göteborgsområdet.

För samhällsplaneringen är den långsiktiga utvecklingen av klimatet bortom år 2100 också av intresse. Vissa internationella utredningar bedömer att havets fortsatta stigning kan uppgå till 2-4 m. Osäkerheten är dock mycket stor eftersom framtida utsläpp och en rad återkopplingsmekanismer, som endast är lite kända, påverkar beräkningarna.

Fakta i korthet

- Klimatscenerierna visar att årsmedeltemperaturen kan förväntas öka med 4-5° C och nederbörden öka med 20-30 % fram till år 2100.
- Havets nivå i Göteborg bedöms att öka med cirka 0,15 m till år 2050 och med omkring 0,7 m till år 2100 med hänsyn till landhöjning.
- Klimatanalysen baseras på klimatscenarier som beräknats med regionala klimatmodeller. Bedömningarna av framtida klimat innehåller stora osäkerheter.

4 Geologi och landformer

Detta kapitel syftar till att ge en förståelse för de geologiska förhållanden och landformer i älvdalen som har betydelse för skred och erosion. De geologiska förhållanden som främst är intressanta är jordart, jordlagerföljd, jorddjup, grundvattenförhållanden, förhållanden vid jordlagrens bildning och högsta kustlinjens läge i området. Kunskap om områdets landformer ger god förståelse för pågående processer och topografiska förutsättningar för skred och erosion.

Göta älvdalens skredkänslighet är ett resultat av de geologiska, geotekniska och morfologiska förhållandena. Göta älvdalen har den högsta frekvensen av skred i Sverige. I SGI:s skreddatabas finns ett 60-tal skred och jordrörelser registrerade längs Göta älv, där de flesta av skreden inträffat på sträckan mellan Lilla Edet och Trollhättan (SGI, 2012b). Av de fyra till ytan största dokumenterade skreden (> 20 ha) har ett inträffat norr om Lilla Edet (Intagan) och tre söder om Lilla Edet (Göta, Jordfallet och Surte).

Av Göta älvs större biflöden är det främst Slumpån och Lärjeån som är drabbade av skred och ravinbildning. Även längs Grönån finns flera skredärr men inga i direkt anslutning till älven. Inga större skred eller jordrörelser längs Nordre älvs stränder finns dokumenterade i skreddatabasen eller har registrerats vid analyser av terrängmodellen, däremot finns ett antal raviner och djuphålor noterade längs Nordre älv.

De geologiska förhållandena påverkas av människans aktiviteter. Under årens lopp har omfattande utfyllnader gjorts i anslutning till älven och leran har på flera håll kommit att täckas av utbredda fyllnadsmassor. I dessa massor har ibland också föroreningar ansamlats, vilket ytterligare påverkar markens egenskaper. Dagens markförhållanden är således en kombination av naturliga geologiska förutsättningar och mänsklig påverkan.

4.1 Geologiska förhållanden

Berggrund

Berggrunden i Göta älvdalen tillhör den Baltiska urbergsskölden och utgörs huvudsakligen av kristallina bergarter med varierande kemisk sammansättning och textur, främst gnejser med inslag av diabas och granit (Samuelsson, 1985).

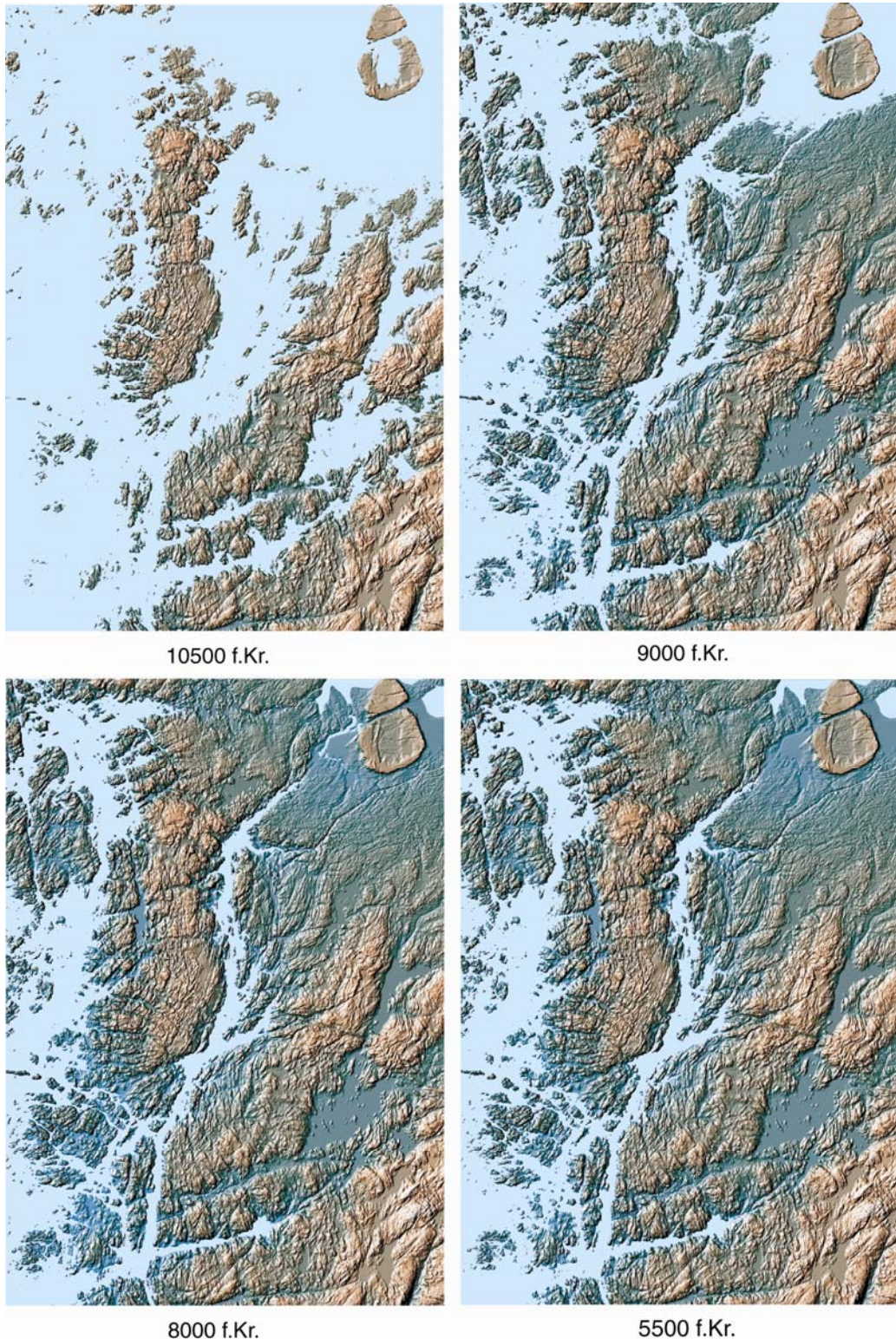
Rörelsezoner i berggrunden har orsakat ett omfattande spricksystem som starkt påverkat utformningen av dalgången. Själva älvfårens sträckning sammanfaller till största delen med en markerad förkastningszon som sträcker sig från Vänerbäckenet och förbi Göteborg. I denna förkastningszon har berget skjivats i vertikalled och därmed orsakat ett system av brantstående sprickor (Samuelsson, 1985 och Klingberg et al., 2006).

I höjd med Lilla Edet ändrar dalgången riktning, från nordöst-sydväst norr om Lilla Edet till nord-syd söder om Lilla Edet.

Följder av landhöjningen

Under den senaste istiden (cirka 110 000–6 000 f.Kr) var hela Skandinavien nedisat. Den tunga belastningen från den 2-4 km tjocka landisen tryckte ned den skandinaviska berggrunden, s.k. isostatisk nedpressning. Vid nedisningens maximum beräknas Göta älvdalen ha varit nedpressad cirka 150 m (Berg och jord, 1994). Efter istiden, då den tunga lasten från landisen hade försvunnit blev processen omvänd, och Skandinavien har åter lyfts upp isostatiskt genom den så kallade postglaciala landhöjningen – en process som fortfarande

pågår. Landhöjningen är långsam och har en avtagande hastighet, och längs Göta älv dalen är den idag 1-3 mm per år. Processen hur landytan successivt lyfts upp över havsytans nivå illustreras av de fyra kartorna i Figur 4-1, som visar situationen i den södra delen av Vänern, Göta älv dalen och Göteborgs lokala kustområde. Hastigheten på landhöjningen har successivt minskat.



Figur 4-1
Landhöjningsprocessen i Göta älv dalen och dess närhet. Markytan har genom landhöjningen successivt blivit upplyft över havet. Situationen i södra delen av Vänern, Göta älv dalen och Göteborgs lokala kustområde 10500 f.Kr, 9000 f.Kr, 8000 f.Kr. och 5500 f.Kr. (Efter Klingberg et al., 2006). Kartor: © SGU

Under tusentals år efter isavsmältningen var många områden, som idag utgör torra land, täckta av öppet hav och fjärdar och genom sedimentation avlagrades delvis mäktiga marina bottenlager av lera och av silt på dessa havsbottnar. På grund av landhöjningen återfinns idag dessa tidigare marina bottenlager som jordlager på land utmed Göta älvs dalgång. Även andra typer av jordlager som svämsediment, organisk jord, isälvsmaterial och morän förekommer. Jordlagren av lera och silt överlagrar ofta morän och isälvsmaterial.

Stränderna med lerlager längs Göta älv och dess biflöden har eroderats varvid delvis branta slänter har bildats.

Jorddjup

På grund av de mäktiga jordlager som idag överlagrar bergytan är det på flera håll svårt att exakt bestämma djupet till berg. Inom Göta älvutredningen har ett stort antal sonderingar utförts till tämligen stora djup. I vissa fall har bergytan nåtts och jorddjupet därmed kunna fastställas, men eftersom syftet inte varit att kartlägga djup till berg, har sonderingarna avbrutits vid 40-45 m djup, om berg inte påträffats dessförinnan. Genom seismiska undersökningar utförda av Klingberg et al. (2006) har dock ungefärliga jorddjup i älven bedömts. Generellt råder stora jorddjup i dalgången söder om Lilla Edet. Mellan Lilla Edet och Göteborg är jorddjup över 100 m vanliga och i höjd med Alafors och vid Älvängen ligger berget sannolikt på ett djup av drygt 200 m. Norr om Lilla Edet är jorddjupet betydligt mindre, och på flera ställen exponeras berget på älvbotten. Vid Slumpåns utlopp påträffas berg mellan 7 och 15 m under älvens botten.

Avsättningsförhållanden

En beskrivning av de geologiska avsättningsförhållandena i Göta älv dalen ges bland annat av Fredén (1994 och 1986), Klingberg et al. (2006) samt i Berg och jord (1994). En sammanfattande beskrivning, baserad på dessa, ges nedan.

Under isavsmältningen för cirka 14 500 år sedan transporterades stora mängder suspenderade silt- och lerpartiklar med smältvattnet och avsattes som mäktig glacial, marin lera i dalgången, som då var en saltvattenmiljö i ett arktiskt ishav. För mellan 11 000 och 10 000 år sedan var landhöjningen påtaglig och Göta älv dalen kom att bilda en lång, smal och djup havsvik där det salta vattnet nådde in söder om Trollhättan. Under denna period dränerades omfattande vattenvolymer genom Vänerbäckenet och ut mot Västerhavet. Älvens mynning i havet låg under flera tusen år nedströms fallen vid Trollhättan och har därefter stegvis förflyttats söderut.

Avsättning av glacial lera skedde under högsta kustlinjen (HK) som på grund av landhöjning efter isens tillbakadragande idag återfinns ungefär 100 m över havet i Göteborg och på ungefär 130 m höjd över havet i Trollhättan. På grund av landhöjningen ändrades successivt förutsättningarna för bildandet av jordlagren i Göta älv dalen. De avsatta lagren med glaciala leror började eroderas. För cirka 7 500 år sedan steg dock havsytans nivå snabbare än landhöjningen (postglaciala transgressionen) och havsstranden i den södra delen kom därför att ligga högre då, jämfört med för 10 000 år sedan. I den miljön kunde eroderade glaciala leror avsättas på nytt som postglacial lera i den nybildade havsviken. Samspelet mellan havsnivåförändring och landhöjning innebar att nya lager av lera, sand och grus kunde avsättas över tidigare landområden. För 4 500 år sedan nådde sundet inte längre in än till Lilla Edet, och för cirka 2 000 år sedan fick älven i det närmaste det utseende den har i dag.

Vid flodmynningar bildas deltan eftersom strömningshastigheten i mynningszonen minskar och partiklar därmed får möjlighet att sedimentera. Mynning i saltvattenmiljö innebär också att lerpartiklar kan flockulera, vilket gynnar sedimentering av material. I Nordre älvs mynningsområde finns idag ett (recent) mynningsdelta utbildat av finkorniga sediment.

Genom variationer i läget för älvens mynning påträffas äldre deltan på olika ställen längs älven. De flacka lerplanen vid Utby och Torpa, söder om Lilla Edet, är exempel på liknande finkorniga mynningsdeltan som bildats innan flodmynningen försköts söderut.

Jordlagerföljden i Göta älvdalen

Jordlagren i Göta älvdalen utgörs i huvudsak av lera som underlagras av någon eller några meter friktionsjord. I områden som berörs av randstråk är friktionsjordens mäktighet dock betydande. Generellt är lermäktigheten större i södra än i norra delen av dalgången. Vid dalens sidor, upp mot fastmarken, går friktionsjorden ställvis i dagen. Den allmänna geologiska bilden har i allt väsentligt styrkts av arbetet inom Göta älvutredningen. Utredningen har också bidragit med omfattande nya data kring jordlagerföljder och kring lerjordarnas uppbyggnad.

Lagerföljden i Göta älvdalen finns redovisad i beskrivningarna till jordartskartorna Vänersborg SO (Fredén, 1984), Göteborg NO (Fredén, 1986) samt Marstrand SO/Göteborg SV (Adriellsson & Fredén, 1987), av Hillefors (1974), i Berg och Jord (1994) och översiktligt av Sundborg & Norrman (1963). En sammanfattande beskrivning, baserad på dessa rapporter och sådant som framkommit inom utredningen, redovisas nedan.

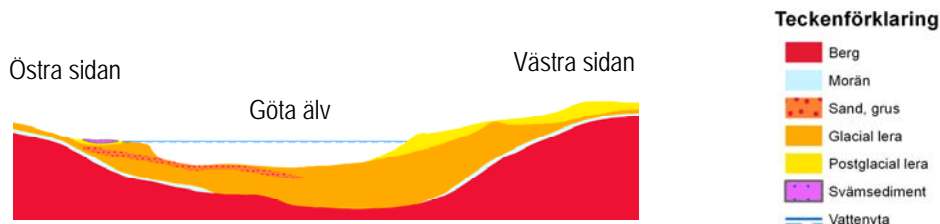
Lagerföljden karaktäriseras allmänt av glaciala marina leror som avsatts direkt på berggrunden eller på tunna lager av grovkorniga sediment som morän och isälvsmaterial. Mellan Bohus och Lödöse förekommer grova sediment med stora mäktigheter under den glaciala leran och norr om Lärje finns en mäktig isälvsavlagring som ingår i Göteborgsmoränen. Lerorna är på många ställen genomsatta av tunna skikt av grovkornigare material, som genom vågverkan svallats ut från dalsidorna. På många platser finns postglacial lera och sand ovanpå den glaciala leran.

I den norra delen av dalgången dominerar den glaciala finleran, som här har en lerhalt på mellan 40 och 60 procent. Denna glaciala finlera är gråblå till färgen, förutom i torrskorpan som vanligen har mörka nyanser av grått och brunt. Torrskorpan är i regel 1-2 m mäktig och är mäktigast på höga strandbrinkar. Under torrskorpan har leran låg skjuvhållfasthet för att därunder öka i fasthet med djupet.

I den södra delen av älvdalen (längs både Göta och Nordre älv) utgörs den undre (äldsta) delen av glacial lera med skikt av sand och silt. Lerskiktens mäktighet ökar högre upp i lagerföljden medan sand- och siltskikten minskar i frekvens. Lerhalten i de olika lerskikten varierar mellan 15 och 40 procent, medan lerhalten i den mäktigaste delen av den glaciala lerlagerföljden ligger mellan 30 och 60 procent. Förekomst av marina djur- och växtfossil, arktiska foraminiferer (amöbor) och plankton, visar att lersedimentationen ägt rum i ett ishav och med ett relativt stort vattendjup. Den mäktiga delen av den glaciala lerlagerföljden är homogen och gråblå i färgen med mörka skikt av järnsulfid.

Postglaciala leror i Göta älvs dalgång finns främst på nivåer under cirka 25 m över havet, vilket innebär att de längs älven påträffas nedströms Trollhättan. De postglaciala lerorna i dalgången är sällan mäktigare än 15 m och ett ytlager (mindre än 0,5 m) av postglaciala sediment av varierande kornstorlek (lera till grus) återfinns i nästan hela älvfåran. Postglacial lera kan vara svår att skilja från den glaciala leran, men den postglaciala leran har grå färg och är vanligen otydligt skiktad. De flacka partierna i dalgången är ofta ett resultat av att postglacial lera bildats.

Sektioner över typiska jordlagerföljder tvärs genom Göta älvs dalgång uppströms Slumpån och nedströms Älvängen redovisas i Figur 4-2.



Figur 4-2
Sektion med typisk jordlagerföljd tvärs Göta älvs dalgång uppströms Slumpån (övre sektion) och nedströms Älvängen (nedre sektion).

Längs älven förekommer även på flera platser svämsediment som vanligen har en mäktighet av 1-3 m. Förekomst av gyttjeleror och lergyttjor i de postglaciala sedimenten är ett resultat av att organiskt material inlagrats i lerorna när klimatet successivt blev varmare för cirka 10 500 år sedan.

De nordliga delarna av älven karaktäriseras av att glacial lera är exponerad i älvens botten medan postglaciala sediment förekommer sporadiskt i form av bland annat svallsediment längs älvfårans sidor. I den sydliga delen av dalgången har älven istället skurit sig ner genom postglaciala sediment och älvfårans sidor består därför huvudsakligen av postglacial lera medan botten i älvfåran kan bestå av glacial lera (Klingberg et al., 2006). Resultatet från multibeam-ekolodningar har utvärderats för att bedöma typen av ytliga botten sediment. Älvfåran är på de flesta platser täckt av tunna ytlager av sand men vid Dössebacka och norr om Lilla Edets sluss förekommer stora sandmäktigheter. Sandavlagringen på älvens botten vid Dössebacka tros vara under tillväxt och med en liten deltafront som rör sig söderut. Sandvågor vinkelrätt älven förekommer på deltaytan och dessa framträder tydligt i de bottenkanningar som genomförts.

Exempel på sediment på älvens botten framgår av Figur 4-3 till Figur 4-5.



Figur 4-3
Ytsediment tagna under Nordre älv. Svartgrå gyttjig lera, något sulfidfärgad och med rotgångar under ett tunt skikt av brungrå lera. Foto: SGI.



Figur 4-4
Ytsediment tagna under Göta älv, Göteborgsgrenen. Grå homogen postglacial lera. Den översta millimetern är brunare i karaktären och innehåller silt- och sandkorn. Foto: SGI.



Figur 4-5
Ytsediment tagna under Göta älv, söder om Göta. I ytan ett brunt skikt av lerig gyttjig silt, därunder, en grå lerig finsandig silt. Foto: SGI.

Älvdalen genomkorsas av tre stråk av ändmoräner som löper i nordväst-sydöstlig riktning och som bildades när iskanten stod stilla under en längre period (100-200 år) i så kallade israndlägen. Den sydligaste ändmoränen är Göteborgsmoränen som korsar Göta älvdalen söder om Nordre älvs mynning och norr om Lärjeåns utlopp. Därefter följer Berghemsmoränen som korsar älven ungefär vid Nol samt Trollhättemoränen vid Trollhättan. Randlägena syns ställvis på båda sidor om älven som moränrygggar och drumlinliknande bildningar.

Vid Dössebacka (del av Berghemsmoränen) finns en mäktig drumlinformation som innehåller både isälvs sediment och morän, se Figur 4-6 och Figur 4-7.



Figur 4-6
Del av Dössebackaformationen. Foto: SGI.



Figur 4-7
Ytsediment i älven ut-
anför Dössebacka.
Brun sand med växtde-
lar. Foto: SGI.

Vid Ellesbo (del av Göteborgsmoränen) finns ytterligare en drumlin. Därtill återfinns randlägena som grovkorniga isälvs sediment under den glaciala leran i höjd med Lärje, Agnesberg och Surte (Göteborgsmoränen) samt mellan Bohus och Älvängen (Berghemsmoränen). Mellan dessa större ändmoräner finns flera stråk av mindre ändmoräner och isälvsavlagringar. Speciellt tydligt är det vid Lilla Edet där det finns två isälvsavlagringar – Backamodeltat och Dunnebacken – som ingår i ett randstråk tvärs över Göta älv. I närheten av isälvsavlagringarna har isälvs sediment svallat ut över den glaciala leran. Mäktigheten av dessa grovkorniga svallavlagringar är generellt liten (0,5-1 m) även om utbredningen kan vara stor. På flera håll längs älvdalen har isälvsavlagringarna exploaterats genom uttag av sand och grus och är inte längre lika tydligt framträdande.

Gemensamt för isälvsavlagringar är att de är uppbyggda av horisontella och snedställda skikt och lager av olika friktionsjordar. I flera fall kan lagren vara störda genom påverkan av isrörelser. Förekomsten av grövre sediment, hur de ligger i skikt och med vilken lutning, hur de återfinns i förhållande till berg och hur de överlagras av lera, har betydelse för grundvattenflödet. I områden med grövre sediment som överlagras av lera eller där grövre skikt finns inlagrade i leran kan artesiskt grundvatten uppträda och lager av högsensitiv lera eller kvicklera kan bildas i dessa miljöer, vilket närmare beskrivs nedan.

Kvicklera

Genom landhöjningen har grundvattenströmningen efterhand medfört att de saltvattenavsatta lerorna på många platser urlakats på salter. I dessa urlakade leror kan bindningskrafterna mellan lerpartiklarna försvinna om leran utsätts för omrörning eller vibrationer. Lerskelettet, som även innefattar hålrum (porer), kan då falla ihop varvid hållfastheten i leran så gott som helt förloras. Dessa leror kallas för kvickleror och är vanliga i Göta älvs dalgång, speciellt norr om Lilla Edet. Kvicklera kan förekomma både som enhetliga lerområden och som större eller mindre kroppar inne i mer normal lera.

Förekomst av kvicklera har avgörande betydelse för utbredningen av eventuella skred. De flesta större skred som förekommer längs Göta älvdalen har skett just i kvicklera. Inom ramen för Göta älvtutredningen har särskild uppmärksamhet ägnats åt att identifiera och kartera förekomsten av kvicklera och högsensitiv lera.

Artesiska grundvattenförhållanden

Den uppspruckna berggrunden längs dalgången har gett upphov till stora nivåskillnader, som på sina ställen uppgår till mellan 200 och 300 m. Detta påverkar bland annat grundvattenförhållandena. Infiltration på höjdpartierna och grundvattenströmning från dessa längs underliggande morän, isälvsavlagringar och inbäddade grövre sediment i de ofta mäktiga lerlagren, ger förutsättningar för höga och ibland artesiska grundvattentryck i lerlagren i angränsande dalgångar.

4.2 Topografi och landformer

Landformerna i Göta älvdalen är resultat av pågående geologiska processer som erosion, skred och ras. Älvfåran i dalen omformas successivt på grund av de krafter som den utsetts för av strömmande vatten, vågor, landhöjning, ändrade grundvattenförhållanden samt mänskliga ingrepp.

I Sundborg & Norrman (1963) beskrivs hur strandmorfologin i Göta älvdalen avsevärt förändrats sedan tiden före och omedelbart efter kanalombyggnaden 1916 på grund av Vänerregleringen och ökad fartygstrafik samt förändrad markanvändning. En beskrivning finns även i Rydell et al. (2011a).

Muddringsarbeten har utförts på flera platser längs älven och en redogörelse för arbeten utförda före 1960-talet beskrivs av Sundborg & Norrman (1963). I Göteborgsgrenen utfördes muddring för att möjliggöra fartygstrafik redan i mitten av 1800-talet och i samband med upprustning av hela älven under 1910-talet utfördes omfattande muddringar längs flera sträckor. Efter skredkatastroferna i Surte och Göta deponerades betydande mängder muddringsmaterial inom djupa delar av älven. På 1950-talet tippades muddringsmassor på en sträcka av en kilometer nedströms Nols järnvägsstation och år 1957 utfylldes bland annat delar av djupområdet vid Smörkullen norr om Lilla Edet. Vidare tippades muddringsmassor från Götaskredet vid Tosslanda norr om Lilla Edet och vid Ivarslund, Ödegärdet, Bäcksholmen, Alvhem, Signehögsholmen och Nol, alla söder om Lilla Edet. I Göteborgs hamn muddras årligen cirka 50-80 kton sediment (Brack et al., 2001 och Göteborgs hamn, 2010).

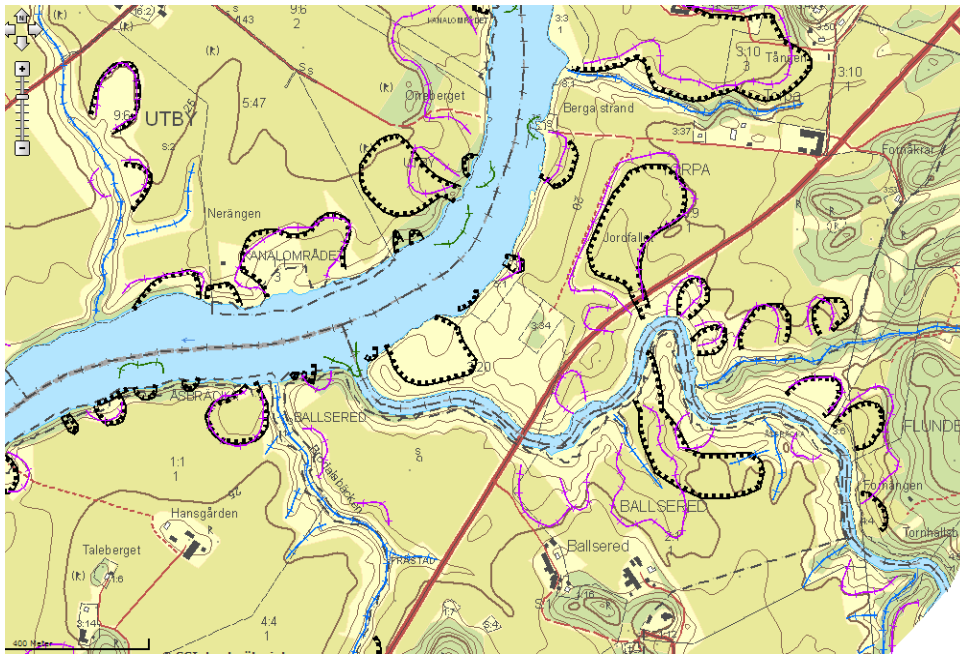
Vattendjupet i älvens mitt varierar kraftigt längs sträckan uppströms Lilla Edet. Djupet vid exempelvis Åkerström och Stallbacka är endast omkring 6-7 m medan det vid Hjärtum och Vargön finns vattendjup på 20-25 m. Nedströms Lilla Edet är variationerna i vattendjup inte lika stora som uppströms och här varierar vattendjupet mellan 6 och 15 m. I Göteborgsgrenen är vattendjupet i älvens mitt omkring 6 till 9 m medan det i Nordre älv i huvudsak är mellan 10 och 15 m.

Utförliga beskrivningar av geomorfologin i Göta älvdalen ges bland annat av Sundborg & Norrman (1963), Engström (1934) och Klingberg et al. (2006). En sammanfattande beskrivning, baserad på dessa rapporter, redovisas nedan uppdelad i områdena norr respektive söder om Lilla Edet samt Nordre älvs dalgång.

Dalgången norr om Lilla Edet

Längs dalgången mellan Vänern och Lilla Edet är reliefen hög och berghällar är blottade på flera ställen längs älvfåran. Därtill är berg i dagen vanligt förekommande nära intill älvfåran. Erosionsspår av strömmande vatten förekommer på älvbotten.

Älven har skurit sig djupt ner i leravlagringarna och bildat en relativt trång fåra med relativt branta strandbrinkar som ofta är omkring 20 m höga. Nivåskillnaden mellan omgivande markyta och älvbotten uppgår som mest till cirka 40 m men minskar successivt ner mot Lilla Edet. Denna del av Göta älvdalen har en mycket särpräglad landskapsform med höga erosionsskadade strandbrinkar, ravinbildningar och ärr efter större och mindre skred. Speciellt i området kring Slumpån och Intagan är detta tydligt, se Figur 4-8 och Figur 4-9. Formationerna har tolkats som ett resultat av kraftig vattenerosion när lerytorna exponerades som en följd av en snabb landhöjning för cirka 11 000 år sedan.



Figur 4-8
Skredärr i Göta älvs
och Slumpåns dal-
gångar.
Bakgrundskarta
© SGI, Lantmäteriet.



Figur 4-9
Skredärr längs älvens
västra sida nedströms
Intagan. Foto: SGI.

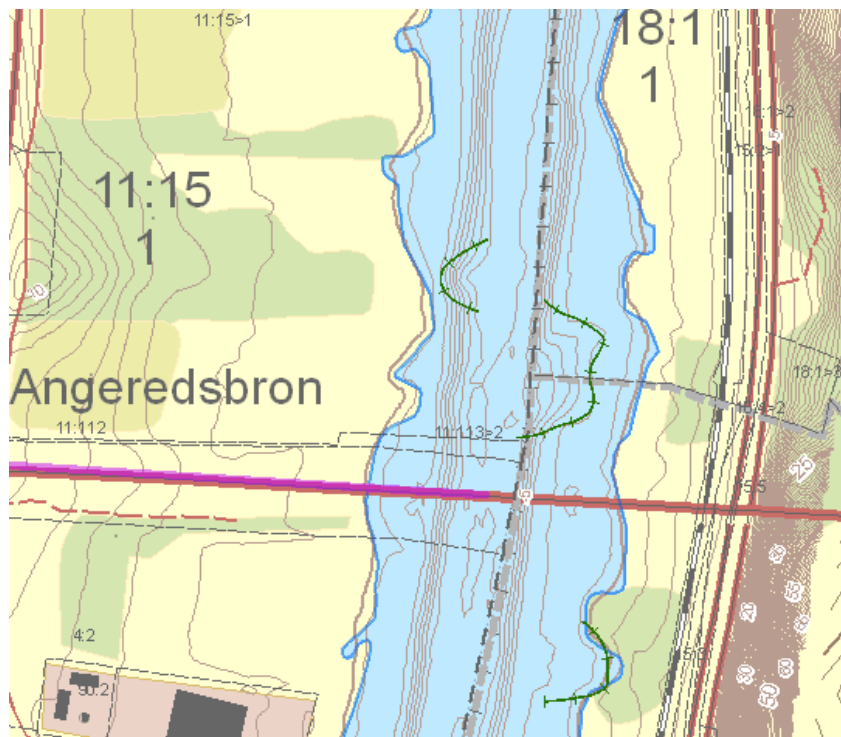
Dalgången söder om Lilla Edet

I dalgången mellan Lilla Edet och havet har dalbotten fortfarande kvar sina ursprungliga drag av ostörd sedimentyta. Inom den södra delen har dalbottnens sedimentationsyta inte helt höjts ovan havsytans nivå än och där finns således översvänningsområden på båda sidor om älven, se Figur 4-10. Längs vissa sträckor, exempelvis vid älvens östra sida i området kring Angeredsbron, begränsas dock dalgången av branta, höga bergspartier.

Själva älvfåran under vattenytan har på många ställen skurits ner kraftigt och begränsas av branta undervattenslänter mot ett på vissa ställen ganska brett och grunt vattenområde mellan djupfåran och strandkanten. Erosion i djupfåran kan orsaka skred i dessa branta undervattenslänter, se Figur 4-11.



Figur 4-10
Älvens östra strand
strax norr om förgre-
ningen vid Bohus.
Foto: SGI.



Figur 4-11
Skred i undervattenslänan strax norr om Angered'sbron.
Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet.

Nordre älv

Vid Bohus delar sig älven i två grenar; Göteborgsgrenen och Nordre älv. Nordre älvs dalgång är betydligt smalare än den dal i vilken Göteborgsgrenen flyter fram. Däremot är Nordre älv bredare och djupare än älvens Göteborgsgren. I den övre delen svänger Nordre älv i flera stora bågar vilka är orsakade av sprickzoner i berggrundstopografien. Nedre hälften av dalgången är rätlinjig med en nordost-sydvästlig riktning. Efter förgreningen är både norra och södra stranden flack kring uppstickande bergspartier, se Figur 4-12. Vid mynningsområdet består norra stranden, från Överön och österut, delvis av brant stupande bergssidor medan södra stranden fortfarande är relativt flack. Bottnen bildar där en tröskel och vattendjupet är inte större än 2-3 m (Adriellsson & Fredén, 1987).

Undervattenslänorna mot djupfåran är på många ställen branta, dock saknas till stor del de grunda vattenområden mellan djupfåran och strandkanten, som är vanliga i Göteborgsgrenen.



Figur 4-12
Nordre älv, södra stranden en sträcka efter förgreningen. Foto: SGI.

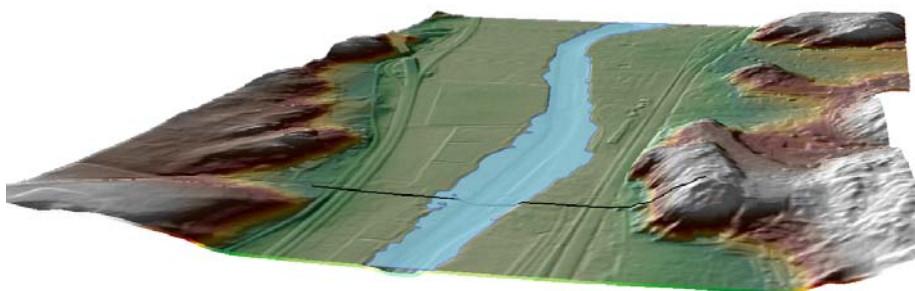
4.3 Terrängmodell

En digital höjdmodell av Göta älv dalen togs fram av Vattenfall AB 2007. Höjdmodellen baserades på en laserskanning från flygplan samt ett flertal sjömätningar från båt. Sjömätningarna omfattade dock inte alltid de grunda områdena i älven, varför en komplett multi-beam-ekolodning av älvbotten har utförts inom Göta älvutredningen (Marin Miljöanalys, 2011b). Beskrivning av laserskanning och multibeam-ekolodning ges i Rydell et al. (2007).

En ny terrängmodell av älv dalen togs därefter fram av Vattenfall Power Consultants (VPC) genom sammankoppling av flygmätningarna från den tidigare höjdmodellen med de nya sjömätningarna (Hedvall, 2010). Modellen är lagrad i plansystemet SWEREF99TM och i höjdsystemet RH2000. Terrängmodellen har ett medelfel i plan på cirka 0,2 m och i höjd på mellan 0,1 och 0,5 m. I samband med laserskanningen till Vattenfalls höjdmodell togs även ortofoton fram över området. I Figur 4-13 visas en 3D-illustration av den framtagna terrängmodellen.

Samtliga marksektioner som undersökts inom utredningen har avvägts i syfte att kontrollera terrängmodellen.

Figur 4-13
3D-illustration av terrängmodellen över Göta älv som visar bland annat mark- och älvtopografi och vägbankar. I markmodellen har alla data rörande vegetation och byggnader m.m. filtrerats bort.



Fakta i korthet

- Mäktiga jordlager av lera som på de flesta platser överlagrar friktionsjord och berg.
- Skikt av silt och sand i lerlagren är vanligt förekommande.
- Förutsättningar finns för artesiska grundvattenförhållanden.
- I den norra delen av dalgången har älven skurit sig ner djupt i jordlagren och bildat branta och höga strandbrinkar.
- I södra delen av dalgången finns branta undervattenslänter och översvämningsområden.

5 Geoteknik

Detta kapitel beskriver de geotekniska förhållandena i Göta älvdalen som har betydelse för skred. De förhållanden som är intressanta från skredsypunkt är jordens tunghet, hållfasthet, känslighet för störning samt grundvattennivåer och portryck. Kapitlet inleds med en beskrivning av utförda fält- och laboratorieundersökningar, som tillsammans med tidigare utförda undersökningar legat till grund för tolkningen av de geotekniska förhållandena i dalgången.

För att kunna fastställa stabilitetsförhållandena för slänterna längs älven fordras ingående kunskaper om jordlagrens uppbyggnad och deras geotekniska och hydrogeologiska egenskaper. En omfattande inventering av resultat från tidigare utredningar har därför gjorts inom Göta älvtredningen, kombinerad med nya undersökningar i fält och analyser av jordprover på laboratorium. Inventeringen har utförts i huvudsak av SGI och till viss del av de konsulter som kontrakterats för delområdena. De fältundersökningar som utförts i Göta älvtredningen har utförts av geotekniska konsultföretag.

För att kvalitetssäkra undersökningarna har SGI tagit fram styrande dokument med riktlinjer för hur det tekniska arbetet ska utföras. Dokumenten anger hur fält- och laboratorieundersökningar samt beräkningsarbete och redovisning ska utföras.

Resultaten från utförda undersökningar finns redovisade i en markteknisk undersökningsrapport (MUR) för respektive delområde (SGI, 2011:1-10). Dessutom har sammanställts ett Tekniskt PM för respektive delområde och i dessa återfinns detaljerade beskrivningar av de geotekniska förhållandena i de undersökta sektionerna (SGI, 2011:11-20).

I detta kapitel presenteras en sammanfattning av strategin och undersökningsmetodiken som använts i fält och i laboratorium samt den metodik som utvecklats för kartering av kvicklera. Dessutom sammanfattas beskrivningarna av de geotekniska förhållandena från de marktekniska undersökningsrapporterna för de tio geografiska delområdena.

5.1 Utförda fältundersökningar

Geotekniska fältundersökningar utfördes inom samtliga delområden i syfte att klarlägga jord-, berg- och grundvattenförhållanden. Samtliga undersökningar har utförts av geotekniska konsulter. Omfattningen av undersökningarna har motsvarat en översiktlig utredning enligt Skredkommissionens anvisningar (Skredkommissionen, 1995) med avseende på antalet sektioner fördelade över dalgången. De flesta sektioner har dock undersökts med en högre detaljeringsnivå.

Generellt har undersökningar utförts längs 100-400 m långa sektioner som är orienterade vinkelrätt mot älven och är fördelade med ett inbördes avstånd av 800 m (som medelvärde). Avståndet mellan sektionerna varierar beroende på topografiska förhållanden, geologin och om undersökningar tidigare utförts i området. Läget för de undersökta sektionerna framgår av kartorna i GÄU Slutrapport Del 3 - Kartor (SGI, 2012a). Totalt har cirka 2 500 geotekniska fältundersökningar (sondering, provtagning etc.) utförts inom utredningen, fördelat på 240 sektioner.

Längs varje sektion har undersökningar normalt utförts i fyra till sex punkter. Där resultat från tidigare utförda undersökningar finns tillgängliga är antalet nya undersökningspunkter färre. Undersökningarna har omfattat sonderingar (totaltrycksondering, CPT-sondering, jord-bergsondering och slagsondering), störd och ostörd provtagning, vingförsök samt installation av portrycks- och grundvattenmätare. Portrycksmätare av typen BAT och Geotech med både manuell och automatisk avläsning och registrering har använts. Totala omfattningen av respektive undersökningsmetod framgår av Tabell 5-1.

CPT-sonderingar har i vissa områden utförts med samtidig registrering av den totala neddrivningskraften i syfte att utgöra underlag för kartering av förekomst av kvicklera (se vidare avsnitt 5.3). Dessutom har ytresistivitetmätningar och CPT-R (CPT-sondering med samtidig mätning av resistiviteten) utförts i ett område söder om Slumpån i syfte att värdera dessa metoders möjlighet att detektera förekomst av kvicklera, kopplat till lerans kemiska sammansättning. Det utförda arbetet med ytresistivitetmätning och CPT-R och resultatet från detta presenteras av Löfroth et al. (2011).

En ny provtagare för upptagning av ostörda prover av finkornig jord togs fram av SGI under utredningens första år. Syftet med provtagaren är att kunna ta prover av hög kvalitet även i jordar där detta har visat sig vara svårt att uppnå med den vanligen använda standardkolvprovtagaren samt att få prover som är bättre lämpade för olika typer av forskningsprojekt, exempelvis undersökning av jordars störningskänslighet. Provtagaren, som beskrivs av Larsson (2011), har använts och utprovats bland annat inom Göta älvutredningen. En jämförelse av prover tagna med blockprovtagaren och standardkolvprovtagaren, kommer att redovisas under 2012.

Av de styrande dokumenten framgår att för geotekniska fältundersökningar i Göta älvutredningen gäller allmänt vad som anges i Geoteknisk fälthandbok (SGF, 1996), om inte annat angetts. I dokumentet anges dessutom vilka referensdokument som ska gälla avseende planering, utförande och dokumentation av undersökningarna.

Undersökningssektionernas placering, samt typ och omfattning av de geotekniska fältundersökningar, har valts av de kontrakterade konsulterna i samråd med SGI. Resultaten från det geotekniska fältarbetet finns redovisat i SGI (2011:1-10).

Tabell 5-1
Omfattning av olika typer av geotekniska fältundersökningar utförda inom Göta älvutredningen.

Undersökningsmetod	Totalt antal undersökningar
Totaltrycksondering, Tr	664
CPT	804
Jord- och bergsondering, Jb	12
Slagsondering, Sl	21
Vingförsök	379
Kolvprovtagning	291
Störd provtagning	333
Portrycksmätare	557 (fördelat på cirka 70 stationer)
Grundvattenrör	34 (fördelat på lika många stationer)

5.2 Utförda laboratorieundersökningar

Upptagna jordprover har undersökts i laboratorium. Undersökningarna har omfattat jordartsbestämning och analys av jordens geotekniska egenskaper. Undersökningarna har utförts vid SGI:s laboratorium samt av kontrakterade konsulter.

I det styrande dokumentet (SGI, 2009) fastställs att laboratoriearbeten ska planeras och utföras enligt gällande standarder, metodbeskrivningar eller praxis om inte annat anges. Ett flertal svenska standarder för laboratorieprovning har upphävts och ersatts med tekniska

specifikationer med beteckningen SIS-CEN ISO/TS 17892-nr. Under tiden för utredningen pågick ett arbete med att harmonisera dessa med svensk praxis och tidigare standarder. I det styrande dokumentet framgår därför vilka referensdokument som gäller för Göta älvtredningen.

Utvalda prover har karakteriserats i laboratoriet genom rutinundersökning, CRS-försök, direkta skjuvförsök och triaxialförsök (ett fåtal) för att få en klar bild av jordlagerföljd och variation i förkonsolideringstryck och skjuvhållfasthet med djupet. Antalet utförda undersökningar med olika metoder framgår av Tabell 5-2.

Metod	Totalt antal
Jordartsbestämning	3 900
Skrymdensitet	3 600
Vattenkvot	3 500
Konflytgräns	3 100
Konförsök, ostörd	3 000
Konförsök, störd	2 200
CRS	755
Direkta skjuvförsök	106
Triaxialförsök	7

Tabell 5-2
Omfattning av laboratorieundersökningar utförda inom Göta älvtredningen.

Resultaten från geotekniska laboratorieundersökningar finns redovisade i de marktekniska undersökningsrapporterna för respektive delområde (SGI, 2011:1-10).

5.3 Metodik för kartering av kvicklera

Kvickleror är leror vilkas lerskelett faller samman vid omrörning. Dessa leror bildas genom långsamma geologiska processer. De flesta har bildats i avlagringar avsatta i saltvattnen vid den senaste istidens avsmältning. Då isen drog sig tillbaka höjdes landet ur havet och lerorna kom ovanför havsytan. Avlagringarna kan då utsättas för genomströmning av sötvatten och salthalten sjunka, vilket kan möjliggöra bildning av kvickleror.

Det är ofta inte kvicklera i sig som initierar ett skred, men den slutliga omfattningen av skredet beror till stor del av jordens känslighet för störning.

Kvicklera definieras i Sverige som lera med en sensitivitet (St) större än 50 och en omrörd, odränerad skjuvhållfasthet (τ_R) mindre än 0,4 kPa.

Kartering av förekomst av kvicklera har hittills huvudsakligen utförts genom upptagning av ostörda prover i fält och bestämning av lerans ostörda och omrörda, odränerade skjuvhållfasthet med fallkonförsök på laboratoriet.

Inom utredningen har de praktiska möjligheterna att använda ett stegvis tillvägagångssätt för kartering av kvicklera baserat på kartmaterial, sonderingar och provtagning vidareutvecklats. Dessutom har möjligheten att ta fram ett verktyg i GIS för detta undersökts. En inventering av tidigare skred har utförts och dessa markerades i den webbaserade kartredovisningen i Tittskåp-Göta älv. En exportfunktion för uppgifter om lerans sensitivitet i redovisningsprogrammet Geosuite, som exporterar samtliga uppmätta värden för sensitivitet från tidigare och nya utförda undersökningar till GIS-format (ArcGIS), utvecklades. Dessutom utvecklades en applikation i GIS för bedömning och redovisning av permeabla

skikt/friktionsjordslager utifrån sonderingar, vilken testades inom ett utvalt område. Denna applikation användes emellertid inte vidare vid kartläggningen.

Möjligheten att bedöma förekomst av kvicklera genom att mäta det totala neddrivningsmotståndet vid totaltryckssondering har undersökts av Möller & Bergdahl (1982). Motsvarande för CPT-sondering undersöktes av Rankka et al. (2004). Det uppmätta neddrivningsmotståndet vid CPT-sonderingen kompletterat med tyngden av stängerna och reducerat med spetskraften motsvarar mantelfriktionen längs stängerna. I de fall lutningen på kurvan för mantelfriktion längs stängerna mot djupet är mindre än lutningen på en kurva motsvarande 1 kPa mantelfriktion, klassas leran som kvicklera. En rutin för sammanställning och analys i Excel-format har utvecklats inom utredningen för att kunna göra denna jämförelse på ett rationellt sätt för samtliga sonderingar. För att utvärdera träffsäkerheten i denna metod för utvärdering av kvicklera gjordes en jämförelse mellan kvicklera, utvärderad från totaltryckssondering och CPT, och kvicklera bestämd med fallkonförsök i laboratoriet för samtliga undersökningspunkter inom delområde 5 och 7 (Löfroth, 2011). Resultaten visar att nästan alla nivåer som utvärderats som kvicklera med fallkonförsöken också klassificerades som kvicklera med de båda sonderingsmetoderna. Såväl CPT-sondering som totaltryckssondering klassificerar vanligen en del ytterligare nivåer som kvicklera, vilka inte är kvicka enligt fallkonförsöken. Klassificering från CPT-sonderingar gav generellt något bättre överensstämmelse med provtagningsresultat än klassificering från tryckssonderingar.

Sammanfattningsvis visar utförda undersökningar att vid en utvärdering av förekomsten av kvicklera med CPT- och totaltryckssondering överskattas denna något jämfört med vad som faktiskt observeras genom provtagning och fallkonförsök.

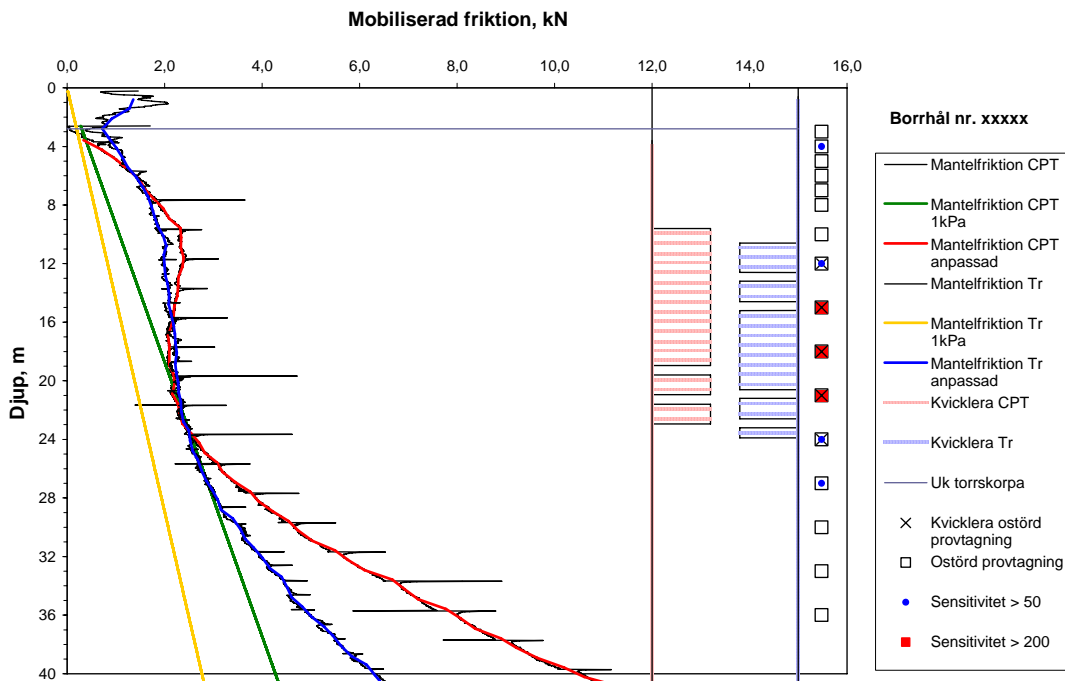
Framtagen metodik för kartering av kvicklera samt resultat från utförda analyser beskrivs mer utförligt i Löfroth (2011).

Tillvägagångssätt

Inom Göta älvutredningen har bedömning av förekomst av kvicklera gjorts utifrån CPT-sondering och totaltryckssondering med hjälp av den framtagna rutinen i Excelformat. I Figur 5-1 visas ett exempel från utvärdering med programmet. En skraffering till höger i diagrammet visar de delar av profilen som programmet har utvärderat som kvicklera. En ingenjörsmässig bedömning av djupet för kvicklera måste sedan göras utifrån denna utvärdering. Bestämning av kvicklera har också gjorts utifrån sensitivitetsbestämningar på ostörda prover i laboratoriet. I de fall bestämning av sensitivitet och omrörd skjuvhållfasthet från ostörd provtagning finns tillgänglig, redovisas detta också i diagrammet.

Förekomst av kvicklera som har bedömts utifrån sonderingar och provtagning är redovisade på tolkade planritningar framtagna inom utredningen (SGI, 2011:1-20). Detta har gjorts genom att nivån för tolkad överkant och underkant av kvicklerans utbredning har markerats vid sonderings- respektive provtagningspunkterna.

Utifrån uppmätta sensitiviteter, exporterade från gamla och nya provtagningar till ArcGIS, har en GIS-baserad karta med den högsta sensitiviteten i samtliga provtagningspunkter tagits fram. För uppskattning av skredutbredning för bakåtgripande skred har en indelning gjorts baserat på värdet på sensitiviteten. På GIS-kartan har undersökningspunkter med sensitivitet lägre än 50 markerats med grönt, punkter med sensitivitet mellan 50 och 99 markerats med gult, punkter med sensitivitet mellan 100 och 199 markerats med orange och extrem kvicklera med sensitivitet högre än 200 markerats med rött. Utifrån de tolkade planerna har sedan kvicklera bedömd utifrån CPT-sondering och totaltryckssonderingar lagts in manuellt på samma GIS-karta. En bedömning av skredutbredning för bakåtgripande skred i respektive sektion har sedan gjorts utifrån denna GIS-karta, baserad på lerans sensitivitet och geometriska förhållande tillsammans med geologiska faktorer som närhet till fastmark och tidigare skred, se vidare avsnitt 9.3.



