

# **Statistiskt beräknade partialkoefficienter till Nybyggnadsregler för geokonstruktioner**

## **Etapp 1—en förstudie**

Per-Evert Bengtsson

Ulf Bergdahl

Lars Olsson

Monica Ouacha

Eva Petersson

Maj 1993

# **Statistiskt beräknade partialkoefficienter till Nybyggnadsregler för geokonstruktioner**

Etapp 1 - en förstudie

Per-Evert Bengtsson  
Ulf Bergdahl  
Lars Olsson  
Monica Ouacha  
Eva Petersson

## Statistiskt beräknade partialkoefficienter till Nybyggnadsregler för geokonstruktioner

### FÖRORD

1. INLEDNING .....	2
1.1 Projektet .....	2
1.2 Partialkoefficientmetoden.....	3
1.3 Problemställning .....	5
2. PROGRAM FÖR FORTSATT ARBETE.....	6
2.1 Stokastisk jordmodell .....	6
2.2 Dimensioneringsmodell .....	7
2.3 Redovisning .....	8
2.4 Tidplan .....	9
2.5 Referensgrupp .....	9
3. STOKASTISK JORDMODELL.....	9
3.1 Allmänt.....	9
3.2 Krav .....	11
3.3 Enkel jordmodell .....	12
3.4 Kvalificerad modell .....	18
4. OSÄKERHET I DIMENSIONERINGSMODELLEN .....	18
4.1 Allmänt.....	18
4.2 Krav .....	19
4.3 Sätt att bestämma osäkerheten i dimensioneringsmodellen .....	19
4.4 Försök .....	20
4.5 Subjektivt .....	21
4.6 Från utförda beräkningar .....	22
5. REFERENSER .....	23
6. BILAGOR .....	23

## 1. INLEDNING

### 1.1 Projektet

Nybyggnadsreglerna till PBL (NR) utkom i mars 1989 och tillämpas från och med 1991. Viss möjlighet finns dock att genom en återkoppling beträffande grundläggning använda tidigare SBN-regler. I NR införs förutsättningarna för en statistisk dimensionering av bl a geokonstruktioner genom att sannolikheten och däremot svarande värden på säkerhetsindex  $\beta$  (3,71-4,75) för överskridande av brottgränstillstånd i en konstruktion anges för olika säkerhetsklasser. Motsvarande värden för bruksgränstillstånd återfinns i en NKB-rapport där de satts till 1,28-2,32, som kan användas om inga andra begränsningar finns angivna för ett visst objekt. Emellertid har det förelegat hinder för att fullt ut genomföra sådana statistiska beräkningar. Dessa hinder har främst varit följande:

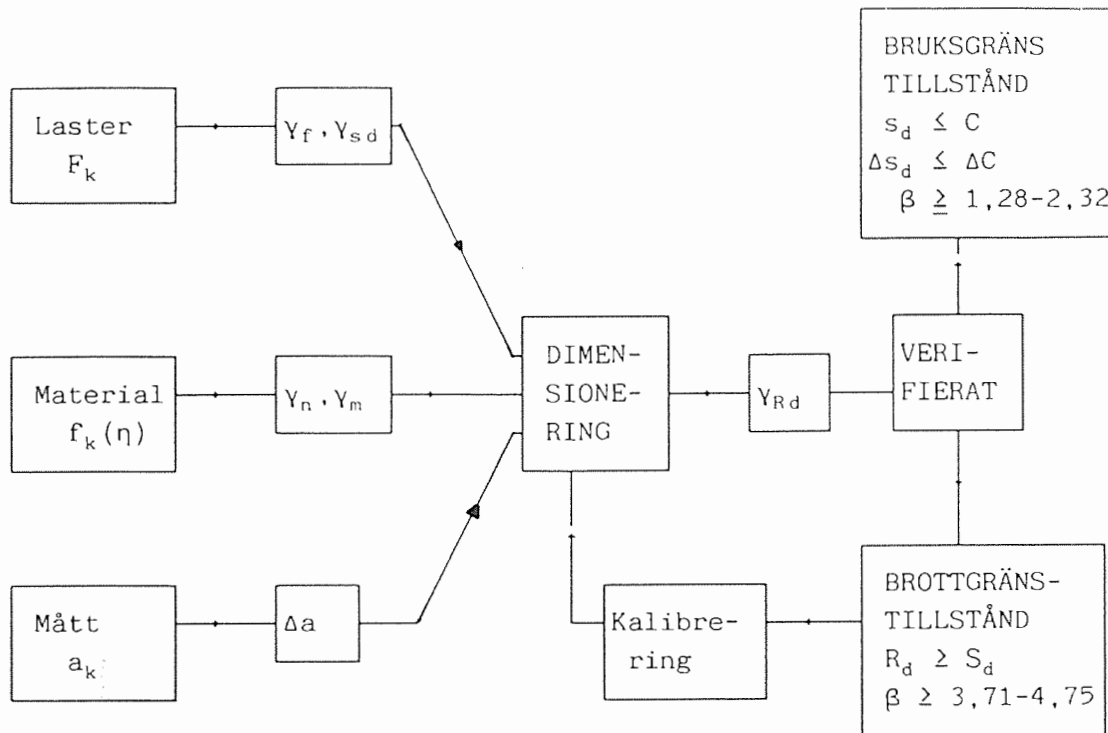
- Man har inte haft tillräcklig kunskap om de geotekniska egenskapernas statistiska parametrar.
- Man har inte haft tillgång till lämpliga stokastiska jordmodeller.
- Marknaden har inte haft tillgång till beräkningsmodeller i tillräcklig omfattning för att kunna göra dimensionering i såväl brott- som bruksgränstillstånd. Man saknar även kunskap om beräkningsmodellernas tillförlitlighet.

Eftersom statistiska dimensioneringsmetoder dessutom är komplicerade att använda har man utvecklat den sk partialkoefficientmetoden som är det huvudsakliga dimensioneringssättet i NR samt i kommande Europannormer. NR har således antagit den allmänna dimensioneringsmetoden enligt den internationella standarden ISO 2394 som i princip framgår av Figur 1. Mellan NR och Europannormen EC7 förekommer dock skillnader vid val av partialkoefficienter.

Reglerna för val och värdena på partialkoefficienter i NR har huvudsakligen framtagits så att den totala säkerhetsnivån blir ungefär densamma som enligt SBN 80 (Andersson et al 1990) vid ett värde på  $\gamma_{Rd} \approx 1,0$  för några enkla dimensioneringsfall.

Av vad som ovan sagts och det faktum att den kommande Europannormen kan komma att ange annat värde än medelvärdet som karakteristiskt värde på en jordparameter gör det nödvändigt att ta fram metoder för statistisk bestämning av partialkoefficienter i såväl brott- som bruksgränstillstånd, för att kunna uppnå angivna säkerhetsnivåer.

Syftet med det genomförda projektets etapp 1 har varit att ta fram ett underlag för det fortsatta arbetet med att ta fram ingenjörsmässiga regler och metoder att bestämma partialkoefficienterna, utifrån normala undersökningar, så att de ansluter till i NR krävd sannolikhet för överskridande av brott- och bruksgränstillstånd. Genom denna koppling kommer man att få en minskad godtycklighet i valet av partialkoefficienter och dessutom komma närmare målet med en optimerad konstruktion.



Figur 1 Schema visande dimensioneringsgång enligt NR och allmänna metoden enligt ISO 2394.

Syftet med denna första etapp har även varit att för den stokastiska jordmodellen ta fram den metod och arbetsgång som ska användas vid det fortsatta arbetet, samt att genomföra en litteraturstudie avseende beräkningsmodellens tillförlitlighet.

Projektet har bedrivits på Statens geotekniska institut (SGI). Forskningen har handlagts av Per-Evert Bengtsson, Ulf Bergdahl, Monica Ouacha och Eva Petersson, SGI och av Lars Olsson, KTH med Monica Ouacha som projektledare.

