BIG – Branschsamverkan i grunden

Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

Projekt A2018:18

Osäkerhetsmodeller

för optimal geoteknisk resursanvändning i infrastrukturprojekt

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
KTH
TRAFIKVERKET
STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

BIG – Branschsamverkan i grunden

Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

Rapport BIG projekt A2018:18

Osäkerhetsmodeller

för optimal geoteknisk resursanvändning i infrastrukturprojekt

Framtagen inom ramen för BIG av Mats Svensson

Helsingborg 2022

Rapport publicerad av BIG, Branschsamverkan i grunden
Beställning Web: www.big-geo.se

ISBN 978-91-986926-7-9
Upplaga Digital

Framtagen av KTH i samverkan med Tyréns

Författare Mats Svensson, Pål Hansson, Sara Johansson, Maria Duvaldt, Olof Friberg

Förord

Sedan 2012 har kärnan i projektgruppen på ett strukturerat sätt jobbat för att förbättra informationshanteringen av geotekniskt relaterad undermarksinformation, det vill säga inom teknikdisciplinerna geoteknik, berg, grundvatten och förorenad mark. Utvecklingen har i allt väsentligt gjorts med digitalisering och visualisering i fokus. Det grundläggande arbetet gjordes som ett delprojektet under FoI-paraplyet TRUST – Transparent Underground STructures – 2013-2017. Inom TRUST utvecklades det så kallade GeoBIM-konceptet, med en modern punktmolnsbaserad databas med förmåga att hantera alla typer av geotekniskt relaterad undermarksinformation som kärna, www.geobim.se.

Med den ordning och reda på undermarksdata som GeoBIM-konceptet med tillhörande effektiva arbetsflöde möjliggjorde blev det möjligt att betydligt enklare än tidigare producera och visualisera geomodeller i 3D. En följd av det blev bland flera byggherrar, sunt men en aning förvånande, en skepsis till dessa allt för snygga modeller. Analysen blev att dessa geomodeller i 3D synliggjorde det begränsade undersökningsmaterial som geomodellerna traditionellt baseras på. Hanteringen av analysen blev att geomodellerna i 3D behöver kompletteras med en bedömning av vilka osäkerheter de är behäftade med.

2018 beviljades de medel som har möjliggjort framtagning av kompetens och verktyg för att hantera ovan angivna utmaning avseende geomodellens osäkerheter avseende geometri.

En geomodell omfattar också värden på designparametrar. För att hantera de osäkerheterna har därför i detta FoI-projekts andra del, utveckling av ett verktyg för att med hjälp av multivariat analys-metodik (MVA) på ett objektivt sätt bestämma desamma, gjorts. MVA-verktyget bygger helt och hållet på det arbete som har utförts i ett tidigare doktorsarbete på KTH (Prästings A., 2019).

Projektet har på ett fokuserat sätt genomförts av följande medarbetare på Tyréns Sverige AB - Sara Johansson, Maria Duvaldt, Gabriella Olsson, Pål Hansson, Olof Friberg, Anders Prästings, Peter Alstorp och Mats Svensson.

I referensgrupp har följande personer ingått: Marie von Matern, WSP; Robert Sturk, Skanska Sverige; Per Tengborg, BeFo; Olle Båtelsson, TRV; Daniel Baltrock, PEAB; Lars G Nilsson, NCC; Stefan Larsson, KTH

Sammanfattning

I aktuellt projekt har två olika digitala verktyg för hantering av osäkerheter avseende geomodeller utvecklats. Med geomodeller avses en beskrivning av de geotekniskt relaterade förhållandena under markytan, omfattande teknikdisciplinerna geoteknik, berg, grundvatten och förorenad mark. De två verktygen hanterar geometriska osäkerheter respektive geotekniska designparametrar.

Beräkningen av de geometriska osäkerheterna har fokuserat på beräkning av bergöverytans form, med tillhörande osäkerhetsberäkning. Indata utgörs huvudsakligen av traditionell geoteknisk sonderingsdata, Jord-berg-sondering, och geologiska observationer. Den nyutvecklade beräkningsalgoritmen utnyttjar individuella osäkerhetsbedömningar i varje enskild sondering samt avstånd till närmaste undersökningspunkt. Beräkningsmetodiken bygger på Monte Carlo-simuleringar och interpoleringsmetoden Kriging.

Efter validering av framtagna bergmodeller med tillhörande osäkerheter mot framschaktad och inmätt bergyta i fem olika pågående projekt har träffsäkerheten befunnits vara < 1 m, vilket bedöms vara så bra som man kan förvänta sig med traditionell omfattning på en geoteknisk undersökning i Sverige.

Några särskilt intressanta resultat är att 1) det inte räcker med tätt utförda sonderingar för bestämning av bergytans nivå om varje enskild sondering är svårtolkad, det vill säga om de individuella osäkerheterna är stora, och omvänt 2) är det tydligt att geoteknisk information mellan borrhål, tex med någon geofysisk metod, sänker den totala osäkerheten avseende bedömning av bergets nivå markant.

Delen osäkerheter för geotekniska designparametrar har uteslutande utgjorts av utveckling av ett digitalt gränssnitt, ett så kallat dash board, för att utnyttja den Multivariat analys-metodik (MVA) för geotekniska designparametrar som har tagits fram i ett tidigare doktorsarbete vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm (Prästings A., 2019). Helt enkelt en implementering av världsledande forskning genom att programmera in den kunskapen i ett användbart verktyg för branschens geotekniker.

En basversion av ett väl fungerande och lättanvänt dash board-verktyg har programmerats upp i programmeringsspråket Python för hantering av den geotekniska designparametern skjuvhållfasthet. Verktyget behöver kompletteras med några ytterligare funktioner för att erbjuda önskvärd funktionalitet.

Summary

In this project two different digital tools for handling of uncertainties in geomodels have been developed. The term geomodels would be understood as a description of the geotechnically related underground properties, including the disciplines geotechnics, rock engineering, groundwater and contaminated soill. The two tools taht have been developed handle uncertainties on geometrical properties and geotechnical design properties respectivelly.

The calculation of the geometrical uncertainties has focused on modelling the top of the bedrock, including it's uncertainties. Indata mainly consists of traditional geotechnical sounding data, Soil-rock sounding, and geological observations. The algorithm that has been developed use individual uncertainties assigned to each sounding and the distance to the nearest borehole. The calculationmethodology used is Monte Carlo simulation, and the interpolation method is Kriging.

After validation of the bedrock models, including accompanying uncertainties, in five ongoing infrastructure projects where uncovered and surveyed rock surfaces have been available, the precision of the algorithm has shown to be <1 m. This is a reasonable precision and as low as one could expect in typical Scandinavian geology and with a traditional geotehnical investigation program available.

Some results to highlight is 1) If the the individual uncertainties in each sounding are large it is still not enough with a large number of geotehnical soundings in a small area for defining the bedrock level, and vice versa 2) it is obvious that if geotechnical information between the boreholesis is added, for example geophysics, even if it´s undividual uncertainties are relativelly high, the general uncertainties of the the bedrock model is lowerd significantly.

The part of the project that focus on handling uncertainties on design parameters project solely constitues of developing a didgtal dash board for enabling use of the Multivariat analysis (MVA) methodology for geotehncial design parameters that was developed in a former PhD project at the Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm (Prästings A., 2019). Simply implementing unique research and knowledge by programming this knowledge into a digital user friendly tool to offer to ordinary geotechncial engineers in the industry.

A fundamental version of a well functioning and user friendly dash board for handling the geotechnical design parameter shear strength has been developed using the Python coding system. However, the tool has to be complemented with a few more functions to enable full functionality.

Innehåll

1. INLEDNING 1

1.1 Osäkerheter på Geometrier 2
1.1.1 Avgränsningar 2
1.2 Osäkerheter på Designparametrar 2
1.2.1 Avgränsningar 3
1.3 Organisation 3

2. SYFTE OCH MÅL 4

2.1 Resultatmål 4
2.2 Effektmål 4

3. OSÄKERHETER AVSEENDE GEOMETRIER 5

3.1 Litteraturstudie 5
3.1.1 Osäkerhetskategorier i geologisk modellering och matematiska felkällor 5
3.1.2 Interpolation och geostatistik (matematisk värdering) 6
3.1.3 Osäkerhetsanalyser och -simuleringar (matematisk felpropagering) 7
3.1.4 Visualisering och analys av resultat från osäkerhetssimuleringar 8
3.2 Tester med befintlig programvara (Gempy) 8
3.3 Utveckling av algoritm 10
3.3.1 Motivering av vald interpolationsmetod 10
3.3.2 Osäkerhetssimulering – propagering av osäkerhet i indata till hela modellen 17
3.3.3 Beräkning av total modellosäkerhet 18
3.3.4 Demonstration och analys av osäkerhetsmodellering av tre dataset 18
3.3.4.1 Delområde 1 19
3.3.4.2 Delområde 2 21
3.3.4.3 Delområde 3 23
3.4 Implementering i verktyg 28

4. OSÄKERHETER AVSEENDE DESIGNPARAMETRAR 30

4.1 Litteraturstudie 30
4.2 Utveckling av algoritm 31
4.3 Implementering i verktyg 31
4.4 Resultat 31

5. RESULTAT OCH ANALYS – OSÄKERHETER AVSEENDE GEOMETRIER 32

5.1 Pilotfallen 33
5.1.1 Pilotfall 1-3 - E20 Bälinge – Vårgårda 33
5.1.2 Pilotfall 4 - Varbergstunneln – Södra påslaget 34
5.1.3 Pilotfall 5 - HSE Skellefteå (HSE – Hedensbyn Site East) 35
5.2 Beräkningsförutsättningar 37
5.3 Resultat 37
5.3.1 Pilotfall 1 - E20 Bälinge – Vårgårda – Norra området 38
5.3.2 Pilotfall 2 - E20 Bälinge – Vårgårda – Mellersta området 38
5.3.3 Pilotfall 3 - E20 Bälinge – Vårgårda – Södra området 38
5.3.4 Pilotfall 4 - Varbergstunneln – Södra påslaget 39
5.3.5 Pilotfall 5 – HSE, Skellefteå 39
5.4 Validering mot inmätt bergyta 39
5.4.1 Sammanställning av nyckeltal för feldjup och felvolym 41
5.4.2 Beräkningsresurser 42
5.5 Resultat och analys av beräkningar utförda på hela undersökningsområdet . 42

6. RESULTAT OCH ANALYS - OSÄKERHETER AVSEENDE DESIGNPARAMETRAR 46

7. REKOMMENDERAD ANVÄNDNING AV PROJEKTETS RESULTAT 47

8. DISKUSSION OCH SÄRSKILT INTRESSANTA RESULTAT 48

8.1 Geometrier 48
8.1.1 Betydelsen av osäkerhet i enskilt borrhål 48
8.1.2 Geofysik sänker osäkerheterna markant 48
8.2 Möjligheter med osäkerhetskartor och "osäkerhetsvolymer" 49
8.2.1 Planering av undersökningsprogram 49
8.2.2 Upphandling av entreprenör 49
8.3 Designparametrar 49

9. SLUTSATSER 51

9.1 Osäkerheter avseende geometrier 51
9.2 Osäkerheter avseende designparametrar 51

10. FORTSATT ARBETE 52

10.1 Osäkerheter Geometrier 52
10.2 Osäkerheter Designparametrar 52
10.2.1 Utvidga funktionaliteten 52
10.2.2 Förbättra interaktivitet och utseende 52
10.2.3 Validering av Dashboard-verktyget 52

11. KOMMUNIKATION AV RESULTAT 53

11.1 Branschtidskrifter 53
11.2 Konferenser och branschdagar 53
11.3 Övrigt 53

12. REFERENSER 54

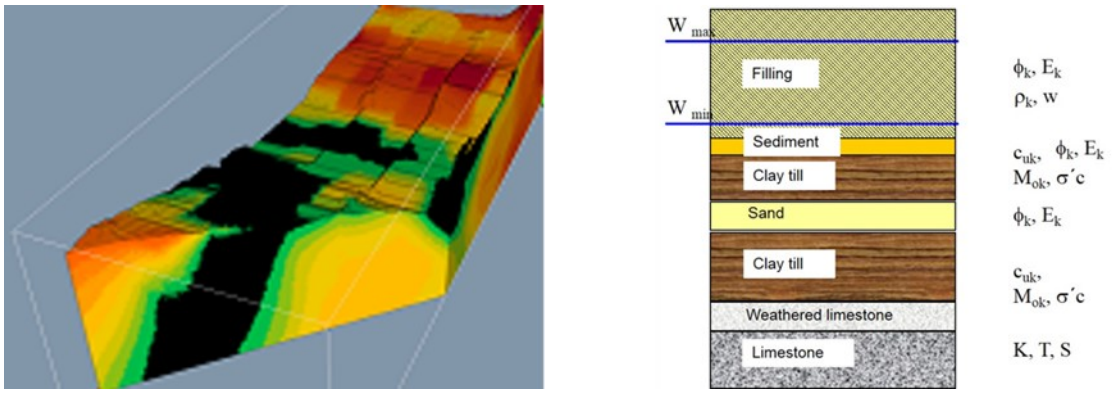
BILAGA A VÄGLEDNING FÖR VERKTYG FÖR BERÄKNING AV OSÄKERHETER AVSEENDE GEOMETRIER 56

BILAGA B VÄGLEDNING FÖR VERKTYG AVSEENDE BERÄKNING AV OSÄKERHETER FÖR GEOTEKNISKA DESIGNVÄRDEN 57

Övergripande beskrivning av programmeringskod 58
Visualisering/demo 59

1. Inledning

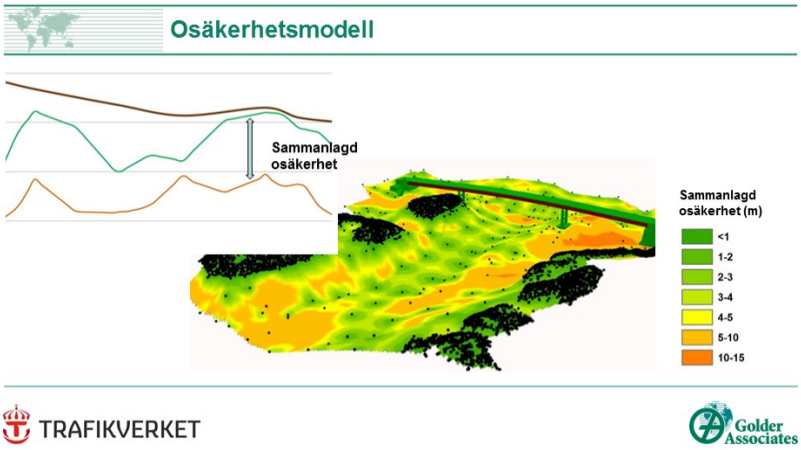
Under utvecklingen och implementeringen av Tyréns så kallade GeoBIM-koncept (www.geobim.se) i flera stora infrastrukturprojekt var det tydligt att det också behöver utvecklas en metodik för att ta fram osäkerhetsmodeller som är kopplade till den presenterade datan i GeoBIM-verktyget. Denna insikt växte fram i takt med att det med GeoBIM-databasen som kärna blev betydligt enklare än tidigare att ta fram geomodeller i 3D som, utöver data från de utförda undersökningarna, omfattar tolkningar av grundvattenytor, sprickzoner, bergytor och föroreningsplymer. Geomodellerna består av de två delarna: 1) volymer/geometri för bergytor, sprickzoner, grundvattenytor och jordlager, och 2) parametrar som beskriver jordens, bergets och grundvattnets egenskaper, se Figur 1.1.



Figur 1.1 Geomodellens två delar - geometri och mekaniska egenskaper. (V) De olika färgerna symboliserar olika geologiska material. (H) De olika geologiska materialen har olika fysikaliska egenskaper.

När de tolkade 3D-volymerna visualiseras tillsammans med de utförda undersökningarna blir det uppenbart hur få undersökningar vi ofta grundar våra 3D-modeller på. Vilka osäkerheter som är förenade med vår geomodell måste vara synliga i modellen för att inte aktörer i ett senare skede av byggprocessen hanterar tex den redovisade bergytan, eller de utvärderade parametrarna, som en strikt sanning.

Med ordning och reda på data och geostatistik går det att ta reda på och ha koll på osäkerheterna. Ett av de få exemplen i stora infrastrukturprojekt där osäkerhetsmodeller har använts i Sverige är från Förbifart Stockholm, se Figur 1.2. Denna osäkerhetsmodell är framtagen med väldigt mycket handpåläggning och utan en tydlig matematisk/statistisk förankring. Osäkerheterna för bergöverytans nivå inom området varierar mellan <1 m och 10–15 m. Icke desto mindre har den varit värdefull i projektet.



Figur 1.2 Osäkerhetsmodell för bergöveryta framtagen i Förbifart Stockholm, delen Kungens kurva (Wenander K., Båtelsson O., 2015).

Med koll på osäkerheterna i våra geotekniska och bergmekaniska modeller och parametrar kan designprocessen samtidigt effektiviseras och vi undviker att över- eller underdimensionera vår konstruktion/anläggning. Tillsammans ger dessa analyser av osäkerheterna en möjlighet att studera hur kostnaderna för de berg/geo-relaterade undersökningarna relaterar till besparingar i byggprocessen.
De viktigaste frågeställningarna som avses hanteras/lösas i detta Fol-projekt är:

- Hur stora är osäkerheterna för tolkade geometriska modeller?
- Hur stora är osäkerheterna för den mekaniska parametern odränerad skjuvhållfasthet?

1.1 Osäkerheter avseende geometrier

Med geometri menas i detta projekt volymen under markytan består av jord, berg och porutrymme. Porutrymmet är i normala fall fyllt med luft eller med vatten. Bergmassan innehåller också spricksystem. Dessa olika enheter har en avgränsning, tex en gräns mellan olika jordlager, en grundvattennivå eller en bergöveryta. Ett geometriskt objekt kan också vara en sprickzon i berget. Beroende på skede i ett byggprojekt är alla dessa avgränsningar eller nivåer olika väl kända, dvs de är alltid behäftade med en viss osäkerhet. Ju längre ett projekt pågår desto mer information tillkommer och osäkerheterna minskar.

1.1.1 Avgränsningar

I nu aktuellt projekt har vi fokuserat på det geometriska objektet bergöveryta. Metodiken är emellertid generell och applicerbar på vilken geotekniskt relaterad geometrisk gränsyta som helst.

1.2 Osäkerheter avseende designparametrar

Det finns ett stort antal designparametrar som används vid olika typer av geotekniska beräkningar, tex odränerad skjuvhållfasthet, kompressionsmodul och friktionsvinkel. Beroende på vilket regelverk som används för olika typer av beräkningar utvärderas dessa parametrar delvis på olika sätt. I Sverige utförs de flesta beräkningar enligt Eurocode (CEN, 2004) och TRV TK Geo (Trafikverket, 2016). Oavsett hur respektive regelverk anger att en parameter ska utvärderas är den alltid behäftad med osäkerheter. Ju mer information som

finns att utnyttja för tolkning av värdet på en parameter, desto lägre blir osäkerheterna (i teorin).
En metodik för att hantera osäkerheterna på ett optimalt sätt är att utnyttja MVA-metodik (Multivariat analys) (Prästings A., 2019), vilket är vad som har gjorts i detta projekt.

1.2.1 Avgränsningar

Detta projekt har fokuserat på designparametern odränerad skjuvhållfasthet.

1.3 Organisation

Projektet har uteslutande drivits av medarbetare från Tyréns. Avstämningsmöten med referensgrupp har hållits vid tre tillfällen, i huvudsak digitalt. Deltagare i projektgrupp och referensgrupp anges i Tabell 1.1.

Tabell 1.1 Projektets organisation

Projektgrupp/Utförare		
Mats Svensson	Tyréns AB	Projektledare
Pål Hansson	Tyréns AB	Strateg
Olof Friberg	Tyréns AB	Expert BIM/GIS
Anders Prästings	Tyréns AB	Expert MVA
Sara Johansson	Tyréns AB	Expert Osäkerhetsmodeller
Maria Duvaldt	Tyréns AB	Expert Geostatistik, programmering
Gabriella Olsson	Tyréns AB	Programmering
Peter Alstorp	Tyréns AB	Expert GIS, databaser
Referensgrupp		
Marie von Matern	WSP	
Robert Sturk	Skanska Sverige AB	
Per Tengborg	BeFo	
Olle Båtelsson	Trafikverket	
Daniel Baltrock	PEAB Grundläggning	
Lars G Nilsson	NCC/LTU	
Stefan Larsson	KTH, Jord- och Bergmekanik	

2. Syfte och mål

Projektets syfte är att till branschen ta fram och erbjuda ett verktyg, med tillhörande Vägledning, som möjliggör för geoteknikern, bergteknikern, arbetsledaren, platschefen eller annan användare att kontinuerligt i alla skeden, inklusive anbudsskede, ha kontroll på de ovan angivna georelaterade osäkerheterna i undermarksprojekt. Kontroll skapar trygghet, kontroll ger möjlighet att ta rätt beslut, kontroll ger möjlighet att optimera resurser, kontroll på osäkerheter skapar helt nya möjligheter att på ett vetenskapligt verifierat sätt dela risk mellan beställare och entreprenör redan i kontraktskrivandet.

2.1 Resultatmål

Projektets mål har varit att:

1. Utveckla ett verktyg för att kunna beräkna osäkerheter för parametrar avsedda för dimensionering och beslut i både projekterings- och byggskede.
2. Utveckla ett verktyg för att kunna beräkna osäkerheter för ytmodeller
3. Utveckla metodik för hur vi på bästa sätt jobbar med framtagna verktyg
4. Beskriva framtagna verktyg i manualliknande rapport
5. Ta fram Vägledning för hur metodik och programverktyg ska användas

2.2 Effektmål

De huvudsakliga nyttorna för slutanvändare och aktörer i branschen är:

1. Optimera georelaterade undersökningsprogram (geoteknik, berg, grundvatten)
2. Ta fram en mer optimerad och volymmässigt säker masshantering
3. Förbättrad möjlighet att fördela risker i avtal
4. Ökad allmän trygghet i projektering och byggande

3. Osäkerheter avseende geometrier

Utvecklingen av metodik och verktyg baseras på en inledande litteraturstudie och användartester av en geologisk osäkerhetsmodell (Gempy) som under projekttiden utvecklades av universitetet i Aachen. Baserat på erfarenheterna från dessa aktiviteter togs en egen beräkningsmodell anpassad för typiska infrastrukturprojekt fram. Beräkningsmodellen har validerats mot framschaktade och inmätta bergytor.

3.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien som redovisas i detta kapitel genomfördes för att fungera som en översiktlig och kortfattad bakgrund till hur osäkerhetsuppskattningar har hanterats inom geologiska/geografiska forskningsfält. I praktiken används i allmänhet borrnings- och sonderingsmetoder i ett antal punkter för uppskattningar av tredimensionella geometrier i markvolymer, t.ex. bergytans nivå. I varje bestämd bergnivåpunkt finns en viss mätosäkerhet som bl.a. beror på själva mätmetoden och tolkningen av sonderingsdata. Mellan mätpunkterna finns oftast inte någon information överhuvudtaget (såvida inte t.ex. geofysiska mätresultat finns). För att ta fram den geologiska modell som ofta efterfrågas i infrastrukturprojekt interpolerar man bergnivån mellan de kända punkterna, antingen för hand eller med hjälp av någon programvara. En central fråga i samband med konstruktionen eller användningen av sådana geologiska modeller är huruvida man på något sätt kan kvantifiera hur säker eller osäker en uppskattning av ett bergnivåvärde (eller något motsvarande värde, t.ex. en föroreningshalt), är i de punkter där ingen mätdata finns. I detta projekt kallas denna typ av osäkerhet för *geometrisk osäkerhet*.

Huvudsyftet med denna litteraturstudie är att ge en grundläggande översikt över interpolation och konstruktion av geologiska modeller, geostatistik och osäkerhetssimuleringar i geotekniskt relaterade tillämpningar. Resultaten som redovisas i följande avsnitt är icke-kompletta men kan användas som en översiktlig bakgrund för att bättre förstå hur olika tillvägagångssätt eller osäkerhetsmått förhåller sig till varandra.

3.1.1 Osäkerhetskategorier i geologisk modellering och matematiska felkällor

I (Bárdossy and Fodor, 2001) ges en översikt över hur olika osäkerhetskategorier inom geologisk modellering kan kategoriseras. Förutom direkta mätosäkerheter (inklusive naturlig variation och samplings-, observations- och mätfel, i detta projekt kallade *statistiska osäkerheter*, se kapitel 4, innefattar kvantifiering av osäkerheter i samband med geologisk modellering även s.k. ***matematiska felkällor.*** Dessa har relevans för det som kallas geometrisk osäkerhet i detta projekt. Till de matematiska felkällorna hör osäkerheter som uppstår i samband med den ***matematiska värderingen*** av geologiska data samt ***propagering av fel*** från en del av modellen till en annan. Den matematiska värderingen av geologiska data har med val av interpolationsmetod att göra och kan ses som den matematiska teorin bakom olika interpolationsalgoritmer. Vanliga källor till en felaktig matematisk värdering är otillräcklig sampling och/eller att en viss matematisk metod används trots att data inte uppfyller de matematiska/statistiska förutsättningarna för detta. (Bárdossy and Fodor, 2001) delar in metoder för matematisk värdering i huvudkategorierna *deterministiska*, *stokastiska* (probabilistiska) och *possibilistiska* metoder. Medan deterministiska metoder grundas i en ”best guess” av parametrar (t.ex. interpolerade bergnivåvärden) utan att ta hänsyn till möjliga felkällor eller osäkerheter utgår stokastiska metoder från att beskriva uppmätta parametrar och deras varians med hjälp av sannolikhetsdistributioner. Dessa statistiska data används sedan för att interpolera fram modellen. Den geologiska tillämpningen av stokastiska metoder begränsas dock enligt

(Bárdossy and Fodor, 2001) av det faktum att många geologiska gränser består av gradvis ändrade egenskaper snarare än de skarpa gränser med exklusiva kategorier som matematiskt antas i sannolikhetsteorin och som används i stokastiska interpolationsmetoder. Vidare krävs det i allmänhet upprepade samplingar i samma punkt för att bekräfta det antagande om slumpmässig natur hos data som stokastiska metoder baseras på.

Possibilistisk teori är ett alternativt sätt för matematisk värdering av data som liksom stokastiska metoder ger ett osäkerhetsmått. I detta fall beskrivs osäkerheter dock inte statistiskt utan istället med hjälp av en kombination av intervaller och fuzzy numbers. Fuzzy numbers beskriver osäkerhet som funktion av möjlighet (possibility) och kan konstrueras med hjälp av geologisk erfarenhet. Vanliga former på fuzzy numbers-funktioner är triangulära eller trapetsoida intervall. En fördel med possibilistiska metoder är därmed att geologiska övergångar kan beskrivas på detta alternativa sätt (Bárdossy and Fodor, 2001). Vidare finns även kombinationer av stokastiska och possibilistiska metoder för att karaktärisera osäkerheter, bland dessa neurala nätverk (Bárdossy and Fodor, 2001).

