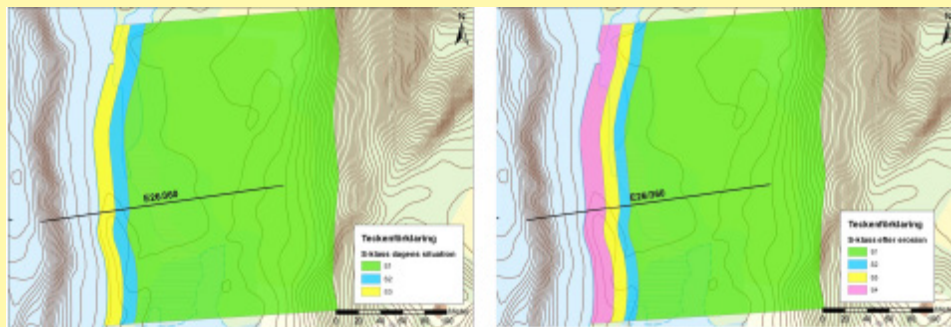




STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



Förändring av konsekvens och sannolikhet avseende klimatförändring i Göta älvdalen

Stefan Falemo

Varia 640

LINKÖPING 2012

Varia	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI – Informationstjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 14 info@swedgeo.se www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA-12/640-SE
Dnr SGI	1203-0219
Uppdragsnr SGI	14783



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Varia 640

Förändring av konsekvens och sannolikhet avseende klimatförändring i Göta älvdalen

Stefan Falemo

FÖRORD

Regeringen gav i ett regleringsbrev 2011 (M2011/3932/S) SGI i uppdrag att nyttiggöra material från Göta älvuppdraget (2009-2011) och utföra ras- och skredkarteringar. Tiden för slutredovisning av uppdraget sattes till den 31/12 2012. Denna delrapport är en del i redovisningen av regeringsuppdraget.

Den översiktliga skredriskkartan som gjordes i Göta älvutredningen presenterar risken för dagens klimat längs älven, samt en uppskattning av klimatets påverkan på skredrisken år 2100 om inga förebyggande åtgärder vidtas innan dess. I skredriskanalysen definierades risken som en funktion av sannolikhet och konsekvens. Klimatpåverkan redovisades i form av förändring av skredrisk och som ett raster på älven. Förändringen i skredrisk är i själva verket en förändring i sannolikheten för skred och den horisontella utbredningen av sannolikhetsklasser och riskklasser i framtidsscenarioet kan förändras. I Göta älvutredningen undersöktes endast klimatscenarier som inbegrep ökad erosion längs älven och i älvfåran.

Den här fördjupade geotekniska analysen har gjorts för att studera om ökad erosion alltid innebär ökad sannolikhet för skred samt om riskklassernas horisontella utbredning förändras i ett förändrat klimat. För att minska risken för skred och vidta rätt åtgärder så behövs detaljerade geotekniska undersökningar för de områden där risken är stor idag eller där ny bebyggelse planeras. Vid planering och upphandling av dessa tjänster är det väsentligt att förstå på vilket sätt klimatförändringar kan påverka den specifika platsen.

Analysen och efterföljande avrapportering utfördes av Stefan Falemo. Avrapporteringen gjordes först i form av en s.k. teknisk notis. Den tekniska notisen har i ett senare skede (och utan Stefan Falemos medverkan) omarbetats till en Varia. Ytterligare medarbetare vid SGI som deltog i analysarbetet: Kine Meijer, David Schälin, Karin Lundström och Mats Öberg. Den tekniska notisen interngranskades av Charlotte Cederbom och Karin Bergdahl.

Linköping 2012

Charlotte Cederbom

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

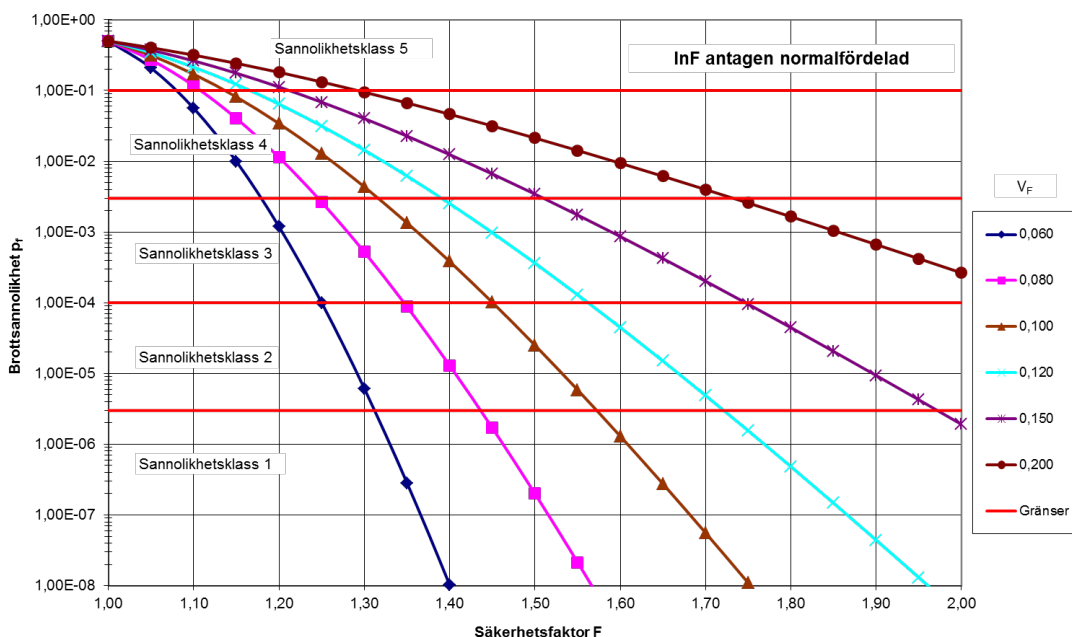
1	BAKGRUND: GÖTA ÄLVUTREDNINGEN	6
2	SYFTE OCH MÅL	10
3	METOD	11
4	RESULTAT	13
	4.1 Urval och bortfall	13
	4.2 Skredsannolikhet i dagens situation och med två erosionsscenarier	14
5	DISKUSSION	23
6	REFERENSER.....	24

1 BAKGRUND: GÖTA ÄLVUTREDNINGEN

I Göta älvutredningen (GÄU) utfördes en översiktlig skredriskanalys för Göta älv dalen (SGI 2012). Risken definierades som en funktion av sannolikhet och konsekvens. Metodik för konsekvensanalys och sannolikhetsanalys utvecklades och anpassades för tillämpning i Göta älvutredningen. Omfattande geotekniska undersökningar och sammanställning av tidigare genomförda geotekniska utredningar utgjorde underlag för sannolikhetsanalysen. Metodiken för sannolikhetsanalys har utvecklats av Alén (1998) och summeras i Berggren et al. (2011) där även anpassning till GÄU beskrivs. Tillämpning av metodiken, anpassning och förenkling för beräkningar i Göta älvutredningen för dagens förhållanden och efter klimatpåverkan i form av erosion beskrivs i Göta älvutredningens slutrapport del 2 (SGI 2012).

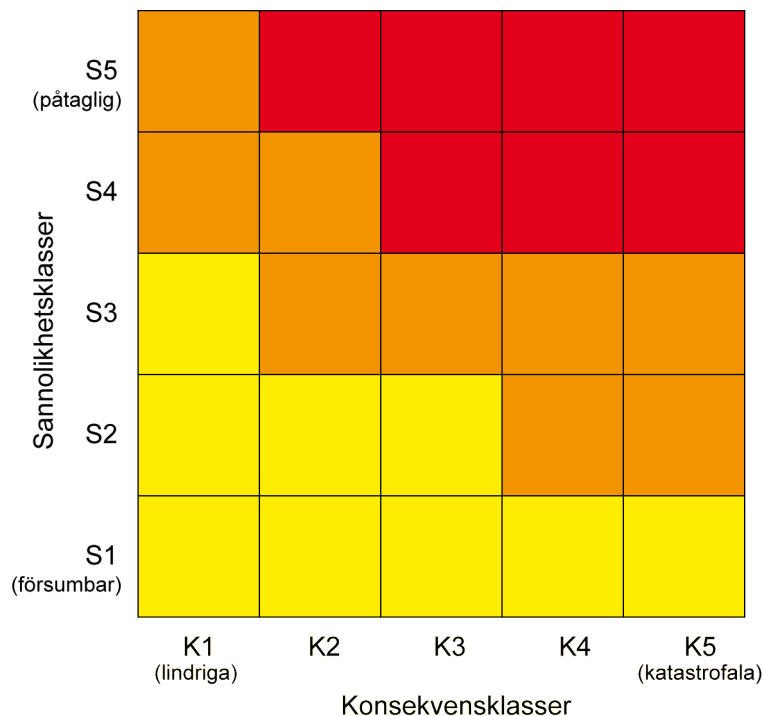
I GÄU var principen för gränsdragning av sannolikhetsklasser i en sektion att:

1. Beräkna variationskoefficient för säkerhetsfaktorn, V_F .
2. Bestäm vilka säkerhetsfaktorer som utgör gränser mellan sannolikhetsklasser med hjälp av ett samband mellan brottsannolikhet, medelvärde på säkerhetsfaktorn och sannolikhetsklassgränser som illustreras i Figur 1.
3. För varje sannolikhetsklassgräns: bedöm läge för gränsen med hjälp av den sökta säkerhetsfaktorn och de i beräkningssektionen utritade säkerhetsfaktorerna (lägsta säkerhetsfaktor, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0).
4. Rita ut koordinaterna för respektive glidyta bakkant på plankarta och markera vilken sannolikhetsklassgräns den avser.