## 1.2 Partialkoefficientmetoden

Vid dimensionering av geokonstruktioner har man tidigare enligt SBN 80 täckt in de osäkerheter som finns med en enda säkerhetsfaktor, en totalsäkerhetsfaktor. I sannolikhetsbaserade dimensioneringsmetoder separerar man olika osäkerheter, kvantifierar dem och sammansätter värdena till ett riskmått som kan tjäna som underlag för beslut om konstruktionen.

I NR används säkerhetsindex  $\beta$  som ett ställföreträdande mått på den formella sannolikheten. Normerade värden på  $\beta$  är i NR knutet till risken för personskador som kan väntas uppkomma vid brott i en byggnadsdel. Kraven i brottgränstillståndet innebär alltså att brott-sannolikheten för en konstruktion ska vara mindre än ett givet acceptabelt värde. Samhällets krav på bruksgränstillståndet, formulerat i  $\beta$ , är mindre tydligt beskrivet i NR. Enligt AK 79/81 har  $\beta$ -värden på 1 à 2 ansetts rimliga för konstruktioner där ett överskridande endast medför måttlig olägenhet, jämför även NKB enligt ovan .

Även om statistiska metoder har många fördelar vill man ibland ha en enklare metod för dimensionering, t ex en metod där man arbetar med deterministiska värden. Man vill samtidigt så långt som möjligt bibehålla säkerhetsfilosofin. Det innebär att man med den förenklade metoden ska få konstruktioner med ett säkerhetsindex minst lika med det föreskrivna, baserat på underlaget för den aktuella konstruktionen.

Dimensionering av en konstruktion innebär att man genom beräkning visar att effekten av stabiliserande faktorer,  $R$ , är större än den samlade lasteffekten  $S$ . Partialkoefficientmetoden innebär att dimensionerande värden på bärförmågan,  $R_d$ , och lasteffekten,  $S_d$ , beräknas. I det enklaste fallet ingår en stabiliserande faktor och en lasteffekt. De dimensionerande värdena beräknas med hjälp av en partialkoefficient,  $\gamma$ , och ett karakteristiskt värde,  $f_k$  resp  $F_k$ , på den stokastiska variabeln  $R$  resp  $S$ , dvs

$$R_d = F(f_k/\gamma_m)$$

$$S_d = \gamma_f F_k$$

Dimensioneringsvillkoret blir då

$$R_d \geq S_d$$

I NR specificeras hur mycket större motståndet,  $R$ , i brottgränstillstånd minst måste vara jämfört med lasteffekten,  $S$ , i olika säkerhetsklasser genom angivna värden på säkerhetsindex  $\beta$  för att uppfylla samhällets krav på betryggande stabilitet, stadga och beständighet.

Normalt ingår flera stabiliserande faktorer och flera lasteffekter vid beräkning av motstånd och lasteffekt. Fördelen med metoden är att osäkerheter kan och ska beaktas där de hör hemma. I partialkoefficientmetoden skall i princip varje ingående faktor vara försedd med en egen partialkoefficient som beskriver risken för att det verkliga värdet avviker ogynnsamt från det antagna karakteristiska värdet. Det karakteristiska värdet är inte karakteristiskt ur någon fysikalisk synpunkt. Det är definierat i statistiska termer, t ex som nedre 5-procentfraktilen. Risken är att om man inte känner till partialkoefficienterna för de enskilda egenskaperna kommer man att vara försiktig vid ansättandet av partialkoefficient. Detta innebär risk för att totalsäkerheten blir onödigt stor:

Om man som i NR fastställer ett fast spann av partialkoefficienter för en konstruktionsklass förenklas dimensioneringen på bekostnad av en något överstark konstruktion i förhållande till en konstruktion beräknad med hjälp av t ex  $\beta$ -metoden.

Det finns ett teoretiskt samband mellan partialkoefficienter och säkerhetsindex  $\beta$ . En stringent bestämning av partialkoefficienterna kräver dock att man för det enskilda fallet beräknar  $\beta$  och sedan ur detta resultat bestämmer de partialkoefficienter som motsvarar  $\beta$ . Att göra denna beräkning för ett tillräckligt stort antal variabler på möjliga konstruktioner och sedan därur med statistisk analys beräkna partialkoefficienter (t ex som funktion av variabelns spridning) är möjligt, men mycket tidskrävande. Av denna anledning har man i NR endast angivit intervall av värden på partialkoefficienten  $\gamma_m$ , medan andra som  $\eta$  och  $\gamma_n$  anges med fixa värden.  $\gamma_n$  har dock olika värden beroende av säkerhetsklass. Dessutom har



NR infört en partialkoefficient  $\gamma_{Rd}$  som bl a skall ta hand om osäkerheten i dimensioneringsmodellen. För  $\gamma_{Rd}$  anges dock inga värden.

### 1.3 Problemställning

Partialkoefficientmetoden infördes i svensk geoteknik genom Nybyggnadsreglerna 1989. Osäkerheterna i materialparametrar och dimensioneringsmodeller beaktas med hjälp av partialkoefficienterna  $\gamma_m$  och  $\gamma_{Rd}$ . I NR ges som allmänna råd intervall för värden på  $\gamma_m$  medan det för  $\gamma_{Rd}$  inte anges några värden. Genom val av partialkoefficienten  $\gamma_m$  beaktas olika faktorer såsom kvalitet och omfattning av geoteknisk undersökning m m. För att inte göra metoden alltför osäker eller komplicerad att använda kräver partialkoefficientmetoden en metodik för bestämning av  $\gamma_m$  och  $\gamma_{Rd}$  som är relevanta och kan anpassas till de sannolikheter för överskridande av brott- och bruksgränstillstånd som aktuella regler kräver. För att uppnå en sådan metodik erfordras att man närmare studerar de statistiska parametrarna dels hos jordens egenskaper (den statistiska jordmodellen) dels hos de dimensioneringsmodeller som normalt används vid geoteknisk dimensionering.

Då det gäller den stokastiska jordmodellen skall denna kunna ta hänsyn till att jordens egenskaper varierar i rummet samtidigt som den bör vara enkel att använda samt kunna baseras på vanligt förekommande undersökningar. För att göra modellen praktiskt användbar krävs att vissa statistiska parametrar blir bestämda för ett antal typiska svenska jordar. Representativa undersökningsområden bör väljas ut och undersökningen bör läggas upp så att egenskapernas variationer kartläggs. Inom respektive undersökningsområde kan så ett relevansområde för en provpunkt beräknas.

Osäkerheten i dimensioneringsmodellen är vid sidan av jordparametrarna ofta den av de osäkra parametrarna som mest bidrar till den totala osäkerheten i ett dimensioneringsresultat. Det är därför av stor vikt att man kan ge ett mått också på denna osäkerhet. Eftersom detta mått skall användas i statistiska beräkningar (eller för kalibrering av partialkoefficienter) behövs liksom för de övriga osäkra parametrarna både väntevärde och varians samt eventuella korrelationer med faktiska försöksresultat.

Ett problem med osäkerheten i dimensioneringsmodellen är hur denna skall anges samt bestämmas. Att bestämma hur tillförlitlig en viss beräkningsmetod är för ett givet problem kan av praktiska skäl inte göras experimentellt för alla olika metoder eftersom ett stort antal försök skulle behövas. Man blir istället hänvisad till att utnyttja expertutlåtanden om olika dimensioneringsmodellens tillförlitlighet och väga samman och utvärdera dessa. Detta görs t ex genom en enkätundersökning. Man kan också utnyttja de utredningar som finns angående olika modellens spridning.

## 2. PROGRAM FÖR FORTSATT ARBETE

### 2.1 Stokastisk jordmodell

I detta arbete ingår att ta fram en enkel stokastisk jordmodell som kan användas i det dagliga arbetet med dimensionering av en geokonstruktion. Den ska vara så enkel att den även går att utnyttja vid handräkning. En mer fullständig men samtidigt mer komplicerad modell som kan användas för kalibrering av den enklare samt vid användandet av rena statistiska metoder avses att tas fram vid KTH i ett separat projekt.

Den fullständiga modellen avses preliminärt byggas upp på krigingmetodik med möjlighet att använda data från olika undersökningar och/eller subjektiva erfarenhetsdata, så kallad bayesiansk kriging, se även kapitel 3.1.

