



**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**  
**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**



## **Parametrarnas betydelse för brottsannolikheten i Göta älvdalen**

**Varia 639**

Stefan Falemo

LINKÖPING 2012

|                |                                                                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Varia</b>   | Statens geotekniska institut (SGI)<br>581 93 Linköping                                                    |
| Beställning    | SGI – Informationstjänsten<br>Tel: 013-20 18 04<br>Fax: 013-20 19 14<br>info@swedgeo.se<br>www.swedgeo.se |
| ISSN           | 1100-6692                                                                                                 |
| ISRN           | SGI-VARIA-12/639-SE                                                                                       |
| Dnr SGI        | 1203-0218                                                                                                 |
| Uppdragsnr SGI | 14782                                                                                                     |



**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**  
**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

# Varia 639

## **Parametrarnas betydelse för brottsannolikheten i Göta älvdalen**

Stefan Falemo

# FÖRORD

Regeringen gav i ett regleringsbrev 2011 (M2011/3932/S) SGI i uppdrag att nyttiggöra material från Göta älvs uppdraget (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 älvtredningen 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. Skredsannolikheten är, i sin tur, en statistisk analys av säkerhetsfaktorn och de ingående parametrarnas spridning. I skredriskkartan framgår bara slutprodukten, dvs. den beräknade sannolikheten för skred.

Den här fördjupade geotekniska analysen har gjorts för att studera vilka parametrar som bidrar till osäkerheten i säkerhetsfaktorn, om spridningen av samtliga parametrar måste säkerställas eller om det är viktigare att fokusera på någon enstaka parameter samt eventuella geografiska variationer. 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 vilka parametrar som har betydelse för den skredsannolikhet som presenteras i kartorna.

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: Stefan Turesson, David Schälin och Azin Vahidi Adl. Den tekniska notisen internergranskades av Per-Evert Bengtsson, Marius Tremblay och Charlotte Cederbom.

Linköping 2012

Charlotte Cederbom

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|          |                                                                       |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>BAKGRUND .....</b>                                                 | <b>2</b>  |
| 1.1      | Göta älvutredningen.....                                              | 2         |
| 1.2      | Skredsannolikhetsmetodik.....                                         | 2         |
| 1.3      | Tillämpning av skredsannolikhetsmetodiken i Göta älvutredningen ..... | 4         |
| 1.4      | Parametrarnas betydelse för brottsannolikhhet .....                   | 5         |
| <b>2</b> | <b>SYFTE OCH MÅL .....</b>                                            | <b>5</b>  |
| 2.1      | Frågeställning .....                                                  | 5         |
| <b>3</b> | <b>METODIK.....</b>                                                   | <b>6</b>  |
| <b>4</b> | <b>ANALYSRESULTAT .....</b>                                           | <b>6</b>  |
| 4.1      | Översikt över parametrarnas bidrag till skredsannolikhhet.....        | 6         |
| 4.2      | Skjuvhållfasthet i detalj.....                                        | 8         |
| 4.3      | Geografiska områden.....                                              | 9         |
| 4.4      | Släntens geometri.....                                                | 13        |
| <b>5</b> | <b>DISKUSSION OCH SLUTSATSER .....</b>                                | <b>18</b> |
| 5.1      | Allmänt.....                                                          | 18        |
| 5.2      | Geografi .....                                                        | 18        |
| 5.3      | Geometri .....                                                        | 18        |
| 5.4      | Avslutande .....                                                      | 18        |
| <b>7</b> | <b>REFERENSER.....</b>                                                | <b>20</b> |

# **1 BAKGRUND**

## **1.1 Göta älvutredningen**

I Göta älvutredningen (GÄU) utfördes en översiktlig skredriskanalys för Göta älvdalen (SGI 2012). Risken definierades som en funktion av sannolikhet och konsekvens, och metodik för konsekvensanalys och sannolikhetsanalys utvecklades/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 beskrivs i detalj i Berggren et al (2011) och sammanfattas i SGI (2012). Tillämpning av metodiken, anpassning och förenkling för beräkningar i Göta älvutredningen för dagens förhållanden och efter klimatpåverkan i form av erosion beskrivs i SGI (2012).

## **1.2 Skredsannolikhetsmetodik**

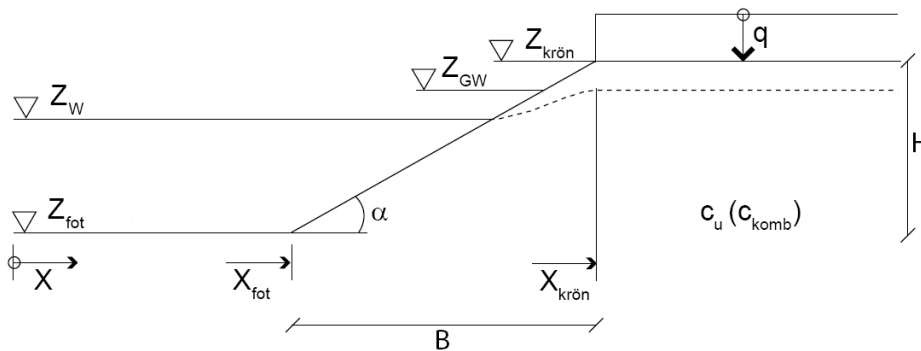
Med den använda sannolikhetsmetodiken beräknas sannolikheten för att säkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott är mindre än 1 med beaktande av de ingående parametrarnas spridning. Den sannolikhet som beräknas avspeglar emellertid inte ett värde för hur stor sannolikheten är för att skred uppkommer i slänten 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. Beräkning av sannolikhet för brott har genomförts enligt en statistisk metod kallad FORM, First Order Reliability Method. Med stöd av använd geometri och egenskaper i utförda traditionella stabilitetsanalyser gör man en idealisering av slänten enligt Janbus direktmetod (Janbu, 1954) och skapar en för säkerhetsfaktor ekvivalent slänt (Figur 1).

Den idealiserade slänten (Figur 1) beskrivs med:

- koordinater för släntfot; längsled,  $X_{\text{fot}}$ , och nivå,  $Z_{\text{fot}}$
- 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,  $\gamma_w$

Varje glidyta beskrivs med:

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



**Figur 1: Geometri för den idealiserade slänten (SGI 2012).**

Med stöd av medelvärde och standardavvikelse för säkerhetsfaktorn beräknas säkerhetsindex  $\beta$  enligt följande uttryck:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_{\ln F}}{\sigma_{\ln F}} \approx \frac{\ln(\mu_F)}{V_F} \quad (1)$$

där

$\mu$  = medelvärde

$\sigma$  = standardavvikelse

$V$  = variationskoefficient

$M$  = säkerhetsmarginal (marginal mot brott)

$F$  = säkerhetsfaktor

Sannolikheten för skred,  $p_F$ , beräknas därefter enligt följande uttryck:

$$p_F = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

där

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

### 1.3 Tillämpning av skredsannolikhetsmetodiken i Göta älvutredningen

Egenskaperna för variablerna  $c_u$ ,  $\gamma$ ,  $x_{krön}$ ,  $x_{fot}$ ,  $z_{krön}$  och  $z_{fot}$  angavs med de statistiska måtten medelvärde och standardavvikelse. Övriga parametrar behandlades deterministiskt. Sektionerna delades in i ett antal slänttyper (Figur 6).

