



EXAMENSARBETE INOM SAMHÄLLSBYGGNAD,
AVANCERAD NIVÅ, 30 HP
STOCKHOLM, SVERIGE 2021

Osäkerhetsbedömning av skjuvhållfasthet i lera längs med Göta älv

JOHANNA DYBERG

Osäkerhetsbedömning av skjuvhållfasthet i lera längs med Göta älv

JOHANNA DYBERG

Examensarbete, 2021
Kungliga tekniska högskolan, KTH
Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad
Institutionen för byggvetenskap
Avdelningen för jord- och bergmekanik
SE-100 44, Stockholm, Sverige

Sammanfattning

Vid geotekniska arbeten är osäkerheter oundvikliga, men i stället för att hantera dessa som okända parametrar kan geotekniker med hjälp av bayesiansk statistik hantera geotekniska osäkerheter som slumpmässiga variabler med en sannolikhetsfördelning. I detta arbete har den bayesianska metoden utökad multivariabelanalys (EMA) tillämpats för bedömning av odränerad skjuvhållfasthet (c_u) i leror längs med Göta älv. Analysen har genomförts för områdena Smådala och Sörängen lokaliserade i lilla Edet längs med Göta älv, med mätdata från fem geotekniska mätmetoder i fält- och laboratorium: CPT-sondering (CPT), CRS-försök (CRS), direkta skjuvförsök (DSS), vingförsök (Vb) och fallkonförsök (Kon).

Beräkningarna har genomförts i två steg: först har den totala osäkerheten för skattningen av c_u bestämts separat för varje metod med hjälp av varianskoefficienten (COV_{tot}) och sedan har samtliga COV_{tot} viktats med en EMA för en uppdaterad, mer tillförlitlig, total osäkerhet ($COV_{tot,viktad}$). Resultaten visar $COV_{tot,viktad} \approx 2-3,5\%$ för Smådala och $COV_{tot,viktad} \approx 1-2\%$ för Sörängen.

Slutsatsen är att bayesiansk statistik kan bidra till att kvantifiera geotekniska osäkerheter och därmed öka förståelsen dessa. Dock har osäkerheter vid bedömningen av vissa parametrar i COV_{tot} uppmärksamats, vilket kan innebära att osäkerheten från modellfelet (ϑ) kan öka osäkerheten vid skattningen av c_u . Därför rekommenderas att storleken på ϑ vid bedömning av COV_{tot} bör undersökas och adderas till modellen för att möjliggöra användning av EMA i praktiken.

Nyckelord

Bayesiansk statistik, osäkerhet, geoteknisk riskbedömning, utökad multivariabelanalys, Göta älv, släntstabilitet.

Abstract

Uncertainties are inevitable in geotechnical investigations. However, instead of viewing these uncertainties as unknown parameters they could be managed with Bayesian statistics where the uncertainties are viewed as random variables with a statistical distribution. In this master thesis, the Bayesian method extended multivariate analysis (EMA) has been used for evaluation of the undrained shear strength (c_u) in clay along the Göta älv river. The analysis has been applied for the areas Smådala and Sörängen in the region Lilla Edet along the river, and with data from five geotechnical investigations methods from field- and laboratory testing: cone penetration test (CPT), constant rate of strain test (CRS), direct simple shear test (DSS), vane shear test (Vb) and fall cone test (Kon).

The calculations were performed in two steps: first the calculation of the total uncertainty from the estimation of c_u for each investigation method with the coefficient of variation (COV_{tot}) and secondly the weighting of all the different COV_{tot} with an EMA to achieve an updated estimation of the uncertainties ($COV_{tot,viktad}$). The results show that $COV_{tot,viktad} \approx 2-3,5 \%$ in Smådala and $COV_{tot,viktad} \approx 1-2 \%$ in Sörängen.

The conclusion is that the usage of Bayesian statistics could increase the understanding of geotechnical uncertainties as well as give tools to quantify them. Although, there were uncertainties with the estimation of some parameters within COV_{tot} and thus the uncertainty from the so-called model error (ϑ) could increase the uncertainty in the estimation of c_u . Therefore, it is suggested that the magnitude of ϑ when estimating COV_{tot} should be investigated and added to the model to enable the usage of EMA in practice.

Keywords

Bayesian statistics, uncertainty, geotechnical risk evaluation, extended multivariate analysis, Göta älv river, slope stability.

Förord

Med detta examensarbete avslutar jag fem års studier till civilingenjör inom Samhällsbyggnad på KTH i Stockholm. Arbetet har genomförts på institutionen för byggvetenskap, avdelningen inom jord- och bergmekanik på KTH och tillsammans med sekretariatet för delegationen för Göta älv på SGI.

Till att börja med vill jag tacka min handledare på KTH, Dr. Johan Spross, som med sin kunskap och stort tålamod introducerat mig till nya delar inom samspelet mellan geoteknik och statistik.

Jag vill även rikta ett stort tack till min handledare från SGI, Jenny Gustafsson, som med goda råd om geotekniskt arbete och rapportskrivande hjälpt mig att anpassa undersökningarna i detta examensarbete till leror längs med Göta älv.

Sedan vill jag tacka Åsa Jönsson, Måns Ryttnäster och Johanna Ljungdahl på SGI som under arbetets gång stöttat med stort intresse, arbetslivserfarenhet och lokalkännedom. Dessutom vill jag tacka Göran Sällfors och Per-Evert Bengtsson för visat intresse samt värdefulla diskussioner och kommentarer.

Slutligen vill jag tacka min familj och klasskamrater som varit med i svängningarna under åren, framför allt under den tid som fascinationen kring stenar och vatten utvecklats till ett genuint intresse för geoteknik.

Stockholm, juni 2021

Johanna Dyberg

Symbolförteckning

Förkortningar

CPT	CPT-sondering (Cone penetration test)
CRS	CRS-försök (Constant rate of strain)
DSS	Direkta skjuvförsök
EMA	Utökad multivariabelanalys (Extended multivariate approach)
exp	Exponenten (används för att tydliggöra presentation i exponentiell form)
Kon	Fallkonförsök
P	Prior (tidigare känt)
PDF	Täthetsfunktion (Probability density function)
PEM	Punktskattningsmetoden
SGI	Statens geotekniska institut
SGU	Sveriges geologiska undersökning
Vb	Vingförsök

Latinska symboler

c_{kon}	Konstant vid fallkontest	[-]
C	Transformationsfaktor	[-]
c_u	Odränerad skjuvhållfasthet i lera	[kPa]
COV	Varianskoefficient	[-]
$COV_{tot D}$	Variationskoefficienten för det totala felet av en uppskattad parameter från mätmetod D .	[-]
$COV_{tot,viktat}$	Variationskoefficienten för det viktade totala felet av en uppskattad parameter från EMA.	[-]
D	Geoteknisk mätmetod i fält eller laboratorium	[-]
g	Tyngdacceleration	[m/s ²]
i	Konintryck	[mm]
m_{kon}	Massa av kon vid fallkontest	[g]
n	Antal oberoende mätningar	[st]
OCR	Överkonsolideringsgrad	[-]
q_t	Spetstryck från CPT-sondering	[kPa]
r	Avstånd mellan mätpunkter	[m]
$R(r)$	Autokorrelationsgrad	[-]
w_L	Flytgräns	[-]
x	Observerade mätdata	[kPa]
X	Okänd geoteknisk parameter	[kPa]
y	Medelvärdestrendlinje	[kPa]
z	Nivå	[m]

Grekiska symboler

ε	Fel i uppskattning av en parameter	[-]
δ_h	Horisontellt fluktuationsavstånd	[m]
δ_v	Vertikalt fluktuationsavstånd	[m]
Γ	Variansreduktionsfaktor	[-]
ψ	Statistisk reduktionsfaktor	[-]
σ	Standardavvikelse	[kPa]
σ^2	Varians	[kPa ²]
σ'	Effektivspänning	[kPa]
σ'_c	Förkonsolideringstryck	[kPa]
σ_{v0}	Vertikalt totaltryck	[kPa]
τ_{Vb}	Okorrigerad skjuvhållfasthet från Vb	[kPa]
τ_{Kon}	Okorrigerad skjuvhållfasthet från Kon	[kPa]
θ	Prior	[kPa]
θ	Slumpmässig variabel	[kPa]
ξ	Undersökt parameter	[kPa]
$\bar{\xi}$	Medelvärde av undersökt parameter	[kPa]

Index

d	Transformerat och korrigerat värde
in	Naturligt, inneboende (inherent)
korr	Korrigerat värde
m	Uppmätt (measured)
me	Mätning (measurement)
st	Statistiskt
tot	Total
tr	Transformation

Innehållsförteckning

1. Introduktion	1
1.1. Bakgrund	1
1.2. Syfte och mål	2
1.3. Metodik	3
1.4. Avgränsningar	3
1.5. Disponering	4
2. Undersökningsområden för tillämpning	5
2.1. Göta älv	5
2.2. Utredningsområden	6
2.2.1. Smådala	8
2.2.2. Sörängen	10
2.2.3. Indata	12
3. Statistisk modell för hantering av osäkerheter	19
3.1. Statistisk inom geoteknik	19
3.2. Bayesianska synsättet på statistik	19
3.3. Osäkerheter inom geoteknik	21
3.3.1. Total osäkerhet	22
3.3.2. Naturlig variation	23
3.3.3. Mätfel	23
3.3.4. Transformationsfel	24
3.3.5. Statistisk osäkerhet	24
3.3.6. Autokorrelation	25
3.3.7. Variansreduktion	25
3.4. Utökad multivariabelanalys	26
4. Beräkningsmetodik	29
4.1. Total osäkerhet för enskilda mätmetoder	29
4.1.1. Trendlinje och variation av indata	29
4.1.2. Priori	30
4.1.3. Naturlig variation	31
4.1.4. Mätfel	31
4.1.5. Transformationsfel	32
4.1.6. Statistisk osäkerhet	33
4.1.7. Variansreduktion	34
4.1.8. Total osäkerhet	35
4.2. Utökad multivariabelanalys	35
4.3. Känslighetsanalyser	38
5. Resultat	39
5.1. Smådala	39
5.2. Sörängen	41

5.3. Känslighetsanalyser	44
6. Diskussion	49
6.1. Analys av COV_{tot}	49
6.2. Analys av mätmetoder	50
6.3. Indelning av geologiska delområden	51
6.4. Felkällor	52
6.4.1. Mätfel	52
6.4.2. Transformationsfel	53
6.4.3. Variansreduktion	53
6.5. Känslighetsanalyser	54
6.6. Modellfel	54
6.7. Användning av EMA	55
7. Slutsats	57
7.1. Förslag på vidare arbeten	57
Appendix A – Vald skjuvhållfasthet SGI	63
Appendix B – Skredhistorik	67
Appendix C – Placering av borrhål för DSS	69
Appendix D – Delresultat för COV_{tot}	71

1. Introduktion

1.1. Bakgrund

Osäkerheter vid bedömning av geotekniska parametrar är oundvikliga, men med hjälp av statistiska metoder kan de uppmärksammas och hanteras systematiskt (Phoon, 2019). Enligt Phoon (2019) var professor Peter Lumbs artikel ”The variability of natural soils” (1966) startskottet till tillämpningen av statistiska metoder för att kvantifiera osäkerheter inom geoteknik. I artikeln fastställer Lumb hur uppskattningen av en jordparameter kan förbättras genom att hanteras som en slumpmässig variabel med en statistisk sannolikhetsfördelning, i stället för som ett absolut värde med deterministiska metoder.

I en intervju från 1986 (citat återgivna av Phoon, 2019) förklarar Lumb att det är på grund av den slumpmässiga naturen hos geotekniska rådata som sannolikhetsteori är en bättre lämpad designmetod vid bedömning av jordparametrar, snarare än de traditionella säkerhetsfaktorerna:

Traditionally engineering and civil engineering are very deterministic in their teaching and in the attitude of their practitioners. when something goes wrong, it takes them by surprise. (...) Once you think of all these things as being random processes, it does clear up the engineer's mind as well as improving his design. It makes him realize that he cannot predict what is going to happen precisely. (Lumb, 1986)

Lumb skiljer på egenskaper hos parametrar inom konstruktion och inom geoteknik, och menar på att geotekniska parametrar måste hanteras annorlunda på grund av osäkerheten som uppkommer till följd av att tillgången på geotekniska data alltid kommer vara begränsande. Med denna inställning till geoteknik accepterar ingenjören hur lite vi vet om platserna vi undersöker och öppnar därmed upp för att jobba med vad vi inte vet. Kring millennieskiftet rekommenderades för första gången sannolikhetsbaserade metoder för att kvantifiera geotekniska osäkerheter (National Research Council, 1995), och idag kan geotekniker bryta ner den totala osäkerheten till kvantifierbara delar.

Risker uppkomna från geotekniska osäkerheter kan hanteras som konsekvenserna från dessa osäkerheter, vilka kan hanteras med samma metoder för riskhantering som tillämpas på övriga risker kopplat till geoteknik (Spross m.fl., 2018). För att motverka dessa risker genomförs ofta olika typer av riskanalyser, där sannolikhet och konsekvens för en geoteknisk risk är avgörande för hanteringen.

En plats i Sverige där riskhantering är aktuellt idag är områdena längs med Göta älv, där risken för jordskred på många platser bedömts som hög (SGI, 2012). Riskanalysen för omgivningen kring Göta älv avser släntstabilitet, dels för att försäkra sig om säkerheten för individ och miljö och dels för att sänka kostnader kopplat till geotekniska risker (SGI, 2021a). I dagsläget arbetar Statens geotekniska institut (SGI) med den statistiska punktskattningsmetoden (PEM) för en sannolikhetsbedömning av skredrisken, och metoden kräver fastställande av den sökta parameters profil och dess variationskoefficient (Lindvall & Jönsson, 2020). Från tidigare utredningar av leran längs med Göta älv finns en stor mängd geotekniska data tillgänglig, och dessutom har odränerad skjuvhållfasthet i lera (c_u) pekats ut som en av de mest kritiska parametrarna för släntstabilitet (SGI, 2012).

Den bayesianska osäkerhetsbedömningen i detta examensarbete bygger på metodiken som Prästings (2019) presenterar i sin doktorsavhandling ”Managing uncertainties in geotechnical parameters: From the perspective of Eurocode 7”, utökad multivariabelanalys (EMA). Metoden är tillämpbar för flera typer av geotekniska parametrar, men i detta examensarbete är det endast osäkerheterna kring bedömningen av c_u som undersöks.

Det finns alltså goda förutsättningar för och ett stort intresse i att undersöka osäkerheterna kring bedömningen av c_u längs med Göta älv. Ett bayesianskt synsätt på statistik kan nyttjas för att utvärdera dessa osäkerheter, och därför har områdena längs med Göta älv antagits utgöra ett lämpligt praktiskt exempel för att tillämpa EMA vid skattning av c_u .

1.2. Syfte och mål

Huvudsyftet med detta examensarbete är att visa hur ett bayesianskt synsätt kan användas vid bedömningen av geotekniska parametrar och därmed öka förståelsen för geotekniska osäkerheter. Målet är att tillämpa bayesiansk statistik genom att kvantifiera geotekniska osäkerheter från skattningen av c_u och därefter utföra en EMA.

Dessutom, i syfte att ytterligare visa på fördelar med denna metodik, jämförs de fem olika geotekniska undersökningsmetoder som används för att uppskatta c_u för leran längs med Göta älv. Målet är att med en statistisk osäkerhetsanalys visa på relevansen av de olika metoderna vid bedömningen av skjuvhållfasthet. Detta kan även ligga till grund för val av mätmetoder i fält- och laboratorium vid geotekniska undersökningar.

1.3. Metodik

Total osäkerhet för bedömningen av skjuvhållfasthet i lera kring Göta älv har beräknats med EMA, vilken bygger på metoden för en enklare multivariat analys av Ching m.fl. (2010) som sedan utvecklats av Müller m.fl. (2014). Bedömningen av osäkerheter vid uppskattning av en geoteknisk parameter har genomförts med de metoder som utvecklades av Müller (2013) och Prästings (2019).

Mätdata från CPT-sondering (CPT), CRS-försök (CRS), direkt skjuvförsök (DSS), vingförsök (Vb) och fallkonförsök (Kon) har erhållits från SGI i syfte att genomföra osäkerhetsanalyserna för områdena Smådala och Sörängen. Resultaten i detta examensarbete jämförs mot en tidigare bedömning av odränerad skjuvhållfasthet i lera från fördjupade stabilitetsutredningar för Smådala (WSP, 2020a) och Sörängen (SWECO, 2020a) utförda på uppdrag av SGI (SGI, 2021a).

Bedömningen av den totala osäkerheten (COV_{tot}) vid skattningen av c_u genomförs i två steg:

- 1) Beräkning av $COV_{tot|D}$ från skattningen av en parameter ξ_d (i detta fall c_u), det vill säga osäkerheten vid skattning av skjuvhållfasthet $\xi_d = c_u$, för varje enskild metod i fält och laboratorium (D).
- 2) Beräkning av den viktade osäkerheten ($COV_{tot,viktat}$) för varje geologiskt delområde (beräkningsområde) med EMA.

Beräkningarna för $COV_{tot|D}$ har genomförts med hjälp av Microsoft Excel, och beräkningarna för $COV_{tot,viktat}$ har genomförts med Mathcad 15.

1.4. Avgränsningar

- Två av totalt cirka 100 undersökningsområden längs med Göta älv har valts ut för denna studie (Smådala och Sörängen), varav cirka 10 av dessa 100 områden är pågående utredningar och cirka 10 områden är slutförda med tillgängliga mätdata. Smådala och

Sörängen har valts på grund av att det för dessa funnits mätdata tillgänglig vid tiden för detta examensarbete. Vid val av geologiska delområden inom Smådala och Sörängen har endast landområden undersökts, alltså har mätpunkter från älven exkluderats.

- De undersökta mätmetoderna (CPT, CRS, DSS, Vb, Kon) har valts på grund av att det är dessa som, enligt branschpraxis, använts för insamling av mätdata i de tidigare utredningarna utförda på uppdrag av SGI. Även mätdata från aktiva och passiva triaxialförsök för bedömning av skjuvhållfasthet i aktiv- respektive passivzonen samt en sammantagen bedömning av anisotropifunktionen finns tillgängliga, men denna data har inte inkluderats i analysen eftersom mätdata från resterande metoder representerar skjuvhållfastheten i den direkta skjuvzonen och därför inte är direkt jämförbara med mätdata från triaxialförsöken.
- Vissa parametrar i studien har inte beräknats specifikt för Smådala och Sörängen, utan har bestämts utifrån erfarenhet (till exempel mätfel) eller antagits likvärdiga med resultat från andra studier (till exempel transformationsfel och fluktuationsavstånd).

1.5. Disponering

Denna rapport är uppdelad i 7 kapitel:

- Kapitel 1: Introduktion till examensarbetet.
- Kapitel 2: Presentation av SGI:s uppdrag samt valda undersökningsområden och indata.
- Kapitel 3: Teoretisk bakgrund till hantering av osäkerheter inom geoteknik med bayesiansk statistik.
- Kapitel 4: Genomgång av beräkningsmetodiken tillsammans med antaganden och förenklingar för detta specifika fall samt genomgång av genomförda känslighetsanalyser.
- Kapitel 5: Resultat från utvärdering av COV_{tot} , \bar{c}_u och känslighetsanalyserna.
- Kapitel 6: Analys av resultat och diskussion om felkällor.
- Kapitel 7: Slutats och förslag på vidare arbeten.
- Referenser och appendix.

2. Undersökningsområden för tillämpning

Eftersom skjuvhållfastheten i lera är avgörande för ett områdets släntstabilitet är det från ett risk- och säkerhetsperspektiv motiverat att undersöka denna parameter separat (SGI, 2012).

I detta examensarbete har c_u från två utredningsområden längs med Göta älv undersökts, och i detta kapitel presenteras indata samt geologiska förutsättningar för respektive område.

2.1. Göta älv

Göta älv är Sveriges största vattendrag, älven är 93 kilometer lång och med en medelvattenföring av $565 \text{ m}^3/\text{s}$ rinner den från utloppet i Vänersborg vid Vänerens södra spets, via Göteborg, och sedan ut i havet vid Fredrikshamn. Älven förser Göteborgsområdet med dricksvatten, tillgodoser industrier med kylvatten och fungerar dessutom som transportled. Marken runt Göta älv består av marint avsatta lerjordar med förekomst av kvicklera, vilket gör älvens slänter känsliga för skred (SGI, 2021a). I dagsläget har många områden längs med älven redan utvärderats, där många klassats som högriskområden (SGI, 2012) och om inga skredriskåtgärder vidtas förväntas en höjd risknivå på grund av klimatförändringar för en fjärdedel av dessa områden under det närmaste århundrandet (SGI, 2021a).

För att tillgodose säkerhets- och hållbarhetsmålen avseende geotekniska risker kring Göta älv har regeringen beslutat om att inrätta den så kallade "Delegationen för Göta älv" (SGI, 2021a), vilken getts som uppdrag till SGI. Delegationen innebär att SGI har till uppgift bedöma skredrisken längs med Göta älv och upprätta en åtgärdsplan för att hantera eventuella risker (SGI, 2018). Dessa stabilitetsutredningar har bedömts utifrån sannolikhet och konsekvens för skred, och områden som pekats ut som riskområden i Göta älvutredningen (SGI, 2012) har sedan genomgått fördjupade stabilitetsutredningar vilket ligger till grund för den sannolikhetsklassificering SGI ska utföra med hjälp av PEM. PEM är en enkel statistisk metod som implementerats hos SGI mycket på grund av att den är enkel och snabb, men ändå ger liknande resultat som mer

avancerade metoder (Lindvall & Jönsson, 2020). Vid beräkning med PEM behöver både en c_u -profil och COV bestämmas; alltså är en korrekt bedömning av dessa av största vikt för en tillförlitlig analys.

2.2. Utredningsområden

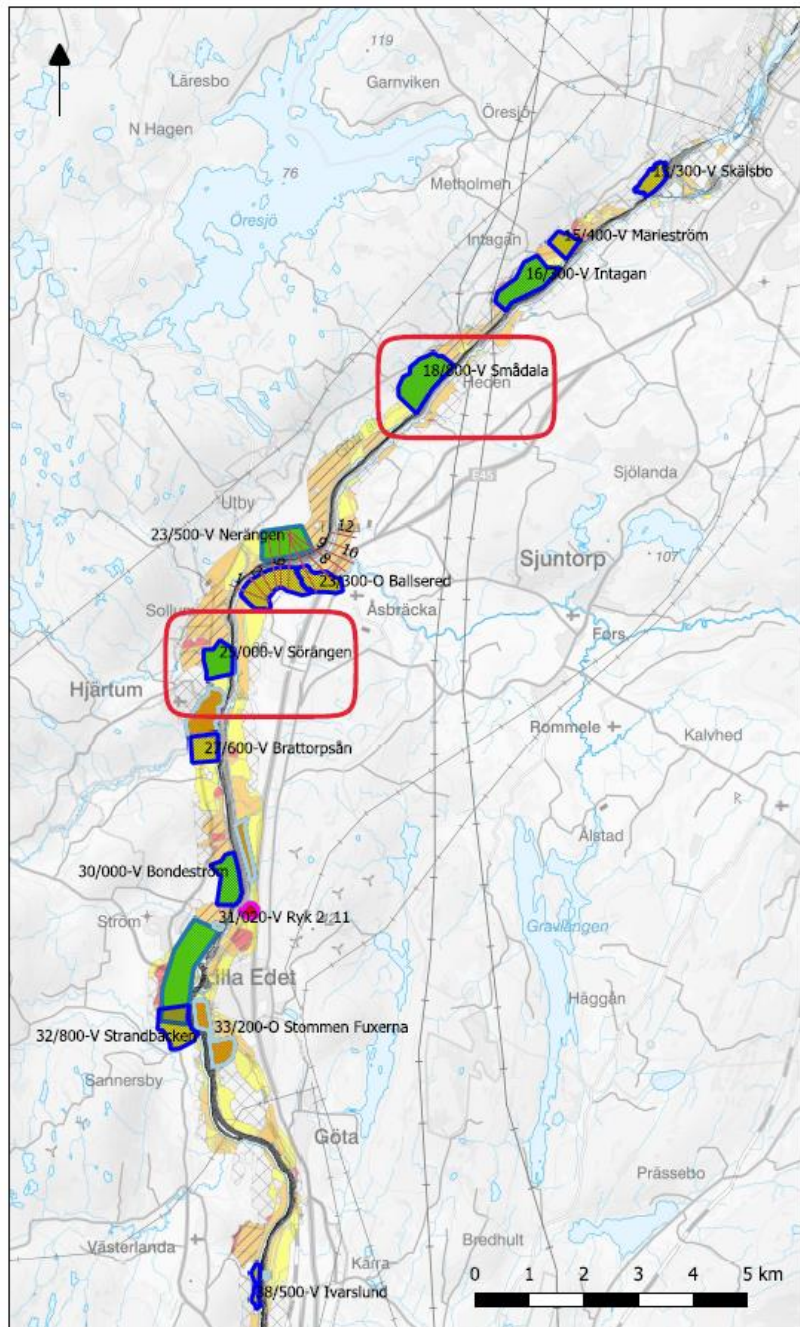
I detta examensarbete har två områden längs Göta älv undersökts: Smådala och Sörängen. Båda områdena ligger i Lilla Edets kommun, i norra delen av och västra sidan om älven (Figur 2.1). De valda områdena har i detta examensarbete delats in i så kallade geologiska delområden enligt de fördjupade stabilitetsutredningarna utförda av WSP (2020a) och SWECO (2020a) för respektive område.

Inom ett geologiskt delområde antas marken vara tillräckligt geologiskt homogen för att jordparametrar kan sammanställas och utvärderas för att representera det området, till exempel i en beräkningsmodell. En tumregel är att COV för en parameter, exempelvis c_u , inte bör överskrida 20 %, då det skulle indikera att det utvärderade området bör delas upp i flera geologiska delområden.