Då mycket arbete inom detta område pågår även på CTH kommer framtagandet av en förenklad jordmodell att användas tillsammans med partialkoefficientmetoden att göras i samråd mellan de olika projekten vid KTH, CTH och SGI.

I etapp 2 kommer arbetsgången att se ut enligt följande:

Ett eller flera typexempel på jordlagerföljder kommer att tas fram som sedan kommer att användas under projektets gång. Exemplet kommer att påvisa de skillnader och förändringar i arbetsgång och resultat som uppstår beroende på vilka olika antaganden och förutsättningar som görs.

Förhandskunskap beträffande spridning och medelvärden sammanställs i en databank för några typiska geologier, med omfattande byggnadsverksamhet. Sammanställningarna baseras primärt på befintliga undersökningar där dessa finns i sådan omfattning att de kan behandlas statistiskt riktigt. Sådana undersökningar finns för tex följande lokaler, där tidigare BFR-finansierade projekt utförts, Kolbytte-mon, Sturehof och Norrköping. Vissa kompletteringar av undersökningsresultat bör göras i fält för att få en god förhandskunskap om respektive område beträffande medelvärde, spridning och korrelation.

I arbetet med detta projekt ligger också att ta fram riktlinjer för val av partialkoefficient utgående från beräknad spridning, fältmetodens osäkerhet etc. Häri ligger att försöka utvärdera de olika osäkerheter som ligger i hela kedjan från val av undersökningsmetod till ansättande av partialkoefficienten  $\gamma_m$  på materialparametern. Följande delosäkerheter skall utvärderas:

- Är undersökningens omfattning tillräcklig.
- Hur väl kan man för olika jordar ange samband mellan jordparametern och mätvärdet.
- Vad är spridningen i parametervärdet i aktuell jordlagerföljd.
- Med vilken precision reproduceras mätvärdet med en viss undersökningsmetod.
- Hur inverkar kontrollplanen.
- Hur inverkar karaktären på brottet.

Riktlinjerna för bestämning av partialkoefficienten  $\gamma_m$  kontrolleras tillsammans med övriga partialkoefficienter genom beräkningar med  $\beta$ -metoden.

Som ett led i detta arbete kommer nedanstående tabell att användas. Den är hämtad ur NR kap 6:3 och beskriver de förhållanden som skall beaktas vid val av  $\gamma_m$  i brottgränstillstånd.



Under arbetet kommer tabellens gynnsamma och ogynnsamma faktorer att kvantifieras för att därmed underlätta bestämningen av  $\gamma_m$ .

I arbetet skall också ingå att ge sådana rekommendationer som kan erfordras med hänsyn till att undersökningarna i fält och på laboratorium skall ge ett beräkningsunderlag som är bättre avpassat till statistisk bearbetning.

Gynnsamma faktorer	Ogynnsamma faktorer
Materialegenskapen har erfarenhetsmässigt liten spridning.	Materialegenskapen har erfarenhetsmässigt stor spridning.
Provningsresultaten från geoteknisk undersökning visar normal spridning.	Provningsresultaten från geoteknisk undersökning visar större spridning än normalt.
Undersökningens omfattning är stor och medger en god bestämning av materialegenskapen.	Undersökningarnas omfattning är liten.
Undersökningarna är utförda med väldokumenterade metoder som ger reproducerbara resultat.	Undersökningarna är utförda med metoder som visar dålig reproducerbarhet eller metoder med begränsat erfarenhetsunderlag.
Kontrollplanen föreskriver tilläggskontroll av materialegenskapen.	Ingen tilläggskontroll av materialegenskapen.
Liten osäkerhet vid översättningen från provresultat till sökt egenskap hos materialet.	Stor osäkerhet vid översättningen från provresultat till sökt egenskap hos materialet.
Brottet är segt.	Brottet är sprött.

Tabell 1. BFS 1988:18, kap 6:3

## 2.2 Dimensioneringsmodell

Som nämnts i kapitel 1.3 är osäkerheten i dimensioneringsmodellen ofta den av de osäkra parametrarna som mest bidrar till den totala osäkerheten i ett dimensioneringsresultat. Ett problem med osäkerheten i dimensioneringsmodellen är hur denna skall anges samt bestämmas. Att bestämma hur tillförlitlig en viss beräkningsmetod är för ett givet problem kan av praktiska skäl inte göras experimentellt för alla olika metoder eftersom ett stort antal försök skulle behövas. Man blir istället hänvisad till att utnyttja expertutlåtanden om olika dimensioneringsmodellens tillförlitlighet och väga samman och utvärdera dessa. Man kan också utnyttja de utredningar som finns angående olika modellens spridning.

I etapp 2 kommer en enkätundersökning att göras för att samla in expertutlåtanden. I etapp 1 har en enkät påbörjats. Arbetet i etapp 2 består i att färdigställa, skicka ut, samla in och

utvärdera enkäten. Ett tjugotal experter väljs ut i en första omgång. Enkäten är tänkt att delas upp i två steg där man i det första behandlar de väsentliga problemen med olika dimensioneringsmodeller utan någon sannolikhetsutsaga, dvs bedömning av med vilken precision en viss dimensioneringsmodell beskriver verkligheten. Detta sker genom utskick av enkäten. I steg två går man vidare med ett urval av experter för att få en sannolikhetsutsaga på modellfelen. Denna del av enkäten görs i form av intervjuer eller som en specialenkät för respektive expert, beroende av specialområde. Utvärdering av enkäten görs med hjälp av i litteraturen angiven teknik (Morris, 1974).

Från resultaten av enkäten kommer ett  $\gamma_{Rd}$  att tas fram för respektive beräkningsmetod som ett rekommendationsvärde.

Ytterligare ett sätt att bestämma  $\gamma_{Rd}$  är genom att använda de utredningar som finns och som visar olika modellers spridning bl a för sättningar, bärförmåga och jordtryck (Briaud). En genomgång av dessa utredningar kommer att göras i etapp 2 för att om möjligt ligga till grund för val av  $\gamma_{Rd}$ . En sammanställning över detta kommer också att göras och skickas med som en bilaga till enkäten.

### 2.3 Redovisning

Förutom en forskningsrapport kommer inom projektets ramar en kortfattad vägledning för ingenjörer att tas fram. Målgrupperna är framför allt geotekniker och konstruktörer som arbetar med grundläggningsdimensionering. Information till dessa kommer att gå ut via SGF. En större informationsinsats kommer att behövas t ex i form av seminarier. Detta ingår dock ej i detta projekt.

Som en delredovisning kommer bl a en artikel till International Symposium on Limit State Design in Geotechnical Engineering, 26-28 maj 1993 i Köpenhamn, att tas fram. I denna kommer ett beräkningsexempel att visa på skillnaderna i resultat mellan beräkningar utförda enligt NR, EC7 och  $\beta$ -metoden. Förhandskunskap från någon tidigare undersökt plats kommer att användas.

En första disposition till slutrapport har tagits fram och redovisas nedan.

#### INNEHÅLL

#### FÖRORD

#### BETECKNINGAR

#### 1. ALLMÄNT

##### 1.1 Projektet

##### 1.2 Problemställning

#### 2. STOKASTISK JORDMODELL

##### 2.1 Inledning

##### 2.2 Begrepp

##### 2.3 Enkel modell

##### 2.4 Kvalificerad modell

##### 2.5 Databank

##### 2.6 Beräkning av $\gamma_m$

##### 2.7 Rekommendationer av värden på $\gamma_m$

### 3. OSÄKERHET I DIMENSIONERINGSMODELLEN

#### 3.1 Inledning

#### 3.2 Begrepp

#### 3.3 Resultat från enkätundersökning

#### 3.4 Resultat från utförda undersökningar

#### 3.5 Rekommendationer av värden på $\gamma_{Rd}$

### 4. REFERENSER

### 5. BILAGOR

#### Beräkningsexempel

## 2.4 Tidplan

Projektplanen bedöms innehålla följande delar i etapp 2. Då projektet innehåller flera olika byggstenar krävs det att dessa löper parallellt under en viss tid för att alla delar ska vara klara då de slutliga beräkningarna görs, se även Bilaga 1.