Figur 5-1
Exempel på resultat från CPT- och trycksondering med utvärderad kwicklera samt utvärdering från kolvprovtagning.

5.4 Geotekniska förhållanden

Allmänt

I Göta och Nordre älvs dalgångar består de lösa jordlagren i huvudsak av lera som, speciellt närmast markytan, kan vara siltig och gyttjig. Lerans mäktighet varierar och sammanhänger bland annat med berggrundens topografi och dalgångens bredd. Mäktigheten i jordlagren under älvens botten, bestämd med seismiska undersökningar (se avsnitt 4.1 och Klingberg et al., 2006), varierar kraftigt mellan Trollhättan och Lilla Edet och uppgår som mest till 60 m. Nedströms Lilla Edet ökar lerdjupen och varierar på de flesta platser mellan 50 och 100 m.

Leran överlagras i huvudsak av torrskorpelera som varierar i mäktighet mellan några decimeter till flera meter. De största mäktigheterna av torrskorpelera påträffas i områden med höga strandbrinkar, i huvudsak i området mellan Lilla Edet och Trollhättan. I bebyggda områden kan leran även överlagras av fyllning. I den södra delen av älven, nedströms Garn (km 41/000), finns på de flesta platser grova sediment under leran. Enligt Klingberg et al. (2006) saknas dessa nästan helt för den norra delen av älven.

Sand- och siltskikt förekommer i lerlagren. Dessa skikt är vanligen mäktigast invid dalsidan och tunnar ut i riktning mot älven. På platser där de står i kontakt med berg eller friktionsjord kan artesisiska grundvattentryck förekomma. Inom utredningen har skikt av sand och/eller silt påträffats huvudsakligen mellan Trollhättan och Lilla Edet, på västra sidan älven mellan Lilla Edet och Garn samt på östra sidan älven mellan Garn och Lärje.

Lerans odränerade skjuvhållfasthet klassas i de övre delarna av dalgången, från Vargön ner till Lilla Edet, som låg till medium (enligt SS-EN ISO 14688). Från Lilla Edet och söderut är skjuvhållfastheten allmänt i intervallet mycket låg till medium men områden med extremt låg hållfasthet förekommer. Längs Nordre älv har uppmätta värden på den odränerade hållfastheten som är mycket låga till medelhöga.

Mellan Vargön och Lilla Edet är leran överkonsoliderad med undantag för området närmast Vargön där den är normalkonsoliderad (enligt klassificering i Larsson, 2008). Lerans

överkonsolideringsgrad minskar söderut för att från och med området kring Lilla Edet och till havet vara normalkonsoliderad.

Kvicklera och högsensitiv lera förekommer längs i stort sett hela älven med den största förekomsten mellan Vargön och några kilometer söder om Lilla Edet. Från Garn (km 41/000) och söderut till Bohus är leran i huvudsak mellansensitiv, men kvicklera förekommer lokalt. För området kring Nordre älv och för Göteborgsgrenen är leran mellansensitiv till högsensitiv och kvicklera förekommer lokalt, exempelvis vid Agnesberg och Lärje.

Undersökningar av jordlagren under älvens botten har utförts på 25 platser, i de flesta fall på undervattenshyllan eller i undervattenslätten. Undersökningarna visar att det överst finns ett mycket löst lerlager med en tjocklek av en till tre meter och att det underlagras av fastare lera med varierande mäktighet. Cirka en fjärdedel av de totalt 92 utförda undersökningarna med CPT-sondering visar att ett tunt lager av friktionsjord överlagrar leran. Enligt undersökningen av bottensedimenten i älvens mittled utförd av SGU (Klingberg et al., 2006) täcks stora delar av botten av tunna lager av friktionsjord.

Lerans odränerade skjuvhållfasthet i de översta lagren under älven är för många sektioner lägre än motsvarande nivå på land. Detta beror på den avlastning av lerlagren som erosionen i älvfåran inneburit. Skjuvhållfasthetens ökning med djupet är oftast högre under älvens botten än på land och hållfastheterna på ett djup av cirka 10-15 m under botten antar normalt värden av ungefär samma storlek som på motsvarande nivå på land. Ökningen av lerans odränerade skjuvhållfasthet för de översta metrarna ligger oftast kring 3 till 5 kPa/m. Det finns dock områden där lerans hållfasthet i jordlagren under älven aldrig uppnår samma skjuvhållfasthet som leran på land. Detta bedöms vara mer vanligt förekommande i den norra delen av älven än i den södra. af Petersens (2012) redovisar för undersökningar utförda i fyra lokaler i anslutning till älven nedströms Angeredsbron, att djupet under älven med lägre hållfasthet generellt är sex till sju meter i de djupaste delarna av älven och avtar närmare strandbrinken. Vattendjupen i den undersökta delen av älven varierar mellan sex och åtta meter.

Grundvatten strömmar allmänt från älvdalens sidor ned mot älven. Fältundersökningarna visar att grundvattennivån i ytliga jordlager, den så kallade nolltrycksnivån återfinns någonstans mellan markytan och ned till omkring två meters markdjup. Vidare är portrycksfördelningen normalt hydrostatisk från nolltrycksnivån och några meter nedåt. Därunder är variationerna större, med allt från kraftigt nedåtriktad gradient med stora undertryck relativt hydrostatisk portrycksfördelning till uppåtriktad gradient med artesiska tryck. Grundvatten- och portrycksförhållanden beskrivs mer utförligt i kapitel 6 *Yt- och grundvattenförhållanden i dagens och framtida klimat*.

Erosionsskydd finns i strandbrynet längs många delar av älven. Dessa beskrivs i kapitel 7 *Erosion*.

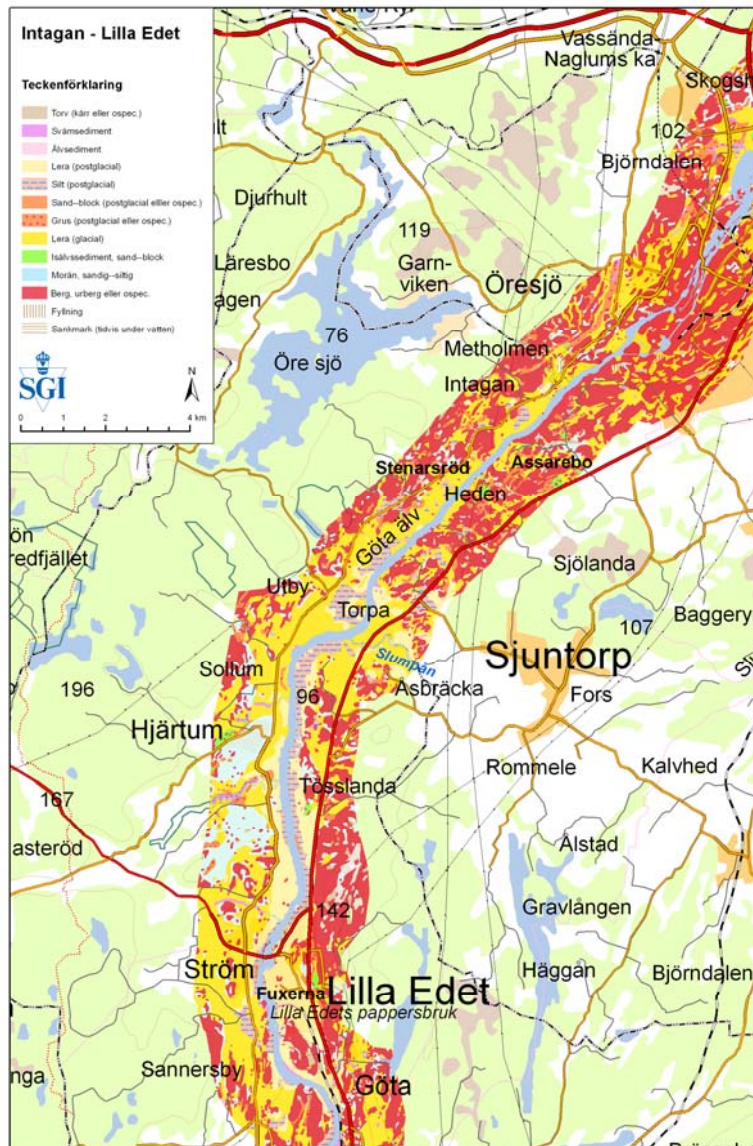
Nedan sammanfattas de geotekniska förhållanden längs älven för de delområden som ingår i utredningen. Mer detaljerade beskrivningar av de geotekniska förhållandena i de undersökta sektionerna än vad som ges nedan återfinns i Tekniskt PM för respektive delområde (SGI, 2011:11-20) och för grundvatten- och portrycksförhållanden även i kapitel 6.

Området mellan Vargön och Intagan (delområde 6)

En karta över området presenteras i Figur 5-2. Mellan Vargön och Stallbacka är marken relativt plan och jordlagren utgörs till stora delar av lera med en mäktighet på upp till 50 m. På västra sidan finns dock höjdparter på ett avstånd av 50-200 m från älven och där stiger markytan snabbt. Lerans odränerade skjuvhållfasthet klassas som mycket låg till låg och leran är ofta högsensitiv. Kvicklera förekommer i relativt stor omfattning.

Området mellan Intagan och Lilla Edet (delområde 5 och 7)

En karta över området presenteras i Figur 5-3. I den nordligaste delen av området, från Trollhättans kraftverk till området kring Slumpån, är landskapet varierat med grunda lerområden mellan uppstickande partier av berg eller friktionsjord. Leran är på många platser siltig och sulfidflammig. Gyttjig lera är vanlig i de översta jordlagren. Lermäktigheterna varierar från ett par meter till cirka 25 m. På den östra sidan nedströms slussarna vid Trollhättans kraftverk utgörs de första fyra kilometrarna huvudsakligen av berg.



Figur 5-3
Karta över delområde 5 och 7. Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet, SGU.

Leran har en odränerad skjuvhållfasthet som är låg till medium och den är mellan- till högsensitiv. Kvikklera förekommer längs merparten av sträckan. Leran har en överkonsolideringsgrad som närmast älven är högre (OCR mindre än 6) än längre ifrån densamma (OCR mindre än 3). Generellt minskar överkonsolideringsgraden söderut.

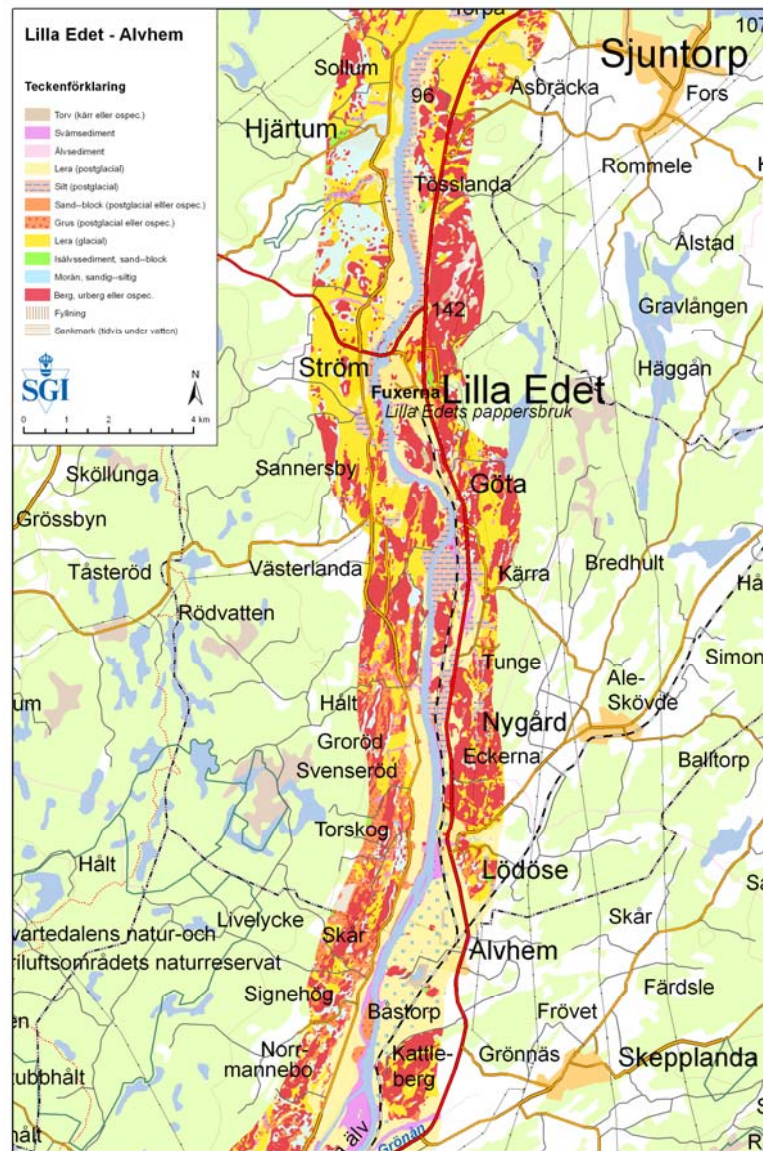
Från området kring Slumpån och söderut är området med lera sammanhängande och lerdjupen från 20 till mer än 45 m. De översta jordlagren, från en till fem meters djup, utgörs närmast älven av svåmsediment i form av gyttjig lera, silt och sand. Den odränerade skjuvhållfastheten är låg till medium och leran är mellan- till högsensitiv. Kvikklera har påträffats i enstaka punkter. I området närmast Slumpån förekommer ett en till fem meter mäktigt lager friktionsjord i leran på cirka 20 ms djup (överkant lager på nivå cirka -1).

Torrskorpeleran, som ofta är siltig, har inom området vanligen en mäktighet på mellan en halv och en meter, men på enstaka platser finns mäktigheter på mellan två och tre meter.

Inom området har ett stort antal små och stora skred inträffat. Skredet vid Intagan 1648 är troligen den största kända skredkatastrofen i Sverige.

Området mellan Lilla Edet och Alvhem (delområde 4 och 8)

En karta över området presenteras i Figur 5-4. Topografiskt är området mycket omväxlande med stora lerbassänger mellan uppstickande bergspartier och smala lerområden närmast älven. Generellt är slänterna branta och höga i norra delen av området medan den södra delen utgörs av relativt låglänt mark. De lösa jordlagren består av lera som vilar på friktionsjord. Leran är i sin översta del siltig och ställvis även gytjtig. Den överlagras av torrskorpelera, som ofta är siltig, med en huvudsaklig mäktighet av en halv till en meter. Några områden med mäktigheter mellan en och tre meter förekommer också. Lerlagrens mäktighet varierar och ökar vanligen i riktning söderut.



Figur 5-4
Karta över delområde 4 och 8. Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet, SGU.

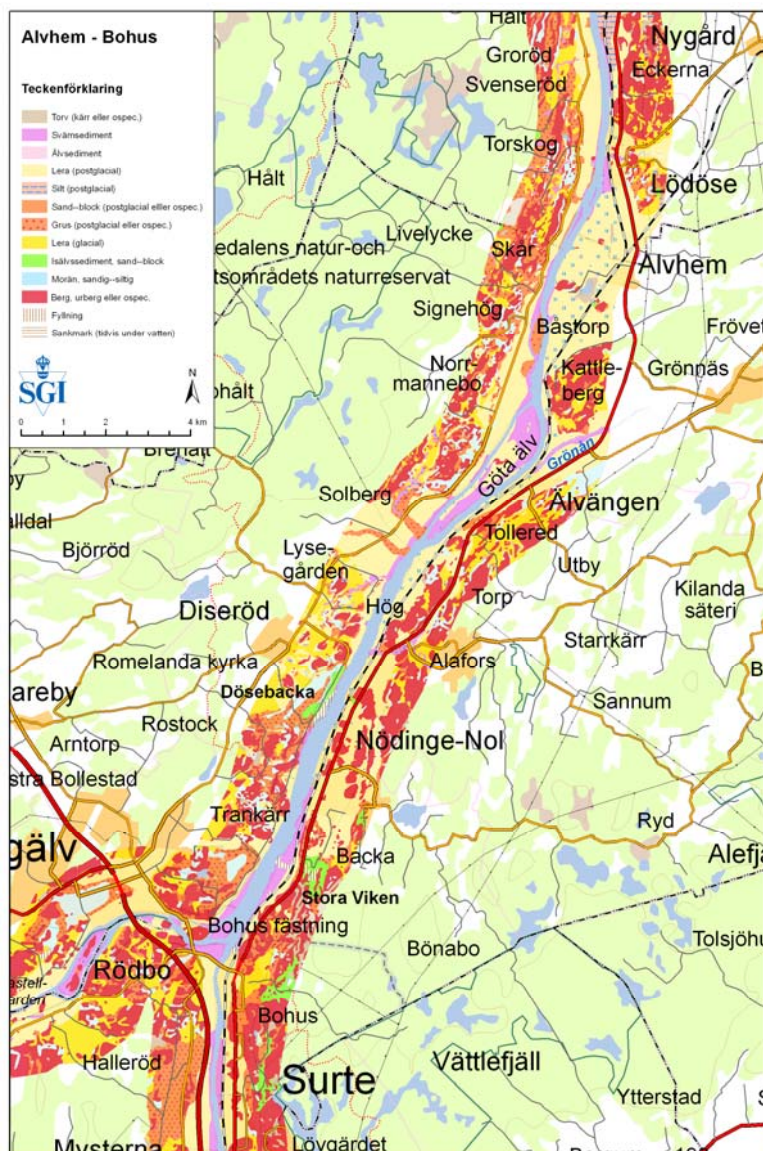
Leran har en odränerad skjuvhållfasthet som klassas som mycket låg till medium. Den är oftast normalkonsoliderad men överkonsoliderad lera förekommer också. I områdets norra del är högsensitiv lera vanlig medan leran i den södra delen huvudsakligen är mellansensitiv.

tiv. Kwicklera är allmänt förekommande kring Lilla Edet, men förekommer ställvis längs hela sträckan.

Inom området har flera små och stora skred inträffat, varav det allvarligaste är Götaskredet som inträffade 1957.

Området mellan Alvhem och Bohus (delområde 3 och del av område 9)

En karta över området presenteras i Figur 5-5. Områdets norra del består av stora lerområden omgivna av bergspartier. Marken utgörs i huvudsak av ängsmark som sluttar svagt mot älven. Området kännetecknas av mäktiga lerlager som vilar på friktionsjord. Lerdjupen uppgår till mer än 40 m närmast älven men avtar upp mot fastmarken.



Figur 5-5
Karta över del-
område 3 och del
av område 9.
Bakgrundskarta
© SGI, Lantmäte-
riet, SGU.

På älvens östra sida från Älvängen och söderut består marken närmast älven till viss del av industriområden. Väg E45 och järnvägen Norge-Vänerbanan finns inom området.

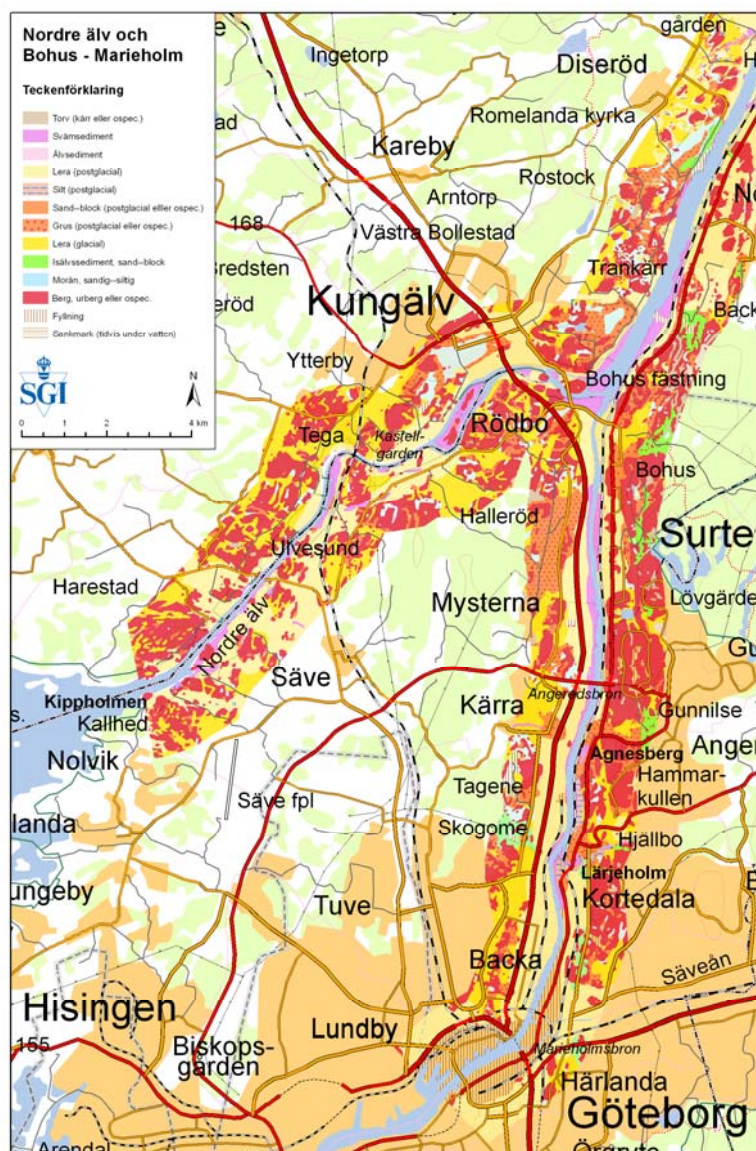
Från strax norr om Nol och söderut är förhållandena varierande. På östra sidan består området huvudsakligen av en begränsad landremsa innan bergspartierna i öster tar vid. På västra sidan förekommer såväl stora lerbassänger som smala lerområden. Jordlagren består av lera med varierande mäktighet som vilar på friktionsjord. Överst är leran generellt siltig och skalrester förekommer genom hela lerprofilen. Lermäktigheten är vanligen mer än 40

m i anslutning till älven. Leran överlagras ställvis, och i huvudsak på östra sidan, av fyllning.

Lerans odränerade skjuvhållfasthet klassas som extremt låg till låg. Överkonsolideringsgraden är i huvudsak mindre än två. Leran är mellansensitiv till högsensitiv och kvicklera förekommer ställvis upp mot fastmarken.

Området mellan Bohus och Mariefholm (delområde 1, 10 och del av områdena 2 och 9)

En karta över området presenteras i Figur 5-6. Området består på den västra sidan huvudsakligen av lera med jorddjup som överstiger 45 m. På den östra sidan är förhållandena varierande med stora lerbassänger och mäktiga jorddjup i norr, medan det från Angeredsbron och söderut är begränsade jorddjup upp mot de branta och närliggande bergspartierna.



Figur 5-6
Karta över området mellan Bohus och Mariefholm samt över Nordre älv.
Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet, SGU.

På östra sidan från Lärjeholm och söderut är markytan plan och bebyggd närmast älven. Området karaktäriseras av industriområden med hårdgjorda ytor. Under bebyggelsen finns en till tre meter fyllnadsmaterial, som ökar till sju meters mäktighet i söder. Fyllnadsmaterialet underlagras av lera med en mäktighet närmast älven på 60 till 120 m. Leran vilar, i sin tur, på friktionsjord. I ett 700 m långt område under älven kring Lärjeholm har frik-

tionsjorden en betydande mäktighet, uppemot sju meter, och är en del av den så kallade Göteborgsmoränen, se kapitel 4 *Geologi och landformer*.

Lerans odränerade skjuvhållfasthet klassas som låg till medium och sensitiviteten som mellan till hög. Kvikklera förekommer på många platser upp mot fastmarken samt mer utbrett vid Agnesberg och Lärjeholm. Leran är normalkonsoliderad.

Området kring Nordre älv (del av område 2)

En karta över området presenteras i Figur 5-6. Terrängen närmast älven är varierande med flacka områden, mer sluttande lerområden och med berg i dagen. Jorden i området utgörs huvudsakligen av ett fast ytskikt bestående av fyllning, torrskorpelera, sand eller silt underlagrat av lera på friktionsjord. Tjockleken av ytskiktet varierar mellan en halv och två meter.

Nordre älvs djup minskar drastiskt ut mot havet och uppgår till endast några meter utanför Kippholmen. Här sker betydande sedimentation av material som transporterats med älven. Eftersom dalgången är trång och vattenflödet är högt, finns det inte förutsättning för betydande sedimentation i Nordre älv förrän i detta område där älven möter havet.

Nordre älv omfattades inte av den seismiska undersökning av djupet till berggrunden som SGU utfört tidigare (Klingberg et al., 2006). I Göta älvutredningen har en mäktighet av lerlagren på mellan 10 och 30 m uppmätts för hälften av de undersökta sektionerna och i övriga en mäktighet över 45 m.

I områden med stora djup har leran en odränerad skjuvhållfasthet som kan klassas som mycket låg till medel. Leran i områden med mindre djup (10-30 m) har en mycket låg till låg hållfasthet. Leran på land i de övre delarna av dalgången är i huvudsak normalkonsoliderad (OCR mindre än 1,5) medan leran längre ut mot havet varierar mellan normalkonsoliderad och måttligt överkonsoliderad (OCR mindre än 3). Leran under Nordre älv har undersökts i fyra punkter och utförda undersökningar visar att leran där är överkonsoliderad ($1,5 < OCR < 15$).

Leran i Nordre älv är medel- till högsensitiv. Kvikklera förekommer i ringa omfattning och i huvudsak i områden med korta avstånd från älvstrand till berg samt där avståndet till underliggande friktionsjord är litet.

Skredärr finns i ringa omfattning längs Nordre älv.

Fakta i korthet

- 2500 geotekniska fältundersökningar (sondering, provtagning etc.) i 240 sektioner längs älven samt 20 000 laboratorieförsök har genomförts.
- Jordlagerföljden består av i huvudsak av torrskorpelera (någon eller flera meter), lera (upp till 60 m norr om Lilla Edet och till 50-100 m söder om Lilla Edet) och friktionsjord.
- Lerans odränerade skjuvhållfasthet är i allmänhet låg till medium men söder om Lilla Edet förekommer även extremt låg skjuvhållfasthet.
- Leran är i huvudsak överkonsoliderad norr om Lilla Edet och normalkonsoliderad till svagt överkonsoliderad söder om Lilla Edet.
- Kvikklera och högsensitiv lera förekommer främst norr om Lilla Edet. Söder därom är leran i huvudsak mellansensitiv men kvicklera förekommer lokalt.
- Grundvattenytans nolltrycknivå ligger mellan markytan och två meters djup. Både nedåtriktad och uppåtriktad gradient förekommer.

6 Yt- och grundvattenförhållanden i dagens och framtida klimat

Detta kapitel beskriver yt- och grundvattenförhållandena i Göta älvdalen i dagens och framtida klimat. Slänternas stabilitet längs älven påverkas bland annat av höga vattenflöden som kan orsaka erosion, låga vattennivåer som ger mindre mothållande krafter i slänterna och höga porttryck i leran innebär en minskad hållfasthet. Kraftig grundvattenströmning kan bidra till bildning av kvicklera. Samtliga dessa förhållanden kan försämra stabiliteten i slänter.

6.1 Metodik

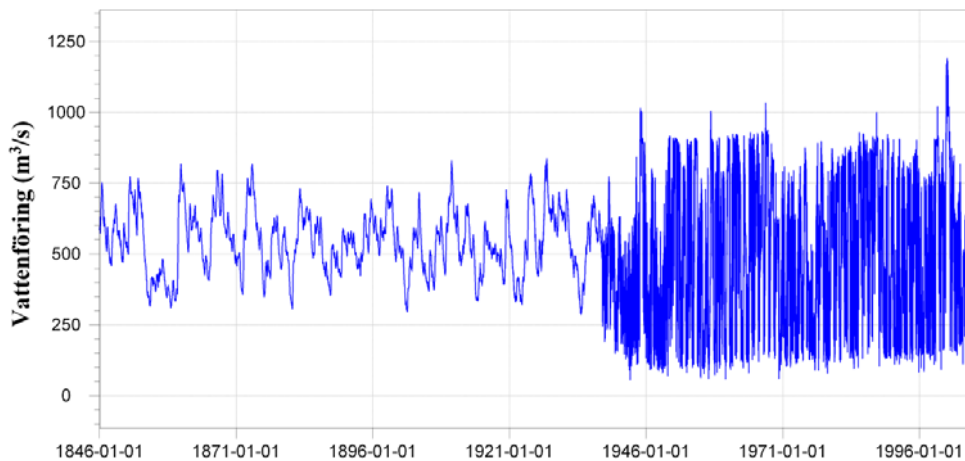
Beskrivning av ytvattenförhållandena baseras på den sammanställning av de hydrologiska och meteorologiska förhållandena längs Göta älv som utförts inom Göta älvtredningen (Bergström et al., 2011) och som redovisas närmare i kapitel 3 *Dagens och framtida klimat i Göta älvs dalgång*. Sammanställningen beskriver förhållanden med såväl dagens klimatvariationer som effekterna av ett framtida förändrat klimat, baserat på de senaste tillgängliga klimatscenerierna.

Grundvattenförhållandena i dagens klimat baseras på en sammanställning av tidigare erfarenheter från älvdalen (Persson et al., 2011) samt fältmätningar gjorda inom Göta älvtredningen. Bedömningar av framtida förhållanden har baserats bland annat på en bedömning av grundvattenförändringar i ett förändrat klimat (Blid & Persson, 2011).

6.2 Flöden i Göta älv

Avgörande för stabilitetsförhållandena och erosionen i älven är vattenflödena från Väneren till havet. Den förväntade ökade nederbörden innebär konsekvenser för vattenståndet i Väneren och en ökad tappning kan bli nödvändig för att begränsa skador kring Vänerens stränder. Vänerens framtida nivåer och tappningen till Göta älv har studerats i en separat utredning (Bergström et al., 2010).

Den reglering av Väneren som gäller enligt vattendom från 1937 utgör en avvägning mellan olika intressen uppströms och nedströms. Den innebar en minskning av de högsta vattenstånden i Väneren men fick en stor effekt på vattenföringen i Göta älv, som nu kom att utnyttjas för vattenkraftproduktion. Detta framgår av Figur 6-1, som visar dygnsvärden på vattenföring i m³/s för Vänerens utlopp till Göta älv under perioden 1846-2005.



Figur 6-1
Vattenföring i m³/s
vid Vänerens utlopp
(Vargöns kraftverk)
under perioden
1846-2005. (Berg-
ström et al., 2011)

För att undvika översvämningsproblem nedströms Lilla Edet finns det också bestämmelser som begränsar tappningen vid höga vattenstånd i havet. Det finns också regler vid lågvatten bland annat för att säkerställa vattenståndet för sjöfartens behov och för att undvika saltvatteninträngning från havet upp i Göta älv.

En sammanställning av bestämmelser för gällande vattennivåer har gjorts inom Göta älvutredningen (Rydell et al., 2011d).

Göta älv är reglerad genom tre vattenkraftverk, belägna vid Vargön vid inloppet från Vänern, Trollhättan och Lilla Edet. Denna reglering innebär att flödet i älven styrs av hur mycket vatten som tappas i dessa kraftverk. Regleringen av Göta älv styrs av en vattendom som föreskriver såväl högsta som lägsta tillåtna tappning. Biflödena är dock oreglerade, varför flödena i dessa främst beror på den senaste tidens nederbörd.

Dagens flöden

Regleringen av Vänern enligt vattendomen 1937 och utbyggnaden av vattenkraftproduktionen i Göta älv innebär en kraftig förändring av flödesförhållandena i Göta älv, främst genom att tappningen fick en stor variation över dygnet. Dygnsvariationen i tappningen beror på att elbehovet är betydligt större under dagarna än under nätterna. Sedan 2008 tillämpas en ny strategi för hur tappningen ska regleras. Denna strategi syftar till att minska riskerna för höga vattennivåer i Vänern, och baseras delvis på långtidsprognoser av tillrinningen till Vänern.

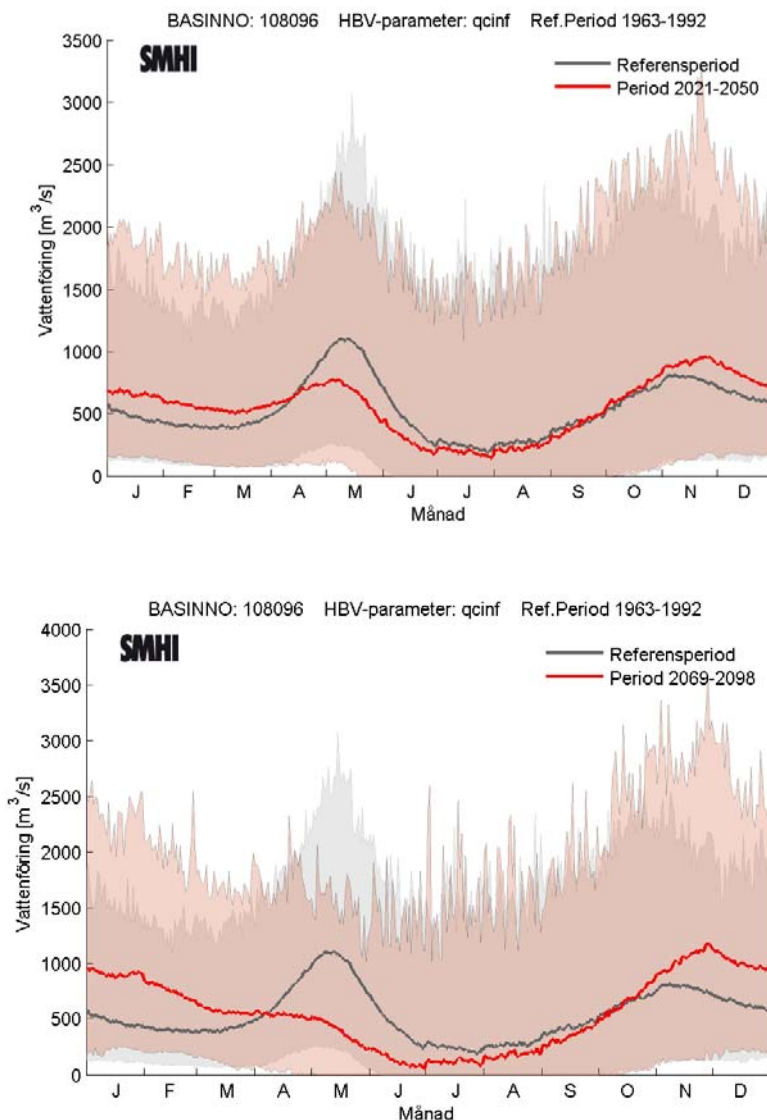
Enligt vattendomen är den högsta tillåtna tappningen i Göta älv begränsad till 1030 m³/s. Avsikten med tappningsbegränsningen är att undvika skador av skred och översvämningslängs älven. Under 2000/2001 gjordes dock undantag från denna regel för att undvika allt för stora översvämnings runt Vänern. Den högsta tappningen var då 1190 m³/s, vilket framgår av Figur 6-1. Medelvattenföringen är omkring 550 m³/s.

För att undvika översvämningsproblem nedströms Lilla Edet finns det även bestämmelser i vattendomen som begränsar tappningen vid höga vattenstånd i havet. Vidare innefattar vattendomen också regler vid lågvatten, bland annat för att säkerställa vattenstånden för sjöfartens behov. En annan viktig anledning är att undvika saltvatteninträngning från havet upp längs Göta älv, vilket kan leda till att Göteborgs dricksvattenintag tillfälligt måste stängas. Den lägsta tillåtna tappningen i älven är 170 m³/s vid Lilla Edet. Detta är ett dygnsmedelvärde och tillfälligt får lägre flöden tappas.

Framtida flöden

Framtida vattenflöden till Göta älv beror av tillrinningen till Vänern. Väners framtida nivåer och tappningen till älven studerades med utgångspunkt från tillgängliga klimatscenarier och redovisas i Bergström et al. (2011). Tillrinningen förväntas öka avsevärt under vintern, minska under sommaren och vara oförändrad under övriga årstider, jämfört med dagens förhållanden.

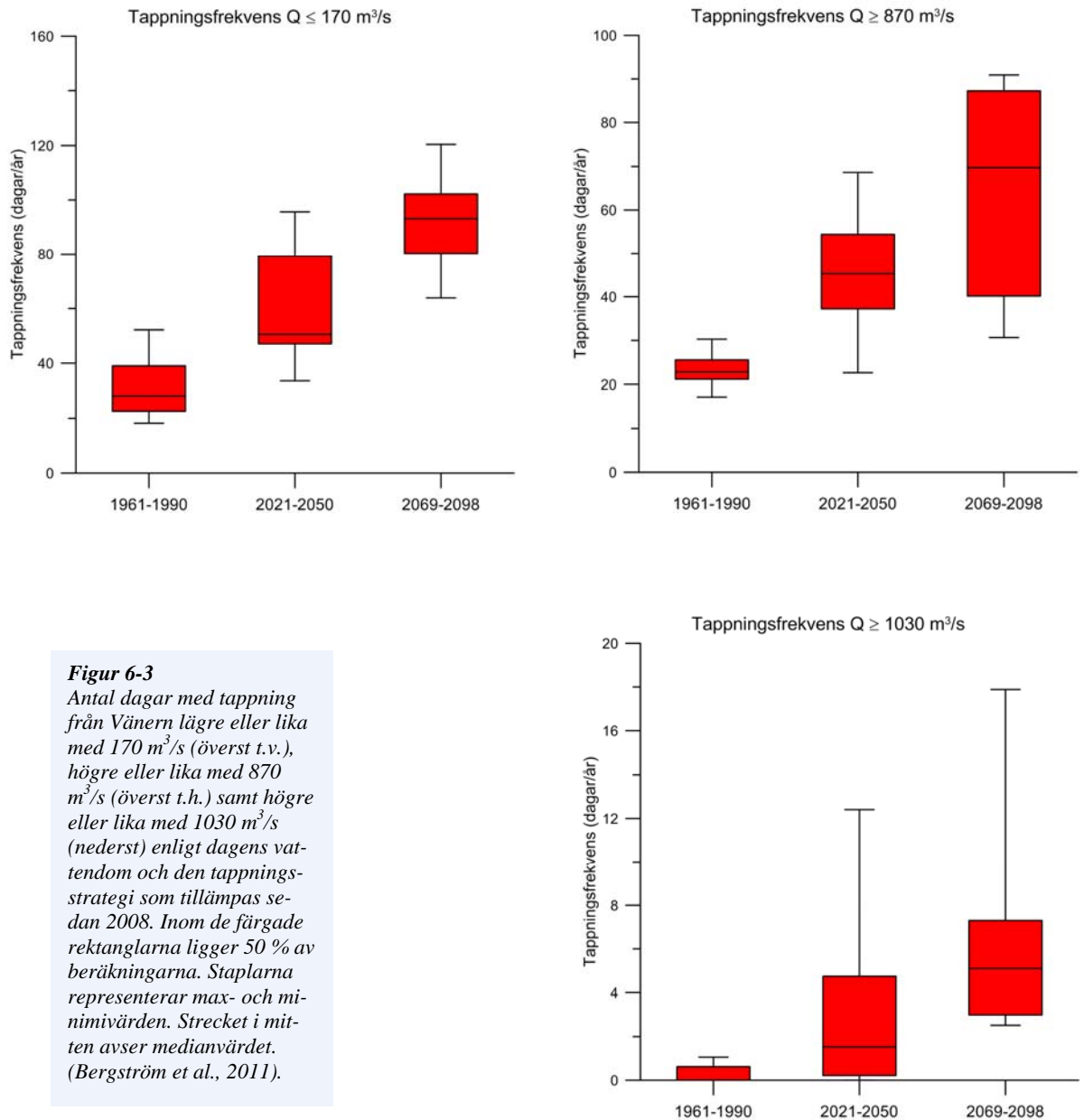
Klimatförändringarna väntas även leda till en förändrad årsrytm för tillrinningen till Vänern i framtiden, vilket påverkar flödena i Göta älv. Av Figur 6-2 framgår att den framtida tillrinningen beräknas öka alltmer under vinterhalvåret samtidigt som den minskar under sommaren. Detta innebär också att vattenflödena i Göta älv förändras i framtiden så att högre flöden förekommer under längre perioder. Vilka flöden som kommer att avledas beror slutligen på valda tappningsstrategier.



Figur 6-2
Förändringen av tillrinningens årsrytm till Väneren för perioderna 2021-2050 och 2069-2098 i relation till referensperioden 1963-1992. Det grå skuggade området omfattar referensperiodens variationsbredd (75 % percentilerna av maxvärdena respektive 25 % percentilerna av minvärdena) och det rosa området avser motsvarande för klimatscenerierna. De heldragna linjerna representerar respektive medelvärde. (Bergström et al., 2011)

Tillrinningen har sammanställts för ett stort antal klimatscenerier och med utgångspunkt från dessa har tappningsberäkningar utförts för Göta älv. Beräkningarna har genomförts i stort sett enligt den tappningsstrategi som tillämpas sedan hösten 2008. Det har dock inte varit möjligt att ta hänsyn till de hydrologiska prognoser som ingår i tappningsstrategin, vilket dock bedöms vara av relativt liten betydelse för det kvalitativa resultatet. Resultatet redovisas i form av antal dagar per år med hög respektive låg tappning.

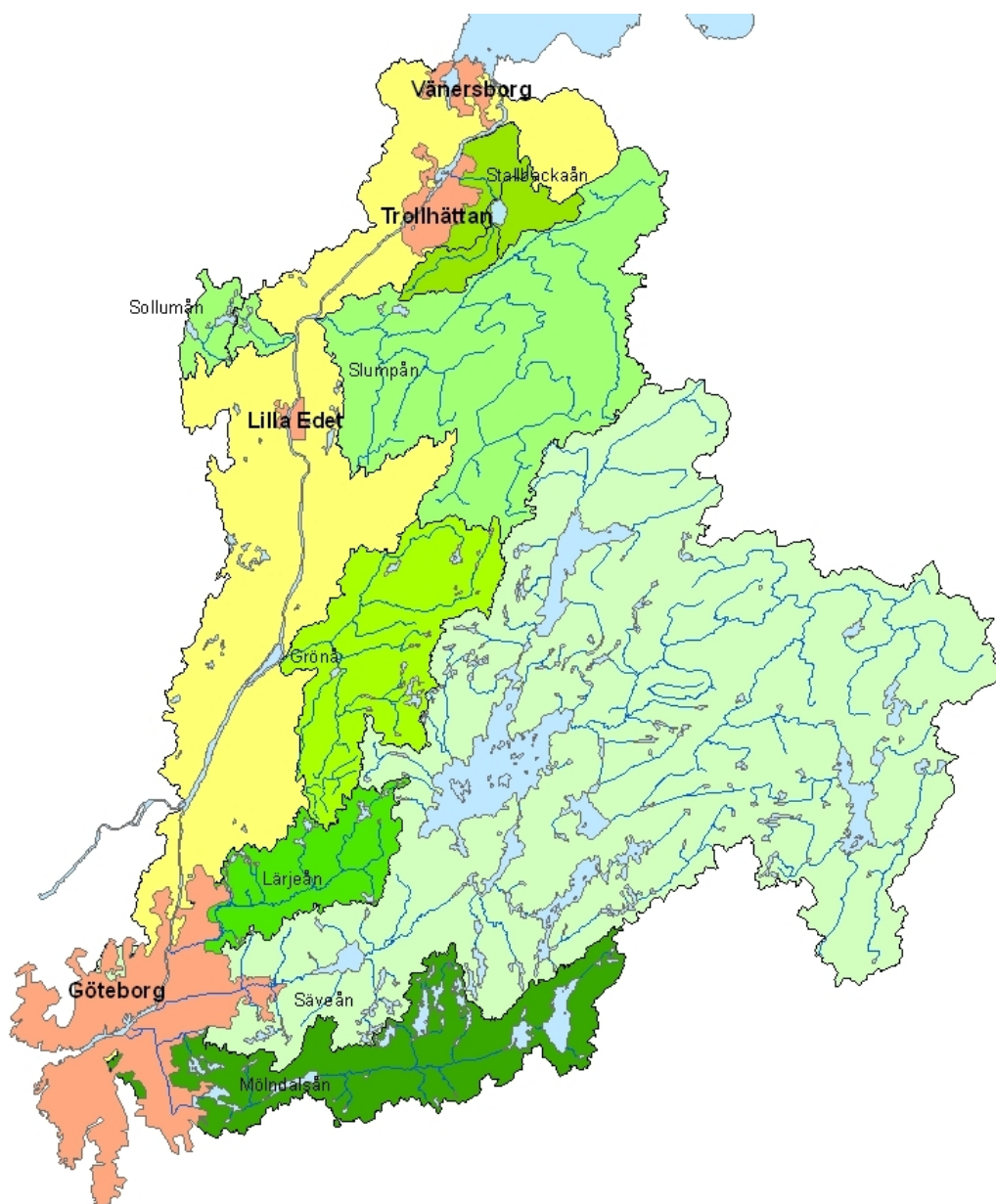
Inverkan av tre olika flöden för de framtida perioderna 2021-2050 och 2069-2098 tillsammans med referensperioden 1961-1990 har beräknats av Bergström et al. (2011). De tre flödena som använts i beräkningarna är 170, 870 samt 1 030 m^3/s , vilket motsvarar de enligt vattendomen lägsta och högsta tillåtna flödena samt ett högt men relativt vanligt förekommande flöde. Beräkningarna är baserade på framtida tillrinning till Väneren, vilken har beräknats utifrån ett stort antal klimatscenerier samt den tappningsstrategi som används sedan 2008. Resultatet i form av antal dagar per år med låg respektive hög tappning från Väneren redovisas i Figur 6-3 som så kallade Box and whiskers-diagram. Ur diagrammen framgår att såväl höga som låga flöden kommer att bli vanligare framöver.

**Figur 6-3**

Antal dagar med tappning från Vänern lägre eller lika med $170 \text{ m}^3/\text{s}$ (överst t.v.), högre eller lika med $870 \text{ m}^3/\text{s}$ (överst t.h.) samt högre eller lika med $1030 \text{ m}^3/\text{s}$ (nederst) enligt dagens vattendom och den tappningsstrategi som tillämpas sedan 2008. Inom de färgade rektanglarna ligger 50 % av beräkningarna. Staplarna representerar max- och minimivärden. Strecket i mitten avser medianvärdet. (Bergström et al., 2011).

6.3 Vattenföring i biflöden längs Göta älv

Nedströms Vänersborg tillförs Göta älv vatten från ett antal mindre och några medelstora vattendrag. Några av de viktigaste av dessa redovisas i Figur 6-4 och Tabell 6-1.



Figur 6-4
De viktigaste vattendragen som rinner till Göta älv på sträckan från Vänersborg till havet (Bergström et al., 2011).

I Tabell 6-1 redovisas flödesstatistiken för de vattendrag där sådan finns tillgänglig. I tabellen anges medelvattenföringen (MQ), medelhögvattenföringen (MHQ) och 100-årsflödena (Q100). Värderna inom parentes har tagits fram genom arealbaserad proportionering mellan aktuellt område och motsvarande uppgifter från Slumpån. I tabellen redovisas medelvattenföring, medelhögvattenföring och 100-årsflöden. För Grönån, Slumpån, Söveån och Mölndalsån har 100-årsflöden beräknats i ett förändrat klimat. Variationen mellan olika scenarier är betydande i det aktuella området, samtidigt som en viss ökning av de genomsnittliga 100-årsflödena kan förväntas i de flesta fall. 100-årsflödena bedöms öka med i medeltal 5-10 % under ett sekel. Spridningen är dock stor och det nu tillgängliga materialet tillåter inte större noggrannhet i bedömningen.

Tabell 6-1
Flödesstatistik för de vattendrag som rinner till Göta älv på sträckan från Vänersborg till havet. (Bergström et

Vattendrag	Areal (km ²)	MQ (m ³ /s)	MHQ (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)
Slumpån	396	4,9	32	66
Grönån	197	2,6	20	45
Lärjeån	113	1,8	13	33
Stallbackaån	79	(1,0)	(6,4)	(12,7)
Sollumån	36	(0,4)	(2,9)	(6,0)
Säveån*)	1750	25,1	81	165
Möldalsån*)	267	4,7	19	40

*) Nedströms studerat område i Göta älvutredningen

6.4 Vattennivåer i Göta älv

På samma sätt som för flödena styrs vattennivåerna i älven till stor del av regleringen och även för vattennivåerna finns begränsningar i vattendomen. Nedströms kraftverket i Lilla Edet är dock älven oregerad och havsnivån har där en avgörande betydelse för nivåerna i älven.

Dagens vattennivåer

I rådande vattendom finns dämmnings- och sänkingsgränser uppströms kraftverken i Vargön, Trollhättan och Lilla Edet vilka framgår av Tabell 6-2. Nedströms Lilla Edets kraftverk finns även en sänkingsgräns. Dessutom finns överenskommelser mellan Sjöfartsverket och Vattenfall om lägstanivåer uppströms kraftverken i Trollhättan och Lilla Edet, som är högre än vattendomens sänkingsgränser.

Tabell 6-2
Dämmnings- och sänkingsgränser längs Göta älv enligt vattendom (m.ö.h. i RH2000)

Plats	Dämmningsgräns	Sänkingsgräns
Vänern	45,17	43,48
Trollhättan (uppströms kraftverk)	39,81	38,71
Lilla Edet (uppströms kraftverk)	7,60	6,55
Lilla Edet (nedströms kraftverk)	-	0,05

Vattennivån i älven minskar något i strömriktningen mellan de olika kraftverken. Vid medelvattenföringen (550 m³/s) uppgår fallförlusten till 0,35 m på sträckan Trollhättan - Lilla Edet och 0,7 m på sträckan Lilla Edet - havet. Vid högre flöden ökar dock dessa fallförluster.

Framtida vattennivåer

Eftersom dämmnings- och sänkingsgränserna är reglerade i vattendomen har någon förändring av dessa inte studerats. Noteras bör dock att en förändrad tappningsstrategi, exempelvis liknande den som diskuterades i avsnitt 6.2, skulle kunna innebära förändrade nivåer i älven. Nedströms Lilla Edet kan även en framtida högre havsnivå påverka nivåerna i älven. Som anges i kapitel 3 förväntas havsnivåerna öka med 0,15 m till år 2050 samt 0,7 m till år 2100 då hänsyn tagits till landhöjningen.

Då det främst är låga vattennivåer som är ogynnsamma för släntstabiliteten, bedöms ett förändrat klimat med högre vattennivåer kunna ha en viss stabilitetshöjande effekt avseende vattennivåerna. Eftersom bedömningarna av framtida havsnivåer är mycket osäkra har dock ingen förändring av vattennivåerna beaktats avseende framtida förhållanden i Göta älv.

En sammanställning av de nivåer som använts i Göta älvutredningen redovisas i kapitel 8 *Stabilitetsförhållanden* och i Rydell et al. (2011d).

6.5 Grundvattenförhållanden i jordlagren längs Göta älv

Grundvattenförhållandena längs Göta älv styrs, förutom av klimatet, till stor del av områdets topografi och geologi. I den södra delen av älvdalen är stränderna flacka, medan den norra delen är mer kuperad med högre och brantare slänter. Leran i Göta älvdalen har låg permeabilitet och kan avseende grundvattenförhållandena oftast betraktas som tät. Detta leder till att portrycken i leran styrs av grundvattenförhållanden i angränsande genomsläppliga lager. Dessa lager består normalt av lerans torrskorpa och den närmast under denna delvis uppspruckna lera tillsammans med lager med friktionsjord under och ibland även inom leran.

