



EXAMENSARBETE INOM SAMHÄLLSBYGGNAD,  
AVANCERAD NIVÅ, 30 HP  
*STOCKHOLM, SVERIGE 2017*

# **Sannolikhetsbaserad dimensionering av sprutbetong**

Fördelningar för tjocklek och böjdraghållfasthet

**PHILIP SUNESSON**

# **Sannolikhetsbaserad dimensionering av sprutbetong**

Fördelningar för tjocklek och  
böjdraghållfasthet

PHILIP SUNESEON

Examensarbete 17:03  
Kungliga Tekniska Högskolan, KTH  
Skolan för Arkitektur och Samhällsbyggnad  
Inst. för Bygghälsa  
Avd. Jord- och bergmekanik  
Stockholm, Sverige

© Philip Sunesson  
Examensarbete 17:03  
Avd. jord- och bergmekanik  
Kungliga Tekniska Högskolan  
Stockholm, 2017  
ISSN 1652-599X

## Sammanfattning

En av de sannolikhetsbaserade metoderna som kan användas för dimensionering av tunnlar är partialkoefficientmetoden. Denna metod ökar eller reducerar variabler med hjälp av partialkoefficienter, vilka kan kalibreras sannolikheteoretiskt. Eurokod tillhandahåller sådana partialkoefficienter för till exempel armerad betong. Problemet med partialkoefficienterna i Eurokod är dock att ingen skillnad görs med avseende på vad betongen skall användas till.

Detta examensarbete har därför syftat till att undersöka möjligheten att ta fram nya partialkoefficienter specifikt för sprutbetongförstärkning då den dimensionerande brottsmekanismen är böjbrott, detta med hjälp av tillförlitlighetsteori, FORM/FOSM. Böjbrott i sprutbetongen kan uppkomma då vidhäftningen mellan berg och sprutbetong är låg, och sprutbetongen måste bära eventuella bergblock med sin momentupptagande förmåga. För att ta fram partialkoefficienterna har uppmätt data på sprutbetongtjockleken och böjdraghållfastheten i en av Citybanans tunnlar, Norrströmstunneln, varit grunden. Statistiska fördelningar har tagits fram för att beskriva dessa data, för att möjliggöra användandet av dem i sannolikhetsanalysen.

Resultaten visade att en lognormalfördelning passade observerad data bäst för sprutbetongtjockleken, och en betafördelning passade bäst för böjdraghållfastheten. Vidare visade resultaten att sannolikhetsbaserade metoder vid dimensionering för denna brottsmekanism ännu inte kan rekommenderas, då de visade på en kraftig överdimensionering jämfört med hur det idag dimensioneras. Osäkerheterna kring vissa av de modeller och variabler som använts behöver först reduceras.

### Nyckelord

Sprutbetong, Berg, Sannolikhetsbaserad dimensionering, Tunnel



## **Abstract**

One of the probability based methods that may be used when designing a tunnel is the partial factor method. This method adjusts the value of variables with the help of partial factors, which may be calibrated using a reliability-based approach. The Eurocodes provide these partial factors for different materials and structures, such as reinforced concrete. A limitation with the provided partial factors from Eurocode is the lack of consideration for the usage of the concrete.

This thesis aims to investigate the possibility to derive new partial factors specifically for shotcrete reinforcement, for the failure mechanism of flexural failure. This has been done by means of reliability theory, FORM/FOSM. Flexural failure in shotcrete may occur when the adhesion between the rock and shotcrete is low. Further, the shotcrete has to have the capacity to withstand bending moments from the rocks. To derive the new partial factors, the measured data of thickness and flexural strength of shotcrete in one of Citybanan's tunnels, Norrströmstunneln, in central Stockholm have been used as the basis for the analysis. The data was described by a statistical distribution which enabled the usage of them in the reliability analysis.