Den andra kategorin av matematiska felkällor handlar om hur fel propagerar från osäkerheter i enskilda mätvärden till den geologiska modellen som helhet. Två exempel på stokastiska verktyg för att analysera matematiska osäkerheter i form av felpropagering är Bayesiansk statistik och Monte Carlo-analys (Bárdossy and Fodor, 2001). I Monte Carlo-baserade osäkerhetsanalyser dras slumpmässiga värden från stokastiska sannolikhetsfördelningar tillhörande datavärden under upprepade simuleringar. På detta sätt studeras felpropageringen från osäkerheter i enskilda punkter till modellen som helhet, se t.ex. (Goovaerts, 2001). Observera att det stokastiska antagandet i fallet med felpropagering gäller den statistiska osäkerheten i enskilda mätvärden och inte en stokastisk natur mellan mätpunkterna (som är fallet vid interpolering, se nedan).

3.1.2 Interpolation och geostatistik (matematisk värdering)

Oavsett former för statistisk osäkerhetsskattning i enskilda punkter eller eventuella matematiska osäkerhetssimuleringar är valet av interpolationsmetod en central del av geologisk modellering. Klassiska interpolationsmetoder som t.ex. finns tillgängliga för interpolation av ytor i GIS-program kan grupperas enligt deras grundläggande metodiska utgångspunkter och antaganden. (Mitas and Mitasova, 2005) grupperar interpolationsmetoder i lokala, stokastiska (geostatistiska) och elastiska (variational) metoder. Till lokala interpolationsmetoder hör t.ex. Inverse distance weighted (IDW), natural neighbour och triangular irregular network (TIN). Dessa metoder ger deterministiska resultat (Li and Heap, 2014) och baseras på det grundläggande antagandet att varje del av den interpolerade ytan endast påverkas av datapunkter inom ett visst spatiellt avstånd (Mitas and Mitasova, 2005).

Geostatistiska interpolationsmetoder skiljer sig från lokala genom att de bygger på ett antagande om att den interpolerade ytan har en stokastisk (slumpmässig) natur (Mitas and Mitasova, 2005). Kriging är ett exempel på geostatistiska interpolationsmetoder. I kriging bestäms den interpolerade ytan med hjälp av en godtycklig funktion som beskriver en specifik spatiell kovarians mellan olika punkter. Valet av denna funktion, det teoretiska s.k. semivariogrammet, anpassas till ett experimentellt semivariogram som konstrueras från tillgängliga data. Semivariogrammet ger sedan ett samband mellan avstånd och t.ex. bergnivå (Mitas and Mitasova, 2005). Interpolationen sker normalt med least-squares algoritmer (Li and Heap, 2014) och resulterar i spatiella förutsägelser och ett osäkerhetsmått i form av en spatiell varians (Bárdossy and Fodor, 2001).

Den tredje gruppen av interpoleringsmetoder använder sig istället av antagandet om en s.k. elastisk natur hos den interpolerade ytan (till skillnad från den antagna stokastiska naturen i

geostatistiska metoder). Detta tar sig uttryck i förutsättningen att interpolationsfunktionen ska passera genom alla datapunkter samtidigt som den ska vara så mjuk som möjligt. Olika varianter av spline-funktioner tillhör denna grupp (Mitas and Mitasova, 2005).

En relativt ny grupp av spatiella interpoleringsmetoder för geo- eller ekosystemrelaterade variabler utgörs av Machine Learning (ML) algoritmer; dessa är dock fortfarande relativt ovanliga i praktiken (Li and Heap, 2014). Exempel på ML-metoder för spatiell interpolation är support vector machine, random forest, neural network och boosted desicion tree (Li and Heap, 2014). I ett examensarbete kopplat till det aktuella projektet jämförs interpolationsresultat från olika ML-algoritmer och kriging-metoder (Machado, 2019). Vidare jämförs en lång rad av geostatistiska och icke-geostatistiska interpolationsmetoder i en review av (Li and Heap, 2014).

I Gempy används en s.k. implicit potential field modelling approach som anpassats specifikt för geologisk modellering i 3D. Själva interpoleringen baseras på universal cokriging; dock begränsas denna av att storskaliga geologiska strukturer först summerats i ett s.k. potential field, vilket i sin tur konstruerats från datapunkter i form av lägen för geologiska begränsningsytor och orientering hos geologiska strukturer (Calcagno et al., 2008; Wellmann et al., 2010). Denna typ av geologisk modellering är mer avancerad och specialiserad än generella interpolationsmetoder, bl.a. eftersom hänsyn tas till geologiska regler och processer under modelleringen (Wellmann et al., 2010).

3.1.3 Osäkerhetsanalyser och -simuleringar (matematisk felpropagering)

Geostatiska interpolationsmetoder, till vilka kriging hör, resulterar i spatiella förutsägelser och varians inom modellområdet. Utnyttjandet av statistiska värden från kriging-interpolation (variansen) kan berättigas under förutsättningen att man accepterar antagandet om en stokastisk natur hos den interpolerade ytan. I verkligheten är detta antagande sällan givet; enligt (Mitas and Mitasova, 2005) är ytor oftast varken av stokastisk eller elastisk natur. Vidare är variansen från t.ex. kriging-metoder oberoende av datavärden inom modellområdet och istället endast relaterad till den spatiella geometrin hos data. Variansen från kriging reflekterar inte uppskattningsfelet i en viss punkt och detta mått kan därför inte användas som ett enskilt mått på lokal osäkerhet (Li and Heap, 2014 och referenser däri). Vidare tar geostatistiska interpolationsmetoder som kriging inte hänsyn till den statistiska osäkerheten i indata, d.v.s. osäkerhetsdistributionen i varje känd punkt (Bárdossy and Fodor, 2001). Därmed uppskattas inte heller den matematiska osäkerhetskällan som består av propageringsfel från osäkerheter i enskilda punkter till osäkerheter i hela modellen som diskuterades ovan. Som nämnts ovan kan osäkerheter i form av propageringsfel uppskattas med hjälp av stokastiska simuleringar, t.ex. Monte Carlo-simuleringar. I det följande ges några exempel på studier där olika typer av stokastiska simuleringar använts i geologiska eller geografiska osäkerhetsanalyser.

Osäkerhetsanalyser av interpolerade ytor inom geovetenskaper traditionellt utförts med hjälp av non-linear kriging eller stokastiska simuleringsalgoritmer, t.ex. sequential Gaussian simulation (Goovaerts, 2001). I en sequential Gaussian simulation antas den modellerade variabeln vara slumpmässig och möjlig att beskriva med en gaussisk kurva i form av en kumulativ fördelningsfunktion (ccdf). Medelvärden och varians extraheras från ccdf:er passade till data i modellnoder efter att ett flertal olika simuleringar eller modellrealisationer (interpoleringar) utförts, vilket resulterar i en distribution av olika möjliga värden i vardera modellnod. Variansen reflekterar det intervall ett simulerat värde kan hamna inom för att bedömas som korrekt i förhållande till med det verkliga värdet och definieras ofta av kvantiler. I (Goovaerts, 2001) jämförs stokastiska simuleringar med kriging och tillämpar dem på två olika dataset; kadmium-förorenad jord och hydraulisk konduktivitet. Efter jämförelse

med valideringsdata var en huvudsaklig slutsats att kriging ofta ger lika bra resultat som de numeriskt krävande stokastiska simuleringarna förutom i de fall då de samplade mätpunkterna i datasetet är få i förhållande till de interpolerade ytorna. I de senare fallet är en stokastisk simulering lämpligare för att nå fram till den mest sannolika interpolerade modellen (Goovaerts, 2001).

Ett alternativt geostatistisk tillvägagångssätt som t.ex. används för att rekonstruera spatiella och temporära vegetationstrender från glesa observationer över stora landområden är Gaussian Markov Random Fields (GMRF) kombinerat med en Expectation Maximisation (EM)-algoritm (Bolin et al., 2009). GRMF kan ses som ett alternativ till kriging-variogram och tillhör den statistiska undergruppen Bayesian hierarchial models. Modellen beskriver spatiella förhållanden mellan olika punkter med kovariansfunktioner och ger en skalningsparameter som beskriver styrkan på dessa relationer. I (Bolin et al., 2009) ses interpolationsproblemet som ett fall av ”missing data” och tillgängliga data ses som brusiga observationer av ett underliggande fält (den ”sanna” bilden). Modellparametrarna för det underliggande fältet uppskattas med hjälp av 100 simuleringar med EM-algoritmen, vilken kan ses som ett beräkningseffektivare alternativ till Markov Chain Monte Carlo (MCMC)-baserade uppskattningar av medelvärden och varians (Bolin et al., 2009).

3.1.4 Visualisering och analys av resultat från osäkerhetssimuleringar

(Wellman and Regenauer-Lieb, 2012) föreslår informationsentropi som ett lämpligt mått på osäkerheter i geologiska 3D-modeller. Metoden baseras på att en 3D-volym delas in i ett voxelgrid vari alla möjliga geologiska formationer definieras. Sannolikheten för vardera formationen beräknas i alla modellvoxlar (t.ex. genom Monte-Carlo simuleringar som i Gempy). Denna sannolikhetsinformation används sedan som indata till informationsentropi-beräkningarna och resulterar i en sammanvägd bild över modellområdet. Voxelvärdet 0 betyder att formationen är absolut känd i den aktuella voxeln medan maximal informationsentropi erhålles då alla olika alternativ inom modellområdet är lika sannolika (Wellmann and Regenauer-Lieb, 2012). (Wellmann and Regenauer-Lieb, 2012) demonstrerar också att visualisering av informationsentropi kan användas för att tydligt visa effekten av att inkludera nya datapunkter i modellområdet för att minska osäkerheten i en viss del av en geologisk modell.

Analyser av en geologisk modells topologiska osäkerhet har föreslagits som ett komplement till Monte Carlo-baserade bestämningar av sannolikheter eller informationsentropier i olika modellceller (Thiele et al., 2016). Topologi är en egenskap som beskriver förhållanden mellan olika enheter i en geologisk modell, där diskreta bergvolymer representeras av noder som länkas till sina spatiella grannar via s.k. arcs. Via Monte Carlo-simuleringar jämförs och klassificeras olika modelltopologier och hur vanligt förekommande de är genom parametern topologisk variabilitet. Genom att variera en indata-parameter i taget, t.ex. orienteringen hos förkastningar, kan modellens topologiska känslighet för specifika strukturer analyseras (Thiele et al., 2016).

3.2 Tester med befintlig programvara (Gempy)

Som en del av projektet utfördes användartester av ett befintligt geologiskt modelleringsverktyg under utveckling på universitetet i Aachen. Modelleringsverktyget, Gempy, är ett open source program för kvantifiering av osäkerheter i komplexa geologiska modeller i 3D och kan hantera geologiska processer så som avsättningshistoria, förkastningar o.s.v. Metoden baseras på att osäkerheter för alla indatapunkter definieras (antingen stokastiskt eller med hjälp av intervall) varefter Monte Carlo-simuleringar används, där slumpmässigt utvalda datavärden inom osäkerhetsintervallet från varje mätpunkt

används som indata till en 3D-interpolering i varje modellrealisation. Efter ett antal simuleringar kan osäkerheten i hela modellområdet (d.v.s. mellan de kända punkterna) beräknas (Wellmann et al., 2010). Resultaten av Gempy-simuleringarna är ett mått på sannolikheten för en viss formation i en viss modellvoxel; om t.ex. tre olika geologiska enheter finns inom det modellerade området resulterar simuleringarna i tre olika sannolikhetsmodeller, en för vardera geologisk enhet.

Interpolationsmetoden som används i Gempy är en s.k. implicit potential field modelling approach som anpassats specifikt för geologisk modellering i 3D. Själva interpoleringen baseras på universal cokriging; dock begränsas denna av att storskaliga geologiska strukturer först summerats i ett s.k. potential field, vilket i sin tur konstruerats från datapunkter i form av lägen för geologiska begränsningsytor och orientering hos geologiska strukturer (Calcagno et al., 2008; Wellmann et al., 2010). Denna typ av geologisk modellering är mer avancerad och specialiserad än generella interpolationsmetoder (inklusive t.ex. geostatistiska interpolationsmetoder som kriging), bl.a. eftersom hänsyn tas till geologiska regler och processer under modelleringen (Wellmann et al., 2010). Även om själva interpoleringen baseras på universal cokriging begränsas de möjliga modellrealisationerna på ytterligare indata. Dessa indata ges i form av orienteringsvektorer (s.k. foliations) som baseras på geologisk kunskap (t.ex. kronologisk avsättning av olika geologiska enheter) och eventuella geologiska observationer (t.ex. strykning, stupning och orientering av sluttande ytor som förkastningar).

Inom detta projekt har en del modelleringar med Gempy utförts på mindre testdataset, till en början då programmet fortfarande var under utveckling, då metoden bedöms vara state-of-the-art inom forskningsfältet. Trots god funktion identifierades några svårigheter/skillnader med att applicera metoden på typiska infrastrukturprojekt istället för på mer storskalig data insamlad i forskningssyfte:

1. De geografiska områdena i olika exempel som modellerats med Gempy är typiskt kvadratiska eller rektangulära med datapunkter relativt jämnt fördelat inom området. I testdatasetet är undersökningspunkterna istället begränsade till en långsmal yta (väg- eller järnvägssträckning) som går diagonalt genom ett geografiskt område begränsat av fyra hörnkoordinater. Gempy-modelleringen blir därför onödigt tung och långsam eftersom modellområdet är mycket större än själva intresseområdet. Tester med att vrida koordinatsystemet för datapunkterna för att begränsa modellområdets storlek har utförts och indikerar förbättrade resultat.

2. Typiska data för industriprojekt är punkter med jord-bergnivåer och det huvudsakliga målet är ofta en realistisk interpolerad yta (och osäkerhetsvariationer för denna yta). Gempy har utvecklats för att möjliggöra modellering av komplexa geologiska strukturer som t.ex. överlappande formationer från olika tidsperioder och förkastningar. Därmed är metoden i många fall onödigt komplex för genomsnittliga infrastrukturprojekt och icke-relevanta men nödvändiga indata-parametrar (s.k. foliations) behöver hanteras för att modelleringen sa fungera.

Testerna med befintlig programvara ledde sammanfattningsvis till insikten att Gempy är en 3D-programvara som kräver tunga beräkningar på dedikerade beräkningsdatorer och är anpassad till komplexa, storskaliga geologiska 3D-miljöer där systematisk indata bör insamlas i forsknings/modelleringssyfte. För att simulera osäkerheten hos geologiska ytor i infrastrukturprojekt är 2D-beräkningar därför bättre lämpade eftersom de kräver betydligt mindre beräkningstid- och kraft och inte kräver (för projektet) onödig indata eller producerar överflödig utdata.

3.3 Utveckling av algoritm

I projektet har en ny beräkningsalgoritm i 2D utvecklats som är anpassad för typiska infrastrukturprojekt men inspirerad av geologisk/geografisk osäkerhetsmodellering i forskningsvärlden. Som indata till programmet krävs tre datafiler:

1. En datafil med alla punkter som definierar nivån för ytan som ska interpoleras och analyseras. Detta kan vara t.ex. Jb-sonderingar, geofysik, berg-i-dagen-observationer eller andra geologiska observationer som kan vara till stöd för interpoleringen (s.k. stödpunkter). I varje punkt görs en geoteknisk tolkning av den mest troliga bergnivån tillsammans med bedömning av djupast respektive ytligast möjliga bergnivå. Dessa bedömningar används sedan för att kvantifiera osäkerhetsdistributionen i bergnivån i varje indatapunkt.
2. En datafil med punkter som definierar markytans nivå (t.ex. data från en DEM).
3. En datafil med parametrar som definierar koordinatsystemet.

Beräkningsmetoden bakom programmet baseras sedan på två huvudsakliga beräkningssteg:

1. Geostatistisk interpolering av punktdata till en geologisk yta (t.ex. en bergyta) med hjälp av kriging (motivation av vald interpolationsmetod redovisas i avsnittet nedan). Den geostatistiska interpoleringen ger ett spatiellt/avståndsberoende osäkerhetmått (varians) som ökar linjärt med avståndet mellan mätpunkterna.
2. Iterativ simulering där bergnivån i alla indatapunkter varieras slumpmässigt inom det definierade osäkerhetsintervallet för varje punkt. 1000 möjliga ytor beräknas under simuleringen och ligger till grund för en beräkning av hur osäkerheten i enskilda datapunkter propagerar till andra delar av den modellerade ytan. Resultaten ger en standardavvikelse i varje modellcell som representerar matematisk propagering av osäkerhet.

Resultaten från dessa två steg vägs sedan ihop till ett totalt osäkerhetsvärde i form av en standardavvikelse i varje modellcell i den interpolerade ytan. Förutom den totala osäkerheten i form av ett standardavvikelsevärde i varje modellcell beräknas även djupast respektive ytligast möjliga yta. Ytorna beräknas genom att addera/subtrahera två standardavvikelser från den ursprungliga interpolerade (”mest sannolika”) ytan i varje modellcell. I de modellceller där avvikelsen på indatapunkterna är större än två sådana standardavvikelser så utvidgas den undre respektive övre ytan. Den ytligaste belägna ytan klipps även av uppåt mot marknivån. Alla ytor klipps dessutom mot varandra, så att den djupast belägna ytan till exempel aldrig ska kunna skära igenom den mest troliga ytan.

En konstant upplösning på resultaten har valts genom användning av gridstorleken 1m x 1m i modellområdet. Alla resultat exporteras till .csv-filer i rätt koordinatsystem.

I följande avsnitt beskrivs de ingående antaganden i osäkerhetsberäkningarna mer detaljerat. Kapitel 3.1.1 beskriver utvärdering och val av interpolationsmetod (beräkningssteg 1) medan kapitel 3.1.2 beskriver osäkerhetsdistributionerna i indatapunkterna och beräkning av total osäkerhet efter osäkerhetssimuleringen (beräkningssteg 2). Vidare redovisas även olika tester som utförts på tre utvalda delområden med testdata för att utvärdera modellens funktion i kapitel3.1.3.

3.3.1 Motivering av vald interpolationsmetod

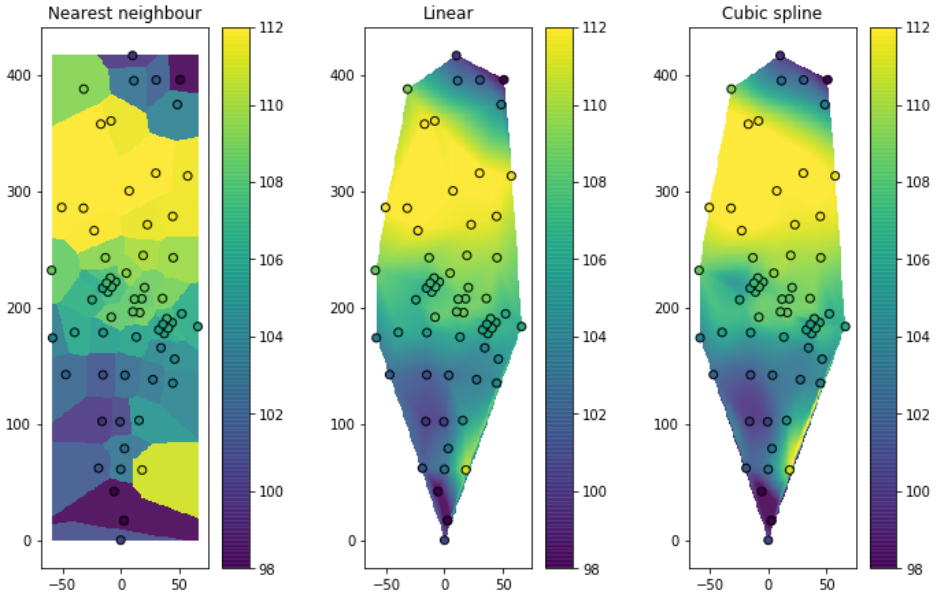
I litteraturstudien (kapitel 3.1) beskrevs olika grupper av interpolationsmetoder. Det finns inget givet ”rätt” eller ”fel” val av interpolationsmetod; dock fungerar olika metoder bättre eller

sämre för olika typer av dataset. Under programutvecklingen testades och utvärderades olika interpolationsmetoder på de testdata som valdes ut. Lokala, elastiska och geostatistiska interpolationsalgoritmer testades, alla i samma Python-miljö. Resultaten redovisas och diskuteras i detta kapitel tillsammans med praktiska beskrivningar av vardera interpolationsmetod.

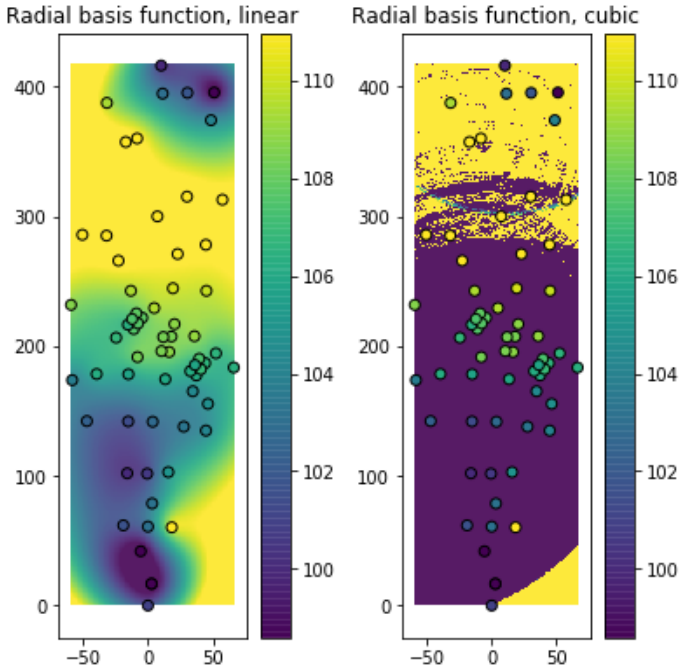
Figur 3.1. visar exempel där samma testdatamängd (delområde 2) interpolerats med några vanliga lokala och elastiska metoder. Det är tydligt i Figur 3.1 att nearest neighbour och i viss mån linjär interpolation (lokala metoder) ger orealistiskt förenklade ytor eftersom områdena mellan mätpunkterna endast beror på värden i de närmst liggande mätpunkterna. Resultaten är därför kraftigt påverkade av hur nära mätpunkterna ligger varandra i olika delar av området, och områdena i ytterkanterna av modellområdet kan inte interpoleras på ett bra sätt. Med den elastiska metoden kubisk spline (Figur 3.1, höger) anpassas en splinefunktion mellan mätpunkterna. Detta ger ett något mer ”naturligt” utseende hos ytorna eftersom metoderna antar att marken varierar mjukt mellan datapunkterna. Resultaten är därför inte lika kantiga som för de lokala metoderna. Dock kan spline-baserade interpolationsmetoder skapa orealistiska värden mellan punkter om de varierar kraftigt i värde på kort spatiellt avstånd samt i utkanterna av modellområdena där inga mätpunkter finns.

Radial basis function (Rbf) interpolation är en mer avancerad form av interpoleringsmetod där ett viktat medelvärde beräknas i en okänd punkt utifrån avstånden till kända datapunkter. Olika typer av funktioner, som varierar med avståndet på olika sätt, kan användas för att beräkna de funktionsvärden som sedan viktas. I det enklaste fallet används en linjär funktion, men många andra typer av funktioner kan också användas, t.ex. en kubisk eller gaussisk funktion (i detta avseende finns vissa likheter med kriginginterpolation). Rbf är en deterministisk interpolationsmetod och enligt Radial Basis Functions ArcGISPro en speciell form av spline-interpolation (alltså en elastisk interpolationsmetod, se kapitel 3.1.2) som lämpar sig bäst för att interpolera fram en mjuk yta från relativt täta datamängder. Med splines kan stora variationer över små avstånd tendera att ge artefakter och det finns risk för orimliga värden i kanterna av modellen där avstånden till närmsta datapunkt är stort.

I Figur 3.2 visas två exempel på Rbf-interpolation av samma testdatamängd som i Figur 3.1 (delområde 2), beräknade med linjära respektive kubiska Rbf-funktioner. Den linjära Rbf-funktionen (där z-nivån varierar radiellt med avståndet från datapunkten) ger ganska mjuka och realistiska resultat, förutom möjligen i kanterna av modellen (övre vänstra och undre högra hörnet). Med kubiska Rbf-funktioner (där z-nivån varierar radiellt med avståndet i kubik från datapunkten) blir däremot den interpolationen uppenbart instabil och ger oanvändbara resultat. Även om linjär Rbf-interpolation möjligtvis kan användas på ett stabilt sätt för att interpolera en yta innebär de ovan nämnda instabiliteterna att problem kan uppstå då tusentals ytor ska interpoleras i osäkerhetssimuleringarna.



Figur 3.1 **Exempel på tre vanliga interpolationsmetoder applicerade till delområde 2 i testdatasetet. Vänster: nearest neighbour. Mitten: Linjär interpolation. Höger: Kubisk spline.**



Figur 3.2 **Exempel på Rbf-interpolation applicerad till delområde 2 i testdatasetet. Vänster: Linjär. Höger: Kubisk.**

Kriging är en grupp geostatistiska interpolationsmetoder som ofta rekommenderas för fåtaliga och oregelbundet belägna datapunkter. Kriging använder sig av ett antagande att datapunkter inom ett visst spatiellt avstånd från varandra är korrelerade. Hur dessa datapunkter förhåller sig till varandra beskrivs med ett variogram, d.v.s. en funktion där den oberoende variabeln är avståndet, se Figur 3.3 nedan. Interpolation med kriging innebär att man väljer och anpassar ett variogram till sina datavärden. Variogrammet styr hur olika indatapunkter viktas för att beräkna ett predikterat värde i en okänd punkt. Dessutom beräknas en varians som är ett mått på hur säkert eller osäkert det predikterade värdet är

(under antagandet att data följer den variogramsmodell man valt). Resultatet är en interpolerad yta med tillhörande spatiell varians. Generellt sett ökar variansen i områden där datapunkterna är glest belägna.