Smådalas och Sörängens geologi är relativt lika: båda består av mäktiga lerlager och har samma bildningssätt. En viktig skillnad är dock att Smådala är mycket större till ytan jämfört mot Sörängen (med cirka 900 000 m² mot Sörängens 150 000 m²) vilket sannolikt, men inte nödvändigtvis, innebär en större variation av geotekniska parametrar inom området.

I både Smådala och Sörängen är det tydligt att alla jordmassor tidigare legat på samma högst nivå eftersom överkonsolideringsgraden (OCR) och förkonsolideringstrycket (σ'_c) vid ett visst djup från markytan är väldigt mycket högre i slänthöjden jämfört mot på slänthöjden (WSP, 2020b; SWECO, 2020b), vilket även bekräftar av områdenas geologiska historia och lerornas bildningssätt. Ett högre σ'_c indikerar ofta ett högre c_u , men empiriska ekvationer baserade på σ'_c som inte är anpassade för extremt överkonsoliderade jordar kan ändå ge missvisande höga värden på c_u och bör därför bedömas med försiktighet (Larsson m.fl., 2007).

Jordmassorna kring Göta älv har avsatts horisontellt mot älvbotten och det är därför troligt att slänterna uppstått från erosion av älven efter att leran sedimenterats och konsoliderats (SGI, 2012). Därmed kan konsolideringsegenskaperna för leran längs med Göta älv antas vara mer lika till nivå än djup. Detta har antagits vara fallet i Smådala och Sörängen,



Figur 2.1: Översiktskarta över utredningsområden för norra delen av Göta älv, underlag från Delegationen för Göta älv. Områdena Smådala och Sörängen är markerade med rött och lägesangivelserna i områdesnamnen avser avståndet i kilometer/meter från utloppet i Vänersborg (SGI, 2021b). Återpublicerat med tillstånd av SGI).

och därför har c_u för dessa områden sammanställts och utvärderats mot nivå i stället för mot djup.

2.2.1. Smådala

Utredningsområdet Smådala består av åker- och betesmark med en marknivå på kring +30 m på släntkrönet, och cirka +9 m vid strandkanten (Figur 2.2). Områdets nivåskillnader består av en sluttning mot älven med brantare parti närmast vattnet samt ett antal raviner (WSP, 2020a). Marken består främst av mulljord och lera av torrskorpekaraktär ovanpå vattenmättad lera med en mäktighet upp till 40 m ovan berggrunden. Berg i dagen finns i områdets ytterkanter och ett friktionslager mellan leran och berget förekommer på vissa platser. Leran är normalt till kraftigt överkonsoliderad med OCR på ca 1,3–2,3 på släntkrönet, men betydligt högre i ravinerna och släntfoten.

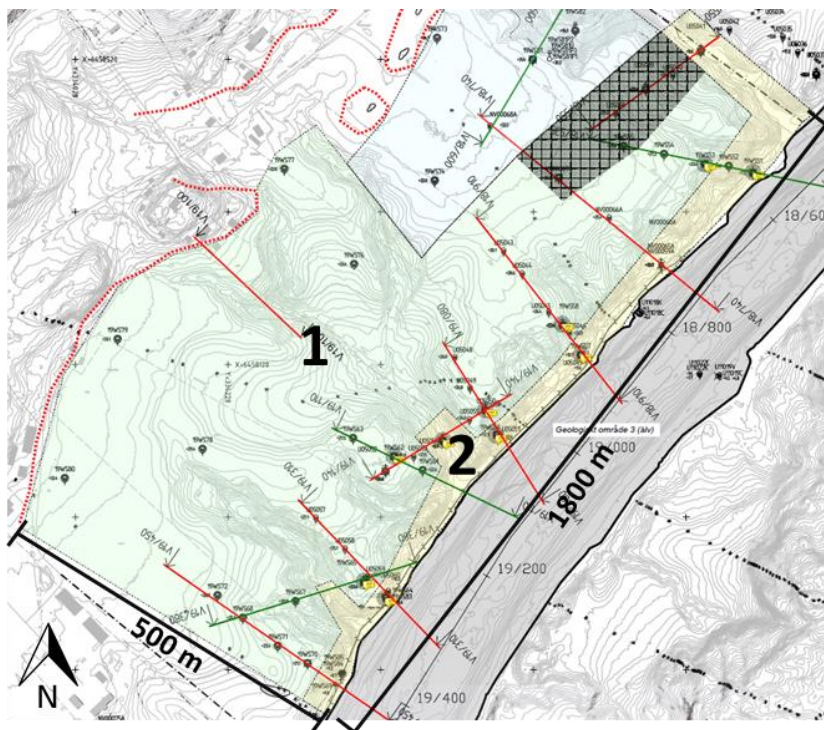
Den kraftigt varierande marknivån i Smådala ger stora variationer i konsolideringsegenskaper, vilket innebär en större geologisk komplexitet jämfört mot ett flackare område. Därtill klassificeras stora delar av Smådalas lera som kvicklera och även fastän detta inte direkt leder till instabilare slänter ökar det risken för större skredutbredning, vilket kan utläsas från Smådalas skredhistorik (Appendix B).



Figur 2.2: Terrängöversikt och utbredningsområde för Smådala, yttre gräns markerad med rött. Ur PM för fördjupad stabilitetsutredning Smådala (WSP, 2020a). Återpublicerat med tillstånd av SGI).

En fördjupad stabilitetsutredning för Smådala har, på uppdrag av SGI, genomförts av WSP (2020a) där området delas in i tre geologiska delområden (Figur 2.3): området bakom släntkrön (område 1), strandzonen (område 2) och området i älven (område 3). Beräkningsområden för detta examensarbete är område 1 och 2.

Indata för Smådala är hämtad från borrhålsdata distribuerade av SGI (WSP, 2020b). Antal borrhål, mätpunkter och typ av geoteknisk undersökningsmetod redovisas separat för Smådala 1 (Tabell 2.1) och Smådala 2 (Tabell 2.2) nedan, se avsnitt 2.2.3 för detaljerad presentation av indata. För sammanställning av c_u från tidigare genomförd fördjupad stabilitetsutredning, se Appendix A. För placering av borrhål för DSS, se Appendix C.



Figur 2.3: Geologisk områdesindelning (beräkningsområden) för Smådala. Grön yta markerar geologiskt område 1, gul markerar geologiskt område 2. Gröna och röda linjer markerar beräkningssektioner, blå yta markerar förslag på ytterligare ett beräkningsområde. Ur PM för fördjupad stabilitetsutredning Smådala (WSP, 2020a). Återpublicerat med tillstånd av SGI.

Tabell 2.1: Indata för Smådala 1, översiktligt.

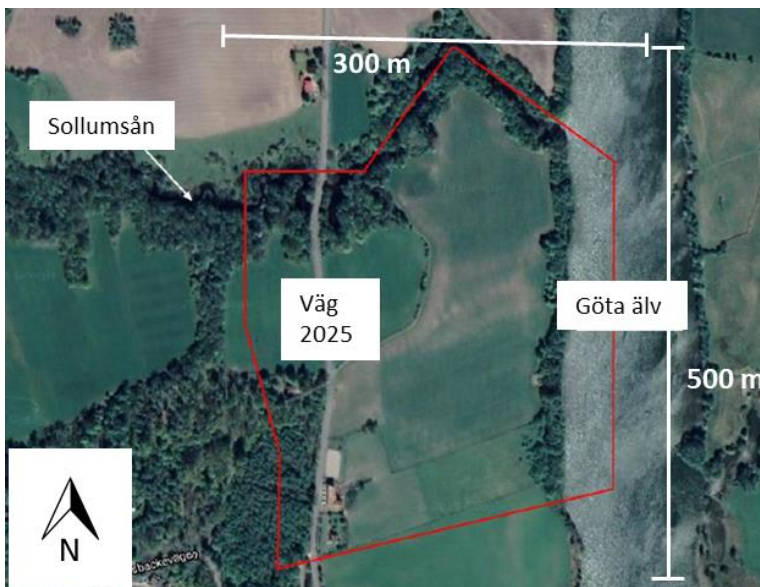
Metod	Typ	Antal borrhål	Totalt antal mätnivåer
CPT	in-situ	30	1580
CRS	ex-situ	5	22
DSS	ex-situ	5	21
Vb	in-situ	9	88
Kon	ex-situ	9	84

Tabell 2.2: Indata för Smådala 2, översiktligt.

Metod	Typ	Antal borrhål	Totalt antal mätnivåer
CPT	in-situ	8	403
CRS	ex-situ	5	23
DSS	ex-situ	5	19
Vb	in-situ	6	45
Kon	ex-situ	6	44

2.2.2. Sörängen

Sörängen består av åkermark med en utbredning om cirka 500 meter längs med älven och 300 meter väster om älven (SWECO, 2020a). Marknivån varierar mellan cirka +21 m och +15 m mellan Kungälvsvägen (Väg 2025 i Figur 2.4) och släntkrönet invid Göta älv. Jorden består i huvudsak av lera

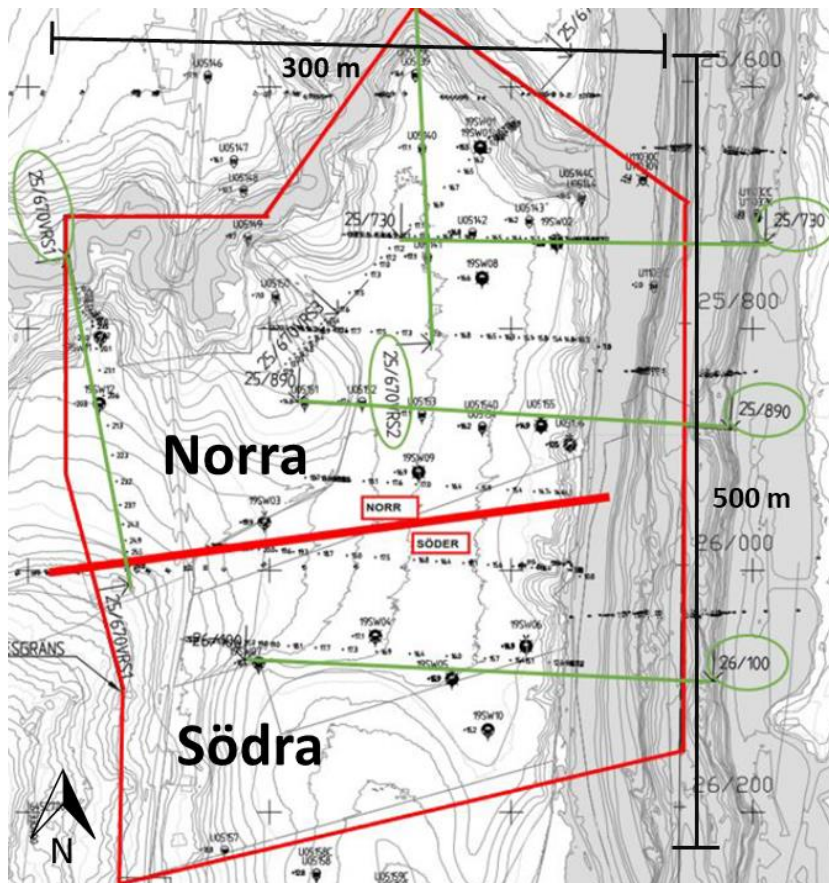


Figur 2.4: Terrängöversikt och utbredningsområde för Sörängen, yttre gräns markerad med rött. Sollumsån och Göta älv utgör nordlig respektive östlig gräns. Ur PM för fördjupad stabilitetsutredning Sörängen (SWECO, 2020a. Återpublicerat med tillstånd av SGI).

med en mäktighet upp till 50 m som sluttar svagt västerut mot Göta älv och Sollumsån. Kvikclera har endast påträffats i en punkt i mitten av området.

En fördjupad stabilitetsutredning av område Sörängen har, på uppdrag av SGI, genomförts av SWECO som delat in området i tre geologiska delområden: Norra, Södra och Älven (Figur 2.5). Beräkningsområden för detta examensarbete är Norra och Södra Sörängen.

Sörängen är betydligt flackare jämfört mot Smådala, och saknar en tydlig naturlig geologisk uppdelning. Utöver analysen på de två delområdena Norra och Södra Sörängen utförs därför även beräkningarna för ett område benämnt ”Hela Sörängen”, där Norra och Södra slagits ihop till ett enda område.



Figur 2.5: Geologisk områdesindelning för Sörängen. Geologiska delområden (beräkningsområden) markerade med rött, beräkningssektionerna i grönt. Ur PM för fördjupad stabilitetsutredning Sörängen (SWECO, 2020a. Återpublicerat med tillstånd av SGI).

Indata för Sörängen är hämtad från borrhålsdata distribuerade av SGI (SWECO, 2020b). Antal borrhål, mätpunkter och typ av geoteknisk undersökning redovisas separat för Norra Sörängen (Tabell 2.3) och Södra Sörängen (Tabell 2.4), se avsnitt 2.2.3 för detaljerad presentation av indata. För sammanställning av c_u från tidigare genomförd fördjupad stabilitetsutredning, se Appendix A. För placering av borrhål för DSS, se Appendix C.

2.2.3. Indata

Indata använd för beräkningarna i detta examensarbete har hämtats från fördjupade utredningar utförda på uppdrag av SGI (WSP, 2020a; SWECO, 2020a). Berörda mätdata uppmätt med CPT, CRS, DSS, Vb och Kon presenteras för respektive delområde: Smådala 1 (Figur 2.6–2.8), Smådala 2 (Figur 2.9–2.11), Norra Sörängen (Figur 2.12–2.14) och Södra Sörängen (Figur 2.15–2.17). I den fördjupade utredningen av SWECO (2020a) användes, på grund av bristande antal mätpunkter, även närliggande mätpunkter från Norra Sörängen vid skattning av c_u för Södra Sörängen. I detta examensarbete användes dock endast mätpunkter lokaliserade inom Södra Sörängens beräkningsområde.

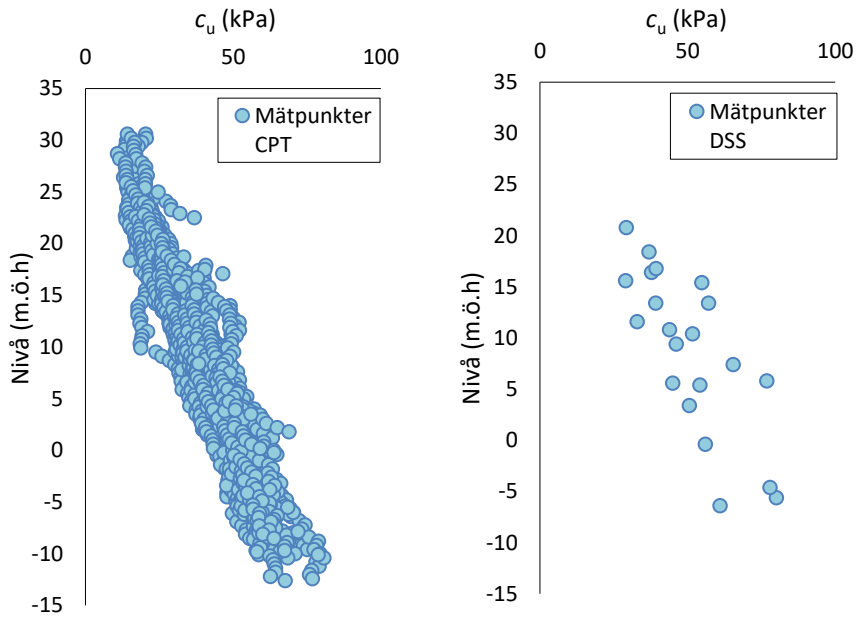
Observera att indata för CPT har rensats med hänsyn till vertikalt fluktuationsavstånd δ_v och förekomst av friktionslager (vanligast förekommande i de över jordlagren) (WSP, 2020b; SWECO, 2020b). I enighet med metodiken i Müller m.fl. (2014) har mätdata från nivåer inom 40 cm avstånd från samma borrhål tagits bort för att beakta δ_v .

Tabell 2.3: Indata för Norra Sörängen, översiktligt.

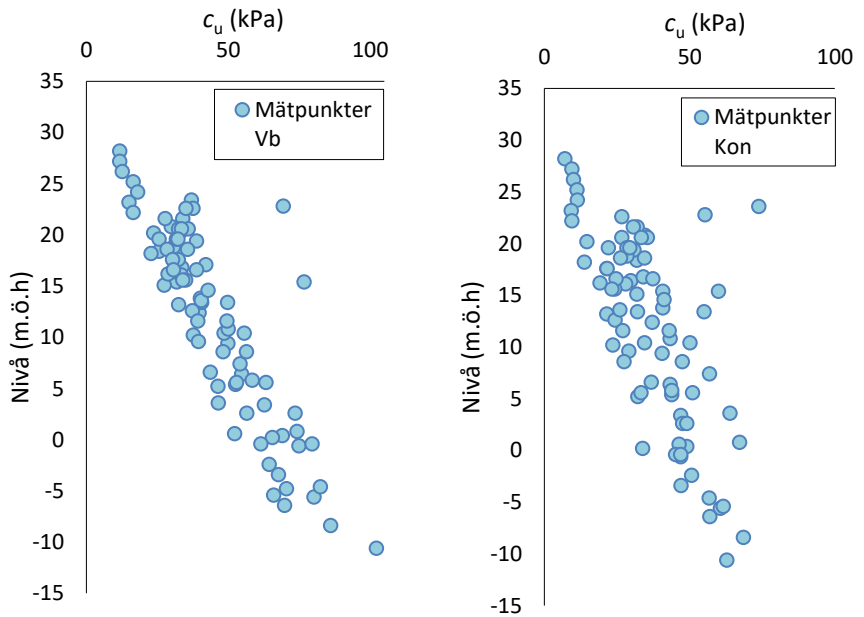
Metod	Typ	Antal borrhål	Totalt antal mätnivåer
CPT	in-situ	21	1776
CRS	ex-situ	6	26
DSS	ex-situ	4	16
Vb	in-situ	6	73
Kon	ex-situ	6	75

Tabell 2.4: Indata för Södra Sörängen, översiktligt.

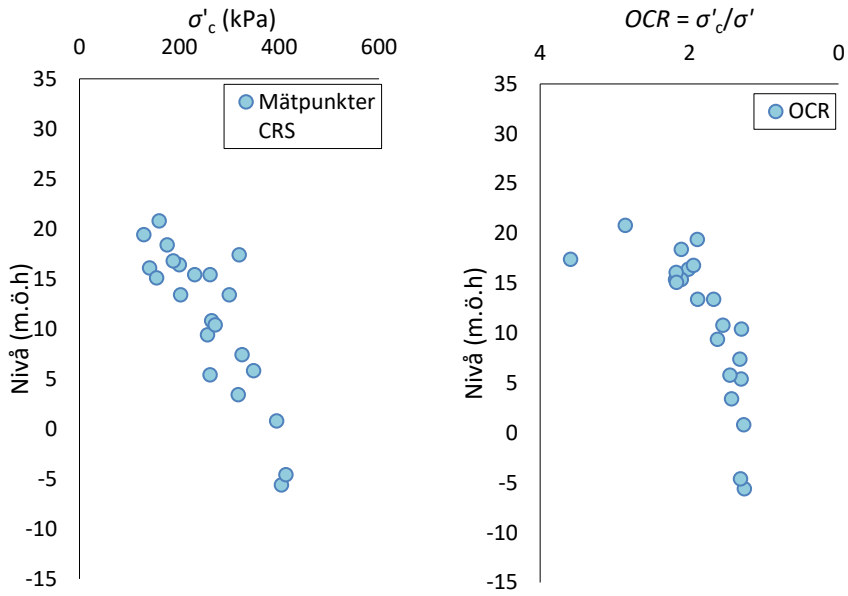
Metod	Typ	Antal borrhål	Totalt antal mätnivåer
CPT	in-situ	4	320
CRS	ex-situ	2	8
DSS	ex-situ	2	8
Vb	in-situ	3	30
Kon	ex-situ	2	21



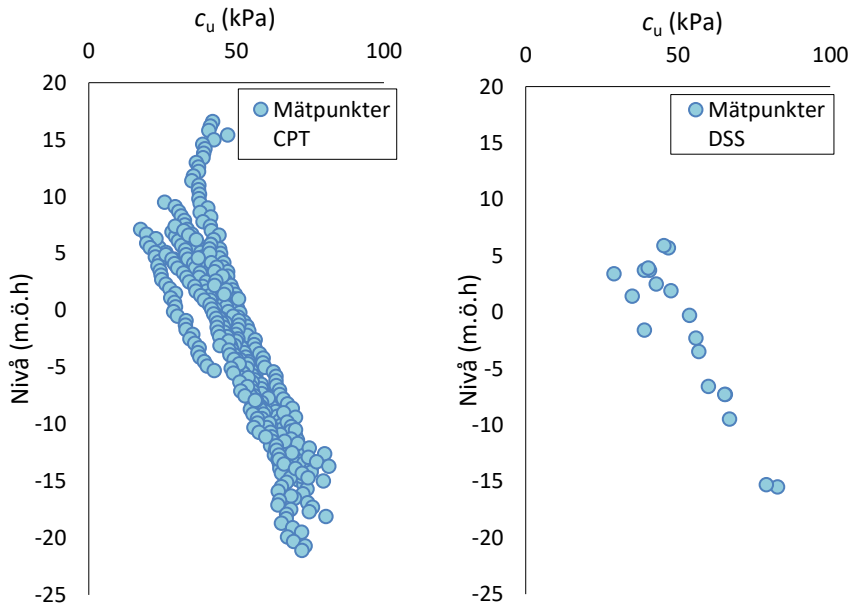
Figur 2.6: Indata från CPT och DSS för Smådala 1. Mätdata distribuerad av SGI.



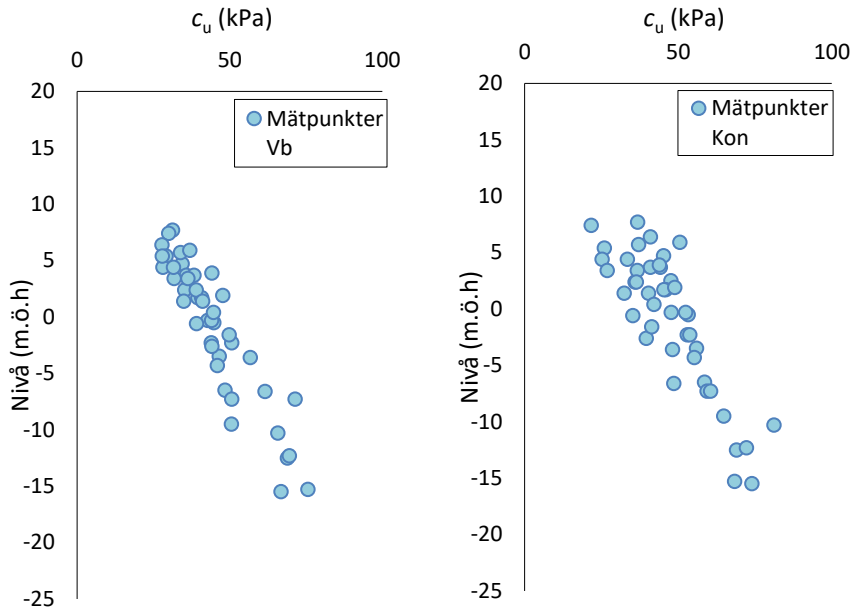
Figur 2.7: Indata från Vb och Kon för Smådala 1. Mätdata distribuerad av SGI.



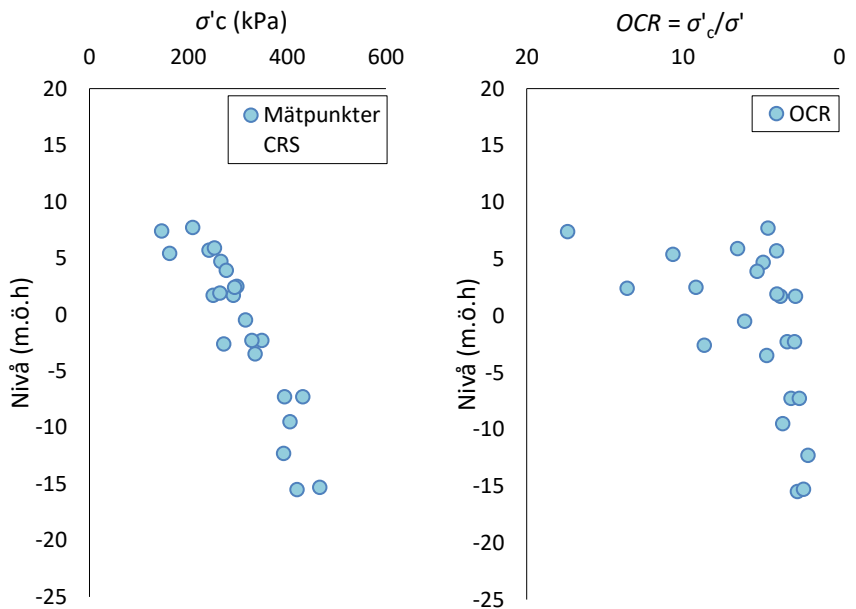
Figur 2.8: Indata från CRS för Smådala 1. Mätdata distribuerad av SGI där σ' bestäms utifrån tunghet i rutinförsök.



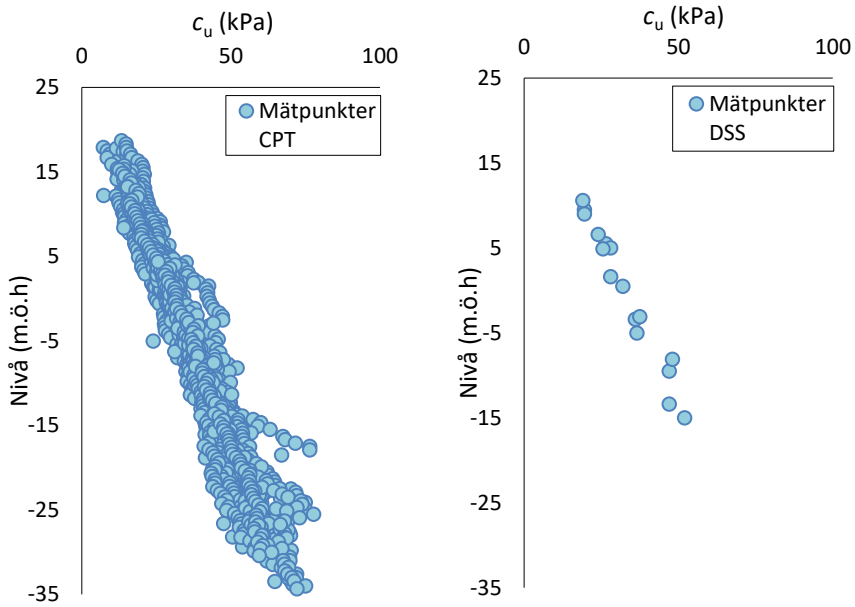
Figur 2.9: Indata från CPT och DSS för Smådala 2. Mätdata distribuerad av SGI.