The results showed that a lognormal distribution best described the shotcrete thickness while flexural strength was best fitted by a beta distribution. The results also showed that it is not recommended to use probabilistic methods in design for this failure mechanism unless uncertainties, arising from some of the models and variables used, are reduced. It clearly shows that it would lead to oversizing compared with the design methods used today.

## **Keywords**

Shotcrete thickness, Rock, Reliability analysis, Tunnel



## Förord

Detta är ett examensarbete som utförts på Avdelningen för jord-och bergmekanik vid Kungliga Tekniska Högskolan, och är den avslutande delen i min civilingenjörsutbildning inom Samhällsbyggnad.

Jag vill först och främst tacka mina handledare Dr. Johan Spross och Dr. Fredrik Johansson, som med kunskap och engagemang starkt bidragit till detta arbete. Deras hjälp och råd har varit mycket värdefulla. Dessutom vill jag rikta ett stort tack till doktoranderna William Bjureland och Andreas Sjölander för all den hjälp jag fått under arbetets gång. Jag vill även tacka Trafikverket som bidragit med den data som använts i arbetet. Sist men inte minst ett stort tack till familj och flickvän som stöttat mig under studietiden och examensarbetet.

Stockholm, februari 2017

*Philip Sunesson*

## Symbolförteckning

|                  |   |
|------------------|---|
| $a$              | Undre gräns i betafördelningen                                  |
| $b$              | Bultavstånd   |
| $c$              | Övre gräns i betafördelningen                                   |
| $d$              | Bultbrickans diameter   |
| $f_{lcrk}$       | Böjdraghållfasthet, sprutbetong                                 |
| $F_i(x)$         | Kumulativa funktionen för den stokastiska variabeln $i$         |
| $f_i(x)$         | Sannolikhetstäthetsfunktionen för den stokastiska variabeln $i$ |
| $FS$             | Säkerhetsfaktor   |
| $G$              | Gränsfunktion   |
| $M_{max}$        | Maximalt böjmoment, sprutbetong                                 |
| $N(\mu, \sigma)$ | Normalfördelning  |
| $n$              | Antal simuleringar i en Monte-Carlo simulering                  |
| $P$              | Sannolikhet   |
| $pf$             | Brottssannolikhet   |
| $q$              | Tunghet, berg <sup>1</sup>                                      |
| $R$              | Bärförmåga  |
| $R'$             | Standardiserad, normalfördelad bärförmåga                       |
| $R_m$            | Momentupptagande förmåga, sprutbetong                           |
| $r$              | Första formparametern i betafördelningen                        |
| $S$              | Lasteffekt  |
| $S'$             | Standardiserad, normalfördelad lasteffekt                       |
| $t_c$            | Tjocklek, sprutbetong   |
| $x_i^*$          | Dimensionerande värdet för stokastiska variabeln $i$            |
| $X_i$            | Stokastiska variabler   |

---

<sup>1</sup> Bergets tunghet brukar tilldelas symbolen  $\gamma$ , men för att undvika att den skall mistas för en partialkoefficient så har den i detta examensarbete tilldelats symbolen  $q$ .

|               |  |
|---------------|--|
| $x_{ki}$      | Karakteristiska värdet för den stokastiska variabeln $i$ |
| $y_i^*$       | Dimensioneringspunkten                                   |
| $Y_i$         | Standardiserade normalfördelade variabler                |
| $z$           | Andra formparameter i betafördelningen                   |
| $\alpha_i$    | Sensitivitetsfaktor för den stokastiska variabeln $i$    |
| $\beta$       | Säkerhetsindex   |
| $\gamma_i$    | Partialkoefficient för den stokastiska variabeln $i$     |
| $\varepsilon$ | Signifikansnivå  |
| $\mu$         | Medelvärde   |
| $\sigma$      | Standardavvikelse  |
| $\Phi$        | Standard-normalfördelningen                              |