Det finns ett antal vanliga variogram-funktioner som beskriver variansen med avståndet. I Python-modulen pykrige definieras funktionerna enligt ekvationerna i Figur 3.3 nedan:

$$Gaussian\ model \qquad p \cdot \left(1 - e^{-\frac{d^2}{\left(\frac{4r}{7}\right)^2}}\right) + n$$

$$Exponential\ model \qquad p \cdot \left(1 - e^{-\frac{d}{\left(\frac{r}{3}\right)^2}}\right) + n$$

$$Spherical\ model \qquad \begin{cases} p \cdot \left(\frac{3d}{2r} - \frac{d^3}{2r^3}\right) + n & d \le r \\ p + n & d > r \end{cases}$$

$$Linear\ model \qquad s \cdot d + n$$

$$Power\ model \qquad s \cdot d^e + n$$

$d = distance$

$r = range$

$p = partial\ sill\ (=\ sill - nugget)$

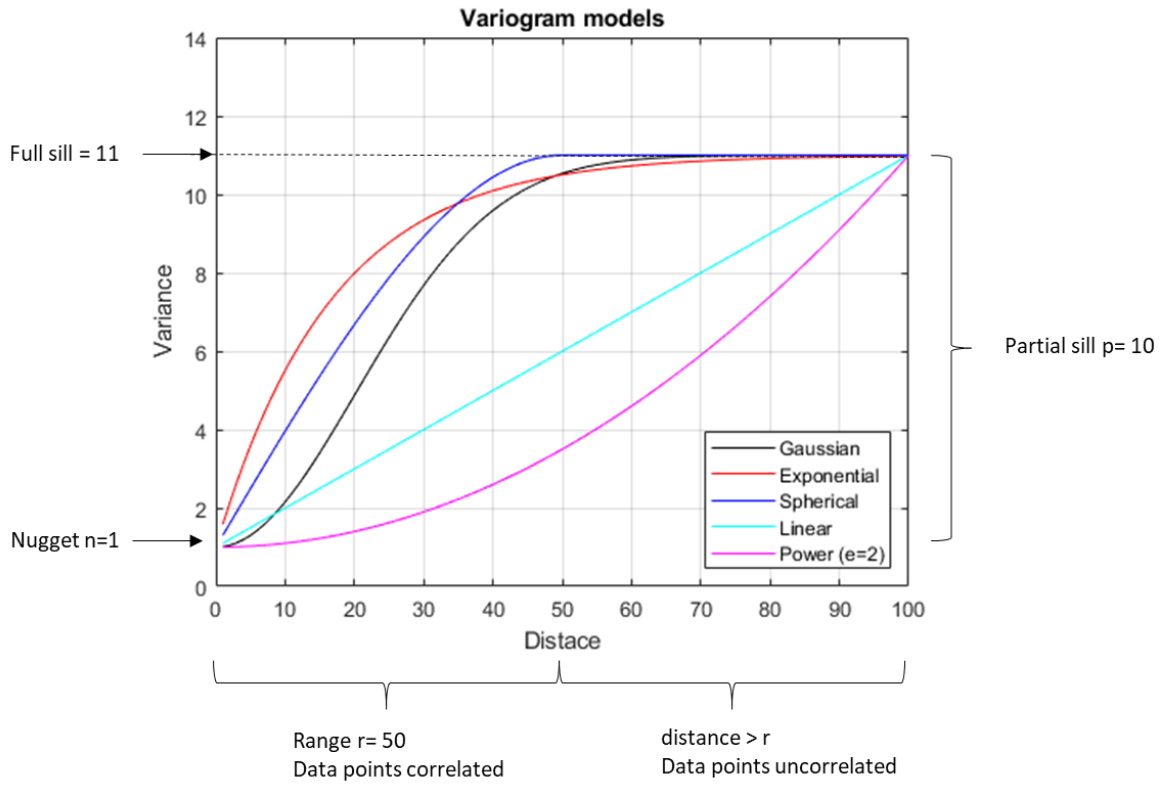
$n = nugget$

$s = scaling\ factor\ or\ slope$

$e = exponent\ for\ power\ model\ (value\ between\ 0 - 2)$

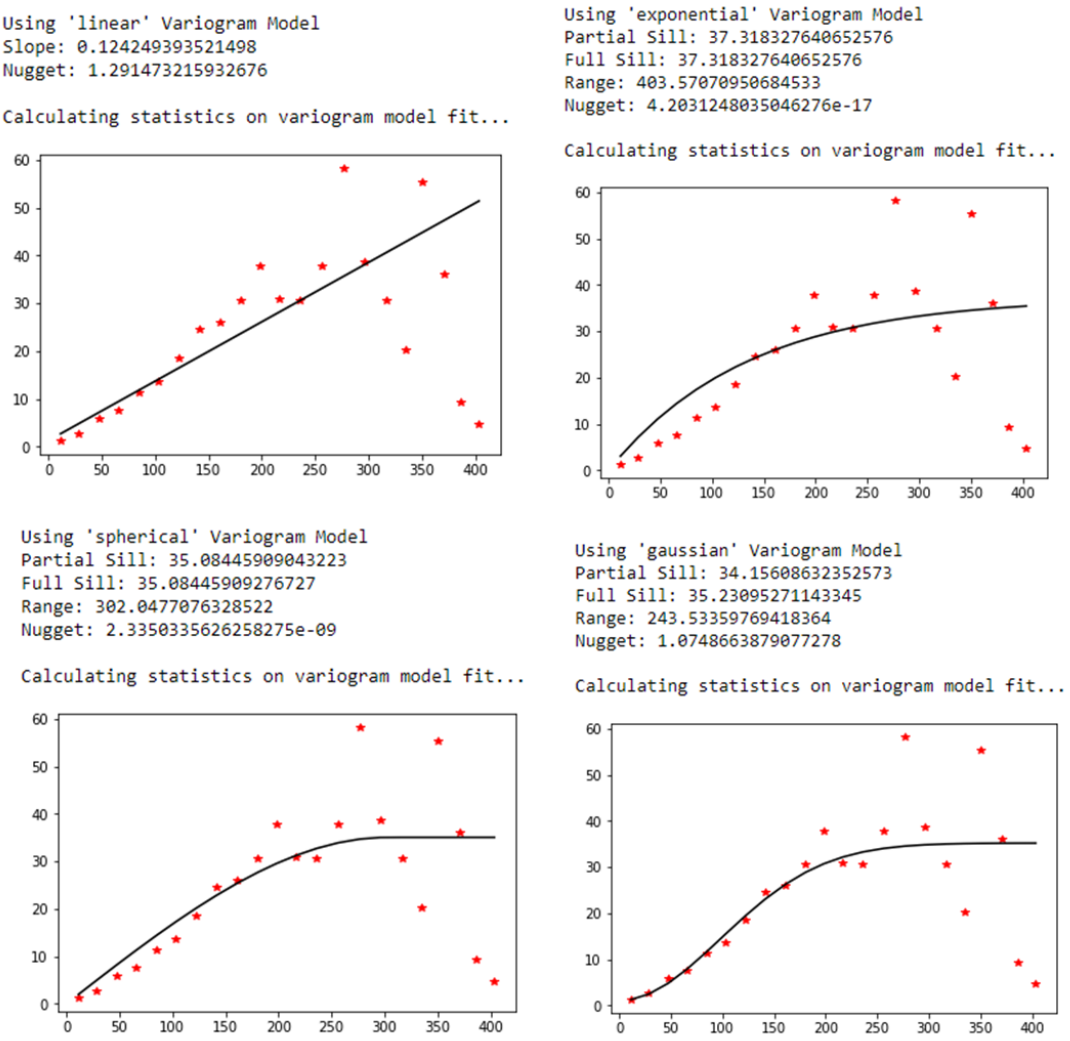
Figur 3.3 Funktioner som används i Python-modulen PyKrige (PyKrige documentation).

Samma funktioner är uppritade i Figur 3.4 för att underlätta en visuell jämförelse mellan dem. Det framgår även i figuren hur dessa parametrar påverkar utseendet på variogrammen. För variogrammen gaussian, exponential och spherical är parametrarna p=10, r=50 och n=1 i Figur 3.4. Med dessa tre variogram antar man att datapunkter som ligger på ett inbördes avstånd som är större än r är oberoende av varandra. I Figur 3.4 visas också exempel på de båda enklare variogrammen linear och power, och det är tydligt i figuren att man genom att välja någon av dessa modeller antar att alla datavärden är beroende av varandra inom modellområdet, oavsett inbördes avstånd. Detta eftersom linear och power variogram aldrig når en konstant nivå (som definieras av parametern full sill i gaussian, exponential och spherical).

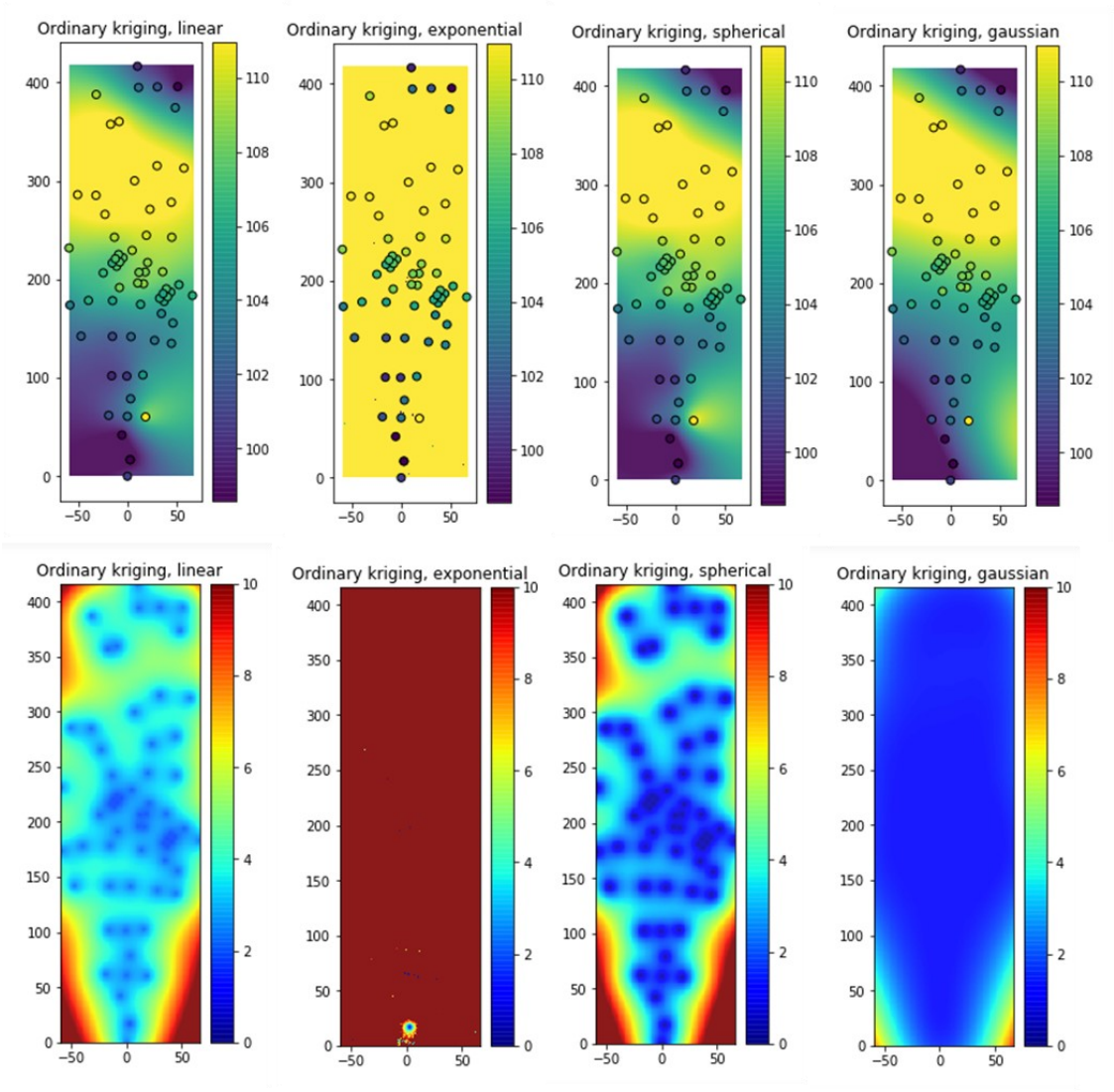


Figur 3.4 **Visualisering av olika typer av kriging-variogram och de parametrar som styr dem.**

Valet och passningen av ett variogram till datavärden är därför ett viktigt steg för att få en högkvalitativ interpolerad yta med rimliga variansvärden. I Figur 3.5 visas ett exempel där olika typer av variogram har anpassats till testdata från delområde 2 i PyKrige (automatiska parametrar). I detta fall är det tydligt att ett gaussiskt variogram passar data bäst. Figur 3.5 visar resulterande interpolerade ytor (övre raden) och varianser (nedre raden). Linear kriging ger en relativt rimlig interpolerad yta; dock kan man se att den interpolerade ytan inte alltid passerar exakt genom datavärdena (se t.ex. den nedersta datapunkten runt y~50 med en z-nivå över 110m). Exponential kriging fungerar inte alls och överskattar konsekvent z-nivån inom modellområdet. Spherical kriging ger en interpolerad yta som i många aspekter liknar den yta som fås med linear kriging. Dock verkar ovan nämnda punkt passas bättre till data i detta fall. Även gaussian kriging ger en likartad interpolerad yta, men i detta fall passar ytan individuella datapunkters värden sämre än linear och spherical kriging. Detta trots att ett gaussiskt variogram passar data bäst, se Figur 3.5.



Figur 3.5 Exempel på olika typer av automatiskt anpassade variogram till data från delområde 2.



Figur 3.6 Interpolerade ytor (övre raden) och varianser (nedre raden) för delområde 2 med de olika variogrammen i Figur 3.5.

Skillnaderna mellan resultaten i Figur 3.6 beror i huvudsak på hur olika datapunkter viktas i interpolationen, vilket i sin tur beror på hur variogramsfunktionen ser ut. Vidare ger olika variogramparametrar också skilda resultat, framförallt i storleksordningen på variansen. T.ex. ger ett högt värde på parametern nugget en generellt högre varians i hela modellområdet. Även om varians är ett direkt statistiskt mått (standardavvikelsen i kvadrat) så är detta mått, teoretiskt sett, bara applicerbart om indata är normalfördelad och variogramsfunktionen passar indata perfekt. Med få punkter i modellområdet finns det alltså en osäkerhet även i både antagandet om normalfördelad data och varians-värdets verkliga magnitud.

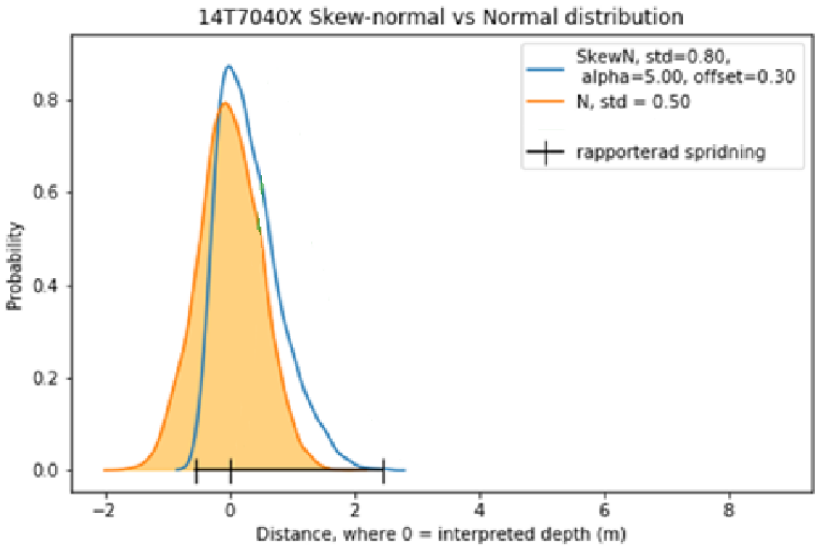
Den sammanvägda bedömningen är därför att en relativt enkel form av variogramsfunktion är att föredra för osäkerhetsmodelleringen i olika infrastrukturprojekt. Det är också fördelaktigt om valet av variogramparametrar har så liten inverkan på resultaten som möjligt, även om detta sker på bekostnad av giltigheten i variansens magnitud.

Baserat på flertal tester föll därför valet på användning av linjär kriging med låsta variogramparametrar (nugget och slope) i den framtagna osäkerhetsmodelleringsalgoritmen. Detta val ger direkt ett enkelt och konstant osäkerhetsmått som endast beror på det linjära avståndet från närmsta mätpunkt. Samtidigt ger interpolationsmetoden stabila och rimliga

resultat med få underliggande antaganden om ytans natur vilket gör den lämpad för iterativa osäkerhetssimuleringar.

3.3.2 Osäkerhetssimulering – propagering av osäkerhet i indata till hela modellen

I modellen antas det att osäkerheterna för varje indatapunkt är skevt normalfördelade och kan kvantifieras med hjälp av en standardavvikelse och en skevhet. Skillnaden mellan normalfördelning och skev normalfördelning syns i Figur 3.7 nedan. Den svarta horisontella linjen motsvarar den inrapporterade borrpunkten, där den mest sannolika bergnivån är satt i x=0 och möjlig avvikelse nedåt respektive uppåt som x <0 och x>0. Vi ser att de inrapporterade avvikelserna inte är centrerade kring borrhålets mittpunkt (x=0). Den orangea fördelningen visar här vad som händer om vi väljer en ”vanlig” normaldistribution och fördelar den kring medelpunkten utefter en viss standardavvikelse. Punkten för vår djupast möjliga bergyta kommer då att hamna ca -2 m under vår mest troliga yta. I verkligheten hade vi ju dock endast rapporterat in en avvikelse nedåt på ca 0,5 m. Den blå kurvan visar en skev normalfördelning med andra parametrar som bättre täcker in den avvikelse våra geotekniker faktiskt rapporterat in vid tolkning av borrpunkten. Den har sitt lägsta värde på ca -0,5 m vilket innebär att vår ”djupast möjliga” bergyta hamnar ca -0,5 m under vår mest troliga yta, i enlighet geoteknikernas tolkning. För de borrpunkter där den inrapporterade osäkerheten är symmetrisk blir den skeva normalfördelning likadan som normalfördelningen.



Figur 3.7 **Sonderingsdata med max- och min-värden (som syns som ett horisontellt streck) och normalfördelningen (orange) jämförs med den skeva normalfördelningen (blå). Den skeva normalfördelningen anses följa borrpunktens angivna osäkerheter bättre.**

I osäkerhetssimuleringarna varieras nivån för varje indatapunkt slumpmässigt inom den fördelning som beskrivits ovan. Detta görs för alla indatapunkter, varefter en ny interpolerad modell tas fram i varje iteration. Efter 1000 iterationer kan standardavvikelsen i varje interpolerad modellcell beräknas (tillsammans med median-, min- och maxvärden i varje cell). På så sätt kvantifierar simuleringen hur osäkerheterna i enskilda indatapunkter propagerar till kringliggande modellområden.

Efter osäkerhetssimuleringarna beräknas en total osäkerhet i varje modellcell som beror både på avståndet från mätpunkter (kriging-variansen) och osäkerheten i enskilda

mätpunkter (standardavvikelsen från simuleringarna). Detta värde beräknas genom att addera kvadratroten ur variansen (=standardavvikelsen) från kriging-interpolationen till standardavvikelsen beräknad genom osäkerhetssimuleringarna. Eftersom storleksordningen på det avståndsberoende osäkerhetsmåttet generellt sett är osäkert (se detaljer om kriging i kapitel 3.1.1ovan) så finns en parameter i osäkerhetsmodellen som kan användas för att vikta de båda osäkerheterna mot varandra. Parametern ”vikt” sätts till ett värde mellan 0 och 1 beroende på hur stor vikt man vill ge den avståndsberoende osäkerheten. Hur man viktar osäkerheterna mot varandra är en ingenjörsmässig bedömning som t.ex. kan bero på vilken geologisk miljö man befinner sig i. I sedimentära miljöer, t.ex., kan man kanske anta att en bergyta inte varierar lika dramatiskt mellan indatapunkterna som i en urbergsmiljö, samtidigt som bedömningen av jord-berg-nivå kan vara svårare i enskilda indatapunkter. Under sådana förhållanden sätter man sammanvägningsparametern ”vikt” till ett lågt värde.

3.3.3 Beräkning av total modellosäkerhet

Efter osäkerhetssimuleringarna beräknas en total osäkerhet i varje modellcell som beror både på avståndet från mätpunkter och osäkerheten i enskilda mätpunkter. Kvadratroten ur variansen från kriging-interpolationen används som ett avståndsberoende osäkerhetsmått som adderas till resultaten från osäkerhetssimuleringarna.

Eftersom storleksordningen på det avståndsberoende osäkerhetsmåttet generellt sett är osäkert (se avsnitt om kriging ovan) så finns en parameter i osäkerhetsmodellen som kan användas för att vikta de båda osäkerheterna mot varandra. Parametern ”vikt” sätts till ett värde mellan 0 och 1 beroende på hur stor vikt man vill ge den avståndsberoende osäkerheten.

Hur man viktar osäkerheterna mot varandra är en ingenjörsmässig bedömning som t.ex. kan bero på vilken geologisk miljö man befinner sig i. I sedimentära miljöer, t.ex., kan man kanske anta att en bergyta inte varierar lika dramatiskt mellan indatapunkterna som i en urbergsmiljö, samtidigt som bedömningen av jord-berg-nivå kan vara svårare i enskilda indatapunkter. Under sådana förhållanden sätter man sammanvägningsparametern ”vikt” till ett lågt värde.

Förutom den totala osäkerheten i form av ett standardavvikelsevärde i varje modellcell beräknas slutligen även djupast respektive ytligast möjliga yta. Ytorna beräknas genom att addera/subtrahera två standardavvikelser från den ursprungliga interpolerade (”mest sannolika”) ytan i varje modellcell. I de modellceller där avvikelsen på indatapunkterna är större än två sådana standardavvikelser så utvidgas den undre respektive övre ytan. Den ytligaste belägna ytan klipps även av uppåt mot marknivån.

Alla ytor klipps dessutom mot varandra, så att den djupast belägna ytan till exempel aldrig ska kunna skära igenom den mest troliga ytan.

Alla resultat exporteras till .csv-filer i rätt koordinatsystem.

3.3.4 Demonstration och analys av osäkerhetsmodellering av tre dataset

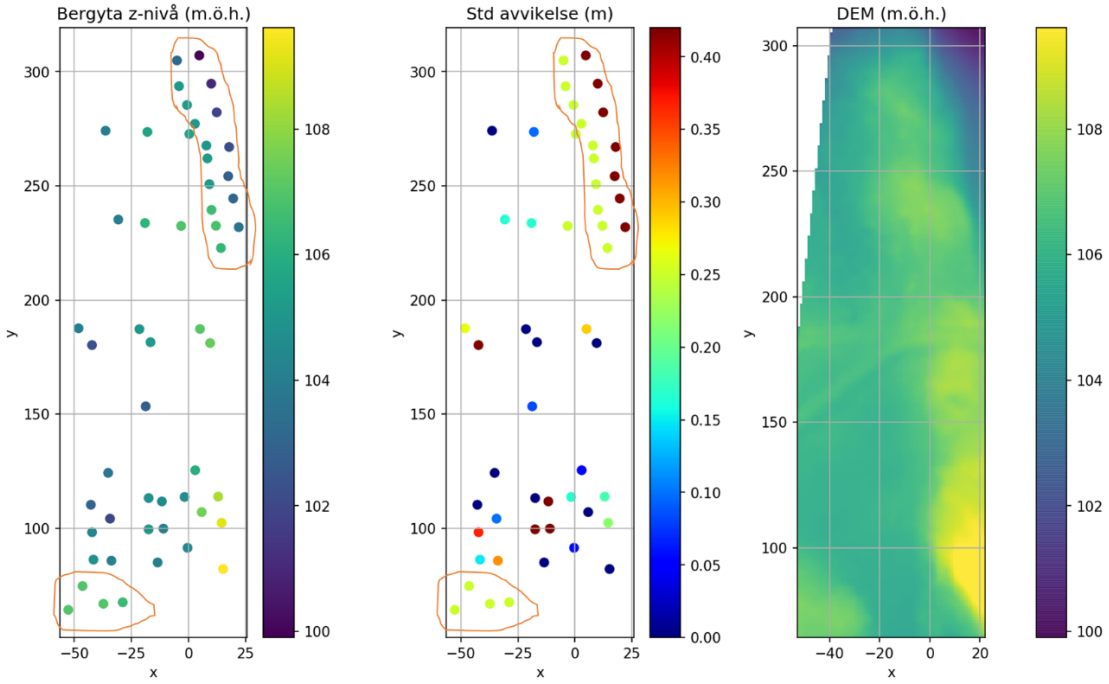
Indata kommer från tre olika delområden längs E20, Bälinge - Vårgårda. I alla exemplen har ett linjärt variogram med parametrarna n=0.01 och s=0.15 använts för kriging-interpolationen. Den totala osäkerheten har viktats med parametern 0.25.

Indatan har ansetts jämnt normalfördelad, där standardavvikelsen beräknas genom att dividera skillnaden mellan den djupaste och ytligaste bergnivåtolkningen med 6, någon skevhetsparameter för normalfördelningen har alltså inte beräknats i dessa fall.

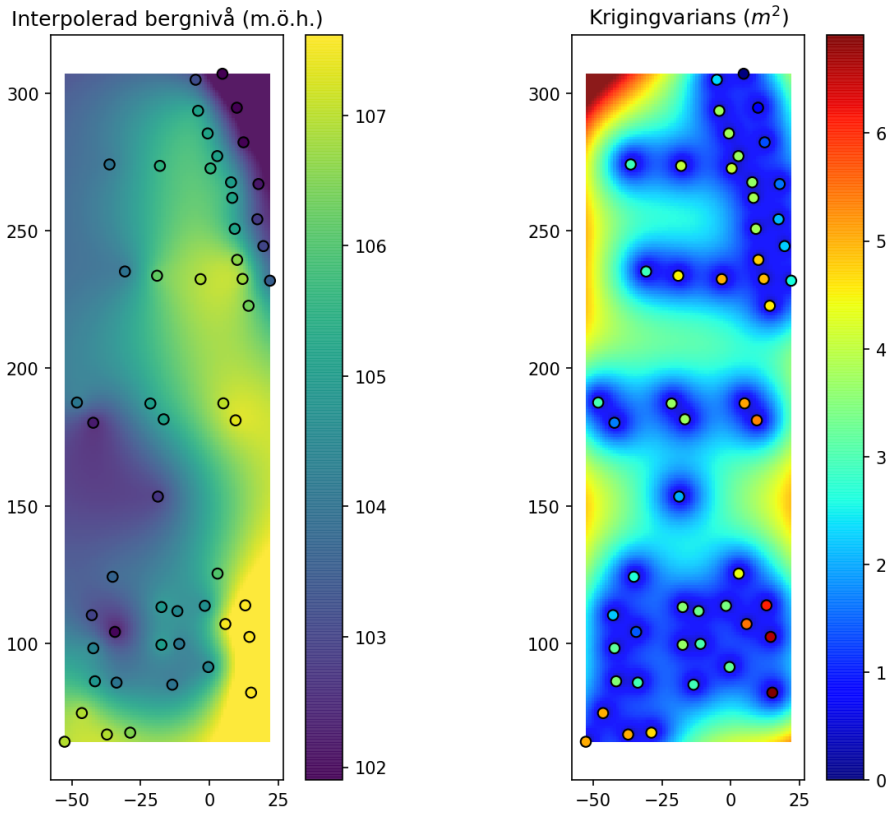
3.3.4.1 Delområde 1

Figur 3.8 visar indata från delområde 1. Datapunkterna består framförallt av Jb-sonderingar, en bergobservationspunkt och ett antal s.k. stödpunkter eller geologiska observationspunkter. Figur 3.9 visar resultaten från kriging-interpolationen. Den interpolerade bergytan (Figur 3.9, vänster) styrs tydligt av de s.k. stödpunkterna i övre högra hörnet så att en känd geologisk struktur fångas i modellen trots avsaknad av undersökningspunkter. Variansen (Figur 3.9, höger) är tydligt beroende på det inbördes avståndet mellan indatapunkterna. Maximal osäkerhet återfinns i modellens övre vänstra hörn där avståndet till närmaste indatapunkt är som störst.