Figur 1: Samband mellan brottsannolikhet p_f och medelvärde på säkerhetsfaktorn F , för olika värden på säkerhetsfaktorernas variationskoefficient V_F . (Berggren et al. 2011)

I GÄU redovisades skredrisk i tre nivåer för hela utredningsområdet. Skredrisken är en sammanvägning av sannolikhet för och konsekvenserna av ett skred, där gränserna mellan sannolikhetsklasser uttrycks som relativ brottsannolikhet och konsekvensklassgränserna uttrycks som samhällsekonomisk kostnad i Mkr (se SGI, 2012). Sambandet mellan sannolikhets- och konsekvensklasser och risknivåer åskådliggörs i riskmatrisen i Figur 2.



Figur 2: Riskmatrisen som användes i GÄU är uppbyggd av 5 konsekvensklasser och 5 sannolikhetsklasser. Risken delas in i tre nivåer; områden med låg skredrisknivå (gul), områden med medelhög skredrisknivå (orange) och områden med hög skredrisknivå (röd).

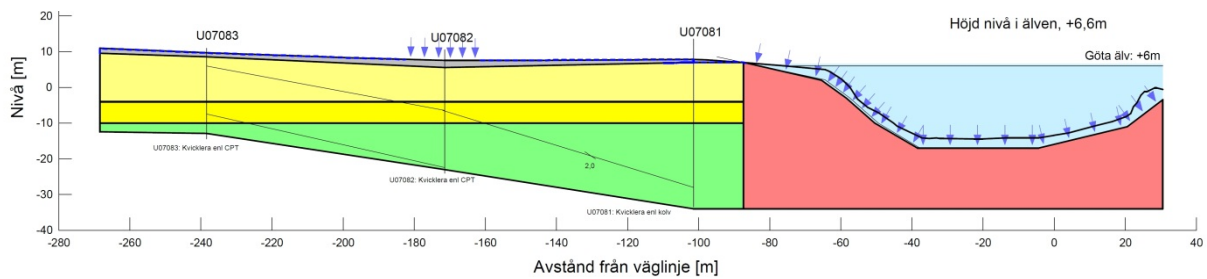
Skredsannolikhetsberäkningar i Göta älvutredningen efter erosionspåverkan

I Göta älvutredningen beräknades skredsannolikhet för ca 68 sektioner för dagens förhållanden. 21 sektioner i sammanlagt 23 varianter utvaldes för erosionsberäkningar. Av dessa sannolikhetsberäknades slutligen 19 sektioner för två olika erosionsscenarier: bottenerosion 1m + sidoerosion 4 m (1B4S), samt bottenerosion 3 m + sidoerosion 4 m (3B4S). I utredningen av erosionsförutsättningar i Göta älvdalen delades älven in i olika områden och resulterade i flera beräkningsfall för varje område. I skredsannolikhetsanalysen i GÄU användes för bottenerosionen ”beräkningsfall 3” för år 2100, som gav den högsta beräknade erosionen, och förenklades till ovanstående beräkningsfall. Detta gjordes konservativt, dvs. en beräknad erosion på 2m resulterade i beräkningsfallet 3m osv.

Erosionsskydd har tagits hänsyn till i de fall där de är inritade i de beräkningssektioner som skapades i GÄU. Där erosionsskydd finns har erosionen ritats som avtagande upp mot erosionsskyddet, och i strandlinjen antogs ingen erosion ske. I övrigt antogs erosionsskyddet inte påverka sido- och bottenerosion.

Samtliga studerade sektioner var ursprungligen beräknade i SLOPE/W. Tillvägagångssättet för sannolikhetsberäkningar med hänsyn till erosionsscenarier var att ändra geometrin i varje släntstabilitetsberäkning från nuvarande förhållanden till geometrin som den antas se ut efter

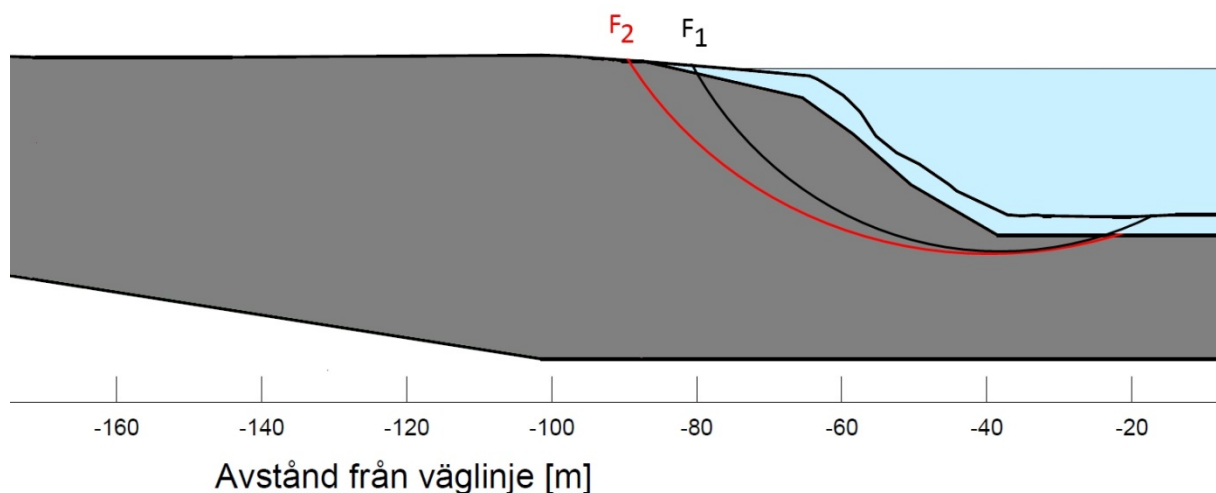
erosionsscenario, dvs. en sänkning av älvbotten med 1 eller 3 meter samt en förflyttning i sidled av gränsen mellan älv och jordlager med 4 meter, se exempel i Figur 3.



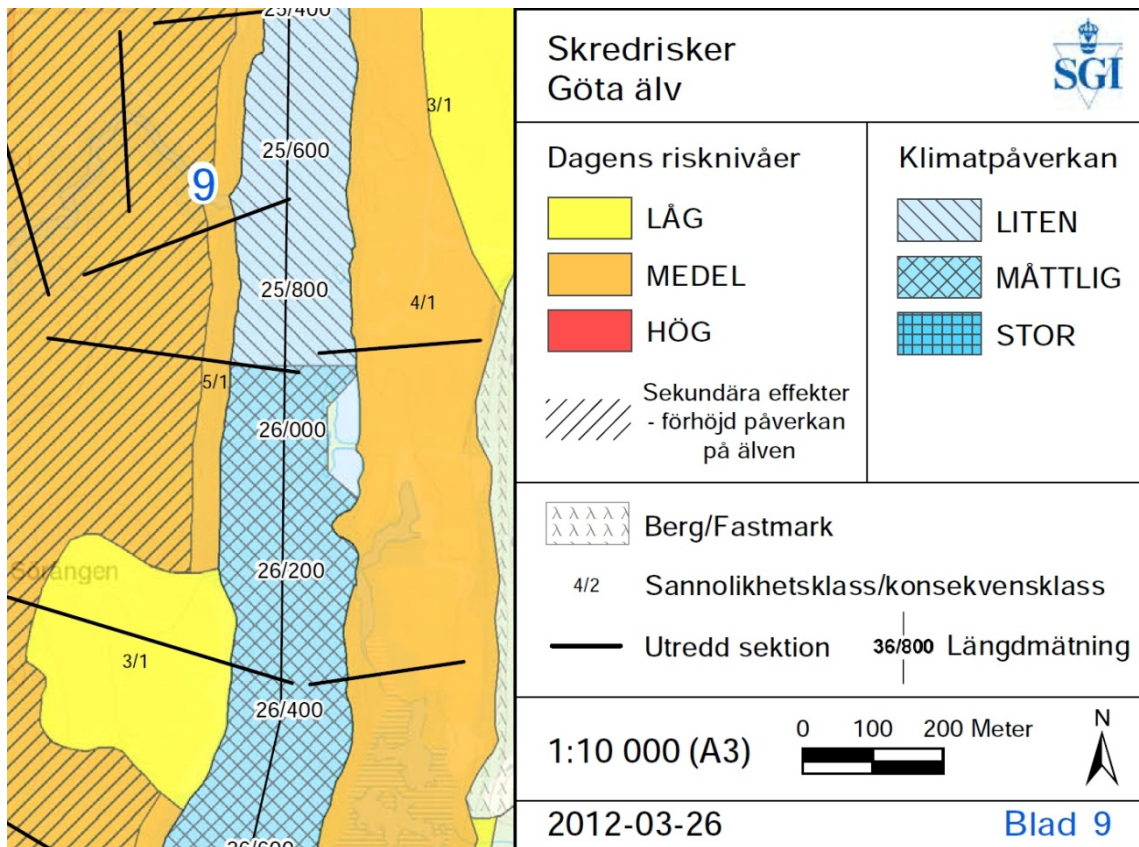
Figur 3: Gränsen mellan vatten och det röda fältet visar älvbottens läge efter erosionsscenario 3B4S. Den svarta linjen i vattnet markerar älvbottens läge i dagens situation.