Torrskorpeleran närmast markytan är fast och kraftigt uppsprucken med permanenta sprickor. Detta innebär att jorden har hög permeabilitet och kan, tillsammans med den närmast under denna delvis uppspruckna lera, betraktas som ett **övre grundvattenmagasin**. Under torrskorpan återfinns ofta en zon på ett par meter med tätare lera, vilken även den är påverkad av sprickbildning som orsakar förhöjd permeabilitet. På ett djup av cirka 5 m under markytan försvinner vanligtvis dessa sprickor. Tryckfördelningen i den täta lera kan avvika kraftigt från hydrostatisk fördelning. Under leran finns oftast permeabla friktionsmaterial, vilka utgör ett **undre grundvattenmagasin**. Ibland påträffas skikt med permeabla material också inom lerprofilen. Dessa lager kan vara friliggande linser eller stå i kontakt med såväl det undre grundvattenmagasinet som älven.

Dagens förhållanden

Övre grundvattenmagasin

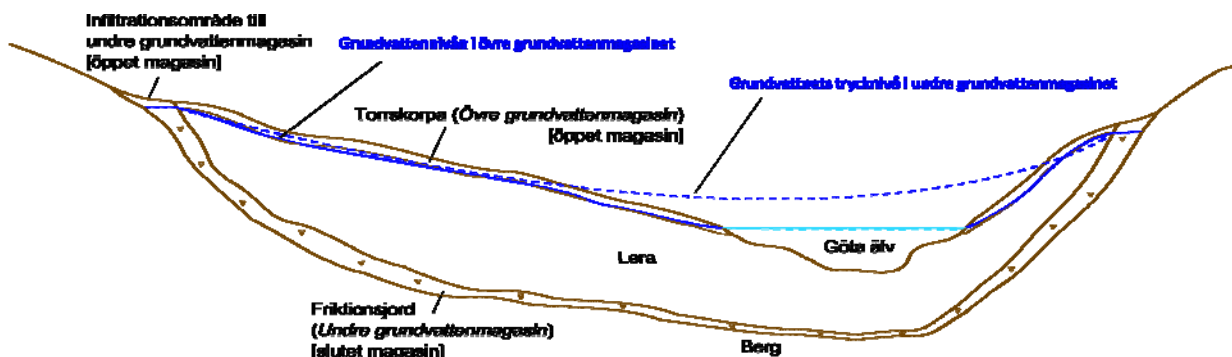
Det övre grundvattenmagasinet tillförs vatten genom infiltration direkt från markytan eller från intilliggande vattendrag. Grundvattenströmningen i det övre magasinet bedöms framförallt ske i riktning mot älven. Grundvattennivån i det övre grundvattenmagasinet bedöms normalt inte vara lägre än i underkant av torrskorpan och inte högre än markytan. Denna grundvattennivå ansluter till älvens vattennivå, vilken därför till stor del styr grundvattennivån i området närmast älven. Förutom i områden närmast älven, bedöms det främst vara i flacka partier som grundvattennivån i det övre grundvattenmagasinet kan nå markytan. Grundvattennivån i det övre grundvattenmagasinet bedöms kunna variera snabbt även vid relativt kortvarigt regn, men dessa fluktuationer är inte kända i detalj.

Undre grundvattenmagasin

Till det undre grundvattenmagasinet, vilket är överlagrat av tät lera och därför kan betraktas som ett slutet magasin, sker tillförseln av vatten oftast från de höjdområden som omger älven. I dessa områden finns berg i dagen och grövre jordar, i vilka infiltration i undre magasinet kan ske. Grundvattnet i såväl det övre som undre magasinet strömmar generellt sett från infiltrationsområdena i höjdområdena som omger Göta älv och mot älven. I många fall avtar dock inte trycknivån i det undre grundvattenmagasinet i samma takt som markytans nivå, vilket innebär att trycknivån överstiger markytans nivå (se Figur 6-5). Detta artesiska

tryck i dalens mitt kan ofta uppgå till 1-2 m över markytan, men i enstaka områden i älvdalens södra del har trycknivåer upp till 7 m över markytan uppmätts.

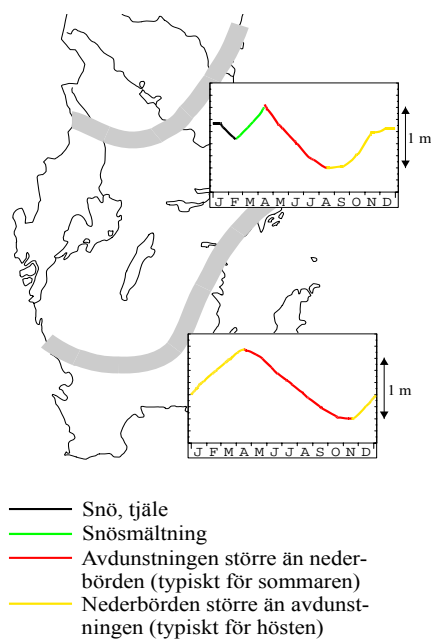
Figur 6-5
En typisk tvärsnitt för Göta älvdalen med artesiskt grundvatten-tryck från höjdområdena ned mot älven.



Trycknivåerna i de undre grundvattenmagasinen är dock uppåt begränsade av markytans nivå i infiltrationsområdena. Detta beror på att grundvattennivån i infiltrationsområdena inte kan överstiga markytan. Till följd av grundvattenströmningen mot dalens mitt är dock de maximala nivåerna i slänterna ofta avsevärt lägre än infiltrationsområdenas nivåer.

På några ställen, speciellt i den norra delen av älvdalen, finns områden med omvända förhållanden. Där är trycknivån i det undre grundvattenmagasinet lägre än i det övre grundvattenmagasinet till följd av att det undre magasinet står i kontakt med älven.

Grundvattnets fluktuationer i det undre magasinet bedöms vara långsammare än i det övre magasinet. Nivåerna i det undre magasinet bedöms variera för olika årstider på ett likartat sätt från år till år. För dagens klimat inträffar årets högsta grundvattennivåer i Göta älvdalen normalt under vinterhalvåret till följd av låg avdunstning tillsammans med långvarigt regn eller snösmältning. De lägsta nivåerna inträffar normalt i slutet av sommaren. Grundvattennivåns årstidsrelaterade variation beskrivs av Sundén et al. (2010) som en grundvattenregim, vilken illustreras för södra Sverige i Figur 6-6. Figuren visar typiska grundvattenfluktuationer under ett år, vilka är grovt generaliserade till två regioner som täcker hela södra Sverige. För respektive region visas också under vilka delar av året då det vanligtvis är snö eller snösmältning, samt under vilka perioder som nederbörden eller avdunstningen är störst. Den årliga variationsbredden i det undre grundvattenmagasinet ligger i Göta älvdalen vanligtvis i intervallet 1,0-2,5 m. Fluktuationerna i de undre grundvattenmagasinen varierar typiskt med avståndet från infiltrationsområdet och är generellt större nära infiltrationsområdena än invid älven.



Figur 6-6
Grundvattenregimer för två regioner i södra Sverige. Typiska årsfluktuationer visas i diagram för vardera regionen, där månad anges på x-axeln och variationsbredd på y-axeln (efter Sundén et al, 2010).

Resultat från mätningar

Inom Göta älvutredningen har geotekniska undersökningar utförts för tio delområden längs Göta älv. En sammanställning av hydrogeologiska förhållanden finns beskrivna i Tekniska PM för dessa delområden (SGI, 2011:11-20).

Allmänt kan sägas att grundvattnet strömmar från älvdalens sidor och ned mot älven. Grundvattennivån i ytliga jordlager, den så kallade nolltrycksnivån, har konstaterats ligga någonstans mellan markytan ned till omkring 2 m djup. Vidare har portrycksfördelningen funnits vara hydrostatisk från nolltrycksnivån och några meter nedåt. Därunder är variationerna större, med allt från kraftigt nedåtriktad gradient med stora undertryck relativt hydrostatisk portrycksfördelning till uppåtriktad gradient med artesiska grundvattenryck.

Nedströms Lilla Edet, längs älvens östra sida (delområde 8-10), ligger nolltrycksnivån i älvens närhet i allmänhet nära markytan, samt på ett större avstånd från älven i underkant av torrskorpan eller upp till cirka 2 m under markytan. Generellt uppvisar leran en hydrostatisk profil i de övre jordlagren och en något förhöjd portrycksnivå i den nedre delen av jordprofilen i anslutning till underliggande friktionsjord. Liknande förhållanden gäller för Nordre älv (delområde 2) samt älvens västra sida, nedströms Skår (delområde 1 och 3) och uppströms Lilla Edet (delområde 5 och 6). I den södra delen av delområde 1, i delområde 6 och i delområde 10 har portrycksfördelningarna ofta varit nära hydrostatiska, medan det i de övriga delområdena varit mer allmänt förekommande med uppåtriktad gradient på större djup. I delområde 5 har iakttagits att gradienterna under de översta hydrostatiska jordlagren är nedåtriktade långt bort från älven och uppåtriktade nära älven.

Mellan Ström och Skår på älvens västra sida (delområde 4) och mellan Intagan och Lilla Edet på älvens östra sida (delområde 7) råder varierande förhållanden. I norra delen av delområde 4 är det hydrostatisk portrycksfördelning i de övre jordlagren och därunder nedåtriktad gradient. Friktionslager under leran bedöms stå i kontakt med älven och dräneras till denna. I relation till markytan är trycknivån i friktionslagret som lägst omkring 10 m under markytan. Längre söderut är förhållandena omväxlande, med på större djup såväl hydrostatiska, som uppåt- och nedåtriktade gradienter. I den sydligaste delen är det på större djup en svagt uppåtriktad gradient.

I den norra delen av delområde 7 ligger nolltrycksnivån i underkant av en i vissa fall märklig torrskorpa. Portrycksfördelningen är hydrostatisk eller med en nedåtriktad gradient till

ett dränerande friktionslager. Något längre söderut, i området ned till Slumpån, ligger nolltrycksnivån under torrskorpan på 1-2 m djup och gradienten i portrycksprofilen är uppåtriktad. Strax söder om Slumpån finns ett dränerande friktionslager i leran som orsakar nedåtriktad gradient över lagret och uppåtriktad under detta. I den sydligaste delen är portrycksfördelningarna långt från älven hydrostatiska, medan gradienterna nära älven är uppåtriktade.

Framtida förhållanden

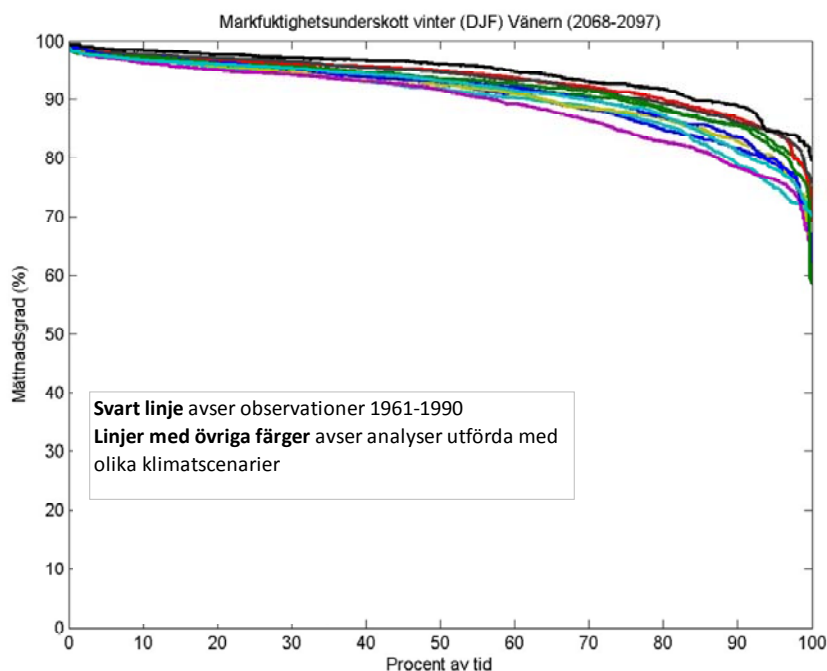
Bedömningar av grundvattenförhållanden längs Göta älv i ett framtida klimat baseras på en sammanställning av olika klimatanalyser rörande såväl extrem nederbörd och markfuktighet som grundvattenbildning och grundvattennivåer. Resultaten beskrivs nedan för grundvattennivåerna i de övre- och undre grundvattenmagasinen samt i en bedömning av framtida förändringar av portrycken i lerslänterna längs Göta älv.

Övre grundvattenmagasin

Förväntade framtida förändringar av markfuktigheten i Vänerns närområde har studerats av Bergström et al. (2011). Här beskrivs hur mycket vatten som finns tillgängligt i de översta jordlagren i relation till markens så kallade fältkapacitet. Beräkningar har genomförts med en hydrologisk modell utvecklad främst för områden med morän och grova jordar.

I Göta älvutredningen har antagits att dessa förhållanden är relevanta också för nivåerna i det övre grundvattenmagasinet i Göta älv dalen, beroende på att den uppspruckna torrskorpan påverkas direkt av nederbörd och avdunstning och grundvattennivån i denna kan sägas motsvara markfuktigheten i modellen. Resultaten från dessa analyser visar att markfuktigheten framöver kommer att minska under hela året. Minskningen är störst under vår och sommar till följd av ökad avdunstning, medan minskningen under vintern är tämligen måttlig, Figur 6-7. Dessa resultat har antagits gälla även för det övre grundvattenmagasinet. I figuren redovisas varaktigheterna för olika klimatscenarier samt observerade värden för dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990) med svart linje.

Ovanstående studie innefattar inte kortvariga, mycket intensiva regn, vilka möjligtvis skulle kunna orsaka höga nivåer i det övre grundvattenmagasinet. Bergström et al. (2011) bedömer att extrem dygnsnederbörd i Göta älv dalen, med en återkomsttid på 100 år, kommer att öka med omkring 20 % till år 2100. De mest intensiva regnen förekommer idag främst under sensommaren (Hernebring, 2006). Ett förändrat klimat bedöms inte i någon avgörande grad påverka när under året de mest extrema kortvariga regntillfällena inträffar (Olsson, 2011). Då markfuktigheten också bedöms minska under sensommaren är en preliminär slutsats därför att enstaka tillfällen med extrem nederbörd inte bör vara en trolig orsak till höga portryck i ett framtida klimat. Kunskapen om fluktuationerna i det övre grundvattenmagasinet, och hur dessa påverkar portrycken i de ytligaste lerlagren är dock begränsad.



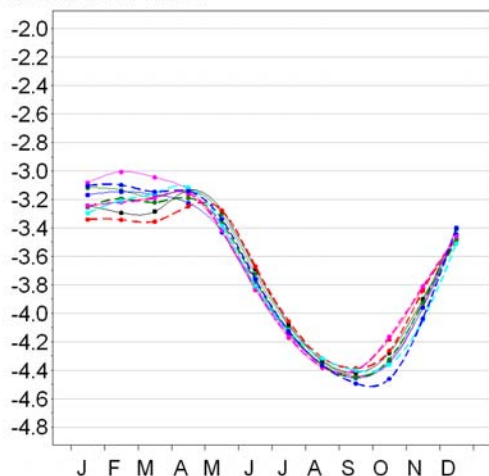
Figur 6-7
Varaktighetsdiagram för markfuktigheten kring Vänern under december-februari för perioden 2068-2097 tillsammans med observationer från 1961-1990 (efter Bergström et al, 2011).

Undre grundvattenmagasin

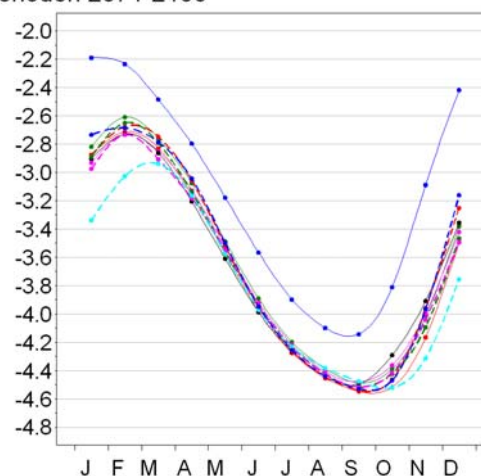
Förväntade framtida förändringar av grundvattennivåerna i öppna grundvattenmagasin inom samma grundvattenregim som Göta älv har studerats av bland andra Rodhe et al. (2009), Sundén et al. (2010) och Blied & Persson (2011). Dessa studier bedöms vara relevanta också för grundvattennivåerna i Göta älvdalens slutna, undre grundvattenmagasin. Detta eftersom infiltrationsområdena till dessa kan betraktas som öppna magasin.

Rodhe et al. (2009) och Sundén et al. (2010) analyserade fyra respektive fem stationer inom samma grundvattenregim och med hydrogeologiska miljöer någorlunda jämförbara med Göta älvdalens infiltrationsområden. Med undantag för ett klimatscenario gav samtliga beräkningar ett relativt likartat resultat. Resultaten indikerar större variationsbredd över året med såväl ökade högstanivåer som minskade lägstnivåer. Medelvärden över perioderna 1961-1990 samt 2071-2100 för dessa beräkningar indikerar att grundvattnets högstanivåer ökar mellan 0 till +0,4 m fram till år 2100 (se exempel i Figur 6-8).

Grundvattennätet station 15007
Perioden 1961-1990



Grundvattennätet station 15007
Perioden 2071-2100



Figur 6-8
Grundvattennivåns årsvariation i station 15-8 för referensperioden 1961-1990 (t.v.) och tio klimatscenarioer för perioden 2071-2100 (t.h.). Grundvattenstationen ingår i SGU:s grundvattennät och är belägen i ett öppet magasin i Herrljunga där jordtypen domineras av morän. Nivåerna är månadsmedelvärden för respektive period. Y-axeln visar nivån i meter relativt markytan. Varje linje motsvarar ett klimatscenario (Sundén et al., 2010).

Blid & Persson (2011) har kompletterat dessa analyser för de fem stationer som bedömdes relevanta för grundvattensituationen i Göta älvdalen. Utifrån extremvärdesanalyser utförda av SMHI har förändringen av de högsta grundvattennivåerna studerats. Resultaten indikerar ökning mellan 0,1 och 0,3 m för höga nivåer med en återkomsttid på 100 år.

Dessa resultat stöds också av Hultén et al. (2005) där observerade grundvattennivåer i slutna magasin studerades under fem nederbördsrika år 1998-2002. Resultaten från denna studie pekade på relativt stor ökning av grundvattennivåer under sommarhalvåret, medan ökningarna under vinterhalvåret var i samma storleksordning som ovan presenterade.

Till slutet av seklet kan därmed det undre grundvattenmagasinets högstanivåer i närheten av infiltrationsområdena väntas öka med omkring 0,3 m. Eftersom grundvattnets variationsbredd är störst nära infiltrationsområdet och minskar i riktning mot älven, skulle detta kunna innebära att beräkningarna för öppna magasin överskattar förändringarna för slutna magasin. En ytterligare begränsning för höga grundvattennivåer i slutna magasin är att magasinet kan bli fullt och att grundvattnet inte kan överstiga infiltrationsområdets nivå.

Portryck i lerlänterna

För stationära förhållanden antas portrycken i leran variera linjärt (samma hydrauliska konduktivitet för lerlagret) mellan det övre och undre grundvattenmagasinet. Det innebär att maximala portryck uppkommer då grundvattennivåerna är maximala i såväl det övre som det undre magasinet. I det undre magasinet förekommer de högsta grundvattennivåerna normalt under vinterhalvåret. Kunskapen om fluktuationerna i det övre magasinet är sämre, men dessa nivåer bedöms variera snabbare och kunna stiga även i samband med relativt kortvariga regn. Maximala portryck i lerprofilen kan alltså uppkomma i samband med regniga perioder eller snösmältning under vinterhalvåret.

Under vintrarna fram till år 2100 bedöms de högsta grundvattennivåerna i det övre magasinet förbli tämligen oförändrade, medan de högsta nivåerna i det undre grundvattenmagasinet förväntas öka med omkring 0,3 m. Det innebär alltså att portrycken i leran bedöms öka mycket lite i de ytligaste lagren och öka något på större djup. I de fall genomsläppliga skikt finns inom lerprofilen kan dock portrycksökningar med omkring 0,3 m uppkomma även i ytliga lerlager, förutsatt att dessa skikt står i kontakt med det undre grundvattenmagasinet.

Fakta i korthet

- Vattenföringen i Göta älv varierar under dygnet beroende på produktion av vattenkraft. Medelvattenföringen är 550 m³/s och maximalt tillåten vattenföring enligt vattendom är 1030 m³/s.
- Klimatförändringar innebär att ökade vattenmängder behöver avledas från Vänern.
- En förändrad årsrytm för tillrinningen till Vänern kan förväntas i framtiden, vilket påverkar flödena i Göta älv. Tillrinningen beräknas öka under vinterhalvåret samtidigt som den minskar under sommaren. Såväl höga som låga tappningar kommer att bli vanligare.
- Grundvattenförhållandena beror av älvdalens geologi, topografi och nederbörden och det finns ett övre och ett undre grundvattenmagasin. I områden med mäktiga leravlagringar finns ett övre och ett undre grundvattenmagasin. Under vintrarna fram till år 2100 bedöms de högsta grundvattennivåerna i det övre magasinet förbli tämligen oförändrade, medan de högsta nivåerna i det undre grundvattenmagasinet förväntas öka med omkring 0,3 m. Det innebär alltså att porttrycken i leran bedöms öka mycket lite i de ytligaste lagren och öka något på större djup.

7 Erosion

I detta kapitel beskrivs erosion och sedimenttransport i Göta älv vid dagens förhållanden och vid framtida klimatförändringar. Erosion är en naturlig och ständigt pågående process som i vattendrag främst orsakas av strömmande vatten och av nötning av is mot slänter och botten. Detta innebär att lutning och nivåer för slänter på land samt botten och slänter i älven successivt förändras. I samband med stabilitetsutredningar är dessa geometriska förhållanden en grundläggande förutsättning för beräkningarna.

Med erosion avses den process som leder till förlust av material från ett specifikt område på stranden och botten i vattendrag och längs kuster. Den motsatta processen kallas sedimentation (eller ackumulation). Erosion och sedimentation är ständigt pågående naturliga processer i landskapet. Den naturliga balansen kan störas av mänskliga aktiviteter, exempelvis genom konstruktioner i vatten, fartygstrafik, avverkning av strandnära skog med mera. Under vissa betingelser sker mer omfattande erosionsangrepp, till exempel längs kuster vid stormar eller vid höga flöden och vattennivåer i vattendrag och sjöar.

7.1 Utredningens uppläggning

För att kartlägga stabilitetsförhållanden och skredriskerna i Göta älv dalen är kunskap om erosionsförhållandena en viktig förutsättning. Därför har erosion och sedimenttransport i Göta älv, vid dagens förhållanden och till följd av framtida klimatförändringar, översiktligt klargjorts inom Göta älvutredningen. En utförligare beskrivning av detta arbete ges av Rydell et al. (2011c).

Den metodik som använts i utredningen har omfattat följande huvuddelar:

- analys och beskrivning av erosion och sedimenttransport för dagens förhållanden,
- beräkning och värdering av erosion i älven vid framtida klimatförhållanden fram till år 2100,
- värdering av behov av kompletterande utredningar.

Resultaten har använts som underlag för stabilitetsberäkningar för dagens och framtida förhållanden.

Analys av erosion och sedimenttransport för dagens förhållanden har inletts med en inventering och sammanställning av tidigare utredningar, tidigare mätningar, erfarenheter etc. i älv dalen.

Undersökningar genom upptagning av sedimentprover har utförts för att översiktligt beskriva bottensedimentens egenskaper. Befintliga erosionskydd har inventerats och bottenivåer från batymetriska mätningar vid olika tillfällen har jämförts och analyserats. En hydrodynamisk modell har etablerats för hela älvsträckningen och sedimenttransporten i älven har analyserats utifrån tillgängliga uppgifter och kompletterande mätningar. Med utgångspunkt från detta har beräkningar av erosion utförts och jämförts med uppmätta förändringar av bottenivåer.

Morfologiska och geologiska förhållanden redovisas huvudsakligen utifrån befintliga utredningar och några ytterligare undersökningar har inte utförts.

Erosionsförhållanden fram till år 2100 har beräknats med utgångspunkt från framtagna vattenflöden enligt klimatscenarier och jämförelser med dagens förhållanden. Uppskattade värden på erosionen har tagits fram för dels det fall dagens vattendom tillämpas, dels då högre vattenflöden tillåts i älven.

Underlag för stabilitetsberäkningar har sammanställts genom att uppskattade förändringar av bottenivåer och slänter redovisas för olika delsträckor.

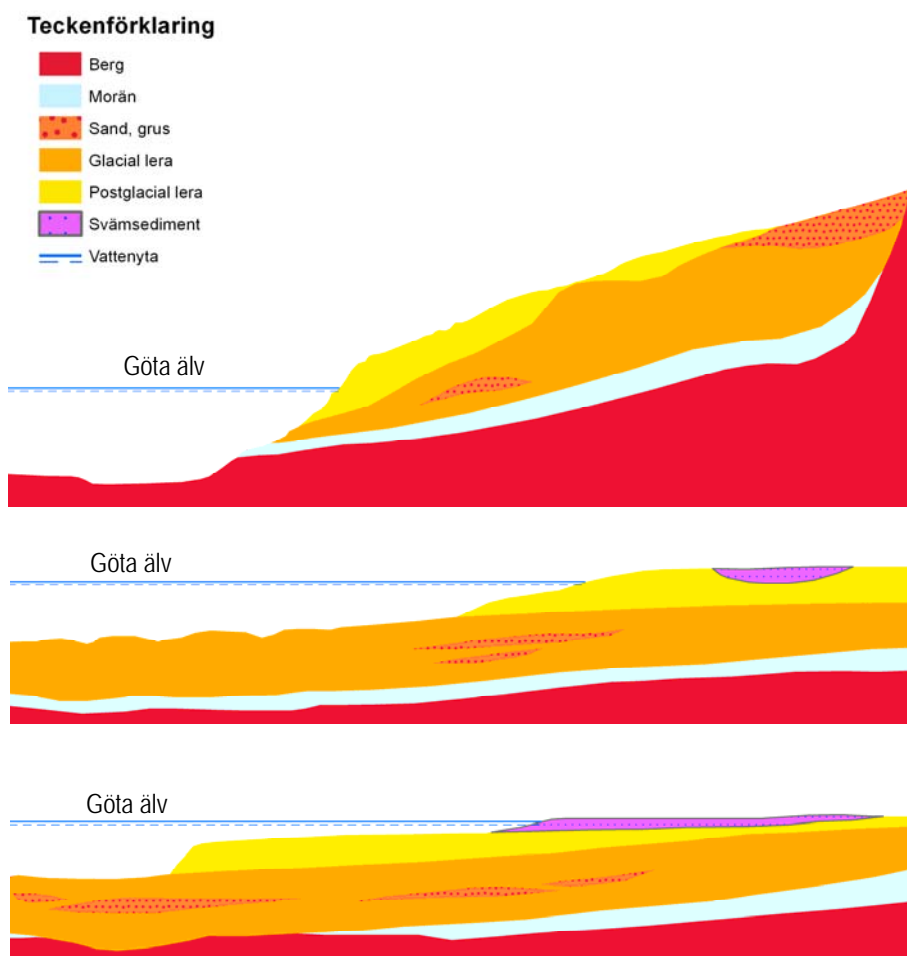
Slutligen har behovet av kompletterande utredningar och kunskap sammanställts, vilket redovisas i Rydell et al. (2011b).

7.2 Erosionsprocesser i Göta älv

Göta älvdalens morfologi och geologi har ingående studerats av bland andra Sundborg och Norrman (1963), Klingberg et al. (2006) och Klingberg (2011). Nedanstående beskrivning av de geologiska och morfologiska förhållandena i Göta älvdalen baseras på dessa rapporter.

De topografiska och batymetriska förhållandena varierar längs Göta älvdalen. Området uppströms Trollhättan karakteriseras av bottenprofiler med stora nivåskillnader men med relativt svaga lutningar som nedströms Trollhättan blir brantare. Nedströms Lilla Edet blir slänterna flackare och mellan Bohus och Göteborg blir terrassplanet under vattenytan nära stränderna längre och på flera sträckor finns en markerad undervattenslänt. I Figur 7-1 ges exempel på släntprofiler i Göta älv. I Nordre älv saknas ofta undervattensterrasser.

Strandbrinkarna blir successivt lägre mot älvdalens södra del. Längst i söder är markytans nivå nära havsytan varför översvämningssområden finns på båda sidor om älven. Två exempel på olika strandområden längs Göta älv visas i Figur 7-2 och Figur 7-3.



Figur 7-1
Exempel på släntprofiler i Göta älv. Profilerna är hämtade (uppifrån och ned) från sträckan Trollhättan – Lilla Edet, Lilla Edet – Bohus respektive Bohus – Marieholm. Profilerna visas i samma skala i höjd och längd.



Figur 7-2
Strandbrink vid Vesten
(mellan Trollhättan
och Lilla Edet) med
äldre skredskällor.
Foto: SGI.



Figur 7-3
Strandområde vid
Tjurholmen i närheten
av Älvängen.
Foto: SGI.

I Göta och Nordre älvs dalgångar består de lösa jordlagren i huvudsak av lera med varierande mäktighet och hållfasthet. Bottensedimenten i älvfåran utgörs huvudsakligen av glacial lera och över denna finns ställvis relativt tunna lager av postglacial lera och sand.

De erosionsprocesser som verkar i Göta älv är mycket komplexa och de lokala effekterna är svåra att förutsäga utan omfattande fältundersökningar och observationer under en lång tidsperiod.

I ett vattendrag beror erosionen huvudsakligen av vattenhastighetens storlek samt av det eroderade materialets egenskaper. Jordarter med fraktioner mellan grovsilt och mellansand utgör de mest lätteroderade. De eroderade jordpartiklarna förs nedströms av det strömmande vattnet. Finkorniga partiklar (fraktioner från lera till finsand) transporteras genom

suspension i vattenmassan. Större partiklar rullar eller hoppar längs botten i kontakt med denna, vilket benämns bottentransport. Om friktionsmaterial förekommer på ytan av kohe-sivt material kan det förra materialet bidra till ytterligare nötning av det underliggande ma-terialet och denna process kallas korrosion.

Erosionen av älvens botten och slänter beror till stor del av de krafter som uppkommer mellan vattnet och botten, så kallade bottenskvjvspänningar. Dessa skjuvspänningar be-ror av älvens flöde, dess form och bottenens karaktär. Jordmaterial i en botten börjar erode-ra när bottenskvjvspänningen överstiger ett visst tröskelvärde som kallas kritisk botten-skjuvspänning.

Om det inom ett visst avgränsat område råder jämvikt mellan eroderad och avsatt mängd material sägs området vara stabilt från erosionsynpunkt. Vid en nettoförlust av material är området utsatt för erosion och i motsatt fall sker en sedimentation/ackumulation av materi-al.

Det är dock inte enbart det strömmande vattnet som verkar eroderade i och omkring ett vattendrag. Vind- och fartygsgenererade vågor påverkar grundare partier samt strandzonen och nederbörd, ytavrinning och tjällossning påverkar strandbrinkarna.

Inom denna utredning har ingen detaljerad studie utförts av de lokala erosionsmönster som förekommer i Göta älv. En undersökning av älvens botten utfördes och rapporterades av Sundborg & Norrman (1963).

Erosionsmönster och sedimenttransport påverkas också av muddringsarbeten och deponering av muddermassor. Muddringar medför att viss del av sedimenten sprids till vatten, vilket leder till ökad transport av sediment i älven. De i vattnet deponerade muddermas-sorna också känsliga för erosion och kan medföra ökad sedimenttransport en tid efter dumpningen. I en sammanställning av Norrman (2008) anges att storleksordningen 20-25 % av muddermassorna kan avgå i suspension vid muddring och deponering i älven.

Skred och ras inträffar regelbundet i Göta älvdalen. Stabilitetsproblemen orsakas ofta av erosion men förloppet kan även vara det omvända, det vill säga skred och ras i strandban-kan medför erosion och sedimenttransport i de relativt lätteroderade skredmassorna.

7.3 Undersökningar och inventeringar

Vid studier av erosionförhållanden och sedimenttransport är det värdefullt att kunna följa förändringar över tiden. I denna utredning har endast begränsade långsiktiga mätdata varit tillgängliga, främst förändringar av bottenivåer.

Erosionsskydd

I en tidigare utredning som genomfördes avseende stabilitetsförhållandena i Göta älvdalen (Götaälvskommittén, 1962) rekommenderades förstärkning genom avschaktning samt ut-byggnad av erosionsskydd i vattenbrynet för vissa delsträckor. Under 1960- och 1970-talet anlades erosionsskydd där aktiv stranderosion förekom och idag har stora delar av älvens stränder försetts med erosionsskydd.

Längs i stort sett hela sträckan mellan Trollhättan och Älvängen finns erosionsskydd på båda sidor om älven med undantag för områden där bland annat berget går i dagen. Söder om Älvängen är det mer sparsamt med skydd utanför bebyggda områden. Mellan Bohus och Lärje har i huvudsak älvens östra strand försetts med erosionsskydd samt även delar av stränder i Göteborg.

Skydden har utförts genom att sprängsten lagts ut på strandbankarna, se Figur 7-4. Det har inte varit möjligt att finna någon dokumentation av inom vilka områden som skydden an-lagts och inte heller skyddens utformning under vattenytan.



Figur 7-4
Erosionsskydd vid In-
tagan (söder om Troll-
hättan). Foto: SGI.

Under 2010 har, i samband med den årliga inspektionsresa som görs längs älven med bland annat Sjöfartsverket och SGI, en inmätning av befintliga erosionsskydd utförts. Inventeringen omfattade de skydd som var tillgängliga ovan vattenytan. Någon uppföljning av skyddens totala omfattning och beskaffenhet har inte gjorts. Detta innebär att det saknas kunskap om vilka delar av slänterna under vatten som är skyddade liksom i vilken utsträckning strandskoningen har glidit ned längs slänterna.

Strandskoningen nära och över vattenytan utgör ett skydd mot stranderosion men i vissa områden kan skydden överspolas vid fartygstrafik och medföra transport av material bakom och genom strandskoningen. Skoningarnas status under vattenytan är i stort okänd men undersökningar med sidescan sonar antyder att skyddet på flera ställen kan ha glidit ut mot djupfåran. Detta kan vara en följd av erosion i underkanten av strandskoningen. Det är därför av stor vikt att en inventering av erosionsskydden utförs även under vattenytan.

Undersökningar av bottenförhållanden

I syfte att beskriva de bottenförhållanden i Göta älv som har betydelse för erosionen har olika undersökningar utförts. Dessutom har tidigare utredningar inventerats och material från dessa sammanställts. En strategi valdes där ett provtagningsprogram genomfördes inledningsvis för att få en orienterande bild av älvens bottensediment och dess egenskaper. Resultaten har använts som underlag för kompletterande undersökningar. Dessa har därefter genomförts separat eller i samband med de geotekniska undersökningarna i älven. Mer detaljerade redovisningar av för erosionsanalysen utförda fält- och laboratoriearbeten finns i en särskild markundersökningsrapport (Blid & Rydell, 2011).

Utredningen om bottenmateriallets erosionskänslighet har varit översiktlig, vilket innebär att undersökningar i fält och på laboratorium endast kunnat utföras punktvis i några områden. Vidare har det inte funnits resurser att göra undersökningar av alla förhållanden av betydelse för erosion och sedimenttransport utan resultat från tidigare utredningar har använts till stor del. Detta gäller bland annat detaljerade morfologiska undersökningar inklusive provtagning av sediment och sedimentologiska undersökningar. De maringeologiska förhållandena har bedömts utifrån befintligt material med vissa kompletteringar.

Provtagning och analys av bottensediment

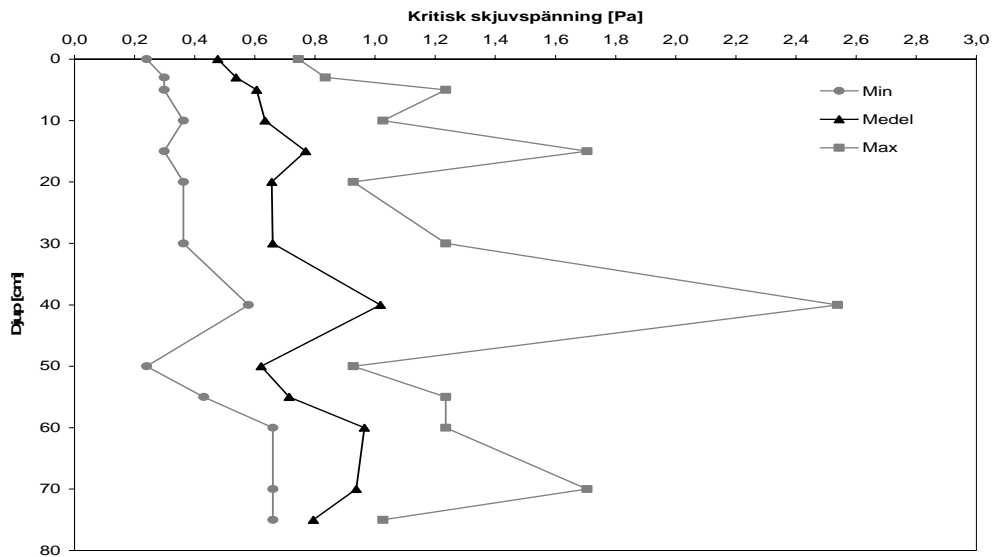
Inledningsvis genomfördes inom utredningen en översiktlig provtagning med rörprovtagare och laboratorieundersökning av ytliga sediment i 15 sektioner tvärs älven. Resultatet visade en något ökad andel av finkorniga fraktioner i ytsedimenten i nedströms riktning i Göta älv. Mellan Trollhättan och Lilla Edet innehöll proven huvudsakligen gyttja och silt, med undantag av en sektion som i sin helhet utgjordes av sand. Nedströms Lilla Edet bestod materialet av lera och sand.

Ytterligare provtagning av bottensediment och laboratorieundersökningar har därefter utförts i cirka 40 punkter längs älven. De geotekniska egenskaperna för de upptagna sedimenten undersöktes i SGI:s laboratorium. Dessutom genomfördes laboratorieundersökningar för att bestämma värden på de parametrar som styr erosion och sedimenttransport. Institutet för vattenbyggnad vid Universitetet i Stuttgart har utvecklat ett system för bestämning av kritisk bottenskjuvspänning, densitet samt erosionshastighet på upptagna sedimentprov, det så kallade SETEG-systemet. Provtagning utförs med öppna plexiglasrör med diameter 130 mm, se Figur 7-5. I laboratoriet trycks sedimentproverna i rören upp i botten på en ränna där vatten kan strömma över provets överyta. För olika flöden kan därefter erosionsegenskaperna bestämmas. Mer detaljerad information om metoden finns beskrivet av Rydell et al. (2011b).



Figur 7-5
Sedimentprovtagning med SETEG-metoden. Foto: SGI.

En sammanställning av resultaten från undersökning av de kritiska bottensskjuvspänningarna redovisas i Figur 7-6. Figuren visar att de kritiska bottensskjuvspänningarna varierar avsevärt längs älven men i genomsnitt uppgår till 0,5-1,0 Pa.



Figur 7-6
Kritiska bottensskjuvspänningar bestämda med SETEG-metoden.

För att undersöka variation i plan och djup av erosionsparametrarna utfördes en koncentrerad provtagning för ett försöksområde i närheten av Lödöse. Resultaten från detta försöksområde beskrivs närmare av Rydell et al. (2011b).

Backscatter-analys

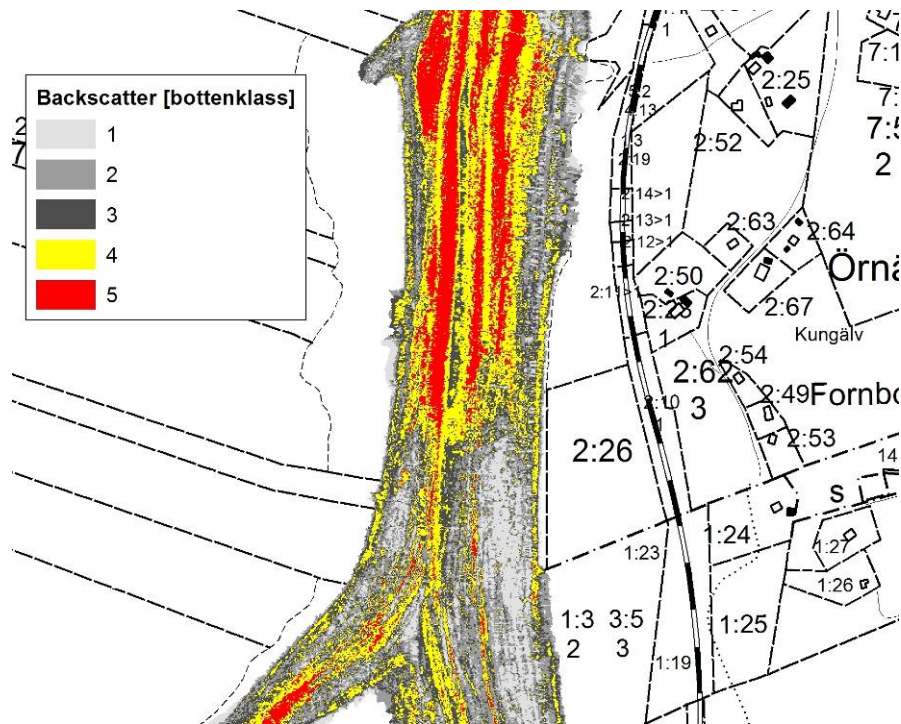
I samband med den batymetriska kartläggningen med multibeam-ekolodning i Göta älv insamlades även uppgifter för analys med backscatter. När den ljudpuls som sänds ut vid ekolodningen returneras har den fått en förändrad amplitud och detta går att utnyttja för att bestämma sammansättningen av bottenens ytskikt. En låg amplitud indikerar en mjuk botten och en hög amplitud indikerar en hård botten. Det bör observeras att ytskiktets egenskaper enbart kan bestämmas till cirka 20 mm djup, vilket innebär att ett tunt lager av fast material kan finnas på underliggande lösare material.

Sedimenten har därefter indelats i fem ytgeologiska klasser enligt Tabell 7-1.

Bottenklass	Bedömt material	Typ av botten
Klass 1	Mycket lösa sediment (lerygttja, gyttjelera)	Sedimentationsbotten
Klass 2	Lösa sediment (lera, gyttja, silt, organiskt material)	Sedimentationsbotten
Klass 3	Finsand, silt, hård lera, organiskt material	Blandbotten
Klass 4	Mellansand, grovsand	Erosions- och/eller transportbotten
Klass 5	Grusig sand, grus, sten	Erosions- och/eller transportbotten

Tabell 7-1
Den klassning av ytskiktet i Göta älv som använts vid tolkning av backscatterdata. (Efter Marin Miljöanalys, 2011a)

Ett exempel på tolkat backscatter-data redovisas i Figur 7-7. För mer detaljerade resultat hänvisas till en rapport om ytgeologi i Göta älv (2011a).



Figur 7-7

Exempel på bottenens ytskikt för områden norr om Tjurholmen utifrån tolkat backscatter-data. In- delningen av de olika bottenklas- serna framgår av Tabell 7-1.

Bakgrundskarta © SGI, Lantmäte- riet.

Sidescan sonar

I samband med en maringeologisk kartläggning av Göta älv genomförde SGU mätningar med bland annat sidescan sonar i farleden (Klingberg et al., 2006). Metoden bygger på att en ljudpuls sänds ut i ett vattenområde och dess reflektion (ett eko) mäts. Insamlade mät- data genererar bilder av bottenarna. Ur bilderna kan bedömningar göras av bottenarnas ytfor- mer, rännor, föremål på bottenar, sedimentformationer etc. Mer information om metoden ges av Rydell et al. (2011b). I den samlade värderingen av erosionsförhållanden har bilder från sidescan sonar använts för vissa sträckor i älven tillsammans med övriga undersök- ningsdata.

7.4 Förändring av bottennivåer

Förändringar av bottennivåer i Göta älv mellan olika tidpunkter ger information om ero- sions- och sedimentationsförhållandena i älven. De batymetriska förhållandena har kart- lagts genom bottennivåmätningar vid flera tillfällen. Inom Göta älvutredningen har en hel- täckande batymetrisk mätning med hög upplösning och hög noggrannhet utförts under 2009. Mätningen utfördes med multibeam-teknik och omfattning av undersökningen, nog- grannhet i mätningar och resultat redovisas i en särskild rapport (Marin Miljöanalys, 2011b).

Resultat från tidigare mätningar

Tidigare har vid flera tillfällen såväl multibeam-mätningar samt enklare lodningar genom- förts och då oftast för delar av älven. En sammanfattning av resultaten från tidigare mät- ningar redovisas nedan.

Slutsatser från mätningar 1963

Sundborg & Norrman (1963) jämförde lodade sektioner från 1899 med sektioner från 1959-1960. Utöver artificiella ingrepp längs älven konstaterades bland annat att uppströms Lilla Edet hade älvens vattennivå höjts till följd av nya regleringsstrategier, vilket inneburit att ett nytt strandplan utformats. Delar av det material som eroderat från det nya strandplanet hade avsatts på det gamla strandplanet. Någon allmän fördjupning eller uppgrundning av älvfåran kunde inte iakttas.

Nedströms Lilla Edet hade någon påtaglig stranderosion eller större släntskred inte inträffat. På sträckan Lilla Edet till strax nedströms Göta hade många artificiella ingrepp omöjliggjort analys av naturliga processer. Däremot observerades en påtaglig erosion av djupfåran nedströms Göta, speciellt mellan Dössebacka och Kungälv, vilket bedömdes bero på mer erosionskänsligt bottenmaterial. Göteborgsgrenen var mycket påverkad av muddringsarbete, varför studier av naturliga processer var svåra att göra. I vissa sektioner kunde en tendens till bottenerosion ses.

Observationer inom SGI:s övervakningsverksamhet

I en redovisning av SGI:s verksamhet i Göta älv dalen under perioden 1962-1982 gjordes en uppföljning av erosionsförloppen för delar av älven (Lindskog, 1982). På sträckan Trollhättan-Lilla Edet visade mätningar att strandlinjen förflyttats inåt land med i genomsnitt 2-4 m under den aktuella perioden. Någon nämnvärd ändring av bottennivån kunde dock inte konstateras vid pejlingar av älvbotten för motsvarande älvsträckor.

På sträckan Lilla Edet-Göteborg hade stranderosionen mellan Lilla Edet-Garn varit ganska kraftig med flera släntskred som följt. Nedströms Lilla Edet visade pejlingar med sex års mellanrum inte någon mätbar erosion i älvens botten. Undersökningar i älvens Göteborgsgren gav inte något entydigt resultat utan älvbotten hade omväxlande legat högre eller lägre jämfört med utgångspejlingen.

Vattenfall

Under 1970-talet utfördes fördjupning av farleden inom några områden längs älven i Vattenfalls regi. De muddrade sedimentmassorna deponerades i djupare delar av älven. En uppföljning av dessa dumpningsområden gjordes genom att ekolodning utfördes vid dumpningstillfällena 1975 och under de efterföljande åren 1976 och 1978 som ett led i miljökontrollprogrammet för dessa arbeten (Vattenfall, 1978). Mätningarna i dumpningsområdena från 2003 och 2009 visar generellt på liknande bottentopografi som mätningarna från 1970-talet. Nivåskillnaderna mellan 1970-talsmätningarna och mätningarna från 2009 uppgår inte till mer än en meter, och i flera fall mindre än en halv meter. Betonas bör dock att noggrannheten i denna jämförelse är begränsad till följd av osäkerhet vid lokalisering av mätsektioner från 1970-talet. En rimlig slutsats från jämförelsen kan vara att förändringarna sedan 1970-talet är mindre än en meter i de aktuella områdena.

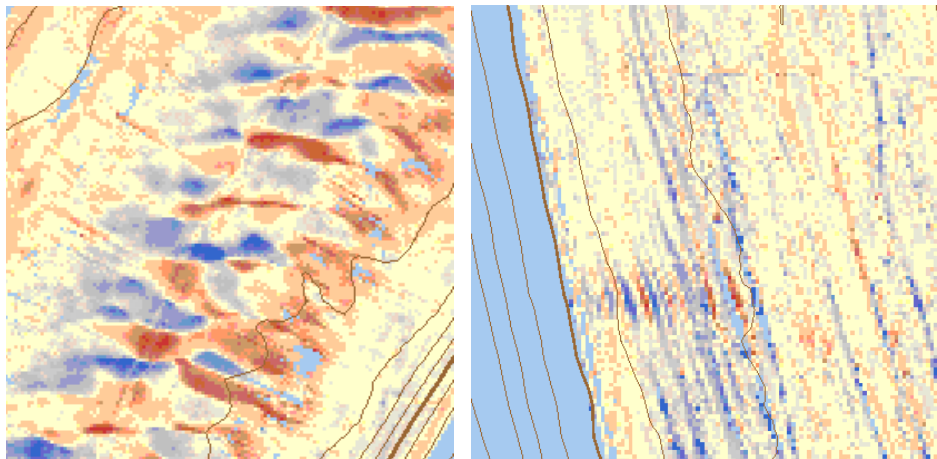
Karaktären på förändringarna verkar vara "lokal", det vill säga förändringarna sker inte alltid på samma sätt över stora områden. Det sker istället omväxlande såväl ökning som minskningar av bottennivåerna.

Jämförelser mellan batymetriska mätningar 2003 och 2009

Förändringar av bottennivåer har beräknats som skillnaden mellan batymetriska mätningar från 2003 och 2009. Ett nät med rutor med sidmättet 0,5 m upprättades och skillnaden mellan nivån för varje ruta beräknades. Beräkningarna har justerats för en avvikelser i nivå som bedömts vara 70 mm mellan de båda mätningar för sträckan från Vargön till Haj (mellan Lilla Edet och Bohus) medan det för de södra delarna inte kunnat bestämmas nå-

gon motsvarande förskjutning. En korrektion för skillnaden mellan höjdmmodellerna gjordes därför längs hela sträckan. Denna korrigering kan eventuell ha lett till en viss över-skattning av bottennivåns sänkning i de södra delarna av älven.

Mätningarna 2003 omfattade endast farleden i Göta älv ner till Bohus samt i älvens Göteborgsgren samt ett mindre område längs denna. Detta innebär att stora delar av de grunda områdena nära stränderna, såväl som hela Nordre älv, inte finns med i denna jämförelse. Två illustrationer av beräknad bottennivåförändring visas i Figur 7-8. Blå färg visar högre bottennivå (sedimentation) och röd färg lägre bottennivå (erosion) mellan 2003 och 2009 års mätningar. I figuren visas till vänster ett område, i vilken sandvågor transporteras i en mäktig sandavlagring. Till höger visas ett område med vad som bedöms vara korrasionsmönster på en lerbotten.



Figur 7-8
Jämförelse av mätningar av bottennivåer 2003 och 2009. Blå färg visar högre bottennivå och röd färg lägre bottennivå.