## Innehållsförteckning

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Inledning .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Bakgrund .....   | 1         |
| 1.2. Syfte och mål .....  | 3         |
| 1.3. Avgränsningar .....  | 3         |
| 1.4. Disponering av examensarbetet .....                                    | 4         |
| <br>  |           |
| <b>2. Geoteknisk osäkerhet och sannolikhetsbaserad dimensionering .....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1. Osäkerheter .....  | 5         |
| 2.2. Sannolikhetsbaserad dimensionering .....                               | 7         |
| 2.2.1. Deterministisk analys .....  | 7         |
| 2.2.2. Sannolikhetsbaserade metoder .....                                   | 7         |
| 2.2.3. Säkerhetsindex .....   | 10        |
| 2.2.4. FORM/FOSM .....  | 12        |
| 2.2.5. Hasofer & Lind .....   | 12        |
| 2.2.6. Monte-Carlo simulering .....   | 14        |
| 2.2.7. Partialkoefficientmetoden .....                                      | 14        |
| 2.2.8. Goodness-of-fit .....  | 16        |
| <br>  |           |
| <b>3. Sprutbetongförstärkning .....</b>                                     | <b>17</b> |
| 3.1. Böjbrott i Sprutbetong .....   | 17        |
| 3.2. Norrströmstunneln .....  | 21        |
| 3.2.1. Kontroll av sprutbetong i Norrströmstunneln .....                    | 21        |
| 3.3. Accepterad brottsannolikhet .....                                      | 22        |
| 3.4. Forskning om sannolikhetsbaserad dimensionering för tunnlarna ..       | 23        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4. Bestämning av statistiska fördelningar .....</b>        | <b>25</b>  |
| <b>4.1. Resultat .....</b>                                    | <b>26</b>  |
| <b>4.2. Diskussion .....</b>                                  | <b>29</b>  |
| <br>  |            |
| <b>5. Sannolikhetsanalys för böjbrott i sprutbetong .....</b> | <b>33</b>  |
| <b>5.1. Gränsfunktion .....</b>                               | <b>33</b>  |
| 5.1.1. Maximalt böjmoment .....                               | 33         |
| 5.1.2. Momentupptagande förmåga .....                         | 35         |
| <b>5.2. Analys i COMREL .....</b>                             | <b>35</b>  |
| <b>5.3. Alternativt böjmoment .....</b>                       | <b>36</b>  |
| 5.3.1. Stokastiska variabler .....                            | 38         |
| <br>  |            |
| <b>6. Resultat .....</b>                                      | <b>39</b>  |
| <b>6.1. Brottsannolikhet från COMREL .....</b>                | <b>39</b>  |
| <b>6.2. Partialkoefficienter .....</b>                        | <b>41</b>  |
| <b>6.3. Alternativt böjmoment .....</b>                       | <b>43</b>  |
| <br>  |            |
| <b>7. Diskussion .....</b>                                    | <b>45</b>  |
| <br>  |            |
| <b>8. Avslutande kommentarer .....</b>                        | <b>49</b>  |
| 8.1. Statistiska fördelningar .....                           | 49         |
| 8.2. Sannolikhetsbaserad dimensionering .....                 | 49         |
| <br>  |            |
| <b>9. Källförteckning .....</b>                               | <b>51</b>  |
| <br>  |            |
| <b>Bilaga 1 .....</b>   | <b>I</b>   |
| <b>Bilaga 2 .....</b>   | <b>III</b> |

# 1. Inledning

## 1.1. Bakgrund

I Sverige finns enligt Trafikverket cirka 190 större tunnlar. Av dessa är 165 järnvägstunnlar och 25 vägtunnlar (Trafikverket, 2015). Det är viktigt att dessa tunnlar såväl som framtida tunnlar håller en mycket hög säkerhet. Konsekvenserna för ett brott kan vara allt ifrån kostnader för återuppbyggnad till skador och dödsfall för människor. Ju mer utvecklad infrastrukturen i samhället blir, desto högre kan efterfrågan på tunnlar förväntas bli. Dessutom har inte tunnlar den negativa barriäreffekt som kan upplevas av en vanlig väg eller järnväg.