För de 21 utvalda beräkningssektionerna beräknades procentuell förändring i säkerhetsfaktor, ΔF , för vardera av de två erosionsscenarioerna (Figur 4). Sedan beräknades genomsnittlig procentuell förändring i säkerhetsfaktor för vardera erosionsscenario, och utifrån dessa två förändringsmedelvärden beräknades säkerhetsfaktor efter erosion, F_{erosion} , för alla beräkningssektioner i GÄU. Variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn, V_F , i respektive sektion antogs vara oförändrad, och användes för att beräkna skredsannolikhet efter erosion, $P_{F, \text{erosion}}$ för varje beräkningssektion (Figur 6) enligt sambandet i Figur 1. Någon framtida skredriskkarta producerades inte inom GÄU, istället redovisades förändringen av skredrisk som liten, måttlig eller stor klimatpåverkan (Figur 5).

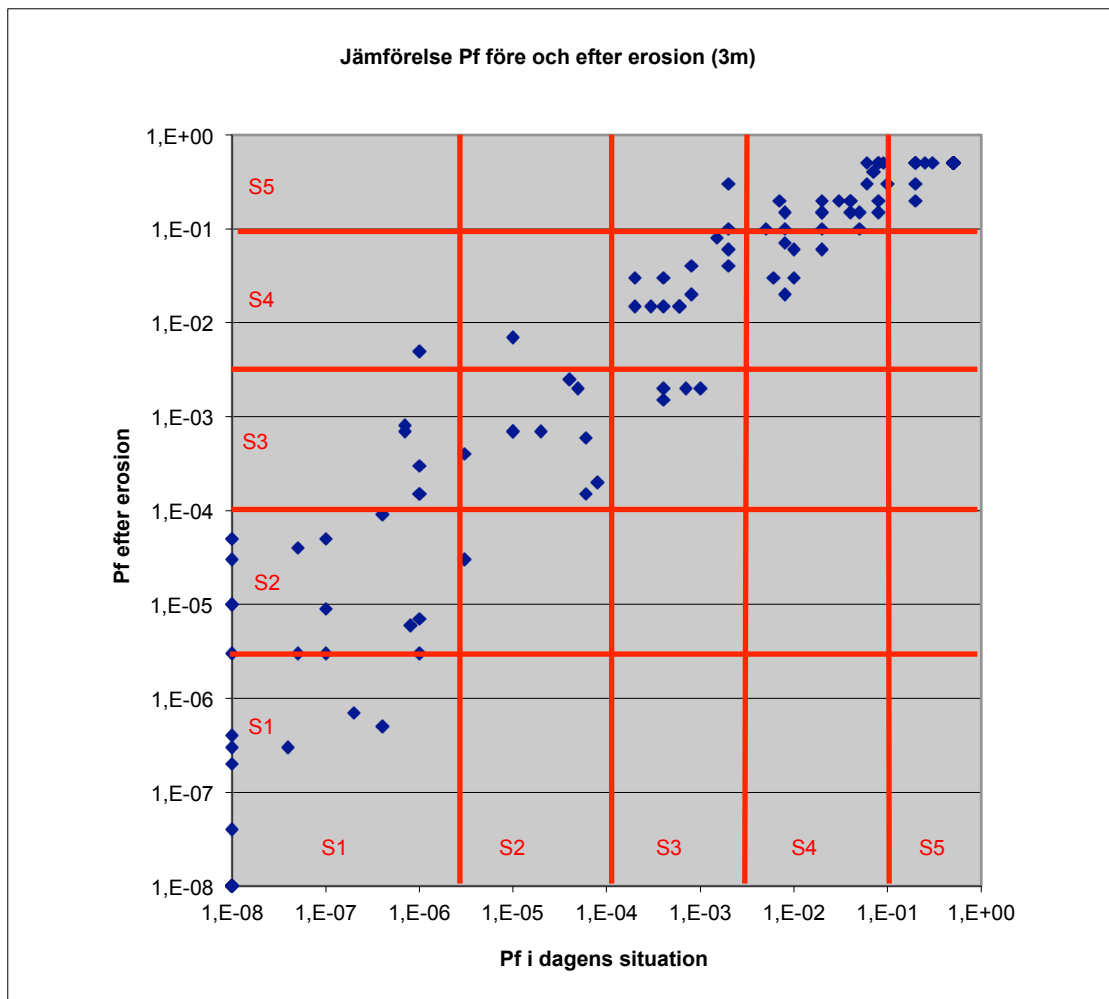
I GÄU undersöktes alltså hur skredsannolikheten förändras med erosionen, och hur högsta sannolikhetsklassen förändras för respektive sektion. Däremot undersöktes inte hur förändring av släntgeometrin påverkar utbredningen och läget av olika sannolikhetsklasser i sektionerna.



Figur 4: För var och en av de 21 beräkningssektionerna beräknades säkerhetsfaktor för dagens situation, F_1 , och säkerhetsfaktor efter erosionsscenario 1B4S och 3B4S, F_2 . Sedan beräknades genomsnittlig procentuell förändring av säkerhetsfaktor, ΔF , för beräkningssektionerna. Gränsen mellan vatten och det grå fältet visar älvbottens läge efter ett erosionsscenario. Den svarta linjen i vattnet markerar älvbottens läge i dagens situation.



Figur 5: I GÄU markerades förändringen av skredrisk direkt på älven som Liten, Måttlig eller Stor klimatpåverkan. Risknivåerna på kartan avser dagens situation. Bilden är modifierad från SGI (2012).



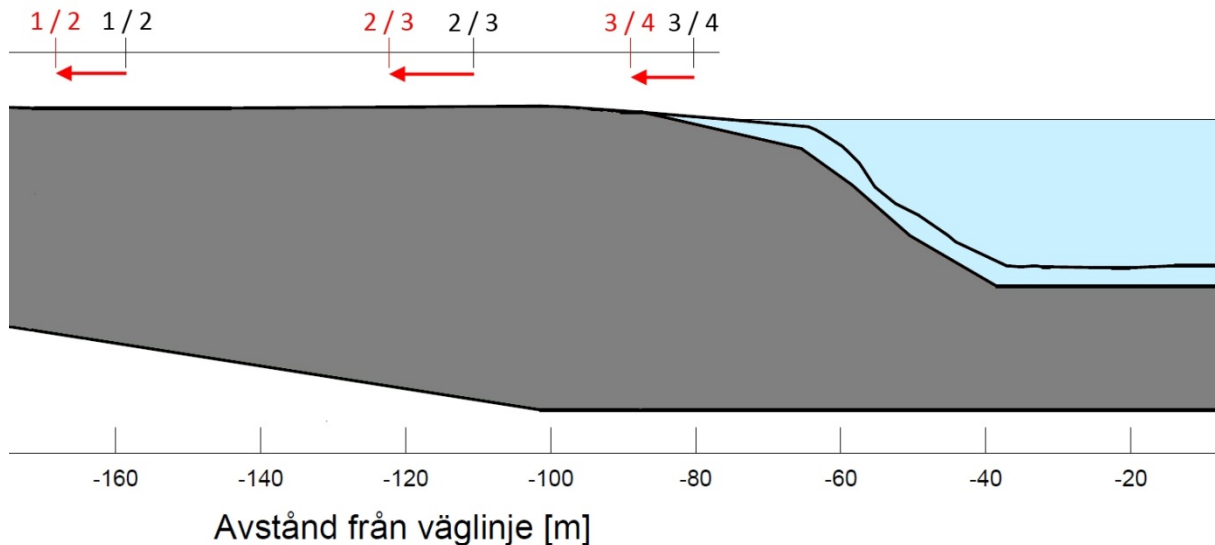
Figur 6: Med hjälp av det beräknade genomsnittliga ΔF , den sektionsspecifika V_F och sambandet i Figur 1 beräknades skredsannolikheten p_f efter erosion.