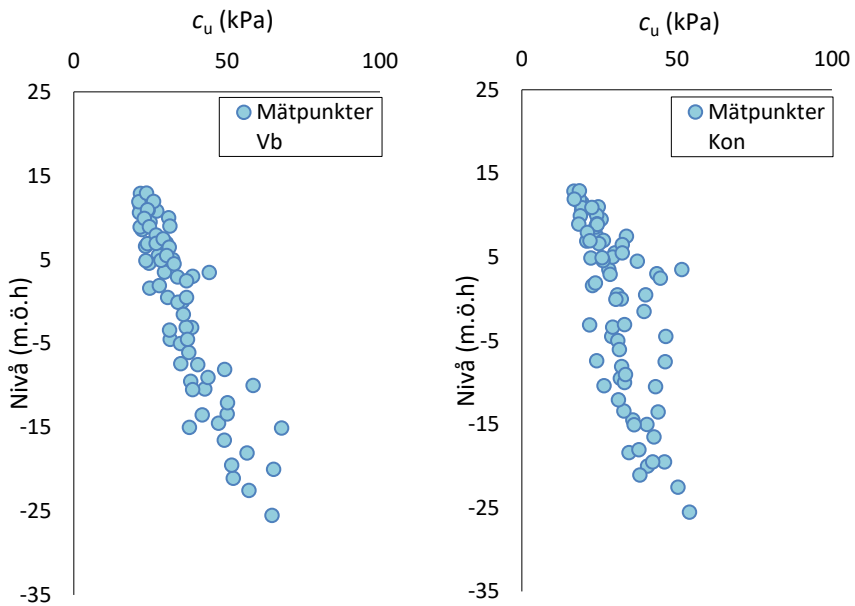
Figur 2.10: Indata från Vb och Kon för Smådala 2. Mätdata distribuerad av SGI.



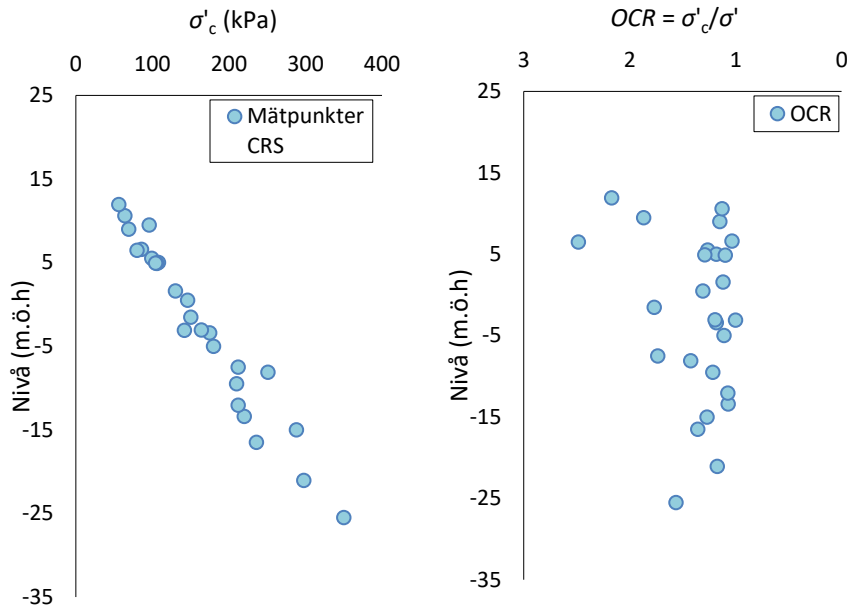
Figur 2.11: Indata från CRS för Smådala 2. Mätdata distribuerad av SGI där σ'_v bestämts utifrån tungnet i rutinförsök.



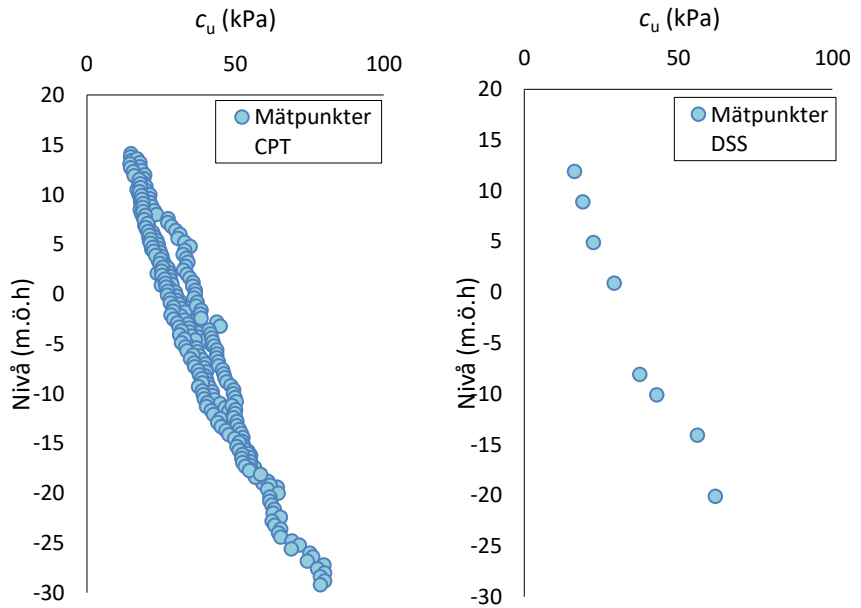
Figur 2.12: Indata från CPT och DSS för Norra Sörängen. Mätdata distribuerad av SGI.



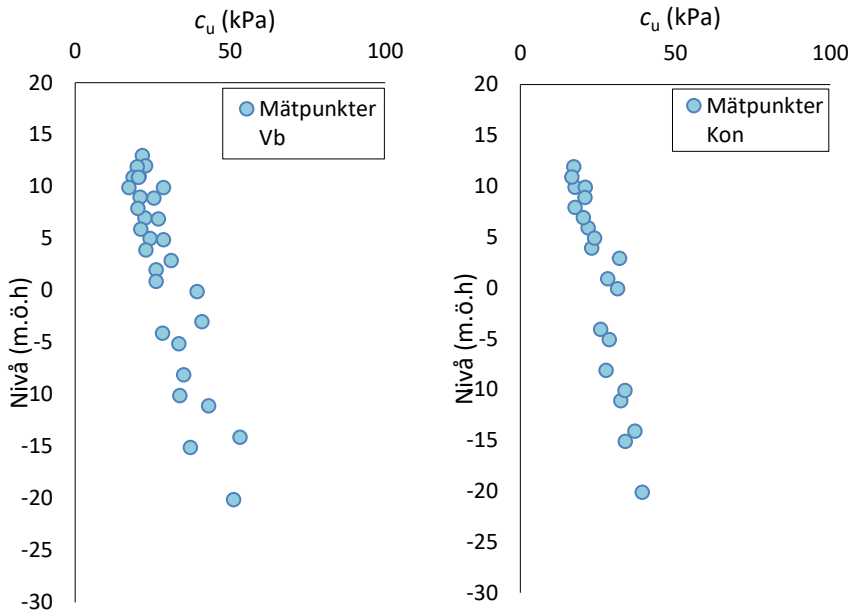
Figur 2.13: Indata från Vb och Kon för Norra Sörängen. Mätdata distribuerad av SGI.



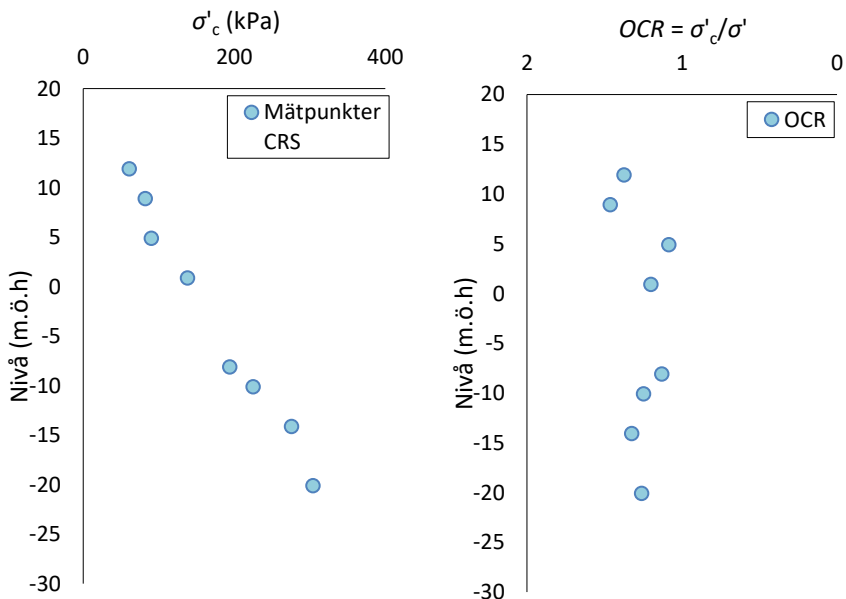
Figur 2.14: Indata från CRS för Norra Sörängen. Mätdata distribuerad av SGI där σ'_c bestäms utifrån tunghet i rutinförsök.



Figur 2.15: Indata från CPT och DSS för Södra Sörängen. Mätdata distribuerad av SGI.



Figur 2.16: Indata från Vb och Kon för Södra Sörängen. Mätdata distribuerad av SGI.



Figur 2.17: Indata från CRS för Södra Sörängen. Mätdata distribuerad av SGI där σ' bestämts utifrån tunghet i rutinförsök.

3. Statistisk modell för hantering av osäkerheter

3.1. Statistisk inom geoteknik

Geotekniska parametrar, till exempel skjuvhållfasthet i lera, kan bedömas från undersökningar i laboratorium och i fält. Eftersom dessa mätningar aldrig helt kan spegla markens egenskaper måste felen i mätningarna korrigeras och osäkerheten i bedömningen beaktas (Prästings, 2019).

Dessa osäkerheter brukar delas upp i två kategorier: aleatoriska och epistemiska (Ang & Tang, 2006). De aleatoriska kommer från naturliga slumpmässiga variationer, till exempel jordparametrars naturliga variation i tid och rum, och denna osäkerhet kan alltså inte påverkas. En epistemisk osäkerhet beror i stället på otillräcklig kunskap, och kan alltså reduceras med ökad kunskap, till exempel med mer exakta och fler mätningar.

För att beskriva en observation från verkligheten och kvantifiera deras osäkerheter används ofta statistiska metoder (Ang & Tang, 2006), vilka enligt Baecher och Christian (2003) kan delas in i två skolor: den klassiska frekventistiska och den bayesianska, där skillnaden framför allt är synen på osäkerhet. Till skillnad från det frekventistiska synsättet, där osäkerheter hanteras som okända variabler, behandlar det bayesianska synsättet osäkerhet som en sannolikhet. På grund av komplexiteten i geotekniska bedömningar anpassas geotekniska undersökningar, enligt Baecher och Christian (2003), bäst till det bayesianska synsättet eftersom detta tillåter tidigare erfarenheter och bedömningar påverka skattningen av en parameter redan innan mätningar i fält och laboratorium.

3.2. Bayesianska synsättet på statistik

En stor fördel med det bayesianska synsättet jämfört mot det frekventistiska är möjligheten att kombinera information från olika slags källor vid bedömningen av en parameter, vilket vid geotekniska utredningar (där brist på mätdata är vanligt) möjliggör mer tillförlitliga bedömningar (Müller, 2013). Liksom beskrivet av Ang och Tang (2006) finns det i stora drag tre fördelar med det bayesianska synsättet:

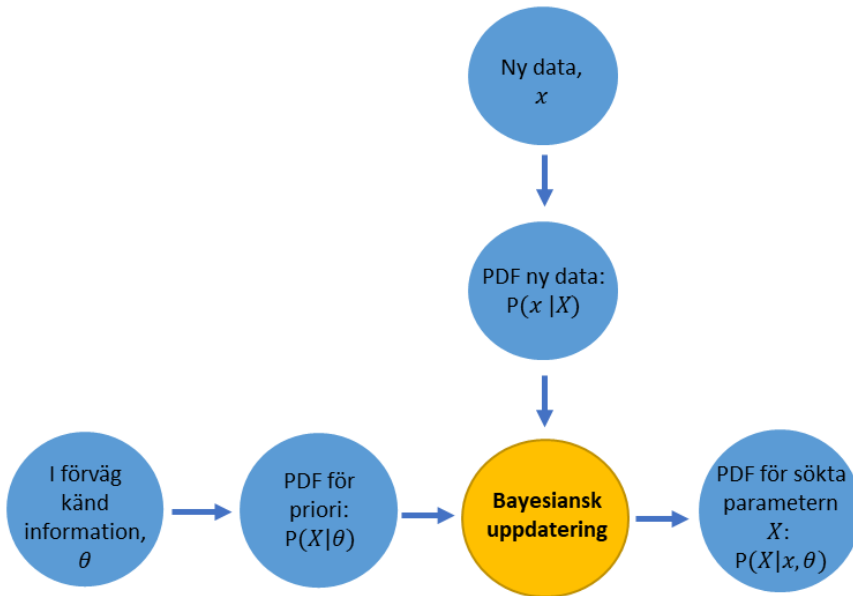
- 1) Hänsyn kan tas till tidigare erfarenheter och expertis, så kallad *a priori* känd information. Alltså kan bedömningar från liknande förhållanden appliceras redan innan nya mätningar genomförs, vilket även kan användas som komplement till mätningar i fält och laboratorium.
- 2) Aleatoriska och epistemiska osäkerheter kan kombineras systematiskt.
- 3) Bedömningen av en parameter kan uppdateras allt eftersom ny information blir tillgänglig.

Vid bedömning av en geoteknisk parameter X finns oftast en aning om parameters storlek och fördelning på förhand, vilket inom bayesiansk statistisk benämns som tidigare (*a priori*) känd information (Müller, 2013). En skattning av en parameter från priori är alltså en skattning från tidigare kunskap om parametern som kan utföras innan utförandet av geotekniska mätningar, till exempel en uppfattning om c_u från tidigare undersökningar i liknande geologiska förhållanden. Med bayesiansk uppdatering (Figur 3.1) kan en slumpmässig variabel (θ) beräknas med hänsyn till både kunskap från tidigare erfarenhet och senare uppmätt data.

Ang och Tang (2006) förklarar att den i förväg kända informationen kan beskrivas med täthetsfunktionen $f'_\theta(\theta)$, där θ representerar parametrarna i täthetsfunktionen till X (till exempel medelvärde och standardavvikelse vid normaldistribution). Således kan täthetsfunktionen till den sökta parametern X skrivas som $f_{X|\theta}(x|\theta)$. Denna täthetsfunktion kan sedan uppdateras med observerade mätdata $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ (till exempel från geotekniska mätningar i fält och laboratorium), vilket kallas för bayesiansk uppdatering (ekvation 3.1 och Figur 3.1). Funktionen som beskriver sannolikheten av att observera x förutsatt en prioriskattning θ , $P(x|\theta)$, kan i gränstillståndet skrivas:

$$f''(\theta) = \frac{P(x|\theta)f'_\theta(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} P(x|\theta)f'_\theta(\theta)d\theta}, \quad (3.1)$$

vilken ofta förenklas med att benämna $P(x|\theta)$ som likelihoodfunktionen av θ , $L(\theta|x)$, samt genom att beteckna nämnaren som konstanten $k = [\int L(\theta|x)f'_\theta(\theta)d\theta]^{-1}$ där k är oberoende av θ :



Figur 3.1: Bayesiansk uppdatering: tidigare känd information θ och ny data x beaktas vid bedömningen av sannolikheten för den sökta parametern X (efter Baecher och Christian, 2003).

$$f''(\theta) = k L(\theta|x) f'_{\theta}(\theta). \quad (3.2)$$

Slutligen kan informationen från de båda källorna (prioriskattningen och skattning från mätdata) kombineras för en sammanvägd bedömning av X (Ang & Tang, 2006):

$$f_X(x) = \int_{\theta} f_{X|\theta}(x|\theta) f''(\theta) d\theta. \quad (3.3)$$

Det bayesianska tillvägagångssättet tillåter alltså tidigare erhållen kunskap påverka uppskattningen av en sökt parameter. Dessutom kan uppskattningen uppdateras systematiskt då ny information blir tillgänglig, vilket kan bidra till en mer precis representation av det verkliga värdet (Müller, 2013).

3.3. Osäkerheter inom geoteknik

Enligt Baecher och Christian (2003) kan osäkerheter inom geoteknik kategoriseras som osäkerhet från skattningen av en parameter

(naturlig variation och mätfel), osäkerhet från en beräkningsmodell (matematisk och statistisk osäkerhet) samt osäkerhet i den utvärderade parametern (transformationsfel). Dessa osäkerheter kan samlas till en total osäkerhet som består av underkategorier karakteriserade utifrån aleatorisk och epistemisk osäkerhet (Figur 3.2) (Müller, 2013).

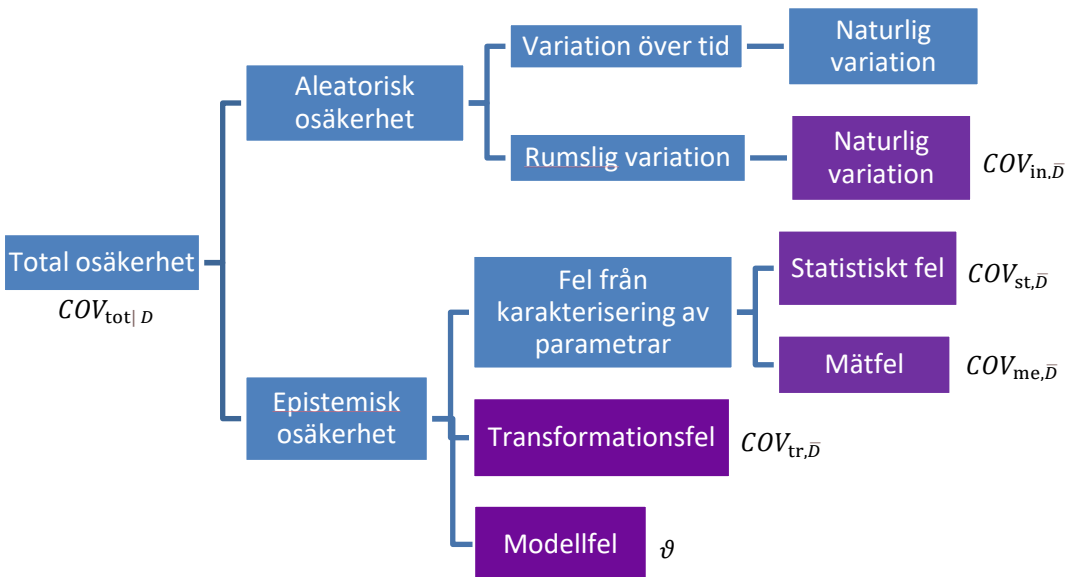
3.3.1. Total osäkerhet

En parameters medelvärde $\bar{\xi}_d$, beräknas från ett uppmätt medelvärde (från någon av undersökningarna i fält eller laboratorium, D) $\bar{\xi}_m$, vilken då korrigerats från ett uppmätt värde till den sökta parametern (till exempel från konintryck från CPT till c_u) med en transformationsfaktor C , och det totala felet ε_{tot} (Prästings, 2019):

$$\bar{\xi}_d | D = \bar{\xi}_m C \varepsilon_{tot} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{in} \varepsilon_{st} \varepsilon_{me} \varepsilon_{tr} \quad (3.5)$$

där ε_{in} är den naturliga rumsliga spridningen i marken, ε_{st} det statistiska felet, ε_{me} mätfelet och ε_{tr} transformationsfelet. Förutsatt undersökningsmetod D , kan COV_{tot} för skattningen av det korrigerade



Figur 3.2: Total osäkerhet uppdelat i kategorier för aleatorisk och epistemisk osäkerhet (efter Müller, 2013).

medelvärdet $\bar{\xi}_d$ beskrivas utifrån osäkerheter från skattningen av parametern (Figur 3.2) som $COV_{\text{tot}|D}$ (Prästings, 2019):

$$COV_{\text{tot}|D}^2 \approx COV_{\text{in},\bar{D}}^2 + COV_{\text{st},\bar{D}}^2 + COV_{\text{me},\bar{D}}^2 + COV_{\text{tr},\bar{D}}^2 + \vartheta \quad (3.6)$$

där ϑ är det statistiska modellfelet vilket, liksom i detta arbete, negligeras i de flesta studier (Müller, 2013). Varje enskild term av COV_{tot} medför ett självständigt bidrag till den totala osäkerheten från skattningen av parametern $\bar{\xi}_d$, indikerat med indexet \bar{D} (Prästings, 2019). Ekvation 3.6 gäller under förutsättning att osäkerheterna är okorrelerade samt att $COV_{\text{tot}|D} < 0,3$ (Melchers & Beck, 2018).

3.3.2. Naturlig variation

För att uppskatta en geoteknisk parameter för ett geologiskt område, till exempel skjuvhållfasthet i lera, görs antagandet att den undersökta jordvolymen är homogen (Prästings, 2019). I verkligheten varierar markens egenskaper i tid och rum på grund av naturliga geologiska processer (Phoon & Kulhawy, 1999a), alltså finns en osäkerhet kopplat till hur marken varierar mellan mätpunkterna över det undersökta området (Baecher & Christian, 2003).

En uppskattning av en geoteknisk parameter från ett ändligt antal mätpunkter kommer alltså alltid, på grund av den naturliga variationen i marken, variera från det verkliga värdet, vilket i osäkerhetsanalysen beaktas av variationskoefficienten COV_{in} (Prästings, 2019).

3.3.3. Mätfel

Variationen i mätdata beror inte endast på markans naturliga variation, utan påverkas även av metoden och utförandet av insamling av data. Tre källor påverkar mätfelet (COV_{me}): mätutrustningen, handhavande fel och slumpmässiga fel (Phoon & Kulhawy, 1999a), där de två första hanteras som systematiska fel (Prästings, 2019). Dessutom kan undersökningar ex-situ ge felaktiga resultat om ett prov störts från ovarsam transport eller dess förhållanden ändrats från för varm eller kall förvaring (Baecher & Christian, 2003).

I syfte att uppskatta COV_{me} över ett geologiskt område, och därmed ha möjlighet att reducera felet med ökat antal mätningar, måste COV_{me} hanteras som en slumpmässig variabel (Jaksa m.fl., 1997). Systematiska mätfel utesluts därför vid bedömning av COV_{me} , men med bättre

mätutrustning och standardiserade förehavanden kan de minimeras och därmed negligeras utan större påverkan på det totala felet (Orchant m.fl., 1988).

3.3.4. Transformationsfel

De flesta mätmetoder för att uppskatta en parameter ξ_m mäter inte parametern direkt och därför krävs en transformation från det uppmätta värdet till den sökta parametern (Phoon & Kulhawy, 1999b), vilket i ekvation 3.4 representeras av faktorn C . På grund av bristfälliga uppskattningar av C (vilken traditionellt är empiriskt uppskattad) kommer det uppskattade värdet av en geoteknisk parameter skilja sig från det verkliga värdet, omvandlingen genererar ett så kallat transformationsfel. En studie av D'Ignazio m.fl. (2016) visar på korrelationer mellan c_u och vattenkvot (w_L). Detta styrks av de fastställda transformationsfaktorerna för CPT och CRS då C_{CPT} och C_{CRS} för c_u beror av w_L , σ'_c och OCR (Larsson m.fl., 2007).

Osäkerheten i C beskrivs av variationskoefficienten COV_{tr} och kategoriseras som en systematisk osäkerhet, alltså minskas inte felet med ökat antal mätningar (Prästings, 2019). Däremot kan C minskas med förbättrade transformationsmodeller, men ett annat sätt är att tillämpa en bayesiansk metod presenterad av Ching m.fl. (2010); multivariat analys, där empiriska transformationsmodeller korsvalideras för en reducering av COV_{tr} .

3.3.5. Statistisk osäkerhet

I frekventistisk statistik, där det uppmätta värdet ses som ett absolut värde, kan statistisk osäkerhet (COV_{st}) endast undvikas ifall ett oändligt antal mätningar genomförs (Phoon & Kulhawy, 1999a). Av praktiska skäl kommer dock mängden geotekniska mätningar alltid vara begränsad, och därmed uppkommer alltid en statistisk osäkerhet vid bedömning av en geoteknisk parameter (Ching m.fl., 2016). Med bayesiansk statistik kan COV_{st} beaktas genom att medelvärdestrendlinjen med djupet ($y(z)$) och dess varians (σ^2) hanteras som osäkra variabler. Grafiskt ger den statistiska osäkerheten uttryck i spridningen av datapunkter kring den uppskattade trendlinjen.

I detta arbete beräknas COV_{st} enligt förslag från Tang (1980), där den statistiska osäkerheten beräknas utifrån den naturliga variationen COV_{in} med hjälp av en statistisk reduktionsfaktor $\psi(n, z)$. Enligt metoden från

Tang (1980) kan COV_{st} reduceras med ökat antal oberoende mätningar (n) och är således en epistemisk osäkerhet vid uppskattning av trendlinjen. Värt att notera är att storleksskillnaden mellan influensområde och fluktuationsavstånd (beskrivna i avsnitt 3.3.6 och 3.3.7) påverkar huruvida ψ beaktar spridningen av medelvärdet eller spridningen av populationen (Prästings m.fl., 2019). Till exempel kommer ett stort influensområde utjämna lokala variationer (liksom beskrivet i avsnitt 3.3.6) och då beräknar ψ medelvärdesspridning snarare än populationens spridning.