Den dominerande dimensioneringsmetoden, inom de allra flesta konstruktionsgrenarna och så även tunnelkonstruktion, har historiskt varit den deterministiska. Det har dock uppstått en önskan och strävan de senaste årtionden att gå från en deterministisk till en sannolikhetsbaserad metod. Sannolikhetsbaserad dimensionering besitter den fördelen att hänsyn till osäkerheterna tas för varje enskild variabel, medan deterministiska metoder uttrycker osäkerheten i en enda säkerhetsfaktor. Sannolikhetsbaserad dimensionering är en tillåten metod enligt regelverket Eurokod. Metoden är dock svårare att tillämpa för bergkonstruktioner jämfört med exempelvis byggnadsverk då osäkerheterna i bergparametrarna är svårare att kvantifiera.

För att en tunnel skall klassas som säker krävs ofta någon form av förstärkning. De vanligaste metoderna vid förstärkning av tunnlar är med bergbultar och/eller sprutbetong. Vid användning av sprutbetong måste denna dimensioneras baserat på vilken brottsmekanism som det kan antas finnas risk för.

För cirka 20 år sedan skrev Fredriksson (1994) ett PM kallat "Bergmekanik. Dimensionering av sprutbetong" i samband med

konstruerandet av Södra länken i Stockholm. Författaren beskriver där de två vanligaste brottsmekanismerna för sprutbetongen. En av dessa är vad detta examensarbete kommer att handla om, nämligen *brott vid dålig vidhäftningen och böjbrott i sprutbetongen*. Fredriksson beskriver i sitt PM de formler och antaganden som Trafikverket i viss grad refererar till i sin handbok ”Projektering av bergkonstruktioner” (Lindfors et al., 2015).

År 2005 skrev Stille et al. (2005) en rapport kallad ”Dimensionering av samverkanskonstruktioner i berg med sannolikhetsbaserade metoder”. Denna studie börjar med att konstatera att Eurokod i grunden har ett sannolikhetsbaserat betraktelsesätt vid dimensionering av bergrum, men att tillämpningen kan ses som deterministisk då den baseras på delsäkerhetsfaktorer med fasta partialkoefficienter.

I rapporten tas även grunderna för hur användningen av sannolikhetsbaserade metoder kan användas för bergkonstruktioner och det beskrivs hur de bergmekaniska parametrarna kan beskrivas när en sådan metod skall användas. Slutsatsen författarna kom fram till var att osäkerheterna rörande bergets mekaniska egenskaper och den mekaniska modellen gör att dimensionering av bergkonstruktioner ofta blir komplex. Detta gör att en ”fix-design” med säkerhetsfaktorer eller partialkoefficienter ofta leder till en alltför konservativ design, eftersom det inte går att utnyttja de erfarenheter som redan erhållits från tidigare tunneldrivning. Istället för att basera dimensioneringen på partialkoefficientmetoden eller sannolikhetsbaserade metoder rekommenderas att använda observationsmetoden integrerat med sannolikhetsbaserade metoder för att kvantifiera osäkerheterna i bergets mekaniska egenskaper och beräkna konstruktionens brottsannolikhet.

För att undersöka en parameters statistiska fördelning behövs mätdata av den specifika parametern. Sprutbetongens tjocklek,  $t_c$ , och böjdraghållfasthet,  $f_{f_{lcrk}}$ , är något som alltid måste kontrolleras och därför mäts vid konstruktion av tunnlrar. Dessa data används dock oftast bara för att kontrollera den egna designen. Denna rapport har därför använt mätningarna av  $t_c$  samt  $f_{f_{lcrk}}$ , som uppmättes vid kontrollen av Norrströmstunneln i Citybanan för att undersöka deras statistiska

fördelningar. Efter detta har ett exempel på en sannolikhetsbaserad analys genomförts med de två parametrarna som grund.