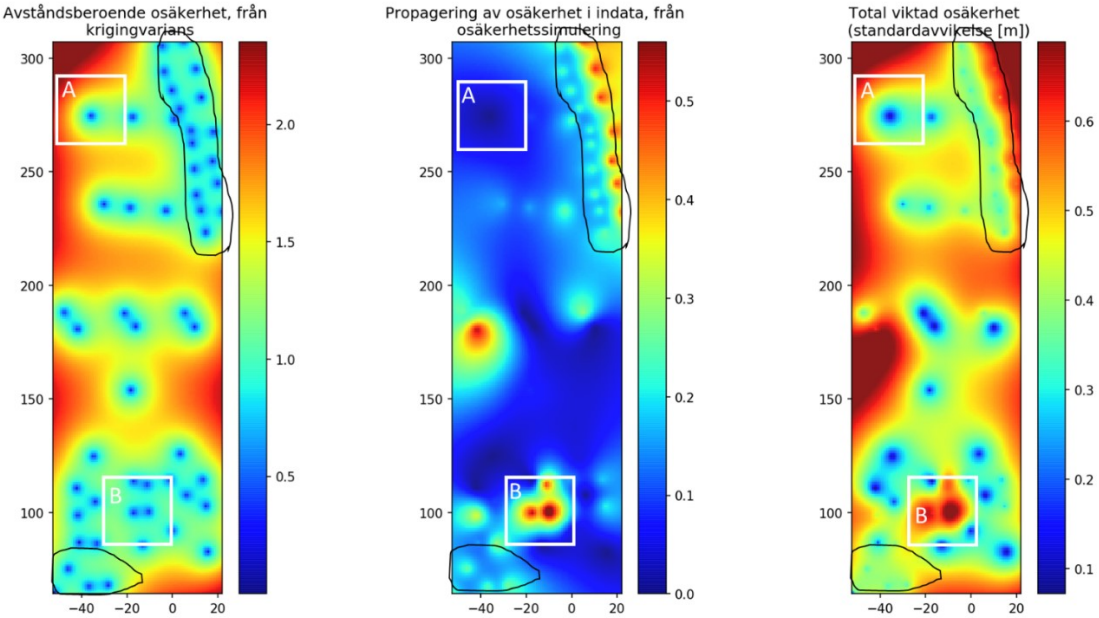
Figur 3.10 visar resultaten av osäkerhetsmodelleringen med avståndsoberoende osäkerhet (från kriging-variansen) till vänster. I mitten visas resultaten av osäkerhetssimuleringen som visar hur osäkerheter i enskilda indatapunkter propagerar till resten av modellområdet (jämför med Figur 3.8, mitten). Till höger i Figur 3.10 visas den totala viktade osäkerheten.



Figur 3.8 **Indata från delområde 1. Vänster: Bergytenivå i meter över havet. De inringade punkterna är s.k. stödpunkter/geologiska observationer som styr interpolationen. Mitten: Ingenjörsmässigt bedömda standardavvikelser för varje bergytenivå. Höger: Marknivå från DEM i meter över havet.**



Figur 3.9 **Kriging-interpolerad ytmodell. Vänster: Interpolerad bergnivå i meter över havet. Höger: Varians (m2), tydligt ökande med avståndet mellan indatapunkterna.**

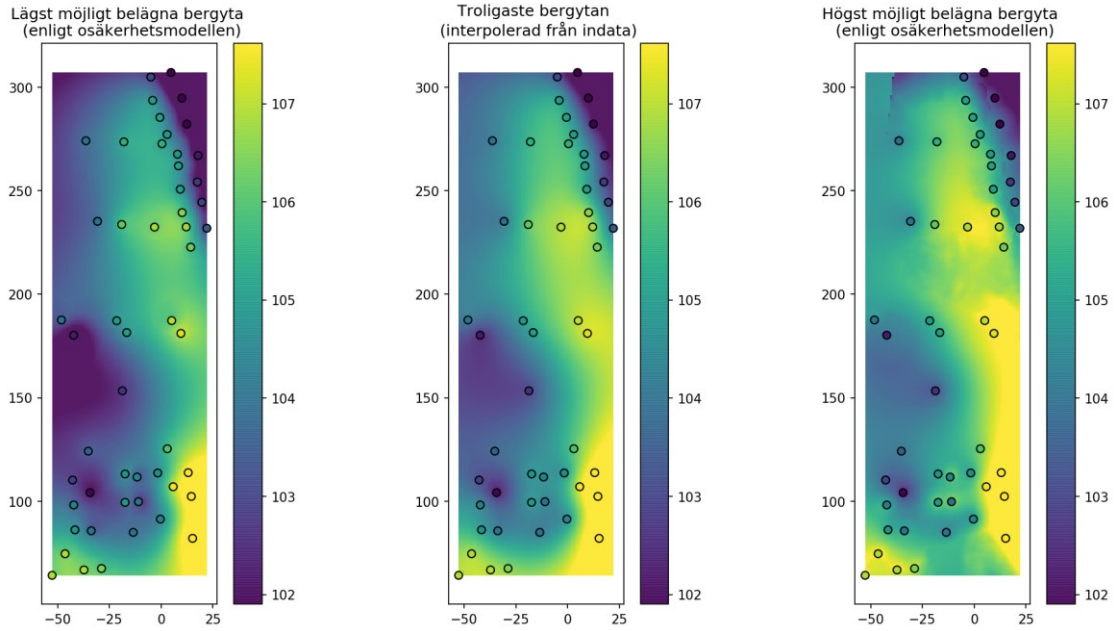


Figur 3.10 **Vänster: Avståndsberoende osäkerhet (från krigingvarians). Mitten: Indataberoende osäkerhet (från simulering). Höger: Total viktad osäkerhet.**

Det är tydligt i Figur 3.10 att de inringade stödpunkterna bidrar till att minska den avståndsberoende osäkerheten (vänster), medan de samtidigt innebär en större

indataberoende osäkerhet (mitten) eftersom den exakta nivån på bergytan är osäker i dessa punkter. Den totala viktade osäkerheten (höger) kan beskrivas som en avvägning mellan dessa två osäkerheter. Ruta A i Figur 3.10 visar ett område där indata bedömts som säker (låg standardavvikelse i Figur 3.8, mitten). Detta innebär att den totala osäkerheten kring punkten (Figur 3.10, höger) blir mindre än i t.ex. närliggande punkt strax till höger. Ruta B visar ett område med stor osäkerhet i tre indata-punkter (jämför med Figur 3.8, mitten). Simuleringarna i Figur 3.10 (mitten) visar att dessa osäkerheter propagerar till närliggande modellceller, och den totala osäkerheten (Figur 3.10, höger) blir stor i ruta B trots att många undersökningspunkter finns här.

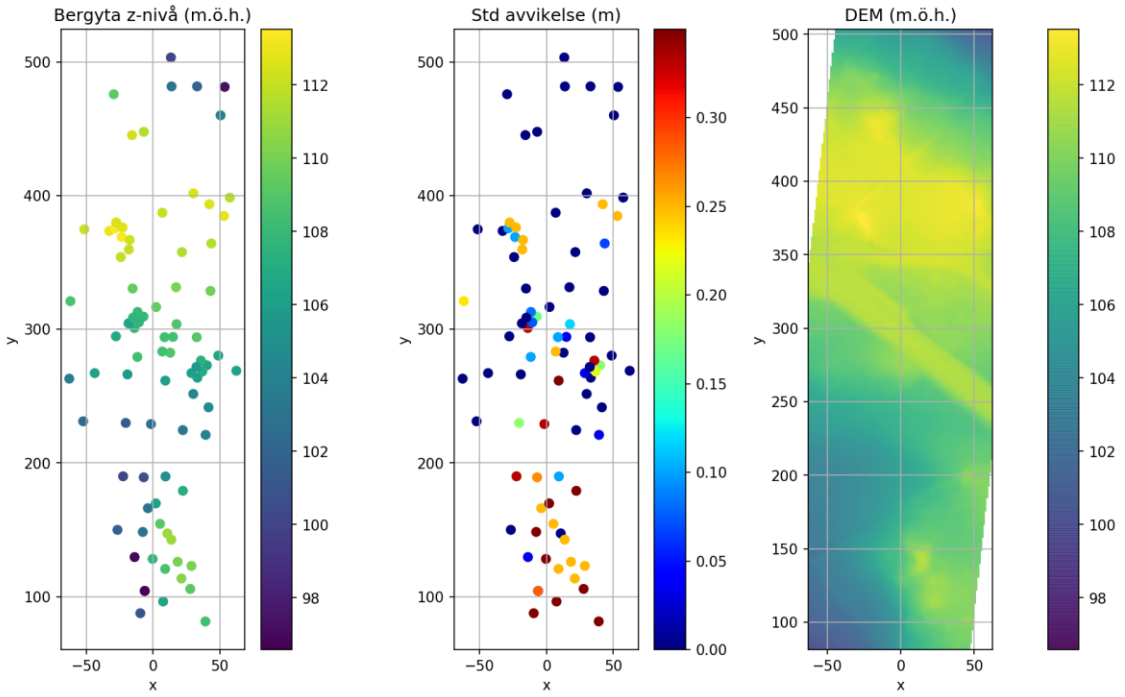
Slutligen visar Figur 3.11 djupast möjliga bergyta (vänster), tillsammans med mest sannolika bergytan (mitten, samma som i Figur 3.9) och ytligast möjliga bergyta (höger). Dessa resultat visualiseras dock tydligast i 3D.



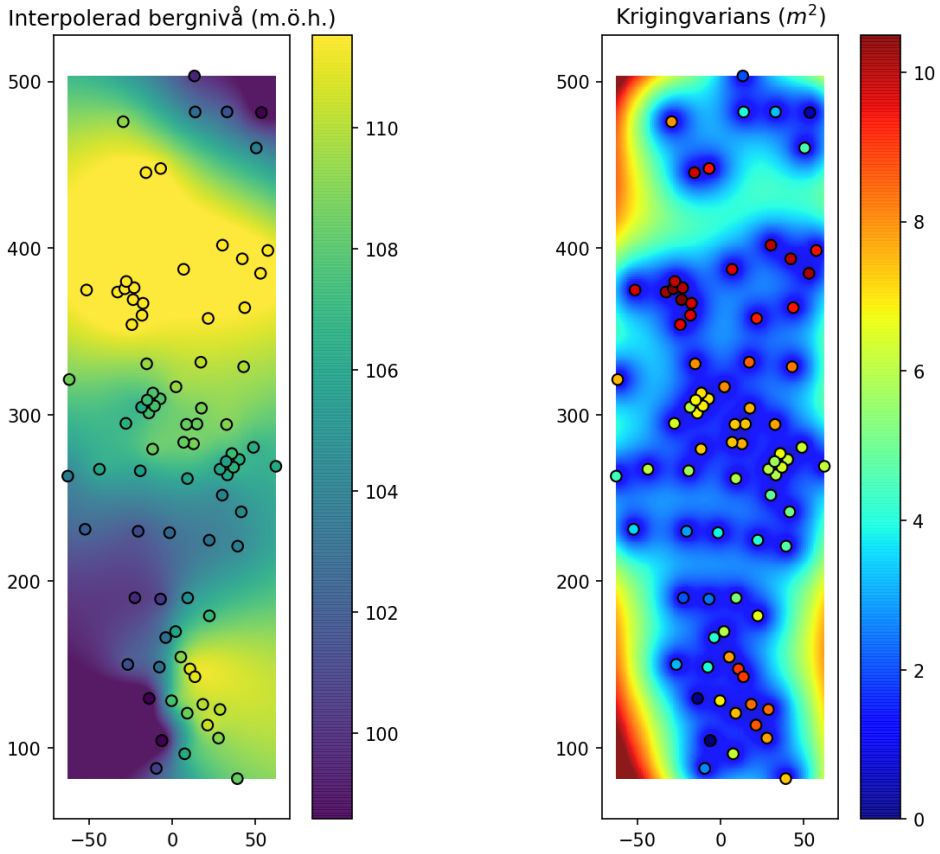
Figur 3.11 **Vänster: Djupast möjliga bergyta enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.10, höger). Mitten: Troligaste bergytan enligt geoteknisk tolkning av indatapunkterna (samma modell som i Figur 3.9). Höger: Ytligaste möjliga bergytan enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.10, höger), klippt mot den inmätta markytenivån (Figur 3.8, höger).**

3.3.4.2 Delområde 2

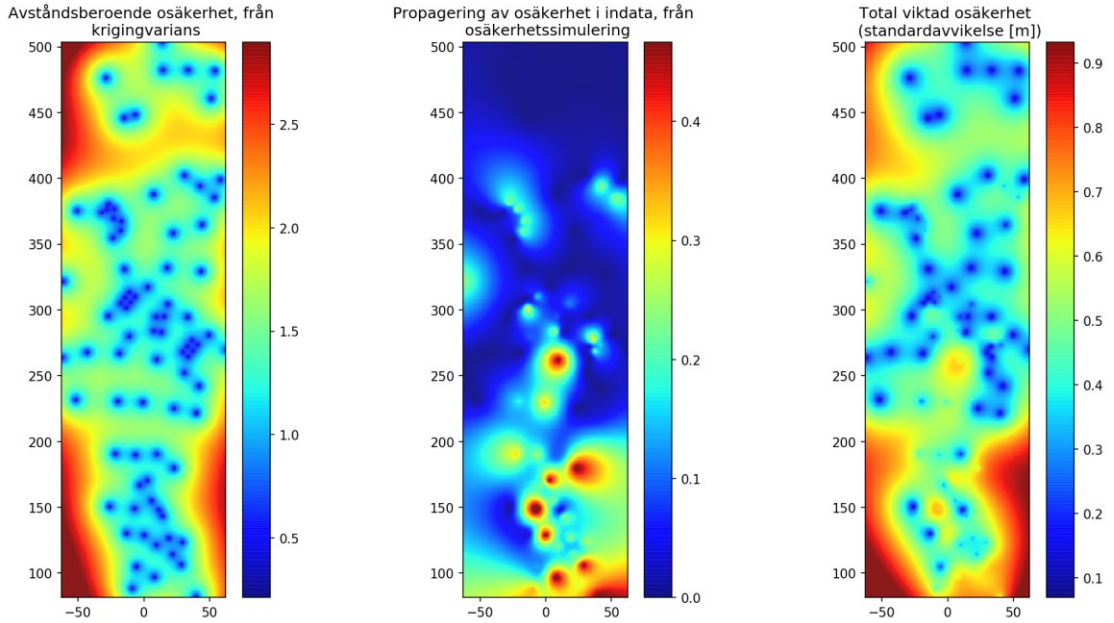
Figur 3.12 visar indata från delområde 2. Datapunkterna består av Jb-sonderingar, nio bergobservationspunkter och ett antal s.k. stödpunkter eller geologiska observationspunkter spridda inom området (alla orangea med standardavvikelsen 0.25 i Figur 3.12). Figur 3.13 visar resultaten från kriging-interpolationen, med interpolerad bergyta till vänster och variansen till höger. Figur 3.14 och Figur 3.15 visar resultaten av osäkerhetsmodelleringen i delområde 2.



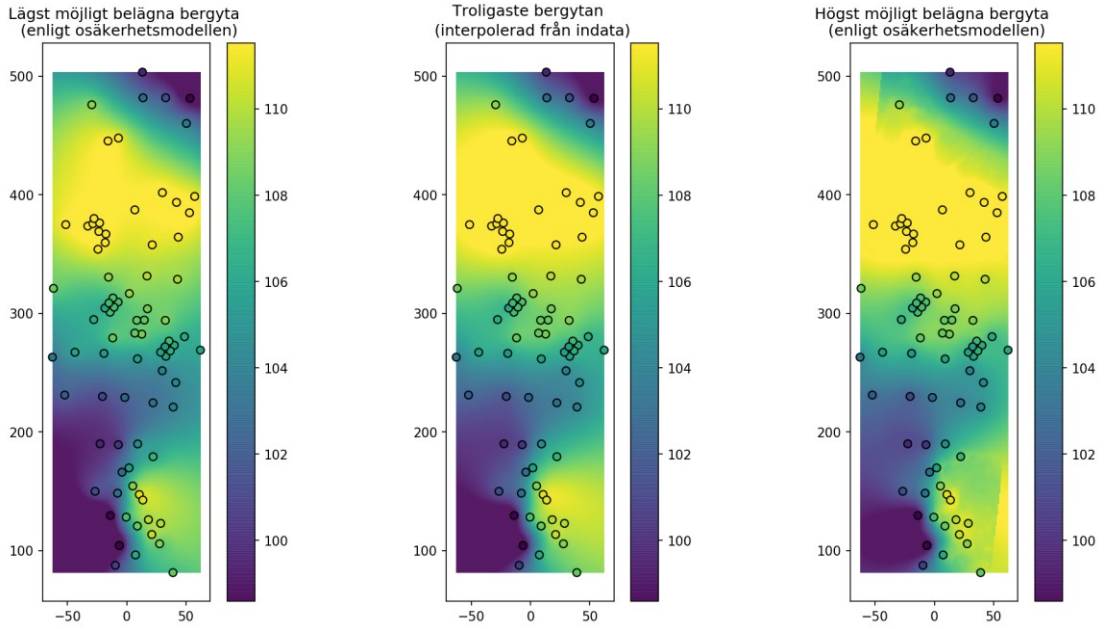
Figur 3.12 Indata från delområde 2. Vänster: Bergytenivå i meter över havet. Mitten: Ingenjörsmässigt bedömda standardavvikelser för varje bergytenivå. Höger: Marknivå från DEM i meter över havet.



Figur 3.13 **Kriging-interpolerad ytmodell. Vänster: Interpolerad bergnivå i meter över havet. Höger: Varians (m²), tydligt ökande med avståndet mellan indatapunkterna.**



Figur 3.14 **Vänster: Avståndsberoende osäkerhet (från krigingvarians). Mitten: Indataberoende osäkerhet (från simulering). Höger: Total viktad osäkerhet.**



Figur 3.15 **Vänster: Djupast möjliga bergyta enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.14, höger). Mitten: Troligaste bergytan enligt geoteknisk tolkning av indatapunkterna (samma modell som i Figur 3.13). Höger: Ytligaste möjliga bergytan enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.14), klippt mot den inmätta markytenivån (Figur 3.12, höger).**

3.3.4.3 Delområde 3

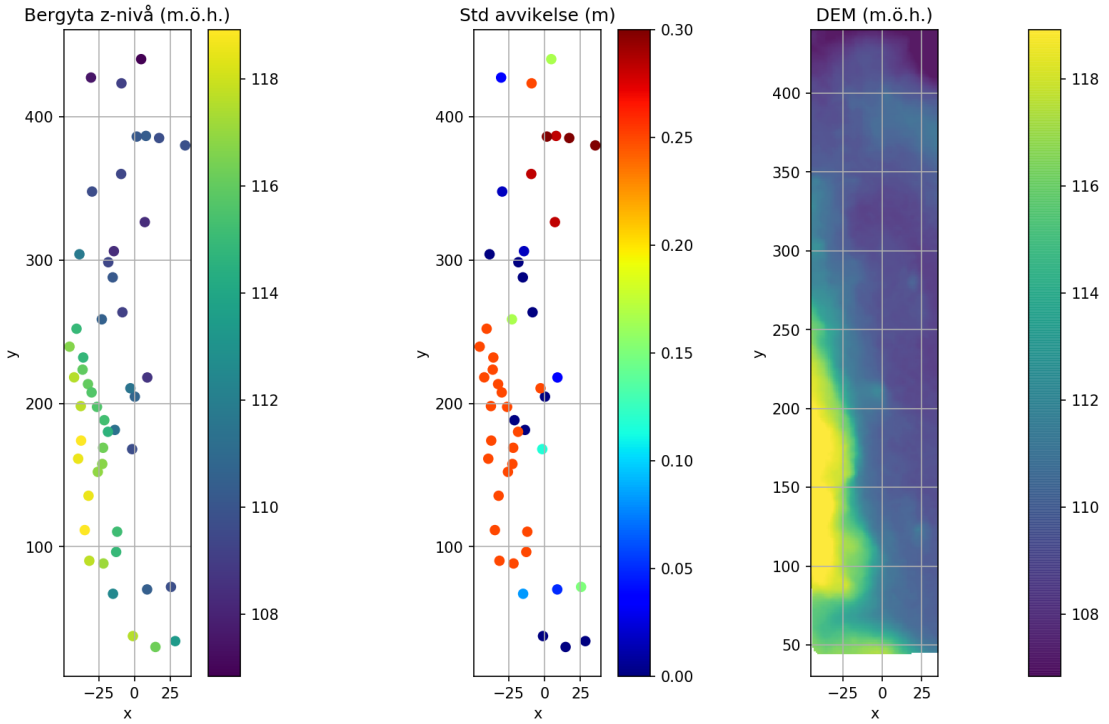
Figur 3.16 visar indata från delområde 3. Datapunkterna består av Jb-sonderingar, sex bergobservationspunkter och ett antal s.k. stödpunkter eller geologiska observationspunkter

spridda inom området (alla ljusröda med standardavvikelsen 0.25 i Figur 3.16). I delområde 3 finns även indata i form av tre seismikprofiler, vilket gör delområde 3 till ett intressant exempel för att visa hur geofysik påverkar osäkerheten i modellområdet. Figur 3.17 visar samma indata som i Figur 3.16 fast med seismikdata inkluderat. Datapunkterna från seismiken består av punktvisa geofysiska tolkningar av bergnivå och tillhörande osäkerhetsbedömningar.

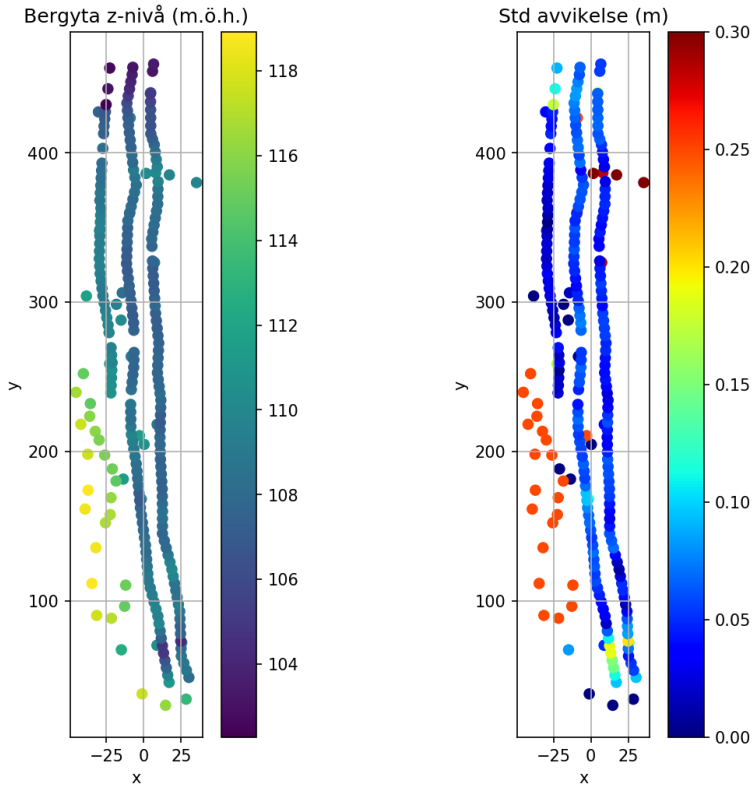
Figur 3.18 och Figur 3.19 visar resultaten från kriging-interpolationen med respektive utan seismikdata inkluderat. Vid en jämförelse är det tydligt att den avståndsberoende osäkerheten minskar kraftigt i stora delar av modellområdet (variansen till höger i Figur 3.18 och Figur 3.19).

Vidare är det intressant att även jämföra resultaten från osäkerhetssimuleringarna och den totala viktade osäkerheten i Figur 3.20 och Figur 3.21. Resultaten från simuleringarna (mitten i Figur 3.20 och Figur 3.21) visar att osäkerheter i enskilda datapunkter inte propagerar lika långt inom modellområdet då seismikdata inkluderas. Seismikdata bidrar i detta fall med att dra ner både den avståndsberoende och den indataberoende osäkerheten, vilket också syns tydligt i den totala viktade osäkerheten (till höger i Figur 3.20 och Figur 3.21).

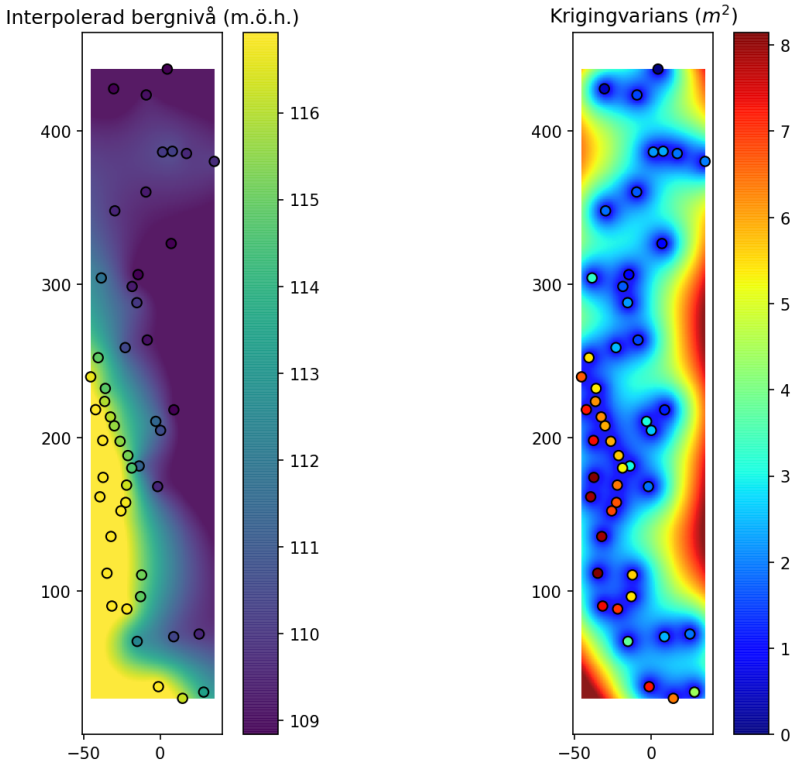
Figur 3.22 och Figur 3.23 visar ytligast och djupast möjliga bergytor enligt osäkerhetsmodelleringarna med respektive utan seismikdata inkluderat.