- Utskick, insamling och sammanställning av expertuttag
- Beräkning av  $\gamma_{Rd}$  utifrån utförda undersökningar
- Utredning av statistiska parametrar för jord
- Uppbyggnad av databank för ett antal typområden
- Kompletterande geotekniska undersökningar inklusive redovisning
- Utredning av tillförlitligheten i dimensioneringsmodeller utifrån enkätvar
- Konstruktionsberäkningar och uppställande av krav för gränstillstånden
- Referensgruppsmöten och information
- Slutrapportering och information

## 2.5 Referensgrupp

Då mycket arbete kring partialkoefficientmetoden och statistisk dimensionering i Sverige har gjorts vid CTH, KTH och SGI kommer en referensgrupp att tillsättas för etapp 2 bestående av Göran Sällfors, CTH, Håkan Stille, KTH och Claes Alén, CTH.

## 3. STOKASTISK JORDMODELL

### 3.1 Allmänt

Vid bedömning av risken för brott är det viktigt att skaffa information om spridning och variation hos jordegenskaperna. Idag är det vanligt att jorden avbildas som homogena lager med konstanta jordparametrar, som endast varierar i en riktning. Jordparametrarna kan dock ha en trend, t ex ökande hållfasthet, mot djupet.

En geoteknisk utredning sett ur statistisk synpunkt skiljer sig i initialskedet inte nämnvärt från en traditionell geoteknisk undersökning, se flödesschema nedan. Den geologiska sorteringen baseras dock på ingenjörsgelogisk erfarenhet, vilket innebär att man i ett första skede endast utför ett fåtal sonderingar, som tillsammans med tidigare erfarenhet ligger till grund för eventuell kompletterande undersökning. Efter den geologiska sorteringen sker en

analys av trender, variationer, rymdberoende och fluktuationer inom varje geologisk delformation för att uppskatta variationerna hos de sökta egenskaperna.

Exempel på hantering av en geoteknisk undersökning idag och med statistisk inriktning, i morgon.





Jordens egenskaper beskrivs statistiskt med ett osäkerhetsmoment genom trend och varians. Beroende på konstruktionens storlek kommer den varians som påverkar slutresultatet av beräkningen ofta att bli mindre än jordens varians, s k variansreduktion. Variansreduktionen beror av egenskapens punkt-till-punkt beroende, vilket kan beskrivas genom kovariansen eller fluktuationsavståndet. Genom att utnyttja t ex fluktuationsavståndet kan den egenskap som innebär att variationen minskar då volymen ökar beskrivas. Om den volym man är intresserad av har mindre storlek än som motsvarar fluktuationsavståndet kommer man att få en liten variansreduktion. Om volymen är betydligt större än vad som motsvarar fluktuationsavståndet kommer varianreduktionen att bli betydande.

För en tillämpning av statistiska metoder i praktiskt arbete är det viktigt att ta fram typvärden på fluktuationsavståndet för olika typer av svenska jordar. Fluktuationsavståndet bör bestämmas såväl vertikalt som horisontellt för olika försöksplatser för att med ledning av dessa kunna ge rekommendationer om värden att använda i praktiskt bruk, t ex vid bestämning av partialkoefficienter.

För att kunna arbeta med en på statistiska grunder baserad dimensioneringsmetod behövs en ändamålsenlig stokastisk jordmodell för att kunna översätta mätdata och förhandskunskap till indata i själva beräkningsmodellen. Den stokastiska jordmodellen skall ge erforderliga statistiska uppgifter för valet av karakteristiskt värde på jordparametern och samhörande värde på partialkoefficienten  $\gamma_m$ .

I kommande projekt vid SGI och KTH avses att ta fram och prova två modeller, nämligen:

- en som primärt skall användas vid praktisk beräkning med partialkoefficientmetoden och där ett huvudkrav är enkelhet i användandet (SGI-projekt)
- en fullständigare men mer komplicerad som skall användas för kalibrering av den enklare samt vid användande av rena statistiska metoder (KTH-projekt).

### 3.2 Krav

De framtagna modellerna skall i möjligaste mån uppfylla följande önskemål:

- Förhandskunskap skall kunna utnyttjas eftersom eljest ett litet antal prov ger en mycket stor spridning och orealistiskt höga partialkoefficienter.
- Metod och utförande skall beaktas
- Modellen skall kunna ta hänsyn till provpunkternas läge och "räckvidd"
- Variansreduktion och hänsyn till provantal skall vara inbyggt

Någon modell som fullt ut klarar dessa krav finns inte idag. En genomgång av befintliga metoder har gjorts och illustrerats i praktiska beräkningar, se kapitel 3.3.

En modell som tar hänsyn till att endast ett fåtal prover står till buds för bestämning av jordparametrar kan ge en direkt betalning i minskad osäkerhet och även ge möjlighet till ekonomisk optimering av undersökningsinsatserna.



### 3.3 Enkel jordmodell

Den enkla jordmodellen skall på ett relevant sätt ta hänsyn till att jordens egenskaper varierar i rymden samtidigt som den skall vara enkel att använda.

Den förenklade modellen föreslås tas fram enligt följande:

1. Förhandskunskap beträffande spridning och eventuellt även medelvärden sammanställs för några typiska geologier, med omfattande byggnadsverksamhet.
2. Metodik för val av antal prov och utvärdering av provresultat tas fram. Här skall även beskrivas hur avvikande värden skall hanteras.
3. Metodik för uppdatering tas fram och beskrivs.
4. Data samlas vad gäller autokorrelation (alt semivariogram).
5. Riktlinjer för variansreduktion tas fram. Eventuellt som grövre tumregler.

Förhandskunskapen är tänkt att sammanställas i en databank. Bestämningen avser främst fluktuationsavståndet vertikalt och horisontalt så att man skall få uppgifter om de avstånd inom vilka jordens egenskaper visar ett statistiskt samband. Sammanställningarna baseras på befintliga undersökningar där dessa finns i sådan omfattning att de kan behandlas statistiskt riktigt. Sådana undersökningar finns för t ex följande lokaler, där tidigare BFR-finansierade projekt utförts som Kolbytte-mon, Sturehof och Norrköping. Eventuellt bör vissa kompletteringar göras i fält för att få en god förhandskunskap om respektive område beträffande medelvärde, spridning och korrelation.

När det gäller kraven för de undersökningar som skall samlas in har följande minimikrav ställts upp:

- det bör finnas minst 10 borrhål inom ett område utgörande av en cirkel med 100 m i diameter
- även enstaka borrhål där provtagning skett med täta intervall på djupet kan vara av intresse
- det bör vara samma typ av undersökning i samtliga borrhål
- jordlagerföljden för området skall kunna beskrivas

Modellen kommer att vara uppbyggd enligt följande:

1. Tar hänsyn till att jordens egenskaper varierar i rymden.
2. Skall vara så utformad att den tar hänsyn till
  - undersökningsmetod
  - antal punkter
  - punkternas läge
  - undersökningsresultatens spridning
  - förhandskunskap.
3. Skall ge erforderliga statistiska uppgifter för valet av partialkoefficienten  $\gamma_m$ .
4. Enkel att använda.

Exemplet nedan vill visa på vilka metoder som det idag finns att tillgå och vad som saknas.

Exempel:

Data från tre borrhål i Göteborgsregionen finns tillgängligt, enligt nedan. Borrhålen ligger på en rät linje med  $\approx 50$  m inbördes avstånd.

Utifrån denna information önskas en bestämning av skjuvhållfasthetens medelvärde och (autoco) varians göras för att använda i sannolikhetsbaserade beräkningar.