En sammanställning av förändringar av bottennivåer mellan 2003 och 2009 visar att i medeltal har bottennivån sänkts varje år sett över hela älvsträckan med 7 mm. Detta överensstämmer med den medelerosion i älven som tidigare uppskattats av Larson & Hanson (2006). Det bör dock noteras att nivåjämförelsen inte täcker hela älven och att erosion eller sedimentation utanför farleden därmed inte finns med i beräkningen. Jämförelsen visar också att störst erosion förekommer i den södra delen av älven och minst i den norra delen. Vidare är variationerna störst i den södra delen.

Sammanfattande analys av utförda mätningar

Sammanfattningsvis visar bedömningar utifrån mätningar att det förekommer såväl ökning som minskningar av bottennivåerna i älven. Dessa förändringar verkar dock främst ske småskaligt, med omväxlande ökning och minskningar av nivåer inom samma delsträcka. Bottennivåförändringarna verkar inte heller vara konstanta över tid utan nivån inom ett visst område kan minska under en period för att senare öka.

De årliga förändringarna visar både på ökade och minskade bottennivåer som i farleden ofta är mindre än 0,05 m. I slänter mot älvens djupare delar har erosion uppmätts som på sina ställen är upp till 0,15 m/år. För att bestämma förändringar mer detaljerat behöver mätningar utföras vid flera tillfällen med täta intervall. Det mönster som framkommer vid analys av olika delsträckor längs älven har ändå bedömts ge en helhetsbild av förändringarna av bottennivåer och därför använts i de fortsatta bedömningarna av erosion och sedimenttransport i älven.

7.5 Hydrodynamiska beräkningar

SMHI har i samverkan med SGI etablerat en hydrodynamisk strömningsmodell över Göta älv, från Vänern till havet (inklusive Nordre älv). Syftet har främst varit att få en beskrivning av bottenskjuvspänningarnas fördelning vid olika vattenflöden. Modellen och resultatet redovisas kortfattat i detta avsnitt medan en mer utförlig beskrivning ges av Åström et al. (2011).

Beräkningsmodell

För att beräkna strömmar, vattennivåer och bottenskjuvspänningar har en hydrodynamisk beräkningsmodell i beräkningsprogrammet Delft3D använts. Vid uppsättningen av modellen har Göta älv delats in i tre delsträckor på grund av kraftverken i Trollhättan och Lilla Edet. Att beskriva skillnaderna i vattennivå som uppstår vid kraftverken är relativt komplicerat, vilket gör att det inte varit aktuellt att sätta upp en sammanhängande beräkningsmodell som sträcker sig hela vägen från Vänern till havet. Det första delområdet sträcker sig från Vänern till Trollhättan, det andra från Trollhättan till Lilla Edet och det tredje delområdet från Lilla Edet till havet. Vart och ett av de tre områdena har beräknats separat. Beräkningarna har utförts med en tvådimensionell (djupintegrerad) modell, eftersom detta har bedömts ge tillräcklig noggrannhet.

Batymetriska förhållanden i modellen är hämtade från den terrängmodell som etablerats inom Göta älvutredningen. Terrängmodellen utgörs av data i ett rutnät med en meters sida som sedan har interpolerats till strömningsmodellens beräkningsnät med celler med storlek cirka 30x10 m.

Som underlag för kontroll av modellresultaten har SMHI utfört mätningar av vattenstånd och vattenhastigheter (strömmätningar) som använts vid kalibrering och validering. För kalibreringen av beräkningsmodellerna för de tre delområdena är det framförallt bottenråheten, i form av Mannings tal, som har justerats. Detta tal valdes initialt med ledning av informationen i den maringeologiska utredningen (Klingberg et al., 2006), men har under kalibreringen justerats så att en korrekt lutning av vattenytan mellan två peglar uppnåtts. Valda ingångsdata och randvillkor framgår av den hydrodynamiska rapporten (Åström et al., 2011).

Resultaten från kalibreringen och valideringen visar att beräknade och uppmätta strömhastigheter ligger inom samma storleksordning och strömriktningarna visar god överensstämmelse.

Resultat av beräkningar

Simuleringar har gjorts för sex olika vattenflöden från Vänern: 170 m³/s, 550 m³/s, 780 m³/s, 1030 m³/s, 1250 m³/s och 1500 m³/s. Dessa flöden motsvarar tillåtna värden enligt vattendom, medelvattenföring och flöden som kan komma att uppträda i ett framtida klimat.

Sammanfattningsvis visar resultaten av simuleringarna att bottenskjuvspänningarna varierar från 0,2 Pa upp till cirka 5 Pa beroende på vattenflödet. Generellt är skjuvspänningarna högst i de norra delarna av de tre delområdena och avtar söderut. De högsta skjuvspänningarna förekommer främst där strömhastigheten ökar på grund av att älven smalnar av eller blir grundare. På flera platser visar beräkningarna avsevärt högre skjuvspänningar lokalt vid kanterna av älven.

På sträckan Vänern – Trollhättan ökar skjuvspänningarna från 0,5 Pa vid 780 m³/s till 2 Pa vid 1500 m³/s, men lokalt i kanterna på djupfåran förekommer värden på 5 Pa. Söder om Trollhättan och till Lilla Edet varierar bottenskjuvspänningarna mellan 0,8-3 Pa vid 780 m³/s. Vid 1500 m³/s ökar skjuvspänningarna till 5 Pa i hela älvfåran i den norra delen och

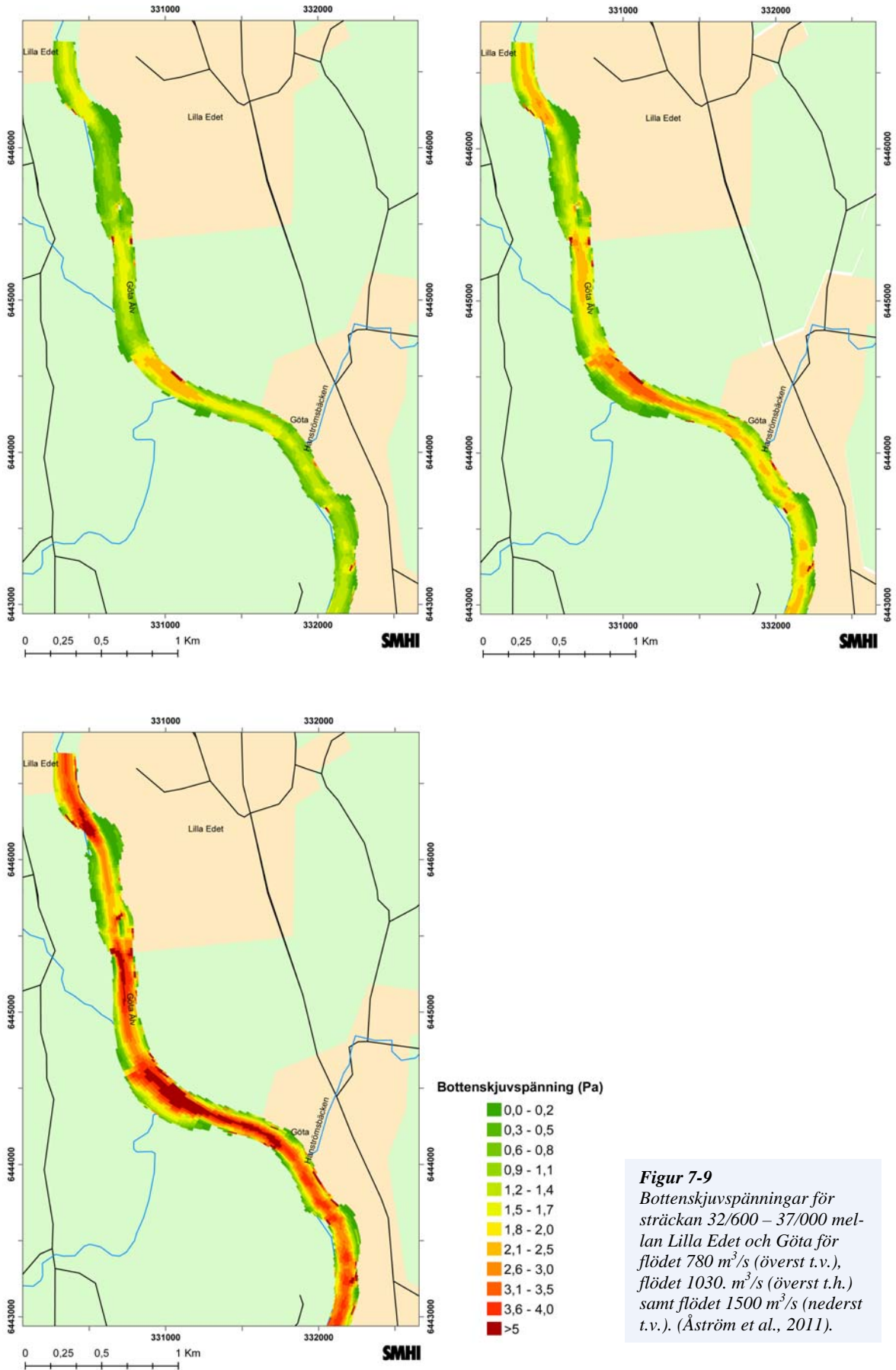
till 3,5 Pa söderut. Mellan Lilla Edet och Bohus är de beräknade skjuvspänningarna cirka 2,5 Pa för 780 m³/s och ökar upp till 5 Pa vid 1500 m³/s.

En betraktelse av flödesfördelningen mellan Nordre älv och Göteborgsgrenen (där cirka 75 % av flödet går genom Nordre älv) kan leda till att bottenskjuvspänningarna skulle vara högre i Nordre älv än i Göteborgsgrenen, men så är inte fallet. Jämför man skjuvspänningarna i de två grenarna ser man att de är av samma storleksordning, vilket är en följd av att Nordre älv generellt är bredare och djupare än Göteborgsgrenen. De beräknade bottenskjuvspänningarna är relativt små i både Göteborgsgrenen och Nordre älv, oftast 0,2 Pa med lokalt högre värden upp till 2,5 Pa. Detta gäller både för flödena 780 och 1500 m³/s.

Omfattningen av områden med höga skjuvspänningar ökar då flödet i älven ökar. Med ökande flöde ökar också skjuvspänningen i hela älvfåran. Anledningen till att skjuvspänningarna är högre i de norra delarna av respektive delsträcka är att strömhastigheterna generellt sett är högre här. Typiska värden på vattenhastigheter i de norra delarna är 0,7 - 1,0 m/s och 0,4 - 0,6 m/s i de södra delarna vid flödet 1030 m³/s.

Ett exempel på beräknade bottenskjuvspänningar för området kring Göta inom delsträckan Lilla Edet till havet visas i Figur 7-9. Av figuren framgår att bottenskjuvspänningarna ökar avsevärt med större flöden i älven.

En sammanställning av fördelningen av samtliga bottenskjuvspänningarna visar att väsentligt större andel låga bottenskjuvspänningar förekommer nedströms Bohus än i områdena uppströms.



Figur 7-9
Bottenskvjvspänningar för sträckan 32/600 – 37/000 mellan Lilla Edet och Göta för flödet $780 \text{ m}^3/\text{s}$ (överst t.v.), flödet $1030 \text{ m}^3/\text{s}$ (överst t.h.) samt flödet $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (nederst t.v.). (Åström et al., 2011).

Jämförelse av skjuvspänningar vid modifierad djupfåra

Efterhand som erosionen pågår uppkommer en breddning och fördjupning av älvens tvärsektion. Då kanalen vidgas ökas genomströmningsarean vilket vid oförändrat flöde ger lägre vattenhastigheter och därmed lägre skjuvspänningar i sektionen. För att studera hur bottenskjuvspänningarna längs en älvsträcka påverkas av erosion i djupfårans kanter har en enkel hydraulisk modellering utförts, där älvfåran breddats med 4 m på vardera sidan. Beräkningarna visar att bottenskjuvspänningarna minskar med 5-10 % jämfört med de ursprungliga förhållandena. Detta innebär att förändringarna vid en utökad tvärsektion bedöms ha begränsad påverkan på erosionen.

7.6 Fartygstrafikens inverkan på erosionen

Fartygstrafiken genererar tre typer av strömning som kan påverka älvbankarna och strandplanen, nämligen kortperiodiga vågor som huvudsakligen genereras från fören på ett fartyg (bogvågor), långperiodiga vågor som bestäms av den totala vattenmassan ett fartyg undantränger (avsänkingsvågor) och en motström runt ett fartyg beroende på fartygets hastighet och hur stor del av älvens tvärsnitt som fartyget upptar.

Det bakåtriktade flödet under fartyget och propellergenererad strömning kan ge påverkan på älvens djupfåra. Vid krökar och/eller smala passager påverkas troligen även undervattenslänter mot djupfåran och strandplanen vid sidan av djupfåran. Vid fartygens färd uppströms sammanfaller riktningen hos det bakåtriktade flödet med vattenföringens riktning.

Brytande vågor, med kraftig generering av turbulens och påverkan på botten och slänter, kan uppkomma vid fartygspassager i älven, se Figur 7-10.



Figur 7-10
Brytande vågor
vid fartygs-
passage. Foto:
Jonas Althage.

Det årliga antalet fartygspassager (av maskinfartyg) var på 1920- och 1930-talet knappt 20 000 och sjönk fram till 1950-talet till mellan 12 000 och 14 000. Idag är motsvarande siffra cirka 1 600 lastfartyg per år.

Jämförelse med vattenföringens påverkan

I en utredning av Althage (2010) har skjuvspänningarna från ett våggenererat flöde beräknats. Skjuvspänningarna är av samma storleksordning som skjuvspänningar från tappningsflödet, varför erosion på grund av skjuvspänningar från fartyg torde vara i samma storleksordning per tidsenhet. Fartygens bidrag till erosion på grund av skjuvspänningar är enligt denna grova uppskattning knappt 1 % vid en fartygstrafik om 1600 passager per år.

Transport av sediment på grund av fartygstrafik

Strömmar som genererats av bogvågorna och avsänkingsvågen leder till att grövre partiklar och jordklumpar rullar och hoppar utmed botten. Strömmarna medför också turbulens och tryckförändringar som leder till uppslamning av löst lagrat och finkornigt material. Rullande, hoppande och uppslammat material transporteras både i längdled och i tvärled.

En modell har utvecklats för att uppskatta mängden material som transporterats längs älven på grund av fartygspassager och som når Göteborg (Larson, 2011). Modellen utgår från mängden uppslammat material vid fartygspassage, hur snabbt materialet åter sedimenterar och med vilken hastighet som vattenflödet i älven kan transportera uppslammat material (advektiv hastighet). Mängden eroderat material som kommer ut från älven på grund av fartygstrafiken uppskattades på detta sätt till 3500 ton per år.

Fartygstrafik i relation till kraftverksdrift

En jämförelse mellan erosion av vågor från fartyg och på grund av vågor orsakade av kraftverksdrift med plötsliga tappningsändringar har studerats av Larsen (1995 och 1996). En jämförelse har gjorts för en sektion ett stycke nedströms Lilla Edet och en sektion nedströms förgreningen till Nordre älv. Det konstateras att vattenståndsförändringen på grund av långperiodiga vågor vid fartygspassage går mycket snabbare och är väsentligt större än vattenståndsförändringen vid tappningsändring. Det konstaterades också att snabba vattenståndsförändringar leder till tryckgradienter i strandslänter. Vidare att det kan uppkomma tryckgradienter som leder till erosion, framförallt i siltiga material.

För sektionen nedströms förgreningen drar Larsen slutsatsen att erosionspåverkan av vågor från fartyg är markant större än erosionspåverkan från kraftverksdrift. Det framgår inte om hänsyn tagits till frekvensen av fartygspassager respektive tappningsändringar inför denna slutsats. Oskyddade siltiga slänter fanns förr uppströms Lilla Edet. Risker för denna typ av erosion har minskat på grund av erosionskydd. Erosionen förekommer dock sannolikt i viss omfattning även idag, bakom de erosionskydd som lagts ut.

Sammanfattande analys av fartygens påverkan på erosionen

Sammanfattningsvis bedöms att vid transport av eroderat material längs älven är fartygens bidrag sannolikt mycket litet, enligt uppskattningen ovan 3 500 ton per år jämfört med den totala transporten av material till havet som uppskattats uppgå till 180 000 ton.

När det gäller erosion från slänter har sannolikt fartygen större påverkan. Erosion av strandbankarna till följd av fartygsvågor kan lokalt vara betydande och initiera små skred. Det är emellertid svårt att kvantifiera denna inverkan. Man bör dock vara observant på fartygspassagers effekter bland annat i smala passager och vid skarpa krökar där stränderna är erosionskänsliga. Vidare bör observeras att fartygens hastighet har stor betydelse för vågbildningen och därmed för erosionsprocesserna. Slutligen har erosionskyddens utsträckning och beskaffenhet över och under vattenytan stor betydelse för fartygsinducerad erosion.

7.7 Sedimenttransport

En samlad värdering av erosion, transport och sedimentation av material längs Göta älv har utförts och sammanställts i en sedimentbudget för älven. Sedimentbudgeten visar omfattning och fördelning av de sediment som transporteras från Vänerens utlopp till havet, totalt och för olika delsträckor. Som underlag för denna sedimentbudget har en analys av transporten av suspenderat material längs älven utförts.

Transport av suspenderat material i Göta älv

Flera utredningar har utförts under åren för att klargöra sedimenttransporten i Göta älv. En sammanställning och analys har gjorts av tidigare utredningar kring transport av suspenderat material i Göta älv (Göransson, 2011). De långa mätserier av kontinuerliga grumlighetsmätningar som finns för Göta älv har använts för att göra en bedömning av transporten av suspenderat material (sediment) i älven. Ett antagande var att det finns en stark koppling mellan grumlighet och suspenderade partiklar och att detta skulle kunna utgöra underlag för att kunna upprätta en sedimentbudget för Göta älv.

Resultaten har jämförts med tidigare utredningar utförda av Sundborg & Norrman (1963), Göta älvs Vattenvårdsförbund (2010), SMHI (2010) och Westberg (2010). Utredningarna visar delvis olika resultat, vilket bland annat beror på att provtagningar gjorts på olika nivåer och i olika delar av en tvärsektion men också på olika typer av analyser av sedimenten.

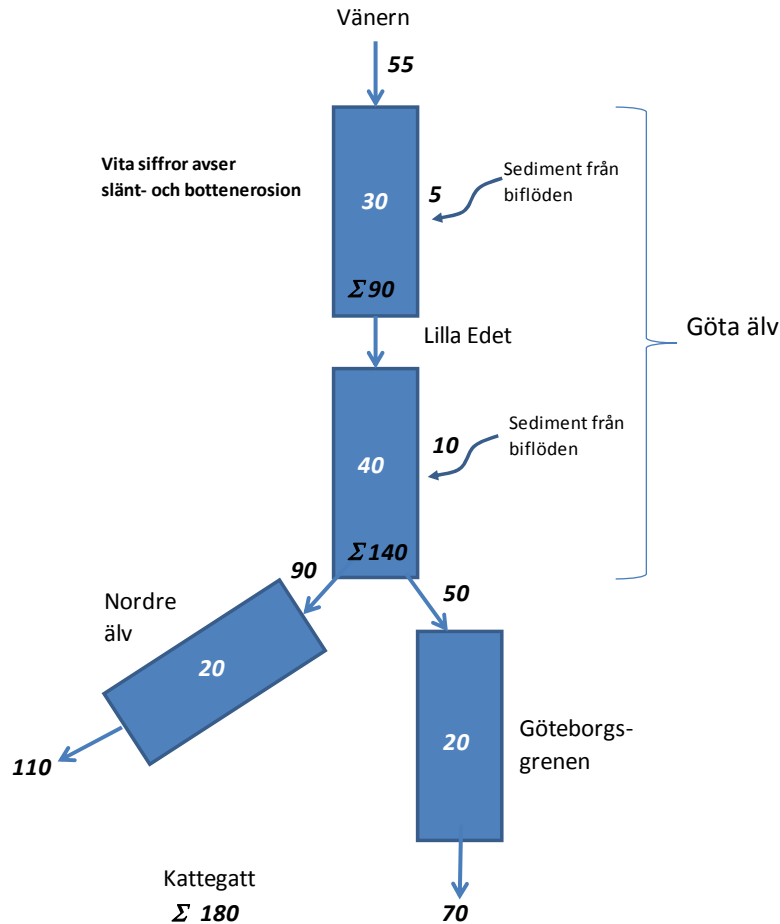
Den totala transporten av suspenderat material i Göta älv består av suspenderat material inklusive utspolat material samt bottentransport. Därtill kommer små lerpartiklar, kolloider och lösta ämnen som inte ingår i bestämning av suspenderad halt men som ingår i bestämning av torrs substans. Halten suspenderat material är inte helt jämnt fördelad över en tvärsektion och det har därmed en viss betydelse var i sektionen provtagningen är utförd.

I syfte att undersöka om extrem tappning möjligen genererar en tydlig ökning av grumligheten gjordes en jämförelse mellan det extrema flödet vintern 2001 (från sen höst 2000 till och med vintern 2001) och turbiditeten under samma period (dygnsmedelvärden). En jämförelse gjordes även med data från 2005 och 2007 med tydligt ökat vinterflöde. Resultaten visar inte på något tydligt samband mellan extrem tappning och turbiditet.

Sammanfattningsvis visar sammanställning och analys att transporten av suspenderat material för hela Göta älv (utloppet i havet vid Nordre älv och vid Göteborgsgrenen) varierar stort mellan olika år. Ungefär 70 % av transporten av suspenderat material uppströms förgreningen transporteras ut genom Nordre älv, med en variation mellan 49-85 % för den studerade tidsperioden (2004-2009). Under år med riklig nederbörd finns tydlig påverkan på flödet (i älven och i biflödena) och på mängden transporterat suspenderat material.

Sedimentbudget för Göta älv

En sammanställning av transporterat material längs Göta älv redovisas i en sedimentbudget för älven enligt Figur 7-11. Sedimentbudgeten visar omfattning och fördelning av de sediment som transporteras från Vänerens utlopp till havet, totalt och för olika delsträckor. De redovisade mängderna i sedimentbudgeten har värderats utifrån tidigare utredningar samt kompletterande analyser och bedömningar inom Göta älvutredningen, främst med utgångspunkt från bottenivåförändringar. Angivna mängder är något högre än de som angivits i tidigare utredningar.



Figur 7-11
Transport av sediment längs Göta älv i kton/år för dagens förhållanden.

Sedimenttransporten längs Göta älv utgörs av sediment som tillförs vid utloppet från Vänern, genom erosion av slänter och bottenar, erosion till följd av fartygstrafik samt sediment från tillflöden via vattendrag till älven. Den totala mängden sediment som når havet har bedömts till 180 kton/år, varav via Nordre älv 110 kton/år och via Göteborgsgrenen 70 kton/år. Detta är av samma storleksordning som den muddring som kontinuerligt utförs i området kring Göteborgs hamn motsvarande 50-80 kton/år (Brack et al., 2001 och Göteborgs hamn, 2010).

Sedimentmängden vid utloppet från Vänern utgör en avsevärd del av den totala sedimenttransporten i älven och utgörs huvudsakligen av utspolat och suspenderat material.

För sträckan Vänern-Lilla Edet bedöms stranderosionen ha minskat jämfört med tidigare utredningar genom att i stort sett alla stränder försetts med erosionsskydd under 1970-talet. En viss erosion bedöms dock förekomma längs stränderna och dessutom djuperosion i undervattenslänter och bottenar.

Längs sträckan Lilla Edet-Bohus bedöms sedimentmängden orsakas av erosion av botten och undervattenslänter och vara av samma omfattning som uppskattats i tidigare utredningar.

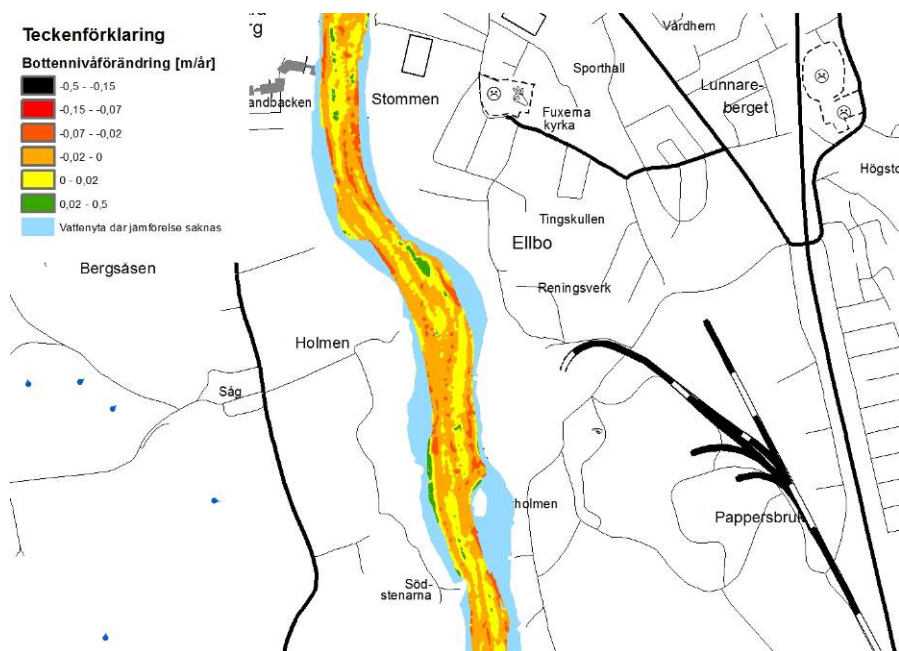
Sedimentmängder till följd av erosion för sträckorna Bohus-Nordre älvs utlopp respektive Bohus-Göteborg har bedömts vara likartade med de som gäller för sträckan Lilla Edet-Bohus och huvudsakligen bero av bottenerosion.

7.8 Erosionsförhållanden i dagens klimat

Vid analys av erosionsförhållandena har älven indelats i 17 delsträckor inom vilka förhållandena har antagits likartade. Indelningen har gjorts utifrån främst morfologiska, batymetriska och geologiska förhållanden. En analys av det samlade underlagsmaterialet har gjorts för varje delsträcka.

Förändringar av bottenivåer har analyserats med utgångspunkt från två batymetriska mätningar med 6,5 års mellanrum enligt beskrivningen i avsnitt 7.4. De årliga förändringarna visar både på ökade och minskade bottenivåer och är i farleden ofta mindre än 0,05 m. I slänter mot älvens djupare delar har erosion som på sina ställen är upp till 0,15 m/år uppmäts.

Med utgångspunkt från **uppmätta batymetriska förändringar** har även eroderad mängd för de olika delsträckorna och medelvärden för nivåförändringen för motsvarande delsträcka beräknats. För Nordre älv har de batymetriska mätningarna endast utförts under 2009. Medelbottenivåns förändring har därför vid beräkningar antagits ha samma storlek som för sträckan Kungälv-Göteborg. Uppmätta förändringar redovisas i kartbilaga i Rydell et al. (2011c) och ett exempel ges i Figur 7-12.

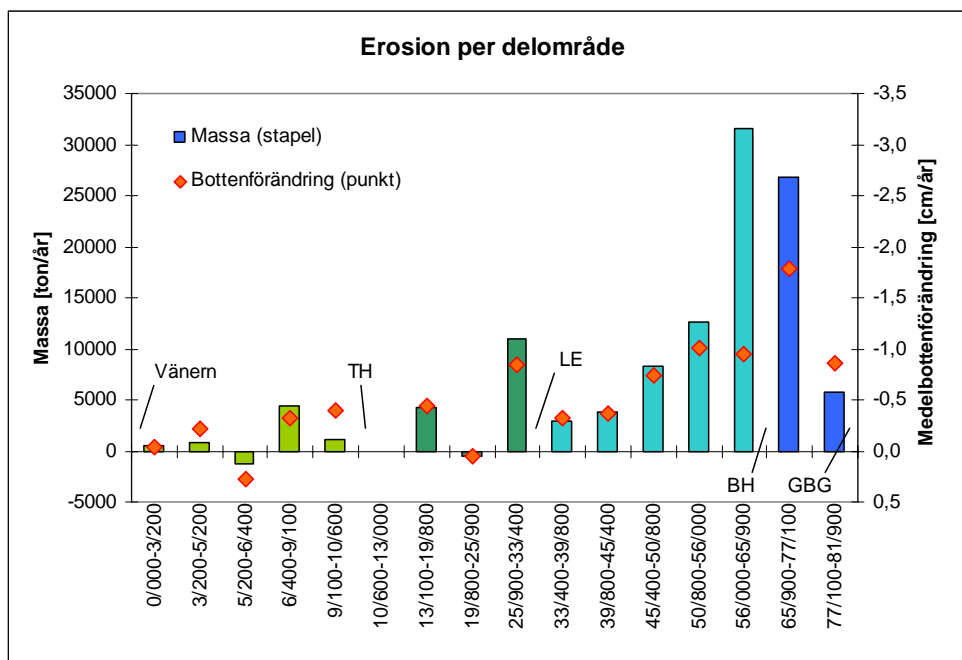


Figur 7-12

Exempel på kartredovisning av årlig förändring av bottenivåer baserad på jämförande batymetriska mätningar. Negativa bottenivåförändringar avser erosion och positiva förändringar avser sedimentation.

Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet.

Beräknad eroderad mängd för de olika delsträckorna och medelvärden för nivåförändringen för motsvarande delsträcka redovisas i Figur 7-13. Det bör observeras att de olika delsträckorna har olika längder och att staplarnas olika färg endast antyder vilket område delsträckan tillhör (Vänern-Trollhättan, Trollhättan-Lilla Edet, Lilla Edet-Bohus, Bohus-Göteborg). Figuren visar att de årliga bottenförändringarna är små (mindre än 0,005 m) på flera sträckor från Vänern till Lilla Edet. Nedströms Lilla Edet är förändringarna större, upp till 0,03 m/år. Detta kan jämföras med den uppskattning som tidigare gjorts av Larson & Hanson (2006) där en erosion av 0,007 m/år angavs som medeltal för hela älvsträckan. På två delsträckor norr om Trollhättan (5/200-6/400) och mellan Vesten och Hjærtum (19/800-25/900) överstiger mängden sedimenterat material de mängder som eroderat. Längs sträckan Bohus-Göteborg är den uppmätta medelbottenförändringen väsentligt större än för övriga delsträckor.



Figur 7-13
Mängd eroderat material respektive medelvärden av bottenivåns förändring för olika delsträckor.

Beräkningar av erosion har gjorts för att få en uppfattning av var erosion kan förekomma och vilken omfattning denna kan ha. Erosionsberäkningarna var ursprungligen tänkta att genomföras med samma modell som använts vid de hydrodynamiska beräkningarna (Delft3D) och modulen MOR i detta beräkningsprogram. I den typen av beräkningar kan bottenivån uppdateras allteftersom bottenivån förändras, vilket också innebär att botten-skjuvspänningarna förändras och en realistisk beskrivning av erosionen över lång tid kan göras. Denna bottenuppdatering är vid en detaljerad beräkning viktig om erosionen kraftigt påverkar vattendragets form och bredd. En beräkning i Delft3D kan även inkludera botten-transport och sedimentation.

Beräkningar med sådana modeller förutsätter att bottenens erosionsegenskaper kan beskrivas väl. Eftersom bottenförhållandena varierar kraftigt längs älven skulle omfattande undersökningar behöva utföras genom provtagning i fält och undersökningar av sediment på laboratorium. Detta har inte varit möjligt inom utredningen och det bedömdes därför inte vara möjligt att göra relevanta erosionsberäkningar med Delft3D-MOR. Av denna anledning valdes i stället att genomföra beräkningar med hjälp av en GIS-analys och utan någon uppdatering av bottenivåerna under beräkningen. Detta innebar också att sedimentation inte har inkluderats i beräkningarna.

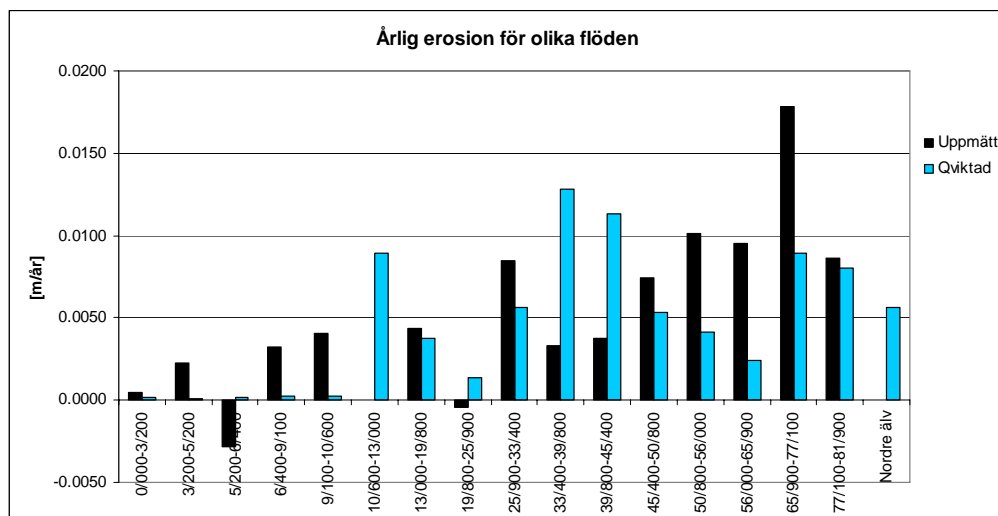
Beräkningarna har utgått från eroderad sedimentmängd och bottenens erosionsegenskaper. Eroderade mängder för de olika delsträckorna har baserats på sedimenttransport som redovisats i tidigare utredningar. De kritiska botten-skjuvspänningarna varierar avsevärt längs älven enligt avsnitt 7.3. Därför valdes att som kritiska botten-skjuvspänningar använda 95 % av botten-skjuvspänningarnas medelvärde enligt den hydrodynamiska modelleringen inom varje backscatter-klass enligt Tabell 7-1 och för ett flöde på $780 \text{ m}^3/\text{s}$. Detta flöde bedömdes motsvara ett rimligt "erosionsflöde", det vill säga det stationära flöde som avseende erosionen bäst representerar den verkliga flödesvariationen i älven. Resultaten redovisas i avsnittet nedan.

Jämförelse mellan uppmätt och beräknad erosion

Med utgångspunkt från jämförelser av förändringar av bottenivåer och beräkningar av erosion genom GIS-analys har pågående erosion för dagens förhållanden värderats. En kontinuerlig förändring av botten-sedimenten har konstaterats där såväl erosion som sedi-

mentation förekommer längs älven. Mätningar visar att dessa förhållanden varierar inom olika delsträckor och inom de beräkningsceller som använts i analyserna. De uppmätta förändringarna har uttryckts som ett medelvärde per år. Resultatet framgår av Figur 7-14.

Figur 7-14
Jämförelse mellan uppmätta nivåförändringar för olika delsträckor (svarta staplar) och beräknad förändring (blå staplar).



Resultaten visar för vissa delsträckor stora skillnader mellan uppmätt och beräknad erosion. En förklaring kan vara att erosionsparametrarna varierar längs älven beroende på botten sedimentens egenskaper men att de i beräkningarna har antagits vara lika över stora områden. Vidare har beräkningarna gjorts med en beräkningsformel som gäller för kohe-sivt material, men som här använts för älvens samtliga bottenmaterial.

Resultaten visar att modellen verkar kunna beskriva erosionen i vissa typer av områden men inte i andra. En tänkbar ytterligare förklaring är att de processer som styr erosionen skiljer sig åt i olika områden av älven.

Erosion för dagens förhållanden

Med utgångspunkt från jämförelser av förändringar av botten nivåer och beräkningar av erosion har pågående erosion för dagens förhållanden värderats. En kontinuerlig förändring av botten sedimenten har konstaterats där såväl erosion som sedimentation förekommer längs älven. Mätningar och beräkningar visar att dessa förhållanden varierar inom olika delsträckor och inom de beräkningsceller som använts i analyserna.

Uppskattade förändringar har redovisats för olika delsträckor i underlag till stabilitetsberäkningar (Rydell et al., 2011a). Den valda årliga erosionen varierar för olika delsträckor mellan 0,005 och 0,015 mm. Med hänsyn tagen till osäkerheter i analyserna har värden valts som ligger på säkra sidan.

Mätningarna indikerar också en betydande erosionspåverkan längs vissa undervattenslän-ter, sannolikt med större delen i släntfoten. Då ras/skred uppträder i undervattenslän- tens nedre del mot djupfåran bedöms en ny släntkontur uppkomma som successivt får en lutning i rasvinkeln, vilket innebär att slänten efterhand parallellförflyttas in mot stranden.

7.9 Erosionsförhållanden i framtida klimat

De klimatförändringar som kan förväntas i Göta älvdalen visar på en ökad nederbörd i framtiden och att den säsongsvisa fördelningen av flödena också förändras med högre flöden under stora delen av året, se kapitel 6 *Yt- och grundvattenförhållanden i dagens och framtida klimat*. Det innebär att en ökad erosion kan förväntas till följd av högre vattenflöden men också genom att höga flöden kommer att ha längre varaktighet under året.

Det finns också andra förhållanden som har betydelse för erosionsförhållandena i älven. Ny bebyggelse och infrastruktur liksom framtida fartygstrafik och tappningsförhållanden för vattenkraften påverkar på olika sätt erosionen. Inverkan av dessa förhållanden är inte möjliga att beakta, vilket innebär att de beräkningar och bedömningar som gjorts innehåller vissa osäkerheter.

Beräkningar och värderingar har utförts för att få en uppskattning av erosionsförhållandena fram till år 2100 utifrån två olika fall. Det första avser det fall där högre tappningar inte kan accepteras, utan flöden enligt gällande vattendom tillämpas även fortsättningsvis. Detta innebär att framtida översvämningar kan förväntas kring Väneren eller att vatten måste avledas annan väg. Det andra fallet som beskrivs gäller då högre flöden än idag kan tillåtas att avledas genom Göta älv.

Erosion vid vattenflöden med dagens tappning

I det fall flödet i älven kommer att styras av gällande vattendom har antagits att erosionen i huvudsak kommer att ha samma omfattning som för dagens förhållanden. Erosionens storlek baseras för detta fall på de uppskattningar som gjorts med utgångspunkt från jämförelser mellan bottenivåer mellan 2003 och 2009. Erosionen fram till 2100 anges som medelvärden för olika delsträckor med hänsyn tagen till de osäkerheter som finns i underlaget.

Erosionen antas ha samma årliga storlek som idag och kan extrapoleras för tiden fram till 2100, det vill säga 90 år. Detta innebär att den totala erosionen uppgår till 0,4-0,5 m i de norra delarna av älven och till 1,0-1,5 m för de södra delarna. Uppgifter för olika delsträckor framgår av underlag till stabilitetsberäkningar (Rydell et al., 2011a).

Den större erosionspåverkan som konstaterats i slänter ned mot älvens djupfåra vid batymetriska mätningar förväntas fortsätta framöver och en parallellförflyttning av slänter in mot stranden kan då uppstå. Storleken på denna förflyttning beror av många förhållanden och är beroende av bland annat tidsberoende morfologiska förändringar och dess storlek är därmed svår att bedöma. I underlaget till stabilitetsberäkningar (Rydell et al., 2011a) har det föreslagits att denna förflyttning kan antas bli 4 m fram till år 2100.

Erosion vid ökade vattenflöden

För att värdera erosionsförhållandena vid ökade flöden i älven har beräkningar utförts för fyra framtida alternativa vattenflöden enligt Tabell 7-2. Beräkningarna har utförts för att få en uppfattning om storleksordningen av bottenivåförändringar i ett framtida klimat. Vattenflödena är generaliserade och motsvarar inte alltid observerade flöden i Göta älv. De har valts för att illustrera inverkan av olika flöden som kan förekomma i dagens men också framtida klimat.

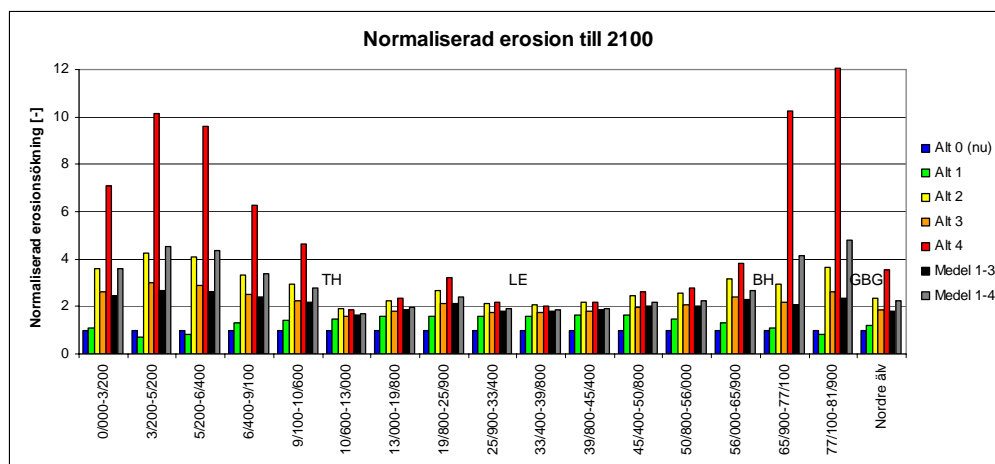
Tabell 7-2
Studerade varaktighetsfördelningar för vattenföring i Göta älv.

Alt	Flöde (m ³ /s)	Varaktighet (mån)	Flöde (m ³ /s)	Varaktighet (mån)	Flöde (m ³ /s)	Varaktighet (mån)
1			780	12		
2	1030	6	780	6		
3	1250	4	780	6	550	2
4	1500	3	780	6	550	3

Beräkningar av den årliga erosionen vid olika flöden har således utförts för de olika delsträckorna med förutsättningen att samma flöde förekommer under 12 månader och motsvarande beräkning har gjorts för olika flöden och varaktighet.

Dessutom har en jämförelse gjorts mellan dagens och framtida erosionsförhållanden. Beräknad erosion för vardera av de fyra flödesalternativen har jämförts med erosionen vid dagens förhållanden. Medelvärden för de olika delsträckorna har även beräknats för samtliga alternativa flöden 1-4. Alternativ 4 avser ett extremt flöde som bedöms ha liten sannolikhet att inträffa och för att värdera inverkan av detta flöde har även medelvärdet för endast flödesalternativ 1-3 beräknats. Resultaten redovisas i Figur 7-15.

Figur 7-15
Förhållande mellan dagens flöde och olika flöden i ett framtida klimat uppdelat på olika delsträckor.



Av figuren framgår att olika delar av älven har olika förutsättningar för erosion. Exempelvis ökar den beräknade erosionen kraftigt vid de högsta flödena i såväl de norra som de södra delarna. Ökade flöden ger större erosionspåverkan och jämfört med dagens förhållanden är det relativt sett större påverkan på delsträckorna mellan Väner-Trollhättan och Bohus-Göteborg än på sträckan Trollhättan-Bohus. Medelvärdena för alternativ 1-3 visar på en ökad erosion med 3-4 gånger för den norra älvsträckan ned till Trollhättan, ökning med 2-5 gånger får sträckan Bohus-Göteborg och med cirka 2 gånger för övriga sträckor.

Vid framtida högre flöden bedöms erosionen komma att öka för samtliga delsträckor. Vid år 2100 uppskattas den totala erosionen för de norra delarna av älven uppgå till 0,8-2,0 m och i de södra delarna till 2,0-3,0 m. Hänsyn har tagits till att vattenflödena successivt ökar fram till seklets slut. Uppgifter för olika delsträckor framgår av underlag till stabilitetsberäkningar (Rydell et al., 2011a).

Ökade flöden innebär ökad erosion av hela tvärsnittet inklusive undervattenslänter. Detta medför en större tvärsektion som i sin tur innebär minskade bottenkjuvspänningarna. När det gäller erosionspåverkan i slänter mot älvens djupfåra har därför antagits samma inver-

kan som för flöden med dagens varaktighet, det vill säga en parallellförflyttning mot stranden och med samma storlek.

Den värdering av framtida förhållanden som gjorts utgår från observerade förändringar under relativt kort tid (6,5 år). Eftersom det saknas detaljerade uppgifter om de lokala variationerna blir angivna uppgifter om erosionen vid 2100 generaliserade och baserade på medelvärden för relativt stora områden. Erosionsförhållandena vid framtida högre flöden beror helt på vilka vattenflöden som kan förväntas i älven, vilket innebär stora osäkerheter i bedömningarna.

Även om det finns osäkerheter i den uppskattning av erosionspåverkan som redovisas i denna utredning bedöms de ändå ge en relativt god bild av de framtida erosionsförhållandena. Angivna värden för erosionen bedöms vara på den säkra sidan.

Fakta i korthet

- Erosion i älven uppkommer genom strömmande vattens påverkan på älvens bottnar och slänter, genom nötning av grövre jordpartiklar på lera (korrusion) och genom fartygstrafik.
- Erosionsskydd av sprängsten finns i vattenlinjen på stora sträckor längs älven. Skyddens omfattning under vattenytan är inte klarlagd.
- Erosionsförhållandena har värderats med utgångspunkt från jämförelser mellan olika batymetriska mätningar respektive genom beräkningar.
- Erosion för dagens förhållanden är för större delen av älven mindre än 0,05 m/år. Längs vissa utsatta undervattenslänter är erosionen cirka 0,15 m/år.
- Med samma maximala flöde som tillåts i dag kan erosionen år 2100 förväntas uppgå till totalt 0,4-0,5 m i de norra delarna av älven och till 1,0-1,5 m i de södra delarna.
- Framtida klimatförändringar innebär ökade vattenflöden vilket medför ökad erosion. I det fall högre flöden ska avledas genom älven kan erosionen år 2100 totalt komma att uppgå till 0,8-2,0 m i de norra delarna av älven och till 2,0-3,0 m i de södra delarna.

8 Stabilitetsberäkningar

I detta kapitel beskrivs den metodik för stabilitetsberäkningar som använts i Göta älvutredningen för dagens och framtida klimatförhållanden. Stabilitetsförhållandena för olika delsträckor längs älven redovisas och hur dessa påverkas vid klimatförändringar.

8.1 Beräkningsmetodik i Göta älvutredningen

Dagens förhållanden

Stabilitetsberäkningar har i Göta älvutredningen genomförts enligt riktlinjer i styrande dokument för tekniskt arbete.

Beräkningarna har utförts med totalsäkerhetsfilosofi enligt en så kallad detaljerad utredning i enlighet med Skredkommissionens anvisningar (Skredkommissionen, 1995). Jordens hållfasthetsegenskaper, bestämda med vingförsök, konförsök och CPT-sondering, har sammanställts såväl djup- som nivårelaterat. Sammanställningarna har jämförts med empiriskt framtagna värden baserade på CRS-försök och i vissa sektioner även med värden bestämda med direkta skjuvförsök. En viktig del vid bedömningen av stabiliteten för slänterna mot Göta älv har varit den odränerade skjuvhållfastheten hos leran dels i det strandnära området, dels i jordlagren under Göta älv. I de fall avståndet till utförda undersökningar i älven har varit stort har den odränerade skjuvhållfastheten i det strandnära området och i jordlager under älven bedömts utifrån en modell baserad på kunskap om den geologiska historien och empiri. Dränerade hållfasthetsparametrar har bedömts utifrån empiriska relationer.

Val av i beräkningar använda portryck och grundvattennivåer har baserats på utförda mätningar, med hänsyn tagen till topografi och jordlagerförhållanden. En känslighetsanalys för portryckets inverkan har också genomförts där det har bedömts vara angeläget.

Vid förekomst av sand- och siltskikt har inverkan på stabiliteten värderats genom en känslighetsanalys med avseende på i skiktet uppmätta och möjliga artesiska portryck. I sektioner där djupet till fasta botten inte har varit känt, vilket framförallt gäller för jordlager under älven och för bakslänter, har denna osäkerhets möjliga effekt värderats i beskrivande text.

Slänternas stabilitetsförhållanden har beräknats både med odränerad analys och kombinerad analys. Undantag från detta har gjorts i några få sektioner där endast odränerad analys har utförts. I dessa sektioner har förhållandena varit sådana att det har bedömts som osannolikt att den kombinerade analysen skulle ge nämnvärt avvikande resultat. Detta gäller exempelvis där den odränerade skjuvhållfastheten är mycket låg, inga artesiska portryck har påträffats och slänten är flack. Inom delområde 5 och 7 förekommer branta slänter med låg säkerhet och i dessa har en kontroll av inverkan av hållfasthetsanisotropi utförts. De här redovisade säkerhetsfaktorena avser dock värden utan beaktande av hållfasthetsanisotropin.

Beräkningarna har utförts antingen med beräkningsprogrammet Slope/W (GeoStudio) eller GeoSuite Stabilitet. För beräkningar utförda med Slope/W har version 2007:7.13 eller senare och beräkningsmetod Morgenstern-Price med glidyta ”optimized” använts. För beräkningar utförda med GeoSuite Stabilitet har version 4 eller senare och beräkningsmetod Beast 2003 med glidyta ”steg” använts.

Beräkningarna har utförts med antagande av uppsprucken torrskorpa och med vattenfyllda sprickor till halva torrskorpans tjocklek. För väg- och järnvägslaster har TK Geo (Vägverket, 2009) tillämpats och för last av byggnader har 10 kPa/våning använts.

Dämnings- och sänkningsgränser för vattennivåer i älven finns fastlagda i gällande vattendom och i överenskommelser mellan Vattenfall och Sjöfartsverket. Baserat på dessa samt medellågvattennivå (MLW) i havet har utredningen baserats på lägsta vattennivåer avsedda för stabilitetsberäkningar enligt Tabell 8-1 (Rydell et al., 2011d). Rätlinjig interpolering har använts mellan Lilla Edet och Bohus samt mellan Bohus och havet. De i Tabell 8-1 redovisade nivåerna fanns dock inte framtagna vid utredningens början, varför stabilitetsberäkningar för området mellan Trollhättans och Lilla Edets slussar utfördes med en vattennivå 6,0 m över havet. Detta innebär att beräkningarna är gjorda på den säkra sidan. Vid sannolikhetsberäkningarna har dock ett modellfel motsvarande differensen i vattennivåer medtagits, varvid de beräknade sannolikhetsklasserna representerar de i Tabell 8-1 angivna nivåerna.

Tabell 8-1

För stabilitetsberäkningar använd lägsta vattennivåer i Göta älv i dagens klimat (nivåer i meter över havet i höjdsystemet RH2000).