Utredningsområdet i Göta älvdalen delades in 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.

För varje geografiskt område/grupp bestämdes representativa variationskoefficienter för odränerad skjuvhållfasthet och tunghet enligt riktlinjer angivna av Berggren et al. (2011). Variationskoefficienten för skjuvhållfasthet påfördes en variansreduktion av 0,6 och sorterades därefter i tre grupper: liten, medelstor och stor variation. För sektioner där den kombinerade analysen var dimensionerande antogs variationskoefficienter för kohesionsinterceptet och friktionsvinkeln till 0,06. Osäkerhet i slänternas geometri valdes beroende på släntens lutning, där en brantare slänt resulterade i högre osäkerhet. Indelning av i utredningen ingående slänter gjordes i grupperna liten och medel enligt förslag givna av Berggren et al. (2011). Gränserna för indelning i grupper sammanställs i Tabell 1.

För en sektion i varje grupp beräknades med ovan beskrivna sannolikhetsmetodik variationskoefficient för säkerhetsfaktorn,  $V_F$ . Övriga sektioner inom gruppen (samma släntform och likartade osäkerheter i geometri, odränerad skjuvhållfasthet och tunghet) antogs ha samma  $V_F$ . I Göta älvutredningen beräknades totalt 68 sektioner med den beskrivna metodiken, i övriga sektioner beräknades skredsannolikheten  $m$  h a ett värde på  $V_F$  som ansågs representativt för aktuell sektion.

Sensitivitetsfaktorer för variablerna  $c_u$ ,  $\gamma$ ,  $x_{krön}$ ,  $x_{fot}$ ,  $z_{krön}$  och  $z_{fot}$  beräknades som ett delresultat i skredsannolikhetsberäkningen. Sensitivitetsfaktorn för en variabel beskriver hur stor andel av variationen i säkerhetsfaktor som härrör från variationen hos variabeln.

**Tabell 1: Sammanställning av de gränser för indelning i grupper avseende variation hos olika variabler som användes i GÄU, utifrån SGI (2012), Berggren et al. (2011) och beräkningsunderlag.**

| Variationskoefficient - V %                                         | Liten | Medel     | Stor |
|---------------------------------------------------------------------|-------|-----------|------|
| Tunghet <sup>1)</sup>                                               | <1,3  | 1,3<V<2,8 | >2,8 |
| Odränerad skjuvhållfasthet efter variansreduktion 0,6 <sup>2)</sup> | ≤9    | 9<V<11    | ≥11  |
|                                                                     |       |           |      |
| Standardavvikelse - σ                                               |       |           |      |
| Nivå släntfot <sup>3)</sup> , m                                     | 0,2   | 0,4       |      |
| Sidomått släntfot <sup>3)</sup> , m                                 | 0,4   | 0,8       |      |
| Nivå släntkrön <sup>3)</sup> , m                                    | 0,2   | 0,4       |      |
| Sidomått släntkrön <sup>3)</sup> , m                                | 0,4   | 0,8       |      |

#### 1.4 Parametrarnas betydelse för brottsannolikhet

Den här analysen beskriver beräkningsresultaten av de 68 sektioner som inom Göta älvtredningen beräknades med skredsannolikhetmodellen. Fokus är på de i modellen ingående variablerna och hur deras osäkerhet/variation påverkar variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn,  $V_F$ .

## 2 SYFTE OCH MÅL

Avsikten med studien är att visa inverkan av skredsannolikhetsmodellens ingående parametrar på skredsannolikheten i Göta älvdalen. Syftet är att identifiera de parametrar som bidrar mest till variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn, och därmed även till skredsannolikheten. I eventuella fördjupade skredriskanalyser kan dessa parametrar studeras mer i detalj för ett säkrare och mer rättvisande resultat.

### 2.1 Frågeställning

1. Vilka parametrar bidrar generellt mest till osäkerheten i säkerhetsfaktor?
2. Ser vi några samband mellan indelning i typsektioner och olika parametrars betydelse för brottsannolikhet?
3. Är skjuvhållfastheten viktigare i vissa typsektioner och övriga variabler mer viktiga i andra?
4. Finns samband mellan geografiska delområden och olika parametrars betydelse för brottsannolikhet?
5. Är skjuvhållfastheten viktigare i vissa geografiska områden och mindre viktig i andra?

<sup>1</sup> Avser beskrivning av hela jordprofilen.

<sup>2</sup> De gränser som faktiskt användes i beräkningarna inom GÄU. Gränserna skiljer sig åt från både Berggren et al. (2011) och SGI (2012).

<sup>3</sup> Måtten avser beskriva både mätosäkerhet och 3D-effekter. För de avvägda punkterna är osäkerheten större i vertikalled, men de geometriska måtten B och H avser beskriva den idealiserade slänten. Då H är klart mindre än B för slänterna i Göta älvdalen så innebär det att osäkerheten i H får störst betydelse.

### 3 METODIK

Utgångspunkten för analysen var de sensitivitetsfaktorer som inom Göta älvutredningen beräknades för varje variabel i skredsannolikhetsberäkningen av varje slänt (ekvation 3). Kvadraten av sensitivitetsfaktorn,  $\alpha$ , visar aktuell variabls bidrag till den resulterande osäkerheten i säkerhetsfaktor (ekvation 4).

$$V_a = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \quad \alpha_a = \frac{V_a}{V_{Fc}} \quad (3)$$

där  $V$  = variationskoefficient

$\sigma$  = standardavvikelse

$\mu$  = medelvärde

$\alpha$  = sensitivitetsfaktor

$a$  = någon av variablerna  $c_u$ ,  $\gamma$ ,  $x_{krön}$ ,  $x_{fot}$ ,  $z_{krön}$  och  $z_{fot}$

$F_c$  = odränerad skjuvhållfasthet.

$$\alpha_{c_u}^2 + \alpha_{\gamma}^2 + \alpha_{z_{krön}}^2 + \alpha_{z_{fot}}^2 + \alpha_{x_{krön}}^2 + \alpha_{x_{fot}}^2 = 1 \quad (4)$$

där  $\alpha$  = sensitivitetsfaktor

$c_u$  = skjuvhållfasthet

$\gamma$  = tunghet

$z_{krön}$  = släntkrönets position i vertikalled

$x_{krön}$  = släntkrönets position i horistontalled

$z_{fot}$  = släntfotens position i vertikalled

$x_{fot}$  = släntfotens position i horistontalled

För de 68 sektioner som beräknades inom GÄU sammanställdes i Excel uppgifter om delområde, slänthet, variationskoefficient för respektive variabel, bedömning av variationen för respektive variabel (låg, medel, hög enligt beskrivning i Tabell 1 och bedömd inom GÄU), sensitivitetsfaktorer för respektive variabel samt för stabilitetstalet  $N_c$  och pådrivande tryck  $P_d$ . Sensitivitetsfaktorerna kvadrerades och utgjorde sedan grund för analyser av data.