3.3.6. Autokorrelation

När en parameter uppskattas från en jordvolym antas den, förutom att inneha homogenitet inom jordvolymen, även vara horisontellt isotropisk (Vanmarcke, 2010). Dessutom antas det att mätvärdena från vilka trendlinjen uppskattas är oberoende av varandra, alltså måste avståndet mellan två punkter vara större än det förväntade avståndet för autokorrelation (DeGroot & Baecher, 1993). I verkligheten är dock autokorrelation en naturlig del av markens egenskaper, vilket kan indikeras med observationer av områden med lokalt högre eller lägre värden av till exempel c_u .

Skalan av autokorrelation $R(r)$ kan bestämmas utifrån korrelationen mellan olika mätvärden i horisontal- eller vertikalled över visst avstånd r (Baecher & Christian, 2003). Vid avståndet $r = 0$ är autokorrelationen absolut, det vill säga $R(0) = 1$. Med ett ökat avstånd r går autokorrelationen mot noll, således är r där $R(r) = 0$ det minsta avståndet utan autokorrelation mellan olika punkter.

Detta minimumavstånd utan autokorrelation i horisontal- eller vertikalled kallas ofta fluktuationsavstånd (δ_h för horisontalled och δ_v för vertikalled), vilket kan beräknas utifrån autokorrelationen i det undersökta området (Baecher & Christian, 2003). Det finns flera olika modeller för uppskattning av autokorrelationens struktur, till exempel triangulärmodellen som presenteras av Baecher och Christian (2003).

3.3.7. Variansreduktion

På grund av markens naturliga variation kommer lokala värden av en geoteknisk parameter variera från det globala medelvärdet, vilket kan orsaka över- och underskattningar av den sökta parametern (Prästings, 2019). Till vilken grad lokala variationer påverkar uppskattningen av en parameter inom en viss jordvolym beror på skillnaden mellan

fluktuationsavstånd (presenterad i avsnitt 3.3.6) och storleken av jordvolymen som påverkas av en brottmekanism (ett så kallat influensområde), till exempel ett jordskred (Bengtsson m.fl., 1991).

Detta kan hanteras med en variansreduktionsfaktor Γ (Vanmarcke, 2010), där sammanvägning av olika egenskaper (till exempel skjuvmotståndet längs en glidyta) kan ge en reduktion av osäkerheten kopplat till markens naturliga variation (Müller, 2013). Tumregeln är att ett stort influensområde har större variansreduktion (vilket innebär en mindre faktor Γ) än ett mindre område på grund av att ett större område har en utjämnande effekt på lokala variationer och blir därför mindre känsligt för dessa. Med ett större influensområde kommer alltså Γ minska (reducering av variationen), tills det lokala medelvärdet närmar sig det globala där $\Gamma^2 = 0$ (Prästings, 2019). Om ett influensområde i stället är väldigt litet jämfört mot fluktuationsavståndet kommer variansreduktionen förflyttas mot en övre gräns med minimal eller ingen reduktion, det vill säga mot $\Gamma^2 = 1$.

3.4. Utökad multivariabelanalys

Genom att kombinera information från flera olika källor med EMA kan den totala osäkerheten från uppskattningen av parameter (ekvation 3.6) reduceras (Müller, 2013). Multivariabelanalysen framtagen av Ching m.fl. (2016) för att korsvalidera transformationsfelet med bayesianska metoder utvecklades av Müller m.fl. (2014) till den s.k. utökade multivariabelanalysen (EMA) i syfte att möjliggöra systematisk kombination av information från olika källor (multivariat data) för den totala osäkerheten i uppskattningen av $\bar{\xi}_d$ (COV_{tot}) och därefter har Prästings (2019) fortsatt utvecklingen av denna metod.

I syfte att följa notationen från Prästings (2019) skrivs skattningen av $\bar{\xi}_d$ från i förväg känd information, priori (P) som $y = \bar{\xi}_d|P$, och uppskattning av $\bar{\xi}_d$ från mätningar från fält- och laboratorium D som $\mathbf{x} = \bar{\xi}_d|D = [\bar{\xi}_{m,1}, \bar{\xi}_{m,2}, \dots, \bar{\xi}_{m,n}]^T$. Med EMA beräknas sedan ett förväntat viktat värde på $\bar{\xi}_d$:

$$E[y|\mathbf{x}] = E[y] + \text{Cov}(y, \mathbf{x})\text{Var}[\mathbf{x}]^{-1}(\mathbf{x} - E[\mathbf{x}]), \quad (3.7)$$

med variansen:

$$\text{Var}[y|\mathbf{x}] = \text{Var}[y] - \text{Cov}(y, \mathbf{x})\text{Var}[\mathbf{x}]^{-1}\text{Cov}(y, \mathbf{x})^T, \quad (3.8)$$

där ekvation 3.7 och 3.8 både beaktar tidigare kunskap (y) och senare tillkomna data (\mathbf{x}).

Nedbrytning av termerna enligt appendix till Müller m.fl. (2014): $E[y]$ är det förväntade värdet på $\bar{\xi}_d$ från tidigare kunskap och $\text{Var}[y]$ är dess varians. $E[\mathbf{x}]$ samt $\text{Var}[\mathbf{x}]$ är motsvarande för tillkomna data \mathbf{x} . Alltså beskriver $\text{Var}[y|\mathbf{x}]$ den totala osäkerheten i $\bar{\xi}_d$ förutsatt P och D , och $\text{Cov}(y, \mathbf{x})$ representerar korrelationen mellan $\bar{\xi}_d|P$ och $\bar{\xi}_d|D$.

Från EMA genereras ett viktat COV_{tot} ($COV_{\text{tot,viktat}}$), där COV_{tot} från de olika källorna (y och \mathbf{x}) för skattningen av en parameter från de olika källorna D ($COV_{\text{tot}|D}$) och från P ($COV_{\text{tot}|P}$) viktas med hänsyn till enskild nivå av osäkerhet (Müller, 2013). Alltså kommer ett COV_{tot} från en metod med låg osäkerhet bidra mer till $COV_{\text{tot,viktat}}$ än från en metod med hög osäkerhet. Vid beräkning med EMA bör det tas i beaktande att metoder som kan bestämma en parameter med hög säkerhet, till exempel $COV_{\text{tot}|DSS}$ för c_u bidrar mer till det viktade resultatet jämfört mot en källa med lägre osäkerhet, till exempel $COV_{\text{tot}|P}$.

Värt att notera är att Ching m.fl. (2010) i den förenklade multivariabelanalysen antar att variablerna är normalfördelade, men eftersom det sällan stämmer för geotekniska parametrar är ofta en omvandling av indata till normalfördelning nödvändig innan genomförande av EMA (Müller, 2013).

4. Beräkningsmetodik

Såsom presenterats i avsnitt 3.3 kan den totala osäkerheten vid skattningen av parameter (COV_{tot}) härledas till fyra källor: COV_{in} , COV_{me} , COV_{st} och COV_{tr} , där COV_{st} beräknas utifrån COV_{in} med hjälp av den statistiska reduktionsfaktorn ψ och COV_{in} kan reduceras med variansreduktionsfaktorn Γ (Prästings, 2019).

Först beräknas $COV_{tot|D}$ för varje enskild metod (D) enligt Müller (2013) och Prästings (2019), och $COV_{tot|P}$ uppskattas. Därefter kan $COV_{tot|P}$ och $COV_{tot|D}$ för samtliga metoder sammanvägas med EMA för en bedömning av $COV_{tot,viktat}$ enligt Müller m.fl. (2014). För utförligare beskrivning av beräkningsmetoderna, se Müller (2013), Müller m.fl. (2014) och Prästings (2019).

I detta arbete hanteras mätdata distribuerad av SGI från följande geotekniska fält- och laboriemetoder för skattning av c_u : CPT-sondering (CPT), CRS-försök (CRS), direkta skjuvförsök (DSS), vingförsök (Vb) och fallkonförsök (Kon). Erhållna mätdata för från CPT, Vb och Kon är redan transformerade, men c_u från CRS beräknas enligt ekvation 4.9b (se avsnitt 4.1.5). Utöver detta uppskattas c_u från tidigare kända (priori) empiriska samband för västkustlera.

Beräkningarna genomförs separat för de geologiska delområdena Smådala 1, Smådala 2, Norra Sörängen, Södra Sörängen samt Hela Sörängen (hopslagning av Norra och Södra Sörängen).

4.1. Total osäkerhet för enskilda mätmetoder

Nedan beskrivs beräkningsmetodik, antaganden och förenklingar för att beräkna COV_{tot} för skattningen av c_u från priori, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon. För delresultat, se Appendix D.

4.1.1. Trendlinje och variation av indata

Från empiriska observationer har det observerats att c_u ofta följer en deterministisk och närapå linjär trendlinje där c_u ökar med djupet (Müller m.fl., 2014). Enligt Müller m.fl. (2014) antas mätdata för c_u vara

normalfördelad i det logaritmerade planet, och därför logaritmerats erhållna mätdata innan beräkning. Samtliga mätdata är redan transformerade med respektive transformationsfaktor (C), samtliga indata visar alltså skattningar av c_u med djupet från respektive mätmetod innan omvandling till det logaritmerade planet.

Medelvärdestrendlinjen till \bar{c}_u uppskattas därför från redan transformerade och logaritmerade mätdata från respektive geoteknisk fält- och laboriemetod, och för att förtydliga detta har indexet "korr" använts i stället för "m" där $\bar{\xi}_{\text{korr}} = \ln(\bar{\xi}_m C)$, det vill säga $\bar{\xi}_{\text{korr}}$ är $\bar{\xi}_m$ efter transformation med C och logaritmering.

Enligt Müller (2013) beräknas en linjär regressionslinje $\bar{\xi}(z)$ med regressionsparametrarna \hat{a} och \hat{b} , där effekten av en ökad mängd mätvärden (det vill säga reduktion av osäkerheten) beaktas:

$$\bar{\xi}_{\text{korr}}(z) = \hat{a} + \hat{b}z \quad (4.1)$$

där

$$\hat{a} = \bar{\xi}_{\text{korr}} - \hat{b}z \quad (4.2)$$

och

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n [\bar{\xi}_{\text{korr}}(z_i) * z_i] - n * \bar{\xi}_{\text{korr}} * \bar{z}}{\sum_{i=1}^n z_i^2 - n * \bar{z}^2} \quad (4.3)$$

4.1.2. Priori

Prioriskattningen (P) av c_u beräknas utifrån empiriska samband för västkustlera, vilket i detta fall är ett empiriskt samband mellan c_u och σ'_c samt OCR (Larsson m.fl., 2007) där konstanterna anpassats till lokala förhållanden (Sällfors, personlig kommunikation, 2021):

$$c_u = 0,22\sigma'_c \left(\frac{OCR}{1,3}\right)^{-0,2} \quad (4.4)$$

där σ'_c och OCR är mätdata från respektive område. Faktorn $\left(\frac{OCR}{1,3}\right)^{-0,2}$ tar hänsyn till att marken är överkonsoliderad.

Såsom beskrivet i stycke 4.4.1 beräknas en linjär medelvärdestrendlinje från logaritmerade värden av c_u . Slutligen antas $COV_{\text{tot}|p}$ för skattning av c_u från ekvation 4.4 till 25 % för att påvisa att detta är en grov skattning av c_u .

4.1.3. Naturlig variation

Den naturliga variationen beräknas som den totala spridningen i mätningarna med avdrag för mätfelet:

$$COV_{\text{in},D}^2 = COV_{\xi_{\text{korr}}|D}^2 - COV_{\text{me},D}^2 \quad (4.5)$$

där spridningen från mätningarna, $COV_{\xi_{\text{korr}}}$, beräknas utifrån variationen i mätdata ($\sigma_{\xi_{\text{korr}}}^2$) och dess medelvärde ($\bar{\xi}_{\text{korr}}$) (Ang & Tang, 2006):

$$COV_{\xi_{\text{korr}}} = \frac{\sigma_{\xi_{\text{korr}}}}{\bar{\xi}_{\text{korr}}} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{\xi_{\text{korr}}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [\xi_{\text{korr}}(z_i) - \bar{\xi}_{\text{korr}}]^2 - \hat{b}^2 \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n - 2} \quad (4.7)$$

4.1.4. Mätfel

Mätfelet från mätdata D , $COV_{\text{me},D}$ är ett antaget värde som baserats på erfarenhet. Det är rimligt att anta att samtliga beräkningsområden i detta examensarbete har ungefär samma COV_{me} , och därför uppskattas COV_{me} utifrån det beräkningsområde med minst $COV_{\xi_{\text{korr}}}$ (i detta fall Södra Sörängen). Skillnader i COV_{me} mellan de olika metoderna anses vara för osäkra för att ta hänsyn till, även om det är troligt att mätfelet kan variera beroende på geoteknisk metod i fält och laboratorium.

Med begränsningen att $COV_{\xi_{\text{korr}}}$ även innefattar COV_{in} (ekvation 4.5), antas $COV_{\text{me},D}^{\{\text{exp}\}} = 1,5 \%$ för samtliga fall, där $\{\text{exp}\}$ indikerar presentation i det lognormala planet. Anpassning till det logaritmerade planet genomförs enligt: $COV_{\text{me}} = \sqrt{\ln(1 + COV_{\text{me}}^2 \{\text{exp}\})}$.

Mätfelet kan sedan, eftersom det hanteras som en slumpvariabel, minskas proportionellt mot antalet mätningar n (Müller, 2013):

$$COV^2_{me,\bar{D}} = \frac{COV^2_{me,D}}{n} \quad (4.8)$$

4.1.5. Transformationsfel

Transformationsfelen för metoderna CPT, Vb och Kon bestäms utifrån Prästings m.fl. (2016) (Tabell 4.1). Notera att eftersom c_u mäts direkt vid DSS kräver denna metod ingen transformationsfaktor och har därför inget transformationsfel, alltså är $COV_{tr,DSS} = 0 \%$. $COV_{tr,CRS}$ uppskattas till 20 % då jag antar att $COV_{tr,CRS}$ bör vara större än COV_{tr} för CPT, Vb och Kon. Enligt Prästings m.fl. (2016) är $COV_{tr,Kon} = 16 \%$, men har i detta examensarbete valts till 17 %:

Vid bedömning av COV_{tr} utvärderas både utförandet av CPT, CRS, Vb och Kon samt ekvationerna för respektive transformation från uppmätt värde i fält och laboratorium till det sökta c_u (Larsson m.fl., 2007):

$$c_{u,CPT} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{13,4 + 6,65w_L} \quad (4.9a)$$

$$c_{u,CRS} = a \times \sigma'_c \times OCR^b \quad (4.9b)$$

$$c_{u,Vb} = \tau_{Vb} \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \left(\frac{OCR}{1,3} \right)^{-0,15} \quad (4.9c)$$

$$c_{u,Kon} = \tau_{Kon} \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \quad (4.9d)$$

där ekvation 4.9b har anpassats för lerjord med $a = 0,33$ och $b = 0,8$, och ekvation 4.9c samt 4.9d gäller med förutsättningen att $\left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \geq 0,5$.

Tabell 4.1: Uppskattat transformationsfel, $COV_{tr}^{\{exp\}}$ för varje geoteknisk metod i fält- och laboratorium uppskattat utifrån Prästings, m.fl. (2016).

Metod	$COV_{tr}^{\{exp\}}$
CPT	10 %
CRS	20 %
DSS	0 %
Vb	17 %
Kon	17 %

Anledningen till att $COV_{tr,CRS}$ antagits vara större än COV_{tr} för CPT, Vb och Kon är att transformationen från förkonsolideringstryck till c_u är mindre precis jämfört mot till exempel c_u från Vb, där markens vridmotstånd transformeras till c_u . Anledningen till att $COV_{tr,Kon}$ höjts från 16 % till 17 % är att transformationen i Kon genomförs i fler steg än i Vb och därmed antas det rimligt att förutsätta att osäkerheten från transformationen för c_u skattat med Kon åtminstone inte är mindre än transformationsosäkerheten från Vb. Den första transformationen i Kon sker, enligt svensk standard SS-EN ISO 17892-6:2017 (SIS, 2017), vid uppskattningen av skjuvhållfasthet från konintrycket i lerprovet (τ_{Kon}), där $\tau_{Kon} = cg \frac{m}{i^2}$. Den andra transformationen sker vid transformationen från τ_{Kon} till $c_{u,Kon}$ enligt ekvation 4.9d.

4.1.6. Statistisk osäkerhet

Den statistiska osäkerheten (COV_{st}) avser i detta fall felet i skattningen av medelvärdestrendlinjens regressionskoefficienter, och beräknats som en faktor på osäkerheten från den naturliga spridningen (Müller, 2013):

$$COV_{st,\bar{D}}^2 = COV_{in,D}^2 \psi(n, z) \quad (4.10)$$

där $\psi(n, z)$ beaktar det statistiska felet i uppskattningen av trendlinjens regressionskoefficienter \hat{a} och \hat{b} , och σ^2 (Prästings, 2019). Om variansen har beräknats enligt ekvation 4.7 beräknas ψ enligt Tang (1980):

$$\psi(n, z) = \frac{n-1}{n-3} \left[\frac{1}{n} \left\{ 1 + \frac{n}{n-1} \frac{(z-\bar{z})^2}{\sigma_z^2} \right\} \right] \quad (4.11)$$

där faktorn innanför hakparenteserna beaktar den epistemiska osäkerheten i regressionslinjen som beror av antalet statistiskt oberoende mätningar n och nivån av extrapolering i medelvärdestrendlinjen i riktning med djupet beräknat med faktorn $(z-\bar{z})^2/\sigma_z^2$ (Ang & Tang, 2006). Faktorn $(n-1)/(n-3)$ representerar osäkerheten från den grundläggande spridningen av mätdata σ^2 (i detta fall $\sigma_{\xi_{kor}}^2$).

Vid beräkning av ψ med ekvation 4.11 antas mätvärdena vara statistiskt oberoende, och eftersom två eller fler mätvärden lokaliserade inom fluktuationsavstånden δ_h och δ_v antas inneha autokorrelation kan detta hanteras genom att dessa mätpunkter rensas bort i förväg.

4.1.7. Variansreduktion

Variansreduktionen (Γ) beräknas som en faktor som kan reducera osäkerheten från den naturliga spridningen (Müller, 2013):

$$COV^2_{in,\bar{D}} = \Gamma^2 COV^2_{in,D} \quad (4.12)$$

I detta arbete antas brottstrukturen för ett jordskred dimensioneras enligt exempel av Müller (2013), där ett potentiellt skreds glidytor dimensioneras av dess horisontella utbredning i det tvådimensionella planet. Skredets yta i längd och bredd beaktas, men djupet i vertikalled negligeras i syfte att tillämpa bestämning av variansreduktionen i 2D (Γ_{2D}) (Vanmarcke, 2010). Beräkning av Γ_{2D}^2 utförs enligt Müller m.fl. (2014):

$$\Gamma_{2D}^2 = \left[\frac{\delta_h}{L_A} \left(1 - \frac{\delta_h}{L_A} \right) \right] \left[\frac{\delta_h}{L_B} \left(1 - \frac{\delta_h}{L_B} \right) \right] \quad (4.13)$$

där glidyornas utsträckning i längd (L_A) och bredd (L_B) (Tabell 4.2) bestäms från dokumenterade tidigare jordskred i området hämtade med SGU:s digitala verktyg ”kartvisaren” (SGU, 2021) (Appendix B).

För Smådala antas en rektangulär skredform på grund av närvaron av kvicklera, medan skreden i Sörängen antas vara kvadratiska, alltså har förhållandet mellan L_A och L_B beaktats med hänsyn till den antagna formen på skreden. Observera att L_A i Smådala är större än bredden på delområde Smådala 2 (se Figur 2.3), och därmed begränsas L_A i Smådala 2 av områdets storlek i stället för av skredets totala utbredning.

Fluktuationsavstånden kan beräknas enligt Vanmarcke (2010): $\delta = 2 \int_0^\infty \rho_i dr$, där $\rho_i = R(r)$ är graden av autokorrelation över avståndet r . $R(r)$ kan beräknas utifrån mätningar $\{\xi_{m,1}, \xi_{m,2}, \dots, \xi_{m,n}\}$ i horisontal- eller

Tabell 4.2: Uppskattade horisontella längder för kritiska glidytor för samtliga beräkningsområden.

Beräkningsområde	L_A	L_B
Smådala 1	200 m	100 m
Smådala 2	30 m	100 m
Norra Sörängen	50 m	50 m
Södra Sörängen	50 m	50 m

vertikalled från olika platser $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ enligt Baecher och Christian (2003): $R(r) = \frac{1}{(n-r)\sigma^2_{\xi_m}} \sum_{i=1}^{n-r} [\{\xi_m(c_i) - \bar{\xi}_m\} \{\xi_m(c_{i+r}) - \bar{\xi}_m\}]$.

I detta arbete har fluktuationsavståndet antagits vara likvärdigt med de enligt Müller m.fl. (2014): $\delta_h \approx 20$ m och $\delta_v \approx 0,4$ m.

4.1.8. Total osäkerhet

Utifrån ekvationerna för $COV^2_{in,\bar{D}}$ (ekvation 4.5) och med hänsyn till Γ (ekvation 4.12), ψ (ekvation 4.10) och ekvationen för $COV^2_{me,\bar{D}}$ (ekvation 4.8) samt negligering av ϑ kan den totala osäkerheten uttryckas enligt:

$$COV^2_{tot|D} \approx (COV^2_{\xi_{korr}|D} - COV^2_{me,D})(\Gamma^2 + \psi) + \frac{COV^2_{me,D}}{n} + COV^2_{tr,\bar{D}} \quad (4.14)$$

vilken kan omvandlas tillbaka till lognormalplanet för att underlätta utvärdering av resultatet: $COV^2_{tot|D}^{\{exp\}} = e^{COV^2_{tot|D}} - 1$.

4.2. Utökad multivariabelanalys

Den utökade multivariabelanalysen (EMA) beräknas med hjälp av programmet Mathcad 15. I exemplet av Müller m.fl. (2014) utförts EMA för tre olika geotekniska metoder i fält- och laboratorium för en nivå, och i detta examensarbete utökas beräkningen för att sammanväga fem metoder samt en prioriskattning (P) för 13 nivåer i vertikalled. Antalet nivåer har valts för att det anses vara ett lagom antal nivåer för representation av respektive jordprofils utbredning i vertikalled (se Tabell 4.3).

Indata till EMA är de beräknade medelvärdena $\bar{\xi}_{korr}(z)$ (ekvation 4.1) från varje mätmetod D för respektive nivå samt den totala osäkerheten vid skattningen av $\bar{\xi}_{korr}(z)$ för varje metod D , $COV_{tot|D}$ (ekvation 4.14). Observera att indata i detta fall är redan transformerad och logaritmerad, det vill säga att $\bar{\xi}_{korr}(z) = \ln(\bar{\xi}_m C)$.

Tabell 4.3: Nivåer (z_i) i meter valda för utvärderingen med EMA för respektive beräkningsområde.