Nivå (m)	$\tau_v$ - skjuvhållfasthet vinge (kPa)		
	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
3	13	15	15
5	14,5	14,5	16
7	16	14,5	17
9	15,5	16,5	16
11	20	20,5	20
13	23	19	24
15	24	23,5	26
17	28	26,5	26,5
19	32	33	30

För göteborgsleran kan man ofta teckna skjuvhållfastheten från vingprovning som:

$$\tau_v = a + 1,5 z \quad \text{där}$$

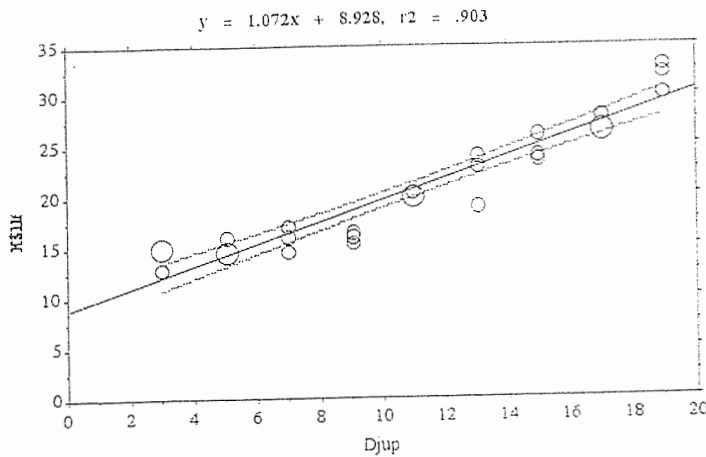
$z$  är djupet under markytan

$a$  beror av grundvattenytans läge och är i storleksordningen några kPa, dock max 14 kPa.

#### A. Information om punkternas inbördes läge utnyttjas ej

Informationsnivå 1. Enbart provdata. Klassisk metodik

Ett samband mellan skjuvhållfastheten och djupet kan fås genom att en sk regressionsanalys utförs på datan. Resultatet av regressionen visas i figuren nedan. Punkterna ligger nära en linje med ekvationen  $y = 1,072x + 8,928$  (den mittersta linjen). De två yttre linjerna visar standardavvikelsen. Korrelationskoefficienten,  $r$ , är ett mått på hur bra den uppskattade linjens lutning beskriver värdena.

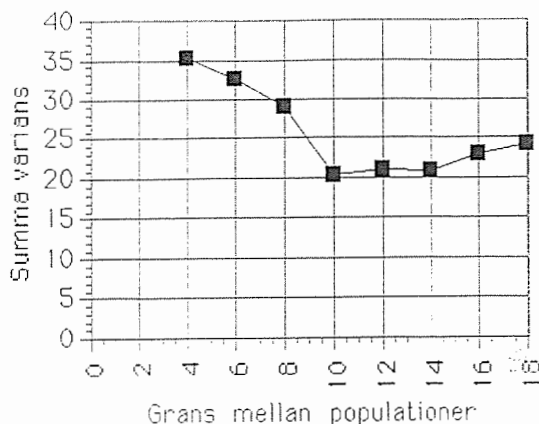


Förhandskunskapen om att skjvållfastheten ofta är konstant från markytan och ett stycke neråt har inte utnyttjats. Detta kan göras genom att dela upp datamängden och göra två regressionsanalyser, där den ena startar uppifrån och den andra utnyttjar resten av datamängden. Problemet är att avgöra på vilken nivå man skall dela datamängden. Ett sätt är att prova olika delningsnivåer och som slutligt val ta den där produkten  $r_1^2 \cdot r_2^2$  är max, där  $r_1$  är korrelationskoefficienten för den övre datamängden och  $r_2$  är korrelationskoefficienten för den nedre datamängden.

Brytpunktsnivå (m)	$r_1^2$	$r_2^2$	$r_1^2 \cdot r_2^2$
5	0,138	0,918	0,127
7	0,315	0,928	0,292
9	0,386	0,931	0,359
11	0,683	0,881	0,601

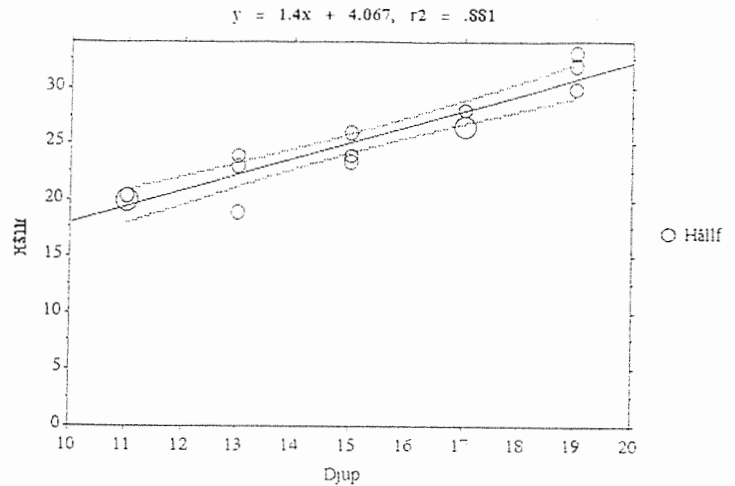
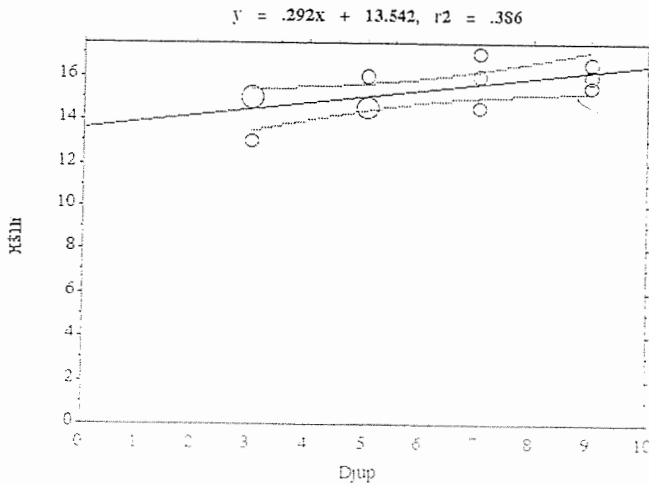
När man tittar på datan i grafisk form ovan ser man att en möjlig brytpunkt ligger vid 9 m djup, något som inte framgår av den statistiska analysen ovan. En möjlig förklaring är att en regression på hela materialet ger så god anpassning att det inte finns någon klar brytpunkt.

Ett annat sätt att utnyttja förhandskunskapen är att först försöka separera populationerna och sedan göra regressionsanalysen. En möjlig metod anges av Réhátí (1988), sid 243 ff, där det föreslås att man delar upp provmängden så att summan av lagrens varians (spridning) är minimum.



$$\text{variansen, } s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_j - \bar{x})^2$$

Enligt denna analys skulle man låta gränsen gå efter 9 m djup, dvs man låter data från 9 m ingå i den övre, konstanta delen.



I figurerna anges de punkter där mätvärden exakt sammanfaller med en större ring. Dessutom har 95% konfidensintervall angivits för den sanna regressionslinjens medelvärde.

I ovanstående metod har endast "hårda" data utnyttjats. En subjektiv kunskap har dock använts då man räknar med att provet kommer ur två populationer. Någon annan förkunskap har inte utnyttjats.

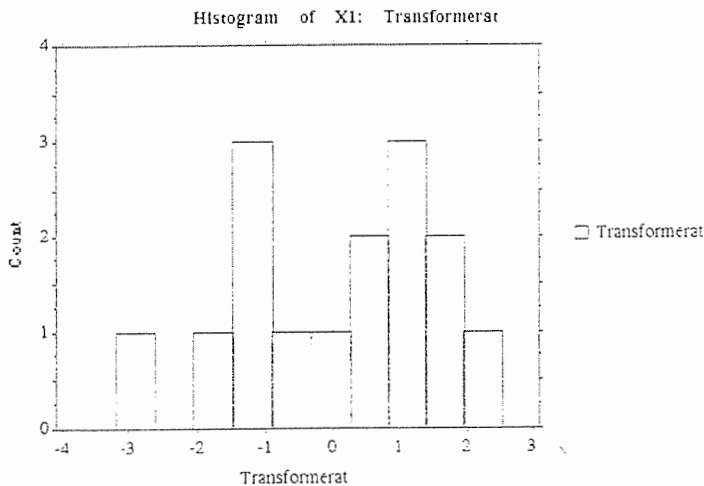
Informationsnivå 2. Förhandskunskap. Autokorrelation okänd.