När det stod klart att skjuvhållfastheten i allmänhet bidrar mest till  $V_F$  som spelar roll för skredsannolikheten identifierades de sektioner där skjuvhållfastheten bidrog till mindre än 75 % respektive mindre än 50 % av totala osäkerheten. Syftet med detta var att försöka finna vid vilka förhållanden andra variabler har större betydelse för  $V_F$ . Det undersöktes om några släntutseenden eller geografiska delområden var vanligare förekommande i urvalet.

### 4 ANALYSRESULTAT

#### 4.1 Översikt över parametrarnas bidrag till skredsannolikhhet

Vilka parametrar bidrar generellt mest till osäkerheten i säkerhetsfaktor? För att besvara frågan sammanställdes och analyserades de kvadrerade sensitivitetsfaktorerna för respektive

parameter och sektion för alla de sektioner som beräknats med skredsannolikhetsmetodik inom Göta älvutredningen.

I Tabell 2 sammanställs data om variablernas bidrag till osäkerheten i säkerhetsfaktorn, uttryckt som en procentsats av den totala osäkerheten. Skjuvhållfasthet (cu) är i allmänhet den parameter som bidrar mest till den resulterande osäkerheten följt av zkrön och tunghet ( $\gamma$ ), men spridningen är stor. Variablerna xkrön och xfot är i allmänhet av mycket liten betydelse.

I Tabell 3 visas olika parametrars bidrag till skredsannolikheten (osäkerheten i säkerhetsfaktor). Ett exempel på hur tabellen kan utläsas: zkrön står för 20 % eller mer av osäkerheten i säkerhetsfaktor för 33 % av de beräknade sektionerna. För 19 % av de beräknade sektionerna förklarar zkrön mellan 20 och 30 % av osäkerheten i säkerhetsfaktor. Sammanfattningsvis står det klart att skjuvhållfasthet är den absolut viktigaste osäkerheten att beakta, men den är inte alltid dominerande och är i de flesta fall inte den enda osäkerheten av betydelse. Zkrön, släntröns position i vertikalled, ser ut att vara den näst viktigaste osäkerheten, följt av jordens tunghet,  $\gamma$ .

**Tabell 2: Översikt över parametrarnas bidrag (%) till osäkerheten i säkerhetsfaktor. cu avser skjuvhållfasthet och  $\gamma$  avser tunghet.**

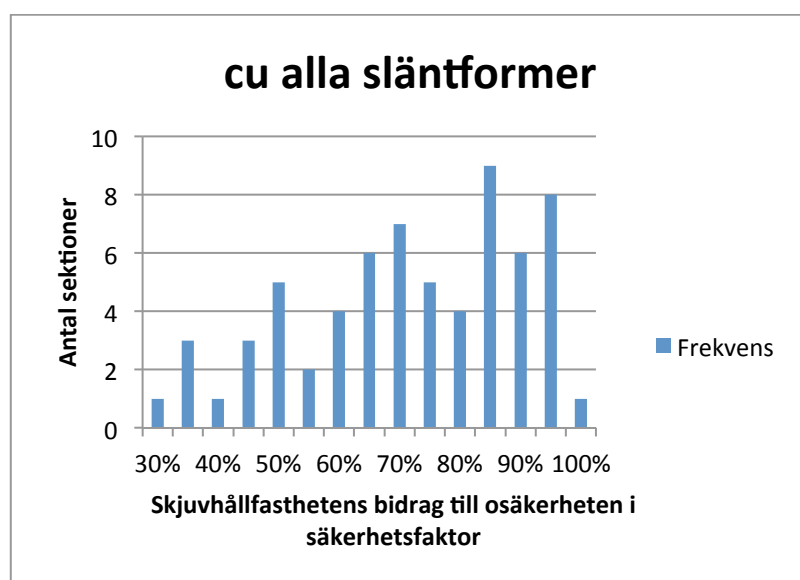
|          | min | max | medelvärde | median |
|----------|-----|-----|------------|--------|
| zkrön    | 1   | 53  | 16         | 12     |
| zfot     | 0   | 18  | 4          | 3      |
| cu       | 25  | 96  | 69         | 71     |
| xkrön    | 0   | 61  | 2          | 0      |
| xfot     | 0   | 2   | 0          | 0      |
| $\gamma$ | 0   | 44  | 10         | 8      |

**Tabell 3: Andel (%) av de beräknade sektionerna där respektive variabel bidrar med en viss andel (%) av osäkerheten i säkerhetsfaktorn F. cu avser skjuvhållfasthet, γ avser tunghet. Inom parentes anges kumulativ andel (%) av de beräknade sektionerna.**

| Andel av osäkerhet i F | zkrön   | zfot     | cu      | xkrön    | xfot     | γ       |
|------------------------|---------|----------|---------|----------|----------|---------|
| $x > 40$               | 6 (6)   | 0 (0)    | 93 (93) | 1 (1)    | 0 (0)    | 1 (1)   |
| $40 \geq x > 30$       | 9 (14)  | 0 (0)    | 6 (99)  | 0 (1)    | 0 (0)    | 4 (6)   |
| $30 \geq x > 20$       | 19 (33) | 0 (0)    | 1 (100) | 0 (1)    | 0 (0)    | 7 (13)  |
| $20 \geq x > 10$       | 23 (57) | 6 (6)    | 0 (100) | 1 (3)    | 0 (0)    | 25 (38) |
| $10 \geq x > 5$        | 25 (81) | 20 (26)  | 0 (100) | 3 (6)    | 0 (0)    | 29 (67) |
| $5 \geq x > 2$         | 9 (90)  | 30 (57)  | 0 (100) | 0 (6)    | 0 (0)    | 23 (90) |
| $2 \geq x > 1$         | 9 (99)  | 26 (83)  | 0 (100) | 9 (14)   | 7 (7)    | 6 (96)  |
| $x \leq 1$             | 1 (100) | 17 (100) | 0 (100) | 86 (100) | 93 (100) | 4 (100) |

## 4.2 Skjuvhållfasthet i detalj

Spridningen hos skjuvhållfasthetens osäkerhetsbidrag till resulterande osäkerhet i säkerhetsfaktor visas som histogram i Figur 2.