## 1.2. Syfte och mål

Det huvudsakliga syftet med rapporten är att undersöka de statistiska fördelningarna av  $t_c$  och  $f_{lcrk}$ , med hjälp av data som insamlats under den kontroll som utförts av de två parametrarna i Norrströmstunneln. Utöver detta har en sannolikhetsbaserad analys av ett specifikt brottstillstånd utförts. Brottstillståndet som undersökts är när dålig vidhäftning råder mellan sprutbetong och berget så att böjbrott i sprutbetongen uppstår. Genom denna analys har partialkoefficienter tagits fram för armerad sprutbetong och jämförts med de som idag rekommenderas i Trafikverkets handbok "Projektering av bergkonstruktioner". Partialkoefficienterna som Trafikverket rekommenderar är från Eurokod och används till alla typer av armerad betong, varför det är intressant att jämföra med partialkoefficienter som är specifikt för armerad sprutbetong i samband med blockstabilitet.

## 1.3. Avgränsningar

Detta examensarbete har endast fokuserat på brottsmekanismen böjbrott i sprutbetongen på grund av dålig vidhäftning mellan berg och sprutbetong. Då denna specifika brottsmekanismen undersökts antas därmed att ingen vidhäftningshållfasthet råder mellan berg och sprutbetong. Vid dimensionering brukar även stansning av bergbult genom sprutbetongen analyseras, men denna brottsmekanismen har inte beaktats.

Bergmassan som belastar sprutbetongen antas inte ha någon styvhet och samverkar därför inte med sprutbetongen vilket är ett konservativt antagande. Om berget skulle ha en viss styvhet skulle det dimensionerande momentet minska och en reduktion av  $t_c$  skulle kunna gjorts.

## 1.4. Disponering av examensarbetet

Kapitel 2 innehåller teorin bakom osäkerhet och sannolikhetsanalys, samt hur de är kopplade till de partialkoefficienter som kan används vid dimensionering.

Kapitel 3 beskriver grundläggande teori om sprutbetongförstärkning, teori om den brottsmekanism som undersökts, samt om accepterad brottsannolikhet. I slutet av kapitlet finns även lite information om tidigare forskning inom sannolikhetsbaserad dimensionering av tunnlar.

Kapitel 4 beskriver hur de statistiska fördelningarna för den observerade data som insamlats från kontrollen av Norrströmstunneln tagits fram. I slutet av kapitlet diskuteras även resultaten av dessa och de största osäkerheterna lyfts fram.

Kapitel 5 innehåller metoden för den sannolikhetsanalys som utförts. För analysen har COMREL använts, som är ett program för sannolikhetsbaserad modellering. Även MATLAB har använts för att genomföra en Monte Carlo simulering.

Kapitel 6 presenterar de resultat som erhållits från sannolikhetsanalysen via figurer och tabeller.

Kapitel 7 är en diskussion av resultaten från kapitel 6. I detta kapitel diskuteras främst osäkerheterna i modellen

Kapitel 8 är det sista kapitlet, där det ges några avslutande kommentarer av examensarbetet.

Därefter följer källförteckning samt de bilagor som det hänvisas till i examensarbetet.