I detta fall kan förhandskunskapen anges i statistiska termer, men inte ge några uppgifter om hur kunskap om provpunkternas inbördes läge skall utnyttjas. Ett sätt är att fortfarande använda regressionsanalys men att utnyttja bayesiansk formulering. Sådana metoder finns i den statistiska litteraturen men har veterligen ej prövats i geotekniska sammanhang.

En modell att hantera förhandskunskap ges i Olsson (1986), där en modell ges som bygger på dessa förutsättningar. Modellen redovisas som om medelvärdet är konstant mot djupet. Det gör att den inte kan användas förrän en transformering av data har gjorts. Transformering kan göras genom att dra bort en deterministisk trend med djupet och sedan tillämpa modellen på den nu djupberoende resten. Den trenddel man drar bort kan bestämmas med ögonmått, eller som här med resultatet från regressionsanalysen.

Följande data erhålls (endast delen djupare än 9 m behandlas) efter det att regressionslinjen,  $\text{hållf} = 1,4 \text{ djup} + 4$ , dragits bort.

X1: Transformerat					
Mean:	Std. Dev:	Std. Error:	Variance:	Coef. Var:	Count:
0,67	1,506	,389	2,267	2258,318	15
Minimum:	Maximum:	Range:	Sum:	Sum of Squares:	# Missing:
-3,2	2,4	5,6	1	31,8	0



0,712

Inom geotekniken brukar man ofta ansätta att variationskoefficienten är konstant, medan uppdateringsformeln istället antar en konstant standardavvikelse. Trots detta provas modellen med antagandet att den underliggande modellen är normalfördelad, med en standardavvikelse av 1,5 kPa. Vidare antas att medelvärdet är normalfördelat med ett väntevärde = 0 och en standardavvikelse = 0,2 kPa.

Uppdatering ger  $m'' = 0,02$  kPa och  $\sigma'' = 0,2$  kPa

Därefter kan  $m''$  adderas till trendlinjen och den totala standardavvikelsen kan bestämmas, vilken blir 1,51 kPa utan variansreduktion.

Följande frågor bör dock diskuteras:

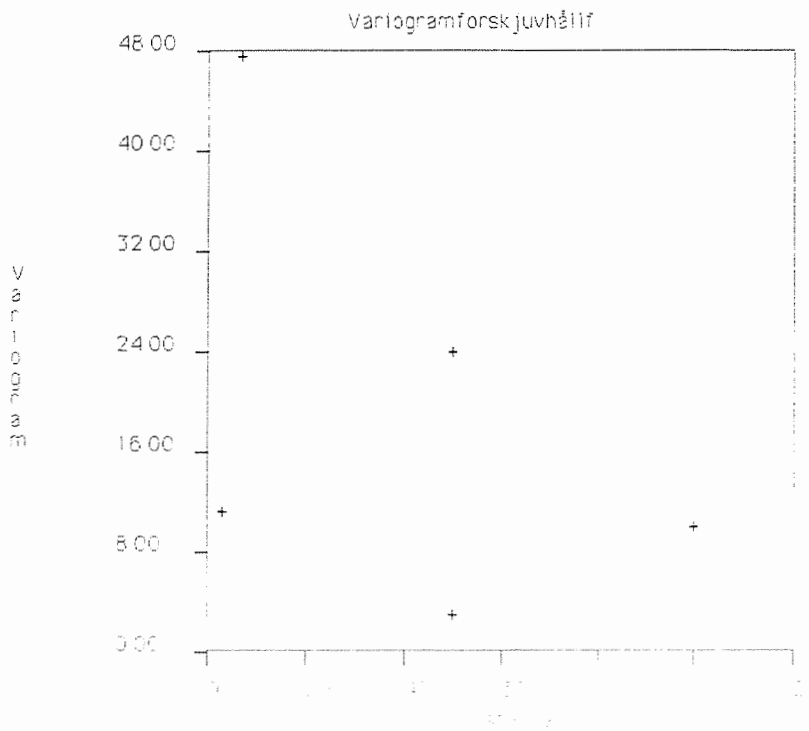
- Är standardavvikelsen konstant med djupet ?
- Får data utnyttjas både i regressionen och vid uppdateringen?

B Information om punkternas inbördes läge utnyttjas.

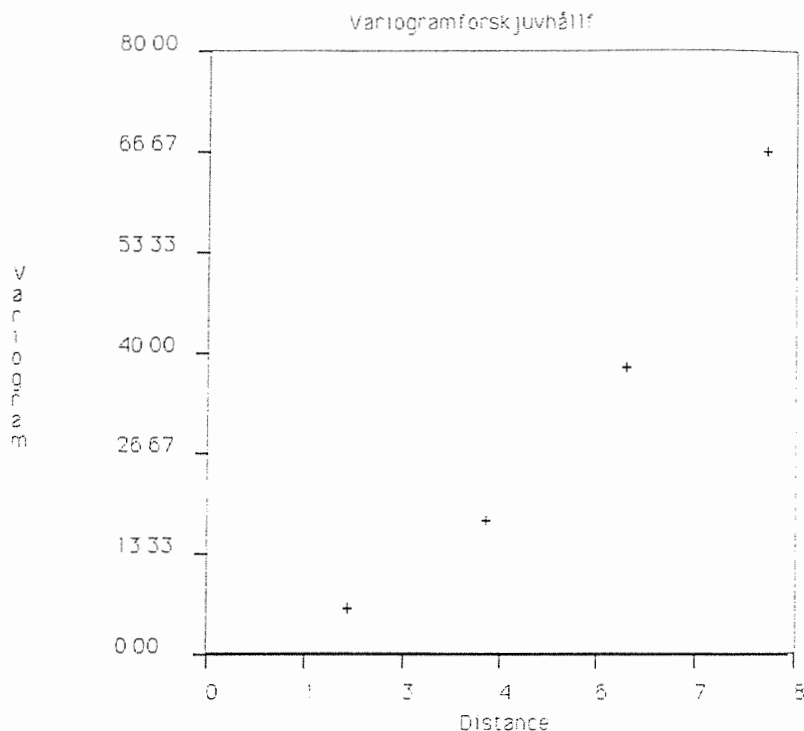
Informationsnivå 1. Enbart provdata. Geostatistik.

En metodik som kan användas när man har att göra med något rymdberoende hos variablerna är geostatistik. Beroendet beskrivs då med ett så kallat semivariogram eller, om man kan göra antagandet om (svag) stationaritet, en autokorrelationsfunktion. Problemet vid praktisk tillämpning är att bestämma variogrammet ur provdata, eftersom man behöver ett stort antal. Dessutom bör man vara försiktig med anisotropier och trender i materialet. I exemplet fallet finns två populationer, dels en uttalad trend, (som också leder till anisotropi). I exemplet nedan behandlas endast den djupa delen, dvs under 9 m djup. Nedan visas ett variogram framtaget med ursprungsdata. Variogrammet tar inte hänsyn till riktning:





Ur variogrammet går det inte att utläsa någon struktur. Ett horisontellt variogram ger inte heller några entydiga resultat, då data från mer än två inbördes avstånd saknas. Beräkningar av det experimentella variogrammet i vertikal riktning ger följande bild:



Parabelformen i variogrammet visar på en trend vilket inte kan hanteras på ett enkelt sätt.

Utan att visa det kan det påstås att geostatistik som metod har stora fördelar. Framför allt kan man få en uppskattning av noggrannheten i sin uppskattning och man kan även få den innan man tagit några prov. Detta förutsätter dock att man känner variogrammet.