**Figur 2: Histogram över skjuvhållfasthetens osäkerhetsbidrag till den resulterande osäkerheten i säkerhetsfaktor. Y-axeln avser antal sektioner, x-axeln visar skjuvhållfasthetens osäkerhetsandel av osäkerheten i säkerhetsfaktor.**

För de sannolikhetsberäknade sektionerna i Göta älvdalen så domineras den totala osäkerheten i allmänhet av osäkerheten i skjuvhållfasthet. För 31 av totalt 69 analyserade slänter utgjorde skjuvhållfasthetens osäkerhet minst 75 % av den totala osäkerheten. I

majoriteten av dessa 31 sektioner var osäkerheten i skjuvhållfasthet klassificerad hög (dvs.  $V_{cu} \geq 11$  %), vilket naturligtvis är en starkt bidragande orsak till skjuvhållfasthetens stora påverkan på  $V_F$ . I 25 sektioner står osäkerheten i skjuvhållfasthet för 50 – 74 % av den totala osäkerheten, och i 13 sektioner är andelen lägre än 50 %.

Sektionerna där skjuvhållfasthetens osäkerhet utgjorde <50 % respektive <75 % av den totala osäkerheten studerades mer i detalj, dels för olika geografiska områden, dels för olika släntgeometrier.

#### 4.3 Geografiska områden

Finns samband mellan geografiska delområden och olika parametrars betydelse för brottsannolikhet? Är skjuvhållfastheten viktigare i vissa geografiska områden och mindre viktig i andra?

Idealt hade man för att besvara frågorna undersökt de 39 geografiska områden med likartade förhållanden avseende topografi och geologiska förhållanden som användes inom GÄU. Dokumentation om vad som karakteriserar dem och hur de valts ut medger tyvärr inte en sådan analys. Istället undersöktes hur parametrarnas bidrag till  $V_F$  varierar mellan delområden 1 till 9. Delområde 10 ingick inte i analysen då endast en sektion hade beräknats med sannolikhetsmetodiken. För att se om skillnader fanns mellan norra och södra Göta älv delades sektionerna in i Norr (delområden 4, 5, 6, 7 och 8) och Söder (delområden 1, 2, 3, 9 och 10). Delområden visas i Figur 4.

I Figur 3 visas medelvärdet av respektive variablers bidrag till  $V_F$ , för varje delområde, för norra respektive södra Göta älvdalen och för hela Göta älvdalen. För skjuvhållfasthet ( $\gamma$ ) och tunghet ( $\gamma$ ) anges medelvärdet av variationskoefficient samt vilken grad av osäkerhet (liten, medel, stor) som medelvärdet motsvarar (gränser presenteras i Tabell 1). För de geometriska osäkerheterna anges graden av osäkerhet gemensamt (liten, medel). Ovanför varje stapel står hur många sektioner som ingår.

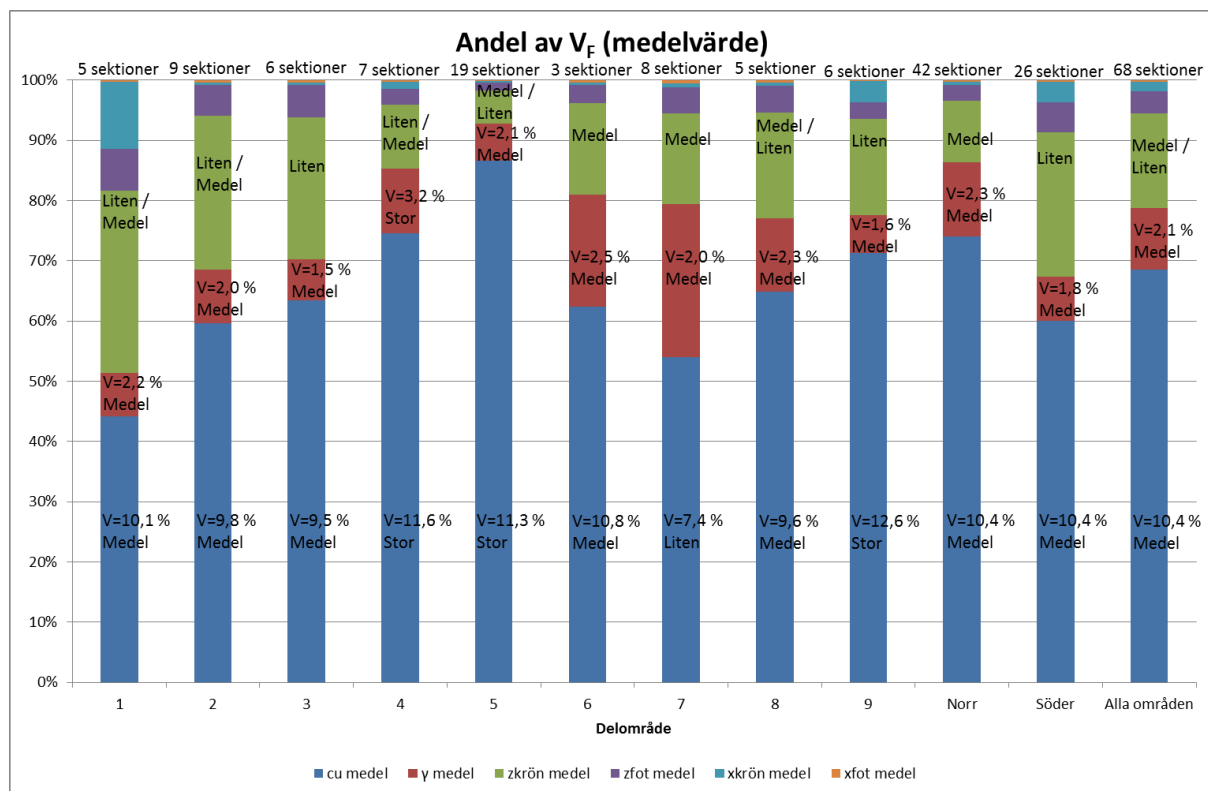
Delområden 1, 2, 3, 6 och 8 har liknande genomsnittliga förutsättningar (svart text i Figur 3). Bidraget från de geometriska osäkerheterna till  $V_F$  varierar absolut mest för dessa delområden, 19-48 %. Även skjuvhållfasthetens bidrag till  $V_F$  varierar betydligt, 44-65 %. Tunghetens bidrag till  $V_F$  är 7-19 %.

Delområden 4, 5 och 9 har liknande genomsnittliga förutsättningar. Här varierar bidraget från de geometriska parametrarna till  $V_F$  mest, 8-23 %. Skjuvhållfasthetens bidrag varierar betydligt, 72-87 %, men tunghetens bidrag är likt för de olika delområdena, 7-11 %.

Delområde 1 sticker ut i analysen genom att osäkerheten i xkrön, släntkrönets koordinat i längsled, är betydande för  $V_F$ . Delområde 5 är speciellt då skjuvhållfasthetens genomsnittliga bidrag till  $V_F$  för de 19 beräknade sektionerna är hela 87 %.

Antalet sektioner inom varje delområde som beräknats med skredsannolikhetsmetodiken är få, och detta bidrar naturligtvis till variationen mellan olika delområden och gör det svårt att dra slutsatser om olika parametrars betydelse för  $V_F$ .