## 2. Geoteknisk osäkerhet och sannolikhetsbaserad dimensionering

### 2.1. Osäkerheter

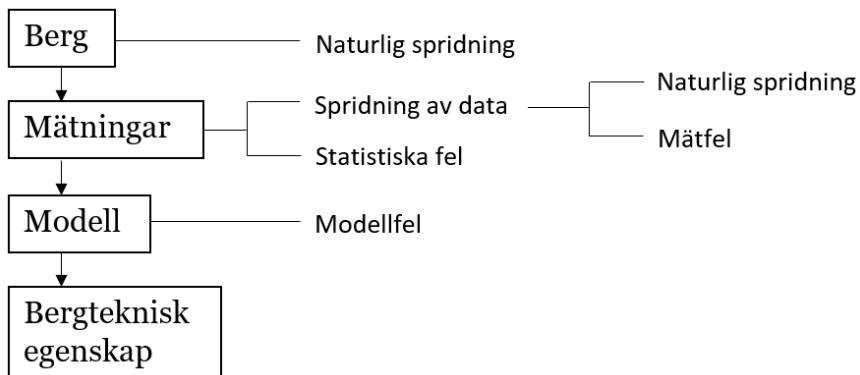
Det finns två olika huvudkategorier av osäkerhet som ofta beskrivs i litteraturen om ingenjörsanalyser (Baecher & Christian, 2003). Den första kategorien av osäkerhet kallas aleatorisk osäkerhet och är kopplad till naturlig spridning. Denna typ av osäkerhet kan således inte reduceras med mer information. Enklaste sättet att beskriva detta är genom kast med en vanlig tärning. Det är omöjligt att beräkna vad en tärning kommer att visa trots att kunskap finns om tidigare kast med tärningen.

Den andra kategorien är kopplad till kunskap och kallas epistemisk osäkerhet. Grundläggande för epistemisk osäkerhet är att den kan reduceras om mer tester utförs eller mer information insamlas. Ett enkelt sätt att beskriva epistemisk osäkerhet är genom att föreställa sig en blandad kortlek som ligger uppochnedvänd. Ju fler kort som vänds upp ur kortleken desto bättre kunskap finns om vilka kort som finns kvar, och den epistemiska osäkerheten för okända kort reduceras.

Till epistemiska osäkerheter brukar modellosäkerheter samt parameterosäkerheter räknas. Modellosäkerhet påvisar hur väl en matematisk modell speglar verkligheten medan parameterosäkerhet i sin tur kan beskrivas av hur väl parametrarna i modellen kan bestämmas. En annan typ av epistemisk osäkerhet är den så kallade operativa osäkerheten som har att göra med vilka som utför arbetet och individuella skillnader i personalen.

Den totala osäkerheten erhålls då alla aktuella felkällor beaktas. Ett exempel på felkällor som kan uppkomma då bergtekniska egenskaper skall bestämmas illustreras i Figur 2.1. Vid mätningar kan fel uppkomma till följd av hur mätdata hanteras och nedtecknas, men även på grund av

för få mätpunkter (Müller, 2013). När mätdata sedan används i en matematisk eller statistisk modell fås ett modellfel om modellen inte speglar verkligheten fullt ut (vilket en modell sällan kan göra). Att undersöka en parameter kan följaktligen göra att man minskar den epistemiska osäkerheten. Det är dock endast möjligt till en viss punkt varefter den naturliga spridningen i det man mäter återstår (Spross, 2016).



Figur 2.1 Felkällor som kan vara aktuella när en bergmekanisk egenskap skall erhållas från mätningar (Spross, 2016).

## 2.2. Sannolikhetsbaserad dimensionering

Det mest grundläggande vid säkerhetsdimensionering är att försäkra att lasteffekterna,  $S$ , ej överstiger bärförmågan,  $R$ , hos konstruktionen under dess givna livslängd (Melchers, 1999). En konstruktion anses därför säker då följande villkor är uppfyllt:

$$R > S \quad (2.1)$$

där  $R$  och  $S$  kan beskrivas av till exempel medelvärde,  $\mu$ , eller en percentil.

### 2.2.1. Deterministisk analys

Historiskt sett har deterministiska metoder för att analysera säkerheten varit dominerande. En mycket vanlig deterministisk metod för att kombinera osäkerheterna av  $R$  och  $S$  är med en säkerhetsfaktor (Baecher & Christian, 2003). Följande villkor skall då uppfyllas för att konstruktionen skall klassas som säker:

$$\frac{R}{FS} \geq S \quad (2.2)$$

Där  $FS$  är säkerhetsfaktorn vilken kan vara vald baserad på till exempel observationer, tidigare erfarenhet eller ekonomiska och politiska grunder (Melchers, 1999).