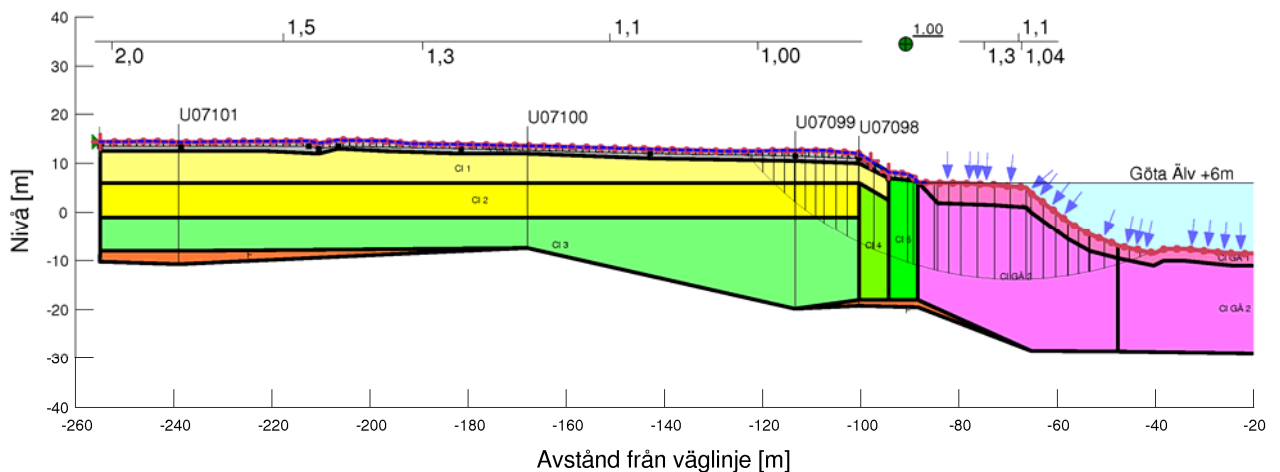
Sträcka/plats	Nivå (m ö h)
Vänersborg – Trollhättan	+38,7
Trollhättan – Lilla Edet	+6,6*
Lilla Edet (nedströms)	-0,2
Bohus	-0,4
Havet	-0,6

*I stabilitetsberäkningar har nivån 6,0 använts. Felet har korrigerats i sannolikhetsberäkningarna.

Den farligaste optimerade glidytan för älvslänten och undervattensslänten har redovisats grafiskt för odränerad och kombinerad analys. Med optimerad glidyta avses att man med stöd av läget för farligaste cirkulära glidyta rotationspunkt, söker en glidyta med godtycklig geometri som ger lägsta värde på säkerhetsfaktorn. Dessutom har säkerhetsfaktorens variation längs slänten och bortom denna redovisats. Variationerna har delats in i intervallerna 1,1-1,3; 1,3-1,5; 1,5-2,0 respektive 2,0-2,5 och för odränerad analys redovisas även intervallet 2,5-3,0. Exempel på redovisning av säkerhetsfaktorns variation ges i Figur 8-1.

Figur 8-1

Redovisning av beräknad farligaste glidyta och säkerhetsfaktorns variation längs slänten.



Förhållanden i ett framtida klimat år 2100

Ett förändrat klimat med ökad nederbörd och mer intensiva regn påverkar slänters stabilitet. För slänterna i Göta älv dalen är det, ur klimataspekt, ökade flöden (som ger förändrade förutsättningar för erosion), förändringar av vattennivåer samt ökad infiltration till grund-

vattenbildningen som påverkar stabiliteten. Inom utredningen har därför förväntad erosion och förändringar i ytvatten- och grundvattennivåer analyserats och resultaten har presenterats bland annat i kapitel 6 *Yt- och grundvattenförhållanden i dagens och framtida klimat* och kapitel 7 *Erosion*.

Den utförda analysen visar att de högsta trycknivåerna i det undre grundvattenmagasinet förväntas öka med omkring 0,3 m fram till år 2100 medan de högsta grundvattennivåerna i det övre magasinet bedöms förbli tämligen oförändrade. I de fall genomsläppliga skikt finns inom lerprofilen kan dock portrycksökningar med omkring 0,3 m uppkomma även i ytliga lerlager, förutsatt att dessa skikt står i kontakt med det undre grundvattenmagasinet. Inom Göta älvdalen är normalt kombinerad analys, vilken påverkas av grundvatten och portryck, av större betydelse främst vid ytliga glidytor. Därför har det bedömts att de marginellt ökade portrycken har liten effekt på stabiliteten och de förändringar som ändå kan förväntas kan anses vara inkluderade i de försiktigt valda värdena och i utförda känslighetsanalyser.

Dämnings- och sänkningsgränserna i älven är reglerade i vattendomen, varför någon förändring av dessa nivåer inte har beaktats i stabilitetsberäkningarna. Havsnivån (korrigerad för landhöjning) förväntas öka med 0,15 m till år 2050 samt 0,70 m till år 2100, vilket kommer att påverka vattennivåerna nedströms Lilla Edet. Bedömningarna av framtida havsnivåer är dock osäkra och eftersom en höjning av havsnivån har en stabilitetshöjande effekt har någon förändring av havsnivån inte analyserats i stabilitetsberäkningarna. I stabilitetsberäkningarna för framtida förhållanden har därför vattennivåerna inte ändrats jämfört med de som använts för dagens klimat.

Beräkningar och analyser av pågående erosion och förändringar av erosionen på grund av flödesförändringar (se kapitel 7), visar att erosion kommer att ske längs älvens bottnar och slänter på många sträckor, såväl för dagens som för ökade flödesnivåer. Om flödet inte förändras i framtiden har den totala erosionen fram till 2100 uppskattats uppgå till 0,4-0,5 m (jämnt fördelad över tvärsnittet) uppströms Lilla Edet och till 1,0-1,5 m nedströms Lilla Edet. Vid framtida högre flöden bedöms erosionen komma att öka för samtliga delsträckor. Vid år 2100 uppskattas den totala erosionen för de norra delarna av älven uppgå till 0,8-2,0 m (jämnt fördelad över tvärsnittet) och i de södra delarna till 2,0-3,0 m. Dessutom förväntas att vissa utsatta partier i undervattensslänter mot djupfåran kan komma att få en förflyttning in mot land med storleksordningen 4 m fram till år 2100. Det bör observeras att de angivna fallen inte gör anspråk på att motsvara den exakta omfattningen utan har tagits fram för att praktiskt kunna ange vilken inverkan erosionen har för stabilitetsförhållandena.

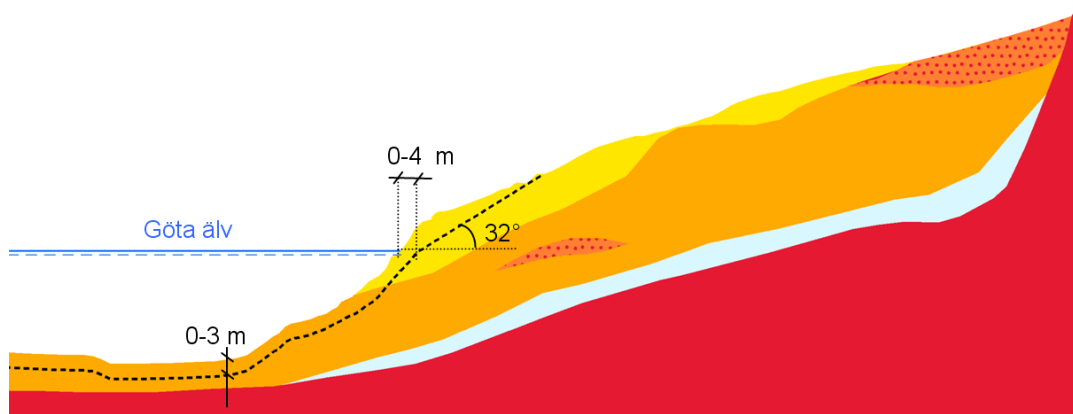
Erosionens effekt på stabilitetsförhållanden längs älven fram till 2100 har studerats för cirka 20 utvalda beräkningssektioner. Sektionerna är valda så att de är representativa för olika områden längs älven med likartade geologiska och topografiska förhållanden samt jordar med likartade geotekniska egenskaper. De beräknade stabilitetsförändringarna har där efter antagits gälla för andra sektioner med samma förutsättningar.

Erosionens inverkan har studerats för de 7 delsträckor längs älven som ansetts påverkas. Inverkan har studerats dels genom jämnt fördelad erosion över tvärsnittet, dels genom horisontell förflyttning av undervattensslänten mot stranden för särskilt utsatta partier. Stabilitetsberäkningarna har utförts genom tre olika alternativ för erosionsförändringar beroende av förekomst av undervattenshylla eller inte. Geometrin i sektionerna har förändrats enligt följande och med de mått som anges ovan för olika delar av älven:

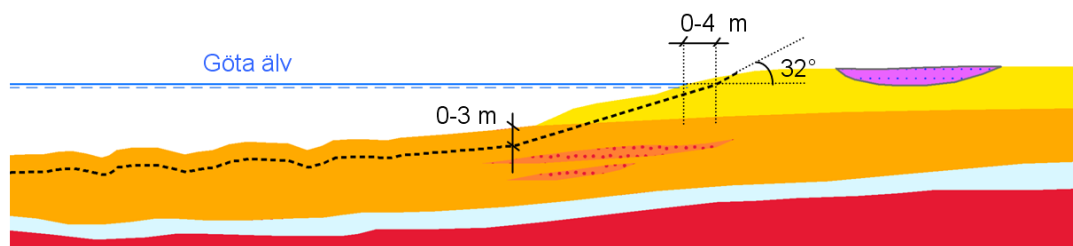
- För slänter utan undervattenshylla, se Figur 8-2, har botten i farleden sänkts och slänten har eroderats horisontellt vid strandlinjen och lutningen har anpassats till farledens botten (efter erosion). Slänt ovanför vattenytan har getts lutningen 32 grader och med vidare anslutning till befintlig släntlutning.

- För slänter med undervattenshylla enligt alternativ a) och b) i Figur 8-3 har botten i farleden sänkts och slänt mellan undervattenshylla och botten i farleden samt undervattenshyllan eroderats vertikalt. Slänt vid strandlinjen har eroderats horisontellt med vidare anpassning till släntfot. Slänt ovan strandlinjen har getts lutningen 32 grader och med vidare anpassning till befintlig släntlutning.
- För slänter med undervattenshylla enligt alternativ c) i Figur 8-3 har botten i farleden sänkts vertikalt och undervattensslänt har antagits ha samma lutning som tidigare. Ingen erosion har antagits på undervattenshyllan. Triangulär fördelning mot djupet ned till farledens botten (efter erosion). Ingen förändring av geometrin på och ovan undervattenshyllan eller för slänter över vattenytan har antagits.

I beräkningarna har hänsyn inte tagits till förändringar i jordens egenskaper som avlastningen eventuellt skulle kunna medföra. Denna effekt bedöms vara försumbar. I beräkningarna har ingen hänsyn tagits till befintliga erosionskydd. Detta med anledning av att utbredning och omfattning av erosionskydden under vattenytan är osäker. Beräkningarna är därmed utförda på säkra sidan med avseende på eventuella erosionskydd.

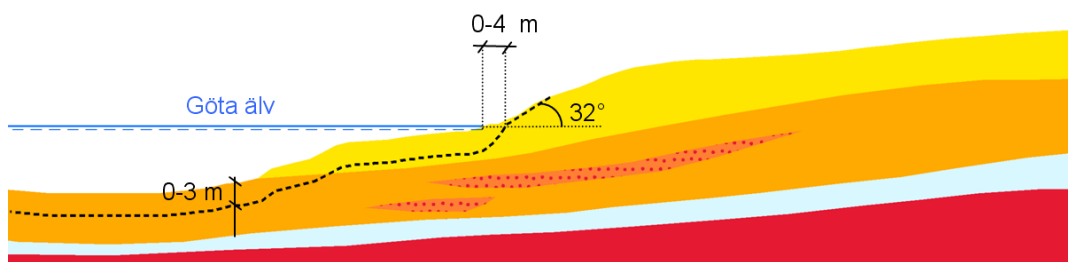


a) Exempel från sträckan Trollhättan - Lilla Edet

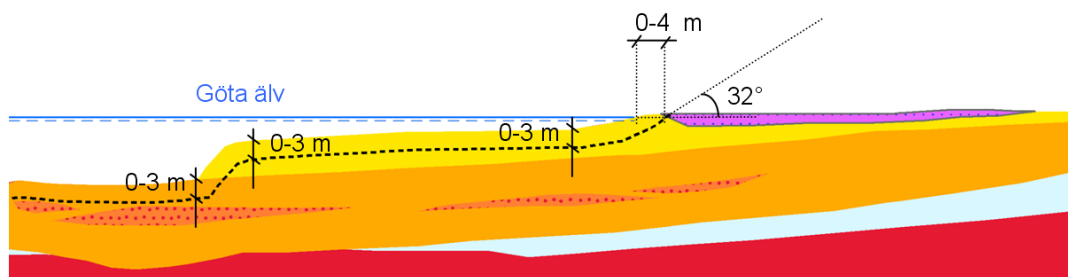


b) Exempel från sträckan Lilla Edet - Bohus

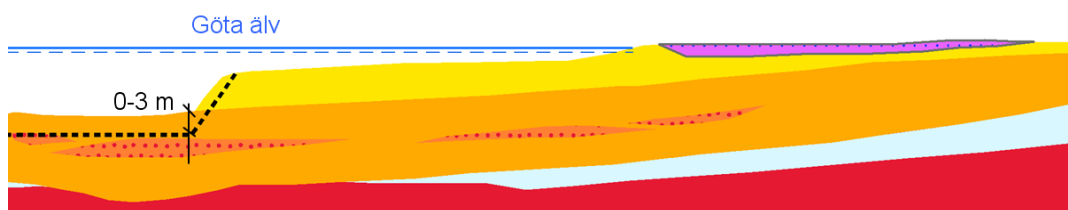
Figur 8-2
Antagen förändring av geometri i slänter utan undervattenshylla utsatta för erosion.



a) Exempel från sträckan Trollhättan – Lilla Edet



b) Exempel från sträckan Bohus - Marieholm



c) Exempel från sträckan Bohus - Marieholm

Figur 8-3
Antagen förändring
av geometri i slänter
med undervattens-
hylla utsatta för
erosion.

8.2 Stabilitetsförhållanden i dagens situation

Stabilitetsförhållandena har beräknats i totalt 240 sektioner längs Göta och Nordre älv. Sektionernas lägen framgår av kartorna i GÄU Slutrapport Del 3 - Kartor (SGI, 2012a). Beräkningarna visar att många områden kring älven har låg säkerhet mot stabilitetsbrott för dagens förhållanden. Sträckan mellan Trollhättan och Lilla Edet är den del längs utredningsområdet som har flest slänter med låg stabilitet. Här förekommer många slänter med säkerhetsfaktorer lägre än 1,2. Inom vissa områden söder om lilla Edet är stabiliteten nära älven låg, i huvudsak beroende på branta undervattenslänter.

Stabiliteten i de studerade sektionerna beskrivs översiktligt i detta avsnitt. Beskrivningen indelas i de olika geografiska delområdena längs älven, vilka framgår av Figur 5-2 till 5-6. Detaljerade beskrivningar av antagna förhållanden och resultaten från stabilitetsberäkningarna för dagens klimat finns redovisade i Tekniskt PM för respektive delområde (SGI, 2011:11-20).

Området mellan Vargön och Intagan (delområde 6)

Mellan Vargön och strax söder om slussarna i Trollhättan är säkerheten mot skred i huvudsak hög. Beräknade säkerhetsfaktorer ligger i allmänhet mellan 1,6 och 3 med odränerad analys och 1,5 och 1,8 med kombinerad analys. Lokalt kan dock lägre stabilitet förekomma.

I den allra sydligaste delen (cirka 1 km) av område 6, nedströms slussarna i Trollhättan, är stabiliteten låg, särskilt på den västra sidan. Beräknade säkerhetsfaktorer mot skred är här så låga som 1,3 med odränerad analys och 1,1 med kombinerad analys.

Området mellan Intagan och Lilla Edet (delområde 5 och 7)

I de nordligaste 4 km av området utgörs den östra stranden huvudsakligen av berg. Stabiliteten för den västra stranden är huvudsakligen låg. Beräknade säkerhetsfaktorer med odränerad analys varierar huvudsakligen mellan 1,0 och 1,7. Säkerhetsfaktorer beräknade med kombinerad analys ligger i de flesta fall kring 1,0, men slänter med säkerhetsfaktorer högre än 1,5 förekommer också. I det västra området har ett stort antal små och stora skred inträffat, där skredet vid Intagan år 1648 är det största.

För de följande 6 km, från Stenarsröd/Assarebo till området strax norr om Slumpån, är stabiliteten huvudsakligen låg. Även de sidoraviner som mynnar i Göta älv har låg säkerhet. Den beräknade säkerhetsfaktorn mot skred med odränerad analys ligger huvudsakligen mellan 1,1 och 1,3 och den beräknade säkerhetsfaktorn med kombinerad analys kring 1,0. Även inom detta område har ett stort antal skred inträffat.

Från området norr om Slumpån och söderut är stabiliteten i stort sett låg. Beräknade säkerheter mot skred med odränerad analys ligger huvudsakligen mellan 1,0 och 1,3 och säkerheten beräknad med kombinerad analys ligger huvudsakligen kring 1,0. Även här har ett stort antal skred inträffat, de flesta i den norra delen av området.

Området mellan Lilla Edet och Alvhem (delområde 4 och 8)

I den nordligaste delen, genom Lilla Edets samhälle, är den beräknade säkerheten mot skred huvudsakligen låg på den västra sidan. Säkerhetsfaktorer beräknade med odränerad analys uppgår till mellan 1,0 och 1,5. Beräknade säkerhetsfaktorer med kombinerad analys ligger kring 1,0. På den östra sidan är stabilitetsförhållandena bättre. Beräknade säkerhetsfaktorer är här huvudsakligen mellan 1,4 och 1,7 med odränerad analys och mellan 1,3 och 1,4 med kombinerad analys. Söder om Lilla edet tätort, vid Lilla Edets pappersbruk, är dock stabiliteten låg, med beräknade säkerheter strax över 1,0 med såväl odränerad som kombinerad analys.

Området söder om Lilla Edets samhälle och vidare till Göta samhälle har relativt låg stabilitet på den västra sidan, medan stabiliteten är bättre på den östra sidan. Beräknade säkerheter mot skred på den västra sidan ligger huvudsakligen mellan 1,4 och 1,6 med odränerad analys och mellan 1,1 och 1,4 med kombinerad analys. På den östra sidan är den beräknade säkerheten mot skred mellan 1,4 och 2 med odränerad analys och mellan 1,3 och 1,9 med kombinerad analys. Skredet vid Göta år 1957 inträffade inom detta område.

För de följande cirka 5 km söder om Göta samhälle är stabiliteten på älvens västra sida i huvudsak låg. Beräknade säkerhetsfaktorer ligger här kring 1,0 enligt både odränerad och kombinerad analys. På älvens östra sida finns områden med såväl hög som låg stabilitet. Beräknade säkerhetsfaktorer uppgår till mellan 1,3 och 2 med odränerad analys och mellan 1,1 och 1,7 med kombinerad analys. Inom området skedde ett till ytan stort skred på västra sidan, Ballaboskredet år 1996, vilket kom att påverka fartygstrafiken i älven. Dessutom har ett antal skred med liten utbredning inträffat inom detta område.

I de sydligaste 5 km av området, norr och söder om Lödöse samhälle, är stabiliteten hög på båda sidor av älven. Den beräknade säkerheten mot skred ligger här mellan 1,9 och 2,2 med odränerad analys och mellan 1,7 och 2,1 med kombinerad analys.

Området mellan Alvhem och Bohus (delområde 3 och del av område 9)

I den nordligaste delen av området, från Alvhem till den södra delen av Älvängens samhälle, är stabiliteten huvudsakligen låg på älvens västra sida. Beräknade säkerhetsfaktorer med odränerad analys uppgår till mellan 1,2 och 1,4. Beräknade säkerhetsfaktorer med kombinerad analys ligger mellan 1,1 och 1,4. Den låga stabiliteten är dock koncentrerad till området närmast älven. På älvens östra sida är stabiliteten i huvudsak något bättre. Beräknade säkerheter mot skred med odränerad analys varierar huvudsakligen mellan 1,4 och 2. Beräkningar med kombinerad analys har här utförts i mycket begränsad omfattning. Beräknade säkerhetsfaktorer med kombinerad analys ligger kring 1,0 i någon enstaka sektion med låg säkerhetsfaktor också vid odränerad analys. I något fall finns också ett område med slänt mot fastmark, på längre avstånd från älven, med låg säkerhet. Beräknad säkerhetsfaktor ligger i detta fall kring 1,2.

I den södra delen av området, från södra delen av Älvängens samhälle till Nordre älv, är stabiliteten hög på älvens västra strand. Med odränerad analys varierar beräknade säkerheter mellan 1,7 och 4. Beräknad säkerhet med kombinerad analys ligger kring 1,7. Då beräknade säkerheter med odränerad analys är hög har i flera fall beräkningar med kombinerad analys utelämnats. Även längs älvens östra strand är stabiliteten relativt god. Beräknad säkerhet mot skred med odränerad analys varierar men är huvudsakligen större än 1,8. Lokalt förekommer dock områden med sämre stabilitet. Beräknad säkerhetsfaktor med odränerad analys ligger här mellan 1,2 och 1,3. Beräkningar med kombinerad analys har endast utförts i enstaka sektioner.

Området mellan Bohus och Marieholm (delområde 1, 10 och del av områdena 2 och 9)

I de nordligaste 6 km av området, från Nordre älv till strax söder om Surte samhälle, förekommer omväxlande hög och låg stabilitet på båda sidor om älven. Beräknade säkerheter med odränerad analys ligger huvudsakligen mellan 1,2 och 1,7 och med kombinerad analys huvudsakligen mellan 1,1 och 1,6. De områden som har låg säkerhet mot skred förekommer dock mestadels lokalt, medan de områden som har högre säkerhet är mer sammanhängande. Enstaka branta undervattenslänter med lägre säkerhet förekommer också. Större skred har förekommit inom området.

För de följande 5 km, till strax norr om Lärjemotet, är stabiliteten huvudsakligen hög på såväl den västra som östra sidan av älven. Enstaka områden med lägre stabilitet förekommer dock på den östra sidan. Beräknade säkerheter mot skred med odränerad analys ligger huvudsakligen mellan 1,5 och 3. I några fall har säkerhetsfaktorn vid odränerad analys inte beräknats då den kombinerade analysen visat på godtagbara stabilitetsförhållanden. Den beräknade säkerheten med kombinerad analys varierar mellan 1,4 och 2.

Från Lärjemotet och 3 km söderut är stabiliteten relativt låg. Stabiliteten på älvens östra sida är något bättre än på den västra. Beräknad säkerhet mot skred med odränerad analys ligger huvudsakligen mellan 1,1 och 1,5 och med kombinerad analys ligger huvudsakligen mellan 1,0 och 1,4. Lokalt förekommer dock mindre områden med hög stabilitet på den östra sidan.

I den sydligaste delen av området förekommer områden med såväl hög som låg stabilitet. Generellt är dock stabilitetsförhållandena bättre i den norra delen. Beräknad säkerhet mot skred med odränerad analys ligger här till största delen mellan 1,2 och 1,8. Med kombinerad analys uppgår beräknade säkerheter mot skred till i stort mellan 1,1 och 1,8.

Från Agnesberg och söderut har beräkningar utförts betydligt tätare än i den norra delen.

Området kring Nordre älv (del av område 2)

Stabiliteten utefter Nordre älv är i huvudsak hög. Beräknade säkerhetsfaktorer med odränerad analys ligger mellan 1,4 och 2. Beräknade säkerhetsfaktorer med kombinerad analys uppgår huvudsakligen till mellan 1,3 och 1,7. Lokalt förekommer dock områden med låg säkerhet mot skred på såväl den norra som södra sidan. Beräknade säkerheter mot skred med kombinerad analys ligger här strax över 1,0, medan säkerheten med odränerad analys kan variera mellan 1,1 och 1,9 för dessa områden.

8.3 Stabilitetsförhållanden i ett framtida klimat

Stabilitetsberäkningar har utförts för förhållanden som kan antas gälla år 2100 med de klimatförändringar som kan förväntas. Beräkningarna har utförts dels för det förhållandet att ingen förändring av flödet tillåts (vilket innebär att vatten måste avledas på annat sätt än genom älven), dels i det fall ökade flöden tillåts. Metodiken för beräkningar framgår av avsnitt 8.1.

Det bör observeras att de beräknade förändringarna av säkerhetsfaktorn är medelvärden och lokalt kan såväl större som mindre förändringar bli aktuella. Förändringen i säkerhetsfaktor beror, förutom på erosionens storlek och läge, framförallt på släntens höjd, lutning och form.

Det bör påpekas att i områden där säkerheten mot stabilitetsbrott är låg för dagens förhållanden, kan även små förändringar orsakade av exempelvis erosion, utlösa skred.

Oförändrat flöde i älven

Inom de områden där erosionen förväntas bli mindre än 1 m visar beräkningarna att förändringarna i säkerhetsfaktor i regel är marginella. För sträckor där erosionen längs botten förväntas bli mellan 1 och 1,5 m och slänten förflyttas 4 m in mot land, fås minskade säkerhetsfaktorer med i medeltal 4 %.

Ökat flöde i älven

Inom de områden där erosionen förväntas bli mindre än 1 m visar beräkningarna att förändringarna av säkerhetsfaktorn i regel är marginella. För sträckor där erosionen längs botten förväntas bli mellan 2 och 3 m och slänten förflyttas 4 m in mot land, minskar säkerhetsfaktorn med i medeltal 14 %.

Fakta i korthet

- Beräkning av stabiliteten har utförts för dagens förhållanden med totalsäkerhetsfilosofi och med detaljerad utredning enligt Skredkommissionens anvisningar. Såväl odränerad som kombinerad analys har genomförts.
- För framtida klimatförhållanden har även beaktats förändringar av grundvattennivåer och slänters geometri till följd av erosion.
- Stabiliteten i dagens klimat är i huvudsak tillfredsställande mellan Vänersborg och Trollhättan. För flera områden på sträckan mellan Trollhättan och Lilla Edet är stabiliteten låg liksom söder om Lilla Edet till norr om Lödöse. Från Lödöse till Älvängen är stabiliteten låg närmast älven men söder därom är stabiliteten tillfredsställande. Mellan Bohus och Mariholm är stabilitetsförhållandena varierande medan stabiliteten längs Nordre älv med några undantag är tillfredsställande.
- Erosionen kommer att påverka stabiliteten fram till år 2100 och säkerhetsfaktorn kan förväntas minska med cirka 4 % om flödet begränsas till det som gäller för dagens förhållanden enligt vattendomen. Om högre flöden tillåts i älven bedöms säkerhetsfaktorn minska med upp till 14 %

9 Sannolikhet för skred

I detta kapitel beskrivs den metodik som utvecklats och använts inom Göta älvtredningen för att beräkna sannolikheten för att skred inträffar. Dessutom redovisas hur utbredningen av skred i områden med kvicklera kan beaktas samt en metodik för beräkning av klimatförändringens effekt på sannolikheten för skred.

Sannolikheten för stabilitetsbrott utgör tillsammans med bedömningen av konsekvenser av skred underlag vid bedömning av risken för skred. Inför valet av metodik inom Göta älvtredningen för beräkning av sannolikhet för skred utfördes en genomgång av befintliga och tänkbara metoder för bedömning av sannolikhet för stabilitetsbrott. Med stöd av denna genomgång valdes den metodik som använts tidigare i Göta älvdalen, se Alén et al. (2000), med ambitionen att göra nödvändiga förändringar och förbättringar med stöd av dagens kunskap och de hjälpmedel som finns idag. Den valda metodiken beskrivs utförligt av Berggren et al. (2011).

Med den valda metodiken beräknas sannolikheten för att säkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott är mindre än 1 med beaktande av de ingående parametrarnas spridning. Den sannolikhet som beräknas avspeglar emellertid inte ett värde för hur stor sannolikheten är för att skred uppkommer i slänten under de kommande, exempelvis, 100 åren. Det har ändå valts att inom utredningen benämna de framräknade sannolikheterna som sannolikheten för skred.

Vid den sannolikhetsbaserade beräkningen förutsätts att utförda traditionella stabilitetsanalyser är relevanta och tillförlitliga och att analysen har utförts så att beräknad säkerhetsfaktor motsvarar säkerhetsfaktorns medelvärde. Eventuella begränsningar och brister i en sådan beräkning är oberoende av den använda metodiken.

9.1 Metodik

Beräkning av sannolikhet för brott har genomförts enligt en statistisk metod kallad FORM, First Order Reliability Method. Ett centralt moment i metodiken är att man ska etablera ett uttryck för säkerhetsmarginalen (marginal mot brott). Säkerhetsmarginalen brukar normalt skrivas som differensen mellan bärförmåga och lasteffekt. Om säkerhetsmarginalen M är större än noll innebär det att bärförmågan är större än lasteffekten, det vill säga brottgränsen överskrids inte, och om M är mindre än noll innebär det att brottgränsen överskrids. Det finns flera alternativa sätt att beskriva säkerhetsmarginalen och i utredningen har valts att som säkerhetsmarginal använda den naturliga logaritmen för säkerhetsfaktorn enligt följande uttryck:

$$M = \ln F$$

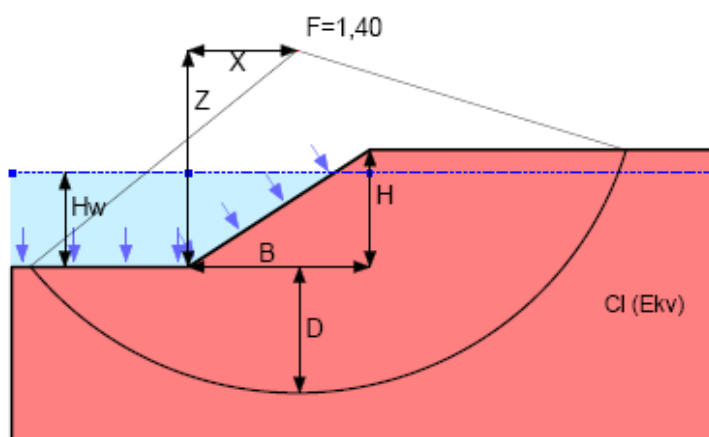
där M = säkerhetsmarginal

F = säkerhetsfaktor

Den valda metodiken kräver att säkerhetsmarginalen kan uttryckas som en funktion av de ingående styrande variabelerna, som kan vara stokastiska eller deterministiska.

För att ta fram ett analytiskt uttryck för säkerhetsmarginalen har de hjälpdigram som etablerades av Janbu (1954) i den så kallade Janbus direktmetod utnyttjats. Med stöd av använd geometri och egenskaper i utförda traditionella stabilitetsanalyser gör man en idealisering av slänten enligt Janbus direktmetod och skapar en för säkerhetsfaktor ekvivalent

slänt. Den idealiserade slänten ska ha samma säkerhetsfaktor som den traditionella analysen för lika värden på ingående parametrar. Idealiseringen innebär att den naturliga släntens geometri överförs till en slänt med horisontell markyta bakom släntrönet och en horisontell botten på vattendraget, se Figur 9-1. Slänten beskrivs geometriskt med måtten slänthöjd, H , och släntlängd i horisontal, B . Glidyten beskrivs geometriskt med måtten avståndet i horisontal mellan släntfot och rotationscentrum, X , avståndet i vertikal mellan släntfot och rotationscentrum, Z , och glidytns djup under släntfoten, D . Jordlagren idealiseras med ett ekvivalent lerlager, Cl (Ekv).



Figur 9-1
Idealisering av
slänt till en ekvi-
valent slänt.

Hjälpdiagrammen i Janbus direktmetod gäller för cirkulära glidytor. I Göta älvutredningen har beräkningar av säkerhetsfaktorn för stabilitetsbrott utförts dels för en cirkulär glidyta, dels för en optimerad glidyta (se avsnitt 8.1). För att hantera denna skillnad i storlek på säkerhetsfaktor införs i den statistiska beräkningen ett modellfel, η_{modell} . Modellfelet korrigerar också för uppkomna avvikelser på grund av idealiseringen av slänten.

Säkerhetsfaktorn, F , beräknas i Janbus direktmetod med införandet av modellfel, enligt följande uttryck:

$$F = \eta_{\text{modell}} \cdot \frac{N \cdot c}{P_d}$$

där η_{modell} = modellfel

N = stabilitetsstal (avseende geometrisk formfaktor för slänten) enligt Janbus direktmetod

c = medelskjuvhållfasthet utefter glidyten

P_d = pådrivande tryck

Pådrivande tryck P_d beräknas enligt följande uttryck:

$$P_d = \gamma \cdot H + q_e - \gamma_w \cdot H_w$$

där γ = medeltunghet hos jordlagren ovan släntfot

H = nivåskillnad mellan släntrönet och släntfot

B = horisontellt avstånd mellan släntfot och släntrönet

q_e = ekvivalent ytlast för laster bakom släntrönet

γ_w = tunghet hos vattnet i vattendraget

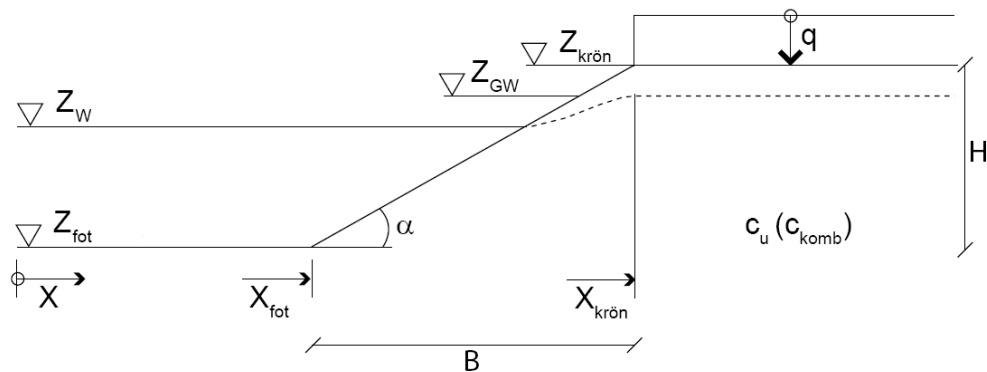
H_w = vattendjup i vattendraget

I metodiken används de analytiska uttryck för stabilitetsstalet N som utvecklats av Alén (1998) för olika typer av cirkulära glidytor (bascirkel och tåcirkel).

Idealiserad modell

Den idealiserade slänten, se Figur 9-1 och Figur 9-2, beskrivs med

- koordinater för släntfot; längsled, X_{fot} , och nivå, Z_{fot}
- koordinater för släntkrön; längsled, $X_{\text{krön}}$ och nivå, $Z_{\text{krön}}$
- nivå för vattenyta i vattendraget, Z_w
- medeltunghet hos jordlagren, $\bar{\gamma}$
- ytlast på släntkrön, q
- tunghet hos vattnet, γ_w



Figur 9-2
Geometri för den idealiserade slänten.

Varje glidyta, se Figur 9-1, beskrivs med

- koordinater för glidykans rotationscentrum (sida och nivå), (X och Z)
- djupet till underkant glidytan relativt nivån för släntfot, (D)
- medelskjuvhållfasthet utefter glidytan, \bar{c}_u

Egenskaper för styrande variabler

Egenskaperna för de styrande variablerna anges med de statistiska måtten medelvärde och standardavvikelse. Rekommendationer för hur dessa mått tas fram ur befintligt underlag ges av Berggren et al. (2011).

Beräkning

Sannolikheten för skred, p_f , beräknas som:

$$p_f = p(\ln F < 0) = p[(\ln \eta_{\text{modell}} + \ln N + \ln c - \ln P_d) < 0]$$

Med stöd av variablernas medelvärde och standardavvikelse beräknas medelvärde för säkerhetsmarginalen, $\mu_{\ln F}$, enligt följande uttryck:

$$\mu_{\ln F} = \mu_{\ln \eta_{\text{modell}}} + \mu_{\ln N} + \mu_{\ln c} - \mu_{\ln P_d} \approx \ln \mu_{\eta_{\text{modell}}} + \ln \mu_N + \ln \mu_c - \ln \mu_{P_d}$$

där μ = medelvärde

Standardavvikelse för säkerhetsmarginalen, $\sigma_{\ln F}$, beräknas enligt följande uttryck:

$$\sigma_{\ln F}^2 = \sigma_{\ln \eta_{\text{modell}}}^2 + \sigma_{\ln N}^2 + \sigma_{\ln c}^2 + \sigma_{\ln P_d}^2 \approx V_{\eta_{\text{modell}}}^2 + V_N^2 + V_c^2 + V_{P_d}^2$$

där σ = standardavvikelse

V = variationskoefficient

Variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn, V_F , kan beräknas approximativt enligt följande uttryck:

$$V_F \approx \sigma_{\ln F}$$

där $\sigma_{\ln F}$ = standardavvikelse för säkerhetsmarginalen

Med stöd av medelvärde och standardavvikelse för säkerhetsfaktorn beräknas säkerhetsindex β enligt följande uttryck:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_{\ln F}}{\sigma_{\ln F}} \approx \frac{\ln(\mu_F)}{V_F}$$

där μ_F = medelvärde för säkerhetsfaktorn

V_F = variationskoefficient för säkerhetsfaktorn

Sannolikheten för skred, p_f , beräknas därefter enligt följande uttryck:

$$p_f = \Phi(-\beta)$$

där $\Phi()$ = den standardiserade normalfördelningen, det vill säga en normalfördelning med medelvärde = 0 och standardavvikelse = 1

Resultatet av beräkningen av sannolikhet för brott blir därmed brotts sannolikheten p_f och säkerhetsindex β . Ett av de viktigaste resultaten från analysen är storleken på variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn. Dessutom ger beräkningarna information om de olika styrande variabelernas influens på osäkerheten i form av sensitivitetsfaktorer, α_i för ingående variabler. Sensitivitetsfaktorn för en parameter anger då parameterns betydelse för osäkerheten i säkerhetsfaktorn, det vill säga, variabelns påverkan på sannolikhet för brott.

Tidsberoende

Vid beräkning av sannolikhet för skred uppkommer frågan hur man ska hantera de egenskaper (variabler) som varierar med tiden, till exempel geometriförändringar i slänten orsakad av erosion, förändringar av nivå för vattenyta i vattendraget, förändringar i grundvattennivåer och portryck och förändringar i lastförutsättningar. I utredningen har en metodik tagits fram i syfte att hantera även tidsberoendet, exempelvis årlig sannolikhet för skred och de ingående variabelernas sensitivitetsfaktorer, Berggren et al. (2011).

I utredningen har en förenkling gjorts på så sätt att analyserna är utförda vid olika tidpunkter med laster och lågvattennivåer beskrivna som dimensionerande värden med antagandet att dessa variabler är deterministiska. Antagandet ger i Göta älvutredningen en relativt liten resultatavvikelse gentemot en mer fullständig analys. För fall där de tidsberoende egenskaperna är mer dominanta bör beräkningarna genomföras förslagsvis enligt den metodik som redovisas av Berggren et al. (2011).

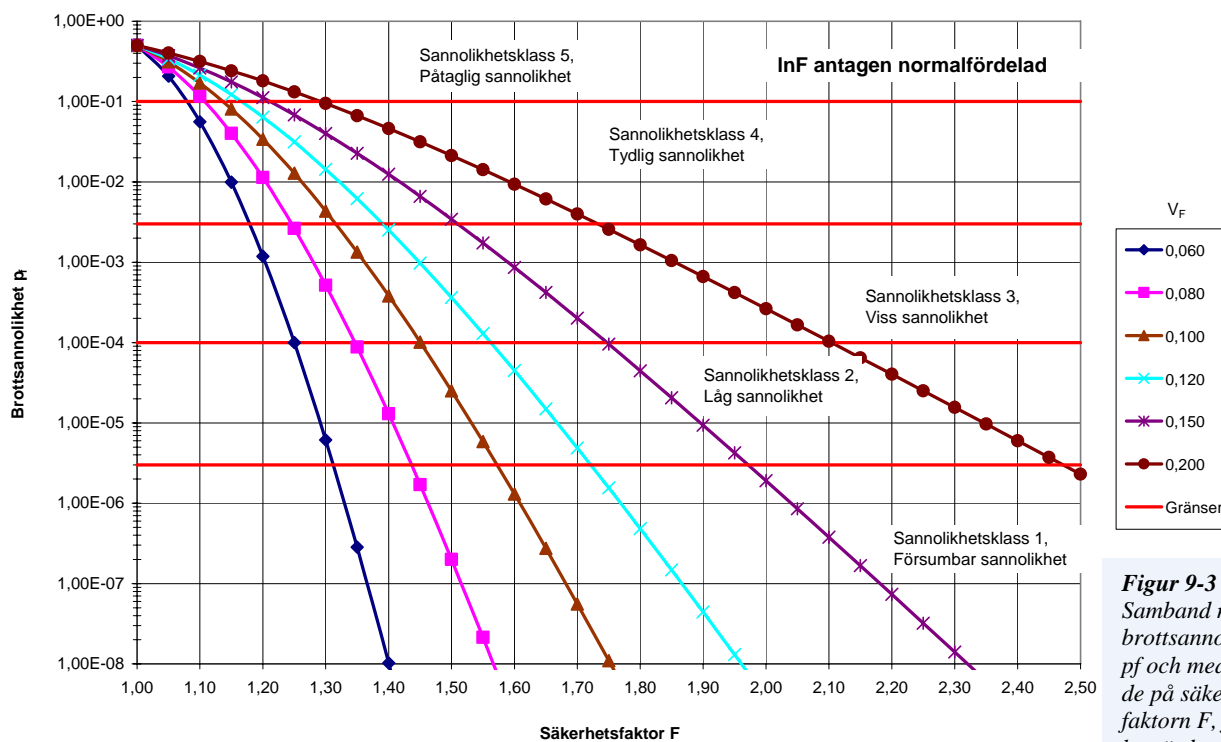
Gränser mellan olika sannolikhetsklasser

I tidigare utredningar, se exempelvis Alén et al. (2000), har sannolikheten för skred indelats i fyra klasser som benämndes stabilitetsklasser. I Göta älvtredningen har i stället fem klasser som benämns sannolikhetsklasser valts för en mer nyanserad beskrivning.

Gränserna mellan de olika sannolikhetsklasserna har valts med hänsyn till:

- sannolikhet mot brott för olika säkerhetsklasser i europasnormer
- gränser i tidigare svenska normer
- tidigare använda gränser i utredningar i Göta älvdalen

De valda gränserna mellan de olika sannolikhetsklasserna samt klassbenämningen presenteras i Figur 9-3. I figuren redovisas även samband mellan brottsannolikhet p_f och säkerhetsfaktor F vid olika värden på säkerhetsfaktorns variationskoefficient, V_F . Sambandet gäller under förutsättning att naturliga logaritmen för säkerhetsfaktorn är normalfördelad.



Figur 9-3
Samband mellan brottsannolikhet p_f och medelvärde på säkerhetsfaktor F , för olika värden på säkerhetsfaktorns variationskoefficient V_F .

9.2 Tillämpning av metodik för skredsannolikhet inom Göta älvtredningen

I syfte att på plankarta redovisa utbredning av sannolikhetsklasserna för skred har sannolikhetsberäkningar utförts enligt den ovan presenterade metodiken med vissa nödvändiga förenklingar och anpassningar, bland annat på grund av att beräkningarna i annat fall hade varit alltför tidskrävande.

För den från stabilitetsberäkningarna farligaste glidyten bestäms medelvärde och variationskoefficient för säkerhetsfaktorn och med stöd av dessa utläses ur Figur 9-3 vilken sannolikhetsklass aktuell glidytta tillhör. Med förenklingen att säkerhetsfaktorns variationskoefficient V_F har samma värde för alla glidytor i slänten, kan det ur Figur 9-3 utläsas vilka säkerhetsfaktorer som gränserna mellan sannolikhetsklasserna motsvarar. Från stabi-

litetsberäkningen kan därefter avståndet från strandlinjen som säkerhetsfaktorn antar dessa värden tas fram och därmed markera tillhörande lägen på plankartan.

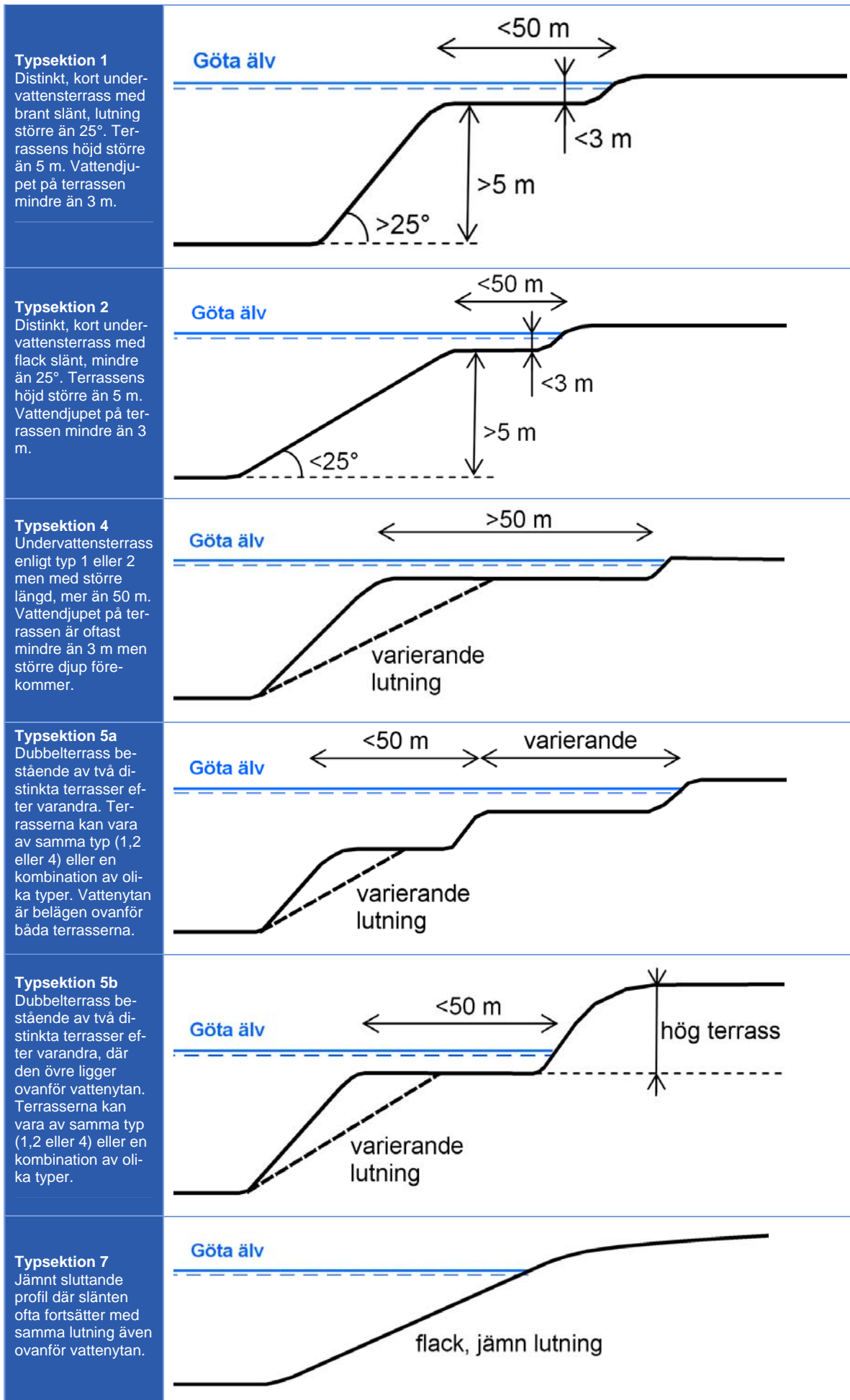
Den farligaste glidyten har valts att motsvara den glidyta som har den lägsta säkerhetsfaktorn beräknad enligt odränerad eller kombinerad analys, med tillägget att säkerhetsfaktorn enligt kombinerad analys har multiplicerats med 1,15 före jämförelsen, det vill säga $F = \min(F_c; 1,15F_k)$. Faktorn 1,15 har valts eftersom osäkerheten för jordens dränerade hållfasthet anses vara lägre än den odränerade och eftersom man i den kombinerade analysen utför beräkningen för det lägsta värdet på jordens hållfasthet (odränerad eller dränerad hållfasthet).

Val av sektioner för beräkning av skredsannolikhet

För att begränsa antalet sektioner med tolkning från verklig till idealiserad slänt har ett antal representativa sektioner valts inom olika geografiska områden. Totalt indelades utredningsområdet i 39 olika geografiska områden med likartade förhållanden avseende topografi och geologiska förhållanden.

Inom varje geografiskt delområde grupperades de beräknade sektionerna med avseende på deras geometriska utseende samt osäkerheter i geometri, odränerad skjuvhållfasthet och tunghet.

Millet (2011) identifierade för undervattenslänterna längs Göta älv sju olika typsektioner med avseende på deras geometriska utseende. Baserat på Millets arbete och med viss modifiering, bland annat för att representera även sektionernas form ovan vattenytan, indelades de inom utredningen beräknade sektionerna i sex olika typsektioner, benämnda typsektion 1, 2, 4, 5a, 5b och 7, se Figur 9-4.



Figur 9-4
Använda typsektioner med avseende på släntgeometri (modifierad efter Millet, 2011).

För varje geologiskt område har representativa variationskoefficienter för odränerad skjuvhållfasthet och tunghet bestämts enligt riktlinjer angivna av Berggren et al. (2011). Indata har utgjorts av resultat från CPT-sonderingar, vingförsök och fallkonförsök på ostörda jordprover, utförda i föreliggande utredning och i andra utredningar. Samtliga skjuvhållfasthets- och tunghetsvärden inom älvens närområde har använts, dock har klart avvikande värden sällats bort i utvärderingen. Variationskoefficienten för skjuvhållfasthet har påförts en variansreduktion av 0,6 och därefter sorterats i tre grupper: liten variation ($V < 11\%$), mellanstor variation ($11\% < V < 15\%$) och stor variation ($V > 15\%$). För sektioner där den kombinerade analysen har varit dimensionerande har variationskoefficienter för kohasionsinterceptet och friktionsvinkeln antagits till 0,06.

Osäkerhet i slänternas geometri har valts beroende på släntens lutning, där en brantare slänt har resulterat i högre osäkerhet. Indelning av i utredningen ingående slänter har gjorts i grupperna liten och medel enligt förslag givna av Berggren et al. (2011). Inom varje geografiskt delområde längs älven (delområde 1-10) har en slänt valts ut för komplett beräkning för varje kombination av geologiskt område, typsektion och osäkerhet i geometri, vilket innebar beräkningar för omkring 80 sektioner. Alla dessa sektioner har beräknats för varje uppsättning av osäkerhetsmått, vilka utgör grunden för beräkning av säkerhetsfaktorns variationskoefficient. I de fall där last förekommer har den representativa sektionen beräknats med och utan last.

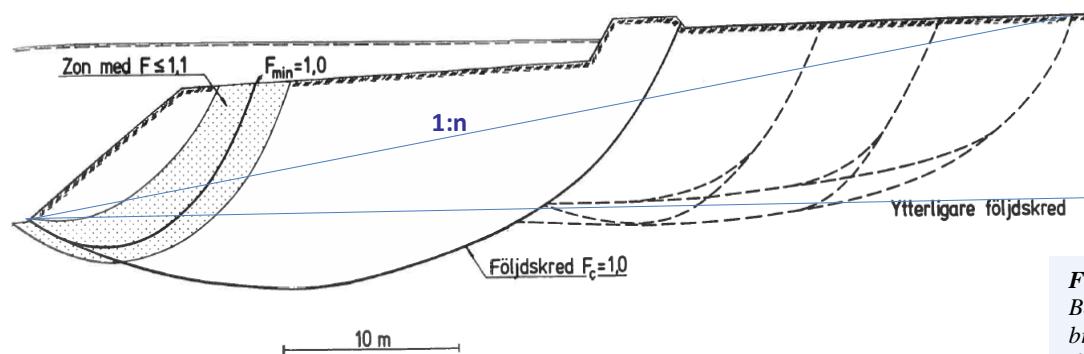
Den beräknade slänten har ansetts kunna representera andra slänter som är belägna inom samma geologiska formation och som har samma kombination av typsektion, osäkerhet i skjuvhållfasthet och osäkerhet i geometri. För dessa slänter har sannolikheten beräknats genom direkt överföring från säkerhetsfaktor till skredsannolikhet via beräknad variationskoefficient för säkerhetsfaktorn enligt diagram i Figur 9-3. Detta diagram har även använts för att bestämma utbredning från strandlinjen och in mot land för respektive skredsannolikhetsklass. Sannolikhetsklassgränserna och V_F har använts för att finna den säkerhetsfaktor som markerar gränsen för respektive sannolikhetsklass. Slutligen tas plankoordinater avseende sannolikhetsklassgränser fram för varje sektion.