2 SYFTE OCH MÅL

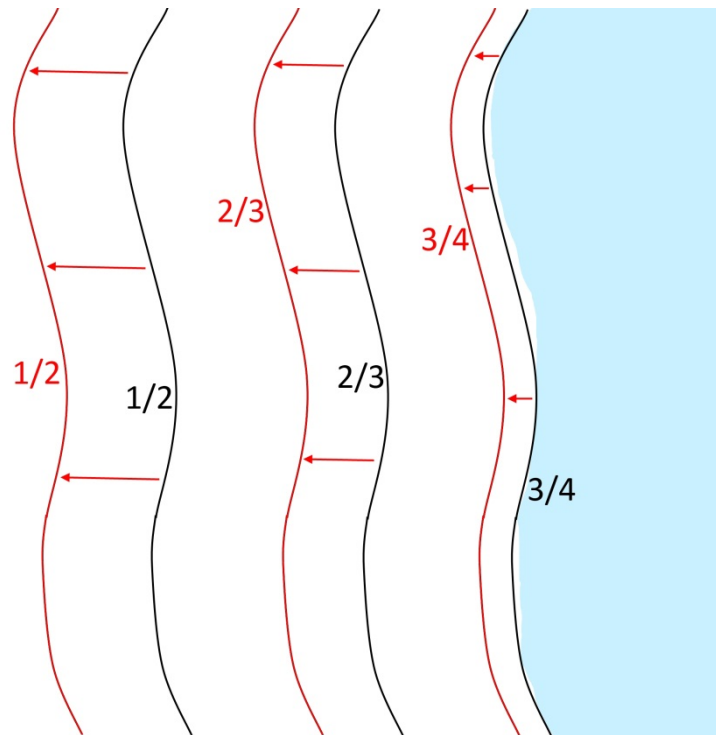
I det här uppdraget studeras resultaten från erosionsberäkningarna som utförts inom GÄU mer i detalj och analyseras ytterligare. Målet med uppdraget är att visa hur skredsannolikhet och förväntad utbredning av olika sannolikhetsklasser förändras med förväntade erosionseffekter. Vi undersöker om sannolikheten alltid ökar med erosionen, eller om det finns tillfällen då erosion kan ha lokala stabiliserande effekter. Ytterligare ett mål är att visa exempel på hur konsekvenser förändras baserat på förändringen i skredutbredning. Slutligen illustreras möjlig framtida risk i plan genom utsnitt av utredningsområdet inom GÄU för dagens situation och för ett erosionsscenario. Det är ett sätt att visa på möjligheterna för framtida analyser, även om bättre underbyggda erosionsscenarioer är ett måste för att så detaljerade karteringar ska bli relevanta.

3 METOD

I Göta älvutredningen beräknades en procentuell förändring av säkerhetsfaktorn för olika typsektioner. Tillsammans med variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn tog man fram sannolikhetsklass efter erosion för den mest sannolika glidytan i varje undersökt sektion. Vad är då nytt i föreliggande analys? I föreliggande analys studeras sannolikhetsklassgränsernas lägen i dagens situation och för de två erosionsscenarierna, och förändringen kvantifieras (Figur 7). I tillägg visas hur sannolikhetsklassgränserna efter erosion kan karteras i plan på samma sätt som inom GÄU gjorts för dagens förhållanden (Figur 8).



Figur 7: Gränserna mellan sannolikhetsklasser för dagens situation och efter erosion markeras i figuren. Med t.ex. "1 / 2" avses gränsen mellan sannolikhetsklass 1 och 2, där klass 1 är belägen till vänster och klass 2 till höger om markeringen. Läget för sannolikhetsklassgränserna beräknades för dagens situation (svart text) och för respektive erosionsscenario (röd text). Avståndet mellan de svarta markeringarna "1 / 2" och "2 / 3" är utbredningen av sannolikhetsklass 2 i dagens situation. Sedan jämfördes utbredningen av sannolikhetsklasserna i sektionen i dagens situation med utbredningen efter erosion enligt erosionsscenario. Gränsen mellan vattnet och det grå fältet visar älvbottens läge efter ett erosionsscenario. Den svarta linjen i vattnet markerar älvbottens läge i dagens situation.



Figur 8: Skiss över hur sannolikhetsklassgränserna i plan kan förflyttas till följd av erosion. Jämför sektionsskissen i Figur 7.

Utgångspunkten för analysen var de 19 sektioner som inom GÄU sannolikhetsberäknades både för nuvarande förhållanden och för erosionsscenarierna 1B4S samt 3B4S. För varje sektion beräknades nya koordinater för gränsdragning av säkerhetsklass för erosionsscenario 1B4S samt 3B4S enligt principen för gränsdragning av sannolikhetsklasser som beskrivs ovan. Variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn antogs vara oförändrad. Koordinatsystemet har origo där sektionen korsar väglinjen, och klassgränserna beräknades i en dimension (längs sektionen, ofta ca 90 graders vinkel relativt väglinjen/strandlinjen). Koordinat för strandlinjen vid lägsta lågvatten (LLW) vid varje sektion togs också ut ur beräkningsfilen, för nuvarande förhållanden och för erosionsscenarierna. Slutligen beräknades utbredningen av olika skredsannolikhetsklasser för varje sektion för nuvarande förhållanden och för scenario 1B4S samt 3B4S. Summering och jämförelser av utbredning av skredsannolikhetsklasser gjordes både i absoluta tal och som procentuell förändring. Utbredning av sannolikhetsklass 1 studeras inte eftersom utbredningen bakåt från älven inte har någon begränsning.

Två sektioner valdes ut för att ge exempel på visualisering och riskförändring till följd av förändrade sannolikhetsklassgränser om erosionsscenario 3B4S besannas.

Sannolikhetsklassgränserna för erosionsscenario 3B4S ritades in på samma sätt och med tillgång till samma kartunderlag som när gränserna för nuvarande förhållanden ritades inom GÄU. Risknivågränser för erosionsscenarierna beräknades slutligen genom sammanvägning av sannolikhet och konsekvens med samma GIS-beräkningsmodell som användes för beräkning av risknivågränser inom GÄU.

4 RESULTAT

4.1 Urval och bortfall

I GÄU delades älv dalen in i 10 geografiska delområden. Sex olika typsektioner identifierades baserat på geometri: 1, 2, 4, 5, 5b och 7. De 19 sektioner som var utgångspunkten i föreliggande analys är väl spridda över dessa olika delområden och typsektioner, se Tabell 1.

Tabell 1: Sektioner som valts ut för att beräkna förändring av sannolikhet p.g.a. erosion.

Sektion	Delområde	Typsektion	Kommentar
E26360	7	1	
E28420	7	4	
E55040	9	1 ev. 5	
E70237	9	2	
E72678	9	5b	
V2930	6	2	
V33350	4	7	
V34050	4	5	
V67620	2	1	
V29910	5	2	
V27470	5	7	
V35900	4	5b	
E34600	8	7	Hela slänten ligger i sannolikhetsklass 1
E51400	9	4	Bakslänten är dimensionerade, påverkas inte av erosion
N100040	3	2	Hela slänten ligger i sannolikhetsklass 1
V05015	6	5	Hela slänten ligger i sannolikhetsklass 1
V66800	2	2	Hela slänten ligger i sannolikhetsklass 1
V72935	1	4	Hela slänten ligger i sannolikhetsklass 1
V73460	1	1	Undervattensslänt

När analysen utförts stod det klart att två av de ursprungligen 19 sektionerna inte kunde tas med i jämförelsen. För en sektion fanns den dimensionerande glidyten vid bakslänten (helt ovan vattenytan) och påverkas således inte av erosion. För en sektion var den dimensionerande glidyten belägen helt under vattenytan. Denna sektion påverkas visserligen av erosion, men sannolikhetsklassningen ovan vattenytan påverkas inte av resultatet.

För fem sektioner var skredsannolikhetsklassen 1 i hela sektionen både för nuvarande förhållanden och för de två erosionsscenarierna. Dessa sektioner redovisas inte nedan, utan fokus är på de 12 sektioner där sannolikheten förändras.

Två av sektionerna är inte tillräckligt långa för att sannolikhetsklassen ska gå ända ner till 1. Dessa har tagits med i jämförelsen för de sannolikhetsklassgränser som finns beräknade för både nuvarande förhållanden och för något av erosionsscenarierna. En sektion saknade beräkning av scenariot 1B4S. Denna sektion har bara tagits med i jämförelsen mellan nuvarande förhållanden och scenario 3B4S.