En jämförelse mellan sektioner i norra och södra Göta älv antyder att osäkerheter i geometri har större betydelse i söder än i norr, medan osäkerheter i tunghet och skjuvhållfasthet är viktigare i norr än i söder. Sammanfattningsvis indikerar vår analys att olika parametrars betydelse för  $V_F$  skiljer sig åt mellan olika delområden. Skjuvhållfasthetens variation är viktigare i vissa delområden än i andra, även om samvarians med t.ex. förekomst av olika typsektioner inte har undersökts.



**Figur 3:** I figuren visas medelvärdet av respektive variablers bidrag till  $V_F$ , dels för olika delområden 1 till 9, dels för norra och södra Göta älvdalen och slutligen för alla beräknade sektioner (alla områden). För skjuvhållfasthet (cu) och tunghet (y) anges medelvärdet av variationskoefficient samt vilken grad av osäkerhet (liten, medel, stor) som medelvärdet motsvarar. För de geometriska osäkerheterna anges graden av osäkerhet gemensamt (liten, medel). Samtliga beräkningar och klassificeringar utfördes inom GÄU. Gruppering i norra och södra Göta älvdalen gjordes i denna analys.

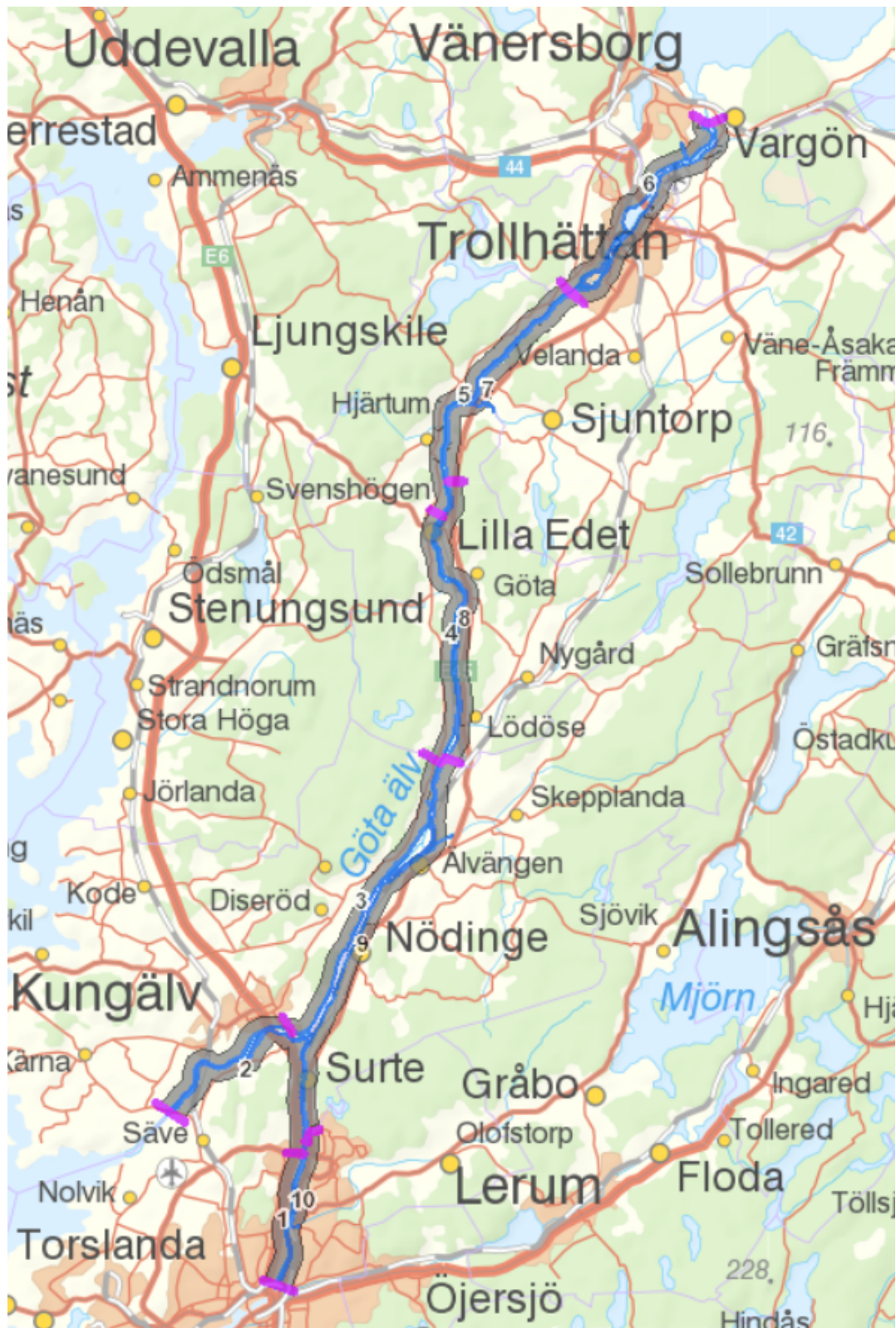
Vidare undersöktes i hur stor utsträckning som skjuvhållfasthetens osäkerhet utgjorde mindre än 50 % respektive mindre än 75 % av den resulterande osäkerheten i säkerhetsfaktorn. Detta gjordes för delområden 1 till 10, och resultatet presenteras i Tabell 4.

Generellt ser bedömningen av osäkerhet i skjuvhållfasthet (låg, medel, hög) som föregick skredsannolikhetsberäkningarna ut att slå igenom i resultaten i Tabell 4. Delområden där osäkerhetsbedömningen ”låg” och ”medel” dominerade resulterar i en högre andel sektioner där skjuvhållfasthetens osäkerhet bidrar till <50 % respektive <75 % av säkerhetsfaktorns osäkerhet. De delområden där osäkerheten i skjuvhållfasthet i allmänhet bedömdes vara hög resulterade i betydligt lägre andel sektioner där skjuvhållfasthetens osäkerhet bidrog med <50 % respektive 75 %.

I delområden 1 och 7 står osäkerheten i skjuvhållfasthet för mindre än 50 % av osäkerheten i säkerhetsfaktorn i en majoritet av de beräknade fallen. För i princip alla beräknade sektioner i delområde 1 och 7 är skjuvhållfasthetens bidrag mindre än 75 %. I delområden 4, 5, 9 och 10 står skjuvhållfasthetens osäkerhet för mer än 50 % av osäkerheten i säkerhetsfaktor i alla beräknade sektioner. I delområde 5 bidrar skjuvhållfasthetens osäkerhet till mer än 75 % av osäkerheten i säkerhetsfaktor i nästan alla beräknade sektioner. Som underlag för sannolikhetsberäkningarna har en hög osäkerhet i skjuvhållfasthet bedömts finnas för majoriteten av sektionerna i delområden 4, 5 och 9, vilket delvis kan förklara varför skjuvhållfastheten förklarar så stor andel av osäkerheten i säkerhetsfaktorn i de delområdena.