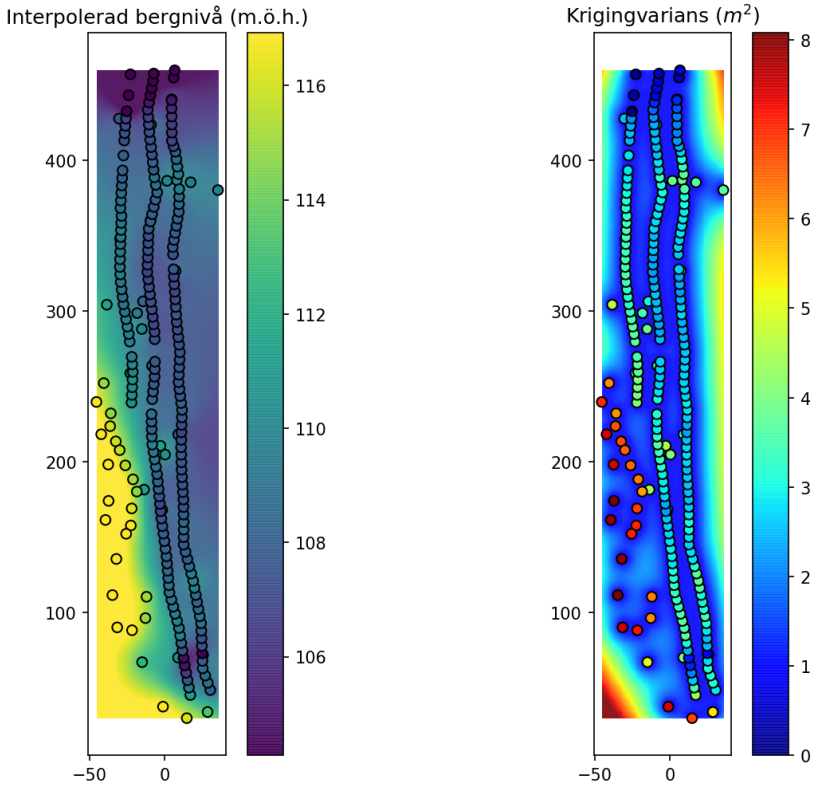
Figur 3.16 **Indata från delområde 3. Vänster: Bergytenivå i meter över havet. Mitten: Ingenjörsmässigt bedömda standardavvikelser för varje bergytenivå. Höger: Marknivå från DEM i meter över havet.**



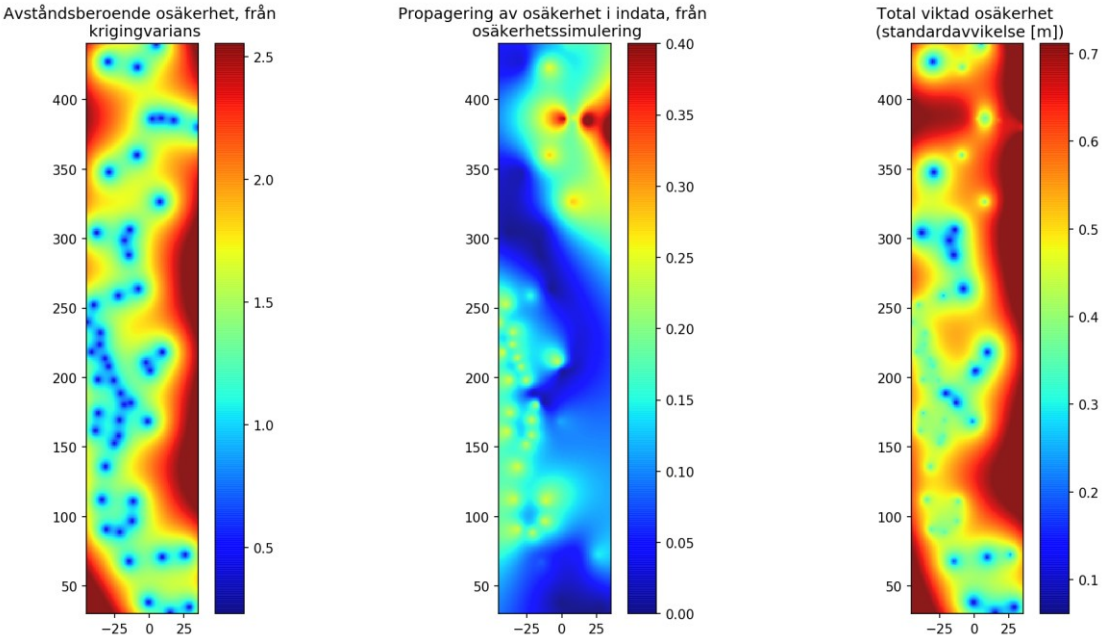
Figur 3.17 **Indata från delområde 3, med data från seismikprofilerna inkluderade. Vänster: Bergytenivå i meter över havet. Höger: Ingenjörsmässigt bedömda standardavvikelser för varje bergytenivå.**



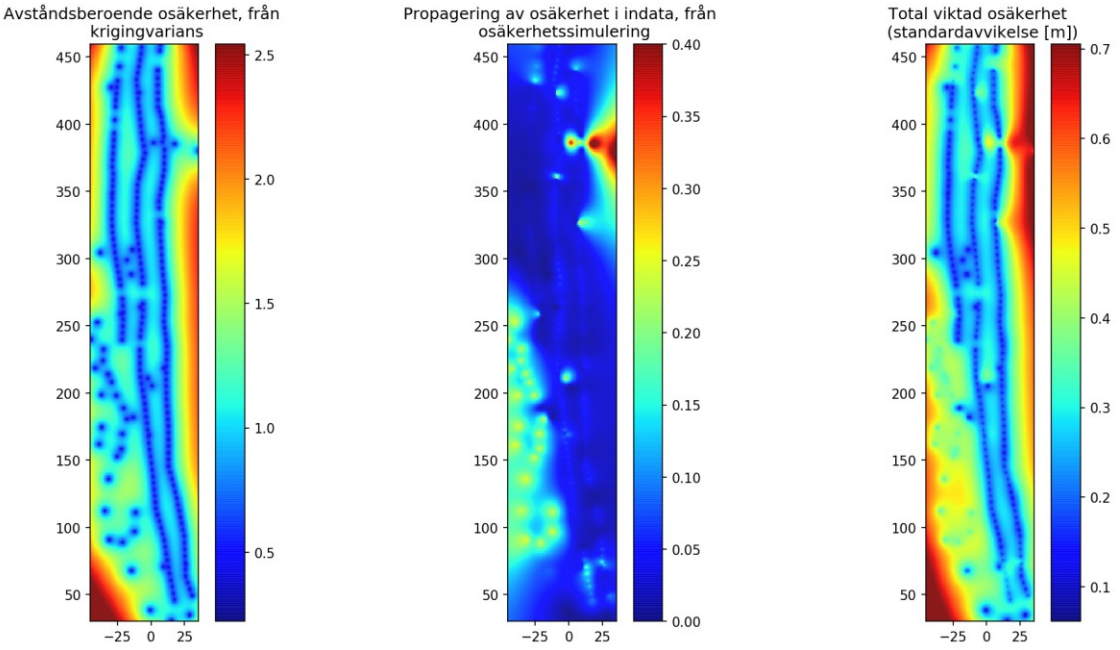
Figur 3.18 **Kriging-interpolerad ytmodell från indata i Figur 3.16. Vänster: Interpolerad bergnivå i meter över havet. Höger: Varians (m2), tydligt ökande med avståndet mellan indatapunkterna.**



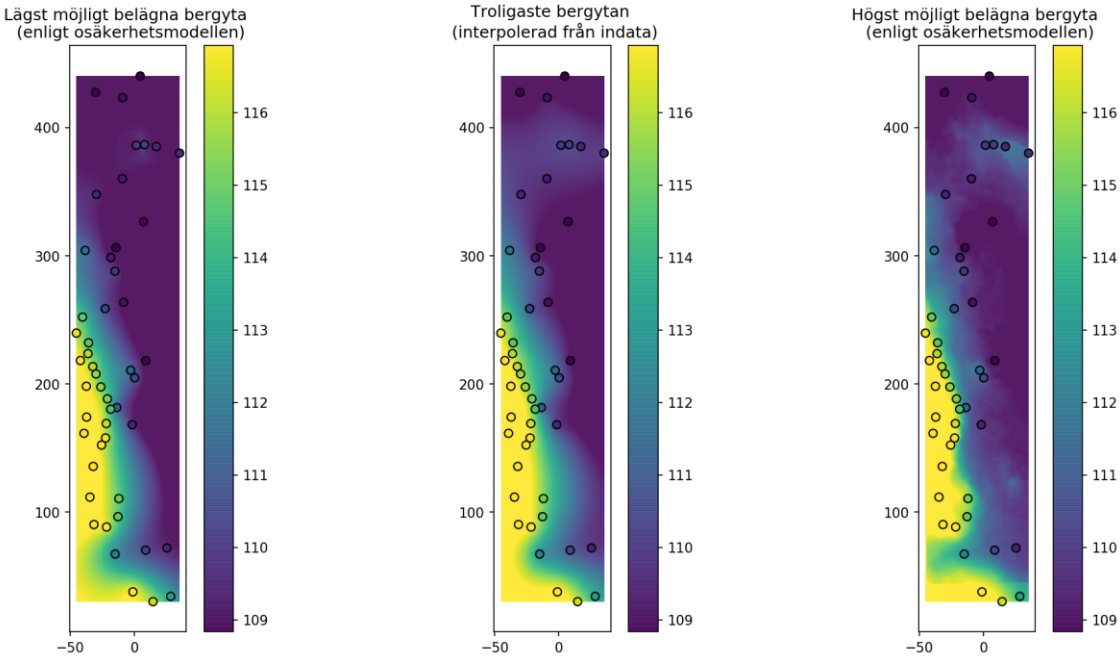
Figur 3.19 **Kriging-interpolerad ytmodell från indata i Figur 3.17. Vänster: Interpolerad bergnivå i meter över havet. Höger: Varians (m2), tydligt ökande med avståndet mellan indatapunkterna.**



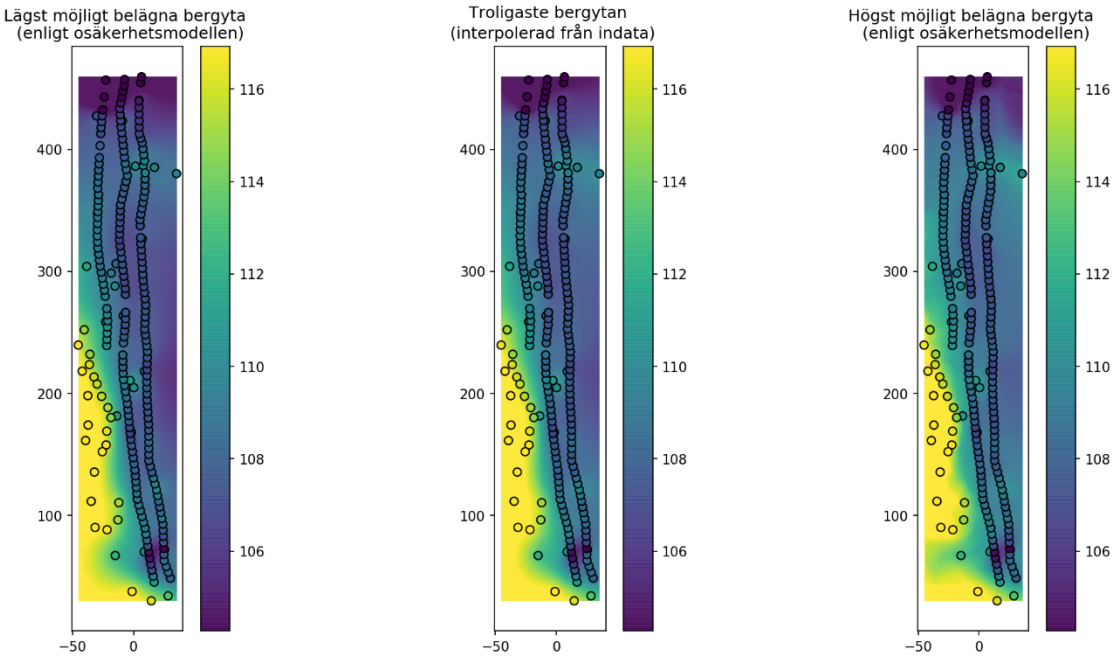
Figur 3.20 **Vänster: Avståndsberoende osäkerhet (från kriging-varians). Mitten: Indataberoende osäkerhet (från simulering). Höger: Total viktad osäkerhet.**



Figur 3.21 **Beräkning med seismikdata. Vänster: Avståndsberoende osäkerhet (från kriging-varians). Mitten: Indataberoende osäkerhet (från simulering). Höger: Total viktad osäkerhet.**



Figur 3.22 **Vänster: Djupast möjliga bergyta enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.20, höger). Mitten: Troligaste bergytan enligt geoteknisk tolkning av indatapunkterna (samma modell som i Figur 3.19). Höger: Ytligaste möjliga bergytan enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.20, höger), klippt mot den inmätta markytenivån (Figur 3.16, höger).**



Figur 3.23 **Beräkning med seismikdata. Vänster: Djupast möjliga bergyta enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.21, höger). Mitten: Troligaste bergytan enligt geoteknisk tolkning av indatapunkterna (samma modell som i Figur 3.19). Höger: Ytligaste möjliga bergytan enligt resultaten från osäkerhetsmodelleringen (Figur 3.21, höger), klippt mot den inmätta markytenivån i Figur 3.16, höger.**

3.4 Implementering i verktyg

Beslutade algoritmer enligt ovan har programmerats i ett Python-script, se exempel i Figur 3.24. Indata i aktuellt projekt utgörs av data från Jb-sonderingar, för vilka individuella osäkerheter anges. I aktuellt projekt har alla indata samlats i en databas som hanteras via verktyget GeoBIM-plattformen (www.geobim.se). I databasen lagras alla data koordinatsatta (X, Y, Z). Koordinaterna krävs för att i programmet kunna beräkna avstånd till aktuell geografisk cell. I GeoBIM-verktyget har också de individuella osäkerheterna på varje individuell Jb-sondering angivits, se Figur 3.25.

```
    alphas[ind], locs[ind], fit_zstds[ind] = stats.skewnorm.fit(made_dist)

# Skapa distributionen
distributions = []
for i in np.arange(len(observation_points_z)):
    with pymc3.Model():
        distribution = pymc3.SkewNormal('skew_distribution_point_%i' %i, mu = locs[i],
                                        sigma = fit_zstds[i], alpha=alphas[i])
        distributions.append(distribution)

#%% Iterationer med osäkerheter

z_with_uncertainty = np.copy(observation_points_z)
all_observation_points_with_uncertainty=np.zeros([iterations,len(observation_points_z)]) #ind är längden på z
all_kriged_uncertainty_surfaces = []

print('Iteration:')
### Loop
for j in range(iterations):
    print(j)
    for k in range(0, len(observation_points_z)):
        sample = distributions[k].random().item()
        z_with_uncertainty[k] = observation_points_z[k] + sample

    all_observation_points_with_uncertainty[j,:] = z_with_uncertainty #sparar z + random-sample.

    kriging_object_uncertainty = OrdinaryKriging(observation_points_x, observation_points_y,
                                                 all_observation_points_with_uncertainty[j,:],
                                                 variogram_model = variogram_type,
                                                 variogram_parameters={'slope':variogram_slope,
                                                                       'nugget':variogram_nugget},
                                                nlags=bins, verbose=False, enable_plotting=False)

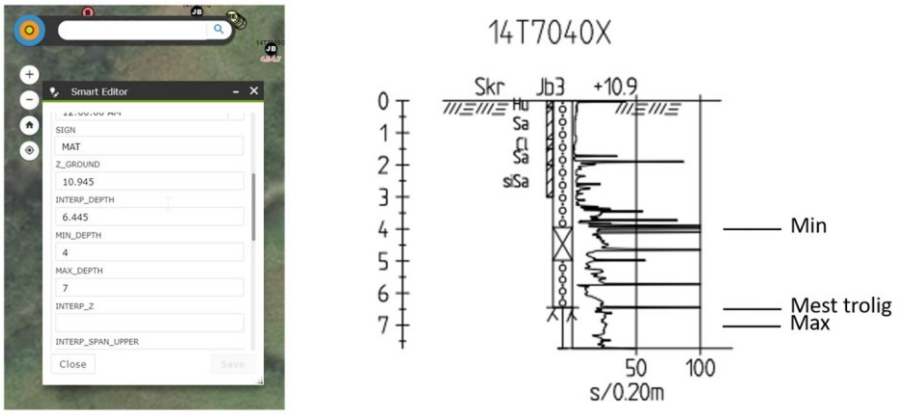
    kriged_grid_uncertainty_masked, variance_kriged_grid_uncertainty_masked = kriging_object_uncertainty.execute('grid',grid_x,grid_y)

    all_kriged_uncertainty_surfaces.append(kriged_grid_uncertainty_masked.data)

    del kriging_object_uncertainty
    del kriged_grid_uncertainty_masked


all_kriged_uncertainty_surfaces = np.asarray(all_kriged_uncertainty_surfaces) # alla interpolerade ytor
all_observation_points_with_uncertainty = np.asarray(all_observation_points_with_uncertainty) # z-värdena för alla iterationer
```

Figur 3.24 Exempel Pythonkod.



Figur 3.25 Individuella osäkerheter har angivits för varje enskild Jb-sondering.

4. Osäkerheter avseende designparametrar

Den här delen av detta FoI-projekt, utveckling av ett verktyg för att hantera osäkerheter avseende geotekniska designparametrar, är en direkt implementering av de slutsatser och algoritmer som togs fram i Anders Prästings doktorsavhandling (Prästings A., 2019).
I korthet har arbetet handlat om att överföra de ekvationer som i form av ett stort antal Excel-blad och egenskrivet program i MatchCAD användes i ovan angivet doktorsarbete till ett gränssnitt som är anpassat och användbart för en i branschen verksam geotekniker.
För fullständighetens skull presenteras ett utdrag ur den omfattande litteraturstudie som gjordes i (Prästings, 2019).

4.1 Litteraturstudie

Den nuvarande strategin för att säkerställa funktionen hos geotekniska konstruktioner behäftade med osäkerheter (d.v.s. hantering av projektrelaterade risker) är att tillämpa partialkoefficienter på de geotekniska parametrarna i olika typer av gränstillstånd. I Eurokod 7 (EN 1997) benämns denna metodik för partialkoefficientsmetoden och syftar till att ange en uppsättning med partialkoefficienter, ämnade för ett stort antal olika typer av geokonstruktioner, som ger en tillräckligt låg sannolikhet för att brott uppstår (Olsson & Stille 1984; Thoft-Christensen & Baker 1982).

I Sverige används en designmetodik (enligt EN 1997) som benämns ”design approach 3” (CEN 2004), där partialkoefficienterna appliceras på geotekniska parametrar och på laster (t. ex. trafiklaster eller konstruktionslaster) för att säkerställa att inget gränstillstånd överskrids. Med det menas att de tekniska kraven på en geokonstruktion är uppfyllda och att sannolikheten för kollaps/brott eller annat oacceptabelt beteende är tillfredställande låg. Om osäkerheterna som är kopplade till bedömningen av värdet på geotekniska parametrar är låga (t. ex. om ett stort antal högkvalitativa undersökningar har utförts), är det rimligt att det bör kunna medföra en reducering av värdet på partialkoefficienten, och vice versa. Men, enligt nuvarande designpraxis (t. ex. EN 1997) är partialkoefficienterna fasta värden, vilket gör det svårt att utnyttja/ta hänsyn till den varierande nivån på osäkerheter vid geoteknisk dimensionering. Det pågår en revidering av EN 1997 vilket i branschen har skapat en diskussion om den nuvarande definitionen av partialkoefficientsmetoden (Bjureland et al. 2017; Orr 2017; Phoon 2017a; Phoon & Ching 2013; Schneider & Schneider 2013; Wang 2017).

Omfattande forskning avseende osäkerheter för geotekniska parametrar har utförts av bl.a. (Vanmarke, 1977), (Lacasse & Nadim, 1996) and (Phoon & Kulhawy, 1999a; 1999b). En tydlig insikt i forskningen är att eftersom högkvalitativa fältundersökningar är kostsamma, resulterar det i att man i byggprojekt ställs inför en avvägning mellan att reducera osäkerheterna genom att utföra omfattande undersökningar eller att potentiellt överdimensionera en konstruktion för att hantera stora osäkerheter.

Det finns således ett incitament för att kunna kombinera den kunskap och erfarenhet som har byggts upp av tidigare fältundersökningar, geotekniska experter och framtagna empiriska samband, och utnyttja det för att kunna påvisa lägre osäkerheter och därmed också möjliggöra en sänkning av de tekniska kraven på geokonstruktioner.

Ett sätt att hantera det på är att utnyttja Bayesiansk metodik, vilket har gjorts av ett stort antal forskare inom geoteknik, t.ex. (Ching et al., 2010), (Cao & Wang, 2014a; 2014b), (Müller et al., 2014; 2016, (Cao et al., 2016), (Wang et al., 2016), (Wang & Zhao, 2017), (Yang et al., 2017) and (Zhang et al., 2018). Genom att tillämpa Bayesiansk metodik vid dimensionering av geokonstruktioner är det möjligt att hantera den inte sällan bristande tillgången på

tillräckligt omfattande och högkvalitativa undersökningsdata och trots allt kunna reducera osäkerheterna på de geotekniska designparametrarna.

4.2 Utveckling av algoritm

Metoden som tagits fram av (Prästings, 2019) går ut på att beräkna ett medelvärde för vald geoteknisk parameter (hädanefter skjuvhållfastheten) genom att kombinera olika undersökningsmetoder, och vikta medelvärdet beroende på variationskoefficienten för respektive metod. Variationskoefficienten är ett procentuellt mått på hur mycket de olika värdena i en mätserie avviker från medelvärdet, standardavvikelsen normaliserat mot medelvärdet.

Orsakerna till fel i ett mätvärde är flera och därför bygger den totala variationskoefficienten på följande delar: mätfel, transformationsfel, naturlig variation och statistisk osäkerhet. I detta arbete antas värden på variationskoefficientsbidragen från mätfelet och transformationsfelet. Metoden bygger på Bayesiansk statistik, vilket innebär att mätvärdesinformation kombineras tillsammans med en första yrkesmässig gissning av mätvärdena och dess variationskoefficient, för att sedan leda fram till en samlad slutsats.
För djupare förståelse av metoden i sin helhet och de ekvationer som är inarbetade i framtaget verktyg, s. k. dash board, hänvisas till (Prästings, 2019).

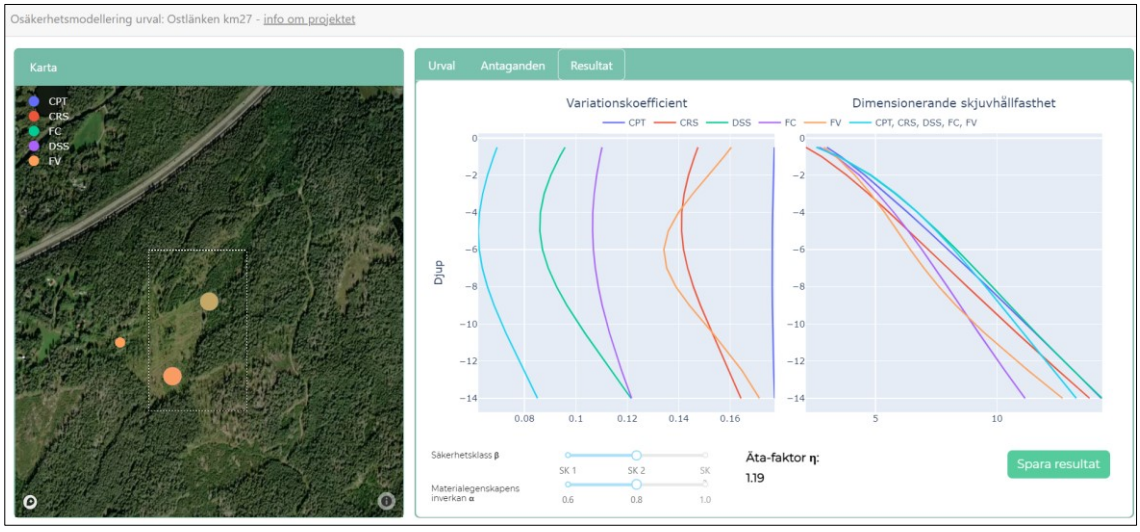
4.3 Implementering i verktyg

För att göra beräkningsmetoden tillgänglig för en i branschen verksam geotekniker togs ett interaktivt dashboard-verktyg fram, där en användare kan göra ett aktivt urval av fält- och labdata i ett projekts informationsdatabas, välja sina antaganden och få fram ett resultat utefter vald säkerhetsklass.

En beskrivning av dashboard-verktyget presenteras i Bilaga B.

4.4 Resultat

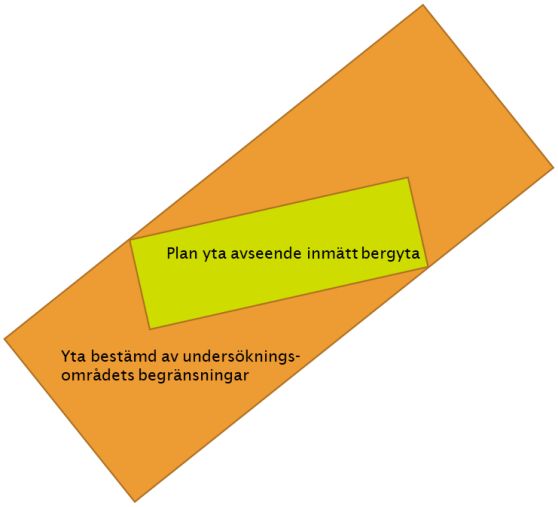
Slutprodukten efter att användaren har genomfört MVA-processen med detta dashboard-verktyg är en objektiv bedömning av dimensionerande värde på den aktuella designparametern, vilken i detta projekt är den odränerade skjuvhållfastheten. Dessutom erhålls ett värde på den sk eta-faktorn, se Figur 4.1.



Figur 4.1. Resultat av den multivariata analysen presenterat i form av variationskoefficient, eta-faktor och dimensionerande skjuvhållfasthet.

5. Resultat och analys – osäkerheter avseende geometrier

Med syftet att kvalitetssäkra den framtagna algoritmen för beräkning av bästa möjliga bergyta har data från fem pilotfall använts. Dessa fem pilotfall beskrivs i avsnitt 5.1
För dessa fem pilotfall finns det tillgång till ”facit” i form av delytor där verklig bergyta har frilagts, skannats och mätts in. De inmätta bergytorna utgör i samtliga fall ett delområde av ett oftast betydligt större område, inom vilket det har utförts geotekniska undersökningar. Data från de undersökningarna har utnyttjats för beräkningar enl ovan. Det större området har använts vid själva beräkningen av bergmodell och tillhörande osäkerheter, medan jämförelsen mellan beräknad bergyta mot skannad bergyta har gjorts för det mindre området, se Figur 5.1.