9.3 Skredutbredning i områden med högsensitiv lera

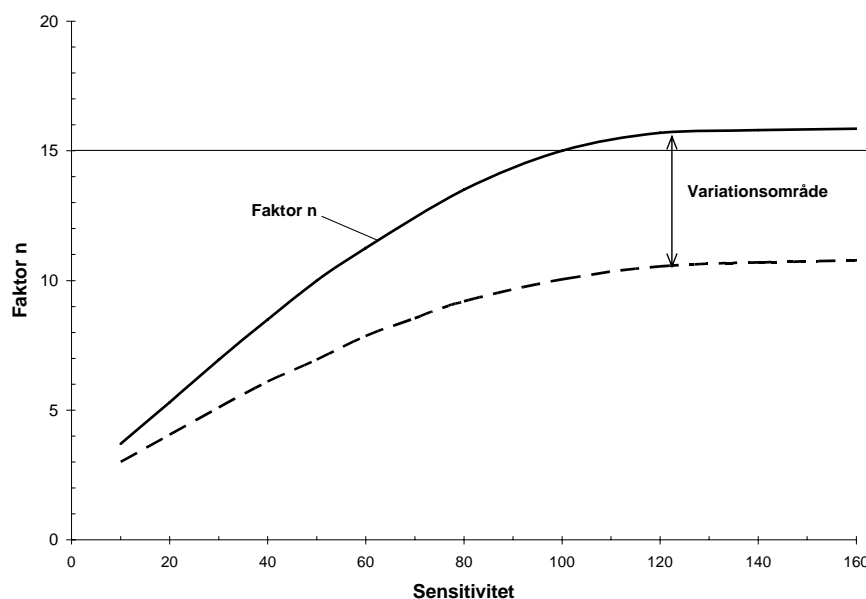
Vid skred i ett område med kvicklera är sannolikheten stor att skredet sprider sig och därmed påverkar stora delar av det aktuella området, samt i vissa fall även angränsande områden.

Inom Göta älvtutredningen har skredutbredning för bakåtgripande skred uppskattats med en metod speciellt utvecklad med avseende på Göta älvdalen av Larsson et al. (2008). Metoden, som har modifierats något inom Göta älvtutredningen, beskrivs i korthet i denna rapport. För en mer utförlig beskrivning hänvisas till Åhnberg et al. (2011).

Metoden bygger på analyser av inträffade bakåtgripande skred ur vilken utbredningen av skredet från släntfot till skredets bakkant har kunnat kopplas till sensitiviteten i jorden. Beräkningar inleds med en bestämning av stabiliteten närmast släntkrön med samma metodik som för övriga typer av lera (Skredkommissionen, 1995). Den fortsatta utbredningen bakåt bestäms med hjälp av en linje från släntfot med lutningen $1:n$, se Figur 9-5. Faktorn n är en funktion av sensitiviteten hos leran inom den jordvolym som berörs av initialskredet, se Figur 9-6. För initiala glidytor vid eller under strandlinjen beräknas en vidare utsträckning bakåt med hjälp av faktorn n gånger slänthöjden. Den sannolikhetsklass som gäller för initialskredet inom ett område antas gälla också för det område som bedöms kunna omfattas av efterföljande sekundärskred.



Figur 9-5
Bedömning av utbredning av sekundära skred i sensitiv lera.

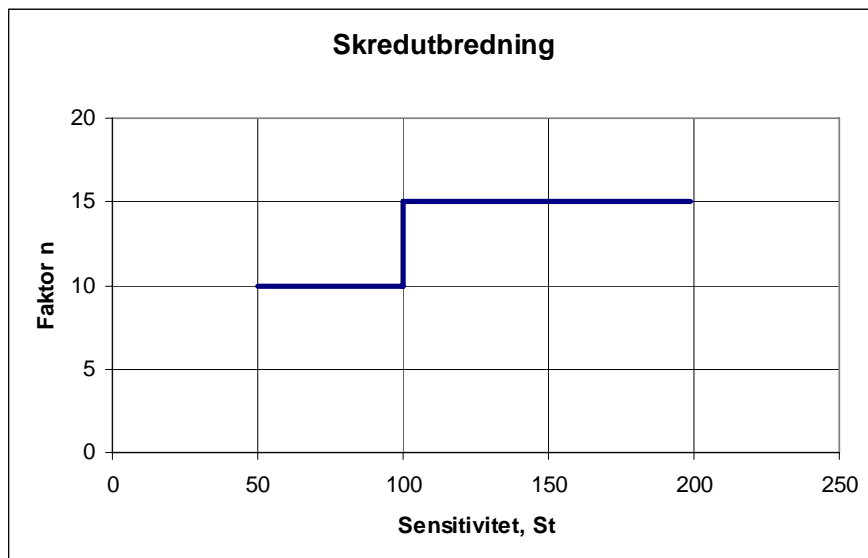


Figur 9-6
Diagram för bedömning av faktorn n med utgångspunkt från sensitivitet.

Vid den praktiska tillämpningen av den föreslagna metodiken för skredutbredning har en förenkling varit nödvändig. Förenklingen och den praktiska användningen innebär att för leror med uppmätt sensitivitet mellan 50 och 99 antas $n = 10$ och för leror med sensitivitet mellan 100 och 199 en lutning $n = 15$, se Figur 9-7. För kvicklera med extremt höga sensitiviteter, större än 200, antas att ett initialscred som når denna lera kommer att sprida sig inom hela området med extrem kvicklera, vilket kan innebära ända fram till omgivande fastmark.

Specialregler använda inom utredningen

1. Skredutbredningen bestäms för den initiella glidyta med lägst säkerhetsfaktor som berör en jordvolym med en sensitivitet lika eller högre än 50.
2. I sektioner, där säkerhetsfaktorn enligt odränerad analys är mindre än eller lika med 1,3, alternativt enligt kombinerad analys 1,2, bestäms utbredningen för den initiella glidytan som har en säkerhetsfaktor enligt odränerad analys av 1,3 (respektive 1,2) om denna berör en jordvolym med en sensitivitet lika eller högre än 50.
3. I det fall där någon glidyta skär igenom ett jordlager med en sensitivitet över 50 eller möjlig förekomst av kvicklera, flyttas dess sannolikhetsklass bakåt i sektionen (i riktning från slänkrön) motsvarande en lutning 1:10 alternativt 1:15 från älvbotten. Detta gäller för alla glidytor oavsett sannolikhetsklass.

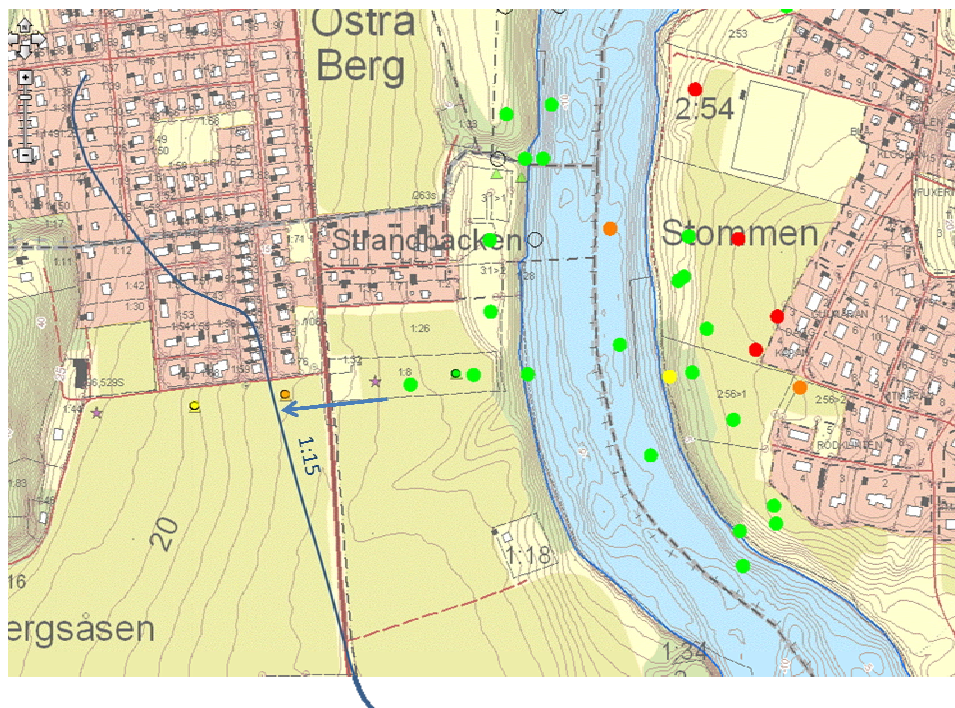


Figur 9-7
Diagram över i utredningen använt samband mellan sensitivitet och faktorn n .

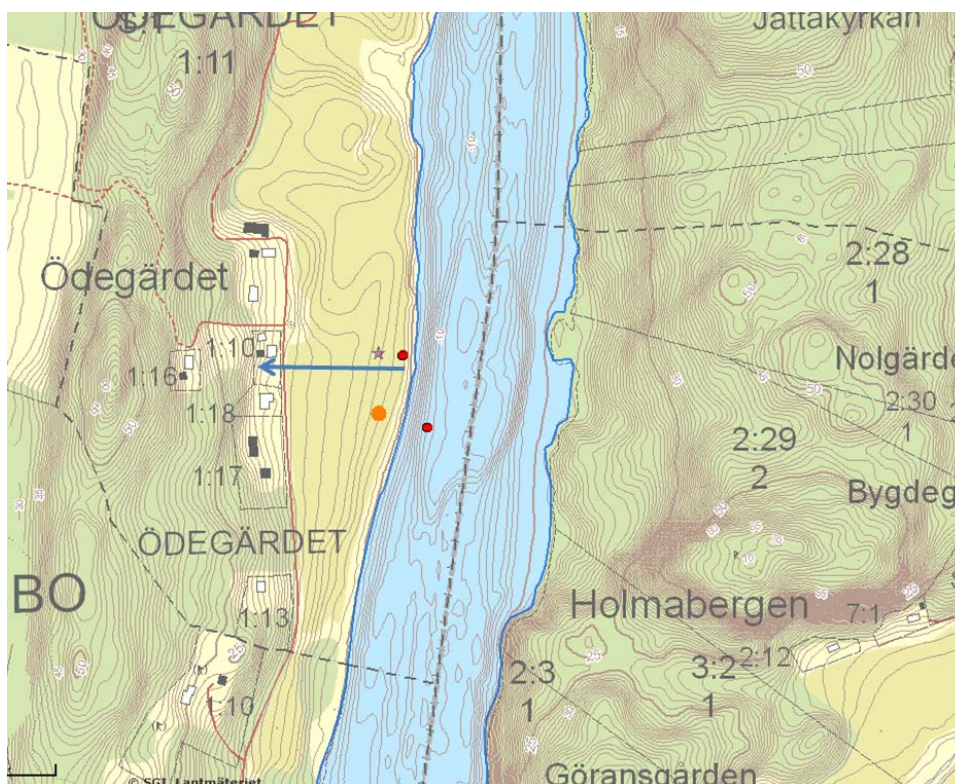
Som underlag för bedömning av skredutbredning markerades borrhåspunkter, som enligt kolvprovtagning på någon nivå visar en sensitivitet över 50, på plankartor genom en automatisk funktion i det inom utredningen framtagna tittskåpet. Borrhåspunkterna markeras med olika färger beroende på sensitivitetens värde i överensstämmelse med intervaller enligt Figur 9-7. Sonderingspunkter där CPT-sondering eller totaltrycksondering påvisar möjlig förekomst av kvicklera markerades manuellt. Möjlig förekomst av kvicklera från sonderingarna utvärderas med hjälp av ett av SGI framtaget program för detta ändamål (Löfroth, 2011).

Exempel på olika typer av förflyttning av sannolikhetsklass redovisas i Figur 9-8 och Figur 9-9. I Figur 9-8 är sensitiviteten lägre än 50 i punkterna närmast älven (gröna prickar) medan det längre bak finns sensitivitet mellan 50 och 99 (gul prick), sensitiviteter mellan 100 och 199 (orange prick) samt möjlig förekomst av kvicklera (lila stjärna). Här är sannolikhetsklassen för den glidyta som skär jorden med hög sensitivitet flyttad till begränsningslinjen för lutning 1:15. Förflyttningen är markerad med en svart pil. Det bör observeras att flyttning av sannolikhetsklass inte gäller för glidytan närmast älven i detta fall.

I Figur 9-9 finns lera med sensitivitet över 200 (röd prick) och lera med möjlig förekomst av kvicklera (lila stjärna) i båda punkterna i sektionen. En förflyttning av sannolikhetsklass för den farligaste glidytan som skär jorden med hög sensitivitet görs till fastmarken (rött område). Detta görs eftersom sensitiviteten är över 200 och dessutom återfinns begränsningslinjen för lutning 1:15 längre bak i sektionen jämfört med fastmarken.



Figur 9-8
Förflyttning av sannolikhetsklass till lutning 1:15. Utsnitt ur det i utredningen framtagna tittskåpet. Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet.



Figur 9-9
Förflyttning av sannolikhetsklass till fastmarksgräns. Utsnitt ur det i utredningen framtagna tittskåpet. Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet.

9.4 Kartering av sannolikhet för skred

Metodiken för bedömning av skredsannolikheten i beräknade sektioner som presenterats hittills i detta kapitel kan sammanfattas på följande sätt:

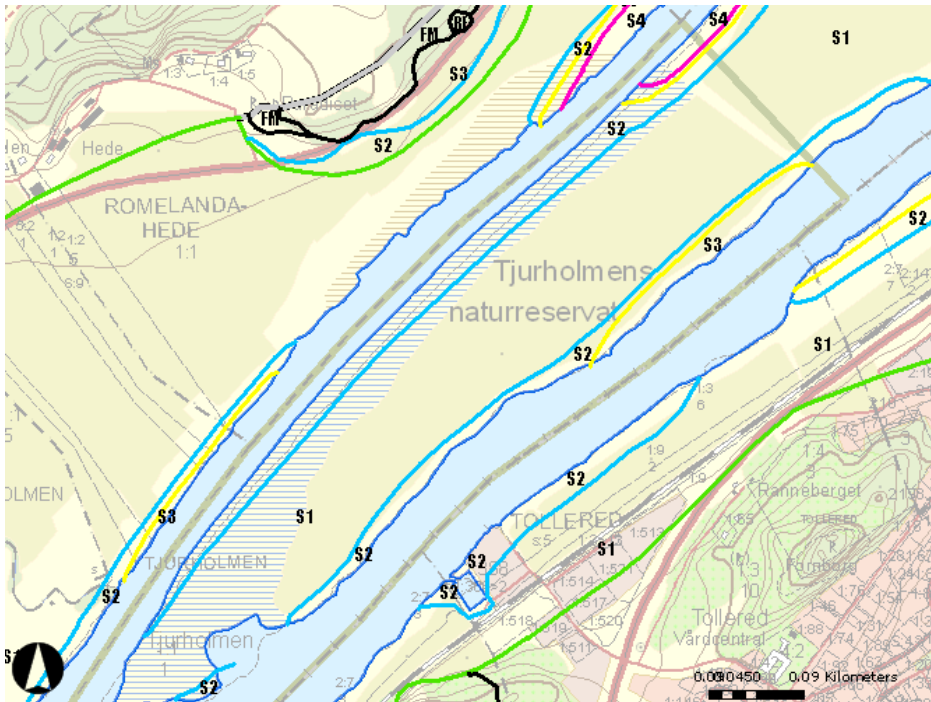
- Det finns ett direkt samband mellan den beräknade skredsannolikheten, släntens säkerhetsfaktor och variationskoefficienten hos styrande faktorer.

- För att minska omfattningen av antalet sektioner som behöver detaljstuderas har området delats in i mindre delområden med samma geologiska förutsättningar, framförallt med liknande skjuvhållfasthetsfördelning. Variationskoefficienterna har sorterats in i tre grupper: liten variation ($V < 11\%$), mellanstor variation ($11\% < V < 15\%$) och stor variation ($V > 15\%$).
- De studerade sektionerna (cirka 240) har indelats efter geometriskt utseende i sex olika typutseenden, se figur 9-4. Släntens lutning har varit den styrande faktorn vid studien av osäkerheten i geometrin och sektionerna har delats upp i två grupper: liten och medelstor osäkerhet i geometrin.
- Fullständiga beräkningar av skredsannolikhet har utförts för cirka 80 representativa sektioner. För övriga sektioner har sannolikheten beräknats genom direkt tolkning från säkerhetsfaktor till sannolikhet via beräknad variationskoefficient för F enligt diagram i figur 9-3.

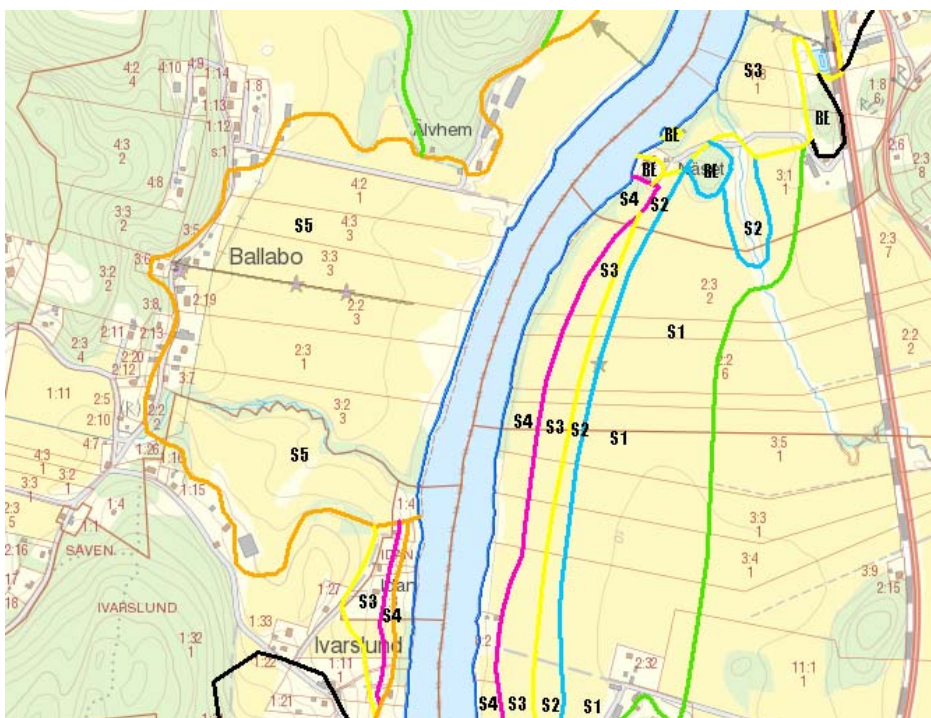
För att bedöma sannolikheten för skred inom hela det studerade området längs Göta älv har resultaten från sektioner beräknade inom Göta älvutredningen använts i första hand. Dessa resultat har applicerats på angränsande områden, främst genom jämförelse mellan beräknade och icke-sannolikhetsberäknade sektioner. Avgränsning av denna extrapolering av resultatet har styrts av utförda klassiska totalstabilitetsberäkningar, terrängens beskaffenhet såsom topografi, jordart, fastmark, med mera. Dessutom har resultat från ett stort antal tidigare utförda utredningar samt lokal kännedom använts för att kartera områden mellan de sektioner som studerats inom utredningen. Detta arbete har resulterat i att olika områden inom utredningsområdet har erhållit en sannolikhetsklass från S1 till S5, Figur 9-10.

Slutligen har förekomst av högsensitiv lera/kvicklera i olika områden beaktats vid kartering av sannolikhetsklasserna. Enligt den metodik som presenteras i detta kapitel samt i Åhnberg et al. (2011), har den beräknade sannolikheten vid den första glidyten mot älven som påverkar ett område med kvicklera fått omfatta en större del eller hela vägen upp till avgränsningen av kvickleraområdet. Detta innebär att framtagna sannolikhetsklasser har justerats inom dessa områden för att markera att området kan drabbas av sekundära skred, det vill säga bakåtskridande skred som en följd av lokala skred vid älven, Figur 9-11.

Resultaten har sammanställts i en sannolikhetskarta som täcker hela det studerade området längs Göta älv och Nordre älv.



Figur 9-10
Exempel på karta med sannolikhetsklasser, där kvicklera inte påverkar indelningen.



Figur 9-11
Exempel på karta med sannolikhetsklasser (S1-S5) med flyttning av sannolikhetsgränsen vid förekomst av högsensitiv lera/ kvicklera. BE avser berg.

9.5 Effekten av ett förändrat klimat på sannolikhetsklassen

Klimatförändringens inverkan på de faktorer som påverkar stabiliteten redovisas i tidigare kapitel om klimat, erosion samt yt- och grundvatten. De förväntade effekterna på stabilitetsförhållandena i älvdalen gäller främst förändring av vattennivån i älven, porttryckssituationen i slänten och förändring av släntens geometri på grund av erosion.

Utredningen av erosionprocessen i Göta älv har visat att ett ökat flöde med maximalt 1500 m³/s under viss del av året medför en markant ökning av erosionen. Detta gäller

främst i områden som redan för dagens situation klassas som erosionskänsliga, men även i andra områden som idag inte är påverkade av erosion i någon större omfattning. Ökad erosion medför en försämring av stabilitetsförhållandena eftersom slänternas geometri har stor betydelse för sannolikheten för skred.

Studien av förändring av maximalt grundvatten- och porvattentryck i slänterna har där-
emot visat att denna har en mindre betydelse på stabilitetsförhållandena och att försäm-
ringen kan antas ligga inom gränserna för parametrarnas osäkerhet, se avsnitt 8.1.

I utredningen har det förutsatts att lägsta vattennivån ovanför Lilla Edets sluss kommer att
vara oförändrad. Söder om Lilla Edets sluss kommer Göta älvs vattennivå att påverkas av
en stigande havsnivå, vilket inom den nedre delen av älven påverkar stabiliteten positivt.

Metodik för beräkning av klimatpåverkan

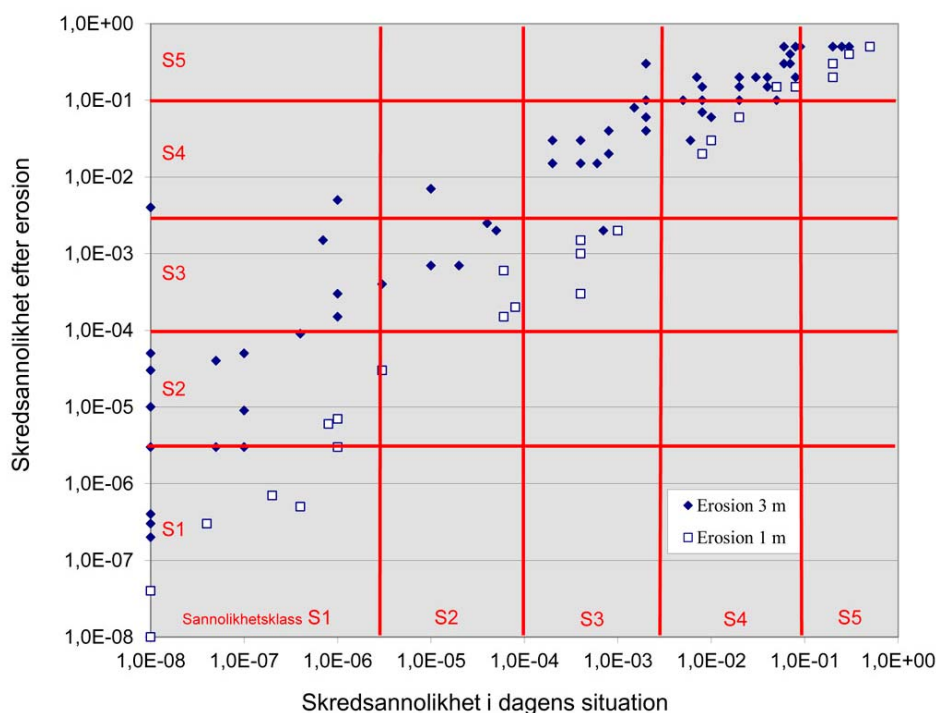
Erosionprocessen i Göta älv dalen och dess inverkan på älvens geometri presenteras i kapi-
tel 7 *Erosion*. Områden längs älven som utsätts för erosion i dagens situation beskrivs
samt vilka ytterligare sträckor som kommer att påverkas av ett ökat flöde på grund av kli-
matförändringen. Den totala erosionen fram till år 2100 varierar mellan 0,4 och 1,5 m vid
samma erosionspåverkan som för dagens flöden. Om högre flöden till följd av förändrat
klimat avleds genom älven bedöms den totala erosionen öka till mellan 0,8 och 3,0 m för
olika delsträckor.

I kapitel 8 *Stabilitetsberäkningar* beskrivs hur säkerhetsfaktorer med hänsyn till påverkan
av erosionen har beräknats inom representativa delsträckor längs älven och hur dessa be-
räkningar har använts för att bedöma effekten längs andra delar av älven. För att illustrera
inverkan av erosion har beräkningarna utförts med 1 respektive 3 m erosion längs älvens
botten och slänter samt även i kombination med 1 respektive 4 m parallellförflyttning av
slänter på grund av erosion längs älvens undervattensslänter.

Förändring av sannolikheten, och därmed i vissa fall förändring av sannolikhetsklass, har
beräknats för samtliga sektioner inom de delsträckor som kommer att påverkas av erosion,
det vill säga cirka 130 sektioner med odränerad analys och cirka 75 med kombinerad ana-
lys.

Vid beräkning av erosionens inverkan på stabilitetsförhållandena erhålls lägre beräknade
säkerhetsfaktorer mot stabilitetsbrott, vilket innebär en direkt påverkan på sannolikheten
och sannolikhetsklassen. Resultaten från utförda beräkningar visar att sannolikheten för
skred ökar till följd av ett förändrat klimat med ett ökat flöde. Förändringarna har dock
olika omfattning längs med sträckan, dels på grund av att erosionen sker i olika omfattning
i olika områden, dels därför att storleken av förändringen av sannolikheten påverkas av
bland annat geometrin och ursprungligt värde för sannolikheten.

I Figur 9-12 presenteras en beräknad förändring av sannolikhetsklass med hänsyn till kli-
matpåverkan för fallet 1 m erosion längs hela tvärsnittet samt för fallet 3 m erosion längs
älvens botten och 4 m längs slänten.



Figur 9-12
Förändring av sannolikhetsklass, utifrån dagens situation, vid en framtida klimatpåverkan (odränerad analys).

Figuren visar att erosionens påverkan är större vid låg ursprunglig sannolikhet (det vill säga slänter med relativt god stabilitet mot brott) än vid slänter med högre brottsannolikhet. Detta innebär att sannolikhet för skred kommer att förändras i större omfattning för områden med relativ god stabilitet som utsätts för erosion än områden med sämre ursprunglig stabilitet. Det ska dock noteras att för de slänter som redan har påtaglig eller tydlig sannolikhet för skred kan en liten förändring av geometrin, orsakad av erosion, innebära att ett skred utlöses.

Figuren visar också att fallet med 1 m erosion innebär en begränsad effekt på sannolikheten medan däremot att 3 m erosion i vissa delar av området kan försämra förhållandena och öka skredriskerna avsevärt.

Resultat från beräkning av klimatpåverkan

Klimatpåverkans effekt på sannolikheten för skred innebär en förväntad förändring inom stora delar av det studerade området. Påverkan har delats upp i tre klasser:

- **liten påverkan** - klimatförändringen innebär ingen generell förändring av sannolikhetsklass.
- **måttlig påverkan** - klimatförändringen innebär att sannolikhetsklassen ökar med ett steg i områden med låg sannolikhet (klass S1-S2) i dagens klimat medan det för övriga områden inte sker någon generell förändring av sannolikhetsklass.
- **stor påverkan** - klimatförändringen innebär att sannolikhetsklassen ökar ett till två steg i områden med låg sannolikhet (klass S1-S2) i dagens klimat medan det för övriga områden innebär en ökning upp till en klass.

För områden med den högsta sannolikhetsklassen, S5, kan även en mindre erosionspåverkan på grund av klimatförändring medföra att skred inträffar.

Fakta i korthet

- Sannolikheten för skred har baserats på en metodik för att beskriva säkerhetsmarginalen som en funktion av ett antal styrande förhållanden för slänter. En idealisering av slänter har gjorts med utgångspunkt från geometriska förhållanden och jordens egenskaper.
- Ett antal representativa sektioner har valts inom olika geografiska områden, där tolkning från verklig till idealiserad slänt utförts.
- En metod har utvecklats för att kunna beakta skredutbredning för bakåtgripande skred inom områden med kvicklera.
- Resultat från beräkningar utförda i sektioner har bundits samman med hjälp av resultat från tidigare utredningar, terrängens beskaffenhet och lokal kännedom, varvid en sannolikhetskarta som täcker hela utredningsområdet har tagits fram.
- Sannolikheten för skred har uttryckts genom en indelning i fem sannolikhetsklasser med utgångspunkt från brottsannolikhet och säkerhetsfaktor
- Förändring av sannolikheten för skred vid ett framtida klimat har analyserats och redovisas genom en indelning i tre klasser.

10 Konsekvensbedömning

I detta kapitel redovisas den metodik som använts för att bedöma konsekvenserna av ett skred. Olika typer av konsekvenser beskrivs, hur dessa kan uttryckas i monetära termer och hur de samlade värden som kan beröras av ett skred kan beräknas. Metodiken har tillämpats i Göta älvutredningen för att kartera konsekvenserna av potentiella skred.

Konsekvensen vid ett skred i kombination sannolikheten för skredet bildar underlag vid bedömningen av skredrisker.

För att värdera de konsekvenser som ett skred kan ge upphov till har en modell som tidigare använts för skredriskanalyser i Göta älv dalen vidareutvecklats. Syftet med konsekvensbedömningen är att identifiera de konsekvenser som kan uppstå och värdera dessa, så långt det är möjligt, i monetära termer. För den monetära värderingen har områdena delats in i fem konsekvensklasser, där den lägsta innebär att endast lindriga konsekvenser förväntas vid skred medan den högsta att konsekvenserna kan bli katastrofala. Några exempel på allvarliga konsekvenser är ett skred i ett bostadsområde, ett skred som orsakar brott i en kraftverksdamm eller om en anläggning som hanterar stora mängder farliga kemikalier skulle drabbas vilket skulle kunna medföra gasutsläpp, explosioner eller spridning av föroreningar i omgivningen.

I detta kapitel redovisas först allmänt den valda metodiken för konsekvensbedömning och därefter metodiken för kostnadsvärdering mer i detalj och slutligen har metoden tillämpats för Göta älv dalen. Om inte annat anges är kostnaderna angivna i 2009 års kostnadsnivå. Metodiken presenteras mer utförligt av Andersson-Sköld (2011a).

10.1 Metodik för bedömning av konsekvenser

Metodik för bedömning av konsekvenser innefattar ett antal steg där de centrala delarna utgörs av dels en identifiering av objekt som kan påverkas av ett skred, dels en värdering av dessa objekt. Efter värderingen görs en summering av konsekvenserna inom varje så kallad redovisningsruta i det valda rutnätet där varje ruta har en bredd och längd av 100 m. Det sammanlagda värdet av konsekvenserna i varje redovisningsruta har redovisats indelat i 5 olika värdeklasser.

Vid värdering av konsekvenserna för ett skred, har därefter värdet för de av skredet påverkade redovisningsrutorna summerats. De sammanlagda konsekvenserna för skred för alla berörda rutor indelas i fem *konsekvensklasser*, betecknade K1 – K5. De ekonomiska intervallen är lika för både värdeklass och konsekvensklass. Den valda klassindelningen framgår av Tabell 10-1.

Värdeklass och konsekvensklass	1	2	3	4	5
Ekonomiska intervall (MSEK)	<6	6-35	35-150	150-650	>650

Tabell 10-1
Ekonomiska intervall för värdeklasser och konsekvensklasser uttryckta i MSEK.

För skred som är större än en redovisningsruta (100 x 100 m) adderas kostnaden för samtliga rutor som påverkas av skredet. Som exempel kan beskrivas situationen om ett större skred drabbar E45 på en sträcka av 300-400 m. Tiden för återställande, och därmed även tiden som trafiken behöver ledas om bedöms till drygt 100 dagar. Motsvarande tid för återställande av en kortare vägsträcka har antagits vara i stort sett linjärt så att tiden för

återställande av 100 m vägsträcka ansätts till 33 dagar. Detta innebär att kostnaderna adderas vid större skred så att totalkostnaden för skredet utgörs av alla konsekvenser som kan beskrivas inom samtliga enheter som drabbas. Vid redovisning av konsekvensvärdet i kartform anges det totala värdet inom respektive redovisningsruta (100 x 100 m), det vill säga konsekvensen redovisas i form av en här benämnd värdeklass per hektar. Vid redovisning av konsekvensen i en riskkarta anges dock det totala konsekvensvärdet (innehåller ofta flera redovisningsrutor) som kan drabba områden i anslutning till älven till följd av ett initialskred som antas ske längs med älven.

Den totala monetära konsekvensvärderingen används därefter för att göra en indelning i de fem konsekvensklasser där den lägsta (K1) innebär att endast lindriga konsekvenser förväntas vid skred och den högsta (K5) innebär att där finns objekt som kan medföra katastrofala konsekvenser.

Vilken typ av konsekvens som kan uppstå vid ett skred samt hur stor denna konsekvens blir, beror främst av skredets storlek och markanvändningen, eller de värden som finns, på den plats som drabbas. I arbetet med konsekvensbedömningen har antagits att en redovisningsruta (100 x 100 m) inom det valda rutnätet omfattas av skred i sin helhet eller inte påverkas alls.

Den följande redovisningen behandlar därför i huvudsak frågor om de värden som finns inom en skreddrabbad redovisningsruta. Denna avgränsning är inte helt optimal, men har ändå bedömts som den bästa. Ett exempel på ett fall när värdet/kostnaden inte är proportionell till värdet inom drabbade redovisningsrutor kan vara om en överföringsledning för vatten förstörs. Avgörande för värdet/kostnaden blir då inte hur många meter av ledningen som förstörs utan snarare det antal människor/industrier som är beroende av just den ledningen, hur lång tid det tar att reparera skadan och vilka åtgärder som måste vidtas under tiden.

För att öka överskådligheten kan konsekvenser beskrivas för olika sektorer, som var och en innehåller kategorier av värden som finns knutna till platsen:

- Bebyggelse (och andra fastigheter)
- Liv
- Väg och järnväg
- Sjöfart
- Energi- och ledningssystem
- VA-system
- Miljöfarliga verksamheter och förorenade områden
- Näringsliv
- Naturmiljö och kulturarv

Analysen baseras på tillgängliga underlag, data och information. Arbetet bygger också på resultat från tidigare studier och tidigare utvecklade metoder, samt på erfarenheter från tidigare eller liknande händelser.

I Göta älvutredningen har information erhållits via inköp av data, öppna dataregister/databaser, litteraturgenomgång samt muntliga eller skriftliga förfrågningar. Kontakter har tagits framförallt med kommuner och länsstyrelser, men också med universitet, högskolor, statliga myndigheter, branschorganisationer, verksamhetsutövare med flera.

Viss information är också plats- och verksamhetsspecifik och det fanns inom utredningen inte möjlighet att ta fram denna. Den metodik som utvecklats kan dock appliceras på mindre och avgränsade områden. I sådana fall går det ofta att ta fram information med god precision för att möjliggöra fördjupade och detaljerade analyser.

Utvecklingsarbetet har utförts i två steg. Det första steget var fallstudiebaserat för att ta fram en metodik som var användbar för just det specifika fallstudieområdet. Det andra ste-

get innebar att metoden utvecklades till en generell metodik som kan användas för hela utredningsområdet.

10.2 Exponering och sårbarhet - identifiering av vad som kan drabbas och i vilken omfattning

För att identifiera vad som kan drabbas på en specifik plats för ett skred görs en inventering av värden på platsen. Exempel på vad som kan ingå vid inventeringen är fastigheter respektive boende (underlag från SCB) och förorenade områden (underlag från länsstyrelsen).

Resultatet av inventeringen är exempelvis antal byggnader eller antal boende som kan drabbas vid ett skred inom en redovisningsruta.

Skadans omfattning beror av hur många, eller hur mycket av respektive objekt, som påverkas av skredet. Hur många som kan drabbas beror av hur många personer som är närvarande när skredet inträffar. För att spegla detta har så kallade närvarofaktorer för boende, arbetande och skolelever tagits fram.

Inom tekniska sektorer används begreppet teknisk, eller betingad, sårbarhet för att beskriva omfattningen av, eller sannolikheten för, att en konsekvens ska uppstå till följd av en händelse såsom ett skred. Konsekvensen som kan uppstå kan till exempel vara att en person som befinner sig inom ett skredområde omkommer. Den betingade sårbarheten kan i detta fall värderas enbart om ett skred inträffar och ska inte förväxlas med sannolikheten för att skred ska inträffa, vilket beskrivs i kapitel 9 *Sannolikhet för skred*. Sannolikheten för att en person som befinner sig inom skredområdet, eller sannolikheten för en kollaps av en funktion, en verksamhet eller en byggnad vid ett skred, benämns betingad eller teknisk sårbarhet. Den tekniska eller betingade sårbarheten anges som ett värde mellan noll och ett (0-1). En nolla innebär att det inte föreligger märkbar effekt till följd av händelsen av ett skred och en etta att det är en total kollaps av det specifika objektet, funktionen eller verksamheten.

10.3 Värdering i monetära termer

En betydande del av det arbete som utförts har varit att finna en metod för att värdera de konsekvenser som kan uppstå. Exempel på värderingsmetod är värde på ett ”statistiskt liv”, kostnader för återställning av de skador som uppkommit, taxeringsvärde eller kostnader för utebliven produktion.

Konsekvensvärderingen, för till exempel boende som kan drabbas vid ett skred, har baserats på uppgifter om antalet boende, bedömda närvarofaktorer samt en bedömning av betingad sårbarhet för de som ansätts finnas närvarande vid ett skred. För värderingen har använts värdet för ett ”statistiskt liv”.

På samma sätt beräknas konsekvensen för bebyggelse och övriga konsekvenser som har ingått i bedömningen och för vilka det funnits underlag för värdering.

Nedan redovisas kostnadsvärdering av konsekvenser samt underlag och värderingsmetoder som valts för respektive sektor. Metodiken för konsekvensbedömning presenteras mer utförligt i Andersson-Sköld (2011a;b) och Göta älvutredningens delrapporter 12-26, se Bilaga.

Bebyggelse

Vid konsekvensbedömning av bebyggelse och andra fastigheter som drabbas av skred antas att fastigheten helt måste återställas eller säljas. Värdet för detta har ansatts till fastighetens marknadsvärde. Vidare fördelas fastighetens värde lika över hela fastighetens area.

För fastigheter med taxeringsvärde (enstaka fastigheter har inget taxeringsvärde, till exempel vissa kyrkor) beräknas fastighetsvärdet som taxeringsvärdet multiplicerat med en köpeskillingskoefficient (kvoten mellan en fastighets pris/köpeskillning och fastighetens taxeringsvärde). Bedömningen baseras på typkod, taxeringsvärde och samtaxeringsnyckel. Alla fastigheter som fastighetstaxeras ges en typkod av Skatteverket. Samtaxeringsnyckeln visar om fastigheten taxeras tillsammans med andra fastigheter och den är därför viktig för att undvika dubbelräkning. Uppgifter för att beräkna fastighetsvärdet har levererats av Lantmäteriet (MS2009/9792). För fastigheter som saknar taxeringsvärde har värden beräknats i de fall underlag varit tillgängligt.

Liv

Inom ett skredområde finns fara för att människor skadas eller omkommer. En kostnadsvärdering av detta kräver en bedömning av hur många människor som finns på platsen för ett skred samt hur sårbara dessa personer är.

En bedömning av hur många som kan antas befinna sig vid platsen för skredet (exponeeringen) baseras på uppgifter om antal boende, förvärvsarbete, skolelever etc. samt på dessas vistelsetid (tid utsatt för risk) på platsen. Vistelsetiden uttrycks som en närvarofaktor vilken speglar den andel av dygnet som en genomsnittsperson antas befinna sig på en plats såsom hem, skola eller arbetsplats.

Den betingade sårbarheten (skadegraden eller risken för dödsfall i samband med skred) har tagits fram utifrån dokumenterad information av tidigare skredhändelser i Sverige och Norge (MSB, 2009a och Skrednett, 2010). Utifrån dessa skred har en bedömning gjorts av risken för att en person som befinner sig inom skredområdet ska omkomma. Personskador skulle, i princip, kunna beskrivas på samma sätt, men det saknas underlag för att genomföra sådana beräkningar. I de känslighetsanalyser, som ingått i denna konsekvensbedömning, ingår dock en grov uppskattning av en samhällsekonomisk kostnad för personskador som kan uppstå till följd av skred.

För att beskriva konsekvensen i monetära termer har värdet av ett statistiskt liv (VSL) använts. Den valda metoden för monetär värdering av konsekvensen för ett statistiskt liv, $C(VSL)$, beräknas enligt följande uttryck:

$$C(VSL) = (P_p \cdot e_p + P_i \cdot e_i + P_e \cdot e_e) \cdot (V \cdot VSL + 0,4)$$

där $C(VSL)$ är konsekvensen med avseende på statistiskt liv uttryckt i MSEK

P_p = antalet elever

P_i = antalet boende

P_e = antalet anställda

e_p = elevernas närvarofaktor

e_i = boendes närvarofaktor

e_e = anställdas närvarofaktor

V = betingad sårbarhet för samtliga grupper

VSL = värdet av ett statistiskt liv som enligt SIK (2009) uppgår till 23,5 MSEK.

De värden som har använts inom utredningen, för att kunna beräkna konsekvensen av ett statistiskt liv, redovisas i Tabell 10-2. För att bedöma konsekvensvärdet för statistiskt liv inom utredningsområdet har befolkningsdata från SCB (2009) använts.

Kategori	Värdefaktor
Värdet av ett statistiskt liv, VSL	23, 5 MSEK
Betingad sårbarhet, V (vulnerability-sårbarhet)	0,16
Närvarofaktor e_i (inhabitants-boende)	0,69
Närvarofaktor e_e (employees-anställda)	0,24
Närvarofaktor e_p (pupils-elever)	0,14

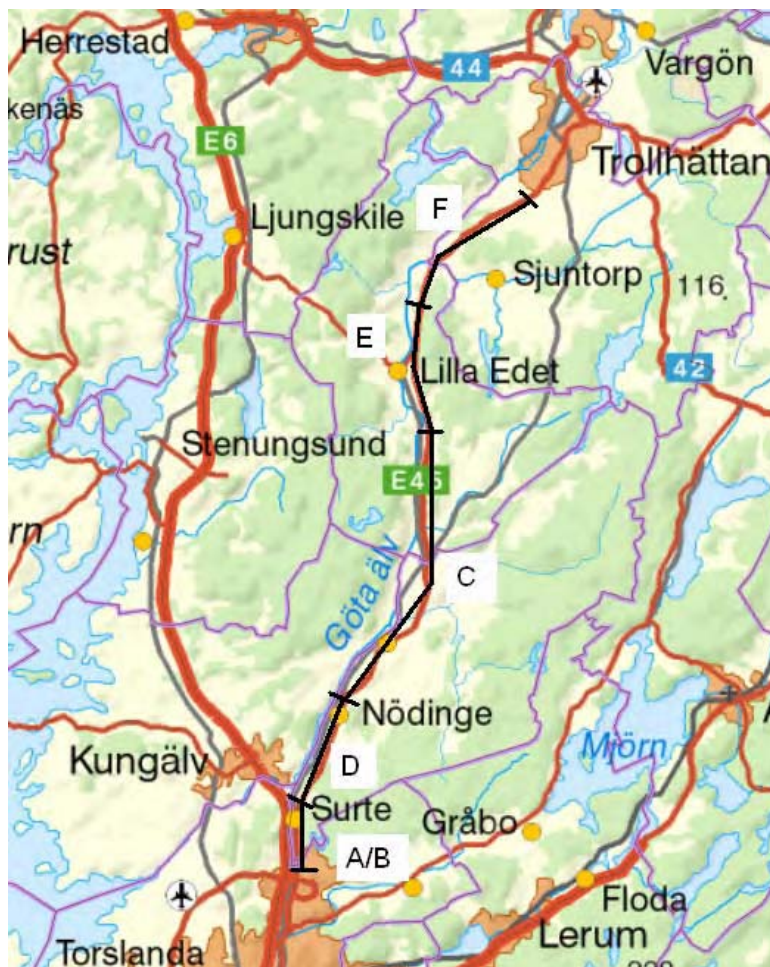
Tabell 10-2
Värden och faktorer som används inom Göta älvtredningen för beräkning av konsekvensvärdet för statistiskt liv som kan drabbas vid ett skred (2009 års kostnadsnivå).

Väg och järnväg

Om en väg eller järnväg drabbas av ett skred uppkommer kostnader för dels omledning av trafiken under ombyggnadstiden, dels återställande av förstörda anläggningsdelar. Beräkning av omledningskostnader har inom utredningen enbart utförts för de större vägarna och för järnvägen Norge-Vänerbanan. Återställningskostnader har dock beaktats för samtliga vägar i anslutning till älven där data varit tillgängligt.

Omledningskostnaden beror av trafikintensiteten, tiden för vilken omledning krävs samt vilka omledningsmöjligheter som finns i det aktuella området. Med stöd av information från tidigare skred och efter diskussion med representanter från Trafikverket, har omledningskostnaden beräknats för 33 dygn per 100 m större väg eller järnväg.

Om E45 genom Göta älvdalen skulle drabbas av ett skred måste trafiken ledas om till andra vägar. Beräkningar av kostnaderna för denna omledning har baserats på modellberäkningar för fem olika avsnitt av vägen, se Figur 10-1. För Norge-Vänerbanan har sträckan utmed Göta älv delats in i två avsnitt, norr respektive söder om Älvängen (beläget strax norr om Nödinge i Figur 10-1).



Figur 10-1

Indelning i fem avsnitt som använts för att beräkna omledningskostnaderna i händelse av ett skred som drabbar E45 i Göta älvdalen.

Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet.

Som underlag för bedömning av återställningskostnader för väg och järnväg har kostnader efter tidigare inträffade skred, och intervjuer om dessa, använts. Om en väg- eller järnvägsbro drabbas har använts en återställningskostnad på 20 000 kr per m².

I Tabell 10-3 redovisas de kostnader, som antagits för omledning och återställande vid ett skred som skulle drabbar E45 i Göta älvdalen,.

Tabell 10-3
Kostnader för omledning och återställning för E45 vid skred (MSEK).

Benämning i Figur 10-1	Sträcka	Kostnad för omledning (MSEK)	Kostnad för återställande (MSEK)	Sammanlagd kostnad (MSEK)
A/B	Göteborg – Jordfallsbron (Surte)	52	12	64
D	Jordfallsbron – Lilla Viken	134	12	146
C	Älvängen	52	12	64
E	Göta	26	12	38
F	Utby – Slumpån	15	12	27

För landsvägen på västra sidan av Göta älv har antagits en omledningskostnad av 15 MSEK och en återställandekostnad motsvarande 1 MSEK. För lokala vägar och andra mindre vägar har antagits enbart en återställandekostnad, motsvarande 1 MSEK per 100 m väg.

Den totala kostnaden för omledning och återställande av järnväg har på samma sätt ansatts till 30 MSEK per 100 m järnväg för sträckor norr om Älvängen och 42 MSEK per 100 m järnväg för sträckor söder om Älvängen.

Sjöfart

Det finns inga vedertagna metoder för att värdera konsekvensen av skred för sjöfartssektorn. Den bedömning som gjorts baseras på intervjuer och på information som finns tillgänglig från tidigare händelser och tillhörande utredningar.

Vid skred utmed Göta älv i eller i närheten av farleden erfordras vissa arbetsinsatser i form av räddningstjänst, muddring av skredmassor samt arbeten för att förebygga nya skred för att återställa och säkra förutsättningarna för sjöfarten. Kostnaden för dessa insatser skulle kunna ha redovisats i ett separat avsnitt, men eftersom den till stor del är motiverad av sjöfarten på Göta älv, har den hänförs till detta avsnitt. Denna kostnad har antagits vara 51 MSEK per 100 m utmed älven, baserat på uppgifter från Agnesbergsskredet 1993 (Andersson-Sköld, 2011a).

Göta älv	A	B	B	osv
	A	B	B	osv
	A	B	osv	osv
	osv	osv	osv	osv

Figur 10-2
Värdering av kostnader för sjöfarten. Indelning av områden för skred baserat på avstånd från älvkanten. Gröna rutor har en storlek av 100 x 100 meter.

För att studera konsekvenskostnaderna för sjöfarten av skred i eller i närheten av farleden har utbredningen av skred i områden närmast älven delats in i två delar. Områden finns dels inom den del av skredet som sker nära (upp till 100 m från) älvkanten och som illustreras av område A i Figur 10-2, dels inom den del som sträcker sig på större avstånd än 100 m från älven, område B enligt Figur 10-2. I Tabell 10-4 anges de kostnader som används för att beskriva konsekvenserna för sjöfarten.

Åtgärd	Antagen kostnad per ha (MSEK)
Akut insats, återställande av farled (muddring), förstärkningsåtgärder (gäller < 100 m från älven) (A)	51
Muddring (> 100 m från älven) (B)	2,5
Deponering av icke förorenade sediment (Dep)	2,5
Fartyg (F)	1
Rutenheter närmast älven (A+Dep+F)	55
Rutenheter > 100 m från älven (B+Dep+F)	6

Tabell 10-4
Sammanställning av kostnader för konsekvenser för sjöfarten (MSEK).

Energi- och ledningssystem

För energi och andra samhällsviktiga system, som telefoni och IT/bredband, kan såväl de direkta som indirekta konsekvenserna av ett skred bli mycket omfattande. Sambanden är dock komplexa och svårbedömda. I denna utredning har därför enbart de återställnings-

ler ersättningskostnader som krävs för att kunna upprätthålla den befintliga strukturen beaktats.

En stor del av kostnaderna vid installation av ledningar är schaktningskostnader. I denna studie har det förutsatts att återställningsarbetena efter ett skred kan samordnas mellan olika sektorer. Eftersom kostnader för schaktningsarbeten finns upptagna både för sjöfarten och för VA-sektorn har inte någon extra kostnad för schaktning antagits för andra typer av ledningar.

I Tabell 10-5 redovisas de värden som har använts för sektorn energi och ledningssystem.

Tabell 10-5
Sammanställning av kostnader som har använts inom konsekvenssektorn energi och ledningssystem (MSEK).