**Tabell 4: Skjuvhållfasthetens osäkerhetsbidrag till osäkerheten i säkerhetsfaktorn, redovisat för olika delområden. "Bedömning av osäkerhet i skjuvhållfasthet" anger den vanligast förekommande bedömningen av osäkerhet i skjuvhållfasthet (låg, medel, hög) som använts i beräkningarna i delområdet.**

| Delområde | Antal sektioner beräknade med sannolikhetsmetodik | Bedömning av osäkerhet i skjuvhållfasthet i GÄU | Andel av beräknade sektioner där cu:s andel av totala osäkerheten är <50 % | Andel av beräknade sektioner där cu:s andel av totala osäkerheten är <75 % |
|-----------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 7         | 8                                                 | låg                                             | 63 %                                                                       | 88 %                                                                       |
| 1         | 5                                                 | medel                                           | 60 %                                                                       | 100 %                                                                      |
| 6         | 3                                                 | medel                                           | 33 %                                                                       | 67 %                                                                       |
| 2         | 9                                                 | låg                                             | 22 %                                                                       | 89 %                                                                       |
| 8         | 5                                                 | medel                                           | 20 %                                                                       | 60 %                                                                       |
| 3         | 6                                                 | medel                                           | 17 %                                                                       | 83 %                                                                       |
| 10        | 1                                                 | låg                                             | 0 %                                                                        | 100 %                                                                      |
| 9         | 6                                                 | hög                                             | 0 %                                                                        | 50 %                                                                       |
| 4         | 7                                                 | hög                                             | 0 %                                                                        | 43 %                                                                       |
| 5         | 19                                                | hög                                             | 0 %                                                                        | 5 %                                                                        |



**Figur 4:** Utredningsområdet inom Göta älvutredningen markeras i grått. Delområden 1-10 är markerade i figuren och separerade med rosa. Bakgrundskarta ©Lantmäteriet.

#### 4.4 Släntens geometri

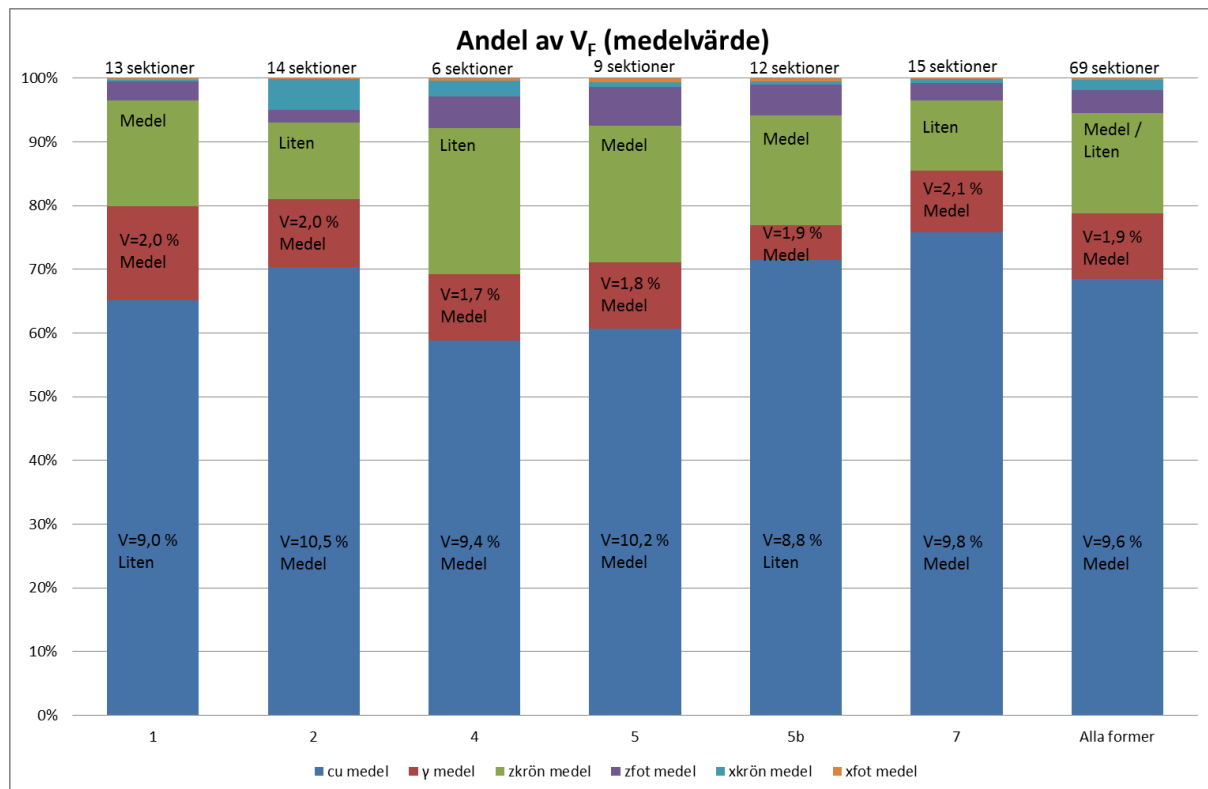
Ser vi några samband mellan indelning i typslänter och olika parametrars betydelse för brottsannolikhet? Är skjuvhållfastheten viktigare i vissa typsektioner och övriga variabler mer viktiga i andra?

Nedan presenteras en summering av de skredsannolikhetsberäknade sektionerna indelade i typsektioner. En fullständig beskrivning av typsektionerna finns i Figur 6. I Figur 5 visas medelvärdet av respektive variablers bidrag till  $V_F$ , dels för olika typsektioner, dels oberoende av typsektion. För skjuvhållfasthet ( $c_u$ ) och tunghet ( $\gamma$ ) anges medelvärdet av variationskoefficient samt vilken grad av osäkerhet (liten, medel, stor) som medelvärdet motsvarar (gränser presenteras i Tabell 1). För de geometriska osäkerheterna anges graden av osäkerhet gemensamt (liten, medel). I figuren visas också antal sektioner av respektive typsektion. Typsektion 3 och 6 ingår inte i utvärderingen eftersom endast en slänt finns för typsektion 3 och ingen för typsektion 6.