Nivå nr	Smådala 1 (m)	Smådala 2 (m)	Norra Sörången (m)	Södra Sörången (m)
1	+30	+10	+20	+20
2	+26	+7	+14	+14
3	+22	+4	+9	+9
4	+18	+1	+5	+5
5	+15	-2	+1	+1
6	+12	-5	-3	-3
7	+9	-7	-7	-7
8	+6	-9	-11	-11
9	+3	-12	-15	-15
10	0	-15	-19	-19
11	-3	-18	-23	-23
12	-7	-21	-29	-29
13	-11	-24	-35	-35

Liksom presenterat i avsnitt 3.4 beräknas det förväntade värdet av $\bar{\xi}_{\text{kor}}^{\bar{}}$ ($E[y|\mathbf{x}]$) och dess variation ($\text{Var}[y|\mathbf{x}]$) enligt ekvation 3.7 och 3.8 nedan (upprepas av pedagogiska skäl):

$$E[y|\mathbf{x}] = E[y] + \text{Cov}(y, \mathbf{x})\text{Var}[\mathbf{x}]^{-1}(\mathbf{x} - E[\mathbf{x}]) \quad (3.7)$$

$$\text{Var}[y|\mathbf{x}] = \text{Var}[y] - \text{Cov}(y, \mathbf{x})\text{Var}[\mathbf{x}]^{-1}\text{Cov}(y, \mathbf{x})^T \quad (3.8)$$

Ekvation 3.7 och 3.8 löses enligt appendix till Müller m.fl. (2014) men i detta fall för de 13 valda nivåerna (i Müller m.fl. 2014 redovisas förfarandet för endast en nivå) för respektive område med hänsyn till skattningar gjorda från tidigare kunskap (P) och från CPT, CRS, DSS, Vb och Kon. Beräkningarna genomförs separat för enskild nivå, och läggs sedan ihop för att visa trenden med djupet för både $E[y|\mathbf{x}]$ och $\text{Var}[y|\mathbf{x}]$ (i detta fall c_u och COV_{tot} , se kapitel 5). Nedan redovisas lösningen för en nivå, initialt med beräkning av $\bar{\xi}_d|D$ (ekvation 3.4) för samtliga metoder D i ekvation 4.15a - 4.15e:

$$\bar{\xi}_d|CPT = \bar{\xi}_{\text{korr}}|CPT - \varepsilon_{CPT} = \ln(\bar{\xi}_m)|CPT - \ln(C_{CPT}) - \varepsilon_{CPT} \quad (4.15a)$$

$$\bar{\xi}_d|CRS = \bar{\xi}_{\text{korr}}|CRS - \varepsilon_{CRS} = \ln(\bar{\xi}_m)|CRS - \ln(C_{CRS}) - \varepsilon_{CRS} \quad (4.15b)$$

$$\bar{\xi}_d|DSS = \bar{\xi}_{\text{korr}}|DSS - \varepsilon_{DSS} = \ln(\bar{\xi}_m)|DSS - \ln(C_{DSS}) - \varepsilon_{DSS} \quad (4.15c)$$

$$\bar{\xi}_d|Vb = \bar{\xi}_{\text{korr}}|Vb - \varepsilon_{Vb} = \ln(\bar{\xi}_m)|Vb - \ln(C_{Vb}) - \varepsilon_{Vb} \quad (4.15d)$$

$$\bar{\xi}_d|Kon = \bar{\xi}_{\text{korr}}|Kon - \varepsilon_{Kon} = \ln(\bar{\xi}_m)|Kon - \ln(C_{Kon}) - \varepsilon_{Kon} \quad (4.15e)$$

Förenkling av notationen: $CPT = \bar{\xi}_d|CPT$, $CRS = \bar{\xi}_d|CRS$, $DSS = \bar{\xi}_d|DSS$, $Vb = \bar{\xi}_d|Vb$ och $Kon = \bar{\xi}_d|Kon$. Uppdelning av termerna i ekvation 3.7 och 3.8:

$$E[\mathbf{x}] = \begin{bmatrix} E\{CPT|P\} \\ E\{CRS|P\} \\ E\{DSS|P\} \\ E\{Vb|P\} \\ E\{Kon|P\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E\{\ln(\bar{\xi}_m)|CPT - \ln(C_{CPT}) - \varepsilon_{CPT}|P\} \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|CRS - \ln(C_{CRS}) - \varepsilon_{CRS}|P\} \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|DSS - \ln(C_{DSS}) - \varepsilon_{DSS}|P\} \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|Vb - \ln(C_{Vb}) - \varepsilon_{Vb}|P\} \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|Kon - \ln(C_{Kon}) - \varepsilon_{Kon}|P\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E\{\ln(\bar{\xi}_m)|P\} - \ln(C_{CPT}) \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|P\} - \ln(C_{CRS}) \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|P\} - \ln(C_{DSS}) \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|P\} - \ln(C_{Vb}) \\ E\{\ln(\bar{\xi}_m)|P\} - \ln(C_{Kon}) \end{bmatrix} \quad (4.16a)$$

$$\text{Var}[\mathbf{x}] = \begin{bmatrix} \text{Var}\{CPT|P\} & \text{Cov}\{CPT, CRS|P\} & \text{Cov}\{CPT, DSS|P\} & \text{Cov}\{CPT, Vb|P\} & \text{Cov}\{CPT, Kon|P\} \\ \text{Cov}\{CRS, CPT|P\} & \text{Var}\{CRS|P\} & \text{Cov}\{CRS, DSS|P\} & \text{Cov}\{CRS, Vb|P\} & \text{Cov}\{CRS, Kon|P\} \\ \text{Cov}\{DSS, CPT|P\} & \text{Cov}\{DSS, CRS|P\} & \text{Var}\{DSS|P\} & \text{Cov}\{DSS, Vb|P\} & \text{Cov}\{DSS, Kon|P\} \\ \text{Cov}\{Vb, CPT|P\} & \text{Cov}\{Vb, CRS|P\} & \text{Cov}\{Vb, DSS|P\} & \text{Var}\{Vb|P\} & \text{Cov}\{Vb, Kon|P\} \\ \text{Cov}\{Kon, CPT|P\} & \text{Cov}\{Kon, CRS|P\} & \text{Cov}\{Kon, DSS|P\} & \text{Cov}\{Kon, Vb|P\} & \text{Var}\{Kon|P\} \end{bmatrix} \quad (4.16b)$$

$$\text{Cov}[y, \mathbf{x}] = \begin{bmatrix} \text{Cov}\{\ln(\bar{\xi}_m), CPT|\ln(P)\} \\ \text{Cov}\{\ln(\bar{\xi}_m), CRS|\ln(P)\} \\ \text{Cov}\{\ln(\bar{\xi}_m), DSS|\ln(P)\} \\ \text{Cov}\{\ln(\bar{\xi}_m), Vb|\ln(P)\} \\ \text{Cov}\{\ln(\bar{\xi}_m), Kon|\ln(P)\} \end{bmatrix}^T \quad (4.16c)$$

Slutligen kan $E[y|\mathbf{x}]$ och $\text{Var}[y|\mathbf{x}]$ transformeras tillbaka till en lognormal fördelning (indikerat med notationen $\{\text{exp}\}$):

$$\bar{c}_u = \bar{\xi}_d^{\{\text{exp}\}} = E[y|\mathbf{x}]^{\{\text{exp}\}} = e^{E[y|\mathbf{x}] + 0,5 \text{Var}[y|\mathbf{x}]} \quad (4.17)$$

$$COV_{\text{tot,viktat}}^{\{\text{exp}\}} = \sqrt{e^{\text{Var}[y|\mathbf{x}]} - 1} \quad (4.18)$$

där \bar{c}_u är ett viktat medelvärde (som genom Γ även beaktar glidyornas storlek) och som skattas med osäkerheten $COV_{\text{tot,viktat}}$.

4.3. Känslighetsanalyser

Fyra känslighetsanalyser genomförs för att undersöka hur en felskattning av mätfelet (COV_{me}), transformationsfelet (COV_{tr}), de horisontella glidyornas utbredning (L_A och L_B) samt det horisontella fluktuationsavståndet (δ_h) påverkar skattningen $COV_{tot|D}$. Följande fyra analyser genomförs, där förändring i COV_{tot} får bero av:

- 1) ändring av $COV_{me} = 1,5\%$ till 1% , 2% , 3% och 5% .
- 2) ändring av COV_{tr} med dubblering, halvering, $+1/2$ samt $\pm 1/4$ av COV_{tr} (se Tabell 4.4).
- 3) ändring av L_A och L_B med dubblering och halvering, samt $\pm 1/4$ av L_A och L_B (se Tabell 4.4).
- 4) ändring av δ_h med dubblering och halvering, samt $\pm 1/4$ av δ_h (se Tabell 4.4).

Tabell 4.4: Känslighetsanalys för COV_{tr} , L_A och L_B samt θ_h .

Term	+100 %	+ 50 %	- 50 %	+ 25 %	- 25 %
COV_{tr}	$2COV_{tr}$	$1,5COV_{tr}$	$0,5COV_{tr}$	$1,25COV_{tr}$	$0,75COV_{tr}$
L_A & L_B	$2L_A$ & $2L_B$	-	$0,5L_A$ & $0,5L_B$	$1,25L_A$ & $1,25L_B$	$0,75L_A$ & $0,75L_B$
δ_h	$2\delta_h$	-	$0,5\delta_h$	$1,25\delta_h$	$0,75\delta_h$

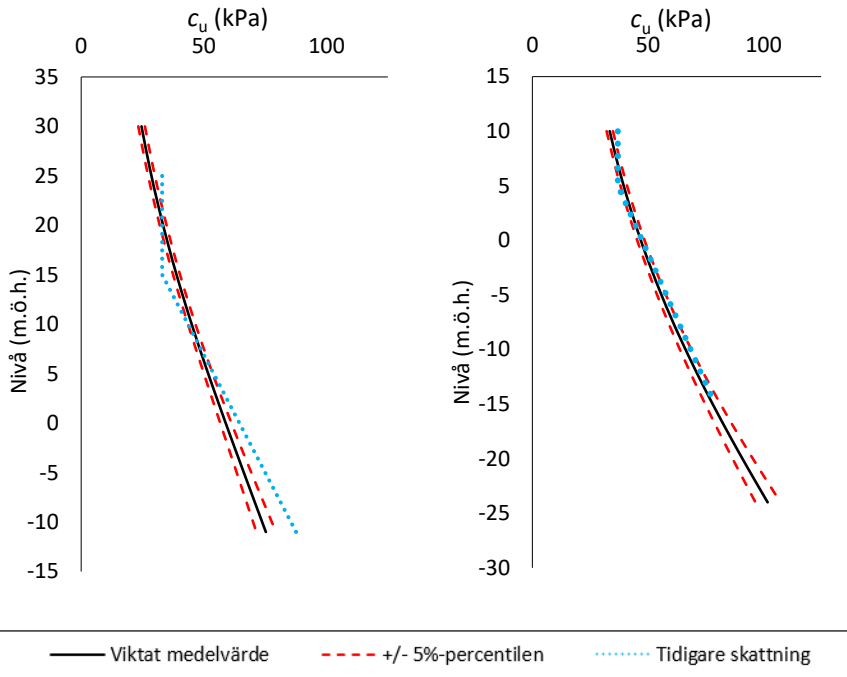
5. Resultat

Skattningen av $\bar{c}_u = \bar{\xi}_d^{\text{exp}}$ och $COV_{\text{tot},D}^{\text{exp}}$ för metoderna D redovisas mot nivå för samtliga beräkningsområden. I c_u -graferna presenteras även övre och undre 5 %-percentilen (på medelvärdet \bar{c}_u) samt skattningen av \bar{c}_u från de fördjupade stabilitetsutredningarna utförda på uppdrag av SGI (se Appendix A) (WSP, 2020a; SWECO 2020a). I COV_{tot} -graferna presenteras $COV_{\text{tot}|D}$ från skattningen av c_u från geotekniska mätmetoder i fält- och laboratorium, $COV_{\text{tot}|P}$ från skattningen av c_u från priori samt $COV_{\text{tot,viktat}}$ från EMA. Samtliga resultat redovisas i det lognormala planet.

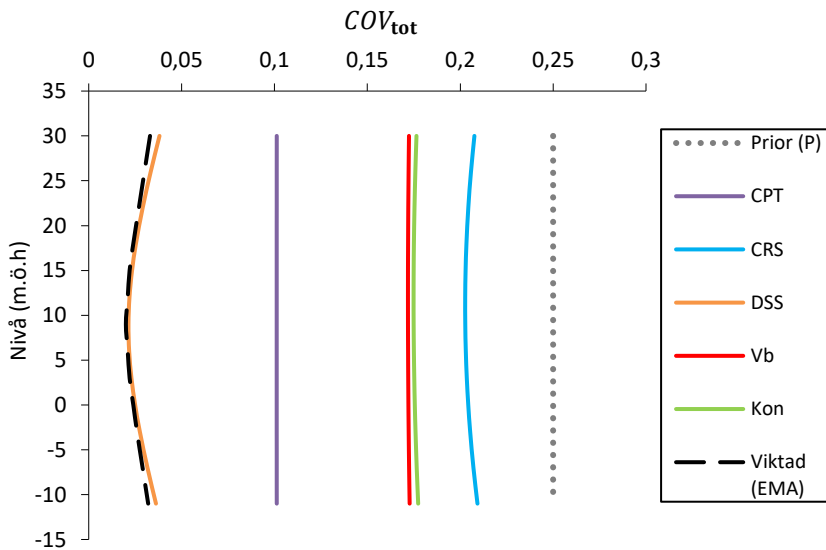
5.1. Smådala

I Figur 5.1 presenteras medelvärdet för det skattade värdet av \bar{c}_u med djupet för Smådala 1 och Smådala 2. Beräkningsområdena presenteras mot olika djup på grund av att Smådala 2 är lokaliserad mycket lägre än Smådala 1 (i slutningen mot Göta älv jämfört mot på slänkrönet). Värt att notera är att \bar{c}_u är större i Smådala 2 än Smådala 1, och att bedömningen av \bar{c}_u från den fördjupade utredningen utförd av WSP (2020a) stämmer bättre överens för Smådala 2 än för mot Smådala 1.

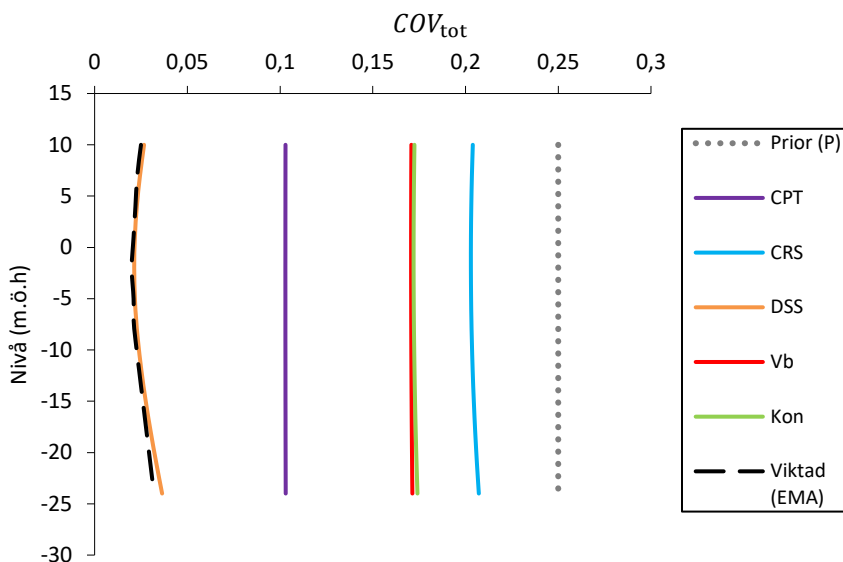
Figur 5.2 (Smådala 1) och 5.3 (Smådala 2) visar COV_{tot} för skattningen av \bar{c}_u från P, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon samt $COV_{\text{tot,viktat}}$ från EMA mot djupet, där ett lägre värde på COV_{tot} innebär lägre osäkerhet och alltså en tillförlitligare skattning av \bar{c}_u . Från Figur 5.2 och Figur 5.3 kan det avläsas att $COV_{\text{tot}|DSS}$ och $COV_{\text{tot}|CRS}$ är lägre i mitten av jordlagret jämfört mot ytterkanterna, och att $COV_{\text{tot}|DSS}$ bidrar mest till $COV_{\text{tot,viktat}}$ för båda beräkningsområdena. De tydligaste skillnaderna mellan Smådala 1 och Smådala 2 är att det är större skillnad mellan $COV_{\text{tot}|Vb}$ och $COV_{\text{tot}|Kon}$ för Smådala 1 än för Smådala 2, samt att $COV_{\text{tot,viktat}}$ är mer påverkat av $COV_{\text{tot}|DSS}$ i Smådala 2 jämfört mot Smådala 1.



Figur 5. 1: \bar{c}_u för Smådala 1 (t.v.) och Smådala 2 (t.h) med övre och undre 5 % percentilen (röda streckade linjerna) och den tidigare skattningen av \bar{c}_u från den fördjupade stabilitetsutredningen utförd av WSP (2020a) (blåa prickade linjerna).



Figur 5.2: COV_{tot} för skattning av \bar{c}_u från P, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon samt $COV_{tot,viktad}$ för Smådala 1.

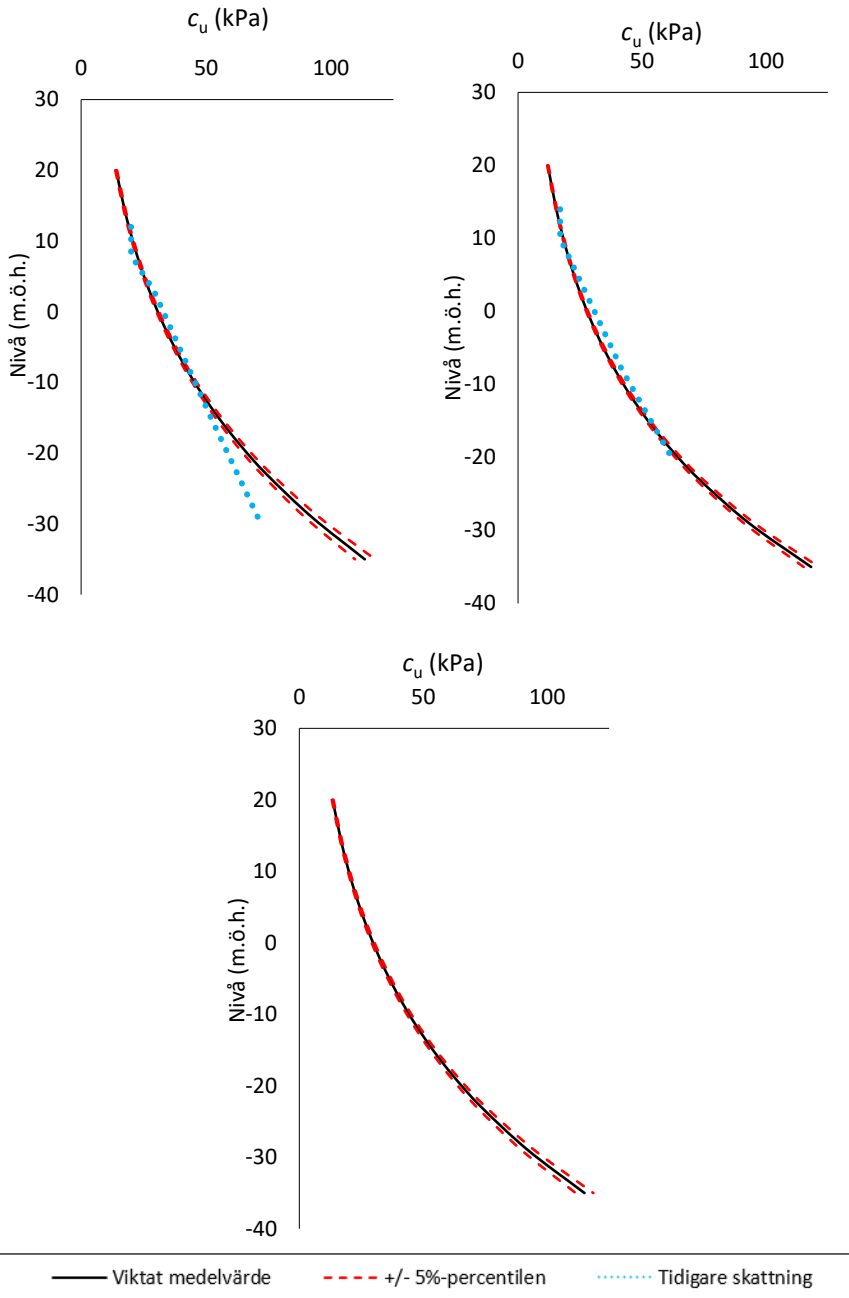


Figur 5.3: COV_{tot} för skattning av \bar{c}_u från P, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon samt $COV_{tot,viktad}$ för Smådala 2.

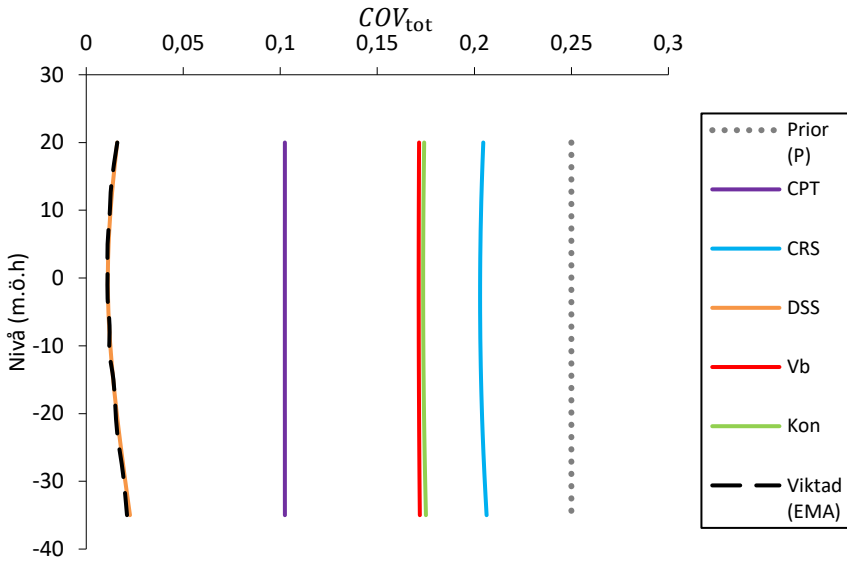
5.2. Sörängen

I Figur 5.4 presenteras medelvärdet för det skattade värdet av \bar{c}_u med djupet för samtliga beräkningsområden i Sörängen. Det går att avläsa att tidigare skattat \bar{c}_u från den fördjupade utredningen utförd av SWECO (2020a) stämmer ungefär lika bra överens för Norra och Södra Sörängen ner till nivå -20 m, för djupare nivåer saknas skattning för Södra Sörängen.

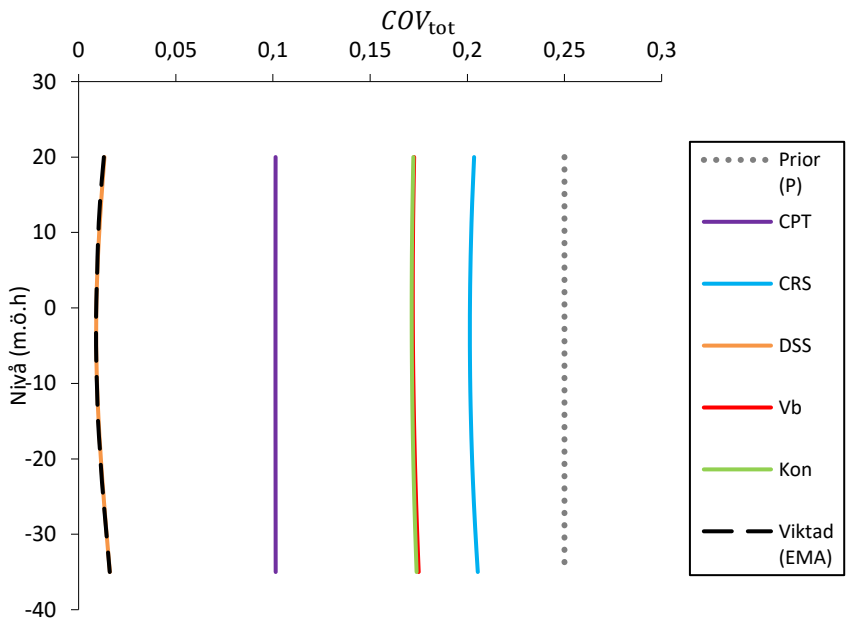
COV_{tot} för skattningen av \bar{c}_u från P, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon samt $COV_{tot,viktad}$ från EMA med djupet visas för Norra Sörängen (Figur 5.5), Södra Sörängen (Figur 5.6) och Hela Sörängen (Figur 5.7), där COV_{tot} är lägst i mitten av jordlagerna för $COV_{tot|DSS}$ och $COV_{tot|CRS}$. Jämfört mot Smådala kan det för Sörängens områden avläsas ett ännu tydligare bidrag av $COV_{tot|DSS}$ till $COV_{tot,viktad}$. En annan observation är att $COV_{tot|Kon}$ är lägre än $COV_{tot|Vb}$ för Södra Sörängen, vilket är tvärtom för Norra Sörängen. Värt att notera är dock att såväl skattningen av \bar{c}_u som samtliga COV_{tot} är mycket lika mellan Norra och Södra Sörängen (vilket går att jämföra mot de tydligare skillnaderna i resultat mellan Smådala 1 och 2), vilket därmed innebär en likhet i resultat även med Hela Sörängen. Dock är Hela Sörängens resultat mer lika resultaten från Norra Sörängen än Södra Sörängen.



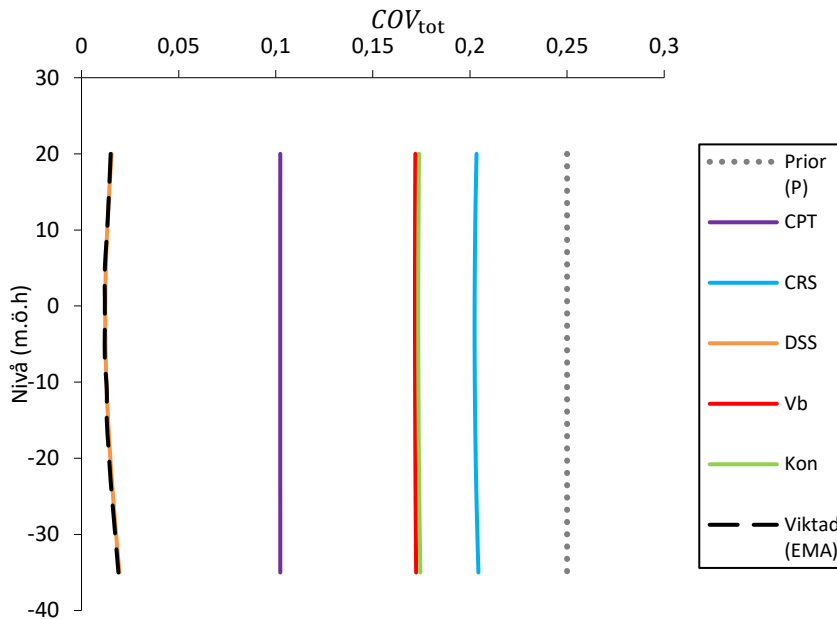
Figur 5.4: \bar{c}_u för Norra Sörängen (övre t.v.), Södra Sörängen (övre t.h) samt Hela Sörängen (nedre) med övre och undre 5 % percentilen (röda streckade linjerna) och en tidigare skattningen av \bar{c}_u från den fördjupade stabilitetsutredningen utförd av SWECO (2020a) (blåa prickade linjerna).



Figur 5.5: COV_{tot} för skattning av \bar{c}_u från P, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon samt $COV_{tot,viktad}$ för Norra Sörängen.



Figur 5.6: COV_{tot} för skattning av \bar{c}_u från P, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon samt $COV_{tot,viktad}$ för Södra Sörängen.



Figur 5.7: COV_{tot} för skattning av \bar{c}_u från P, CPT, CRS, DSS, Vb och Kon samt $COV_{tot,viktad}$ för Hela Sörängen.

5.3. Känslighetsanalyser

Känslighetsanalyserna redovisas för Smådala 1 och Södra Sörängen, och endast för de geotekniska fält- och laboriemetoder som påverkas minst respektive mest av analyserna:

- Från ändringar i COV_{tr} påverkades COV_{tot} mest för CRS (Tabell 5.1) och minst för CPT (Tabell 5.2).
- Från ändringar i COV_{me} , L_A och L_B samt δ_h påverkades COV_{tot} ungefär lika mycket för CPT, CRS, Vb och Kon, men visade betydligt större påverkan för DSS. Analyserna redovisas för påverkan av $COV_{tot|DSS}$ och $COV_{tot|CPT}$ från ändring av COV_{me} (Tabell 5.3 och Tabell 5.4), L_A och L_B (Tabell 5.5 och Tabell 5.6) och δ_h (Tabell 5.7 och Tabell 5.8).