Anläggning	Antagen kostnad (MSEK)
Vattenkraftverk	Behandlas som allvarligaste konsekvensklass (konsekvensklass 5)
El-ledningar /spänning	Uppskattad kostnad* per 100 m (MSEK)
12 kV (högspänning)	0,07
400 V (lågspänning servis)	0,07
400 V (lågspänning stam)	0,05
Transformatorstationer /spänning	Uppskattad kostnad (MSEK)
Liten transformatorstation för distribution (matning av ett kvarter, villaområde)	0,5
Transformatorstation 40/10 kV (försörjning till mindre samhälle)	20
Transformatorstation 130 kV (försörjning större samhälle, större industri typ AKZO Eka Nobel i Bohus m.m.)	50

*) Uppgifter från Vattenfall (2010).

Vatten- och avloppssystem

Endast de VA-anläggningar och ledningssystem som antas bli direkt drabbade vid ett skred har värderats. Det har antagits att systemen blir totalförstörda, det vill säga restvärdet har satts till noll. Värdena har kopplats till de av skredet drabbade redovisningsrutorna, vilket i vissa fall kan leda till felaktiga värderingar

Anläggningar och ledningssystem har indelats i tre typer: ytformade, linjeformiga och punktförmiga anläggningar. Ytformade anläggningar består av nät av ledningar, inklusive servisledningar för den lokala VA-försörjningen. Linjeförmiga anläggningar utgörs av ledningar med grövre dimensioner som förbinder större områden, till exempel överföringsledningar och huvudledningar. Till de punktförmiga anläggningarna hör vattenverk, avloppsreningsverk, pumpstationer och tryckstegringsstationer. För nybyggnad av ledningar har kostnaderna beräknats med hjälp av KP-fakta, vilka bygger på prisinformation från faktiska byggprojekt (KP-fakta, 2010). Till entreprenadkostnaderna har lagts 25 % för projektering samt för kommunens byggledning och kontroll. För större ledningar inom Göteborgs kommun har kostnader för nybyggnation inhämtats från kommunens tekniska förvaltningar. I Tabell 10-6 anges de kostnader som antagits för VA-sektorn.

Anläggning	Antagen kostnad (MSEK)
Avloppsreningsverk och vattenverk > 8000 personekvivalenter (pe)	150
Avloppsreningsverk och vattenverk 1000 < pe < 8000	50
Avloppsreningsverk och vattenverk < 1000 pe	10
Pump- och tryckstegringsstationer	0,5
Pump- och tryckstegringsstationer alternativ	0,025 per hektar
Linjeformiga anläggningar *	0,003 per m
Ytformiga anläggningar, merkostnader som inte ingår i fastigheternas marknadsvärde	0,1 per ha

Tabell 10-6

Antagna kostnader (MSEK) för VA-anläggningar som drabbas av skred och som inte ingår i fastigheternas marknadsvärde (2009 års kostnadsnivå). Avloppsreningsverk är indelade i tre klasser baserade på det antal personer verket försörjer (antal personekvivalenter, pe).

*) Gäller för huvuddelen av utredningsområdet. Inom Göteborgs kommun kan skadekostnaderna bli betydligt högre med tanke på att ledningsnätet är betydligt grövre. För vissa huvudledningar kan skadekostnaden där uppgå till mellan 0,010 och 0,080 MSEK per meter.

Miljöfarlig verksamhet och förorenade områden

Någon etablerad metod för ex-ante värdering (värdering före händelsen har inträffat) av samtliga kostnader som uppkommer till följd av att ett skred drabbar en miljöfarlig verksamhet, en Sevesoanläggning (en verksamhet som hanterar mycket stora mängder farliga kemikalier, SFS 1999:381) eller ett förorenat område, har inte kunnat identifieras. En stegvis modell för detta har därför tagits fram inom utredningen, vilken beskrivs av Andersson-Sköld (2011a) och mer i detalj av Helgesson & Rihm (2011).

Det har inte funnits möjlighet till att göra en fullständig värdering av varje objekt inom utredningsområdet, utan värderingen har endast utförts i form av grova uppskattningar. Uppskattningar har varit nödvändiga då det inte har varit möjligt att inventera exempelvis mängder av lagrade farliga ämnen per verksamhet eller utbredning, halt och mängder av förorenade massor per objekt. En slutsats som dragits i utredningen är att underlaget för bedömningar av mängd och typ av föroreningar i många fall är knapphändigt. För vissa förorenade områden finns överhuvud taget inte mer information att få utan att nya miljötekniska undersökningar utförs. Vidare är varje verksamhet specifik och för att rätt bedöma konsekvensen krävs detaljerade och verksamhetsspecifika utredningar.

För Sevesoklassade anläggningar med hög kravnivå bedöms konsekvenserna på människors hälsa och på miljön kunna bli så stora att endast den högsta konsekvensklassen kan komma ifråga.

Efter ett skred erfordras vissa åtgärder oavsett om området är förorenat eller inte. Dessa baskostnader för muddring, deponering av icke förorenade massor, säkerställande av området etc. behandlas inom sektorn sjöfart. För miljöfarlig verksamhet och förorenade områden beaktas därför endast den kostnad som uppstår till följd av att marken är förorenad i förhållande till motsvarande mark om den inte var förorenad, det vill säga den merkostnad som uppstår till följd av att det är en miljöfarlig verksamhet, en Sevesoklassad verksamhet eller ett förorenat område som drabbas.

Resultatet av antaganden och bedömningar av kostnader för miljöfarlig verksamhet och förorenade områden redovisas i Tabell 10-7.

Tabell 10-7

Värden för beskrivning av merkostnader och samhälls-ekonomiska kostnader till följd av att det skreddrabbade området är förorenat eller att miljöfarlig verksamhet finns på platsen.

Verksamhet	Merkostnad per ha (MSEK)*
Förorenat område, Mycket hög risk (klass 1)	22
Förorenat område, Hög risk (klass 2)	14
Förorenat område, Måttlig risk (klass 3)	2,3
Förorenat område, Liten risk (klass 4)	0,5
Miljöfarlig verksamhet, A-anläggning	0,65
Miljöfarlig verksamhet, B-anläggning	0,4
Miljöfarlig verksamhet, C-anläggning	0,15
Seveso, Högre kravnivå**	Högsta konsekvensklass
Seveso, Lägre kravnivå**	0,65

* Saneringskostnader med avdrag för de kostnader som skulle ha uppstått om området inte varit förorenat

** Bör utredas vidare av verksamhetsägaren i samverkan med berörda myndigheter.

Näringsliv

Det finns flera stora och viktiga kommersiella verksamheter belägna i Göta älvdalen. Dessa är beroende av kommunikationer, VA-försörjning med mera för att upprätthålla verksamheten. Konsekvensen av ett skred kan därför vara stor även för verksamheter som inte ligger direkt inom det skreddrabbade området. I denna utredning har det inte funnits utrymme att analysera och kvantifiera alla dessa konsekvenser.

Inverkan på näringslivet har uppskattats genom att göra en grov värdering av den produktionsförlust som direkt skulle bli följden av ett skred. Varaktigheten för produktionsbortfallet har antagits i genomsnitt uppgå till en månad. För att uppskatta produktionsförluster från inkomstsidan (konsumentsidan) har medellönen för en anställd i Sverige använts. För att beräkna antalet löntagare som berörs har statistik från SCB använts. Detta material redovisar antalet löntagare för en administrativ enhet. Det framgår dock inte hur löntagarna är fördelade geografiskt över ett större område som tillhör den aktuella verksamheten. För stora anläggningar medför detta att mängden löntagare överskattas i den administrativa tyngdpunkten medan den underskattas i kringliggande punkter. Den metod som här använts innefattar inte kapitalinkomster, vilket kan innebära en underskattning av produktionsförlusterna.

Naturmiljö och kulturarv

Göta älvs dalgång med strandängar utgör riksintresse för natur- och friluftsliv och är ett ekologiskt mycket känsligt område. Strandområdena är några av de största och mest värdefulla våtmarkskomplexen i sötvattenmiljö i Västsverige och innehåller exempelvis viktiga grod- och kräldjurslokaler. Strandängarna uppvisar stor biologisk mångfald av både flora och fauna och utgör även viktiga häckningsplatser för fåglar. Älven är ett artrikt vattendrag och alla åmynningar utmed älven utgör viktiga reproduktionslokaler och vandringsstråk för bland annat lax och havsöring. Det sammanhängande naturområdet i Göta älvdalen ger också utrymme för friluftsliv med möjligheter till bland annat natur- och kulturstudier, fiske och båtsport.

För den biologiska mångfalden finns det två konkurrerande konsekvenser av skred. Befintliga artrika livsmiljöer kan vara beroende av kontinuitet och kan skadas av skred. Men

skred ger också förutsättningar för ny- och återetableringar av önskade arter. Det finns många arter som är beroende av erosionsytor.

Inverkan av skred på naturmiljön kan således vara såväl positiv som negativ. Det saknas metoder för att beskriva konsekvenserna av skred för alla naturvärden och det saknas underlag för att kvantitativt beskriva negativ och positiv inverkan av skred på naturmiljön, på kort respektive lång sikt.

Kulturlandskapet präglas av sina brukare och det förändras i takt med att samhället utvecklas genom att odlingsmark överges, gränser flyttas, orter växer, vägar byggs och hus rivs, etc. Det finns också ett antal objekt av riksintresse för kultur i Göta älvdalen. Skred som orsakar skador på kulturbyggnader får samma konsekvenser som för andra byggnader, men att bedöma det kulturella värdet är svårare. Det finns enstaka metoder för att beskriva enstaka värden för kulturarv, men det saknas metoder för en generell beskrivning av de förluster som kan uppstå till följd av ett skred.

Det finns metoder för att beskriva vissa naturvärden och vissa värden för kulturarv i monetära termer. Inverkan av ett skred på natur- och kulturmiljön är komplex och det saknas underlag för kvantitativa bedömningar även då en värderingsmetod finns.

I utredningen har det inte bedömts möjligt att inkludera monetära värden på natur- och kulturvärden vid värdering av konsekvenser tillsammans med andra sektorer som till exempel trafik, fastigheter och liv, även om det hade varit önskvärt.

10.4 Illustration av konsekvensklasser

I riskvärderingen används som ovan nämnts fem intervall som beskriver konsekvenser för skred (konsekvensklasser, K1–K5) och som uttrycks i ekonomiska intervall enligt Tabell 10-1. Då det inte funnits någon vedertagen metod har valts att utgå från den metod som tidigare använts för att beskriva konsekvensen av skred (Berggren et al., 1991, Alén et al., 2000, Hultén et al., 2006). I denna baserades klassindelningen på kvalitativa beskrivningar och semikvantitativa bedömningar, vilka har sammanställts i Tabell 10-8. I tabellen görs även en tolkning av de beskrivna konsekvenserna i monetära termer enligt den metodik för värdering som här tagits fram och som översiktligt beskrivits av Andersson-Sköld (2011a;b). Den kostnad som bedöms uppkomma till följd av ett skred, angivet i redovisningsrutorna om 100 x 100 m framgår också av tabellen. För vägar, järnvägar och andra större linjeformade objekt anges kostnaden per 100 m. Konsekvensen har därmed bedömts för skred som är 100 x 100 m eller större.

Varje skred medför en del kostnader för samhället i form av olika insatser från bland annat räddningstjänsten, kommunen och markägaren. Dessutom kan vissa skred medföra störningar på sjöfarten och kräver därför andra insatser såsom muddring och återställning i älven. Stora skred i områden med högsensitiv lera/kvicklera kan medföra andra konsekvenser såsom dämning av älven och översvämning av olika område. Dessa kostnader är direkt beroende av skredets läge och omfattning och kan därför inte beräknas utan en mer exakt kännedom om var skredet sker och hur stor jordvolym påverkas. Därför har dessa konsekvenser inte tagits med i bedömningen av primära konsekvenser, utan betraktas som sekundära effekter av skred vid riskkarteringen, se kapitel 11.

Tabell 10-8

Beskrivning av konsekvensklass samt exempel på tolkning till monetär värdering. För att värdera kostnaden för större skred adderas kostnaden för de enheter som drabbas samt en ytterligare bas-kostnad till följd av skredet.

Konsekvens-klass	Beskrivning efter Alén et al., 2000 (modifierad)	Exempel på monetär värdering (MSEK/ha)
K1 Lindriga konsekvenser	<p>Exempel på skador:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Obebyggt område: 100 m från strandlinjen, mark försvinner (ej förörenad). - Mindre lokalvägar. Avbrott i trafiken på lokalväg en kortare tid tills provisoriska förbifarter ordnats. <p>Jämförbart exempel: Skredet i Agnesberg (1993) och i Ballabo (1996).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Återställning av lokala vägar: 1 MSEK per 100 m väg • Muddring samt deponering av skredade ej förörenade massor utöver baskostnader: 5 MSEK <p>Sammanlagt ekonomiskt värde för konsekvenser: < 6 MSEK</p>
K2 Stora konsekvenser	<p>Exempel på skador:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mark försvinner, delvis förörenad. - Kraftproduktionen får minska tillfälligt i avvaktan på möjligheter att leda om vattnet för att undvika översvämning. - Obebyggt område: 100-250 m från strandlinjen, mark försvinner (måttligt förörenad jord). - Bostadshus: 1-2 st. Raserad bebyggelse. Ett par omkomna och några skadade personer. - Industrier: 1-2 st, raserad bebyggelse. Ett par omkomna och några skadade personer. - Betydande lokaltrafik efter E45. Avbrott i vägtrafiken under ett par månader, till provisoriska förbifarter ordnats. <p>Jämförbart exempel: Jämförbara exempel saknas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Återställning lokala VA-system (0,33), mindre VA-verk), muddring, deponering samt merkostnader för skred i måttligt förörenat område: 18 MSEK • Muddring, deponering av icke förörenade massor utöver baskostnader, återställande lokal väg, två bostadshus: 25 MSEK <p>Sammanlagt ekonomiskt värde för konsekvenser: 6 - 35 MSEK</p>
K3 Mycket stora konsekvenser	<p>Exempel på skador:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Allvarliga störningar i den kommunala vattenförsörjningen och förörenad mark har rasat ut i älven. - Kraftproduktionen måste begränsas för att undvika översvämning tills ny älvsåra öppnats. - 3-10 bostadshus, med raserad bebyggelse. Flera omkomna och skadade personer. - Raserad industribebyggelse och mindre än 5 bostadshus. Flera omkomna och skadade personer. - Raserad industribebyggelse och E45. Flera omkomna och skadade personer. - E45 dras med i skredet och förbindelserna bryts under flera månader i avvaktan på provisoriska passager genom skredområdet. - Större upplag, förörenad jord. <p>Jämförbart exempel: Liknar skredet i Göta med avseende på person- och byggnadsskador, men inte när det gäller volymen utgjorda massor. Jämförbart också med skredet i Vagnhärad, Trosa kommun, både avseende byggnadsskador och volym av massor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Avloppsreningsverk och vattenverk 1000-pe<8000 (Ett medelstort VA-verk samt ca 1 MSEK för VA-ledningar, muddring, deponit och merkostnader för förörenad mark och 10 hus: 89 MSEK • 2 mindre industrier eller medelstort företag drabbas (420 anställda), muddring, deponering, lokala vägar och 5 omkomna inom området: 133 MSEK <p>Sammanlagt ekonomiskt värde för konsekvenser: 95 - 150 MSEK</p>
K4 Extremt stora konsekvenser	<p>Exempel på skador:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Industrier med risk för allvarlig miljöpåverkan. Raserad bebyggelse. Många omkomna och skadade personer. Stör materiell fördöelse. - Industribebyggelse, mer än fem bostadshus samt E45 dras med i skredet, vilket leder till långvariga avbrott i trafiken. Många omkomna och skadade personer. <p>Jämförbara exempel: Tuveskredet när det gäller antalet omkomna, skadade och materiell förstörelse. Surte- och Götaskredet med avseende på mängden jordmassor och älvsårens igentäppning.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Långvarigt avbrott på viktig trafikpunkt samt industribebyggelse drabbas: 460 MSEK • Ålvarlig miljöpåverkan och Klass 1 förörenat område stora byggnader 10-tal omkomna: ~ 370 MSEK <p>Sammanlagt ekonomiskt värde för konsekvenser: 150 - 650 MSEK</p>
K5 Katastrofala konsekvenser	<p>Exempel på skador:</p> <p>Seveso-anläggningar av högre kravnivå, vattenkraftverk, många omkomna och svårt skadade.</p>	<p>Sammanlagt ekonomiskt värde för konsekvenser: > 650 MSEK</p>

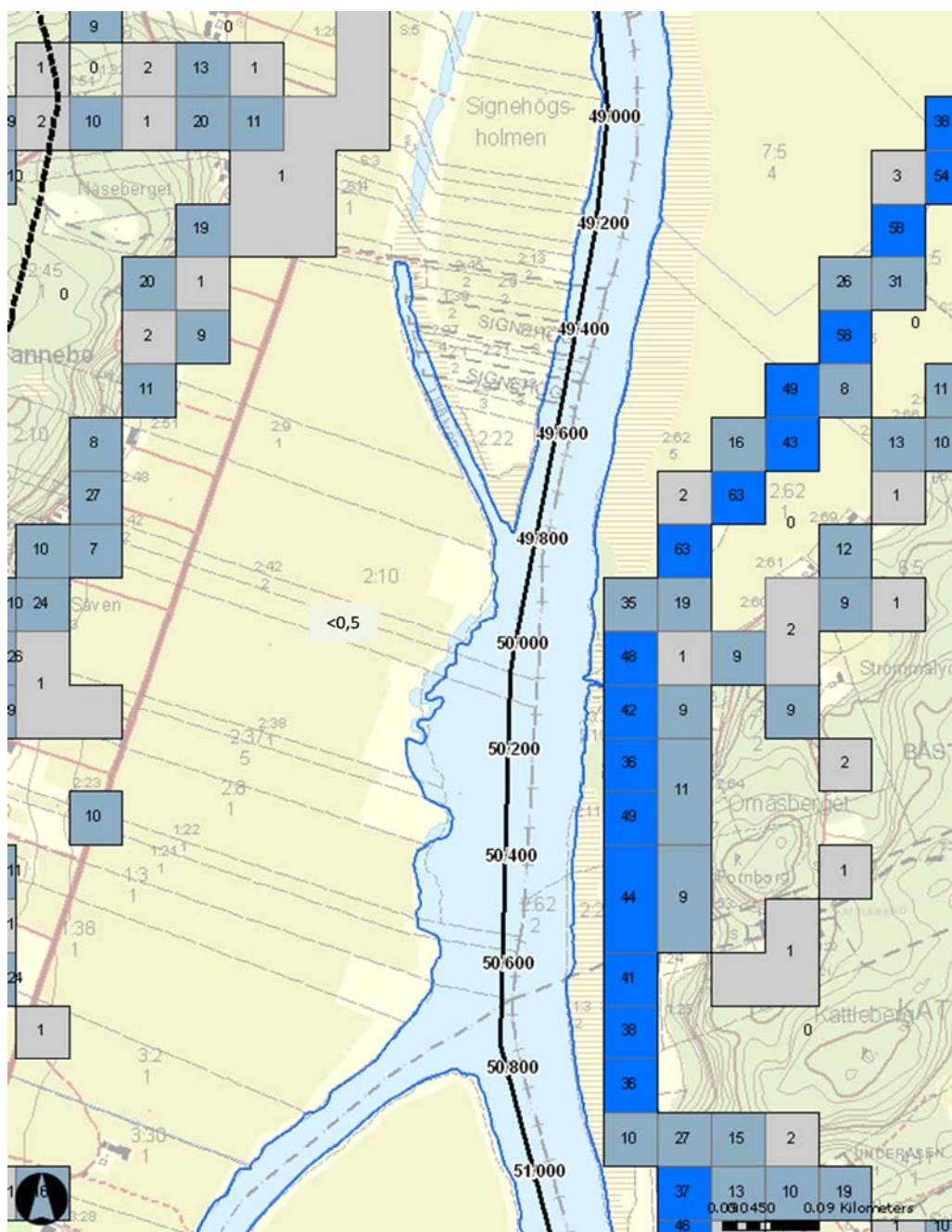
10.5 Kartering av konsekvenser i Göta älvdalen

Metodiken för bedömning av konsekvenser presenteras i detalj i tidigare avsnitt i detta kapitel. De inventerade konsekvenserna utgör de samhällsekonomiska effekterna av skador, förluster och följdverkningar orsakade av ett skred i aktuellt område. Dessa konsekvenser har sammanställts som ett sammanlagt värde i ett rutnät med beräkningsrutor med måttet 100 x100 m. Sammanställning gäller för hela utredningsområdet och motsvarar den primära effekten av ett skred, det vill säga kostnader av förlorade liv, tillgångar och funktioner på land om den aktuella beräkningsrutan drabbas i sin helhet, Figur 10-3.

Konsekvenser av ett skred innefattar ett stort spektrum av konsekvenser. Det finns dock några konsekvenser som inte kunnat värderas i monetära termer i denna utredning av vilka två exempel ges nedan.

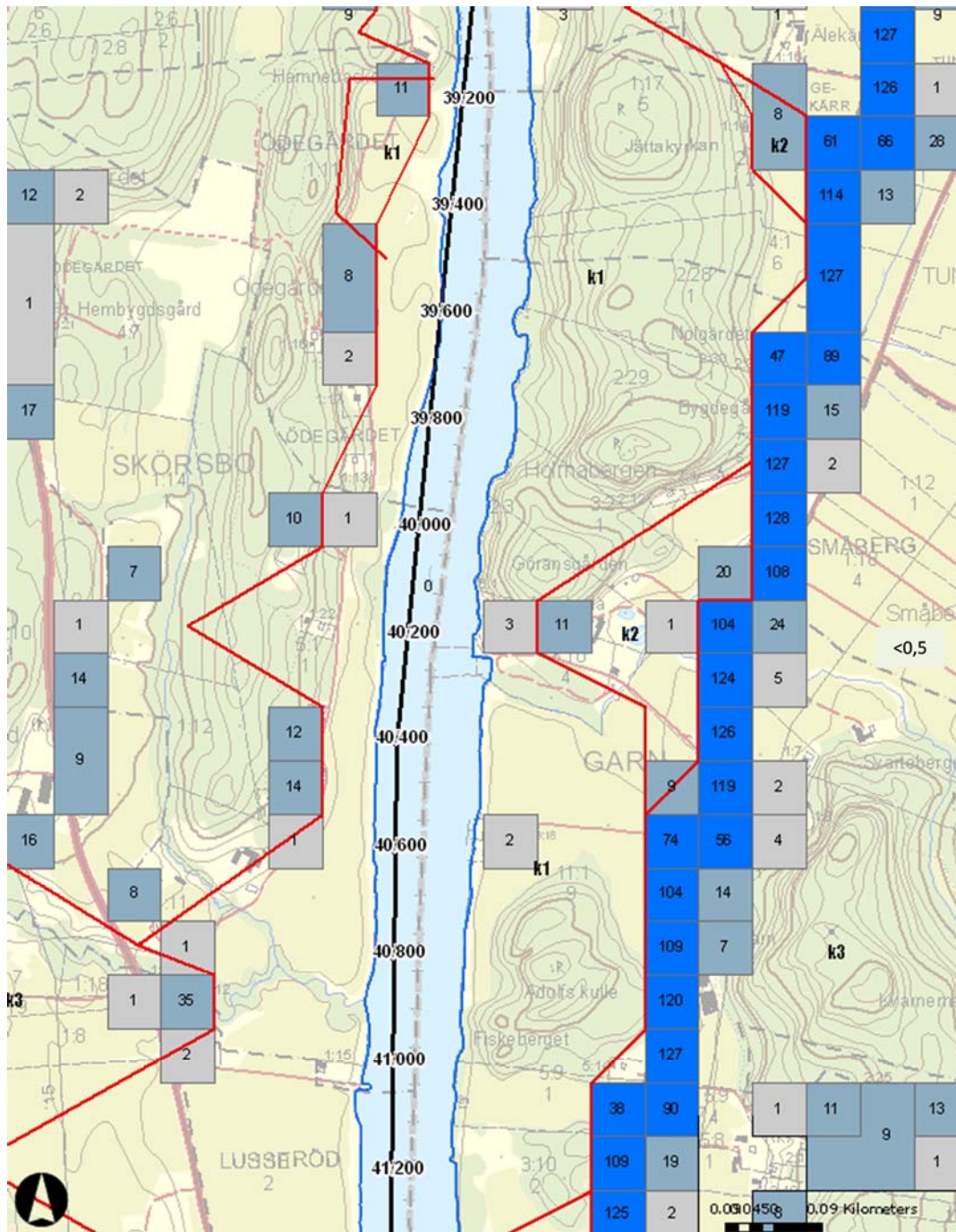
Ett skred innebär stora konsekvenser för människor och orsakar lidande, sorg eller obehag. I denna utredning har det dock inte funnits utrymme för att beakta denna typ av konsekvenser.

Utöver skadorna och kostnader på land kan även älven påverkas om ett skred inträffar. Dämning som kan uppstå i älven och dess konsekvenser har inte beaktats som en primär konsekvens. Ett skred kan även medföra en avsevärd flodvåg, också på stort avstånd från själva skredet. Kostnaderna för skador och andra konsekvenser till följd av en sådan flodvåg har dock inte beräknats inom utredningen. I de fall en flodvåg, till exempel till följd av ett mycket stort skred i kvicklera, skulle uppkomma, kan konsekvenserna bli så stora att de kan komma att tillhöra den mest allvarliga konsekvensklassen. Områden där sekundära konsekvenser kan inträffa redovisas på skredriskkartorna utifrån den metodik som beskrivs i avsnitt 11.5.



Figur 10-3
Exempel på in-
venterade rutnät
med värden i
MSEK/hektar.
Bakgrundskarta
© SGI, Lantmäte-
riet.

Den totala konsekvensen av ett skred är beroende av skredets storlek, vilken varierar från fall till fall och kan innefatta flera beräkningsrutor. För att kunna klassa områden i de konsekvensklasser som beskrivs ovan måste det sammanlagda värdet av det drabbade området beräknas. En summering av värdena i de rutorna som berörs av skred med olika avstånd från älven har därför gjorts och en ny karta har tagits fram. Detta innebär att för ett skred som förväntas starta inom ett visst område och på ett visst avstånd från älven är konsekvensvärdet summan av samtliga rutor som drabbas av skredet fram till älven. Bedömda konsekvensklasser (K1-K5) redovisas med röda begränsningslinjer mellan olika klasser, Figur 10-4.



Figur 10-4
Exempel på summerade konsekvenser av skred. Angivna siffror avser värden i MSEK/hektar. Bakgrundskarta © SGI, Lantmäteriet.

En översyn och justering av konsekvensklasserna har utförts för att ta hänsyn till två brister i metodiken. Den första justeringen gäller det faktum att vissa stora värden, till exempel höga fastighetsvärden hos en ytmässigt stor fastighet eller många anställda registrerade vid en adress (företagets huvudkontor), inte är representativa för värdet inom området då värdet endast registreras i en ruta. Den andra justeringen beror på att konsekvenserna, och därmed de framtagna konsekvensklasserna, är sammanställda i ett rutnät med nord-sydlig riktning och därför behöver justeras för älvens och anläggningarnas verkliga riktning i olika delar. Detta gäller främst områden där älven eller långsträckta anläggningar, såsom väg och järnväg, går i en kraftig vinkel mot konsekvensernas rutnät.

I Figur 10-5 presenteras tre exempel som visar hur ovanstående beskrivna process har tillämpats från inventerade värden i rutnät till justerade konsekvensklasser.

Fakta i korthet

- En metod har utvecklats för att bedöma de samhällsekonomiska konsekvenserna av skred. Metoden omfattar att identifiera vad eller vilka objekt som kan drabbas inom ett visst avgränsat område, att bedöma i vilken omfattning skredet påverkar objekten samt en monetär bedömning av konsekvenserna.
- Konsekvenser som beaktats i utredningen är bebyggelse, människoliv, väg och järnväg, energi- och ledningssystem, VA-system, miljöfarliga verksamheter och förorenade områden samt näringsliv. Områden med sekundära konsekvenser har inte värderats i monetära termer men redovisas på skredriskkartor.
- Summering av värdet av samtliga objekt som kan beröras av ett skred redovisas på kartor.
- Konsekvenser för skred anges i fem konsekvensklasser och uttrycks i ekonomiska intervall.

11 Analys av skredrisker

I detta kapitel beskrivs skredrisker som en kombination av sannolikhet för skred och konsekvenserna av ett skred. Skredriskerna beskrivs för olika delsträckor längs älven i dagens klimat och hur riskerna förändras i ett framtida klimat. Inledningsvis redovisas en sammanfattning av tidigare skredriskkarteringar och stabilitetsutredningar.

11.1 Inledning

En kombination av sannolikhet för skred tillsammans med förväntade konsekvenser används som ett mått för skredrisknivån på liknande sätt som vid tidigare riskkartering i Göta älv. Metodiken beskrivs närmare i avsnitt 11.3.

Skredrisknivån i ett område styrs både av de lokala stabilitetsförhållandena och av hur området används och exploaterats:

- Geoteknik, geologi, topografi, belastning → **sannolikhet** för skred.
- Påverkan på befintliga fastigheter och anläggningar, markanvändning → **konsekvenser**.

I utredningen har risker för skred i områdena mot älven karterats. Skred kan även ske på längre avstånd från älven, till exempel i branta slänter i gränsen mellan lös jord och fastmark. Någon fullständig studie av dessa slänter ingår inte i utredningen utom i de områden där slänter förväntas påverka stabiliteten mot Göta älv.

11.2 Tidigare skredriskkarteringar och stabilitetsutredningar

Efter Surteskredet, som inträffade den 29 september 1950, initierade Länsstyrelsen i Älvsborgs län en första geoteknisk stabilitetsundersökning inom skredområdet och i dess närhet. Denna utökades senare till att i princip omfatta hela Göta älvdalen och presenterades av Göta älvkommittén 1962. Från mitten av 1990-talet har skredriskanalyser utförts för södra Göta älvdalen, nordöstra Göta älvdalen inom Lilla Edets kommun samt sydvästra älvdalen inom Göteborgs kommun. Dessutom har en översiktlig stabilitetsutredning genomförts för nordvästra Göta älvdalen. Lokalt har geotekniska utredningar utförts i samband med planläggning, byggnation, infrastrukturutbyggnad med mera. SGI har sedan 1960-talet ansvar för att övervaka stabiliteten utmed Göta älv, från Trollhättan till kommungränsen mot Göteborg. Inom detta uppdrag granskar SGI framtagna utredningar som remitteras till institutet för synpunkter.

Resultat från större utredningar och utförda åtgärder sammanfattas i detta avsnitt.

Rasriskerna i Göta älvdalen (SOU 1962:48)

När utredningen efter skredet i Surte i stort sett var färdigställd inträffade ett storskred i Göta den 7 juni 1957. En statlig utredning tillsattes för att utföra en övergripande stabilitetsutredning för Göta älvdalen. I slutbetänkandet från utredningen (Götaälvskommittén, 1962) rekommenderades bland annat följande skredförebyggande åtgärder:

- Erosionsskydd i anslutning till strandlinjen för att hindra den omfattande stranderosion som konstaterades i utredningen. Erosionsskydd har därefter lagts ut på en sträcka av drygt 80 km.

- På platser med störst skredrisker rekommenderade utredningen begränsade avschaktningar, vilka bland annat genomförts för bostadsområdena kring slussarna i Lilla Edet samt vid industriområdet norr om pappersbruket i Lilla Edet.
- För villaområdet vid Fuxerna kyrka i Lilla Edet valdes djupdränering genom pumpning i brunnar, nedförda till friktionslagret under leran. Pumpning har pågått sedan början av 1960-talet.
- I ravinen norr om pappersbruket i Lilla Edet utfördes 1959-1960 kulvertering av vattendrag, begränsad stödfyllning och dränering av det sandlager som finns inlagrat i leran. Pumpningen och dräneringsåtgärderna har sänkt grundvattennivåer och porvattentryck.

Skredriskanalys för södra Göta älvdalen

I början av 1990-talet konstaterades att kunskapen om stabiliteten i Göta älvdalen var otillräcklig som underlag för beslut om infrastrukturbyggnad i älvdalen och behov av kompletterande undersökningar med moderna metoder och stabilitetsberäkningar förelåg. En ny utredning utfördes som en skredriskanalys och den första etappen omfattade den del, som var aktuell för planering av ny dubbelspårig järnväg och fyrfältsväg E45. Analysen omfattade en sträcka av cirka 25 km längs den östra stranden från norr om Älvängen i Ale kommun till och med Lärje i Göteborgs kommun. Resultatet från utredningen presenterades av Holmén & Ahlberg (1995) och visade bland annat följande:

Topografin på bottnar och slänter under älven respektive på land har en avgörande betydelse för stabiliteten. Längs sträckor som saknar undervattenshylla är generellt sannolikheten för skred hög.

Utbyggnad av väg och järnväg är möjlig men kräver noggranna geotekniska utredningar, särskilt inom de delar som ligger inom 100 m från strandlinjen.

Ett antal områden redovisades med klart hög skredrisk. Särskilt utpekade var Eka Chemicals industriområde i Bohus samt Älvängens industriområde. För Ekas område genomfördes kompletterande utredningar och stabilitetsförbättrande åtgärder, som var färdigställda 1996. För Älvängens industriområde har kompletterande stabilitetsutredningar genomförts, som bekräftar de första bedömningarna. Stabilitetshöjande åtgärder har ännu inte genomförts. Kommunen har ansökt om medel för förebyggande åtgärder mot naturolyckor hos Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

Inom vissa andra områden noterades det att skredriskerna borde utredas vidare, bland annat före detta Bohus varv, Surte industriområde samt vissa slänter upp mot fastmarksområdena (till exempel industriområdet vid Stora Viken). Flera av de utpekade områdena har utretts och åtgärdats.

Osäkerheter i utredningen var främst otillräcklig kunskap om bottenpografin i älven samt utbredning av områden med kvicklera. I områden med kvicklera förutsattes att ett eventuellt initialskred alltid skulle ge upphov till sekundärskred som omfattade hela området med kvicklera.

Skredriskanalys för nordöstra Göta älvdalen inom Lilla Edets kommun

Skredriskanalys för nordöstra Göta älvdalen i Lilla Edets kommun genomfördes med samma metodik som den för södra Göta älv och omfattade den östra älvsträckan vid Lödöse och delen från Göta till norr om Lilla Edets tätort. Resultatet från utredningen redovisades av Hagberg & Schälin (2004).

Speciellt utpekades två områden med hög sannolikhet för skred, nämligen villaområdet vid Fuxerna kyrka samt industriområdet norr om pappersbruket i Lilla Edet. För villaområdet

genomfördes stabilitetsförbättrande åtgärder 1997 medan industriområdet norr om pappersbruket fortfarande inte har förstärkts.

Skredriskanalysen utpekade också relativt stora områden där skredrisken borde utredas vidare, speciellt inom de tätbebyggda delarna i Lilla Edets tätort. Att dessa områden markerats beror främst på de stora konsekvenser som ett omfattande kvicklereskred skulle medföra. Med det underlag som fanns i utredningen bedömdes större delen av Lilla Edets tätort underlagras av kvicklera. Detta innebär att stabiliteten i anslutning till älven är avgörande. Lilla Edet har sett över stabiliteten inom tätorten och föreslagit vissa stabilitetsåtgärder, som ännu inte är genomförda.

Skredriskanalys för sydvästra Göta älv dalen inom Göteborgs kommun

Skredriskanalys för sydvästra Göta älv dalen omfattade den västra älvstranden mellan Tingstadstunneln och Angeredsbron på Hisingen i Göteborgs kommun, en sträcka av cirka 8 km. Utredningen redovisas av Hultén et al. (2006). I utredningen anges partier med hög sannolikhet för skred eller där skredrisken borde utredas vidare, speciellt i anslutning till befintliga kajkonstruktioner samt där undervattensslänt i älven saknas. I en sidoravin utpekades även ett område i nära anslutning till bostäder. Kompletterande utredningar och åtgärder har utförts inom delar av de utpekade områdena.

Översiktlig stabilitetsutredning för nordvästra Göta älv dalen

Det fjärde området som bedömdes som angeläget att utreda omfattar nordvästra delen av Göta älv med huvuddelen inom Lilla Edets kommun, en älvsträcka av cirka 26 km. Resultaten finns presenterade av Johansson (2010). Sammanställningar och stabilitetsberäkningar visade på i huvudsak låga beräknade säkerheter mot skred. Vissa särskilt angelägna områden har identifierats under utredningsarbetets gång och för dessa områden har Lilla Edets kommun påbörjat kompletterande stabilitetsutredningar.

11.3 Metodik för riskkartering

I kapitel 9 *Sannolikhet för skred* respektive kapitel 10 *Konsekvensbedömning* beskrivs hur sannolikheten för skred respektive konsekvenserna av ett skred har karterats inom Göta älv dalen. Utredningsområdet har klassats enligt angivna kriterier. Klassningen resulterar i att varje enskilt område inom utredningsgränserna har tilldelats en sannolikhetsklass (S-klass) från 1 till 5 samt en konsekvensklass (K-klass) från 1 till 5.

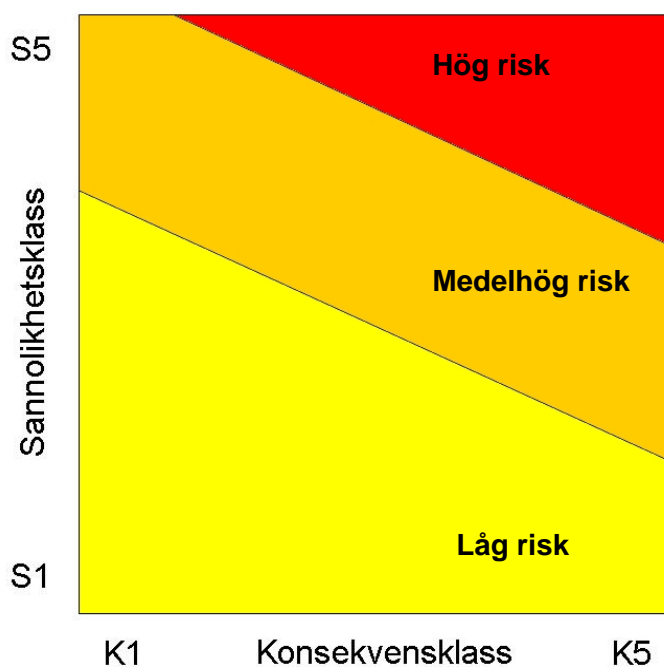
Varje enskilt område kan därför beskrivas med ett talpar ”S/K” som representerar kombinationen *Sannolikhet/Konsekvens*. Visualisering av denna kombination av sannolikheter och konsekvenser kan presenteras i en matris för olika kombinationer, se Figur 11-1. Skredrisken i varje område kan utifrån matrisen beskrivas som kombinationen av sannolikhet för skred (från försumbar till påtaglig) och konsekvenserna av ett skred (från lindriga till katastrofala). Detta innebär att varje talpar utgör en riskklass med specifika förutsättningar för skred (sannolikhet och konsekvenser).

Figur 11-1
Matris för skred-
riskklassning –
kombination av
sannolikhet för
skred och dess
konsekvenser.
Exemplet visar
talparen S2/K2
och S5/K5.

Sannolikhet	S5 - Påtaglig					Påtaglig sannolikhet för skred med katastrofala konsekvenser
	S4 - Tydlig					
	S3 - Viss					
	S2 - Låg		Låg sannolikhet för skred med stora konsekvenser			
	S1 - Försumbar					
			K1 - Lindriga	K2 - Stora	K3 - Mycket stora	K4 - Extremt stora
		Konsekvens				

11.4 Skredrisknivåer

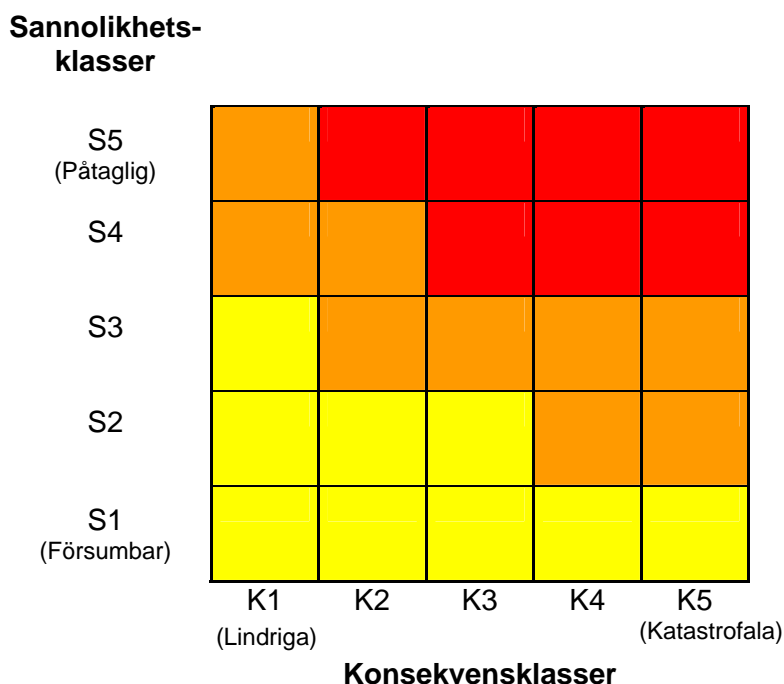
Matrisen i Figur 11-1 visar att sannolikheter och konsekvenser kan förekomma i totalt 25 kombinationer av skredriskklasser (5x5). För att kunna klassa de olika delområdena på ett överskådligt sätt och framförallt beskriva dem i ett överskådligt kartmaterial, måste antalet grupper (risknivåer) begränsas. Liksom i tidigare liknande skredriskutredningar har riskmatrisen därför delas upp i tre olika ytor motsvarande låg skredrisk, medelhög skredrisk och hög skredrisk, se Figur 11-2.



Figur 11-2
Översiktlig princip
för framtagande
av risknivåer.

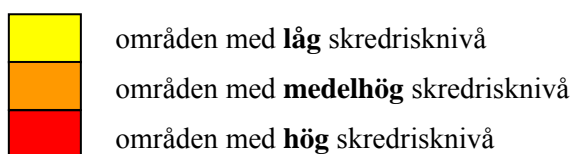
Eftersom klassningen av såväl sannolikhet som konsekvens är utförd i fem olika klasser måste gränserna för risknivåer anpassas till avgränsningarna presenterade i Figur 11-2. Anpassningen resulterar i en ny riskmatris där gränserna för risknivåerna sammanfaller med gränserna från sannolikhets- och konsekvensklasserna, enligt Figur 11-3.

Detta innebär att varje del av den i Figur 11-1 redovisade matrisen, som karakteriseras av ett talpar (S/K) av sannolikhetsklass och konsekvensklass, nu även får en färg som motsvarar en risknivå baserat på riskmatrisen i Figur 11-3.



Figur 11-3
Matris med skredrisknivåer baserad på sannolikhet för skred och dess konsekvenser.

Baserat på matrisen i Figur 11-3 har skredriskkartor tagits fram för hela utredningsområdet. På kartorna anges skredrisknivåer för olika områden enligt följande:



Kartorna visar kombinationer av sannolikheten för ett skred och de primära konsekvenserna av ett sådant skred, det vill säga förluster av människoliv och skador på befintliga fastigheter och anläggningar på land.

11.5 Risk för bakåtgripande skred och sekundära effekter

Inom områden med högsensitiv lera/kvicklera kan bakåtgripande skred inträffa, där stora ytor kan drabbas av fortskridande skred. En sådan händelse innebär att sekundära konsekvenser utöver förluster och skador på land kan uppstå. Exempel på sekundära effekter som kan inträffa är störning av sjöfarten, dämning av Göta älv (eller dess biflöden) och flodvågor av olika magnitud beroende på skredmassornas volym. Dessa sekundära konsekvenser kan, om det berörda området är tillräckligt stort, överskrida de primära conse-

kvenserna i området. De sekundära konsekvenserna går inte att förutse eller kostnadsberäkna med säkerhet, men eftersom de utgör en betydande effekt av skred i områden med högsensitiv jord har de behandlats inom utredningen.

För att ta hänsyn till eventuella sekundära effekter av skred i Göta älvdalen har områden med högsensitiv lera/kvicklera och hög sannolikhet för skred (sannolikhetsklass S4 eller S5) närmast älven markerats med ett streckat mönster på riskkartorna. Detta indikerar att möjligheten för att ett större skred inträffar är påtaglig i detta område, vilket också medför en större risk (större konsekvenser). Metodiken för bedömning av skredutbredning presenteras i kapitel 9 *Sannolikhet för skred* samt i Åhnberg et al.(2011)

11.6 Framtagande av skredrisker i ett förändrat klimat

Vid värdering av klimatpåverkan på skredriskerna har hänsyn tagits enbart till förändringar av slänters stabilitet och ökad sannolikhet för skred (se kapitel 9), medan konsekvenserna av framtida skred har åsatts samma värden som idag. Det har inte varit möjligt att i denna utredning förutsäga hur konsekvenserna kommer att förändras fram till 2100. Detta beror på att den tidsperiod som utredningen omfattar, cirka 100 år framåt i tiden, är längre än den planeringshorisont som normalt används i samhällsplaneringen. Dessutom ger resultatet från denna Göta älvtredningen möjlighet att påverka lokalisering och utförande av ny bebyggelse och verksamhet så att skredrisker kan förebyggas.

11.7 Risker i dagens klimat och i ett förändrat klimat

I detta avsnitt ges en sammanfattande beskrivning av de skredrisker som kartlagts inom utredningen. Beskrivningen är uppdelad i olika delområden, där områdenas indelning avgränsas av den längdmätning som använts inom utredningen. För varje område beskrivs sannolikhet för skred, konsekvenser av detta samt risknivåer.

Resultatet från kartläggningen redovisas på skredriskkartor i GÄU Slutrapport Del 3 (SGL, 2012a). Kartorna visar vilken skredrisknivå (låg, medelhög, hög enligt Figur 11-3) som gäller för olika delar av utredningsområdet för dagens klimat. Kartorna visar även påverkan av ett förändrat klimat inom utredningsområdet samt vilka områden bakåtgränsande skred och sekundära effekter i älven bedöms kunna uppstå.

Sträckan mellan Vargön och Åkerström (km 0/000 – 14/000)

Området präglas av relativt stora bergpartier längs älven. Inom lerområden är den beräknade sannolikheten för skred generellt försumbar (klass S1), bortsett från några områden där skredsannolikheten är högre. Högsensitiv lera förekommer i området. Norr om Trollhättans sluss har inte denna bedömts innebära någon större påverkan på skredrisken eftersom kvickleran i dessa områden inte påverkar skredutbredningen. Lera med hög sensitivitet förekommer normalt oftast upp mot fastmarken och endast lokalt i anslutning till älven.

Konsekvenserna varierar i området, vilket resulterar i en viss variation av risknivån. De största konsekvenserna av ett skred förekommer främst inom Trollhättans tätort. Även skador orsakade av ett skred vid SAAB-fabriken eller vid slussarna i Trollhättan räknas som mycket stora.

I nordöstra delen av den aktuella sträckan, cirka km 2/500-7/000 finns en skyddsvall mot översvämning vid höga vattennivåer i älven. Området som skyddas omfattar till stor del åkermark med relativt lågt värde men även viktiga funktioner såsom Trollhättans flygplats, SAAB-fabriken och en del bebyggelse. Enligt uppgift från Vattenfall (2011) är skyddsvallen klassad som en högkonsekvensdamm (konsekvensklass 1A) enligt riktlinjer från kraft-

verksbranschen RIDAS. Detta innebär att hela sträckan längs älven samt området bakom vallen har klassats till den högsta konsekvensklassen (K5).

Norr om SAAB-fabriken, km cirka 3/700, förekommer ett begränsat område längs östra stranden med tydlig sannolikhet för skred (klass S4) på grund av en brant slänt vid strandlinjen. Området får därmed en högre risknivå än omgivningen.

Ett område på västra sidan av älven, km 13/200 till km 13/800, har en påtaglig sannolikhet för skred (klass S5), vilket medför en medelhög risknivå med hänsyn till konsekvenser på land. Eftersom kvicklera påträffats har området en förhöjd risk för påverkan i älven med hänsyn till sekundära effekter av ett skred.

Området kring de gamla slussarna i Trollhättan, cirka km 13/100, har klassats med medelhög risknivå på grund av tydlig sannolikhet för skred (klass S4).

Klimatpåverkan

Klimatpåverkan inom den aktuella sträckan förväntas vara liten. Detta innebär att beräknad sannolikhet efter klimatpåverkan ligger inom samma klass som för dagens klimat. Eftersom området nära strandlinjen i anslutning till den ovan nämnda skyddsvallen är klassat i konsekvensklass 5, innebär en begränsad ökning av sannolikheten en förändring till medelhög risknivå. I södra delen av sträckan, där risk för sekundära skred förekommer på västra sidan, kan erosion vara en utlösande faktor för skred.

Sträckan från Åkerström till Lilla Edet (km 14/000 – 34/000)

Beräknad sannolikhet varierar från tydlig till påtaglig (sannolikhetsklass S4 och S5) på ömse sidor av älven utmed stora delar av sträckan. Området präglas av höga branta slänter samt djupa branta raviner. I området syns tydliga spår efter inträffade skred. Högsensitiva lera och kvicklera förekommer i princip utmed hela sträckan, vilket innebär att stora skred kan inträffa med betydande omgivningspåverkan, både med hänsyn till omfattning av bakåtgripande skred inom landområde och sekundära effekter i älven.

Konsekvenserna varierar längs sträckan men den höga sannolikheten för skred medför nästan uteslutande medelhög till hög skredrisknivå. De största konsekvenserna av ett skred som berör skadeobjekt på land finns inom Lilla Edets tätort, cirka km 30/500-33/500.

I nordvästra delen av delsträckan vid Åkerström, cirka km 15/000, förekommer områden med hög skredrisk. Hela området uppvisar generellt en påtaglig sannolikhet för skred (klass S5) och förekomsten av bebyggelse medför en hög skredrisknivå. Längre söderut, vid km cirka 16/000, påträffas det första området inom delsträckan med kvicklera där det föreligger risk för påverkan på älven. Förekomst av högsensitiv lera och kvicklera har dokumenterats längs i stort sett hela den västra sidan av delsträckan. Stora delar av området har risk för omgivningspåverkan med hänsyn till bakåtgripande skred och sekundära effekter i älven. Detta beror på en kombination av hög sannolikhet för skred (klass S4 eller S5) och förekomst av högsensitiv lera och kvicklera. Mindre områden har dock klassats med lägre skredrisk på grund av lokalt beräknad försumbar sannolikhet för skred alternativt lindriga konsekvenser närmast älven.

På östra sidan av älven förekommer berg längs strandlinjen på en cirka 3 km lång sträcka. Därefter, till cirka km 21/000 (cirka 2 km norr om Slumpån), finns en smal remsa längs älven av lera som begränsas av bakomliggande bergspartier. I området kring Slumpån (cirka km 23/000) förekommer kvicklera i stor omfattning vilket innebär att området har förutsättningar för att ett skred kan orsaka en betydande omgivningspåverkan vid ett sekundärt skred. Inom området finns E45. Mellan Slumpån och Lilla Edet finns smala strandområden, cirka 100-200 m, med mycket varierande skredsannolikhet och konsekvens. Detta resulterar i att alla tre risknivåerna förekommer i området. Även kvicklera har

påträffats men området har inte bedömts som potentiell risk för stor omgivningspåverkan med hänsyn till den mindre jordvolym som eventuellt berörs av ett sekundärt skred.