Anledningen till att inte fler sektioner valdes ut och analyserades när bortfallet konstaterades är det tidskrävande arbetet med att förändra geometrin i beräkningsfilerna och utföra nya stabilitetsberäkningar, ett arbete som för de analyserade sektionerna utfördes inom GÄU.

4.2 Skredsannolikhhet i dagens situation och med två erosionsscenarioer

Beräkningar för de 12 sektioner där sannolikheten förändras med erosionsscenarierna visas i Tabell 2. Sannolikhetsklassgränser som saknas i en sektion markeras med ”-” om de inte förekommer i sektionen. Markeringen ”**” betyder att beräkningssektionen är för kort för att täcka in gränserna och ”***” betyder att SLOPE/W-beräkning helt saknas för erosionsscenarioet.

För erosionsscenario 1B4S så består förändringen av utbredning för de flesta sektioner i ett byte från en sannolikhetsklass till en annan: den sammanlagda utbredningen av sannolikhetsklasser 2-5 är i princip samma för nuvarande förhållanden som för 1B4S för 10 av sektionerna. För två sektioner ökar den sammanlagda utbredningen av sannolikhetsklasserna 2-5 med +38 respektive +24 meter. Total förändring av utbredningen av sannolikhetsklasser 2-5 för alla sektionerna är +80 meter, att jämföras med total utbredning för nuvarande förhållanden: 688 meter (dvs. 12 % arealökning).

För erosionsscenario 3B4S så ökar den sammanlagda utbredningen av sannolikhetsklasser 2-5 betydligt för 4 sektioner: +136, +52, +34 och +34 meter. För övriga sektioner är ökningen liten, och för en sektion minskar utbredningen: -14 meter. Total förändring av utbredningen av sannolikhetsklasser 2-5 för alla sektionerna är +302 meter, att jämföras med total utbredning för nuvarande förhållanden på 688 meter (dvs. 44 % arealökning).

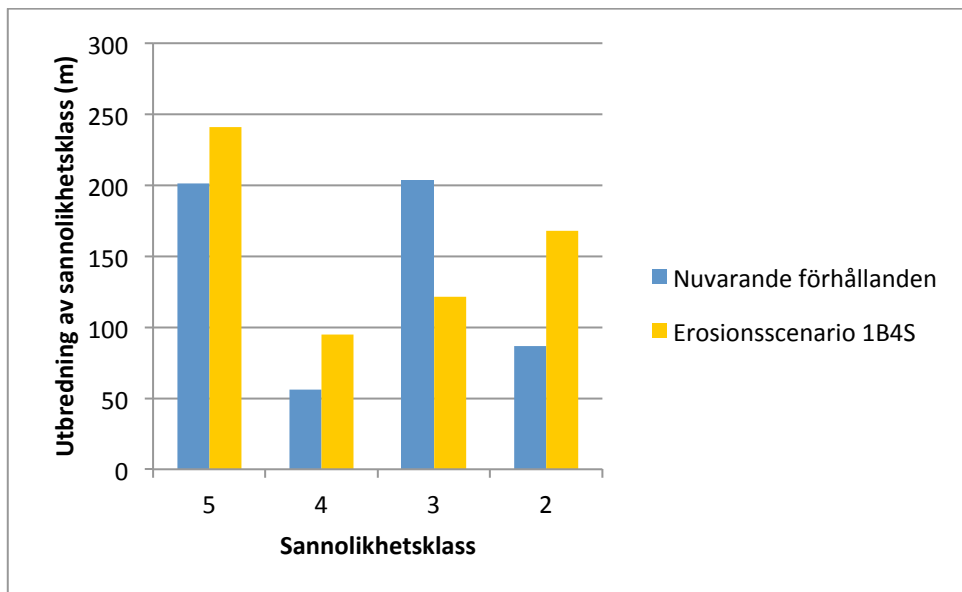
En anledning till att skredutbredningen kan minska efter erosion är att när ett lerlager som överlagrar friktionsjord eroderas till ett tunnare lerlager så kan glidytns djup begränsas av friktionsjorden, vilket kan resultera i högre säkerhetsfaktorer för glidyterna. Korta glidytor kan vara grundare och gå helt i lerlager även efter erosion. Effekten blir att korta glidytor med mindre utbredning är mer sannolika än långa glidytor med stor utbredning.

Tabell 2: Sammanställning av beräknade sektioner för nuvarande förhållanden (blåmarkerade rader), och för erosionsscenarierna 1B4S (gulmarkerade rader) och 3B4S (grönmarkerade rader). I raderna "Förändring utbredning" och "Procentuell förändring" jämförs utbredning av sannolikhetsklasser i erosionsscenariot med nuvarande förhållanden. För fält markerade med * så är beräkningssektionen för kort för att hitta koordinaten. För fält markerade med ** så saknas SLOPE/W-beräkning för erosionsscenariot.

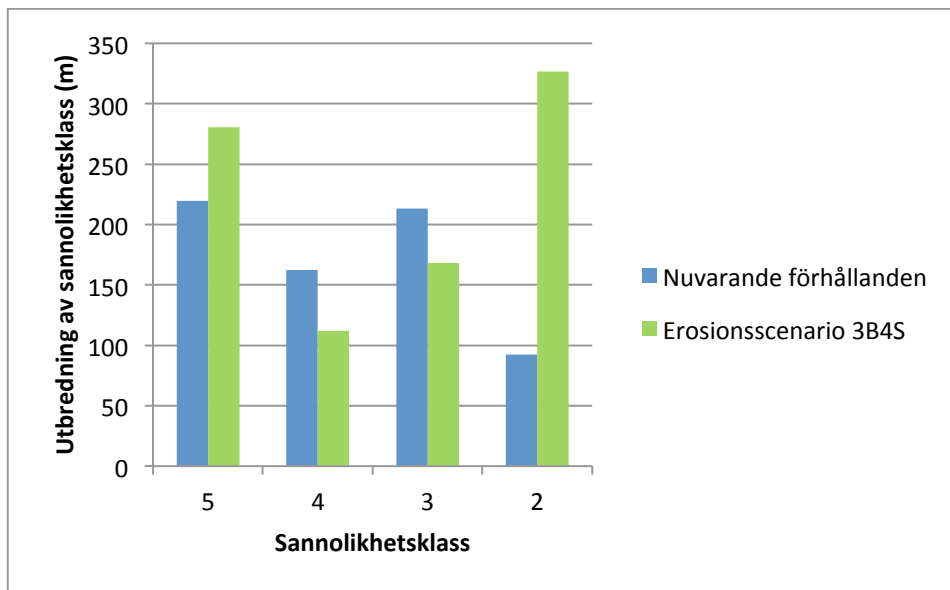
Sektion	E26360	E28420	E55040	E70237	E72678	V2930	V33350	V34050	V67620	V29910	V27470	V35900		
Nuvarande förhållanden	Strandlinje	-76	-125	-142	-78	-131	64	34	22	-17	87	111	44	
	Koordinat för S-klassgräns	5-4	-73	-	-	-	-	-	-	-	180	220	62	
		4-3	-87	-	-	-94	-	-	-	9	280	*	69	
		3-2	-112	-195	-	-100	-176	-	-	69	20	0	*	79
		2-1	-123	-213	-	-108	-180	-	-	106	28	0	*	84
	Utbredning av S-klass (m)	5	0	0	0	0	0	0	0	0	93	109	18	
		4	14	0	0	16	0	0	0	26	100	*	7	
		3	25	70	0	6	45	0	0	47	11	*	10	
		2	12	18	0	8	4	0	0	37	8	*	6	
	1B4S	Strandlinje	-76	-125	-143	-82	-131	69	34	22	-13	91	115	44
		Koordinat för S-klassgräns	5-4	-74	-	-	-	-	-	-	-	222	225	**
			4-3	-82	-	-	-97	-174	-	-	18	*	*	**
			3-2	-112	-	-	-107	-180	-	-	87	28	*	**
2-1			-127	-210	-	-112	-182	-	58	116	35	*	**	
Utbredning av S-klass (m)		5	0	0	0	0	0	0	0	0	131	110	**	
		4	8	0	0	15	43	0	0	31	*	*	**	
		3	30	0	0	10	7	0	0	65	10	*	**	
		2	15	85	0	5	2	0	24	30	8	*	**	
Förändring utbredning		5	0	0	0	0	0	0	0	0	38	2	**	
		4	-6	0	0	-1	43	0	0	5	*	*	**	
		3	6	-70	0	4	-39	0	0	18	-1	*	**	
		2	4	67	0	-3	-2	0	24	-8	-1	*	**	
Procentuell förändring	5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	41%	1%	**		
	4	-43%	0%	0%	-6%	ökning	0%	0%	19%	*	*	**		
	3	22%	-100%	0%	67%	-86%	0%	0%	38%	-9%	*	**		
	2	30%	367%	0%	-38%	-50%	0%	ökning	-20%	-6%	*	**		
3B4S	Strandlinje	-76	-125	-143	-82	-131	69	34	22	-13	91	115	44	
	Koordinat för S-klassgräns	5-4	-78	-	-	-97	-	-	-	9	218	230	-	
		4-3	-115	-	-	-107	-178	-	-	29	*	*	-	
		3-2	-126	-195	-	-112	-180	-	-	94	37	*	-	
		2-1	-137	-219	-279	-122	-187	103	86	114	45	*	71	
	Utbredning av S-klass (m)	5	2	0	0	15	0	0	0	22	127	115	0	
		4	37	0	0	10	47	0	0	21	*	*	0	
		3	12	70	0	5	2	0	0	72	8	*	0	
		2	11	24	136	10	7	34	52	20	8	*	27	
	Förändring utbredning	5	2	0	0	15	0	0	0	22	34	7	-18	
		4	23	0	0	-6	47	0	0	-6	*	*	-7	
		3	-13	0	0	-1	-43	0	0	25	-3	*	-10	
		2	-1	6	136	2	3	34	52	-18	-1	*	21	
Procentuell förändring	5	ökning	0%	0%	ökning	0%	0%	0%	0%	ökning	37%	6%	-100%	
	4	161%	0%	0%	-38%	ökning	0%	0%	0%	-21%	*	*	-100%	
	3	-53%	0%	0%	-17%	-96%	0%	0%	53%	-27%	*	*	-100%	
	2	-4%	32%	ökning	25%	75%	ökning	ökning	-47%	-6%	*	*	382%	