Figur 5.1 **Orange = undersökningsområde inom vilket geotekniska undersökningar har utförts och inom vilket en bergmodell har beräknats. Grönt = område där frilagd och inskannad bergyta finns tillgänglig. Det mindre området (grönt) har använts för jämförelse mellan inmätt och beräknad bergmodell.**

Ett exempel på hur en frilagd bergyta kan se ut i verkligheten visas i Figur 5.2.



Figur 5.2 **Frilagd bergyta, typisk för det skandinaviska urberget.**

5.1 Pilotfallen

Data för de fem pilotfallen är hämtade från fem olika infrastrukturprojekt, se Figur 5.3 . De fem pilotfallen är:

- Pilotfall 1: E20 Bälinge – Vårgårda, övre området
- Pilotfall 2: E20 Bälinge – Vårgårda, mellersta området
- Pilotfall 3: E20 Bälinge – Vårgårda, nedre området
- Pilotfall 4: Varbergstunneln – Södra påslaget
- Pilotfall 5: HSE Skellefteå (HSE – Hedensbyn Site East)



Figur 5.3 De fem lokaler för vilka framtagen algoritm för beräkning av osäkerheter för geometrier (bergyta) har testats och validerats mot.

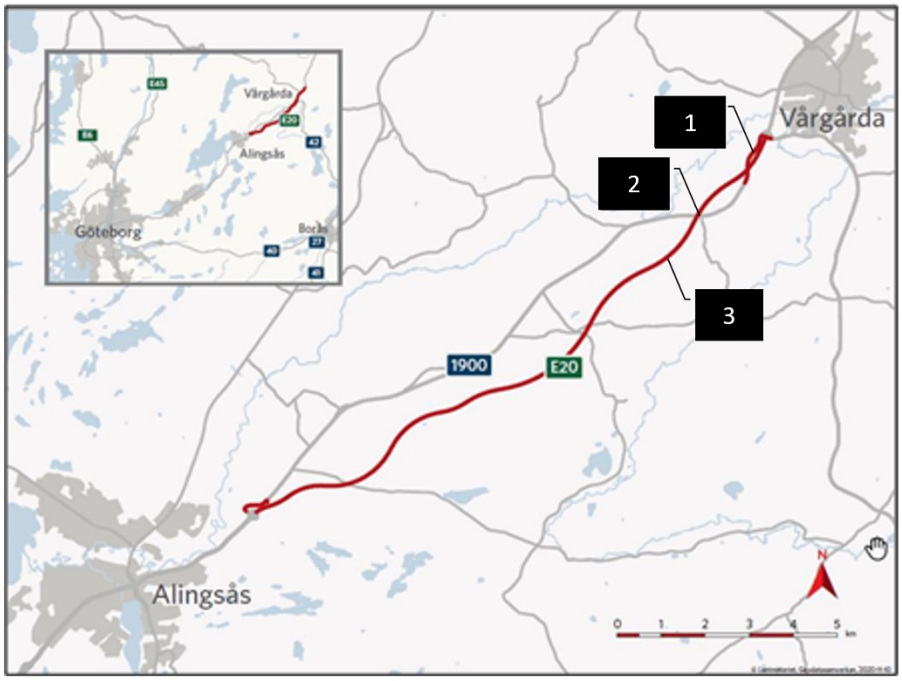
5.1.1 Pilotfall 1-3 - E20 Bälinge – Vårgårda

E20, sträckan Bälinge Vårgårda, är nyligen byggd som en fyrfältig motorväg med totalbredd 21,5 meter, en sträcka på cirka 15 km, se Figur 5.4.

I TRV-handlingarna för Vägplan beskrivs de geotekniska förhållandena som att de längs sträckan präglas av närheten till högsta marina gränsen (MG) i området. Längs vägförslagets första och sista delar, Bälinge - Gisslatorp och Gongstorp – Vårgårda, ligger marknivån i huvudsak under MG. Jorden domineras generellt av glaciala, ofta växellagrade, sediment i form av lera, silt och sand, som ofta överlagras av postglaciala svallsediment i form av skiktad silt och sand. I mer högländ terräng bryter fastmark med morän och berg i dagen igenom sedimenten.

Längs vägförslagets centrala delar, mellan Gisslatorp och Gongstorp, ligger marknivån ovan MG. Topografin är mer kuperad och geologin domineras av större områden med berg i dagen och ytnära berg. I mindre omfattning förekommer morän ovan berg. I svackor

förekommer organisk jord i form av torv, generellt med 0,5–2 m mäktighet. I liten omfattning förekommer isälvsavlagringar.

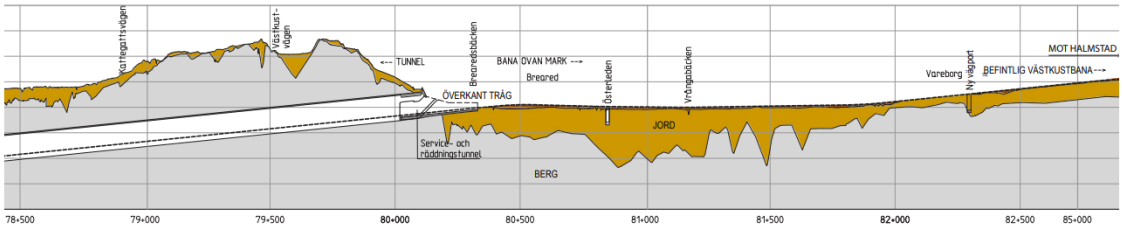


Figur 5.4 E20 Bälinge-Vårgårda, översiktskarta. Pilotfall 1-3.

5.1.2 Pilotfall 4 - Varbergstunneln – Södra påslaget

Västkustbanan leds genom en cirka 3,1 kilometer lång tunnel under centrala Varberg. Det blir ett nytt stationshus med nedgång till plattformarna, som är placerade i ett nedsänkt tråg vid norra tunnelmynningen. I området för det södra tunnelpåslaget, se Figur 5.5, övergår tunneln från betongtråg till bergtunnel med liten bergtäckning, se Figur 5.6. I TRVs Planbeskrivning till Järnvägsplanen beskrivs de geologiska förhållandena enligt nedan.

I området förekommer i huvudsak två huvudbergarter; bandad gnejsgranit och charnockit. Charnockiten, som förekommer främst vid bergtunnelns norra och södra ändar samt en kortare sektion mitt på bergtunneln, är en bergart som har bildats under mycket höga tryck och temperaturer för cirka 1400 miljoner år sedan. Bergmassan längs bergtunneln innehåller tre till fem sprickgrupper och ett antal sprickzoner. Bergkvaliteten är normalt god med en blockstorlek på 0,6 till 2 meter, men speciellt vid sprickzoner kan kvaliteten bli låg. Längs hela bergtunneln dominerar de horisontella sprickorna där även vattenföringen antas ske till stor del.



Figur 5.5 Längdprofil Varbergstunneln, Södra påslaget.



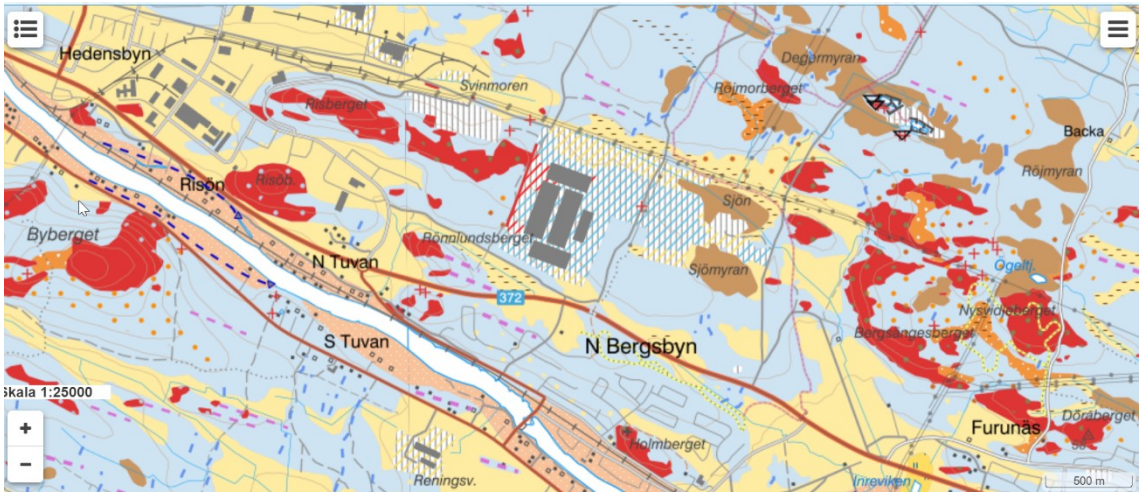
Figur 5.6 Varbergstunneln, södra tunnelpåslaget. Bild tagen strax utanför tunnelmynningen vid schakt för betongtråg.

5.1.3 Pilotfall 5 - HSE Skellefteå (HSE – Hedensbyn Site East)

Den så kallade Batterifabriken kommer då den är fullt utbyggd att omfatta ett område motsvarande 40 fotbollsplaner, se Figur 5.7. Platsen är belägen i ett område med varierande geologiska förutsättningar, se Figur 5.8. Den aktuella fastigheten gränsar till ett område med berg i dagen men består huvudsakligen av morän, se Figur 5.8 och Figur 5.9.



Figur 5.7 Illustration över planerad batterifabrik, Skellefteå. Pilotfall 5. (www.skellefteå.se).



Figur 5.8 **Jordartskarta med HSE/Batterifabriken inritad (SGU, 2021-12-14).**



Figur 5.9 **Påbörjat schaktarbete för planerad batterifabrik, Skellefteå. Pilotfall 5. (www.skellefteå.se).**

5.2 Beräkningsförutsättningar

Beräkningarna är utförda med hjälp av den metod som beskrivs i kapitel 3. För dessa beräkningar har vissa beräkningsparametrar valts samtidigt som en indatafil har skapats. En del av dessa parametrar och indata framgår av Tabell 5.1 nedan.

Tabell 5.1 Beräkningsförutsättningar.

Beräkningsförutsättningar	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Antal använda undersökningspunkter från traditionella metoder i modelleringen och beräkningen	347	221	908	309	1205
Vald osäkerhetsfördelning för tolkat djup (Skew eller Normal)	Skew	Skew	Skew	Skew	Skew
Vald fördelningsparameter avseende ”smoothing”	0	0	0	0	0
Vald parameter för viktning av osäkerheterna (avstånd kontra osäkerheten i punkten), ett värde mellan 0 och 1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Storleken på det begränsande undersökningsområdets plana 2D-yta i m^2	52 204	24 700	30 020	135 700	508 934
Storleken på det inmätta områdets plana 2D-yta i m^2	16 870	11 341	14 264	3 928	106 643

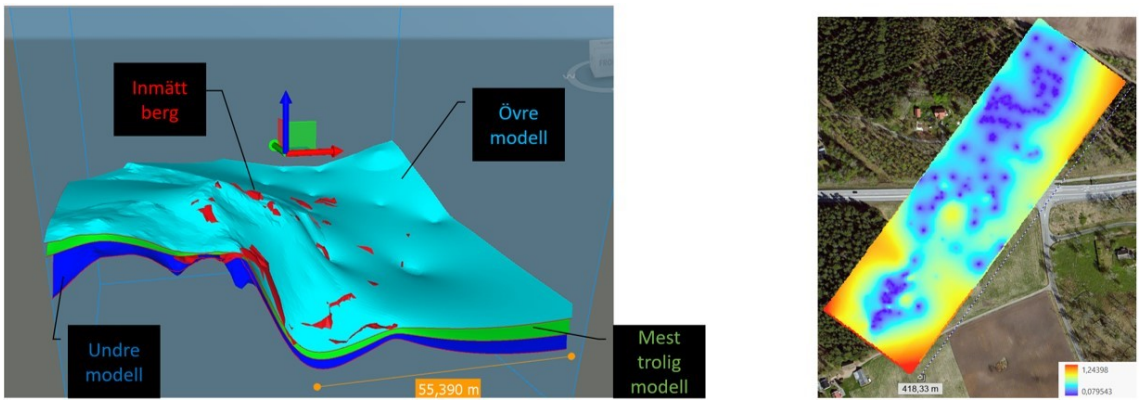
5.3 Resultat

För varje pilotområde har beräkning av följande produkter utförts:

- Mest trolig bergmodell, 3D
- Ytligast rimliga bergmodell, 3D
- Djupast rimliga bergmodell, 3D
- Osäkerhetsmodell (3D), visualiserad som osäkerhetskarta (2D), gällande för Mest trolig bergmodell

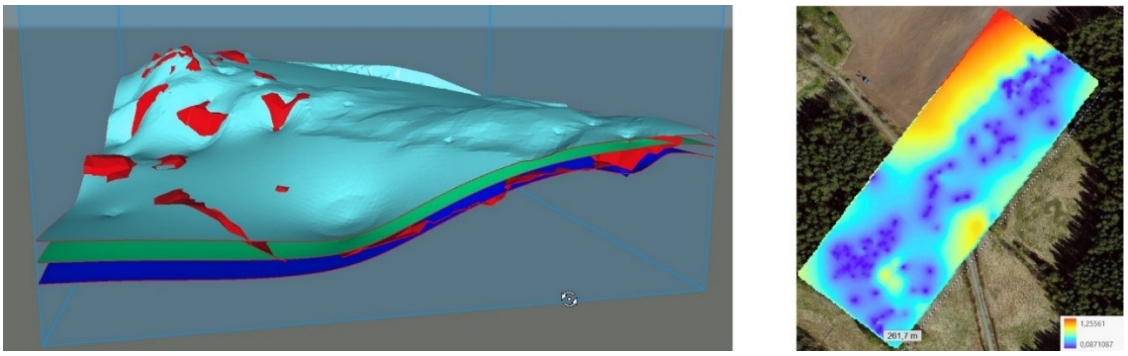
För varje lokal presenteras i nedan kapitel en representativ vy över respektive produkt, se Figur 5.10 - Figur 5.14. I figurerna visas även inmätt bergyta på respektive lokal.

5.3.1 Pilotfall 1 - E20 Bälinge – Vårgårda – Norra området



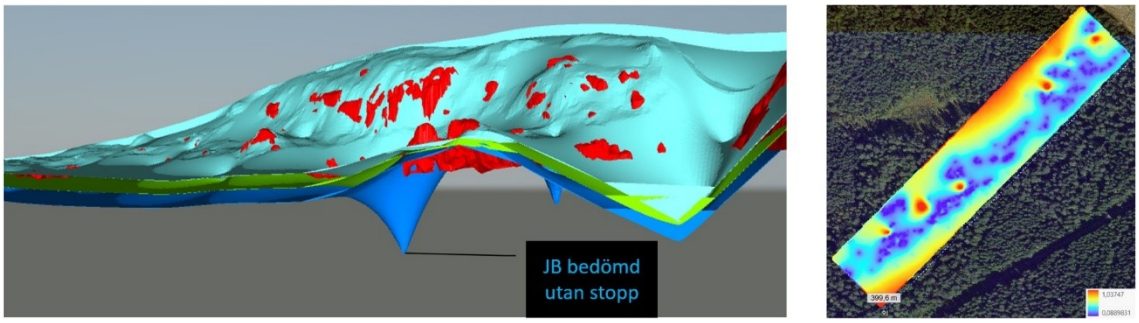
Figur 5.10 **Modeller för ytligast rimliga, mest trolig, djupast rimliga samt inmätt bergyta i projekt E20 Norra området (Pilotfall 1).**

5.3.2 Pilotfall 2 - E20 Bälinge – Vårgårda – Mellersta området



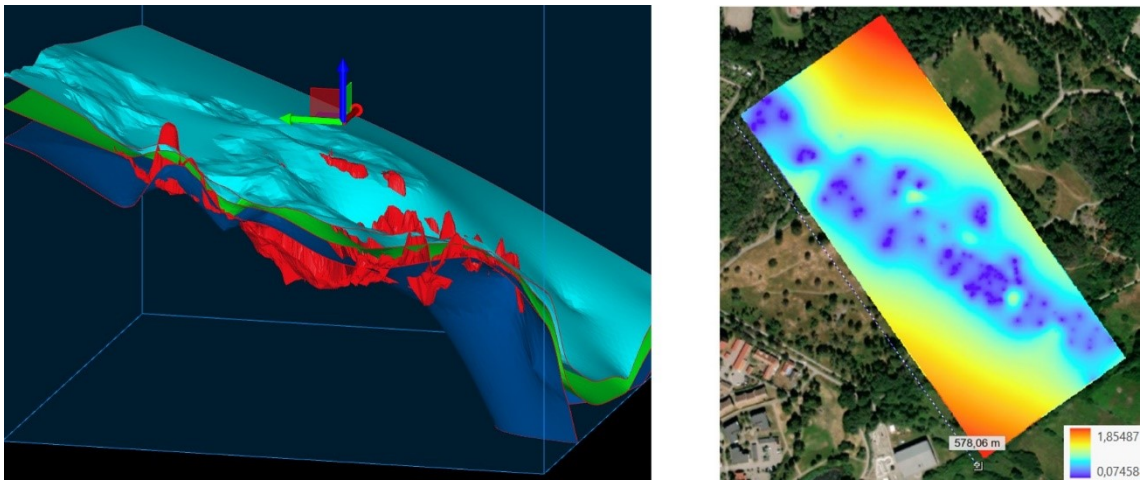
Figur 5.11 **Modeller för ytligast rimliga, mest trolig, djupast rimliga samt inmätt bergyta i projekt E20, Mellersta området (Pilotfall 2).**

5.3.3 Pilotfall 3 - E20 Bälinge – Vårgårda – Södra området



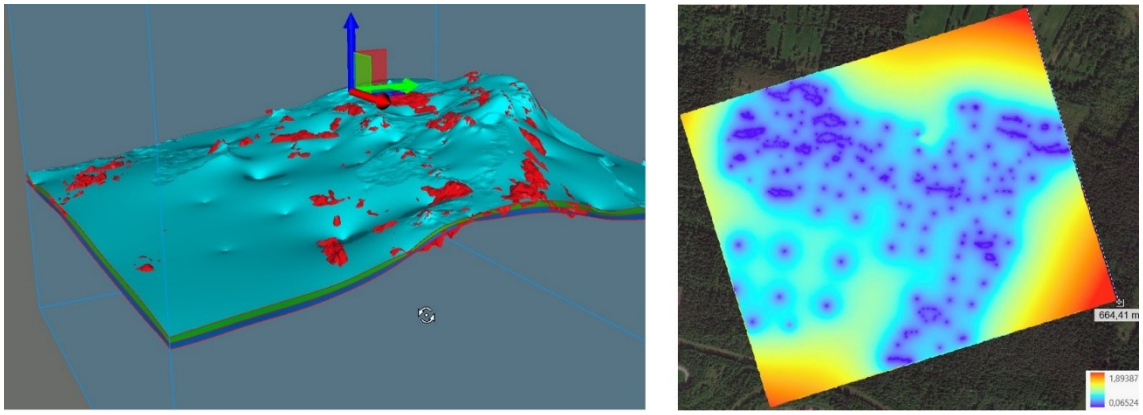
Figur 5.12 **Modeller för ytligast rimliga, mest trolig, djupast rimliga samt inmätt bergyta i projekt E20, Södra området (Pilotfall 3).**

5.3.4 Pilotfall 4 - Varbergstunneln – Södra påslaget



Figur 5.13 **Modeller för ytligast rimliga, mest trolig, djupast rimliga samt inmätt bergyta i projekt Varbergstunneln (Pilotfall 4).**

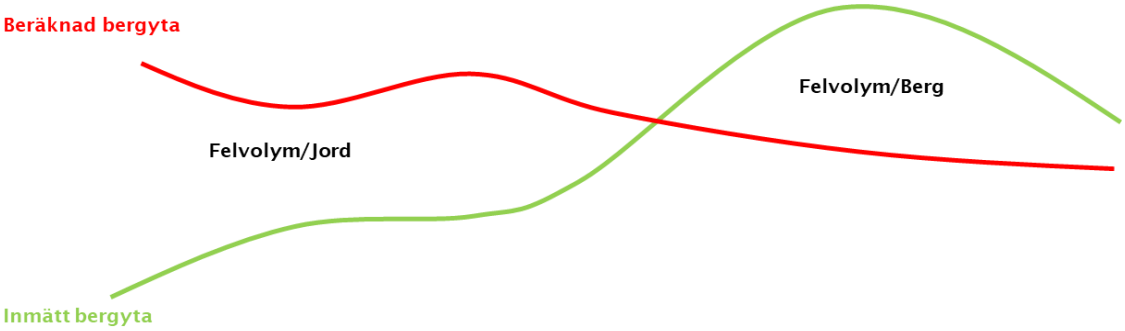
5.3.5 Pilotfall 5 – HSE, Skellefteå



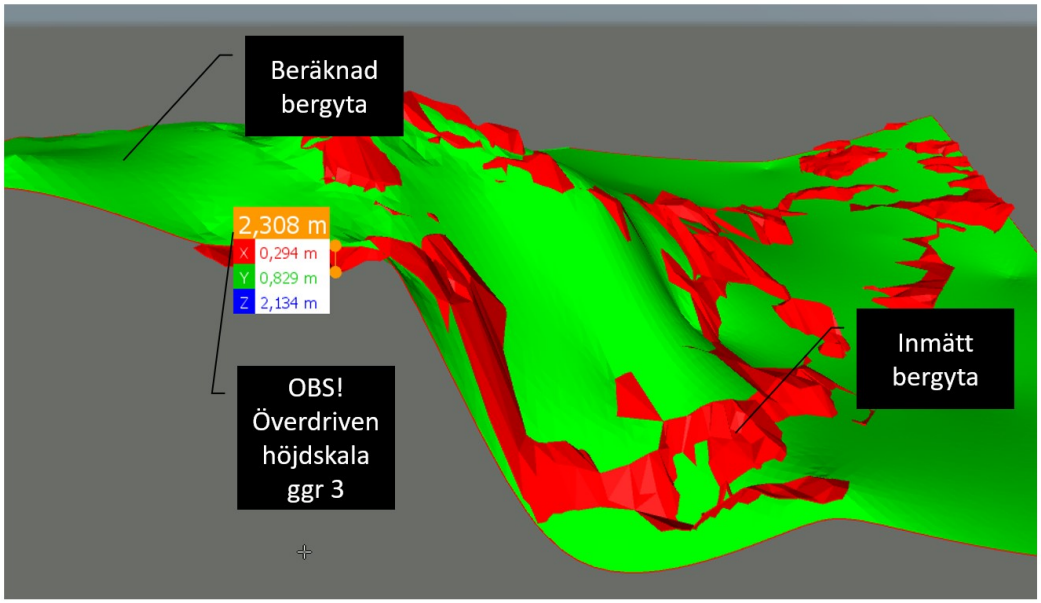
Figur 5.14 **Modeller för ytligast rimliga, mest trolig, djupast rimliga samt inmätt bergyta i projekt HSE (Pilotfall 5).**

5.4 Validering mot inmätt bergyta

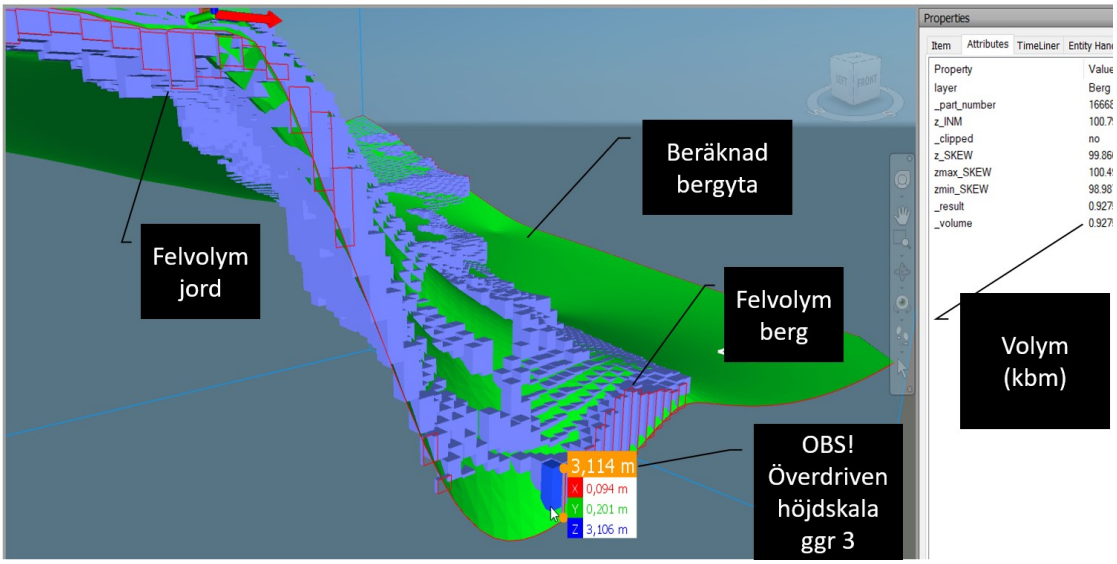
För att kunna jämföra hur träffsäker algoritmen som beräknar bergmodellen har densamma jämförts med den inmätta ytan på varje lokal. Jämförelsen har gjorts genom att beräkna två **nyckeltal**, benämnda **felvolym** respektive **feldjup.** Felvolymen definieras som den volym i m^3 som begränsas av ytorna *beräknad bergyta* och *den inmätta bergytan*, se Figur 5.15. Feldjup definieras som felvolymen i förhållande till den inmätta plana ytans area i m^2, se Figur 5.16 och Figur 5.17.



Figur 5.15 Definition av felvolymer.



Figur 5.16 En jämförelse mellan inmätt (röd) och beräknad mest trolig (grön) bergyta i projekt E20, Norra området (Pilotfall 1).



Figur 5.17 Felvolymer i projekt E20, Norra området (Pilotfall 1).

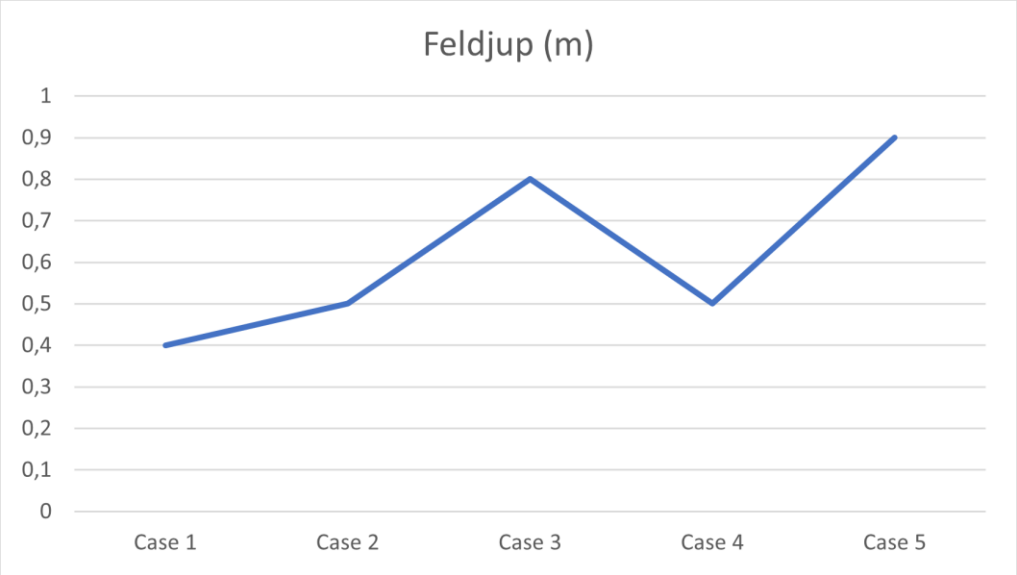
5.4.1 Sammanställning av nyckeltal för feldjup och felvolym

Data och beräknade nyckeltal för de fem pilotfallen framgår av Tabell 5.2 nedan.