Inom Lilla Edets tätort har bedömning av skredrisknivån varit svår att utföra på grund av de varierande förhållanden som råder längs strandlinjen med slussar, sponter, kraftverk, stödfyllningar, tidigare avschaktade områden, förekomst av högsensitiv lera, område med grundvattensänkning med mera. Utförd analys baseras, utöver den nu aktuella utredningen, på tidigare skredriskanalyser, samt i viss utsträckning av pågående detaljutredningar. Redovisade resultat har därför en viss osäkerhet. Generellt gäller inom Lilla Edets tätort att en tydlig till påtaglig skredsannolikhet (klass S4 och S5) beräknats lokalt närmast älven inom flera områden. Utbredningen av skredriskområdena ökar med hänsyn till bedömd förekomst av kvicklera.

Två områden i nordöstra delen av tätorten, km 30/500 och 31/000, klassas med hög skredrisknivå på grund av lokalt beräknad tydlig (klass S4) sannolikhet för skred, förekomst av kvicklera och befintlig bebyggelse. Ett annat stort område som berör befintlig bebyggelse som har hög skredrisknivå ligger på västra sidan av älven, söder om slussarna, cirka km 32/000. Området har tydlig till påtaglig (klass S4 till S5) sannolikhet för skred vid strandlinjen och extremt stora konsekvenser. Området har även streckats med hänsyn till sekundära effekter och älvpåverkan. Områdets omfattning är osäker eftersom förekomst av kvicklera inte är känd överallt. Sydost om tätorten, km 33/500, finns ett industriområde nära älven (Gamla pappersbruket) som har en hög skredrisknivå på grund av den påtagliga sannolikheten för skred (klass S5) och stor skredutbredning, då kvicklera förekommer.

Delsträckan har flera områden med hög skredrisknivå. De branta slänterna och den relativt smala älvfåran kan medföra problem med att utföra eventuella stabilitetsåtgärder. Ytterligare faktorer som påverkar utförandet av åtgärder och omfattningen kan vara miljöhänsyn, påverkan på sjöfart med mera.

Klimatpåverkan

Klimatpåverkan inom den aktuella sträckan förväntas variera från liten i norra delen av sträckan till måttlig i södra delen. Norra delen av området är glest befolkat och domineras av jordbruksmark närmast älven. Detta medför lindriga konsekvenser på land. Området visar dock en tydlig till påtaglig sannolikhet för skred (klass S4 och S5) längs med stora delar av strandlinjen för dagens situation. Små förändringar av geometrin orsakade av erosion kan medföra att skred utlöses. Eftersom dessa områden kan omfattas av sekundära skred med påverkan i älven, innebär sådana små förändringar en förhöjd skredrisk. Trots denna förändring kommer normalt inte risknivån i dessa områden att höjas på grund av oförändrad konsekvensklass.

I den mellersta delen av sträckan, km 25/700 till km 30/000 (östra sidan) respektive km 25/700 till km 31/000 (västra sidan), beräknas klimatpåverkan vara måttlig. Områdets västra sida klassas inom stora delar med påtaglig sannolikhet (klass S5) för dagens situation. Förekomst av kvicklera medför risk för älvpåverkan i händelse av skred i området. Klimatpåverkan som förväntas längs sträckan kommer att medföra en ännu större sannolikhet för skred, dock utan att ändra risknivån eftersom konsekvensklassen förblir oförändrad. Områdets östra del präglas av samma höga sannolikhet som den västra, dock utan samma älvpåverkan vid ett sekundärskred. Även här medför klimatpåverkan en större risk för skred.

Södra delen av sträckan, det vill säga inom Lilla Edets tätort, beräknas få en måttlig klimatpåverkan som försämrar stabilitetsförhållandena. Detta innebär att den redan höga sannolikheten för skred (klass S4 och S5) i många bebyggda områden kommer att öka. Området kan bedömas vara det mest utsatta området med en kombination av påtaglig sannolikhet för skred, mycket stora till katastrofala konsekvenser, områden med kvicklera som innebär risk sekundärskred vid en måttlig klimatpåverkan.

Sträckan från Lilla Edet till Alvhem (km 34/000 – 47/000)

Den norra delen av sträckan fram till cirka km 41/000 visar mestadels tydlig till påtaglig sannolikhet för skred (klass 4 och 5). Inom denna del av sträckan finns ett område, km 37/600 till 38/400, med högsensitiv lera. Detta i kombination med hög sannolikhetsklass medför att området är ett potentiellt riskområde med hänsyn till sekundära effekter och älvpåverkan.

Södra hälften av sträckan har betydligt bättre stabilitetsförhållanden med enbart sannolikhetsklass S1 längs strandlinjen förutom vid Torskogs Bruk, km 44/400. Vid ett biflöde (Gårdaån) till älven, km 44/600 i Lödöse, finns viss sannolikhet för skred (klass S3) i ravinerna mot ån som med de stora konsekvenserna innebär medelhög skredrisknivå.

Konsekvenserna längs den aktuella sträckan är lindriga till stora längs älvens strandlinje, förutom vid bebyggelse i Göta, väg och järnväg norr om samt för bebyggelsen i Lödöse.

Risknivån i norra delen av sträckan styrs i första hand av variationer i sannolikhetsklass och varierar mellan låg och medelhög. Ett mindre område inom Göta (östra sidan), km 36/500, har den högsta risknivån. Från cirka km 36/500 till cirka km 40/700 är skredrisknivån utmed älvens västra sida medelhög på grund av hög sannolikhetsklass (S5) och låg konsekvens (K1). Inom denna delsträcka har dock ett antal mindre områden den högsta risknivån på grund av bebyggelse. I övrigt har resterande del av sträckan låg skredrisknivå.

Klimatpåverkan

Klimatpåverkan inom den aktuella sträckan förväntas vara liten, utom för en kort sträcka (cirka 1,5 km) längst i söder där den ökar till måttlig. I den norra delen av sträckan ner till cirka km 40/600 är sannolikheten för skred i dagens situation mycket varierande. Inom delsträckor med tydlig och påtaglig sannolikhet (klass S4 och S5) kan små förändringar av geometrin orsakad av erosion medföra att skred utlöses. Området kring Göta, på östra sidan vid km cirka 35/500 till 37/000, kan få en klimatpåverkan som höjer sannolikhetsklassen och därmed risknivån. Detta gäller främst vid Glässnäs där området söder om bergpartiet (km 37/000) kan förändras till en hög risknivå.

På sträckan mellan km 40/600 och 45/400 är sannolikheten för skred längs strandlinjen på ömse sidor försumbar (klass S1). Konsekvenserna är lindriga (klass K1), vilket innebär att delsträckans risknivå inte kommer att förändras på grund av klimatpåverkan. Områden på större avstånd från älven och med högre konsekvensklass (K4-K5) kan eventuellt få en högre risknivå.

Södra delen, mellan 45/400 och 47/000, har låg risknivå (klass S1/K1) som inte kommer att påverkas även om klimatpåverkan skulle orsaka en ökning av sannolikhetsklassen till S2.

Sträckan mellan Alvhem och Bohus (km 47/000 – 66/000)

Från norra gränsen av sträckan fram till ön Tjurholmen, km 50/800, varierar sannolikhetsklassen mellan S1 till S5 på båda sidor av älven. De högre klasserna återfinns på smala partier nära strandlinjen. Området förbi Tjurholmen och Älvängen till km cirka 55/400 klassas mestadels med sannolikhetsklasser S2 till S4, med undantag för Älvängens industriområde (km 52/400 till 53/200), där sannolikheten för skred är påtaglig (klass S5). Söder om Tjurholmen och Älvängen är sannolikheten för skred lägre (klass S1) förutom vid Grönån och Nödinges småbåtshamn (km 58/300) på östra sidan av älven samt vid Dössebacka på den västra sidan.

Konsekvenserna längs den aktuella sträckan är generellt relativt låga. Högre konsekvensklasser förekommer vid järnvägen på östra sidan, där den är belägen relativt nära älven

norr om Älvängen (km 50/000 till 52/400), förbi Nol (km 58/000 till 61/000) samt i södra delen av sträckan (km 65/000 till 66/000). Högre konsekvensklasser finns också vid Älvängen, vid Nols industriområde och småbåtshamnen vid Grönåns mynning samt vid industriområde vid km 59/200-59/600.

Generellt är skredrisknivån låg längs den aktuella sträckan med några få undantag. Risknivån ökar till medelhög nära strandlinjen i norra delen av sträckan och når en hög nivå enbart utmed Älvängens industriområde. I övrigt är risknivån medelhög vid Dössebacka och vid småbåtshamnen utanför Nödinge.

Klimatpåverkan

Klimatpåverkan inom den aktuella sträckan förväntas vara måttlig, vilket innebär att en viss ökning av sannolikhet kan förväntas, eventuellt till en högre sannolikhetsklass. Stora delar av sträckan har en låg risknivå (S1/K1) som inte kommer att förändras även om klimatpåverkan skulle orsaka en ökning av sannolikhetsklassen till S2. Det finns dock ett antal delsträckor, främst smala partier längs strandlinjen, med sannolikhetsklass S3 och S4. Inom dessa kan en ökning av sannolikhetsklassen på grund av klimatpåverkan medföra en höjning av risknivån till nästa steg (från låg till medelhög alternativt från medelhög till hög).

Strandlinjen längs med Älvängens industriområde visar en tydlig till påtaglig sannolikhet för skred (klass S4 och S5) redan för dagens situation och små förändringar av geometrin orsakade av erosion kan medföra att skred utlöses.

Sträckan mellan Bohus och Marieholm (Göteborgsgrenen) (km 66/000 – 81/000)

Stabilitetsförhållandena skiljer sig markant mellan östra och västra sidan av älven. På östra sidan är sannolikheten i allmänhet låg (klass S2) till tydlig (klass S4). Söder om Angeredsbron och norr om Lärjeån är dock sannolikheten försumbar (klass S1). Vid Marieholms industriområde (km cirka 80/500) är sannolikheten påtaglig (klass S5).

På västra sidan om älven är beräknad sannolikhet för skred försumbar fram till km 76/000 (klass S1). Därefter förekommer många områden med högre sannolikhet för skred, främst smala områden utmed befintliga kajkonstruktioner. Sannolikhetsklass 4 och 5 (tydlig till påtaglig) finns mellan km cirka 77/000 och 79/000, samt i södra delen av sträckan strax norr om Marieholmsbron.

Konsekvenserna längs den östra sidan är relativt stora (klass K2-K5) vid befintliga industrier och arbetsplatser, bebyggelse och infrastrukturåtgångar. På västra sidan gäller liknande förhållanden söder om Angeredsbron.

Generellt är skredrisknivån låg längs den aktuella sträckan. Medelhög risknivå förekommer på östra sidan längs med industriområdet söder om Jordfallsbron (km 66/600-67/700) och inom industriområdet utanför Surte (km 68/800-69/800). Medelhög till hög skredrisknivå förekommer också lokalt inom områden på ömse sidor om älven mellan km 74/600 Lärjeån och Marieholmsbron (km 81/000).

Klimatpåverkan

Klimatpåverkan genom erosion blir stor inom området, den största inom hela utredningen. Stora delar av området på västra sidan av älven har försumbar till låg sannolikhet för skred (klass S1 till S2) för dagens förhållanden. Dessa områden kan få betydande försämring av stabilitetsförhållandena, upp till två sannolikhetsklasser högre, orsakad av klimatpåverkan. Detta innebär att risknivån kommer att öka på grund av klimatpåverkan, främst inom områden söder om Angeredsbron med stora till mycket stora konsekvenser (klass K2-K3) och

som idag har låg risknivå. I övriga områden med högre sannolikhetsklass än S3 längs strandlinjen, till exempel utanför Bäckebol och Backa (77/000-79/300) och i slutet av sträckan (80/200-81/000), kan klimatpåverkan orsaka en höjning av sannolikhetsklassen ett steg och därmed höja risknivån.

På östra sidan av älven är situationen mycket varierande för dagens förhållanden både vad gäller sannolikhet och konsekvenser. Detta försvårar möjligheten att förutse effekten av klimatförändringen längs denna sträcka. Områdets norra del fram till km 77/000 präglas av infrastrukturen (järnväg och motorväg) nära älven, vilket innebär att klimatpåverkan i detta område med största sannolikhet kommer att medföra en höjning av risknivån. I södra delen av sträckan är sannolikhet för skred försumbar (klass S1) inom huvuddelen av industriområdena längs älven. Det förekommer dock smala områden längs strandlinjen med sannolikhetsklass S2 till S4 och för dessa områden kan klimatpåverkan orsaka en höjning av sannolikhetsklassen och därmed en höjning av risknivån.

Sträckan längs Nordre älv (km 100/000 – 111/600)

Området från förgreningen av Göta älv vid Bohus till km 102/400 har en sannolikhet för skred från försumbar till tydlig (från klass S1 till S4) längs med norra stranden. Därefter varierar sannolikheten för skred från försumbar till låg (klass S1 till S2) förbi närliggande bebyggelse ända fram till sydspetsen av Munkholmen, km 105/600. Längs med den södra strandlinjen, mellan km 100/000 och km 103/000, är sannolikheten försumbar till låg med undantag för ett område söder om Fästningsholmen där sannolikhetsklass 4 (tydlig) förekommer. Området längs med södra strandlinjen mellan km 103/000 och södra delen av Munkholmen (km 105/600) domineras av tydlig till påtaglig skredsannolikhet (klass S4 till S5).

Mellan södra delen av Munkholmen och km 108/200 varierar sannolikheten för skred på båda sidor om älven mellan klass 1 och 4. Områden med klass 4 förekommer främst på norra sidan av älven. Området från km 108/200 till den södra utredningsgränsen (km 111/600) har låg sannolikhet för skred (S1) på båda sidor om älven.

Konsekvenserna längs norra strandlinjen är stora till extremt stora (klass K2 till K4) i Kungälv's tätort (mellan km 100/000 och 103/800) på grund av bebyggelse etc. i anslutning till Kungälv's tätort. Väster om Kungälv är konsekvenserna på norra sidan av älven lindriga (klass K1) med undantag för några mindre områden med begränsad bebyggelse.

Konsekvenserna av ett skred längs den södra strandlinjen är lindriga (klass K1) förutom vid bron över till Fästningsholmen (km 101/000), vid motorvägsbron över Nordre älv (km 102/700) samt ett antal mindre bebyggelseområden mellan km 107/200 och 107/800), vid km 110/300 och vid km 111/200.

Skredrisknivåerna längs den aktuella sträckan av Nordre älv varierar mellan låga och medelhöga, där områdena med den högre risknivån (medelhög) finns utspridda på båda sidor om älven.

Klimatpåverkan

Klimatpåverkan inom den aktuella sträckan förväntas vara måttlig, vilket innebär en viss ökning av sannolikheten, eventuellt till en högre sannolikhetsklass. Inom norra strandlinjen utmed Kungälv's tätort, det vill säga mellan km 100/000 och 103/600, kan vissa områden med mycket stora konsekvenser få en höjning av risknivån på grund av klimatpåverkan. Även delar av området kring Kastellegården på norra sidan av älven (cirka km 10/600) med sannolikhetsklass S4 (tydlig) kan klimatpåverkan leda till en högre risknivå. Övriga delar längs norra sidan av Nordre älv förväntas inte få någon förändring av risknivån.

Längs med den södra strandlinjen finns två områden med tydlig till påtaglig sannolikhet (klass S4 och S5). Förändring av förhållandena i älven på grund av klimatpåverkan kan medföra att skred utlöses. I dessa områden är dock konsekvenserna av skred mestadels lindriga, vilket innebär att ingen förändring av risknivån förväntas. Mellan km 107/200 och 107/600 finns bebyggelse på ett område med viss skredsannolikhet (klass S3). Förändring av sannolikhetsklass på grund av klimatpåverkan kan medföra att området får en hög risknivå. I övrigt förväntas inte klimatpåverkan orsaka något ändring av risknivån på södra sidan av Nordre älv.

Fakta i korthet

Sammanfattningsvis finns de största skredriskerna i **dagens klimat** i följande områden:

- Sträckan från Trollhättan och till Ödegärdet söder om Lilla Edet utgör det största sammanhängande området med höga skredrisker. Inom flera områden finns kvicklera, där ett skred kan leda till sekundära effekter och stor påverkan på älven.
- Gäddebacke, Vänersborgs kommun – område på östra sidan av älven samt en vall som skall skydda bakomliggande områden för översvämning.
- Åkerström, Trollhättans kommun – område med samlad bebyggelse.
- Lilla Edets tätort – flera områden med hög skredrisk på båda sidor om älven. Förekomst av kvicklera innebär att ett skred kan få stor utbredning.
- Gamla pappersbruket, Lilla Edets kommun – ett stort område med förekomst av kvicklera.
- Älvängens industriområde, Ale kommun – befintligt industriområde med markföroreningar.
- Kärra-Backa, Göteborgs kommun – branta undervattenslänter längs flera sträckor.
- Kungälv – område med näringsverksamhet.

I ett **förändrat klimat** bedöms sannolikheten för skred förändras, vilket kan påverka skredriskerna. Följande förhållanden kan förväntas:

- Mellan Vargön och Åkerström – liten påverkan.
- För området mellan Åkerström och Alvhem – påverkan varierar mellan liten och måttlig.
- Mellan Alvhem och Bohus – måttlig påverkan.
- Mellan Bohus och Marieholm – stor påverkan längs Göteborgsgrenen.
- Längs Nordre älv – måttlig påverkan

12 Åtgärdsbehov och kostnader

I detta kapitel redovisas översiktligt behovet av åtgärder för att minska skredriskerna i älvdalen. Olika typer av åtgärder som kan vara aktuella beskrivs liksom behovet av övervakning av skredriskområden och underhållsåtgärder samt uppskattning av kostnader för dessa åtgärder.

12.1 Allmänt

Behovet av åtgärder som krävs för att minska sannolikheten för skred inom områden utmed Göta älv har uppskattats och en överslagsmässig bedömning har gjorts av kostnader för dessa åtgärder. Bedömningarna har baserats på en sammanvägd bild av risknivåer med avseende på skred utmed älven, bedömda erosionsprocesser samt möjliga översvänningsområden med hänsyn till klimatförändringar. Bedömning av åtgärdsbehov har utförts utifrån befintliga förhållanden dels för ett scenario motsvarande dagens situation och tappning genom älven, dels för en framtida maximal tappning motsvarande 1500 m³/s (under del av året på samma sätt som beskrivits i kapitel 7 *Erosion*).

Behovet av stabilitetsförbättrande åtgärder har bedömts baserat på beräkningar av erforderlig avlastning och utflackning av slänterna utmed älven för att minska sannolikheten för skred. Andra mer kostnadskrävande åtgärder kan i vissa fall krävas av utrymmeskäl, miljöhänsen, etc. Utmed vissa delar av stranden, där bebyggelse ligger nära stranden och/eller där farledsdjupet i älven är begränsat, kommer lösningar i form av till exempel flyttning/borttagning av byggnader eller industriverksamhet, spontning med mera. sannolikt att behöva tillämpas. Någon bedömning av omfattningen av dessa eventuella speciallösningar har inte gjorts inom utredningen. Bedömning av åtgärder har utgått från dagens förhållanden. Vid all ny exploatering eller annan förändring av belastningssituationen i anslutning till älven krävs en förnyad bedömning av behov av stabilitetsförbättrande åtgärder.

Behovet av utökat erosionskydd har bedömts och kostnaderna för detta har uppskattats. Det kommer att erfordras såväl höjning av befintliga erosionskydd som utläggning av nya erosionskydd. Ett ökat flöde och sedimenttransport i älven förväntas medföra ett ökat behov av muddring vid älvens södra delar, främst utanför utredningsområdet. Så länge muddring i älven inte utförs till större djup än för dagens farledsdjup, bedöms detta dock inte inverka på stabiliteten utmed Göta älv. Någon kostnadsbedömning av muddringsbehov har därför inte gjorts inom utredningen.

Behovet av invallning där översvänningsrisk finns för områden med befintlig bebyggelse eller industrimark har bedömts och en grov uppskattning av kostnader för detta har gjorts. Anledningen till att invallningar har beaktats är att de normalt innebär en viss försäkring av stabiliteten. Detta behöver utredas speciellt eller i samband med detaljutredning av övriga behov av stabilitetsförbättrande åtgärder. Bedömningen av invallningsbehov är gjord utifrån en bedömd medelhöjning av vattennivåerna utmed älven. Extremsituationer kan ge än högre nivåer men någon beräkning av kostnader för detta har inte gjorts inom utredningen. Invallning av till exempel jordbruksmark i nära anslutning till älven eller speciella åtgärder med avseende på risk för utlakning av föroreningar vid översvämning av förorenad mark har inte tagits med i kostnadsuppskattningen.

För utförandet av förbättrande åtgärder krävs utredningar i form av detaljerade stabilitetsutredningar, projektering av åtgärder och upprättande av bygghandlingar, miljökonsekvensbeskrivningar, tillståndsansökningar med mera.

Det finns behov av fortlöpande kontroll/övervakning och underhåll av funktionen hos förbättrande åtgärder. Behov av kontroll/övervakning omfattar också pågående erosionspro-

cesser. Behovet av förbättrande åtgärder är stort men har bedömts kunna hållas på de uppskattade nivåerna under förutsättning att status på erosionsskydd, erosionsförlopp, flöden med mera följs upp fortlöpande.

I efterföljande avsnitt redovisas uppskattade kostnader för stabilitetsförbättrande åtgärder, erosionsskydd, invallningar, utredningar, årligt underhåll och övervakning. Kostnaderna redovisas som grovt uppskattade intervall med hänsyn till den översiktliga karaktären av bedömningen och de osäkerheter som finns med avseende på såväl omfattningen av erforderliga åtgärder som kostnaderna för dessa. Variationen i å-pris för olika typer av åtgärder kan vara betydande då de är starkt beroende av storlek på arbetet, transportavstånd och tillgång på massor, möjlighet att utföra arbeten från land eller vatten, arbetsvägar med mera. Det bör observeras att kostnadsuppskattningen gäller för ett totalt behov av åtgärder för hela älvsträckan utifrån den bebyggelse etc. som finns idag. Kostnaderna för enskilda sträckor med olika grad av åtgärdsbehov kan variera betydligt.

12.2 Stabilitetsförbättrande åtgärder, erosionsskydd och invallningar

Vid bedömningen av kostnader kopplade till stabilitetshöjande åtgärder har mängd erforderlig avschaktning respektive stödfyllning beräknats för att förbättra stabiliteten med minst 20 % utmed strandområden där sannolikheten för skred klassas som sannolikhetsklass 4 och 5. Denna förbättring motsvarar endast en generell bedömd erforderlig ökning. Behovet för enskilda slänter varierar och kan vara betydligt större för till exempel många slänter inom sannolikhetsklass 5. Vidare kan framtida detaljutredningar komma att visa på att en del förbättringar behövs också inom vissa områden som tillhör till exempel sannolikhetsklass 3. Erforderlig utfläckning för ett antal typslänter med olika geometri har beräknats och total mängd avschaktning respektive stödfyllning har bedömts baserat på fördelning av dessa typer av slänter utmed älven. Någon ytterligare avschaktning eller stödfyllning vid ökande flöden till maximalt 1500 m³/s utöver de som erfordras för flödet 1030 m³/s, beräknas inte behöva utföras utan stabilitetsförsämring i form av ökad erosion förhindras istället genom utökade erosionsskydd.

Vid bedömning av kostnader för utökning av erosionsskydd, genom förhöjning av befintliga skydd och utläggning av nya, har detta beräknats behöva utföras utmed stränder som klassats ha medelhög till hög skredrisk. Erosionsskydd har bedömts behövas dels strandnära, dels ända ned till älvbotten och inom ett område på botten utmed vissa sträckor där slänten under vattnet är relativt brant. Även viss höjning av befintliga erosionsskydd behöver utföras. Vidare har erosionsskydd bedömts behövas för att motverka fortsatt kraftig erosion vid ett antal befintliga djuphålur i älvbotten. Ökande flöden till maximalt 1500 m³/s bedöms medföra behov av utökat erosionsskydd, dels i form av höjning av befintliga erosionsskydd, dels till stor del i form av djupare skydd av undervattenslänt och delar av älvbotten.

Kostnader för invallning av låglänta områden har enbart uppskattats för strandpartier där översvämningar bedöms kunna omfatta befintliga bebyggda områden och industrimark. Invallningen i dessa områden bedöms behöva utföras i form av vall med tät kärna som till viss del går ned i eventuell befintlig genomsläpplig jord/fyllning. Kostnadsbedömningen avser skydd mot förväntade framtida medelnivåhöjningar utmed älven. Behov av åtgärder vid eventuella extremnivåer inkluderas inte.

I Tabell 12-1 visas de sammanlagda uppskattade kostnaderna för stabilitetsförbättrande åtgärder, erosionsskydd samt invallningar för dagens situation och för en situation med en maximal tappning motsvarande 1500 m³/s.

Dagens situation, max tappning 1030 m ³ /s (MSEK)	Max tappning 1500 m ³ /s (MSEK)
3 600 - 4 300	4 300 - 5 200

Tabell 12-1
Bedömda kostnader för stabilitetsförbättrande åtgärder, erosionsskydd och invallningar för olika flöden.

Kostnaderna för stabilitetsförbättrande åtgärder och erosionsskydd är klart dominerande och utgör 90 - 95 % av totalkostnaderna.

12.3 Underhåll

Underhållskostnaderna för erosionsskydd kommer att öka något vid ett ökat tappningsflöde och/eller fler antal tillfällen då hög tappning förekommer. De bedömda årliga underhållskostnaderna framgår av Tabell 12-2.

Dagens situation, max tappning 1030 m ³ /s (MSEK)	Max tappning 1500 m ³ /s (MSEK)
4 - 5	5,5 - 6,5

Tabell 12-2
Bedömda årliga kostnader för underhåll.

12.4 Geotekniska utredningar

Kostnader för behov av olika utredningar såsom detaljerade stabilitetsutredningar, projektering av åtgärder, upprättande av bygghandlingar, miljökonsekvensbeskrivningar, ansökningar om miljödömdom med mera har uppskattats. De bedömda kostnaderna framgår av Tabell 12-3.

Dagens situation, max tappning 1030 m ³ /s (MSEK)	Max tappning 1500 m ³ /s (MSEK)
400 - 450	450 - 500

Tabell 12-3
Bedömda kostnader för utredningar.

12.5 Övervakning

Geoteknisk övervakning av älven genomförs vid minst en årlig inspektionsresa från båt av representanter från SGI, Sjöfartsverket och Vattenfall, där de synliga erosionsskydden besiktigas okulärt. Dessutom utförs punktvisa besiktningar från land. Omfattningen av denna övervakning bedöms behöva öka till ungefär två à tre inspektioner från båt per år och ungefär det dubbla från land.

I dagsläget utförs ingen övervakning av erosionsprocesser, vare sig med hänsyn till botenerosion eller till stranderosion. Detta bedöms behöva utföras framöver i form av återkommande batymetriska mätningar med multibeam-ekolodning samt backscatter- och sidescan-mätningar i kombination med provtagningar av sediment i älven för analys av förändringar i botten- och erosionsförhållanden. Denna typ av mätningar bedöms behöva utföras ungefär vart tredje år och/eller i samband med detaljundersökningar i områden med hög skredrisk.

Bedömda årliga kostnader för övervakning och kontroll framgår av Tabell 12-4.

Dagens situation, max tappning 1030 m ³ /s (MSEK)	Max tappning 1500 m ³ /s (MSEK)
1,5 - 2	1,5 - 2

Tabell 12-4
Bedömda årliga kostnader för övervakning

12.6 Totalkostnader

I Tabell 12-5 redovisas de översiktligt bedömda sammanlagda kostnaderna för stabilitetsförbättrande åtgärder, erosionsskydd, invallningar och behov av utredningar samt årligt underhåll och övervakning för de studerade scenarierna. Kostnader för invallning av obebyggda låglänta områden eller för muddring för farleden ingår inte.

Tabell 12-5
Totalkostnader
för de studerade
scenarierna.

Åtgärder	Dagens situation, max tappning 1030 m ³ /s (MSEK)	Max tappning 1500 m ³ /s (MSEK)
Stabilitetsåtgärder, erosionsskydd, invallningar	3 600 - 4 300	4 300 - 5 200
Utredningar	400 - 450	450 - 500
Totalt (MSEK)	4 000 - 4 750	4 750 - 5 700
Årligt underhåll	4 - 5	5,5 - 6,5
Årlig övervakning	1,5 - 2	1,5 - 2
Totalt (MSEK/år)	5,5 - 7	7 - 8,5

Fakta i korthet

- Åtgärder för att minska skredrisker erfordras för flera sträckor längs Göta älv. Exempel på åtgärder är stabilitetsförbättrande insatser som avschaktning och stödfyllning samt erosionsskydd.
- För vissa låglänta områden erfordras invallning för att undvika översvämning och sådana vallar kan i vissa fall medföra behov av stabilitetsförbättrande åtgärder.
- Kostnaderna för stabilitetsförbättrande åtgärder kan uppskattas till mellan 4000 och 5000 MSEK för skredrisker i dagens klimat och till mellan 5000 och 6000 MSEK i ett framtida klimat med ökad tappning genom älven.
- Kostnaderna för övervakning och underhåll bedöms uppgå till mellan 6 och 7 MSEK/år för dagens klimat och till mellan 7 och 9 MSEK/år vid förändrat klimat.

Referenser

- Adriellsson, P & Fredén, C (1987). Beskrivning till jordartskartan Marstrand SO/Göteborg SV. Sveriges Geologiska Undersökning. Serie Ae nr 72.
- af Petersens, M (2012). Modell för lerans odränerade skjuvhållfasthet i anslutning till Göta älv. Luleå tekniska universitet. Samhällsbyggnad. Geoteknologi. Examensarbete.
- Alén, C (1998). On probability in geotechnics, Random calculation models exemplified on slope stability analysis and ground-superstructure interaction, Doctoral thesis. Chalmers University of Technology. Department of Geotechnical Engineering.
- Alén, C, Bengtsson, P-E, Berggren, B, Johansson, L & Johansson, Å (2000). Skredriskanalys i Göta älv dalen – Metodbeskrivning. Statens geotekniska institut, SGI. Rapport 58. Linköping.
- Althage, J (2010). Ship-induced waves and sediment transport in Göta River, Sweden. Lund University. Division of Water Resources Engineering. Department of Building and Environmental Technology. Master thesis TVVR 10/5021.
- Andersson, H, Ottosson, E & Sällfors, G (1999). Skredet i Ballabo, Västerlanda. Statens geotekniska institut, SGI. Rapport 57. Linköping.
- Andersson-Sköld, Y (2011a). Metodik för inventering och värdering av konsekvenser till följd av skred i Göta älv dalen. Statens geotekniska institut, Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 12. Linköping.
- Andersson-Sköld, Y (2011b). Metodik konsekvensbedömning – Känslighetsanalys, klassindelning och applicering av metodik i hela utredningsområdet. Statens geotekniska institut, Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 13. Linköping.
- Berg och jord (1994). Temaredaktör: Curt Fredén. Sveriges Nationalatlas (SNA).
- Berggren, B, Fallsvik, J, Hintze, S & Stille, H (1991). LerslänTERS stabilitetsförhållanden. Riskvärdering och beslutsteori. Förslag till metod för riskvärdering. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 333. Linköping.
- Berggren, B, Alén, C, Bengtsson, P-E & Falemo, S (2011). Metodbeskrivning sannolikhet för skred: kvantitativ beräkningsmodell. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 28. Linköping.
- Bergström, S, Andréasson, J, Asp, M, Caldarulo, L, German, J, Lindahl, S, Losjö, K & Stensen, B (2010). Fördjupad studie rörande översvänningsriskerna för Vänerne – slutrapport. SMHI Rapport nr 2010-85.
- Bergström, S, Andréasson, J, Losjö, K, Stensen, B & Wern, L (2011). Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älv dalen – slutrapport. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 27. Linköping. Även publicerad som SMHI Rapport nr 2010-81.
- Blied, L & Persson, H (2011). Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älv dalen till följd av förändrat klimat. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 9. Linköping.
- Blied, L & Rydell, B (2011). Markteknisk undersökningsrapport. Geoteknisk och erosion. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Linköping.
- Brack, K, Johannesson, LT & Stevens, RL (2001). Accumulation rates and mass calculations of Zn and Hg in recent sediments, Göta Älv estuary, Sweden. Environmental Geology, vol 40, pp 1232-1241.
- Engström, G (1934). Nordre Göta älv. En morfologisk och hydrografisk studie. Gothia 3.

- Fredén, C (1984). Beskrivning till jordartskartan Vänersborg SO. Sveriges Geologiska Undersökning. Serie Ae nr 48.
- Fredén, C (1986). Beskrivning till jordartskartan Göteborg NO. Sveriges Geologiska Undersökning. Serie Ae nr 40.
- Göransson, G (2011). Transport av suspenderat material i Göta älv. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 4. Linköping.
- Göta älvs Vattenvårdsförbund (2005). Fakta om Göta älv. En beskrivning av Göta älv och dess omgivning 2005. Göteborg.
- Göta älvs Vattenvårdsförbund (2010). <http://www.gotaalvvvf.org/>
- Götaälvskommittén (1962). Rasriskerna i Göta älvdalen. Betänkande avgivet av Götaälvs-kommittén. SOU 1962:48.
- Göteborgs Hamn (2010). Personlig kommunikation.
- Hagberg M & Schälin, J (2004). Samhällsutbyggnad och skredriskanalys i nordöstra Göta älvdalen inom Lilla Edets kommun. Underlag vid översiktlig planering och beslut om mark- och vattenanvändning. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 548. Linköping.
- Hedvall, T (2010). Bearbetning av Terrängmodell över Göta och Nordre Älv. Vattenfall Power Consultant AB.
- Helgesson, H & Rihm, T (2011). Metodik konsekvensbedömning – Miljöfarliga verksamheter och förorenade områden, Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 19. Linköping.
- Hernebring, C (2006). 10 års-regnets återkomst, förr och nu – regndata för dimensionering/kontrollberäkning av VA-system i tätorter. VA-Forsk rapport Nr 2006-04.
- Hultén, C, Olsson, M, Rankka, K, Svahn, V, Odén, K & Engdahl, M (2005). Släntstabilitet i jord. Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat. Deluppdrag 1. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 560:1. Linköping.
- Hillefors, Å (1974). The stratigraphy and genesis of the Dössebacka and Ellesbo drumlins. A contribution to the knowledge of the Weichsel-glacial history in western Sweden. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, vol 96, pp 355-374. Stockholm.
- Holmén, L & Ahlberg, P (1995). Samhällsutbyggnad och skredriskanalys i södra Göta älvdalen. Slutrapport. Underlag vid översiktlig planering och beslut om mark- och vattenanvändning, 1-2. Länsstyrelsen i Älvsborgs län/Statens geotekniska institut, SGI. Varia 439. Linköping.
- Hultén, C, Edstam, T, Arvidsson, O & Nilsson, G (2006). Geotekniska förutsättningar för ökad tappning från Väner till Göta älv. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 565. Linköping.
- Hultén, C (2005). Sydvästra Göta älv. Delen Tingstadstunneln Angeredsbron. Göteborgs kommun. Skredriskanalys. Statens geotekniska institut, SGI. Diarienummer 2-0402-0128. Linköping.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S, Qin, D, Manning, M, Chen, Z, Marquis, M, Averyt, KB, Tignor, M & Miller, HL (eds.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Jakobson, B (1952). The landslide at Surte on the Göta River. Statens geotekniska institut, SGI. Proceedings 5. Stockholm.

- Janbu, N (1954). Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. Doctoral Thesis. Cambridge. Massachusetts.
- Johansson, Å (2010). Nordvästra Göta älv. Översiktlig stabilitetsutredning. Delrapport. Statens geotekniska institut, SGI. Diarienummer 5.51-1012-0942. Linköping.
- Klimat- och sårbarhetsutredningen (2006). Översvämningshot. Risker och åtgärder för Mälaren, Hjälmaren och Vänern. Delbetänkande. Statens offentliga utredningar, SOU 2006:94. Miljödepartementet. Stockholm.
- Klimat- och sårbarhetsutredningen (2007). Sverige inför klimatförändringarna – hot och möjligheter. Statens offentliga utredningar, SOU 2007:60. Miljödepartementet. Stockholm.
- Klingberg, F (2011). Bottenförhållanden i Göta älv. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 6. Linköping. Även publicerad som SGU-rapport 2010:7.
- Klingberg, F, Påsse, T & Levander, J (2006). Bottenförhållanden och geologisk utveckling i Göta älv. Sveriges Geologiska Undersökning, SGU. Rapport K43. Uppsala.
- KPfakta (2010). KP-fakta 2010, 360 40 Rottne.
- Larsen, P (1995). Erosionsskador och skredrisk i Göta älv. Fartygstrafik kontra vattenkraft. Vattenfall utveckling. Rapport US95-32.
- Larsen, P (1996). Erosionspåverkan från vågor. Fartygstrafik kontra vattenkraft. Vattenfall utveckling. Rapport US96-11.
- Larson, M (2011). A model of sediment transport due to ship-generated waves. Presentation för utredningsgruppen för erosionsförhållandena i Göta älv.
- Larson, M & Hanson, H (2006). Sedimenttransport och erosion i Göta Älv: Inverkan av framtida klimatförändringar. Lunds universitet. Teknisk vattenresurslära.
- Larsson, R, Ottosson, E & Sällfors, G (1994). Agnesbergsskredet. Statens geotekniska institut, SGI. Rapport 44. Linköping.
- Larsson, R (2008). Jords egenskaper. Statens geotekniska institut, SGI. Information 1. Linköping.
- Larsson, R (2011). Metodbeskrivning för SGI:s 200 mm diameter ”blockprovtagare” – Ostörd provtagning i finkornig jord. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 33. Linköping.
- Larsson, R, Bengtsson, P-E & Edstam, T (2008). Vägbyggande med hänsyn till omgivningens stabilitet. Vägverket Region Väst Dnr AL90 B 2007:27435. Statens geotekniska institut. Slutrapport 08-05-29. Linköping.
- Lindskog, G (1982). Stabilitetsförhållandena i Göta älv dalen. Sammanfattande redogörelse för Statens geotekniska instituts verksamhet i Göta älvs dalgång under perioden 1962-1982. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Löfroth, H (2011). Kartering av kvicklereförekomst för skredriskanalyser inom Göta älv-uppdraget – Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer. Statens geotekniska institut, SGI. Göta Älvutredningen, GÄU. Delrapport 29. Linköping.
- Löfroth, H, Suer, P, Dahlin, T, Leroux, V & Schälin, D (2011). Quick clay mapping by resistivity – The potential of surface resistivity, CPTU-R, and chemistry to complement common geotechnical sounding and sampling. Statens geotekniska institut, SGI. Göta Älvutredningen, GÄU. Delrapport 30. Linköping.

- Marin Miljöanalys (2011a). Ytgeologisk undersökning med backscatter-analys för Göta älv och Nordre älv. Marin Miljöanalys AB, U304-0909. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 5. Linköping.
- Marin Miljöanalys (2011b). Sjömätning – Göta älv och Nordre älv. Marin Miljöanalys AB, U304-0909. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 34. Linköping.
- Millet, D (2011). River erosion, landslides and slope development in Göta River – A study based on bathymetric data and general limit equilibrium slope stability analysis. Chalmers University of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. GeoEngineering. Geology and Geotechnical Engineering. Master thesis 2011:131.
- MSB (2009a). Analys av samhällsekonomisk kostnad – Skredet vid E6 i Småröd, 2006. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB.
- MSB (2009b). Naturolycksdatabasen. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. <http://ndb.msb.se/>
- Möller, B & Bergdahl, U (1982). Estimation of the sensitivity of soft clays from static and weight sounding tests. European symposium on penetration testing, 2, ESOPT2. Amsterdam. Proceedings, Vol. 1, pp 291-295.
- Norrman, J (2008). Utvecklingen av Göta älvs botten nedströms Trollhättan genom Trollhätte kanals ombyggnad 1916 till nutid. PM 2008-08-29.
- Odenstad, S (1958). Jordskredet i Göta den 7 juni 1957. Svenska Föreningen för Lerborsknin. Meddelanden, nr 9, pp 76-86.
- Olsson, J (2011). Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI. Norrköping. Personlig kommunikation.
- Persson, H, Bengtsson, P-E, Lundström, K & Karlsson, P (2011). Bedömning av grundvattenförhållanden för slänter längs Göta älv. Allmän vägledning. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 7. Linköping.
- Rankka, K, Andersson-Sköld, Y, Hultén, C, Larsson, R, Leroux, V & Dahlin, T (2004). Quick clay in Sweden. Statens geotekniska institut, SGI. Rapport 65. Linköping.
- Rodhe, A, Lindström, G & Dahné, J (2009). Grundvattennivåer i ett förändrat klimat. Uppsala universitet/Sveriges hydrologiska och meteorologiska institut. Slutrapport från SGU-projektet Grundvattenbildning i ett förändrat klimat, proj nr 60-1642/2007.
- Rydell, B, Arvidslund, O, Fallsvik, J (2007). Undersökningar i strandnära områden – Mätning av topografi och batymetri. Tillämpning för erosion och släntstabilitet. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 573. Linköping.
- Rydell, B, Blied, L, Persson, H (2011a). Beräkningsförutsättningar för erosion vid stabilitetsanalys för Göta älv. Göta älvutredningen, GÄU. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 624:2. Linköping.
- Rydell, B, Blied, L, Persson, H, Åström, S & Gyllenram, W (2011b). Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 2. Linköping.
- Rydell, B, Persson, H, Blied, L & Rankka, W (2011c). Erosionsförhållanden i Göta älv. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 1. Linköping.

- Rydell, B, Persson, H & Blied, L (2011d). Klimateffekt på vattennivå, erosion och grundvattenförhållanden i Göta älv. Underlag till styrdokument 99ST003. Göta älvutredningen, GÄU. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 624:1. Linköping.
- Samuelsson, L (1985). Beskrivning till berggrundskartan Göteborg NO. Sveriges Geologiska Undersökning. Serie Af nr 136.
- SCB (2009). SCB:s register över totalbefolkningen 2008-12-31. Befolkningsstatistik per ruta för en buffertzons längs Göta älv. SCB 198102/ 858584-6.
- SFS 1999:381. Lag om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor.
- SGF (1996). Geoteknisk fälthandbok. Svenska Geotekniska Föreningen. Rapport 1:96. Linköping.
- SGI (2006). På säker grund för hållbar utveckling. Förslag till handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat. Statens geotekniska institut, SGI. Uppdrag enligt regleringsbrev M2002/4162/A.
- SGI (2011:1). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 1 (Angeredsbron-Marieholm). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0023. Linköping.
- SGI (2011:2). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 2 (Nordre älv samt Rödbo-Angeredsbron). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0024. Linköping.
- SGI (2011:3). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 3 (Skår-Bohus). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0025. Linköping.
- SGI (2011:4). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 4 (Ström-Skår). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0026. Linköping.
- SGI (2011:5). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 5 (Intagan-Ström). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0027. Linköping.
- SGI (2011:6). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 6 (Vargön-Intagan). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0028. Linköping.
- SGI (2011:7). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 7 (Intagan-Lilla Edet). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0029. Linköping.
- SGI (2011:8). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 8 (Lilla Edet-Alvhem). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0030. Linköping.
- SGI (2011:9). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 9 (Alvhem-Surte). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0031. Linköping.
- SGI (2011:10). Markteknisk undersökningsrapport, geoteknik. Delområde 10 (Surte-Marieholm). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0032. Linköping.
- SGI (2011:11). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 1 (Angeredsbron-Marieholm). Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0023. Linköping.

- SIG (2011:12). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 2 (Nordre älv samt Rödbo-Ångeredsbron). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0024. Linköping.
- SIG (2011:13). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 3 (Skår-Bohus). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0025. Linköping.
- SIG (2011:14). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 4 (Ström-Skår). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0026. Linköping.
- SIG (2011:15). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 5 (Intagan-Ström). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0027. Linköping.
- SIG (2011:16). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 6 (Vargön-Intagan). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0028. Linköping.
- SIG (2011:17). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 7 (Intagan-Lilla Edet). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0029. Linköping.
- SIG (2011:18). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 8 (Lilla Edet-Alvhem). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0030. Linköping.
- SIG (2011:19). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 9 (Alvhem-Surte). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0031. Linköping.
- SIG (2011:20). Teknisk PM, geoteknik. Delområde 10 (Surte-Marieholm). Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Diarienummer 6-1001-0032. Linköping.
- SIG (2012a). GÄU Slutrapport Del 3 – Kartor. Statens geotekniska institut, SIG. Göta älvutredningen, GÄU. Linköping.
- SIG (2012b). Skreddatabas – skred, ras och övriga jordrörelser i Sverige. Statens geotekniska institut. Linköping. <http://gis.swedgeo.se/skred/>
- SIKA (2009). Värden och metoder för transportsektorns samhällsekonomiska analyser – ASEK 4. Statens institut för kommunikationsanalys. Rapport 2009:3.
- Skredkommissionen (1995). Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Ingenjörsvetenskapsakademien, IVA. Rapport 3:95. Linköping.
- Skrednett (2010). Webportalen Skrednett.no <http://www.skrednett.no/>
- SMHI (2010). Vattenprovtagning och analys av suspenderat material i två sektioner i Göta älv.
- SMHI (2011). Klimatdata. <http://www.smhi.se/klimatdata.2011-12>
- Sundborg, Å & Norrman, J (1963). Göta älv. Hydrologi och morfologi med särskild hänsyn till erosionsprocesserna. Sveriges Geologiska Undersökning, SGU. Rapport Ca 43.
- Sundén, G, Maxe, L & Dahné, J (2010). Grundvattennivåer och vattenförsörjning vid ett förändrat klimat. Sveriges Geologiska Undersökning, SGU. Rapport 2010:12.
- Vattenfall (1978). Trollhätte kanal. Kontrollmätning av dumpningsplatser. Rapporter från 1975 och 1978. Statens Vattenfallsverk, BSU, dnr BSU-BN/MB-3521.
- Vattenfall (2011). Anna Östlund, Vattenfall, Vattenkraft AB. Personlig kommunikation.
- Westberg, E (2010). Sedimenttransport vid Marieholm, rev 1. Marin Miljöanalys AB, U337-1002.

- Vägverket (2009). TK Geo. Teknisk beskrivning som anger Vägverkets och Banverkets krav och råd vid nybyggnad och förbättring av geokonstruktioner. Vägverket, VV. Publikation 2009:46 / Banverket, BV. BVS 1585.001. Borlänge.
- Västra Götaland (2003). Temareaktörer: Bengt Frizell & Margit Werner. Sveriges Nationalatlas, (SNA) / Länsstyrelsen i Västra Götalands län; 18.
- Åhnberg, H, Larsson, R, Bengtsson, P-E, Lundström, K, Löfroth, H & Tremblay, M (2011). Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 32. Linköping.
- Åström, S, Eklund, D & Lindahl, S (2011). Hydrodynamisk modell för Göta älv. Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och bottenskjuvspänningar. SMHI Rapport nr 2011-36. Statens geotekniska institut, SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 3. Linköping.

Bilaga

Göta älvutredningen, GÄU – Delrapporter

- 1 **Erosionsförhållanden i Göta älv**
Bengt Rydell, Linda Blied, Håkan Persson, Wilhelm Rankka
- 2 **Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag**
Bengt Rydell, Håkan Persson, Linda Blied, Sofia Åström, Walter Gyllenram
- 3 **Hydrodynamisk modell för Göta älv. Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och bottenskjuvspänningar**
Sofia Åström, Dan Eklund, Sture Lindahl
- 4 **Transport av suspenderat material i Göta älv**
Gunnel Göransson, Håkan Persson, Karin Lundström
- 5 **Ytgeologisk undersökning med backscatter - Analys för Göta älv och Nordre älv**
Marin Miljöanalys AB
- 6 **Bottenförhållanden i Göta älv**
Fredrik Klingberg
- 7 **Bedömning av grundvattenförhållanden för slänter längs Göta älv – Allmän vägledning**
Håkan Persson, Per-Evert Bengtsson, Karin Lundström, Petter Karlsson
- 8 **Känslighetsanalys för variationer i grundvattennivå och val av maximala portryck i slänter längs Göta älv – Exempel från en slänt**
Håkan Persson
- 9 **Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älv dalen till följd av förändrat klimat**
Linda Blied, Håkan Persson
- 10 **Studie av portryckens påverkan från nederbörd och vattenståndsvariation i tre slänter längs Göta älv**
Linda Blied
- 11 **Analys av uppmätta portryck i slänterna vid Äsperöd och Åkerström**
Thomas Rihm
- 12 **Metodik för inventering och värdering av konsekvenser till följd av skred i Göta älv dalen**
Yvonne Andersson-Sköld
- 13 **Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalys, klassindelning och applicering av metodik i hela utredningsområdet**
Yvonne Andersson-Sköld
- 14 **Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse**
Stefan Falemo
- 15 **Metodik konsekvensbedömning - Kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv**
Stefan Falemo
- 16 **Metodik konsekvensbedömning - Sjöfart**
Ramona Bergman
- 17 **Metodik konsekvensbedömning - Väg**
Ramona Bergman
- 18 **Metodik konsekvensbedömning - Järnväg**
Ramona Bergman

- 19 **Metodik konsekvensbedömning - Miljöfarliga verksamheter och förorenade områden**
Helena Helgesson, Thomas Rihm
- 20 **Metodik konsekvensbedömning - Naturmiljö**
Pascal Suer
- 21 **Metodik konsekvensbedömning - Energi och ledningsnät**
Paul Frogner Kockum
- 22 **Metodik konsekvensbedömning - VA-system**
Thomas Rihm
- 23 **Metodik konsekvensbedömning - Näringsliv**
Tonje Grahn
- 24 **Metodik konsekvensbedömning - Kulturarv**
Tonje Grahn
- 25 **Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalyser**
Tonje Grahn
- 26 **Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse och kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv - Fallstudie Ale kommun**
Stefan Falemo
- 27 **Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen**
Sten Bergström, Johan Andréasson, Katarina Losjö, Björn Stensen, Lennart Wern
- 28 **Metodbeskrivning sannolikhet för skred: Kvantitativ beräkningsmodell**
Bo Berggren, Claes Alén, Per-Evert Bengtsson, Stefan Falemo
- 29 **Kartering av kvicklereförekomst för skredriskanalyser inom Göta älvutredningen. Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer**
Hjördis Löfroth
- 30 **Quick clay mapping by resistivity – Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling**
Hjördis Löfroth, Pascal Suer, Torleif Dahlin, Virginie Leroux, David Schälin
- 31 **Inverkan av förändringar i porvattnets kemi, främst salturlakning, på naturlig leras geotekniska egenskaper - Litteraturstudie**
Rolf Larsson
- 32 **Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer**
Helen Åhnberg, Rolf Larsson, Per-Evert Bengtsson, Karin Lundström, Hjördis Löfroth, Marius Tremblay
- 33 **Metodbeskrivning för SGI:s 200 mm diameter ”blockprovtagare” - Ostörd provtagning i finkornig jord**
Rolf Larsson
- 34 **Sjömätning - Göta älv och Nordre älv**
Marin Miljöanalys AB



Statens geotekniska institut

Besöksadress: Olaus Magnus väg 35 Postadress: SGI, 581 93 Linköping
Tel: 013-20 18 00 E-post: sgi@swedgeo.se

Regionkontor Göteborg:
Hugo Grauers gata 5 B, 412 96 Göteborg Tel: 031-778 65 60

Regionkontor Malmö:
Adelgatan 19, 211 22 Malmö Tel 040-35 67 70

Regionkontor Stockholm:
Kornhamnstorg 61, 111 27 Stockholm Tel 08-578 45 500

www.swedgeo.se