Utbredning av sannolikhetsklasserna i de undersökta sektionerna för nuvarande förhållanden och efter erosionsscenario 1B4S summeras i Figur 9. Vissa sektioner saknar värde för utbredning av några sannolikhetsklasser. Jämförelsen har därför gjorts genom summering av sannolikhetsklassens utbredning för de sektioner som har värden både för nuvarande förhållanden och för erosionsscenario 1B4S för den aktuella sannolikhetsklassen. På samma sätt har utbredningen för nuvarande förhållanden jämförts med utbredningen för erosionsscenario 3B4S (Figur 10).

Antalet sektioner som ligger till grund för jämförelsen av respektive sannolikhetsklass varierar mellan 9 och 12, men inom respektive sannolikhetsklass och scenario jämförs samma sektioner. Skillnaden i urval av sektioner som ingår i jämförelserna i Figur 9 och Figur 10 syns på staplarna för ”nuvarande förhållanden” som skiljer sig åt i de två figurerna.

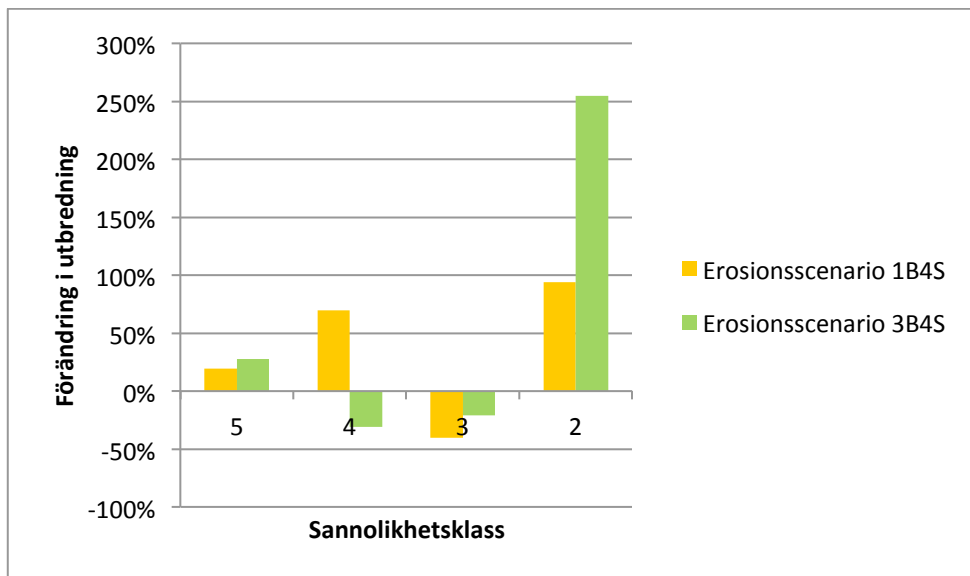


Figur 9: Summering av utbredningen av varje sannolikhetsklass 2, 3, 4 och 5 för nuvarande förhållanden samt för erosionsscenario 1B4S. Jämförelsen görs med alla tillgängliga sektioner: 11 sektioner för sannolikhetsklass 5 och 9 sektioner för övriga sannolikhetsklasser.



Figur 10: Summering av utbredningen av varje sannolikhetsklass 2, 3, 4 och 5 för nuvarande förhållanden samt för erosionsscenario 3B4S. Jämförelsen görs med alla tillgängliga sektioner: 12 sektioner för sannolikhetsklass 5 och 10 sektioner för övriga sannolikhetsklasser.

I Figur 11 presenteras beräkningsresultaten som procentuell förändring i utbredning för de två erosionsscenarierna jämfört med dagens situation. Summan av utbredning (alla beräknade sektioner) i en sannolikhetsklass för erosionsscenario 1B4S jämförs med utbredningen för nuvarande förhållanden för samma sektioner. Jämförelser mellan nuvarande förhållanden och 3B4S har gjorts på samma sätt. Procentuell förändring har beräknats utifrån samma principer som ovan, dvs. jämförelsen mellan nuvarande förhållanden och erosionsscenario 3B4S har gjorts för samma urval av sektioner, men sektionerna i urvalet varierar mellan olika sannolikhetsklasser och mellan de två erosionsscenarierna.



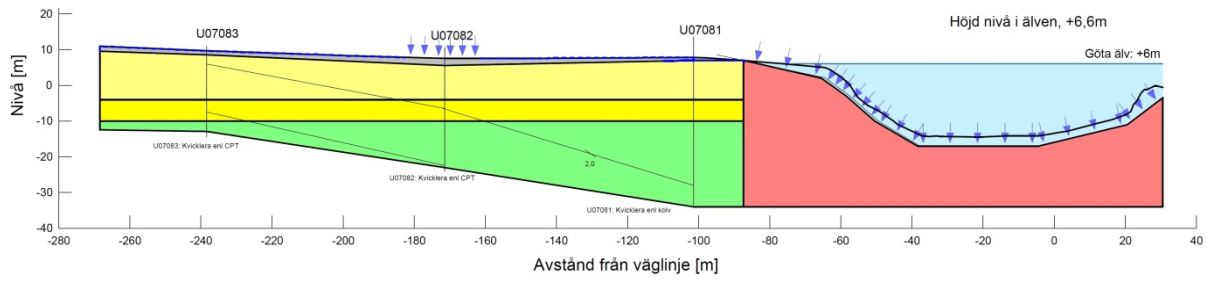
Figur 11: Procentuell förändring av utbredning av sannolikhetsklasser 2, 3, 4 och 5 för erosionsscenarierna 1B4S och 3B4S jämfört med nuvarande förhållanden. Förändringen har beräknats utifrån underlaget till Figur 9 och Figur 10. Det är alltså inte exakt samma sektioner som visas för de två erosionsscenarierna, men de har jämförts med sina respektive urval inom de nuvarande förhållandena.

För de studerade sektionerna ökar utbredningen av sannolikhetsklass 5 med 20-30 % för de två erosionsscenarierna. För sannolikhetsklass 4 pekar scenarierna åt olika håll: 1B4S ger 60 % större utbredning, men 3B4S ger tvärtom en minskning med 30 % relativt nuvarande förhållanden. För sannolikhetsklass 3 minskar utbredningen med 20-40 % för scenarierna. För sannolikhetsklass 2 ökar utbredningen avsevärt, med 90 % för 1B4S och hela 250 % för 3B4S.

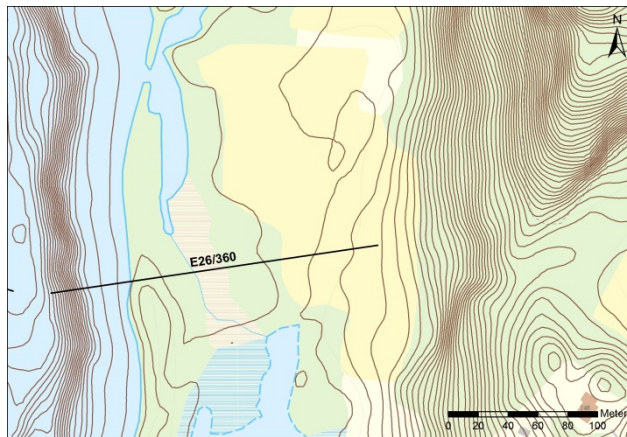
Exempel på ny gränsdragning av skredsannolikhetsklasser

Nedan presenteras två exempel på förändring av sannolikhetsklass och skredrisk till följd av förändrade sannolikhetsklassgränser om erosionsscenario 3B4S besannas. Efter beräkning av sannolikhetsklassgränser i sektionen har en bedömning av sannolikhetsklassgränser i plan gjorts på samma sätt som i GÄU.