Samtliga värden av COV_{tot} presenterade i Tabell 5.1–Tabell 5.8 nedan uttrycks i lognormal form och som medelvärdet över djupet i syfte att förenkla jämförelse.

Tabell 5.1: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|CRS} = 0,201$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av COV_{tr} .

Ändring	$COV_{tot CRS}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot CRS}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$2COV_{tr}$	0,401	+99 %	0,401	+99 %
$1,5COV_{tr}$	0,301	+49 %	0,301	+49 %
$0,5COV_{tr}$	0,103	-49 %	0,103	-49 %
$1,25COV_{tr}$	0,251	+25 %	0,251	+25 %
$0,75COV_{tr}$	0,152	-25 %	0,152	-25 %

Tabell 5.2: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|CPT} = 0,102$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av COV_{tr} .

Ändring	$COV_{tot CPT}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot CPT}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$2COV_{tr}$	0,201	+97 %	0,201	+97 %
$1,5COV_{tr}$	0,053	-47 %	0,151	+48 %
$0,5COV_{tr}$	0,151	+49 %	0,054	-47 %
$1,25COV_{tr}$	0,126	+24 %	0,127	+24 %
$0,75COV_{tr}$	0,077	-24 %	0,078	-24 %

Tabell 5.3: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|DSS} = 0,028$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av COV_{me} .

Ändring till	$COV_{tot DSS}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot DSS}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$COV_{me} = 1 \%$	0,028	+2%	0,015	+35 %
$COV_{me} = 2 \%$	0,027	-3%	$COV_{me} > COV_{\xi_k}$	
$COV_{me} = 3 \%$	0,024	-13%	$COV_{me} > COV_{\xi_k}$	
$COV_{me} = 5 \%$	0,012	-55%	$COV_{me} > COV_{\xi_k}$	

Tabell 5.4: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|CPT} = 0,102$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av COV_{me} .

Ändring till	$COV_{tot CPT}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot CPT}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$COV_{me} = 1 \%$	0,102	0 %	0,102	0 %
$COV_{me} = 2 \%$	0,102	0 %	0,102	0 %
$COV_{me} = 3 \%$	0,101	+1 %	0,101	-1 %
$COV_{me} = 5 \%$	0,1	-2 %	0,098	-4 %

Tabell 5.5: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|DSS} = 0,028$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av L_A & L_B .

Ändring	$COV_{tot DSS}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot DSS}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$2L_A$ & $2L_B$	0,024	-11%	0,010	-7 %
$0,5L_A$ & $0,5L_B$	0,032	+18%	0,012	+10 %
$1,25L_A$ & $1,25L_B$	0,026	-4%	0,011	-3 %
$0,75L_A$ & $0,75L_B$	0,029	+7%	0,012	+4 %

Tabell 5.6: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|CPT} = 0,102$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av L_A & L_B .

Ändring	$COV_{tot CPT}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot CPT}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$2L_A$ & $2L_B$	0,101	-1 %	0,101	-1 %
$0,5L_A$ & $0,5L_B$	0,103	+1%	0,103	+1%
$1,25L_A$ & $1,25L_B$	0,101	-0,5%	0,102	0 %
$0,75L_A$ & $0,75L_B$	0,102	0 %	0,102	0 %

Tabell 5.7: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|DSS} = 0,028$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av δ_h .

Ändring	$COV_{tot CRS}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot CRS}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$2\delta_h$	0,032	+18 %	0,012	+10 %
$0,5\delta_h$	0,024	-11 %	0,01	-7 %
$1,25\delta_h$	0,029	+5 %	0,012	+3 %
$0,75\delta_h$	0,026	-5 %	0,011	0 %

Tabell 5.8: Känslighetsanalys: Påverkan av $COV_{tot|CPT} = 0,102$ för Smådala 1 och Södra Sörängen vid ändring av δ_h .

Ändring	$COV_{tot CPT}$ Smådala 1	Ändring i % (Smådala 1)	$COV_{tot CPT}$ S Sörängen	Ändring i % (S Sörängen)
$2\delta_h$	0,103	+2 %	0,103	+1 %
$0,5\delta_h$	0,103	-1 %	0,101	-1 %
$1,25\delta_h$	0,102	0 %	0,102	0 %
$0,75\delta_h$	0,101	0 %	0,102	0 %

6. Diskussion

Syftet med diskussionen är att utifrån resultaten i kapitel 5 kunna:

- 1) Visa hur utökad multivariabelanalys kan användas i praktiken.
- 2) Avgöra vilka geotekniska undersökningsmetoder som är mest relevanta vid bedömning av skjuvhållfasthet i lera.

Utöver detta diskuteras indelningen av geologiska delområden, felkällor i beräkningarna, känslighetsanalyserna samt modellfelet (θ) i ekvation 3.6.

6.1. Analys av COV_{tot}

Den utökade multivariabelanalysen visar att c_u -profilen i Smådala kan bestämmas med $COV_{tot,viktat} \approx 2-3,5\%$, och i Sörängen med $COV_{tot,viktat} \approx 1-2\%$, vilket vid en första anblick kan uppfattas som anmärkningsvärt litet. Från COV_{tot} -diagrammen är det tydligt att valet av skjuvhållfasthet i lera framför allt beror av resultaten från DSS, en slutsats som dras från att grafen till $COV_{tot,viktat}$ till stor del överlappar grafen till $COV_{tot|DSS}$, vilket är särskilt tydligt för Sörängen. En förklaring till att bedömningen från DSS har så mycket mindre osäkerhet jämfört mot resterande metoder är att ingen transformation sker vid DSS, och osäkerheter från hanteringen av provet och utförandet av DSS inte beaktats i denna analys (exempelvis eventuell störning av provet under transport och tveklaktigt underlag för val av σ'_c). Eftersom $COV_{tot|DSS}$ från denna analys fått så pass låga värden och därmed till hög grad påverkar $COV_{tot,viktat}$, kan osäkerheter från hantering och utförande av DSS inte med säkerhet negligeras. I syfte att säkerställa att den beräknade osäkerheten är tillförlitlig kan det därför vara motiverat att utvärdera ifall även osäkerheter från hantering av det ostörda provet och utförande av DSS bör inkluderas vid uppskattning av $COV_{tot|DSS}$.

För delområdena i Smådala syns en tydligare inverkan från metoder utöver DSS för $COV_{tot,viktat}$ jämfört med Sörängens delområden, framför allt i övre och nedre delen av jordlagret. Denna skillnad kan bero på att den större naturliga variationen inom Smådala medför att området inte lika lätt

kan representeras från den lilla andelen punkter DSS utgör. Eftersom Sörängen både är mindre till ytan och mer geologiskt homogent kan DSS-punkterna i Sörängen förväntas vara mer representativa för hela området.

Det hade varit av intresse att undersöka hur $COV_{\text{tot,viktat}}$ skulle ändras ifall DSS plockades bort från beräkningarna med EMA. Gissningsvis skulle resultatet bli ett $COV_{\text{tot,viktat}}$ snäppet bättre än $COV_{\text{tot|CPT}}$ (alltså $COV_{\text{tot,viktat}} < 10 \%$), men en sådan analys ligger utanför examensarbetets omfattning.

6.2. Analys av mätmetoder

Trots att beräkningarna visar att noggrannheten i skattningen av c_u från DSS är överlägsen med ett mycket lågt $COV_{\text{tot|DSS}}$ kan inte c_u skattas enskilt från DSS, eftersom denna metod utförts i alldeles för liten utsträckning för att säkert kunna representera ett större område (den statistiska osäkerheten blir för stor). En mycket säker metod är inte tillräcklig om den utförs i för liten mängd, och DSS är vanligtvis för resurskrävande för att utföras i tillräckligt stor utsträckning för att säkert representera ett geologiskt delområde. Därför är kompletterande metoder nödvändiga, där resultat från snabbare och mindre resurskrävande metoder (till exempel CPT) ger kompletterande underlag för en mer tillförlitlig analys.

Emellertid kan det diskuteras om några av de fem metoderna undersökta i detta arbete är överflödiga. DSS och CPT har minst osäkerhet av de fem metoderna, och dessutom ger CPT enskilt störst mängd data. Det är fullt troligt att en analys med endast DSS och CPT skulle ge ett mycket likt resultat som med samtliga fem metoder, eftersom mängden provpunkter endast minskats marginellt vid uteslutande av CRS, Vb och Kon. Av praktiska skäl kommer CRS ändå alltid genomföras för en bedömning av lerans spänningsförhållanden, så i praktiken finns det ingen anledning att inte använda data från CRS om den ändå finns tillgänglig sedan tidigare. Alltså är det eventuellt endast Vb och Kon som bör övervägas som överflödiga vid bestämning av c_u .

I valet av \bar{c}_u från de fördjupade utredningarna utförda för Smådala (av WSP) och Sörängen (av SWECO) är det rimligt att anta att skattningen av \bar{c}_u (se appendix A) till största del baserats på resultatet från DSS då DSS anses vara den mest tillförlitliga metoden. Vid jämförelse av \bar{c}_u beräknat från EMA mot \bar{c}_u från de fördjupade utredningarna går det att se att skattningarna är mycket lika för Smådala 2 samt Norra och Södra

Sörängen. Likheten är sämre för Smådala 1, men fortfarande tillräckligt lik för att antyda att samma indata använts vid de olika skattningarna av \bar{c}_u . Viktigt att notera är att en förenkling till räta linjer behövde göras vid beräkningarna i de fördjupade utredningarna, vilket kan vara en av anledningarna till att skattningarna skiljs åt. En annan anledning kan vara att skattningarna av \bar{c}_u från metoder utöver DSS enklare kan kombineras med EMA.

Det hade varit intressant att se ifall skillnaden mellan den tidigare skattningen och skattningen från dessa beräkningar hade varit större om mätdata från DSS uteslutits från utförd EMA, men det som går att utläsa från befintliga resultat är en bekräftelse av att samma indata använts för skattningen av \bar{c}_u gjord i tidigare utredning på uppdrag av SGI som för utredningen i detta examensarbete (det vill säga störst vikt av mätdata från DSS). Eftersom EMA erbjuder en systematisk metod där mätdata från flera källor kan viktas, och även kan ge underlag för att avgöra vilka metoder som tillför mest till skattningen av c_u motiverar sambandet med den tidigare skattningen användande av EMA, framför allt vid avsaknad av eller begränsad tillgång på mätdata från DSS.

6.3. Indelning av geologiska delområden

Värt att påpeka är att leran i de båda undersökningsområdena Smådala och Sörängen har samma geologiska bildningsätt, och även ligger relativt nära varandra geografiskt (ca 5,5 km ifrån varandra). För att dra slutsatser om andra områden, till exempel val av mätmetoder för östkustleror, skulle analysen behöva utföras även på den specifika typen av lera.

Som tidigare nämnts har beräkningsområdena delats in efter geologin i respektive område för att möta kravet på homogenitet inom ett beräkningsområde, vilket i detta fall redan genomförts i de fördjupade utredningarna. Geologisk indelning är en förenkling som görs för att kunna skapa modeller, och på grund av att det egentligen inte finns sådana skarpa gränser i geologin kommer den naturliga variationen innebära att sådana indelningar aldrig är felfria. Konsekvensen kan antingen bli en indelning med för stora områden som inte innehar tillräcklig geologisk homogenitet, eller för små områden för praktisk hantering.

Smådala har en komplicerad geologi på grund av geologiska händelser, framför allt stora skred, vilket orsakat en stor variation i områdets konsolideringsförhållanden. Det skulle därför kunna vara motiverat att

utvärdera ifall Smådala bättre kan representeras av flera mindre geologiska delområden än i dagsläget.

Även indelningen av Sörängens delområden kan ifrågasättas, eftersom resultaten i denna studie tydligt visar på geologisk homogenitet över Norra och Södra Sörängen. Förslaget är att dessa två delområden kan slås samman och alltså räknas som ett enda geologiskt område.

6.4. Felkällor

En korrekt bedömning av termerna för COV_{tot} för varje enskild metod är av största vikt för ett pålitligt resultat från EMA. Nedan diskuteras svårigheter vid kvantifieringen av de olika parametrarna vid beräkning av COV_{tot} (ekvation 4.14) samt felkällor från hantering av mätdata.

6.4.1. Mätfel

Osäkerheten från mätfelet var en av de svårare delarna att kvantifiera vid utvärdering av COV_{tot} för de olika mätmetoderna. Inga exempel på storleken av mätfelet hittades i tidigare litteratur, så därför undersöktes först spridningen från mätningarna COV_{ξ} , och utifrån detta avgjordes andelen COV_{me} och COV_{in} (enligt ekvation 4.5). Vid beräkningarna uppmärksammades det att ett större COV_{me} gav ett mindre COV_{tot} , och det konservativa valet blev därför att välja ett lägre mätfel och låta COV_{in} utgöra en större andel av COV_{ξ} .

En felkälla vid val av COV_{me} kan vara att det valts till samma värde för alla geotekniska metoder. Under beräkningarna uppmärksammades det att COV_{ξ} varierade mellan olika metoder inom respektive beräkningsområde, och antagandet att COV_{me} är samma för alla metoder innebär då att det endast skulle vara COV_{in} som varierar mellan de olika metoderna. Detta är otroligt eftersom mätdata för respektive undersökningsområde hämtats från ungefär samma plats för alla geotekniska metoder i fält och laboratorium, men eftersom en djupare undersökning av fördelningen mellan COV_{me} och COV_{in} i COV_{ξ} anses ligga utanför ramen för detta examensarbete accepterades förenklingen att COV_{me} är lika för samtliga metoder och beräkningsområden.

En annan felkälla från mätfel är att fel från mätutrustningen och handhavande fel försummas, vilket alltså innebär osäkerheter som inte beaktats vid skattningen av COV_{tot} i detta examensarbete. Både för mätmetoder in-situ och ex-situ behöver kalibreringar göras utifrån

erfarenhet (till exempel hastigheten vid utförandet av V_b), vilka kan variera beroende av vem som utför provtagningen, vilken utrustning som använts och vädret vid mättillfället. För mätmetoder ex-situ (CRS, DSS och Kon) uppkommer dessutom en felkälla kring återskapandet av in-situ förhållanden gällande spänning och konsolideringsgrad i provet. Även ovarsam transport och temperaturskillnader mellan olika platser kan påverka provets hållfasthetsegenskaper.

6.4.2. Transformationsfel

Även osäkerheten från transformationsfelet var besvärlig att uppskatta, och antogs i detta examensarbete utifrån värden presenterade i en studie av Prästings m.fl. (2016). Eftersom Smådala och Sörängen har liknande geotekniska förhållanden borde skillnaden i COV_{tr} mellan dessa platser vara marginell. En notering om de valda COV_{tr} från Prästings m.fl. (2016) är att COV_{tr,V_b} är högre (17 %) än $COV_{tr,Kon}$ (16 %), vilket intuitivt borde vara tvärtom eftersom transformationen i Kon rimligen kan antas vara mer osäker (på grund av fler steg i transformationen) än den i V_b . För att ta hänsyn till att $COV_{tr,Kon}$ åtminstone inte bör vara lägre än COV_{tr,V_b} höjdes $COV_{tr,Kon}$ till samma värde som COV_{tr,V_b} , vilket är en marginell ändring för resultatet men som anses viktig av teoretiska skäl.

Som tidigare nämnts utgör COV_{tr} ofta en stor del av COV_{tot} på grund av att COV_{tr} inte reduceras med ökat antal oberoende mätningar. Att hitta metoder för att minska COV_{tr} kan därför vara ett effektivt sätt att öka tillförlitligheten vid skattning av c_u .

6.4.3. Variansreduktion

En nackdel med att uppskatta glidyornas storlek från jordskredshistorik är att det kan vara svårt att avgöra vilken typ av skred som visas i kartan för skredshistorik (se Appendix B). För variansreduktionen är primärskred relevant, men framför allt på platser med kvicklera kan primärskreden övergå till stora sekundärskred, vilka är svåra att skilja från varandra i efterhand. Valet av den ungefärliga ytan på initialscred i Smådala (rektangulär) och Sörängen (kvadratisk) är en grov uppskattning som förmodligen avviker från verkligheten, men som utifrån känslighetsanalysen (se avsnitt 6.5) anses tillräckligt bra för beräkning av COV_{tot} .

Valet av δ_h som används vid beräkning av variansreduktion (ekvation 4.13) valdes liksom COV_{tr} inte specifikt för områdena undersökta i detta

examensarbete, utan baserades på en studie av Prästings m.fl. (2016). Fluktuationsavstånd är inte helt enkelt att beräkna, och med grund i att variansreduktionen har relativt liten betydelse för COV_{tot} (se avsnitt 6.5) skulle en lösning för att göra beräkningen av COV_{tot} mer praktisk kunna vara att fastställa en mängd förslag på fluktuationsavstånd för olika typer av förhållanden.

6.5. Känslighetsanalyser

Från känslighetsanalyserna kan följande observationer göras:

- 1) COV_{tr} utgör den absolut största delen av COV_{tot} för samtliga mätmetoder med transformation, vilket förklarar varför $COV_{tot|DSS}$ är så pass mycket lägre än övriga COV_{tot} . För berörda mätmetoder utgör COV_{tr} en så pass stor del av COV_{tot} att förändringen i COV_{tot} nästan direkt speglar förändringen i COV_{tr} .
- 2) Ändring av COV_{me} , L_A och L_B samt δ_h påverkar inte COV_{tot} mer än ca 1–2 % (alltså $\Delta COV_{tot} \approx \pm 0,001$) för CPT, CRS, Vb och Kon, och kan därför anses som marginella för dessa mätmetoder. Observera dock att COV_{me} påverkas av antalet mätningar n .
- 3) $COV_{tot|DSS}$ påverkas procentuellt mer av förändringar i COV_{me} , L_A och L_B samt δ_h jämfört mot påverkan av COV_{tot} från övriga mätmetoder, vilket beror på att den största delen osäkerhet för övriga metoder är just COV_{tr} . COV_{me} ger störst utslag av dessa, men till skillnad från COV_{tr} kan storleken på COV_{me} begränsas av storleken på COV_{ξ} , vilken bedöms från platsspecifika mätningar. Det bör dock lyftas att påverkan av felskattning av COV_{me} , L_A och L_B samt δ_h kanske inte har särskilt stor betydelse i praktiken eftersom $COV_{tot|DSS}$ redan är så pass lågt och att detta värde ändå eventuellt bör höjas på grund av att osäkerheter från utförande av DSS ej beaktats vid uppskattningen av $COV_{tot|DSS}$ i detta examensarbete (se avsnitt 6.1).

6.6. Modellfel

Modellfelet (ϑ) utgör en osäkerhet för uppskattningen av COV_{tot} som negligerats i detta examensarbete, vilket innebär att de låga skattningarna av $COV_{tot|DSS}$ och $COV_{tot,viktat}$ kan behöva höjas.

Om metodiken för bestämning av COV_{tot} ska användas i praktiken är det viktigt att komma ihåg att osäkerheter från ϑ inte beaktas i skattningen av COV_{tot} , exempelvis osäkerheter från uppskattningen av COV_{me} , COV_{tr} , L_A och L_B samt δ_h . För att ta höjd för ϑ kan en möjlig lösning vara att ta fram ett schablonvärde för ϑ som kan adderas till COV_{tot} innan resultatet presenteras. Hur stort ett sådant schablonmodellfel skulle vara har dock inte undersökts i detta examensarbete.

6.7. Användning av EMA

Detta examensarbete kan ses som en fingervisning till hur den bayesianska metoden EMA kan användas för att förbättra det geotekniska arbetet, men också för att ge verktyg till att på ett systematiskt vis kunna tillgodose all tillgänglig geoteknisk information vid bedömning av en jordparameter. En viktig insikt är att en ökad medvetenhet kring geotekniska osäkerheter kan förbättra bedömningen av geotekniska parametrar i form av snävare parameterskattningar och minskad risk för felbedömningar, vilket i sin tur kan gynna såväl individ och miljö som ekonomi kring geotekniska arbeten.

Denna studie visar tydligt att en ökning av utförda DSS skulle kunna bidra till en större säkerhet vid skattningen av c_u , men också att mindre resurskrävande metoder som CPT är viktiga komplement. Slutligen kan användandet av EMA motiveras ytterligare på grund av att det möjliggör tillvaratagande av information från olika källor som kan finnas tillgängliga av yttre anledningar, till exempel tidigare kunskap, och bidrar alltså till tillvaratagande av geoteknisk kunskap.

7. Slutsats

Resultaten från denna studie visar att tillämpningen av bayesiansk statistisk inom geoteknik bidrar till att kvantifiera och därmed öka förståelsen för osäkerheterna inom geoteknik.

Avseende geotekniska mätmetoder i fält- och laboratorium visar detta arbete på en överlägsen noggrannhet av skjuvhållfasthet (c_u) skattat från direkta skjuvförsök (DSS), men även på vikten av komplettering med mindre exakta metoder som CPT-sondering (CPT) vilket i stället tillför en stor mängd data. Studien indikerar att resultat från vingförsök (V_b), fallkonförsök (Kon) och CRS-försök (CRS) är mindre viktiga på grund av att dessa varken har låg osäkerhet eller medför en större mängd data.

Tröskeln till att använda utökad multivariabelanalys (EMA) i praktiken ligger i beräkningen av varianskoefficienten för den totala osäkerheten vid skattningen av c_u (COV_{tot}) för varje enskild mätmetod. Varianskoefficienten för mätdata (COV_{ξ}) och den statistiska reduktionsfaktorn (ψ) kan beräknas från erhållna mätdata, men för att beräkna variansreduktionsfaktorn (Γ), osäkerheten från mätfelet (COV_{me}) och osäkerheten från transformationsfelet (COV_{tr}) krävdes det i detta fall förenklingar. Dessutom har modellfelet (ϑ) inte beaktats, vilket bedöms utgöra en viktig faktor för den viktade totala osäkerheten vid skattningen av c_u ($COV_{tot,viktad}$).

Ett ramverk för bestämmandet av Γ , COV_{me} och COV_{tr} samt ϑ anses nödvändigt för att möjliggöra en systematisk bedömning av COV_{tot} , och därmed möjliggöra användandet av EMA i praktiken.

7.1. Förslag på vidare arbeten

Följande punkter är förslag på vidare arbeten med syfte att jobba mot praktiskt användande av EMA:

- Undersökning av ϑ och hur det kan kvantifieras.
- Hitta metoder för att standardisera valet av COV_{me} , COV_{tr} och Γ för att förenkla beräkningen av COV_{tot} .

- Kvantifiera osäkerheterna kring DSS, det vill säga osäkerheter från hantering av prov och utförande av DSS, i syfte att öka tillförlitligheten av $COV_{tot|DSS}$ och därmed även för COV_{tot} .
- Analys av hur $COV_{tot,viktat}$ påverkas ifall en eller flera mätmetoder undersökta i detta arbete tas bort.
- Genomföra liknande studier som denna på andra typer av jordar, framför allt skulle en analys av eventuella skillnader i COV_{tot} mellan olika mätmetoder för en annan typ av jord än västkustlera vara av intresse.
- Framtagande av användarvänlig programvara för beräkning av COV_{tot} .