Exemplen ovan visar på vilka metoder som finns idag, och vad som saknas. Sammanfattningsvis kan sägas att det finns metodik för att hantera problem där man inte har något

rymdberoende hos variabeln. Problem uppstår dock om man har en trend och samtidigt vill utnyttja förhandskunskap. Om rymdberoende finns kan problemet hanteras om man har ett mycket stort antal provpunkter så att utseendet hos variogrammet kan bestämmas. Om man inte har det måste man arbeta med förhandskunskap. Idag går detta om man tar prover för uppdatering på så stort inbördes avstånd att de är oberoende och det helst inte finns en trend mot djupet. Tas prover på mindre avstånd och man dessutom vill använda förhandskunskap saknas färdigutvecklad metodik. Bayesiansk kriging är dock en metod där man skulle kunna kombinera kriging med förhandskunskap. Problemet med variogram och behovet av många provpunkter kvarstår dock. En väg som är möjlig är att för typiska lokaler bestämma variogram (eller korrelationsfunktion) och använda dessa.

### 3.4 Kvalificerad modell

Denna modell avses primärt att byggas upp på krigningsmetodik med möjlighet att använda data från olika undersökningar och/eller subjektiva erfarenhetsdata, så kallad bayesiansk kriging. En metodik är att använda co-kriging, där man använder data från undersökningar av olika, men korrelerade egenskaper. Med en sådan metodik fås även möjlighet att direkt ta hänsyn till variansreduktion (block kriging) och att få en bild av hur variansen påverkas av avståndet till provpunkten.

Vid en tolkning av t ex lagergränser är det vanligaste förfarandet att man interpolerar rätlinjigt mellan punkterna, vilket kan leda till avvikelser från verkligheten. Om man har kunskap om hur t ex bergytan brukar fluktuera inom området kan man utnyttja denna kunskap för att få en mer tillförlitlig bild över hur bergytan fluktuerar mellan två kända punkter. En effektiv metod att göra detta är sk kriging. Vid denna metod beskriver man fluktuationen med ett sk semivariogram. Den förväntade skillnaden i egenskapen mellan två punkter beskrivs som en funktion av avståndet mellan punkterna. Variogrammets utseende speglar hur egenskaperna varierar: en jämn tillväxt hos variogrammet tyder på långsamma förändringar i naturen och en tröskel hos variogrammet visar det största avståndet inom vilket ett provresultat har något inflytande. Något som gör metoden användbar vid uppläggning av undersökningsstrategier är att man för att göra en uppskattning av osäkerheten inte behöver provresultaten utan endast undersökningspunkternas lägen. Man kan alltså direkt se hur mycket ett tänkt hål minskar osäkerheten.

## 4. OSÄKERHET I DIMENSIONERINGSMODELLEN

### 4.1 Allmänt

Dimensioneringsmodellens tillförlitlighet för ett speciellt problem kopplat till den valda undersökningsmetodens relevans måste vara känd för att man skall kunna bestämma värdet på  $\gamma_{Rd}$

Osäkerheten i dimensioneringsmodellen är ofta den av de osäkra parametrarna som bidrar mest, varför det är av största vikt att man kan ge något mått på denna. Eftersom dessa mått skall användas i statistiska beräkningar (eller för kalibrering av partialkoefficienter) behöver man, liksom för de övriga osäkra parametrarna, få både väntevärde och varians samt eventuella korrelationer.

Osäkerheten kan ofta betraktas som en faktor med vilken man skall multiplicera sitt beräknade värde för att få det "verkliga" (Olsson & Stille, 1984; Olsson, 1986; Ronold & Bjerager, 1992).

$$Z = I \cdot X$$

där

Z är "verkligt" uppträdande hos konstruktionen

X är beräknat d:o

I är dimensioneringsmodellosäkerheten

Ofta betraktas osäkerheten som en stokastisk variabel med medelvärdet 1. Så är inte alltid fallet i geotekniken eftersom man där har arbetat med empiri på säkra sidan. Se t ex Olsson (1986) sid 138. Hur stor spridningen är är osäker, men den bedöms ofta vara relativt stor, vilket kan ge en stor inverkan på partialkoefficienterna ( Olsson, Rehnman & Stille 1985).

Hur man skall ange osäkerheten är inte riktigt klart. Den bör dock vara en koefficient, men var den skall placeras bör utredas. Ett förslag som inte nödvändigtvis är rätt, är att placera den på dominerande motståndsvariabeln (materialparametern), vilket tillämpas i Europainorm 7.

Osäkerheten i dimensioneringsmodellen är i NR kopplad till beräkningsmetoden. Ett alternativ är att ange osäkerheten kopplad till beräkningsmetoden i kombination med metod för hållfasthetsbestämning.

## 4.2 Krav

Osäkerheten som ligger i dimensioneringsmodellen bör kunna beskrivas statistiskt med både väntevärde och varians samt eventuella korrelationer.

## 4.3 Sätt att bestämma osäkerheten i dimensioneringsmodellen

Att bestämma hur tillförlitlig en viss beräkningsmetod är för ett givet problem kan av praktiska skäl inte göras experimentiellt för alla olika metoder eftersom ett stort antal försök skulle behövas. Man blir istället hänvisad till att utnyttja expertutlåtanden om olika dimensioneringsmodellens tillförlitlighet och väga samman och utvärdera dessa.

Vid expertutsagor är det dock viktigt att man får en sannolikhetsutsaga som verkligen återspeglar expertens uppfattning. Metodiken för detta finns inom beslutsteorin se t ex Stael v Holstein & Matheson 1978. Även vid sammanvägning av flera experters omdömen finns risker, t ex att de inte är oberoende av varandra, se t ex Baecher 1979. Det finns dock mycket ledning i litteraturen, t ex Morris.

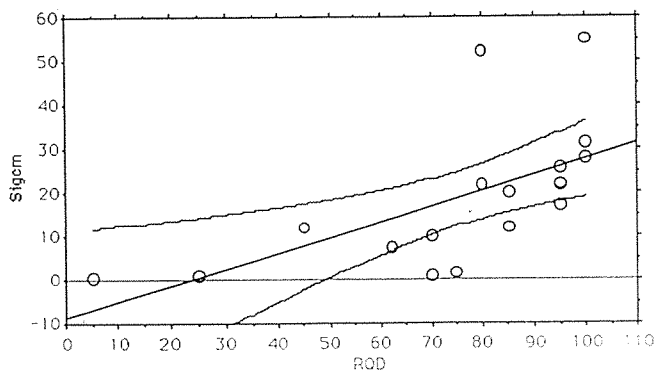
Ett annat sätt att ta fram dimensioneringsmodellens osäkerhet är att använda de undersökningar som finns och som visar olika dimensioneringsmodellens spridning, relaterade till undersökningsmetod för bl a sättningar, bärförmåga och jordtryck (Briaud).

#### 4.4 Försök

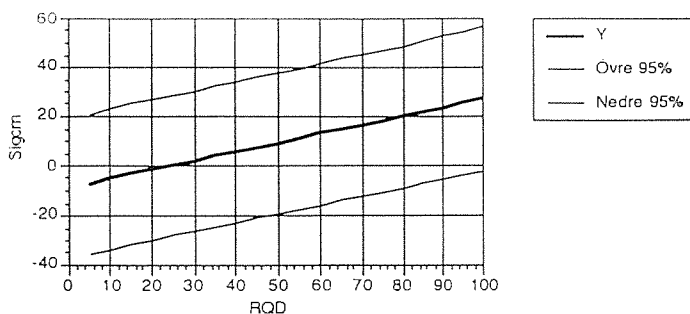
För att bestämma dimensioneringsmodellosäkerheten utifrån försök, skulle ett stort antal försök erfordras vilket innebär stora kostnader.

Ibland har man ett antal mätningar för vilka man kan jämföra beräknat uppträdande och verkligt uppträdande hos konstruktionen. Detta kan göras t ex med hjälp av regressionsanalys. Härvid skall beaktas att man väljer rätt konfidensintervall när det gäller att skatta standardavvikelsen. Man skall inte använda konfidensintervallet för skattning av medelvärdet av den beroende variabeln utan skall använda intervallet för skattning av enstaka utfall, ett intervall som är betydligt vidare, se t ex Olsson (1986) sid 141.

Nedan visas ett bergmekaniskt exempel på skillnaden mellan de två typerna av konfidensintervall.



Exempel på relation mellan RQD och SIGCM med 95% konfidensintervall för det sanna medelvärdet.