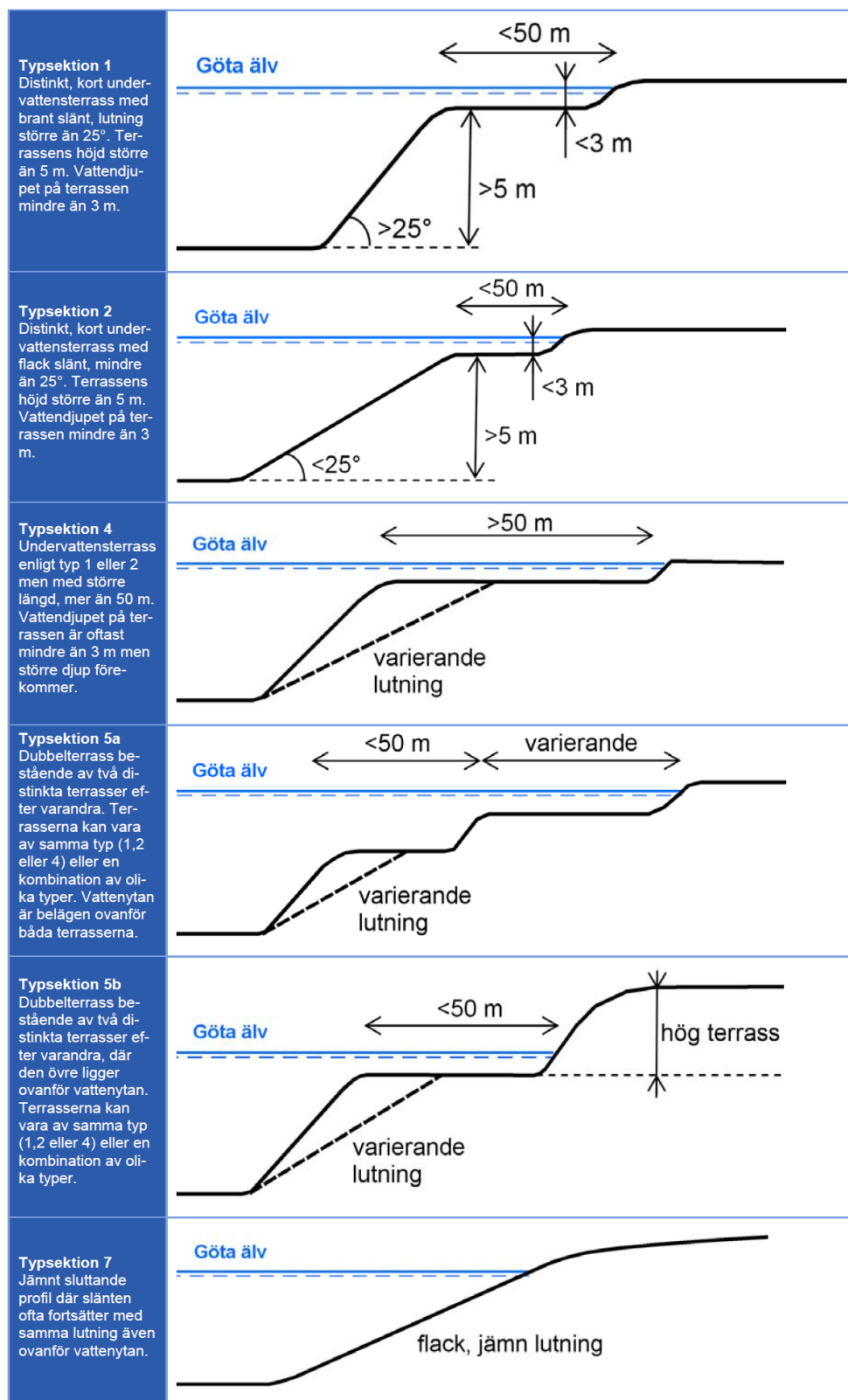
Om geometriskt utseende saknade betydelse så skulle typsektioner med liknande osäkerheter i ingående variabler resultera i liknande bidrag till  $V_F$ , det vill säga staplarna i Figur 5 skulle se likadana ut om förutsättningarna (svart text i figuren) var lika.

Typsektioner 2, 4 och 7 har liknande genomsnittliga förutsättningar (svart text i Figur 5). För dessa sektioner är tunghetens bidrag till  $V_F$  lika stort, 9-10 %. Bidraget från de geometriska osäkerheterna däremot varierar stort, 14-32 %. Även skjuvhållfasthetens bidrag till  $V_F$  varierar betydligt, 58-76 %. Geometriskt skiljer sig typsektioner 2, 4 och 7 åt. Typsektion 2 och 4 har båda en distinkt kort undervattensterrass, vilken genomgående har flack slänt och kort längd för typsektion 2, men varierande lutning och större längd för typsektion 4. Typsektion 7 har jämn flack lutning utan terrasser. De stora skillnaderna mellan typsektionerna i parametrarnas genomsnittliga bidrag till  $V_F$  beror sannolikt på skillnaderna i geometriskt utseende typsektionerna emellan.

Typsektioner 1 och 5b har i princip samma genomsnittliga osäkerheter (svart text i Figur 5). Bidraget från de geometriska osäkerheterna till  $V_F$  är 20 till 28 % och tunghetens bidrag varierar mellan 6 och 15 %. Skjuvhållfasthetens bidrag är relativt likt för de två typsektionerna: 65 till 72 %. Typsektioner 1 och 5b är relativt lika varandra även geometriskt med korta undervattensterrasser, där typsektion 1 genomgående har brant undervattensslänt och typsektion 5b har varierande lutning på undervattensslänten och ytterligare en terrass ovanför vattenytan. Utifrån detta kan man ana sambandet att om de ingående osäkerheterna för typsektioner 1 och 5b är lika så bör även parametrarnas bidrag till  $V_F$  vara likartade.



**Figur 5:** I figuren visas medelvärdet av respektive variablers bidrag till  $V_F$ , dels för olika typsektioner 1 till 7, dels för alla typsektioner (alla former). För skjuvhållfasthet (cu) och tunghet ( $\gamma$ ) anges medelvärdet av variationskoefficient samt vilken grad av osäkerhet (liten, medel, stor) som medelvärdet motsvarar. För de geometriska osäkerheterna anges graden av osäkerhet gemensamt (liten, medel). Samtliga beräkningar och klassificeringar utfördes inom GÄU.



**Figur 6: Beskrivning av typsektioner med de beteckningar som använts i Göta älvtredningen. Reproducerad från SGI (2012), modifierad efter Millet (2011).**

I Tabell 5 undersöks i hur stor andel av sektionerna inom respektive typslänt som skjuvhållfastheten är den dominerande osäkerheten, dvs. ger stora bidrag till  $V_F$ .

Om samband saknades mellan släntutseende och olika variablers påverkan på skredsannolikheten hade man kunnat förvänta sig att skjuvhållfasthetens variationskoefficient för respektive typsektion, som tagits fram från indata till skredsannolikhetberäkningen, skulle återspeglas i resultaten. Inget samband syns dock mellan skjuvhållfasthetens variationskoefficient och andel av beräknade sektioner där skjuvhållfasthetens andel av totala osäkerheten är <50 % respektive <75 %.

Typsektioner 4 och 5 liknar varandra med långa terrasser under vattnet. Typsektioner 1, 2 och 5b liknar varandra med korta undervattensterrasser, där typsektion 1 har brant undervattensslänt, typsektion 2 har flack undervattensslänt, och typsektion 5b har varierande lutning på undervattensslänten och ytterligare en terrass ovanför vattenytan.