### 2.2.2. Sannolikhetsbaserade metoder

För sannolikhetsbaserade metoder är det första steget att ställa upp en gränsfunktion,  $G$ . Denna funktion innehåller stokastiska variabler,  $X_i$ , som beskriver de olika krav som ställs på en konstruktion för antingen brott- eller bruksgräns. Variabler i  $G$  kan till exempel beskriva lasterna eller materialegenskaperna (Langford & Diederichs, 2015). Brott för en konstruktion kan således beskrivas på följande sätt (Melchers, 1999):

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0 \quad (2.3)$$

Sannolikheten,  $pf$ , för att konstruktionen inte skall klara de uppställda kraven kan således beskrivas enligt:

$$pf = P[G(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0] \quad (2.4)$$

Någon form av sannolikhetstäthetsfunktion brukar användas för att beskriva  $X_i$ . Två av de vanligaste täthetsfunktionerna är normalfördelning och lognormalfördelning. Fördelningarna beskrivs ofta av sina statistiska moment. Normalfördelningen har till exempel momenten väntevärdet,  $\mu$ , samt standardavvikelse,  $\sigma$ . Utöver detta är det värt att nämna att arean under alla fördelningar alltid är lika med 1.

För den mest grundläggande sannolikhetsanalysen kan  $G$  skrivas med endast de två tidigare nämnda variablerna,  $S$  och  $R$  (Melchers, 1999). En rad olika ekvationer kan användas för att beskriva  $pf$ , till exempel:

$$pf = P(R \leq S) \quad (2.5a)$$

$$= P(R - S \leq 0) \quad (2.5b)$$

$$= P\left(\frac{R}{S} \leq 1\right) \quad (2.5c)$$

$$= P(\ln R - \ln S \leq 0) \quad (2.5d)$$

och mer generellt brukar det skrivas med ekvation:

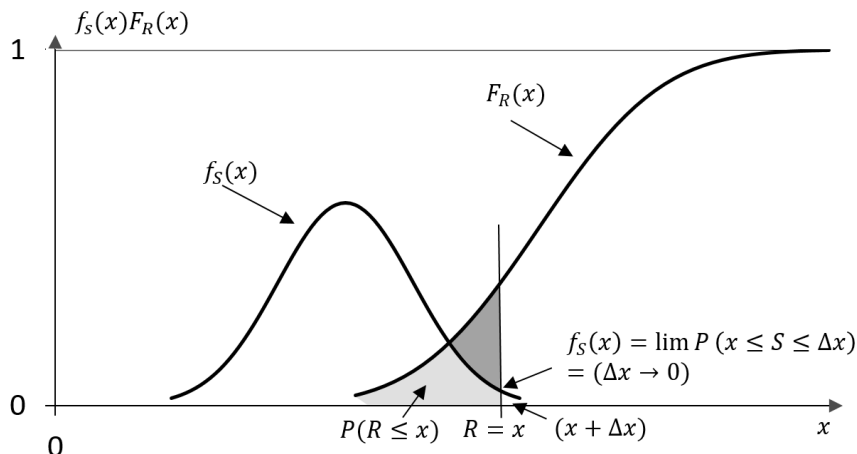
$$= P[G(R, S) \leq 0] \quad (2.5e)$$

Om  $S$  och  $R$  antas vara oberoende och ej korrelerade med varandra kan  $pf$  även skrivas som:

$$pf = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} (F_R(x) f_S(x) dx) \quad (2.6)$$

där  $F_R(x)$  beskriver sannolikheten att  $R$  är mindre eller lika med  $x$ , vilket skulle leda till brott på konstruktionen (Melchers, 1999).  $f_S(x)$  representerar sannolikheten att  $S$  har ett värde mellan  $x$  och  $x + dx$  då  $dx \rightarrow 0$ . Genom att se på alla möjliga  $x$ , det vill säga integralen mellan  $-\infty$  till  $\infty$ , erhålls den totala sannolikheten för brott. Denna integral kallas även för "convolution integral" och förklaras bäst i Figur 2.2. Det kan vara önskvärt att ansätta den nedre gränsen i integralen till 0 då negativa värden oftast inte är möjligt för till exempel en bärförmåga. Det är också möjligt om både  $R$  och  $S$  beskrivs med en bunden fördelning som inte kan anta negativa värden. För en obunden fördelning, som normalfördelningen, ger det dock upphov till ett fel.