Exempel på relation mellan RQD och SIGCM med 95% konfidensintervall för förutsägelsen av ett enstaka värde.

I fallet när man bara har en oberoende variabel ges konfidensintervallet av

$$Y_0 = Y_0 \pm t_{.025} s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x_0^2}{\sum x_i^2} + 1}$$

där

Student-t har  $n - 2$  frihetsgrader.

I exemplet i avsnitt 4.6 fås

$t_{.025} = 2,120$  ( $n=18$  således 16 frihetsgrader)  
 variansen  $s^2$  ges av uttrycket

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \cdot \sum [Y_i - \bar{Y}]^2$$

som är en skattning av den sanna variansen  $\sigma^2$ .

#### 4.5 Subjektivt

När man saknar mätdata, eller som ett komplement till sådana, kan man använda sig av subjektiva sannolikheter ur expertutsagor. Tekniken för sådana bestämningar har i första hand tagits fram för användning i statistisk beslutsteori, och finns främst att finna i ekonomisk litteratur. Se t ex Stael v Holstein & Matheson (1978)

Väsentligt är att man observerar att det finns ett antal psykologiska faktorer (bias) som måste beaktas vid åsättandet av sannolikheterna. Om man har fler än en expert kommer frågan om sammanvägning och kalibrering in se Morris (1974,1977)

När det gäller subjektiva sannolikheter finns det inget som heter "rätt", eftersom dessa utsagor är personliga. Man måste däremot få en sannolikhetsutsaga som på ett "objektivt" sätt återspeglar expertens uppfattning. En medveten eller omedveten avvikelse mellan en persons svar och en noggrann representation av hans kunskap kallas "bias" (snedvridning). Orsakerna till bias kan vara motivationsberoende eller kognitiva. Motivationsbias orsakas av att den som åsätter sannolikheten medvetet eller omedvetet upplever att vissa svar ger en personlig belöning. Kognitiv bias uppkommer som medvetna eller omedvetna ändringar i personens svar, vilka på ett systematiskt sätt orsakas av den intellektuella procedur, som personen använder för att behandla sin kunskap så kan man t ex få en bias mot den senast erhållna informationen enbart därför att den är lättast att komma ihåg.

Det finns metoder att undvika bias eller att åtminstone minimera deras inflytande. Inom projektets ramar har en enkät påbörjats, se Bilaga 1. Vid användandet av en enkät blir risken för olika typer av bias större än vid intervjuer. Det är av största vikt att enkäten utformas så att effekten av vissa biasfaktorer minskas. Enkätens syfte är att i ett första skede välja ut ett antal experter till en andra omgång där expertutsagorna förmodligen kommer att ske som intervju eller som en specialenkät för respektive expert.

Enkäten syftar till att samla in utlåtanden om olika beräkningsmetoders tillförlitlighet för ett antal givna problem. Enkäten är tänkt att utformas enligt följande:

#### Typ av grundläggning

Plattgrundläggning		Pålgrundläggning	
Horisontal- deformationer	Vertikal- deformationer	Horisontal- deformationer	Vertikal- deformationer



Förutsättningar  
(friktionsjord)

Undersökningsmetod  
(CPT)

Bedömd tillförlitlighet  
för undersökningsmetoden

Beräkningsmetod

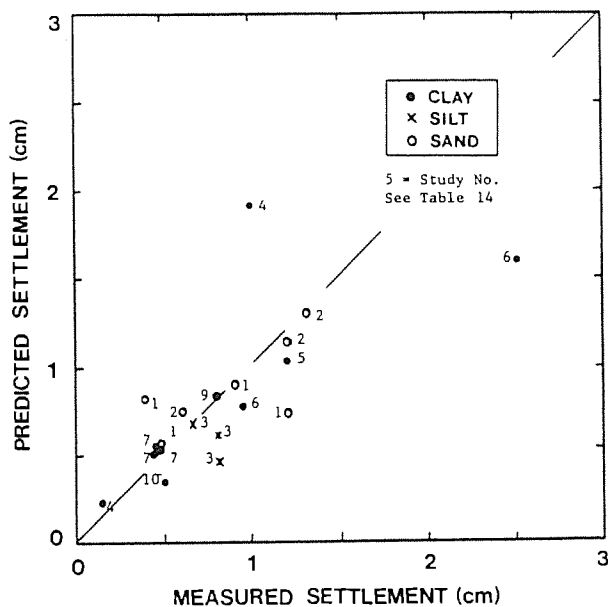
(De Beer)

(Schmertmann)

Bedömd tillförlitlighet  
för beräkningsmetoden

#### 4.6 Från utförda beräkningar

I litteraturen (Briaud 1991, 1991, 1992) har beräkningar gjorts av bl a bärförmåga och sättningar för olika geotekniska konstruktioner. Beräkningarna bygger på resultat från pressometer, dialatometer och spetstrycksondering. Nedan visas en jämförelse av sättningar, dels genom beräkningar baserade på resultat från pressometerförsök enligt Menard samt mätta resultat.



I etapp två är det tänkt att dessa undersökningar skall gås igenom och om möjligt ligga till grund för val av  $\gamma_{Rd}$  t ex genom att utnyttja regressionsanalys, som har beskrivits i kap 4.4.

## 5. REFERENSER

**Baecher, G B (1979).** Correlations among experts' opinions. Unpublished manuscript. MIT Boston.

**Bengtsson, P-E, Berggren, B, Ohlsson, L & Stille, H (1991).** Geoteknik och Statistik. BFR projekt 810430-4.

**Briaud, J-L, Miran J (1991).** The Flat Dilatometer Test. The Federal Highway Administration, Washington, D.C., July 1991.

**Briaud, J-L, Miran J (1991).** The Cone Penetrometer Test. The Federal Highway Administration, Washington, D.C., August 1991.

**Briaud, J-L (1992).** The Pressuremeter. Texas A&M University, College Station. Balkema, Rotterdam.

**Morris, P A (1974).** Decision analysis expert use. Management Science, Vol. 29, No. 9, May 1974.

**Morris, P A (1977).** Combining expert judgment: a bayesian approach. Management Science, Vol. 24, No. 7, March 1977.

**Nordiska kommittén för byggbestämmelser (1987).** Guidelines for Loading and Safety Regulations for Structural Design, NKB Report No 55E June 1987, Stockholm.

**Nybyggnadsregler, BFS 1988:18**

**Olsson, L & Stille, H (1984).** Partialkoefficientmetoden i geotekniken. Teoretisk grund. Rapport R52:1984. Byggforskningsrådet.

**Olsson, L (1986).** Användning av  $\beta$ -metoden i geotekniken - illustrerad med spontberäkning. Inst. för jord- och bergmekanik, KTH.

**Olsson, L, Rehnman, S-E & Stille, H (1985).** Partialkoefficientmetoden. Illustrerande beräkningar. Rapport R45:1985. Byggforskningsrådet.

**Rétháti, L (1988).** Probabilistic solutions in geotechnics. Elsevier.









**Staël von Holstein, C A & Matheson J E (1978).** A Manual for Encoding Probability Distributions.

**Sällfors, G (1990).** Punktskattningsmetoden. Chalmers Tekniska Högskola, Geohydrologiska forskningsgruppen, meddelande nr 89.

## 6. BILAGOR

**Projektplan**

Statistiskt beräknade partialkoefficienter till Nybyggnadsregler för geokonstruktioner

Uppgift	1993	1994
	jan feb mar apr maj jun jul aug sep okt nov dec	jan feb mar apr maj jun jul aug sep okt nov dec
Utskick, insamling och sammanställning av expertutsagor		
Beräkning av $\gamma_{Rd}$ utifrån utförda undersökningar		
Utredning av statistiska parametrar för jord		
Uppbyggnad av databank för ett antal typområden		
Kompletterande geotekniska undersökningar inklusive redovisning		
Utredning av tillförlitligheten i dimensioneringsmodeller utifrån enkätsvar		
Konstruktionsberäkningar och uppställande av krav för gränstillstånden		
Slutrapportering och information		

R = referensgruppmöte