För typsektion 4 står osäkerheten i skjuvhållfasthet för mindre än 50 % av osäkerheten i säkerhetsfaktorn i hälften av de beräknade fallen. Osäkerheten i skjuvhållfasthet bidrar med mindre än 75 % till säkerhetsfaktorns osäkerhet i ca 2/3 av de beräknade sektionerna med typsektioner 4, 5 och 1.

Detta kan tolkas som att skjuvhållfasthetens osäkerhet är som viktigast i sektioner med jämn, flack lutning. För sektioner med undervattensterrass är skjuvhållfasthetens osäkerhet viktigare när slänten är flack och terrassen kort. För branta slänter med kort terrass ökar övriga variablers bidrag till osäkerheten i skjuvhållfasthet. För sektioner med lång undervattensterrass eller dubbel undervattensterrass är övriga variablers andel av osäkerheten i säkerhetsfaktorn som störst och utgör uppemot 50 % för ca hälften av de beräknade sektionerna.

**Tabell 5: Skjuvhållfasthetens osäkerhets bidrag till  $V_F$ , redovisat för olika typsektioner. Grad av osäkerhet (liten, medel, stor) avser medelvärdet för typsektionen enligt den gruppering som gjordes i GÄU (Tabell 1).**

| Typ-sektion | Geometri | Antal sektioner beräknade med sannolikhetsmetodik | Osäkerhet i skjuvhållfasthet: medelvärde för variationskoefficient (%) samt grad av osäkerhet | Andel (%) av beräknade sektioner där cu:s andel av total osäkerhet är <50 % | Andel (%) av beräknade sektioner där cu:s andel av total osäkerhet är <75 % |
|-------------|----------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 4           |          | 6                                                 | 9,4 %, medel                                                                                  | 50                                                                          | 67                                                                          |
| 5           |          | 9                                                 | 10,2 %, medel                                                                                 | 33                                                                          | 67                                                                          |
| 1           |          | 13                                                | 9,0 %, liten                                                                                  | 23                                                                          | 62                                                                          |
| 5b          |          | 12                                                | 8,8 %, liten                                                                                  | 17                                                                          | 33                                                                          |
| 2           |          | 14                                                | 10,5 %, medel                                                                                 | 7                                                                           | 50                                                                          |
| 7           |          | 15                                                | 9,8 %, medel                                                                                  | 7                                                                           | 53                                                                          |

## 5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Analysen avser Göta älvdalen och några generella slutsatser kan inte dras från underlaget, utan slutsatser nedan avser de inom Göta älvutredningen utförda beräkningarna.

### 5.1 Allmänt

Utifrån Tabell 3 dras slutsatsen att för de studerade sektionerna ger osäkerheten i skjuvhållfasthet, följt av osäkerheten i zkrön och tunghet, i allmänhet det absolut största bidraget till osäkerheten i säkerhetsfaktor och därmed även skredsannolikhet. Dessa är därför de viktigaste osäkerheterna att kvantifiera i kommande skredsannolikhetsanalyser i Göta älvdalen. Osäkerheterna i z<sub>fot</sub>, x<sub>fot</sub> och x<sub>krön</sub> är som väntat sällan av avgörande betydelse.

### 5.2 Geografi

En jämförelse mellan sektioner i norra och södra Göta älv antyder att osäkerheter i geometri har större betydelse i söder än i norr, medan osäkerheter i tunghet och skjuvhållfasthet är viktigare i norr än i söder. Sammanfattningsvis indikerar vår analys att olika parametrars betydelse för  $V_F$  skiljer sig åt mellan olika delområden. Skjuvhållfasthetens variation är viktigare i vissa delområden än i andra, även om samvarians med t.ex. förekomst av olika typsektioner inte har undersökts.

Det finns en möjlighet att indelning i geologiskt likartade områden skulle visa ett tydligare samband, men detta kunde inte undersökas utifrån befintligt underlag.

### 5.3 Geometri

Om geometriskt utseende saknade betydelse så skulle typsektioner med liknande osäkerheter i ingående variabler resultera i liknande bidrag till  $V_F$ . En sådan jämförelse i två grupper av olika typsektioner med lika genomsnittliga osäkerheter i parametrar visade stora skillnader i parametrarnas genomsnittliga bidrag till  $V_F$  för gruppen med stor skillnad i geometriskt utseende mellan typsektionerna. För gruppen med geometriskt likartade typsektioner var skillnaderna i parametrarnas genomsnittliga bidrag till  $V_F$  små.

Resultat från en studie i närmare detalj av skjuvhållfastheten kan tolkas som att skjuvhållfasthetens osäkerhet är som viktigast i sektioner med jämn, flack lutning. För sektioner med undervattensterrass är skjuvhållfasthetens osäkerhet viktigare när slänten är flack och terrassen kort. För branta slänter med kort terrass ökar övriga variablers bidrag till osäkerheten i skjuvhållfasthet. För sektioner med lång undervattensterrass eller dubbel undervattensterrass är övriga variablers andel av osäkerheten i säkerhetsfaktorn som störst och utgör uppemot 50 % för ca hälften av de beräknade sektionerna.

Sammanfattningsvis indikerar vår analys att släntgeometrin har en inverkan på vilka parametrar som är betydelsefulla för skredsannolikheten. Erfarenheten sedan tidigare är att släntlutning påverkar vilka parametrar som är mer betydande. Denna studie indikerar att även andra geometriska parametrar kan vara av betydelse, t.ex. förekomst av undervattensterrass, dubbelterrass och terrassens höjd.

### 5.4 Avslutande

Ytterligare analyser kan utföras på samma sätt som nu men med utgångspunkt i sensitivitetsfaktorerna för stabilitetstalet  $N_c$ , pådrivande tryck  $P_d$  och skjuvhållfasthet  $c_u$ . Kvadraterna av dessa sensitivitetsfaktorer summerar till 1 (jfr ekvation 4). Man kan då komma till slutsatser om för vilka situationer som stabilitetstalet, pådrivande trycket eller

skjuvhållfastheten är den dominerande osäkerheten. Detta synsätt knyter närmare an till traditionell geoteknik.

Något som inte har tagits upp i denna analys är vilka parametrar som valts att behandlas som variabler respektive anges deterministiskt. En vidareutveckling av metodiken bör främst inriktas på att behandla laster och lågvattennivåer som variabler istället för att som nu anges deterministiskt. Sannolikt har dessa variabler betydande inverkan på skredsannolikheten för ett stort antal slänter. I tillägg är denna vidareutveckling en förutsättning för att kunna ange skredsannolikhet som en tidskopplad enhet, t.ex. som sannolikhet för att skred ska ske inom ett år eller 100 år.

## 7 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.

Janbu, N (1954). *Stability analysis of slopes with dimensionless parameters*. Doctoral thesis. Cambridge. Massachusetts.

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.

SGI (2012). *Skredrisker i Göta älvdalen 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](mailto:sgi@swedgeo.se) Internet: [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)