Tabell 5.2 Jämförelse mellan beräknad och inmätt bergyta.

DATA OCH NYCKELTAL	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Storleken på det begränsande undersökningsområdets plana 2D-yta i m^2	52 204	24 700	30 020	135 700	508 934
Storleken på det inmätta områdets plana 2D-yta i m^2	16 870	11 341	14 264	3 928	106 643
Storleken på felvolymen mellan beräknad bergyta och inmätt bergyta i m^3	7 501	6 104	10 800	1 985	91 829
Storleken på felvolymen avseende berg mellan beräknad bergyta och inmätt bergyta i m^3	5 833	5 326	1 017	586	43 168
Storleken på felvolymen avseende jord mellan beräknad bergyta och inmätt bergyta i m^3	1 668	778	9 783	1 399	48 661
Storleken på totala volymen som begränsas av beräknad bergyta och inmätt bergyta i förhållande till inmätt områdes plana yta i m (feldjup)	0,4	0,5	0,8	0,5	0,9
Storleken på volymen jord som begränsas av beräknad bergyta och inmätt bergyta i förhållande till inmätt områdets plana yta i m (feldjup)	0,1	0,1	0,7	0,4	0,5
Storleken på volymen berg som begränsas av beräknad bergyta och inmätt bergyta i förhållande till inmätt områdes plana yta i m (feldjup)	0,3	0,5	0,1	0,1	0,4

Resultaten visar att beräkningsalgoritmen har en träffsäkerhet på <1 meter. Feldjupet varierar mellan 0,4 m och 0,9 m för samtliga fem pilotfall, se Figur 5.18 nedan.



Figur 5.18 Beräknat feldjup (m) för de fem pilotfallen.

5.4.2 Beräkningsresurser

I samband med beräkningarna av nyckeltalen har även två parametrar avseende resursförbrukningen tagits fram. Dessa parametrar framgår av Tabell 5.3 nedan.

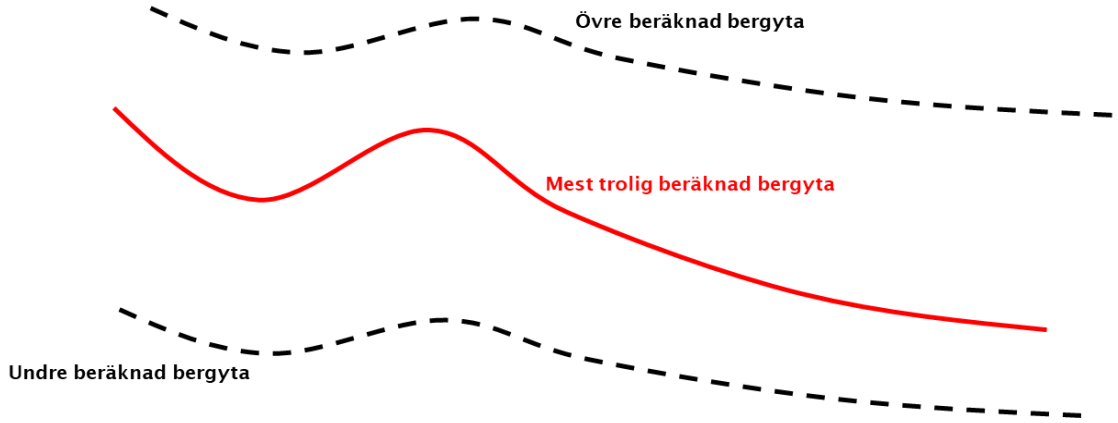
Tabell 5.3 Erforderliga beräkningsresurser.

BERÄKNINGSRESURSER	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Beräkningstid i minuter	22	7	52	50	1177
Antal iterationer	1000	1000	1000	1000	1000

5.5 Resultat och analys av beräkningar utförda på hela undersökningsområdet

Data från de fem pilotprojekten har också använts för att med samma algoritm som tidigare, se kapitel 3, beräkna bergytans form och läge för hela det undersökningsområde som omfattas av de geotekniska undersökningarna i varje pilotfall, se Figur 5.1. Beräkningen resulterar i en yta som avser en mest trolig bergyta, en undre bergyta och en övre bergyta. För den mest troliga bergytan görs även här en osäkerhetsberäkning enligt kapitel 3.1.

Den övre bergytans nivå är, enl kapitel 3.2, beräknad som [mest trolig beräknad bergyta + 2 x standardavvikelsen] i varje punkt. På motsvarande sätt är den undre beräknade bergytan beräknad som [mest trolig beräknad bergyta - 2 x standardavvikelsen] i varje punkt, vilket statistiskt motsvarar att inom 95% av hela ytan förväntas den verkliga bergytan ligga inom den övre och den undre beräknade bergytan, den så kallade 95%-kvantilen, se Figur 5.19.



Figur 5.19 Definition av de tre beräknade ytorna.

För att kunna få en uppfattning av hur stora osäkerhetsvolymerna och osäkerhetsdjupet är har tre nyckeltal definierats även här, se Tabell 5.4 nedan.

Tabell 5.4 Definitioner av nyckeltal avseende osäkerhetsvolym och osäkerhetsdjup.

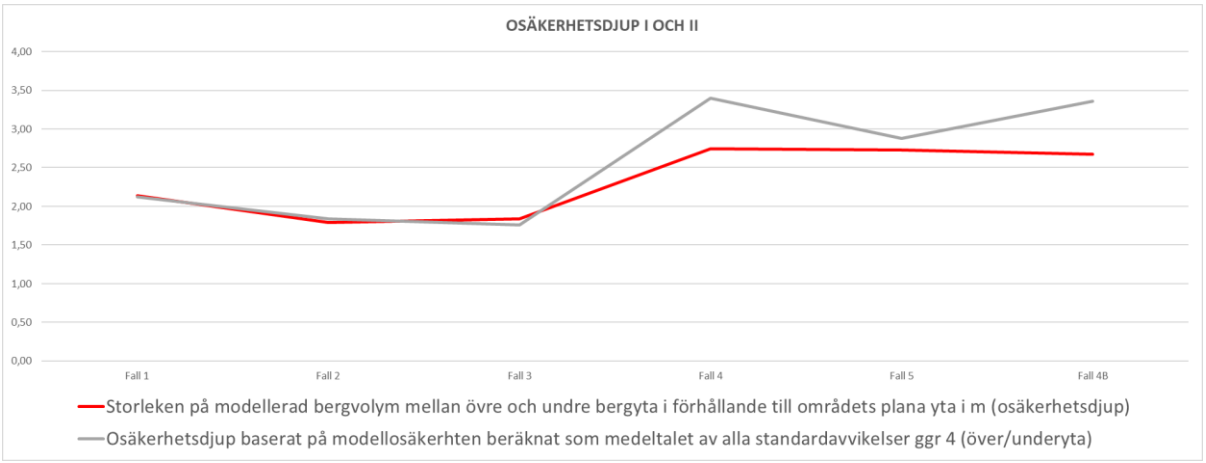
NYCKELTAL	DEFINITION	ENHET
Osäkerhetsvolym	Den volym som begränsas av den övre beräknade bergytan och den undre beräknade bergytan.	m^3
Osäkerhetsdjup I	Osäkerhetsdjup definieras som osäkerhetsvolymerna i förhållande till undersökningsområdets plana yta.	m
Osäkerhetsdjup II	Osäkerhetsdjup baserat på modellosäkerheten beräknat som medeltalet av alla standardavvikelser i alla modellceller gånger 4.	m

Resultatet från beräkningarna av nyckeltalen framgår av Tabell 5.5 nedan.

Tabell 5.5 Resultat från beräkningar avseende hela området.

DATA OCH NYCKELTAL	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Antal använda undersöknings-punkter i modelleringen och beräkningen	347	221	908	309	1 205
Storleken på det begränsande undersökningsområdets plana 2D-yta i m^2	52 204	24 700	30 020	135 700	508 934
Storleken på beräknad bergvolym mellan övre och undre bergyta i m^3 (osäkerhetsvolym)	111 479	44 304	55 130	372 710	1 389 069
Storleken på beräknad bergvolym mellan undre och mest trolig bergyta i m^3	63 008	28 243	31 838	195 354	675 529
Storleken på beräknad bergvolym mellan övre och mest trolig bergyta i m^3	48 471	16 061	23 291	177 356	713 707
Storleken på beräknad bergvolym mellan övre och undre bergyta i förhållande till under-sökningsområdets plana yta i m (osäkerhetsdjup I)	2,1	1,8	1,8	2,7	2,7
Storleken på beräknad bergvolym mellan övre och mest trolig bergyta i förhållande till undersökningsområdets plana yta i m (osäkerhetsdjup I)	0,9	0,7	0,8	1,3	1,4
Storleken på beräknad bergvolym mellan undre och mest trolig bergyta i förhållande till undersökningsområdets plana yta i m (osäkerhetsdjup I)	1,2	1,1	1,1	1,4	1,3
Osäkerhetsdjup II baserat på modellosäkerheten beräknat som medeltalet av alla stan-dardavvikelser i alla modellceller ggr 4 i m (över/underyta)	2,1	1,8	1,8	3,4	2,9

Resultaten visar att beräkningsalgoritmen ger ett resultat för osäkerhetsdjup I som varierar mellan 1,8 m och 2,7 m för de fem pilotfallen. Osäkerhetsdjup II varierar mellan 1,8 m och 3,4 m, se Figur 5.20.



Figur 5.20 Beräknat osäkerhetsdjup I och II för de fem pilotfallen.

6. Resultat och analys - osäkerheter avseende designparametrar

Denna del av FoI-projektet har som tidigare beskrivits helt och hållet handlat om att bygga ett nytt digitalt gränssnitt för att kunna utnyttja den MVA-metodik som tidigare enbart fanns i beräkningsverktyg för en enskild forskare, huvudsakligen xls-lösning. Inga nya algoritmer eller samband har således utvecklats. Algoritmerna är vetenskapligt validerade sedan tidigare i (Prästings, 2019).

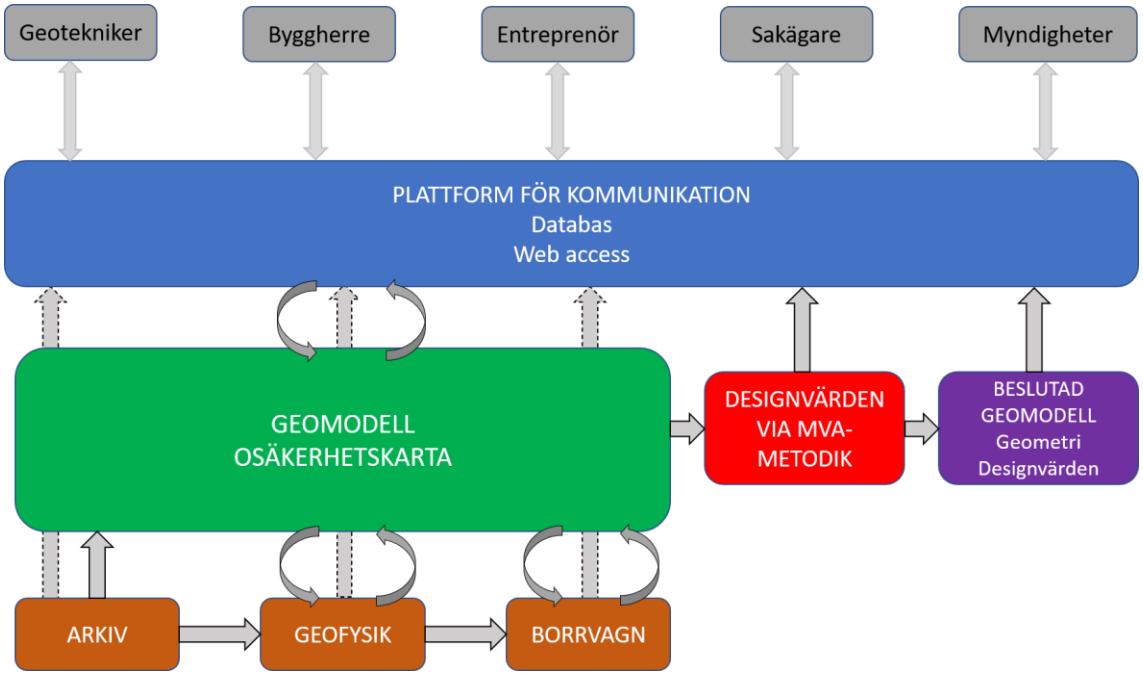
Validering av den dashboard-lösning som har tagits fram har under programmeringsarbetet modulvis gjorts genom jämförelse mellan de framräknade odränerade skjuvhållfastheterna från respektive xls-verktyg och dashboard-verktyget. Resultaten har varit identiska.

En systematisk jämförelse mellan de båda beräkningsverktygen för den totala beräkningsprocessen har inte varit möjlig att utföra inom ramarna för aktuellt projekt. Det önskvärda hade varit att göra en sådan jämförelse för fem olika lokaler. Risken för att den sammansatta beräkningsprocessen med det nu utvecklade dashboard-verktyget skulle ge ett annat resultat än summan av resultaten från de enskilda modulerna bedöms dock som liten.

7. REKOMMENDERAD ANVÄNDNING AV PROJEKTETS RESULTAT

De två utvecklade verktygen för hantering av två olika typer av osäkerheter är viktiga pusselbitar i en ny modern geoteknisk process, se Figur 7.1. En sådan förnyad geoteknisk process skulle skapa många fördelar. En uppdaterad geoteknisk process enligt nedan föreslås.

- Samla all information i en **databas** redan i mycket tidigt skede
- **Tillgängliggör all information** till alla behöriga aktörer via ett webgränssnitt
- Basera metodval och placering av undersökningar på **osäkerhetskartor**
- **Inled** alla fältundersökningar **med geofysiska metoder** innan borrvagn skickas ut
- Jobba med ett **iterativt** undersökningsförfarande
- Utnyttja **multivariat analys**-metodik för bestämning av dimensionerande värden på designparametrar
- **Delge entreprenör** framtagna **geomodeller** i förfrågningsunderlaget



Figur 7.1 Schematisk skiss över en uppdaterad geoteknisk process, där kontrollerad hantering av osäkerheter på både geomodell och designparametrar är centrala delar.

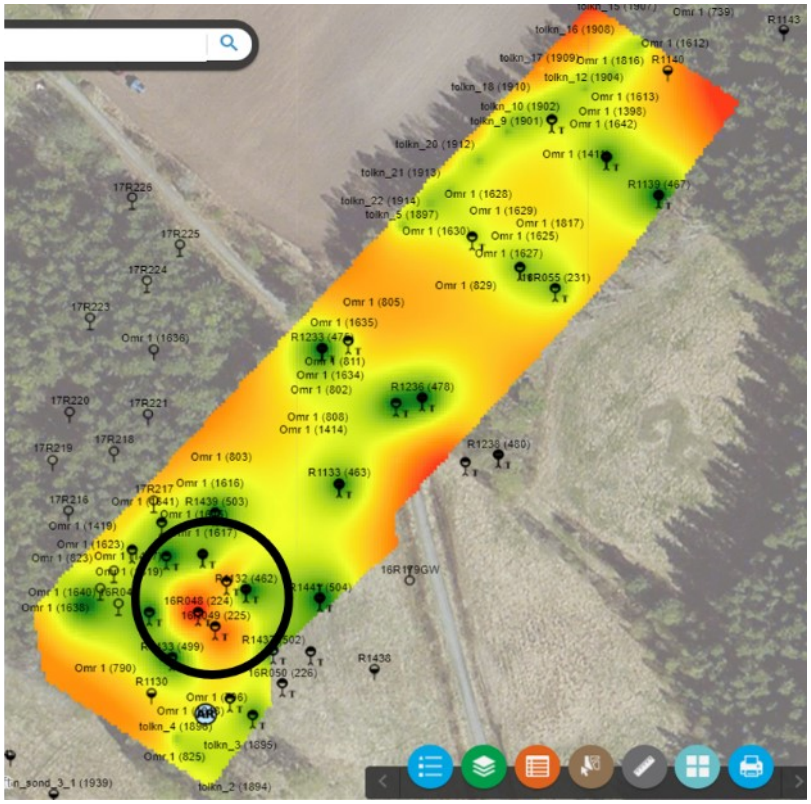
8. Diskussion och särskilt intressanta resultat

Detta kapitel tydliggör några av de mest intressanta och användbara insikterna som har har gjorts vid analys av de erhållna resultaten.

8.1 Geometrier

8.1.1 Betydelsen av osäkerhet i enskilt borrhål

I branschen är det en allmänt vedertagen uppfattning att vi har god kunskap om de geotekniska förhållandena i de punkter som vi har undersökt. Figur 8.1 visar att det inte alltid är så. Om de individuella osäkerheterna i en sondering, i detta fall svårtolkade Jb-sonderingar, är stora blir den totala osäkerheten också stor trots att flera sonderingspunkter ligger inom ett litet område. De individuella osäkerheterna övertrumfar det korta avståndet mellan punkterna.

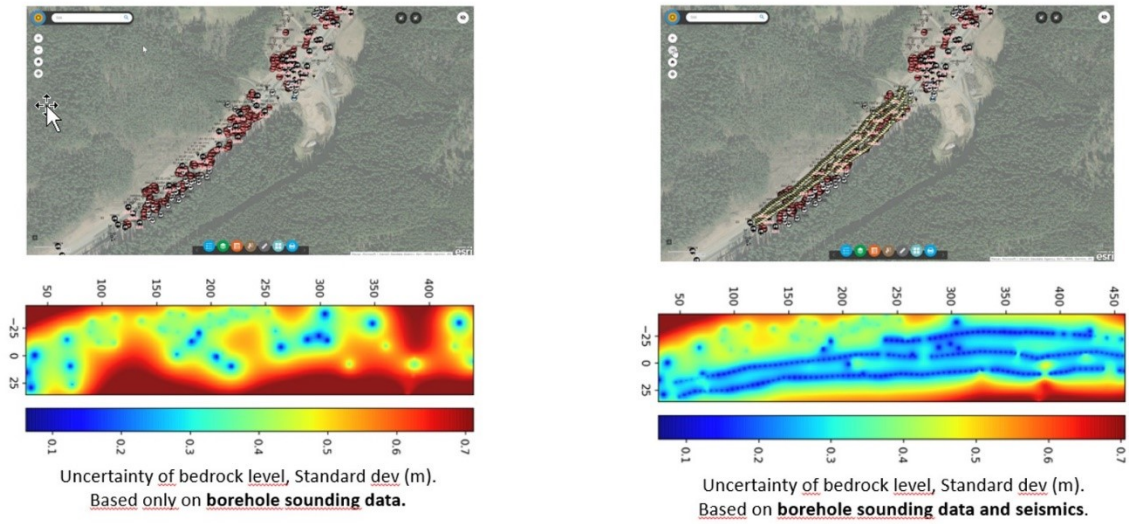


Figur 8.1 **Det inringade området visar att trots ett förhållandevis stort antal sonderingspunkter så är osäkerheten i bedömning av bergnivån stor (rött).**

8.1.2 Geofysik sänker osäkerheterna markant

En av de parametrar som ingår i beräkningsalgoritmen är avståndet till närmaste undersökningspunkt. Figur 8.2 visar effekten då information från en metod som möjliggör tolkning av bergnivå kontinuerligt mellan borrhålen. Den tillförda informationen är tre seimsiprofiler från vilka bergnivån har tolkats. Den tolkade bergnivån har ansatts en generell oäkerhet på 20% av tolkat djup under markytan, vilket är ä ren förhållandevis hög osäkerhet. Mätpunkternas täthet (höga densitet) gör emellertid att, i motsats till ovan, så övertrumfar det

korta avståndet mellan informationspunkterna den stora osäkerheterna i varje individuell mätpunkt.



Figur 8.2 **Den högra figuren visar tydligt att då information mellan borrhål tillförs, i detta fall bergtolkning från tre seismiska profiler, minskar osäkerheterna avseende djup till berg signifikant.**

8.2 Möjligheter med osäkerhetskartor och "osäkerhetsvolymer"

8.2.1 Planering av undersökningsprogram

Resultaten ovan indikerar att ett geotekniskt undersökningsprogram bör inledas med yttäckande metoder. Flera av de de geofysiska undersökningsmetoderna är relativt snabba att utföra och med dem som underlag för framtagning av en första osäkerhetskarta erhålls ett bra underlag för att placera de följande borrvagnsundersökningarna så optimalt som möjligt, dvs där de största osäkerheterna finns.

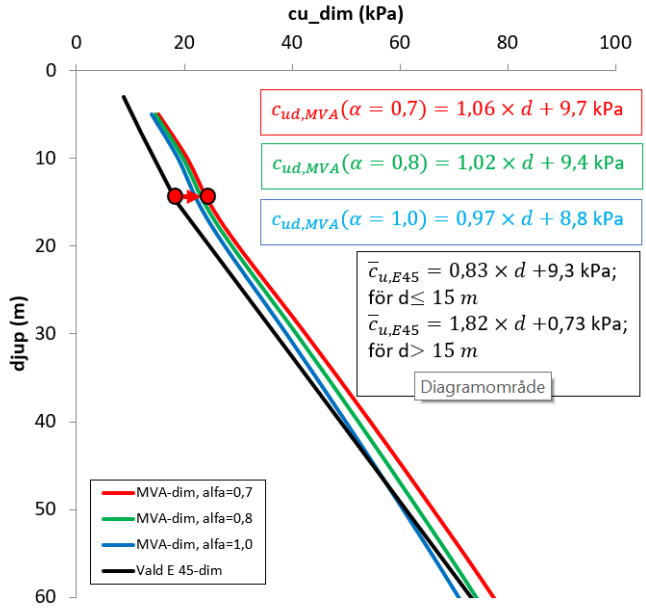
8.2.2 Upphandling av entreprenör

Framtagen algoritm för beräkning av bergmodell har validerats ha en träffsäkerhet på < 1 m. Det rättfärdigar uttrycket "en säker osäkerhetsmodell". Med en säker osäkerhetmodell tillhörande varje framtagen bergmodell skapas de förutsättningar för att en byggherre med trygghet ska kunna ta ansvar för undermarksförhållandena och därmed våga skicka med en geomodell i underlag för upphandling av entreprenör. Samma underlag kan användas i kontrakt för en tydligare riskfördelning än idag. Därmed bör antalet tvister kunna minska.

8.3 Designparametrar

I TRV-projekt Nedsänkning av E45 och i (Prästings A., 2019) visas flera fördelar med att använda MVA-metodik för att hantera osäkerheter i geotekniska designvärden. Den största fördelen med att använda sig av MVA-metodik är att man alltid får en objektiv framtagning av sitt designvärde och slipper lita till geoteknikerns magkänsla. I projekt Nedsänkning av E45 visade det sig vara möjligt att med trygghet öka värdet för designparametern odränerad skjuvhållfasthet med upp till 20%, se Figur 8.3.

Med det dashboard-verktyg som har utvecklats i aktuellt projekt finns det nu mycket goda möjligheter att implementera MVA-metodik i branschen.



Figur 8.3 **Odränerad skjuvhållfasthet utvärderad med MVA-metodik i TRV-projekt Nedsänkning av E45, Göteborg. Resultaten visar att en ökning med designvärdet med upp till 20% är möjlig att göra.**

9. Slutsatser

9.1 Osäkerheter avseende geometrier

Den algoritm för beräkning av bergmodell med tillhörande osäkerhetskarta som har utvecklats har vid validering mot fem framschaktade och inmätta bergytor befunnits ha en träffsäkerhet på < 1 m. Bättre träffsäkerhet än så är inte rimligt att uppnå för det skandinaviska urbergets överyta och med traditionell omfattning av undersökningsprogram.

I aktuellt projekt har fokus legat på att beräkna den geometriska formen bergyta, med huvudsakligen Jb-data som indata. Det är önskvärt att utveckla algoritmen både för andra geometriska ytor, tex underkant torv och underkant lera. För mer direkta bergtillämpningar är geometrier som tex en sprickzons bredd eller mäktigheten på en bergöverytas vittrade zon intressant Det kräver också att algoritmen/programmet utvecklas för att enkelt utnyttja data från andra typer av undersökningsmetoder.

9.2 Osäkerheter avseende designparametrar

För att möjliggöra användning av MVA-metodik för hantering av geotekniska designparametrar har ett dashboard-verktyg i basversion tagits fram, med tillämpning på designparametern odränerad skjuvhållfasthet. Verktyget tillgängliggör för första gången MVA-metodiken för i branschen aktiva geotekniker.

Därmed finns det nu förutsättningar för alla i branschen att på ett objektivt sätt ta fram värden på geotekniska designparametrar. Aktuell version av dashboard-verktyget är anpassad för designparametern odränerad skjuvhållfasthet. Med förhållandevis små insatser är det möjligt att vidareutveckla verktyget för tillämpning på andra geotekniska designparametrar, tex friktionsvinkel och kompressionsmodul.

Idag väljs värden på designparametrar i varje projekt genom att okulärt välja ett designvärde från uppritade sk härledda värden, vilket gör att osäkerheterna hanteras på ett okontrollerat och osystematiskt sätt. Med risk för både över- och underdimensionering i efterföljande projektering.

10. Fortsatt arbete

10.1 Osäkerheter Geometrier

I aktuellt projekt har fokus legat på att beräkna den geometriska formen bergyta, med huvudsakligen Jb-data som indata. Det är önskvärt att utveckla algoritmen både för andra geometriska ytor, tex underkant torv och underkant lera. För mer direkta bergtillämpningar är geometrier som tex en sprickzons bredd eller mäktigheten på en bergöverytas vittrade zon intressant Det kräver också att algoritmen/programmet utvecklas för att enkelt utnyttja data från andra typer av undersökningsmetoder.

10.2 Osäkerheter Designparametrar

Framtida arbete kan delas upp i flera olika områden.