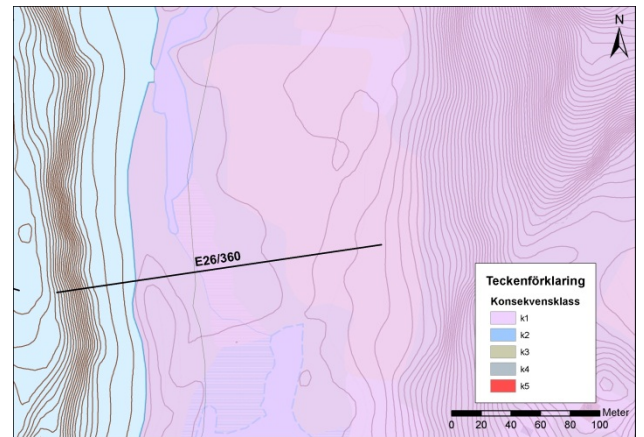
I exemplet i Figur 13 visas bakgrundskarta med inritad sektion, konsekvenskarta, sannolikhet för nuvarande förhållanden och efter erosion samt skredrisk för nuvarande förhållanden och efter erosion. Tvärsektionen återges i Figur 12. Konsekvenskartan ska tolkas så att ett skred som sträcker sig från älvstranden och bakåt resulterar i den högsta av de konsekvensklasser som skredområdet täcker. I det aktuella området finns inga stora värden, så konsekvensklassen är 1 även för skred som täcker hela sektionen från älv till sektionens bakkant. Konsekvenserna antas inte förändras med tiden. För nuvarande förhållanden hör största delen av området till sannolikhetsklass 1 med en förhöjd sannolikhet (klass 2 och 3) närmst älvstranden. Efter erosion har sannolikhetsklassgränserna flyttats längre från älven och det yttersta området tillhör nu sannolikhetsklass 4. Området närmst älven ändrar då risknivå från Låg till Medelhög (se Figur 2).



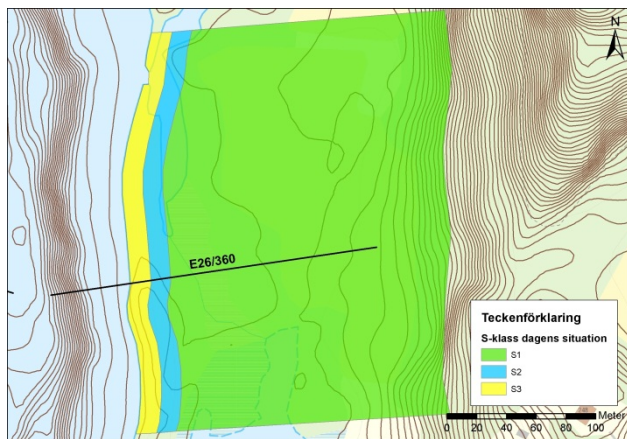
Figur 12: Tvärsektionens utseende för exemplet i Figur 13. De olivfärgade fälten avser jordar med olika geotekniska egenskaper. Ursprunglig älvbotten markeras med den svarta linjen. Gränsen mellan vattnet och det röda fältet utgör framtida älvbotten enligt erosionsscenario 3B4S.



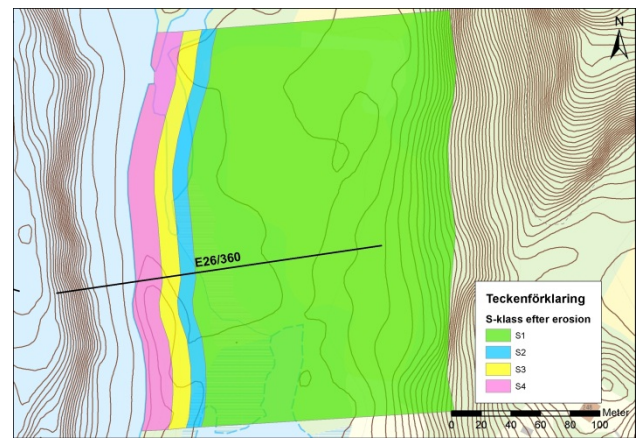
a)



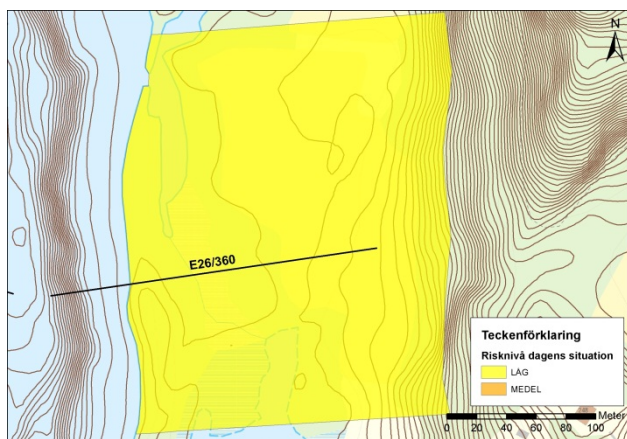
b)



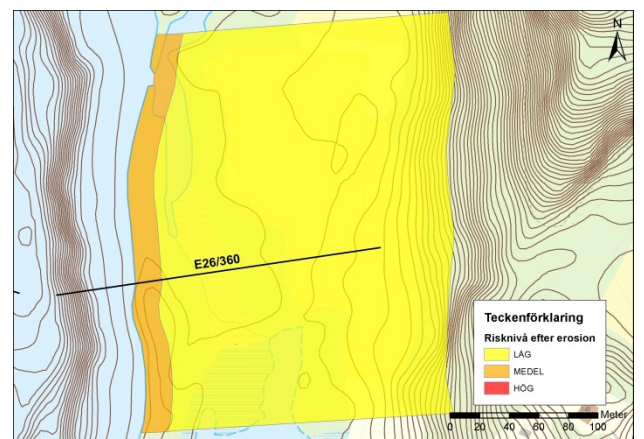
c)



d)



e)

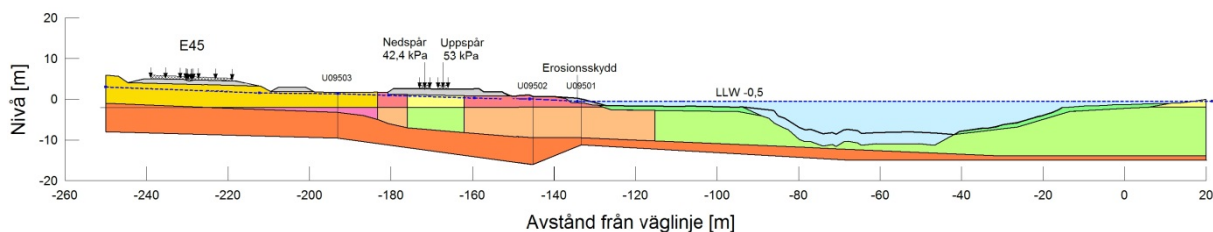


f)