Referenser

- Ang, A. H.-S., & Tang, W. H. (2006). *Probability Concepts in Engineering, Emphasis on Applications in Civil and Environmental Engineering* (2:a uppl.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Massachusetts: Department of Civil & Environmental Engineering, University of Maryland.
- Bengtsson, P.-E., Berggren, B., Ohlsson, L., & Stille, H. (1991). *Geoteknik och statistik - Partialkoefficienter*. Stockholm: Statens råd för byggforskning.
- Ching, J., Phoon, K.-K., & Chen, Y.-C. (2010). Reducing shear strength uncertainties in clays by multivariate correlations. *Canadian Geotechnical Journal*, *47*(1), 16-33. doi:10.1139/T09-074.
- Ching, J., Phoon, K.-K., & Wu, S. H. (2016). Impact of Statistical Uncertainty on Geotechnical Reliability Estimation. *Journal of Engineering Mechanics*, *142*(6): 4016027. doi:10.1061/(ASCE)E M.1943-7889.0001075
- DeGroot, D. J., & Baecher, G. B. (1993). Estimating autocovariance of in-situ soil properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, *119*(1), 147-166. doi:10.1061/%28ASCE%290733-9410%281993%29119%3A1%28147%29
- D'Ignazio, M., Phoon, K.-K., Tan, S. A., & Lämsivaara, T. T. (2016). Correlations for undrained shear strength of Finnish soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, *53*(10), 1628-1645. doi:10.1139/cgj-2016-0037
- Jaksa, M. B., Brooker, P. I., & Kaggwa, W. S. (1997). Inaccuracies associated with estimating random measurement errors. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *123*(5), 393-401. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:5(393)
- Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P.-E., Alén, C., Bergdahl, U., & Eriksson, L. (2007). *Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord*. Linköping: Statens geotekniska institut.
- Lindvall, R., & Jönsson, Å. (2020). *Metodik för sannolikhetsberäkningar avseende detaljerad/fördjupad geoteknisk utredningsnivå inom ramen för Delegationen för Göta älv, v 1.0*. Linköping, 2021-05-10: Statens geotekniska institut, SGI.
- Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. *Canadian Geotechnical Journal*, *3*(2), 74-97. doi:10.1139/t66-009

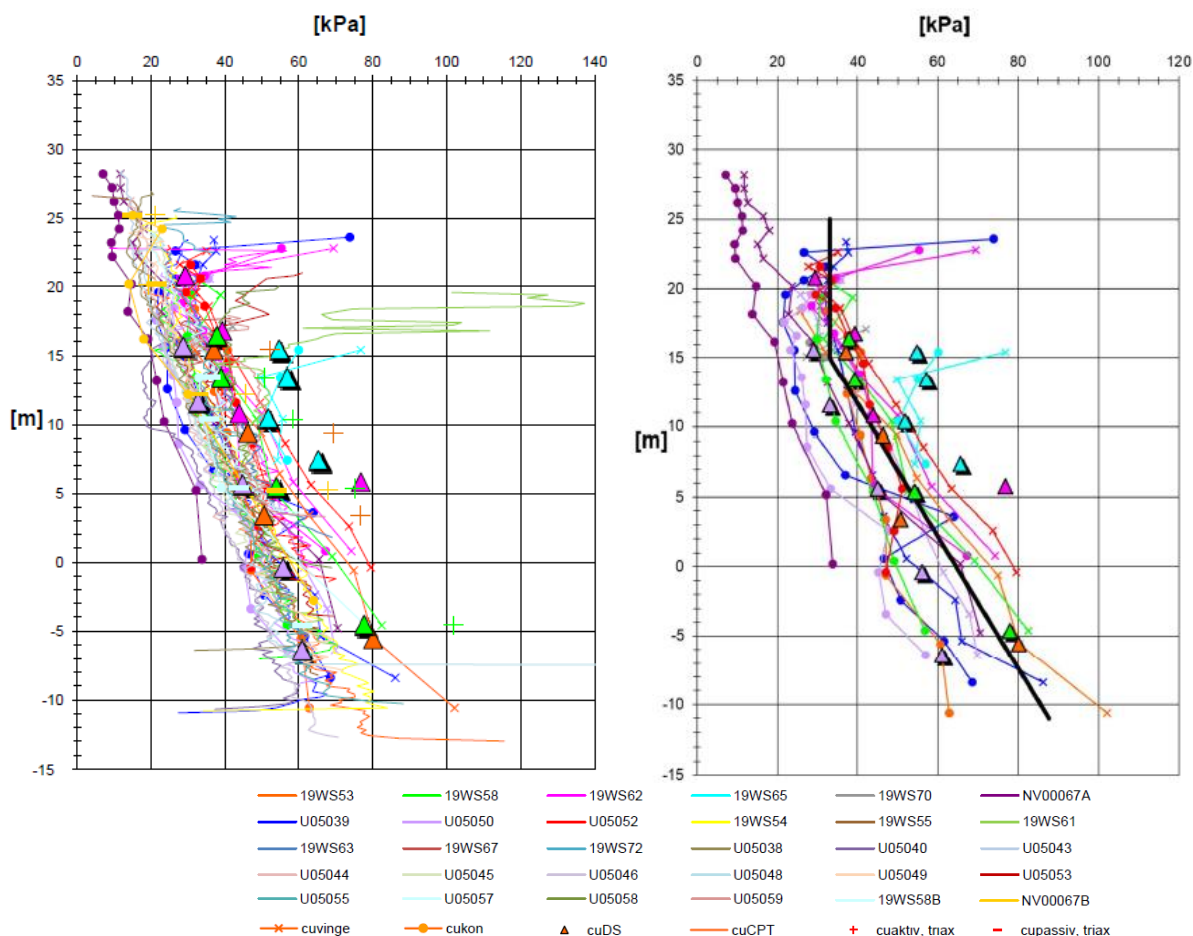
- Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (3:e uppl.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Müller, R. (2013). *Probabilistic stability analysis of embankments founded on clay*. TRITA-JOB PHD 1018. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan, KTH.
- Müller, R., Larsson, S., & Spross, J. (2014). Extended multivariate approach for uncertainty reduction in the assessment of undrained shear strength in clays. *Canadian Geotechnical Journal*, *51*(3), 231-245. doi:10.1139/cgj-2012-0176
- National Research Council. (1995). *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. Washington, DC: The National Academies Press. doi:10.17226/9476
- Orchant, C. J., Kulhawy, F. H., & Trautmann, C. H. (1988). *Reliability-Based Foundation Design for Transmission Line Structures: Critical evaluation of In-situ Test Methods*. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute.
- Phoon, K.-K. (2019). The story of statistics in geotechnical engineering. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, *14*(1), 3-25. doi:10.1080/17499518.2019.1700423
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999a). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, *36*(4), 612-624. doi:10.1139/t99-038
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999b). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, *36*(4), 625-639. doi:10.1139/t99-039
- Prästings, A. (2019). *Managing uncertainties in geotechnical parameters: From the perspective of Eurocode 7*. TRITA-ABE-DLT-1924. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan, KTH.
- Prästings, A., Larsson, S., & Müller, R. (2016). Multivariate approach in reliability-based design of a sheet pile wall. *Transportation Geotechnics*, *7*, 1-12. doi:10.1016/j.trgeo.2016.03.001
- Prästings, A., Spross, J., & Larsson, S. (2019). Characteristic values of geotechnical parameters in Eurocode 7. *Geotechnical Engineering*, *172*(4), 301-311. doi:10.1680/jgeen.18.00057
- SGI. (2012). *Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat Slutrapport Del 2 - Kartläggning*. Linköping: SGI.
- SGI. (2018). *Regeringsbeslut om nytt bidrag för att skredsäkra Göta älv*. Hämtat 2021-15-06 från <https://www.sgi.se/sv/om-sgi/pressrum>

- /aktuellt/regeringsbeslut-om-nytt-bidrag-for-att-skredsakra-gota-alm/
- SGI. (2021a). *Delegationen för Göta älv ska minska risken för ras och skred*. Hämtat 2021-15-06 från <https://www.sgi.se/sv/om-sgi/var-t-samhallsuppdrag/regeringsuppdrag/delegationen-for-gota-alm/>
- SGI. (2021b). Översiktskarta utredningsområden längs med Göta älv. Göteborg: SGI.
- SGU. (2021). *Kartvisare Jordskred och raviner*. Hämtat 2021-04 från <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-skred.html>
- SIS. (2017). Geoteknisk undersökning och provning - Laboratorieundersökning av jord - Del 6: Provning med fallkon (ISO 17892-6:2017). Geoteknik och geokonstruktioner, SIS/TK 183.
- Spross, J., Olsson, L., & Stille, H. (2018). The Swedish Geotechnical Society's methodology for risk management: a tool for engineers in their everyday work. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 12(3), 183-189. doi:10.1080/17499518.2017.1416643
- SWECO. (2020a). *PM Geoteknik, Fördjupad stabilitetsutredning Hjärtum Sörängen*. Göteborg: SGI, D-nr: 4.2.12-1902-0153.
- SWECO. (2020b). *Markteknisk undersökningsrapport/geoteknik, Fördjupad stabilitetsutredning Hjärtum Sörängen*. Göteborg: SGI, D-nr: 4.2.12-1902-0153.
- Tang, W. H. (1980). Bayesian Frequency Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(7), 1203-1218.
- Vanmarcke, E. (2010). *Random fields: analysis and synthesis*. Hackensack, NJ: World Scientific.
- WSP. (2020a). *PM Geoteknik fördjupad stabilitetsutredning Smådala*. Göteborg: SGI, D-nr: 4.2.12-1904-0303.
- WSP. (2020b). *Fördjupad stabilitetsutredning, Smådala, Markteknisk undersökningsrapport, Geoteknik*. Göteborg: SGI, D-nr: 4.2.12-1904-0303.

Appendix A – Vald skjuvhållfasthet SGI

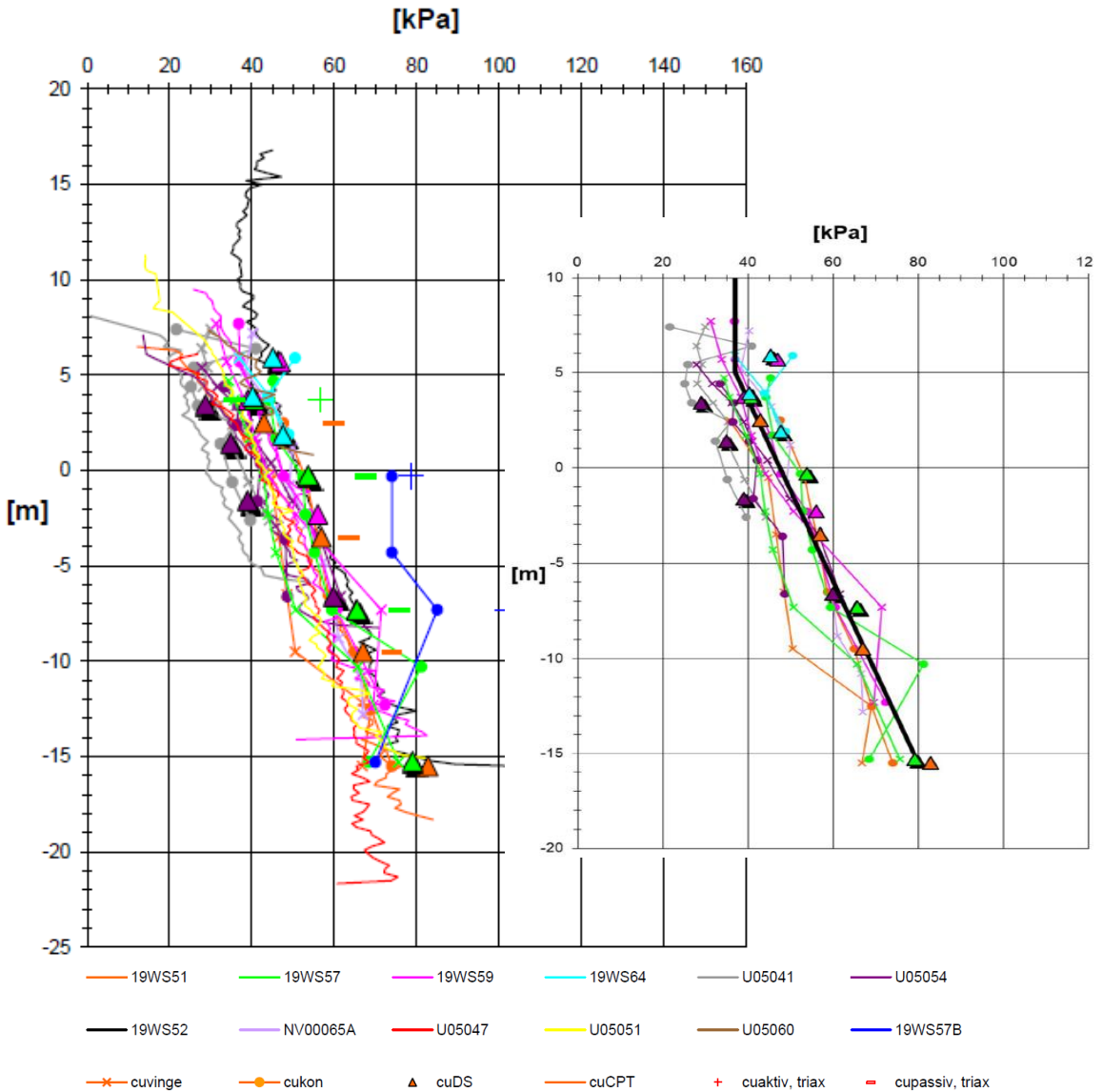
I detta appendix redovisas underlag för val av c_u för områdena Smådala och Sörängen.

Figur A.1 och A.2 visar c_u från den fördjupade utredningen i Smådala utförd av WSP (2020a). I figurerna finns två grafer; till vänster presenteras



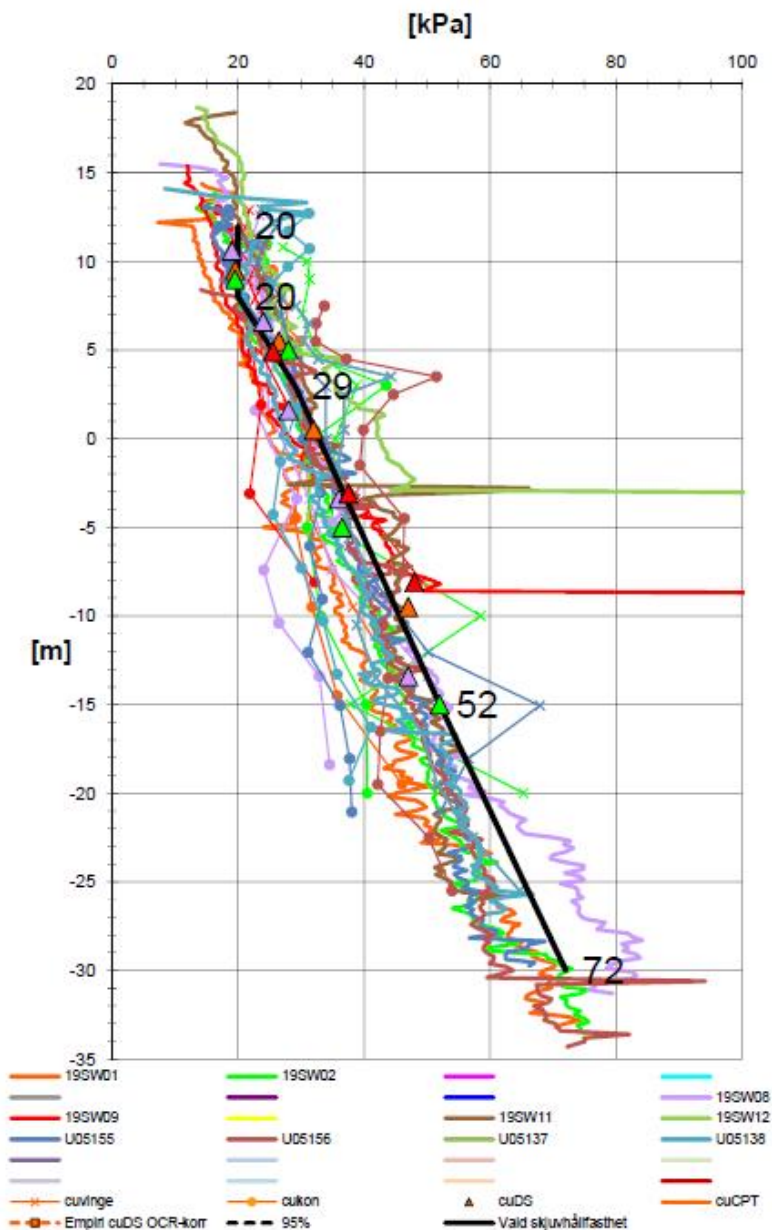
Figur A.1: Underlag från tidigare utförd fördjupad utredning för skattning av c_u i Smådala 1 (WSP, 2020a). Grafen t.v. (ur Bilaga 1 till PM Smådala) presenterar samtliga mätmetoder och borrhål, grafen t.h. (ur PM Smådala) exkluderar CPT men visar det valda c_u (svart streck). Återpublicerat med tillstånd av SGI.

c_u från CPT, DSS, Vb, Kon samt triaxialförsök. Till höger visas även det valda \bar{c}_u (svart tjock linje), men på grund av att den stora mängden data från CPT gör grafen svårsläst visas ej c_u från CPT i den högra grafen.

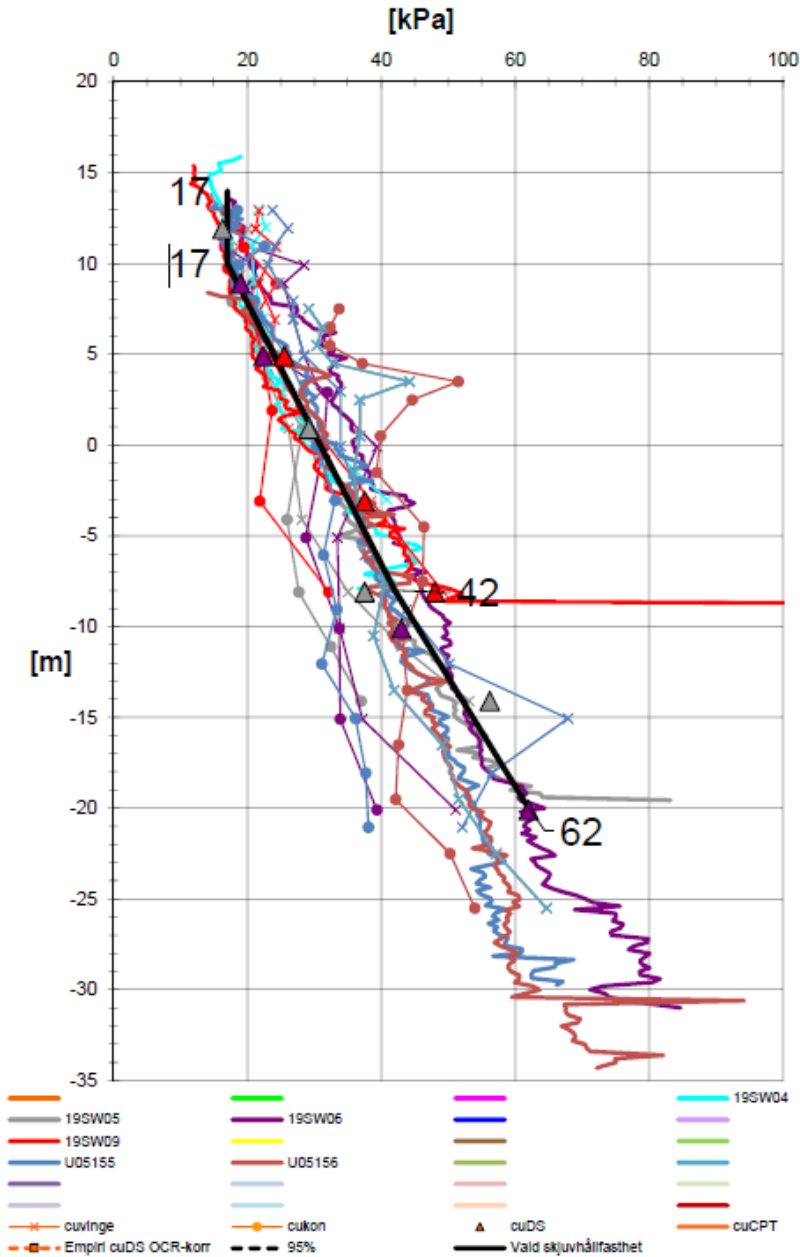


Figur A.2: Underlag från tidigare utförd fördjupad utredning för skattning av c_u i Smådala 2 (WSP, 2020a). Grafen t.v. (ur Bilaga 1 till PM Smådala) presenterar samtliga mätmetoder och borrhål, grafen t.h. (ur PM Smådala) exkluderar CPT men visar det valda c_u (svart streck). Återpublicerat med tillstånd av SGI.

Figur A.3 och A.4 visar c_u från den fördjupade utredningen i Sörängen utförd av SWECO (2020a). I figurerna presenteras c_u från CPT, DSS, Vb och Kon samt det valda \bar{c}_u (svart tjock linje).



Figur A.3: Underlag från tidigare utförd fördjupad utredning för skattning av c_u i Norra Sörängen (SWECO, 2020a). Grafen presenterar samtliga mätmetoder och borrhål (ur Bilaga 2 till PM Sörängen) samt det valda c_u (svart streck). Återpublicerad med tillstånd av SGI.

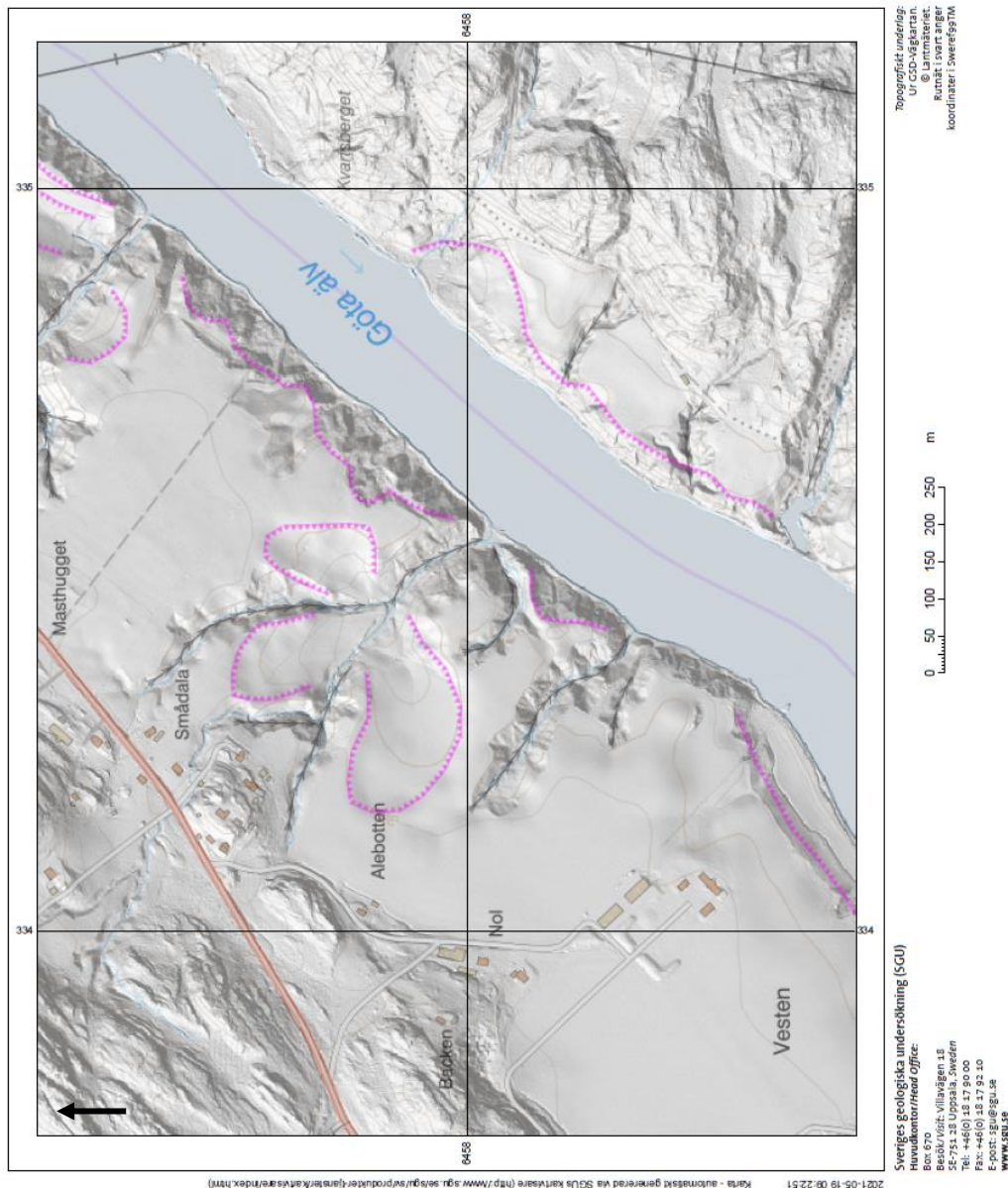


Figur A.4: Underlag från tidigare utförd fördjupad utredning för skattning av c_u i Södra Sörängen (SWECO, 2020a). Grafen presenterar samtliga mätmetoder och borrhål (ur Bilaga 2 till PM Sörängen) samt det valda c_u (svart streck). Återpublicerad med tillstånd av SGI.

Appendix B – Skredhistorik

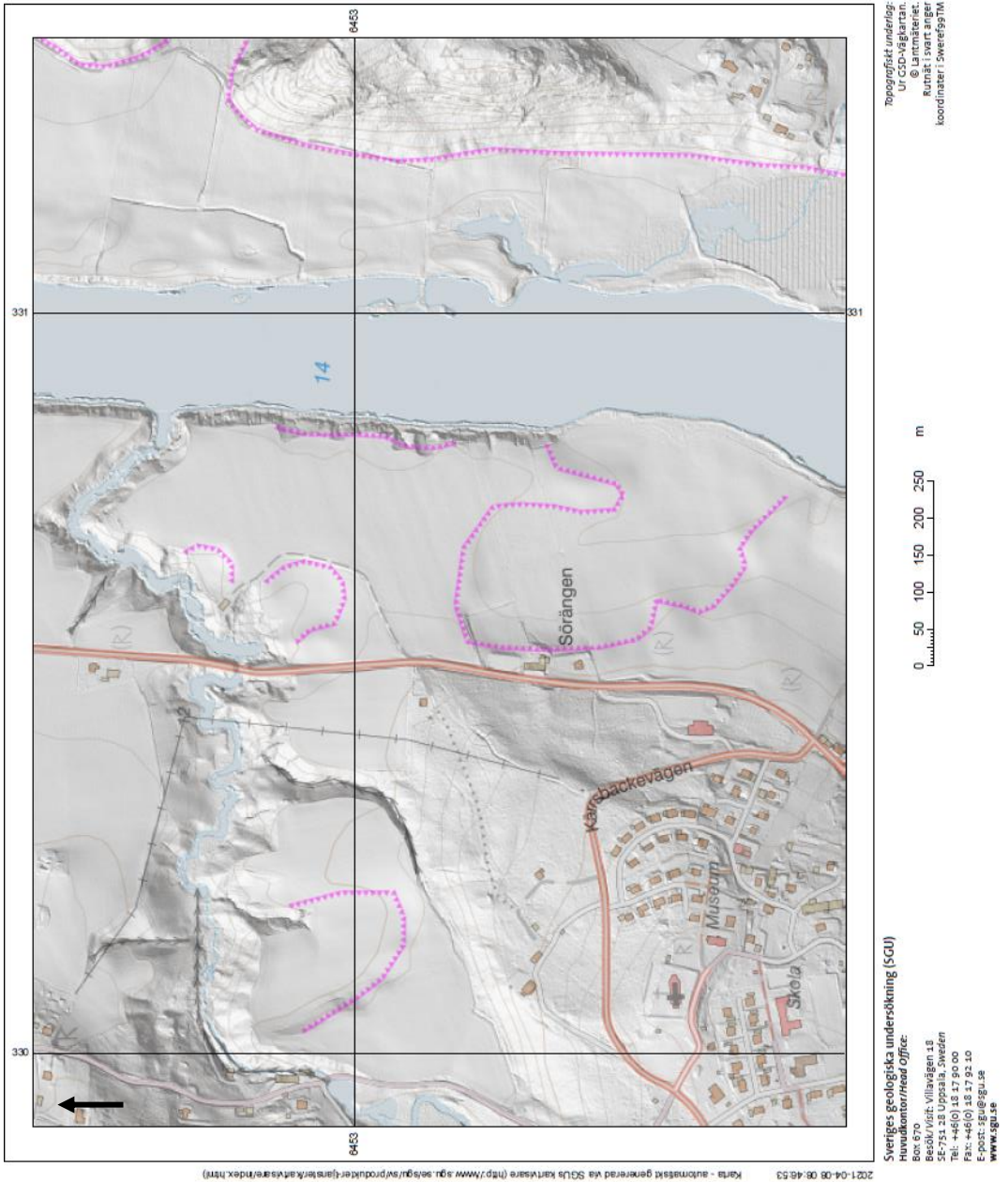
I detta appendix redovisas underlag för val av förväntade glidytor av skred i Smådala och Sörängen (L_A och L_B). Tidigare skred markeras av de rosa linjerna.