10.2.1 Utvidga funktionaliteten

För att utnyttja MVA-metodiken fullt ut behöver dashboard-verktyget kompletteras med möjligheten att hantera fler sonderingstyper och att låta användaren välja konfigurationsparametrar själv. Dessutom är det önskvärt att möjliggöra beräkningar av fluktuationsavstånd (Prästings A., 2019), samt att hantera osäkerheten i fler parametrar än dimensionerande skjuvhållfasthet. Sammanfattning önskad funktionalitet:

- Fler sonderingstyper
- Beräkning av fluktuationsavstånd (och variansreduktionen gamma)
- Fler parametrar utöver skjuvhållfasthet (kompressionsmoduler, friktionsvinkel)
- Beräkna vanliga spridningsmått för övriga parametrar

10.2.2 Förbättra interaktivitet och utseende

Förslag på sådana åtgärder är:

- Kolla upp hur sidan skalar mot olika typer av webbläsare.
- Göra flikar för alla sonderingstyper
- Rullist för scroll i tabellen
- Förfina urvalet i kartan så att punkterna inte ligger på varandra
- Visualisera bakomliggande beräkningar (visa ekvationer)
- Skriva hjälpavsnitt
- Åtkomst och inläsning av data

För att dashboarden ska bli användbar för flera användare behöver den kunna läggas på en server med åtkomst utifrån, eller startas via ett FME-skript. En automatisering där indata kan läsas direkt från GeoBIM, eller en standardiserad export behöver göras.

10.2.3 Validering av Dashboard-verktyget

En systematisk jämförelse mellan det ursprungliga beräkningsverktyget i xls och det nu utvecklade dashboard-verktyget för den totala beräkningsprocessen har inte varit möjlig att utföra inom ramarna för aktuellt projekt. Under programmeringsarbetet har det emellertid gjorts modulvisa jämförelser som visar att de olika delarna i respektive verktyg ger samma resultat.

Utöver budget- och kompetensmässiga resursbegränsningar har det heller inte tidsmässigt varit möjligt att göra jämförande beräkningar eftersom vissa parametrar som krävs för full flexibilitet ännu inte är programmerade, de sk saknade knapparna, se Figur B.5.
I ett fortsättningsprojekt är det också önskvärt att göra en jämförelse för fem olika lokaler.

11. Kommunikation av resultat

Projektet har lagt stor kraft på att kommunicera erhållna resultat. Nedan insatser i form av artiklar i branschtidskrifter, bidrag till konferenser med mera har gjorts.

11.1 Branschtidskrifter

Svensson M., Friberg O., (2021), Nyttan med geotekniska osäkerhetsmodeller, Bygg&Teknik, januari
Svensson M., (2022), En helt ny geoprocess, Bygg&Teknik, januari
Svensson M., (2021), Osäkerhetsmodeller för geoteknisk riskhantering, Husbyggaren, nr 5
Svensson M., (2021), Osäkerhetsmodeller för geoteknisk riskhantering under mark, Samhällsbyggaren, september

11.2 Konferenser och branschdagar

Svensson M., Friberg O., (2022), Komplett modell för beräkning av bergöveryta med tillhörande osäkerhetsnivåer, Bergdagarna, Svenska Bergtekniska Föreningen, mars
Svensson M., (2022), Säkra osäkerhetsmodeller, Grundläggningsdagen, Svenska Geotekniska Föreningen, mars
Svensson M., Friberg O., (2022), GeoBIM for handling geological and geotechnical uncertainties in tunnelling, ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2022, Bella Center, Copenhagen 22-28 April
Svensson M., Friberg O., (2022), Certain geotechnical uncertainties using the GeoBIM concept, InfraBIM Open 2022, Lyon, France, 10-12 January
Svensson M., (2021), Osäkerhetsmodeller, Adventsföreläsning SGF Syd, 25 november
Svensson M., (2021), Osäkerhetsmodeller – för optimal resursanvändning i infrastrukturprojekt, BIG-VIP-möte, 13-14 oktober

11.3 Övrigt

Svensson M., (2020), Så kan osäkerheterna i bergmodeller minskas markant, Tyréns Geobloggen, 2 september
Svensson M., (2021), Uppdatera den geotekniska processen, Tyréns Geobloggen, 13 december
Svensson M., (2020), Konsten att implementera geotekniska forskningsresultat, Tyréns Geobloggen, 29 oktober
Svensson M., (2021), Fantastiska geotekniska verktyg redo att användas, Tyréns Geobloggen, 13 augusti
Svensson M., (2021), Uncertainties in rock modelling – preliminary results, månatligt arbetsmöte, International Tunnelling Association, WG22, 18 maj
Svensson M., (2021), Uncertainties on bedrock models – preliminary results, månatligt arbetsmöte, International Tunnelling Association, WG22, 15 juni

12. Referenser

Bárdossy, G. and Fodor, J. (2001). Traditional and new ways to handle uncertainty in geology, *Natural Resources Research*, **10**(3), pp. 179–187.

Bjureland, W., Spross, J., Johansson, F., Prästings, A. & Larsson, S., 2017, Challenges in Applying Fixed Partial Factors to Rock Engineering Design. In Geo-Risk 2017: Reliability-Based Design and Code Development (Huang, J., Fenton, G.A., Zhang, L. & Griffiths, D.V.(eds)). American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, GSP:283, pp. 384–393, doi: 10.1061/9780784480700.037.

Bolin, D., Lindström, J., Eklundh, L. and Lindgren, F. (2009). Fast estimation of spatially dependent temporal vegetation trends using Gaussian Markov random fields, *Computational Statistics and Data Analysis*. Elsevier B.V., **53**(8), pp. 2885–2896.

Calcagno, P., Chilès, J. P., Courrioux, G. and Guillen, A. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge. Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **171**(1–4), pp. 147–157.

Cao, Z. & Wang, Y., 2014a. Bayesian Model Comparison and Characterization of Undrained Shear Strength. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(6): 4014018, doi: 10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001108.

Cao, Z. & Wang, Y., 2014b. Bayesian Model Comparison and Selection of Spatial Correlation Functions for Soil Parameters. Structural Safety, 49: 10–17, doi: 10.1016/j.strusafe.2013.06.003. (Müller et al., 2014; 2016,

Cao, Z., Wang, Y. & Li, D., 2016. Quantification of prior knowledge in geotechnical site characterization. Engineering Geology, 203: 107–116, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.08.018.

CEN European Committee for Standardization., 2004, SS - EN 1997-1 Geotechnical design-Part 1: General rules

Goovaerts, P. (2001). Geostatistical modelling of uncertainty in soil science, *Geoderma*, **103**(1–2), pp. 3–26.

Li, J. and Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review, *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd, **53**, pp. 173–189.

Mitas, L. and Mitasova, H. (2005). Spatial Interpolation, in Longley, P. A. et al. (eds) *Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. 2nd Editio, pp. 481–492.

Olsson, L. & Stille, H., 1984. The Partial Factor Method Applied to Geotechnical Engineering - Theoretical Background., Byggforskningsrådet, Stockholm, Sweden, Report 52:1984.

Orr, T.L.L., 2017. Defining and Selecting Characteristic Values of Geotechnical Parameters for Designs to Eurocode 7. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 11(1): 103–115, doi: 10.1080/17499518.2016.1235711.

Phoon, K.-K., 2017a. Role of Reliability Calculations in Geotechnical Design. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 11(1): 4–21, doi: 10.1080/17499518.2016.1265653.

Phoon, K.-K. & Ching, J., 2013. Can We Do Better than the Constant Partial Factor Design Format? In Modern Geotechnical Design Codes of Practice (Arnold, P., Fenton, G.A., Hicks, M.A., Schweckendiek, T. & Simpson, B. (eds)). IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, pp. 295–310.

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. (Ching et al., 2010)

Prästings A., 2019, Managing uncertainties in geotechnical parameters: From the perspective of Eurocode 7, Doktorsavhandling, KTH

Schneider, H.R. & Schneider, M.A., 2013. Dealing with Uncertainty in EC7 with Emphasis on the Determination of Characteristic Soil Properties. In Modern Geotechnical Design Codes of Practice (Arnold, P., Fenton, G.A., Hicks, M.A., Schweckendiek, T. & Simpson, B. (eds)). IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, pp. 87–101.Wang 2017)

Thiele, S. T., Jessell, M. W., Lindsay, M., Wellmann, J. F. and Pakyuz-Charrier, E. (2016). The topology of geology 2: Topological uncertainty, *Journal of Structural Geology*. Elsevier Ltd, **91**, pp. 74–87.

Trafikverket, 2016, Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner-TK Geo 13, TDOK 2013:0667

Thoft-Christensen, P. & Baker, M.J., 1982. Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer, Berlin, Germany.

Vanmarcke, H.E., 1977. Probabilistic Modeling of Soil Profiles. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103(11): 1227–1246. (Lacasse & Nadim, 1996)

Wang, Y., Cao, Z. & Li, D., 2016. Bayesian Perspective on Geotechnical Variability and Site Characterization. Engineering Geology, 203: 117–125, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.08.017.

Wang, Y. & Zhao, T., 2017. Statistical Interpretation of Soil Property Profiles from Sparse Data Using Bayesian Compressive Sampling. Géotechnique, 67(6): 523–536, doi: 10.1680/jgeot.16.P.143.

Wellmann, J. F., Horowitz, F. G., Schill, E. and Regenauer-Lieb, K. (2010). Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion, *Tectonophysics*. Elsevier B.V., **490**(3–4), pp. 141–151.

Wellmann, J. F. and Regenauer-Lieb, K. (2012). Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models, *Tectonophysics*. Elsevier B.V., **526**–**529**, pp. 207–216.

Wenander K., Båtelsson O., 2015, Modeller kan också vara osäkra, Grundläggningsdagen

Yang, W., Xu, Y. & Wang, J.P., 2017. Characterising Soil Property in an Area with Limited Measurement: A Bayesian Approach. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 11(2): 189–196, doi: 10.1080/17499518.2016.1208828.

Zhang, L., Li, D.-Q., Tang, X.-S., Cao, Z. & Phoon, K.-K., 2018. Bayesian Model Comparison and Characterization of Bivariate Distribution for Shear Strength Parameters of Soil. Computers and Geotechnics, 95: 110–118, doi: 10.1016/j.compgeo.2017.10.003.

Bilaga A Vägledning för verktyg för beräkning av osäkerheter avseende geometrier

1. Undersökningsdata med tillhörande individuella osäkerheter, tex Jb, för aktuellt område väljs ut i aktuell databas (i detta projekt har GeoBIM-databasen använts).
2. En anpassad indatafil för det program som beräknar bergmodell och osäkerhetsmodell skapas.
3. Den anpassade filen läses in i programmet och beräkning av bergmodell och osäkerhetsmodell körs.
4. Ett antal utdatafiler genereras då beräkningarna är klara.
5. Utdatafilerna visualiseras i ändamålsenligt program, tex Navis works.

Bilaga B Vägledning för verktyg avseende beräkning av osäkerheter för geotekniska designvärden

Slutprodukten efter att användaren har genomfört MVA-processen med detta dashboard-verktyg är en objektiv bedömning av dimensionerande värde på den aktuella designparametern, vilken i detta projekt är den odränerade skjuvhållfastheten. Dessutom erhålls ett värde på den sk eta-faktorn.
Arbetsgången är enligt nedan.

1. Läs in aktuellt projekt från databas (GeoBIM i detta FoI-projekt)
2. Välj sonderingstyper i kartan
3. Kolla igenom datapunkter i tabell och ta bort värden som inte ska ingå i analys
4. Tryck på fliken Antaganden och se över de antaganden som gjorts
5. Tryck på Beräkna
6. Välj önskad säkerhetsklass och materialegenskapens inverkan ($\propto$)
7. Nu har du din eta-faktor och dimensionerande skjuvhållfasthet
8. Tryck på Spara för att ladda ner grafer och tabell med värden

En mer detaljerad beskrivning av dashboard-verktygets uppbyggnad, med skärmdumpar av gränssnittet o dyl, presenteras nedan.

Övergripande beskrivning av programmeringskod

I Tabell B.1 anges vilka filer som levereras av programmet i detta skede:

Tabell B.1 Övergripande beskrivning av vilka filer som levereras från dashboard-programmet, samt dess funktion.

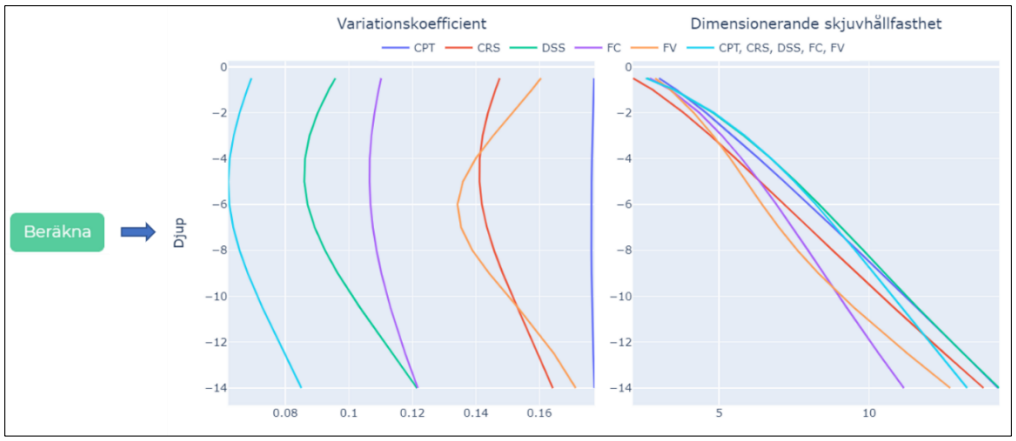
Filnamn	Funktion
main.py	Bygger upp dashboarden och funktionalitet
requirements.txt	Info om de python-bibliotek som behöver installeras för att kunna köra main.py
multi_analysis.py	Kör beräkningarna för den multivariata analysen utifrån tabell skapad av användare i dashboarden
config.py	Konfigurationsparametrar som används i multi_analysis.py
Input_data_multivariate_ analysis_test_interaktivitet.xlsx	Exempel på input-fil med alla mätvärden och sonderingstyper, ligger i mappen input_data

Dashboarden är byggd som en webbapplikation tänkt utifrån följande arbetsflöde för en användare

1. Få en överblick av projektet och tillgänglig data (karta med borrpunkter)
2. Välj punkter
3. Se mätvärden för valda punkter detaljnivå, jämför punkter med varandra
4. Förändra/ta bort mätvärden som inte ska ingå i analys
5. Se över antaganden om korrektionsfaktorer och mätfel
6. Välja att köra igång beräkning – multivariat analys (MVA)
7. Se resultat av beräkning: variationskoefficient, dimensionerande skjuvhållfasthet och äta-faktor
8. Kunna ändra input-parametrarna i äta-beräkningen för att visualisera nytt värde
9. Spara bilder på dimensionerande skjuvhållfasthet och variationskoefficient, samt fil med tabellvärden från valda punkter

Dashboarden byggs i en huvudfil: main.py. Den byggs upp genom att skapa olika kort, för respektive ”modul” eller funktion. Dessa kort placeras sedan ut i huvudapplikationen. Positioneringen i huvudapplikationen bygger på rader och 12 kolumner (lämpligt då 12 är delbart på både 6, 4, 3 och 2). Stilen och utseendet kommer från bootstrap bootswatch tema Minty (https://bootswatch.com/minty/) men många stilar skrivs över med egen css-kod. Alla dessa stilar definieras i versaler högst upp i koden.

Varje interaktivt element tilldelas ett specifikt namn som kallas id, exempelvis ”calculate-button”. Detta id används sedan i en callback-funktion där olika triggers, som ett klick, ett ifyllt värde eller att hovra över en punkt startar en funktion. Funktionen genererar sedan en output som tas emot av ett annat interaktivt element, till exempel ”result-table”, se Figur B.1.

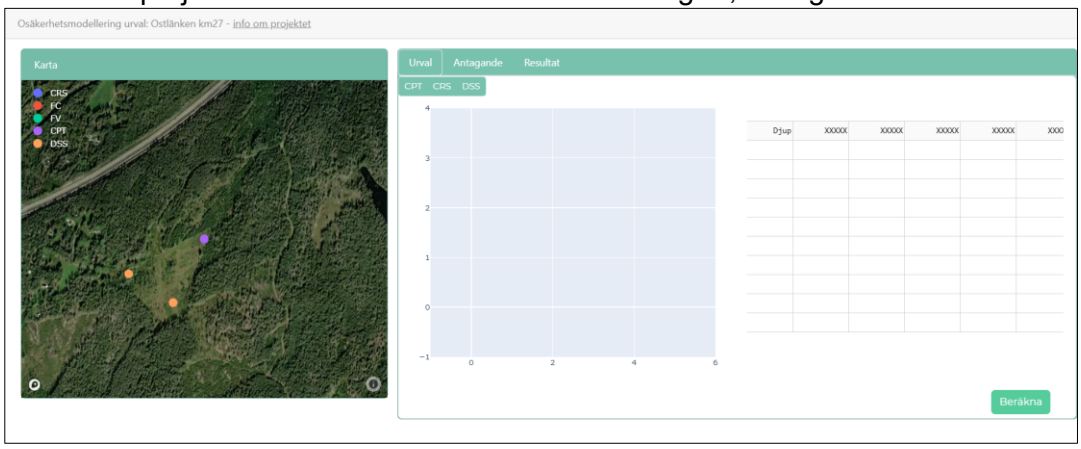


Figur B.1 Exempel utdata. Ett tryck på beräkningsknappen fyller i diagrammet med resultat.

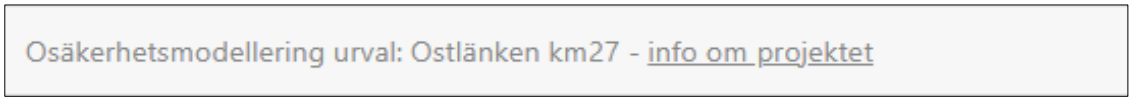
Grundläggande för dashboard-verktyget är att alla layout-element är fördefinierade och redan på plats när applikationen körs igång. Data kan sedan förändras och beräkningen som körs kan ta ny indata, men alla element och deras position är där de ska. De kan vara inaktiva/aktiva men de måste hela tiden existera.

Visualisering/demo

Designen är vald för att vara enkel och överskådlig. Dashboardens startsida består av en karta med projektets borrhål samt en tom tabell och graf, se Figur B.2.

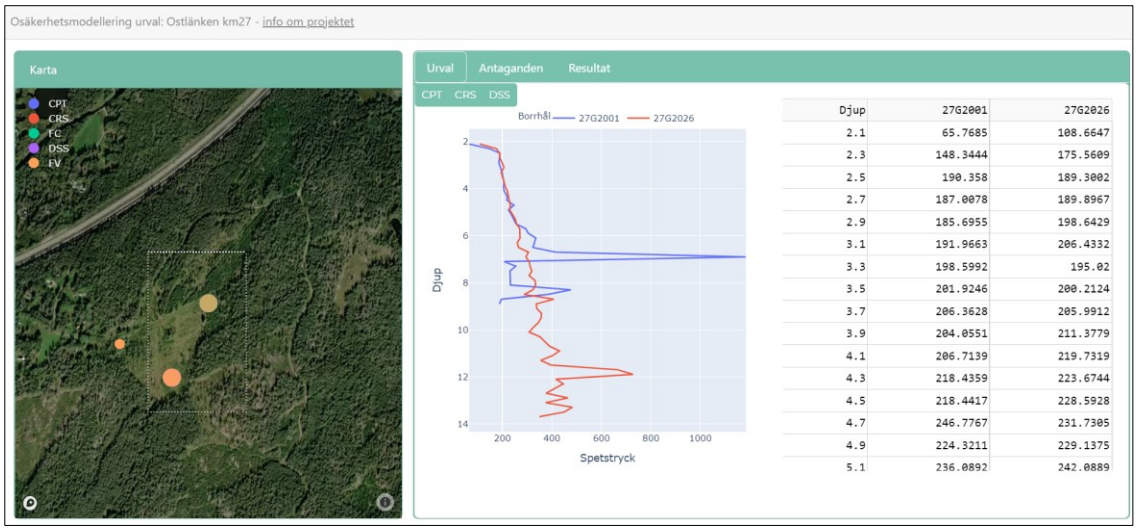


Figur B.2 Dashboard-verktygets startsida. Högst upp i rubriken anges det vilket projekt det är samt kort information om projektet, se Figur B.3.



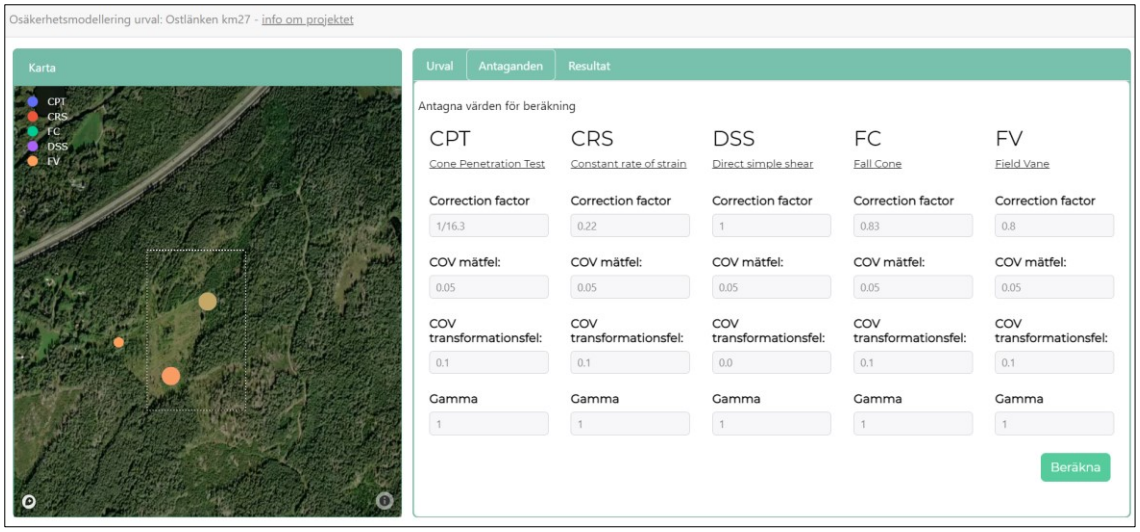
Figur B.3 Rubrik med information om projektet.

Punkterna i kartan är klickbara och med hjälp av legenden kan man filtrera på de metoder som man vill titta på. Detta görs genom att klicka ur eller i metoden i kartlegenden. Då en punkt blir vald, antingen via klick, ”box select” eller ”lasso select”, dyker dess data upp i intilliggande tabell och graf, se Figur B.4. Det går att markera flera genom att hålla in shift-tangenten. Både tabell och graf är interaktiv och tanken är att man här ska göra ett urval genom att dels välja punkter för beräkning, dels ha möjligheten att ta bort eventuella värden som misstänks vara felaktiga och då inte ska vara med i beräkningen.



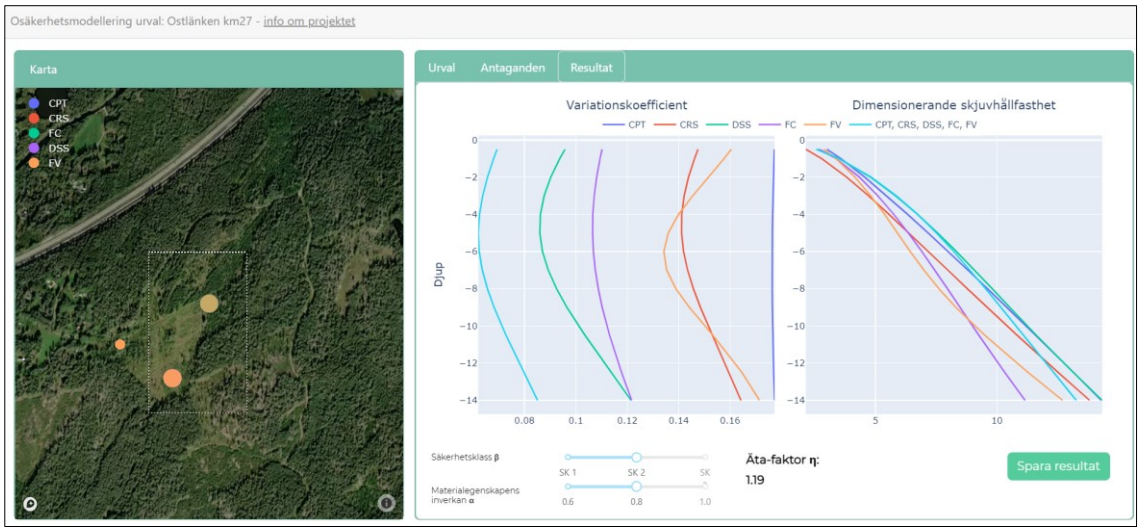
Figur B.4 Tabell och diagram som visar de valda punkternas spetstryck mot djupet. I tabellen kan värden tas bort.

Under nästa flik, *Antaganden*, anges de parametrar som är antagna för beräkningen. Dessa är i nuläget låsta men framöver önskas dessa kunna bli valbara för att kunna anpassa dessa till respektive projekts beräkning. Denna flik måste passeras för att användaren ska kunna gå vidare till beräkningsresultat. Beräkningen sker när användaren trycker på knappen *Beräkna*, se Figur B.5.



Figur B.5 Antaganden och knapp för att gå vidare med beräkning.

Resultaten visas i nästa flik, *Resultat*, se Figur B.6 där variationskoefficienten mot djupet visas tillsammans med den dimensionerande skjuvhållfastheten beräknad utifrån ett medelvärde på eta-faktorn, se Figur 4.1. Beroende på val av säkerhetsklass och sensitivitet (materialegenskapens inverkan) ändras värdet på eta-faktorn men det är förinställt på säkerhetsklass 2 och $\propto$=0,8.



Figur B.6 Resultat av den multivariata analysen presenterat i form av variationskoefficient, eta-faktor och dimensionerande skjuvhållfasthet.

BIG – Branschsamverkan i grunden
Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

BIG

BIG – Branschsamverkan i grunden - är ett forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av transportsystemets infrastruktur. Programmet etablerades under senhösten 2013, och påbörjade sin verksamhet den 1 januari, 2014.

Målsättningen är att sänka kostnader för byggande och underhåll av transportsystemets infrastruktur genom ett långsiktigt och systematiskt utvecklingsarbete inom geoteknikområdet.

I BIG samverkar Trafikverket, Chalmers tekniska högskola, Luleå tekniska universitet, Kungliga tekniska högskolan och Statens geotekniska institut.

Resultat från BIG projekt publiceras i vetenskapliga artiklar och parternas egna rapportserier. Alternativt så publiceras rapporterna i denna gemensamma BIG rapportserie.

Publicerade rapporter

A2014:03 Deformationer i undergrund – Litteratursammanställning och analys
A2014:07 Grundvattensänkning i morän
A2014:13 Höghastighetsspår i Sverige – på bank
A2014:14 On the fundamental relation between soil creep and cyclic pile-soil response
A2016:05 Modelling deformations below high-speed rail
A2017:07 Dynamic response of transition zone on soft clay
A2017:10 Effects of climate change on slopes in sensitive clay
A2017:14 Changes in undrained shear strength as a function of time under embankments
A2018:03 Three-dimensional effects in slope stability calculations
A2018:18 Osäkerhetsmodeller – för optimal geoteknisk resusanvändning..