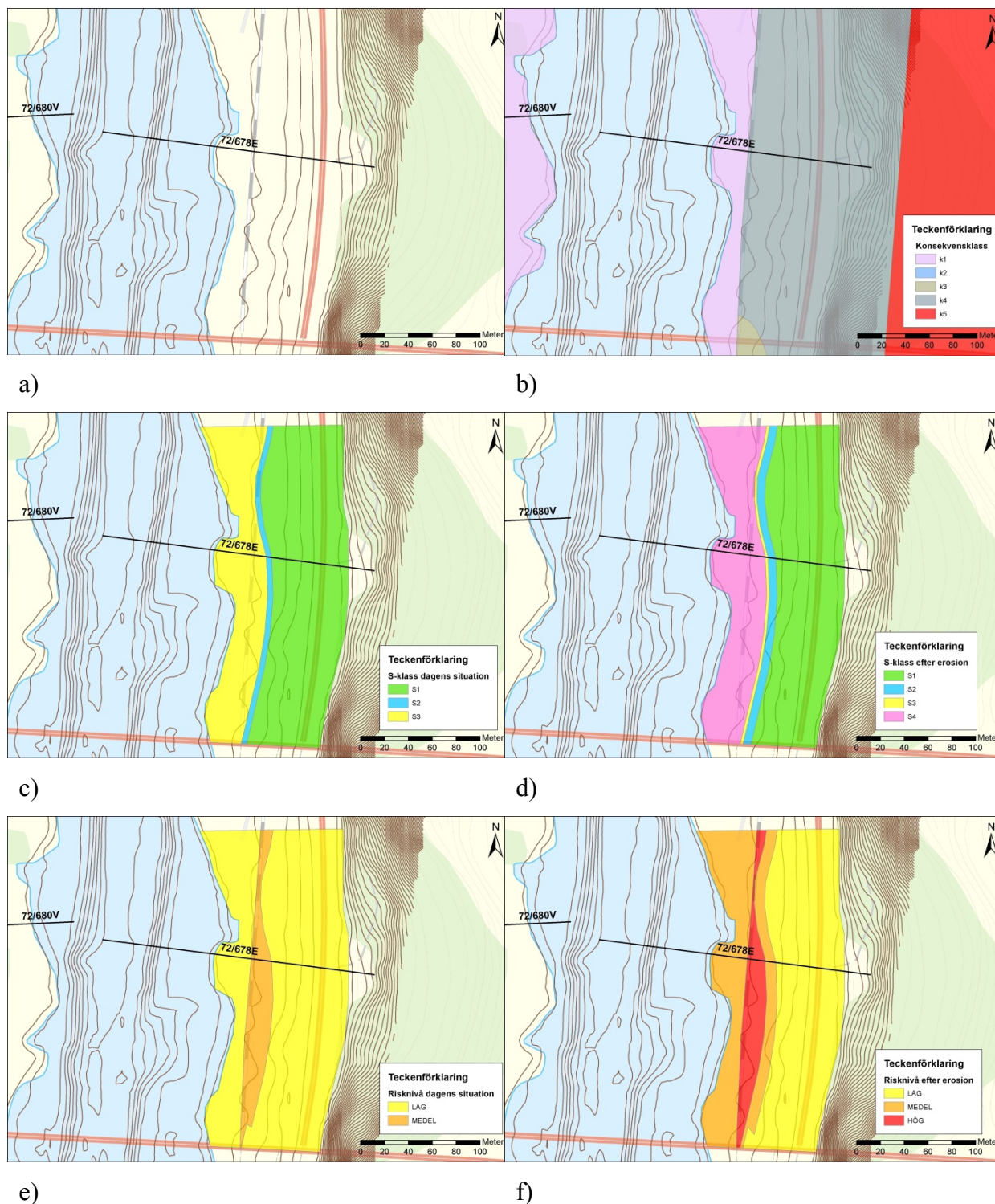
Figur 13: Exempel på hur sannolikhetsklasser och risknivåer ser ut för dagens förhållanden och för erosionsscenario 3B4S. Älven är belägen till vänster i kartan, och sektionen som går vinkelrätt mot älven är markerad i svart. a) bakgrundskarta; b) konsekvensklass där hela sektionen ligger inom konsekvensklass 1; c) sannolikhetsklass i dagens situation; d) sannolikhetsklass efter erosionsscenario 3B4S; e) risknivå i dagens situation; f) risknivå efter erosionsscenario 3B4S.

Exemplet i Figur 15 ligger i anslutning till nyanlagd järnväg och väg. Konsekvensklassen är 1 närmst älven. Ett skred som drabbar Norge/Vänerbanan har konsekvensklass 4, och konsekvensklassen är densamma om även E45 drabbas. Området närmst älven upp till och med en del av järnvägen har sannolikhetsklass 3, vilken snabbt övergår till klass 1 längre från älven. Efter erosion ökar sannolikhetsklassen nära älven från 3 till 4, och i övrigt flyttar klassgränserna något från älven. Skredrisknivån i området kring järnvägen ökar då från Medelhög till Hög, och i området mellan järnvägen och älven ökar den från Låg till Medelhög. Tvärsektionen återges i Figur 12.

I ovanstående exempel har utgångspunkten varit de geotekniska beräkningar som ingått i GÄU. Där ingår en nyanlagd järnväg med tillhörande grundförstärkning i form av KC-pelare. Erosionen i sektionen antogs inte påverka undervattenterrassen närmst älvstranden (koordinater ca -90 till -130). Därför har inte erosionsskyddet i strandkanten någon påverkan på de studerade erosionsscenarierna.



Figur 14: Tvärsektionens utseende för exemplet i Figur 15. De olikfärgade fälten avser jordar med olika geotekniska egenskaper. Ursprunglig älvbotten markeras med den svarta linjen. Gränsen mellan vattnet och det gröna fältet utgör framtida älvbotten enligt erosionsscenario 3B4S.



Figur 15: Exempel på hur sannolikhetsklasser och risknivåer ser ut för dagens förhållanden och för erosionsscenario 3B4S. Älven är belägen till vänster i kartan, och sektionen som går vinkelrätt mot älven är markerad i svart. a) bakgrundskarta; b) konsekvensklass där en del av sektionen har konsekvensklass 1 och en del konsekvensklass 4; c) sannolikhetsklass i dagens situation; d) sannolikhetsklass efter erosionsscenario 3B4S; e) risknivå i dagens situation; f) risknivå efter erosionsscenario 3B4S.

5 DISKUSSION

Utifrån de utförda beräkningarna kan man dra slutsatsen att effekterna av erosion ser väldigt olika ut i olika sektioner trots att den faktiska erosionsmängden förenklat antas vara lika stor och ha samma geometri i alla sektioner. I verkligheten varierar erosionen kraftigt längs med älven (Rydell et al., 2011). Därför är det viktigt att både kontinuerligt mäta erosion och att utföra detaljerade beräkningar av skredsannolikhet för ett framtida klimat (efter erosionspåverkan).

Den fulla potentialen av beräkningsunderlaget från GÄU utnyttjas inte när man, som i GÄU, endast undersöker förändring av den högsta skredsannolikheten och den högsta sannolikhetsklassen för nuvarande förhållanden och för erosionsscenarierna. Man kartlägger inte heller hela effekten av erosion på skredrisken. Denna analys visar betydelsen av utbredning av skredsannolikhetsklasserna, då ökad utbredning kan leda till högre riskklass i de fall då sannolikhetsklassgränsen förflyttas över en konsekvensklassgräns (jfr Figur 15 e-f). Sammanlagt ökade utbredningen av skredsannolikhetsklasser 2-5 i de analyserade sektionerna med 12 % för erosionsscenario 1B4S och med 44 % för 3B4S. Samtidigt innebär erosionsscenarierna i många fall att skredsannolikhetsklassen höjdes i olika punkter längs beräkningssektionerna. I jämförelse med kostnad för geotekniska fältundersökningar och traditionella stabilitetsberäkningar så är kostnaden för erosionsberäkningar låg.

Erosionsscenarierna innebär inte en ökad skredsannolikhet överallt, vilket tydligt framgår av Tabell 1. Fem av de undersökta sektionerna som har sannolikhetsklass 1 i dagens situation kommer inte att få en högre sannolikhetsklass för något av de studerade erosionsscenarierna. För en annan sektion innebär erosionsscenarierna en sänkning av sannolikhetsklasserna, troligen p.g.a. minskad lermäktighet i sektionen och därmed kortare glidytor.

Erosion är en avgörande faktor för att bedöma framtida skredrisk. De erosionsscenarier som tagits fram inom GÄU baseras på jämförelser av två bottenkarteringar som genomförts med relativt kort mellanrum (ca 6 år). För att kunna förstå och prognosticera erosion i Göta älvdalen krävs periodiska batymetriska mätningar i älven över många års tid, som ger längre tidsserier att bygga erosionsscenarier på. Eftersom erosionen har stor påverkan på skredsannolikhetsklassernas utbredning och därmed även på skredrisk så är det viktigt att kunna modellera erosionsmönster i ett långtidsperspektiv vid beräkning av skredsannolikhet för ett framtida klimat. Baserat på sådana detaljerade erosionsprognoser föreslås en beräkning av framtida skredsannolikhet sektionsvis och därefter kartering av framtida skredrisk i plan på det sätt som visas i föreliggande arbete.

6 REFERENSER

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.

Berggren, B, Alén, C, Bengtsson, PE, Falemo, S (2011). *Metodbeskrivning sannolikhet för skred: Kvantitativ beräkningsmodell*. Göta älvutredningen, Delrapport 28, Statens geotekniska institut, Linköping.

Rydell, B, Persson, H, Blied, L & Rankka, W (2011). *Erosionsförhållanden i Göta älv*. Göta älvutredningen, Delrapport 1. Statens geotekniska institut, Linköping.

SIGI (2012). *Skredrisker i Göta älv dalen i ett förändrat klimat*. Göta älvutredningen, Slutrapport del 2 -Kartläggning, Statens geotekniska institut, Linköping.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se