För Smådala har de tre skred i den vänstra mittrutan som tillsammans formar en treklöver undersökts (Figur A.5). För Sörängen har de två



Figur A.5: Skredhistorik för område Smådala genererat med SGU:s digitala verktyg "kartvisaren Jordskred och raviner" (SGU, 2021).

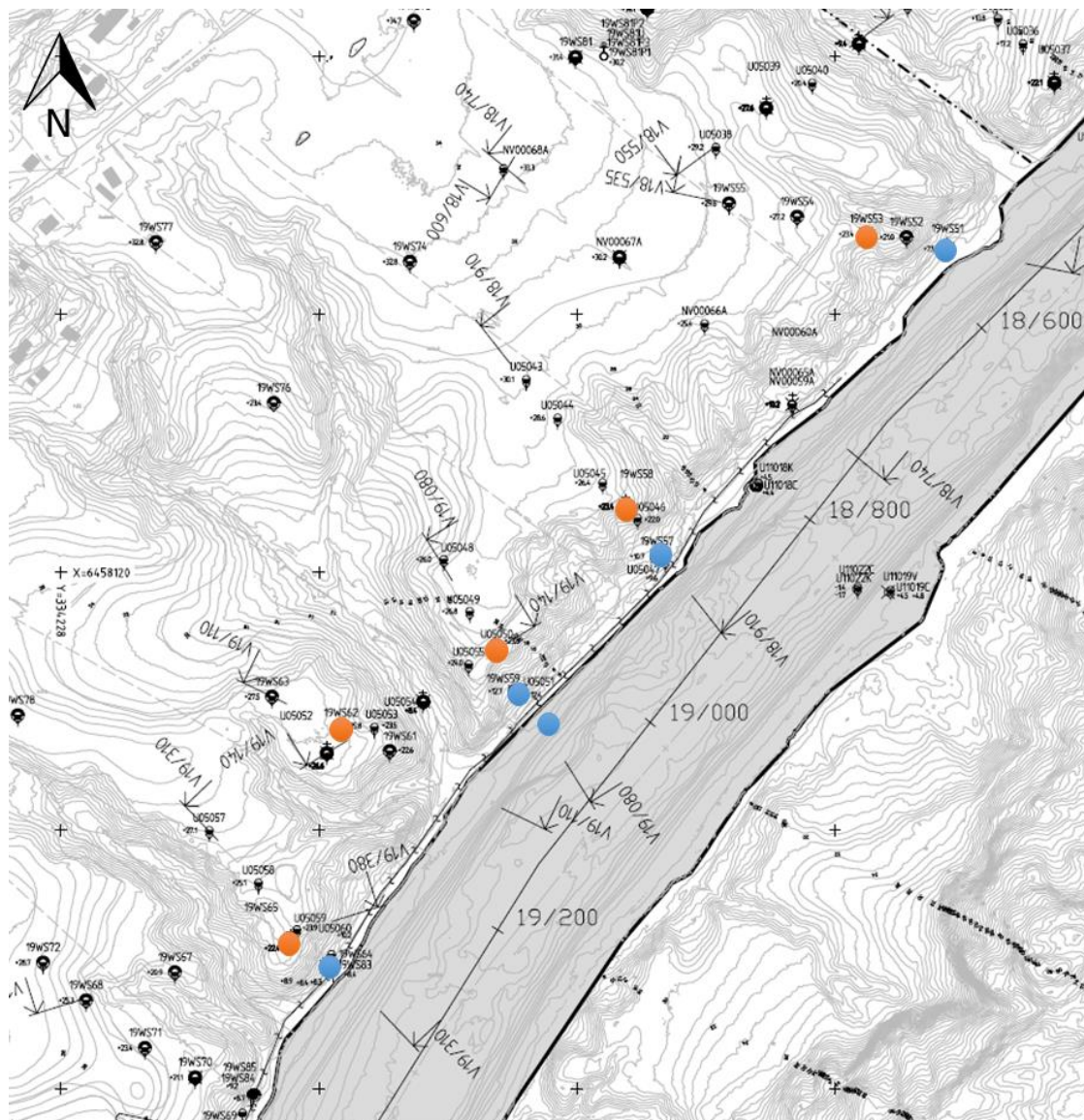
hästskoformade skreden i vänstra mittrutan undersökts (Figur A.6).



Figur A.6: Skredhistorik för område Sörängen genererat med SGU:s digitala verktyg "kartvisaren Jordskred och raviner" (SGU, 2021).

Appendix C – Placering av borrhål för DSS

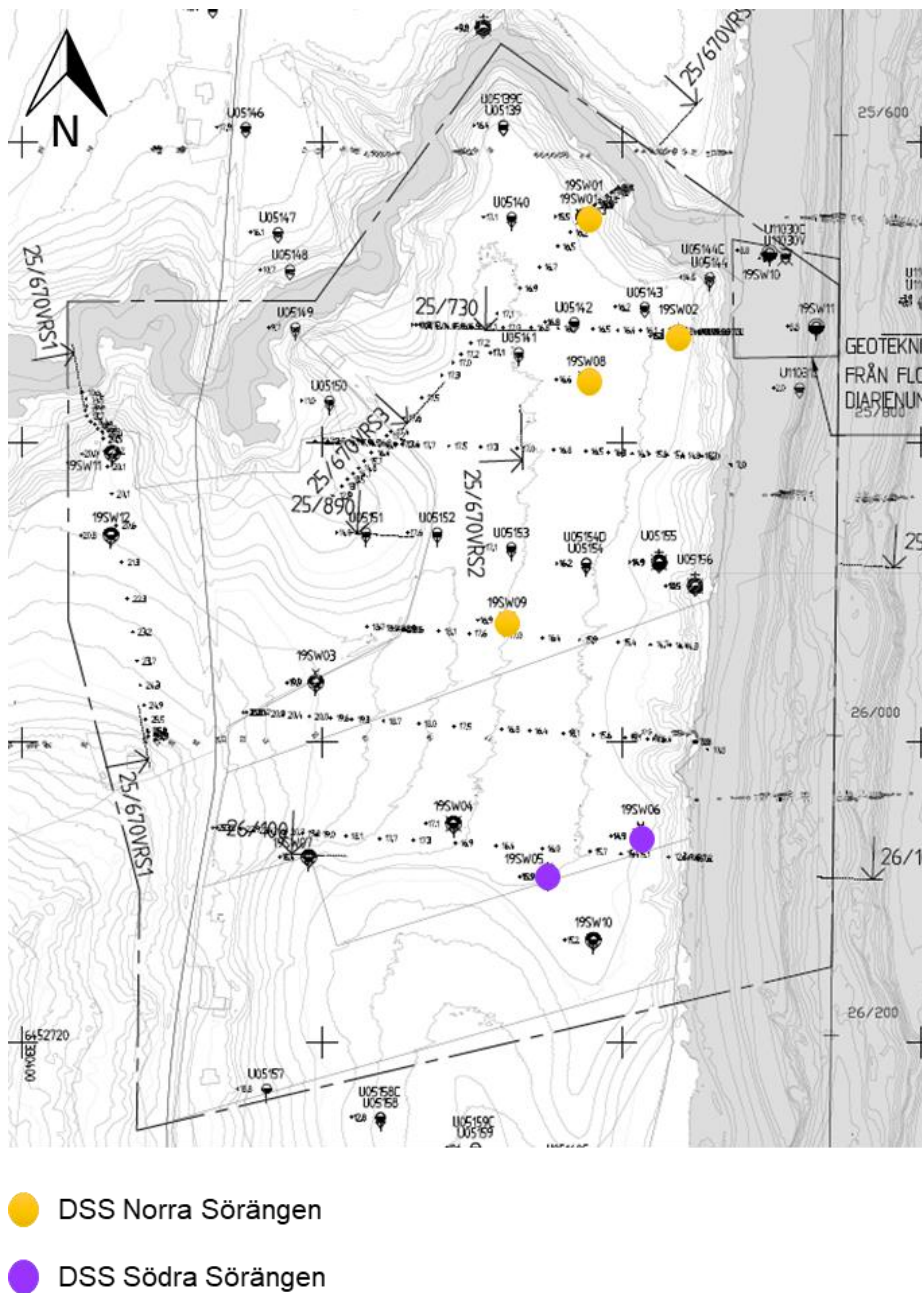
I detta appendix visas lokaliseringen av borrhpunkter där ostörda prover tagits för utvärdering med DSS. Figur A.7 visar punkter i Smådala och



- DSS Smådala 1
- DSS Smådala 2

Figur A.7: Lokalisering av borrhpunkter för utvärdering av DSS för Smådala. Planritning framtagen av WSP (2020a) i den fördjupade utredningen för Smådala. Numreringen längs med älvens mittstreck avser avståndet i kilometer/meter från utloppet i Vänersborg. Återpublicerad med tillstånd av SGI.

Figur A.8 visar punkter i Sörängen.



Figur A.8: Lokalisering av borrpunkter för utvärdering av DSS för Sörängen. Planritning framtagen av SWECO (2020a) i den fördjupade utredningen för Sörängen. Numreringen längs med älvens mittstreck avser avståndet i kilometer/meter från utloppet i Vänersborg. Återpublicerad med tillstånd av SGI.

Appendix D – Delresultat för COV_{tot}

Tabell A.1-A.5 presenterar delresultat för Smådala 1, Tabell A.6-A.10 presenterar delresultat för Smådala 2, Tabell A.11-A.15 presenterar delresultat för Norra Sörängen och Tabell A.16-A.20 presenterar delresultat för Södra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
30	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0038	0,1343	1580	0,0102	0,1012
26	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0027	0,1343	1580	0,0102	0,1012
22	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0019	0,1343	1580	0,0102	0,1012
18	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0012	0,1343	1580	0,0102	0,1012
15	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0009	0,1343	1580	0,0102	0,1012
12	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0007	0,1343	1580	0,0102	0,1012
9	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0006	0,1343	1580	0,0102	0,1012
6	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0007	0,1343	1580	0,0102	0,1012
3	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0009	0,1343	1580	0,0102	0,1012
0	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0012	0,1343	1580	0,0102	0,1012
-3	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0017	0,1343	1580	0,0102	0,1012
-7	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0025	0,1343	1580	0,0102	0,1012
-11	0,0002	0,0020	0,0100	0,0018	0,0035	0,1343	1580	0,0102	0,1012

Tabell A.2: Delresultat för COV_{totGRS} för Smådala 1.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
30	0,0002	0,0057	0,0392	0,00549	0,408	0,134	22	0,0422	0,208
26	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,273	0,134	22	0,0415	0,206
22	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,170	0,134	22	0,0409	0,204
18	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,099	0,134	22	0,0405	0,203
15	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,066	0,134	22	0,0403	0,203
12	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,051	0,134	22	0,0403	0,203
9	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,054	0,134	22	0,0403	0,203
6	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,075	0,134	22	0,0404	0,203
3	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,113	0,134	22	0,0406	0,204
0	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,169	0,134	22	0,0409	0,204
-3	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,243	0,134	22	0,0413	0,205
-7	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,369	0,134	22	0,0420	0,207
-11	0,0002	0,00572	0,0392	0,00549	0,526	0,134	22	0,0429	0,209

Tabell A.3: Delresultat för $COV_{tot|DSS}$ för Smådala 1.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
30	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,4694	0,134	21	0,0015	0,038
26	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,327575	0,134	21	0,0011	0,033
22	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,215165	0,134	21	0,0008	0,029
18	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,132171	0,134	21	0,0006	0,025
15	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,089229	0,134	21	0,0005	0,023
12	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,062834	0,134	21	0,0005	0,022
9	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,052985	0,134	21	0,0005	0,021
6	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,059682	0,134	21	0,0005	0,022
3	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,082926	0,134	21	0,0005	0,023
0	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,122716	0,134	21	0,0006	0,025
-3	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,179052	0,134	21	0,0008	0,028
-7	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,279906	0,134	21	0,0010	0,032
-11	0,0002	0,0026	0,000	0,00239	0,410175	0,134	21	0,0013	0,036

Tabell A.4: Delresultat för $COV_{tot|Vb}$ för Smådala 1.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
30	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,056071	0,134	88	0,0293	0,172
26	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,038568	0,134	88	0,0292	0,172
22	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,025423	0,134	88	0,0292	0,172
18	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,016637	0,134	88	0,0291	0,172
15	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,012909	0,134	88	0,0291	0,172
12	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,011632	0,134	88	0,0291	0,172
9	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,012806	0,134	88	0,0291	0,172
6	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,016433	0,134	88	0,0291	0,172
3	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,022512	0,134	88	0,0292	0,172
0	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,031042	0,134	88	0,0292	0,172
-3	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,042024	0,134	88	0,0292	0,172
-7	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,060481	0,134	88	0,0293	0,172
-11	0,0002	0,0044	0,028	0,00420	0,083297	0,134	88	0,0294	0,173

Tabell A.5: Delresultat för $COV_{\text{tot|Kon}}$ för Smådala 1.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{\text{kor}}^2}$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{\text{tot}}^{\{\text{exp}\}}$
30	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0602	0,134	84	0,0307	0,176
26	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0414	0,134	84	0,0304	0,176
22	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0272	0,134	84	0,0303	0,175
18	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0177	0,134	84	0,0302	0,175
15	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0136	0,134	84	0,0301	0,175
12	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0122	0,134	84	0,0301	0,175
9	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0134	0,134	84	0,0301	0,175
6	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0172	0,134	84	0,0302	0,175
3	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0236	0,134	84	0,0302	0,175
0	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0327	0,134	84	0,0303	0,176
-3	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0444	0,134	84	0,0305	0,176
-7	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0640	0,134	84	0,0307	0,177
-11	0,0002	0,0113	0,0285	0,0111	0,0883	0,134	84	0,0310	0,177

Tabell A.6: Delresultat för $COV_{tot|CPT}$ för Smådala 2.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
10	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0092	0,3111	403	0,0105	0,1029
7	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0064	0,3111	403	0,0105	0,1029
4	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0044	0,3111	403	0,0105	0,1029
1	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0031	0,3111	403	0,0105	0,1029
-2	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0025	0,3111	403	0,0105	0,1029
-5	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0027	0,3111	403	0,0105	0,1029
-7	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0032	0,3111	403	0,0105	0,1029
-9	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0041	0,3111	403	0,0105	0,1029
-12	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0060	0,3111	403	0,0105	0,1029
-15	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0086	0,3111	403	0,0105	0,1029
-18	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0119	0,3111	403	0,0105	0,1030
-21	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0160	0,3111	403	0,0106	0,1030
-24	0,0002	0,0021	0,0100	0,0018	0,0209	0,3111	403	0,0106	0,1030

Tabell A.7: Delresultat för $COV_{\text{tot|CRS}}$ för Smådala 2.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{\text{korr}}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{\text{tot}}^{\{\text{exp}\}}$
10	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,180	0,311	23	0,041	0,204
7	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,119	0,311	23	0,041	0,203
4	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,076	0,311	23	0,040	0,203
1	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,053	0,311	23	0,040	0,203
-2	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,049	0,311	23	0,040	0,203
-5	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,063	0,311	23	0,040	0,203
-7	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,083	0,311	23	0,040	0,203
-9	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,112	0,311	23	0,041	0,203
-12	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,171	0,311	23	0,041	0,204
-15	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,249	0,311	23	0,041	0,204
-18	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,346	0,311	23	0,041	0,205
-21	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,462	0,311	23	0,042	0,206
-24	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,597	0,311	23	0,042	0,207

Tabell A.8: Delresultat för $COV_{tot|DSS}$ för Smådala 2.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
10	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,272	0,311	19	0,001	0,027
7	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,179	0,311	19	0,001	0,024
4	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,112	0,311	19	0,001	0,023
1	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,072	0,311	19	0,000	0,022
-2	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,059	0,311	19	0,000	0,021
-5	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,073	0,311	19	0,000	0,022
-7	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,097	0,311	19	0,001	0,022
-9	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,133	0,311	19	0,001	0,023
-12	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,210	0,311	19	0,001	0,025
-15	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,313	0,311	19	0,001	0,028
-18	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,444	0,311	19	0,001	0,030
-21	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,601	0,311	19	0,001	0,033
-24	0,0002	0,001	0,000	0,001	0,785	0,311	19	0,001	0,036

Tabell A.9: Delresultat för $COV_{tot|Vb}$ för Smådala 2.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
10	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,098	0,311	45	0,029	0,171
7	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,062	0,311	45	0,029	0,171
4	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,038	0,311	45	0,029	0,171
1	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,025	0,311	45	0,029	0,171
-2	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,024	0,311	45	0,029	0,171
-5	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,035	0,311	45	0,029	0,171
-7	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,049	0,311	45	0,029	0,171
-9	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,068	0,311	45	0,029	0,171
-12	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,106	0,311	45	0,029	0,171
-15	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,155	0,311	45	0,029	0,171
-18	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,217	0,311	45	0,029	0,171
-21	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,290	0,311	45	0,029	0,171
-24	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,375	0,311	45	0,029	0,171

Tabell A.10: Delresultat för $COV_{tot|Kon}$ för Smådala 2.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
10	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,1029	0,311	44	0,0293	0,172
7	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,0653	0,311	44	0,0292	0,172
4	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,0398	0,311	44	0,0292	0,172
1	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,0262	0,311	44	0,0292	0,172
-2	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,0247	0,311	44	0,0292	0,172
-5	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,0351	0,311	44	0,0292	0,172
-7	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,0487	0,311	44	0,0292	0,172
-9	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,0677	0,311	44	0,0292	0,172
-12	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,1062	0,311	44	0,0293	0,172
-15	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,1566	0,311	44	0,0294	0,173
-18	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,2191	0,311	44	0,0295	0,173
-21	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,2935	0,311	44	0,0297	0,174
-24	0,0002	0,0022	0,0285	0,0020	0,3800	0,311	44	0,0299	0,174

Tabell A.11: Delresultat för $COV_{tot|CPT}$ för Norra Sörången.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,003	0,347	1776	0,010	0,102
14	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,002	0,347	1776	0,010	0,102
9	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
5	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
1	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
-3	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
-7	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
-11	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
-15	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
-19	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,001	0,347	1776	0,010	0,102
-23	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,002	0,347	1776	0,010	0,102
-29	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,002	0,347	1776	0,010	0,102
-35	0,0002	0,002	0,010	0,001	0,004	0,347	1776	0,010	0,102

Tabell A.12: Delresultat för $COV_{tot|CRS}$ för Norra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,262	0,347	26	0,041	0,205
14	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,161	0,347	26	0,041	0,204
9	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,100	0,347	26	0,041	0,203
5	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,067	0,347	26	0,040	0,203
1	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,047	0,347	26	0,040	0,203
-3	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,042	0,347	26	0,040	0,203
-7	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,050	0,347	26	0,040	0,203
-11	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,072	0,347	26	0,040	0,203
-15	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,108	0,347	26	0,041	0,203
-19	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,157	0,347	26	0,041	0,204
-23	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,221	0,347	26	0,041	0,204
-29	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,341	0,347	26	0,041	0,205
-35	0,0002	0,003	0,039	0,003	0,493	0,347	26	0,042	0,206

Tabell A.13: Delresultat för $COV_{tot|DSS}$ för Norra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,570	0,347	16	0,0003	0,0160
14	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,319	0,347	16	0,0002	0,0137
9	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,176	0,347	16	0,0002	0,0123
5	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,106	0,347	16	0,0001	0,0115
1	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,074	0,347	16	0,0001	0,0112
-3	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,081	0,347	16	0,0001	0,0112
-7	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,127	0,347	16	0,0001	0,0118
-11	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,212	0,347	16	0,0002	0,0127
-15	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,335	0,347	16	0,0002	0,0139
-19	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,498	0,347	16	0,0002	0,0153
-23	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	0,699	0,347	16	0,0003	0,0170
-29	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	1,073	0,347	16	0,0004	0,0197
-35	0,0002	0,0005	0,0000	0,0003	1,535	0,347	16	0,0005	0,0225

Tabell A.14: Delresultat för $COV_{tot|vb}$ för Norra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,070	0,347	73	0,029	0,172
14	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,042	0,347	73	0,029	0,171
9	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,026	0,347	73	0,029	0,171
5	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,018	0,347	73	0,029	0,171
1	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,014	0,347	73	0,029	0,171
-3	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,015	0,347	73	0,029	0,171
-7	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,020	0,347	73	0,029	0,171
-11	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,029	0,347	73	0,029	0,171
-15	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,043	0,347	73	0,029	0,171
-19	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,061	0,347	73	0,029	0,171
-23	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,084	0,347	73	0,029	0,172
-29	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,126	0,347	73	0,029	0,172
-35	0,0002	0,001	0,028	0,001	0,177	0,347	73	0,029	0,172

Tabell A.15: Delresultat för $COV_{\text{tot|Kon}}$ för Norra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,068	0,347	75	0,030	0,174
14	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,041	0,347	75	0,030	0,174
9	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,026	0,347	75	0,030	0,174
5	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,018	0,347	75	0,030	0,174
1	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,014	0,347	75	0,030	0,174
-3	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,014	0,347	75	0,030	0,174
-7	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,018	0,347	75	0,030	0,174
-11	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,027	0,347	75	0,030	0,174
-15	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,039	0,347	75	0,030	0,174
-19	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,055	0,347	75	0,030	0,174
-23	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,075	0,347	75	0,030	0,174
-29	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,113	0,347	75	0,030	0,175
-35	0,0002	0,004	0,028	0,003	0,160	0,347	75	0,030	0,175

Tabell A.16: Delresultat för $COV_{tot|CPT}$ för Södra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korrr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0175	0,347	320	0,0102	0,101
14	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0111	0,347	320	0,0102	0,101
9	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0072	0,347	320	0,0102	0,101
5	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0050	0,347	320	0,0102	0,101
1	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0036	0,347	320	0,0102	0,101
-3	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0031	0,347	320	0,0102	0,101
-7	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0035	0,347	320	0,0102	0,101
-11	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0047	0,347	320	0,0102	0,101
-15	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0068	0,347	320	0,0102	0,101
-19	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0097	0,347	320	0,0102	0,101
-23	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0134	0,347	320	0,0102	0,101
-29	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0207	0,347	320	0,0102	0,101
-35	0,0002	0,0010	0,010	0,00074	0,0298	0,347	320	0,0102	0,101

Tabell A.17: Delresultat för $COV_{tot|CRS}$ för Södra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korrr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,0011	0,0392	0,00092	1,100	0,347	8	0,0406	0,204
14	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,684	0,347	8	0,0402	0,203
9	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,431	0,347	8	0,0400	0,202
5	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,291	0,347	8	0,0398	0,202
1	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,206	0,347	8	0,0398	0,201
-3	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,175	0,347	8	0,0397	0,201
-7	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,199	0,347	8	0,0398	0,201
-11	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,279	0,347	8	0,0398	0,202
-15	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,413	0,347	8	0,0399	0,202
-19	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,602	0,347	8	0,0401	0,202
-23	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	0,846	0,347	8	0,0403	0,203
-29	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	1,314	0,347	8	0,0408	0,204
-35	0,0002	0,00114	0,0392	0,00092	1,907	0,347	8	0,0413	0,205

Tabell A.18: Delresultat för $COV_{tot|DSS}$ för Södra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	1,100141	0,347	8	0,0002	0,013
14	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,68388	0,347	8	0,0001	0,012
9	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,431327	0,347	8	0,0001	0,010
5	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,291029	0,347	8	0,0001	0,010
1	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,205616	0,347	8	0,0001	0,009
-3	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,175087	0,347	8	0,0001	0,009
-7	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,199442	0,347	8	0,0001	0,009
-11	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,278681	0,347	8	0,0001	0,010
-15	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,412804	0,347	8	0,0001	0,010
-19	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,601811	0,347	8	0,0001	0,011
-23	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	0,845702	0,347	8	0,0002	0,012
-29	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	1,314446	0,347	8	0,0002	0,014
-35	0,0002	0,0003	0,000	0,00010	1,90668	0,347	8	0,0003	0,016

Tabell A.19: Delresultat för $COV_{tot|vb}$ för Södra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,179012	0,347	30	0,0294	0,173
14	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,099001	0,347	30	0,0292	0,172
9	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,056981	0,347	30	0,0292	0,172
5	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,039504	0,347	30	0,0291	0,172
1	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,036372	0,347	30	0,0291	0,172
-3	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,047585	0,347	30	0,0292	0,172
-7	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,073143	0,347	30	0,0292	0,172
-11	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,113048	0,347	30	0,0293	0,172
-15	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,167297	0,347	30	0,0294	0,173
-19	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,235892	0,347	30	0,0295	0,173
-23	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,318832	0,347	30	0,0296	0,173
-29	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,47014	0,347	30	0,0299	0,174
-35	0,0002	0,0019	0,028	0,00166	0,653725	0,347	30	0,0302	0,175

Tabell A.20: Delresultat för $COV_{tot|Kon}$ för Södra Sörängen.

Nivå (m)	COV_{me}^2	$COV_{\xi_{korr}}^2$	COV_{tr}^2	COV_{in}^2	ψ	Γ^2	n	COV_{tot}^2	$COV_{tot}^{\{exp\}}$
20	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,303	0,347	21	0,0292	0,172
14	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,176	0,347	21	0,0291	0,172
9	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,104	0,347	21	0,0290	0,172
5	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,069	0,347	21	0,0290	0,171
1	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,054	0,347	21	0,0290	0,171
-3	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,058	0,347	21	0,0290	0,171
-7	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,082	0,347	21	0,0290	0,171
-11	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,125	0,347	21	0,0290	0,172
-15	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,189	0,347	21	0,0291	0,172
-19	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,272	0,347	21	0,0292	0,172
-23	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,375	0,347	21	0,0293	0,172
-29	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,566	0,347	21	0,0295	0,173
-35	0,0002	0,0014	0,0285	0,0011	0,802	0,347	21	0,0298	0,174

TRITA-ABE-MBT-21583