För vissa fördelningar av  $S$  och  $R$  är det möjligt att beräkna integralen ovan (Melchers, 1999). Det är till exempel möjligt när båda variablerna är normalfördelade med medelvärden  $\mu_S$ ,  $\mu_R$  samt standardavvikelse  $\sigma_S$ ,  $\sigma_R$ . Medelvärde samt standardavvikelse för  $G$  kan erhålls genom:



Figur 2.2 Beskrivning av "convolution integral" (Melchers, 1999).

$$\mu_G = \mu_R - \mu_S \quad (2.7)$$

$$\sigma_G = \sqrt{(\sigma_R)^2 + (\sigma_S)^2} \quad (2.8)$$

Med hjälp av ekvation (2.6) fås då:

$$pf = P(R - S \leq 0) = P(G \leq 0) = \Phi\left(\frac{-(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{(\sigma_R)^2 + (\sigma_S)^2}}\right) \quad (2.9)$$

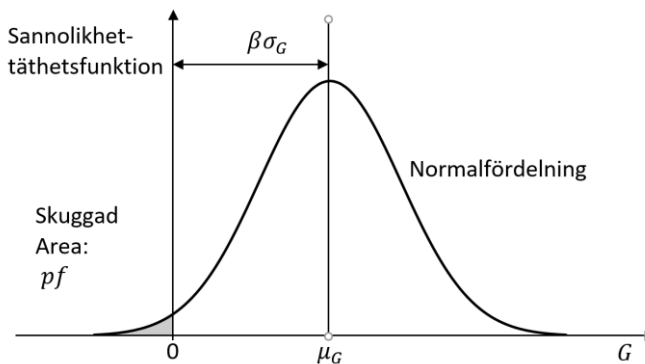
Där  $\Phi$  anger en standard-normalfördelad funktion, det vill säga  $N(0,1)$ .

### 2.2.3. Säkerhetsindex

Ett annat vanligt alternativ för att beskriva sannolikheten för brott av en konstruktion är med ett säkerhetsindex,  $\beta$  (Melchers, 1999). Ett  $\beta$  definierar sannolikheten för brottvärdet och erhålls av funktionen:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (2.10)$$

Det kan även ses som antalet standardavvikelser som  $\mu_G$  ligger från brottgränsen ( $G = 0$ ) vilket illustreras i Figur 2.3.



Figur 2.3 Illustration av  $\beta$  för  $G$  bestående av två normalfördelade stokastiska variabler (Westberg, 2010).

Det betyder att ju säkrare en konstruktion är, desto lägre är värdet för  $pf$  och desto högre är värdet för  $\beta$  (Melchers, 1999). Den exakta relationen mellan  $\beta$  och  $pf$  erhålls med ekvation (2.11). Hur  $\beta$  förhåller sig till  $pf$  visas även i tabell 2.1.

$$pf = \Phi(-\beta) \quad (2.11)$$

För att en konstruktion skall anses säker jämförs antingen  $pf$  eller  $\beta$  med värden som anses acceptabla, efter en kod eller andra bestämmelser, enligt:

$$\beta \geq \beta_{target} \quad (2.12)$$

$$pf \leq pf_{target} \quad (2.13)$$

Värden på  $\beta_{target}$  från Eurokod samt  $pf_{target}$  från Trafikverket är presenterade i Kapitel 3.3.

Tabell 2.1 Några exempel på  $\beta$  och dess relaterade  $pf$

| $\beta$ | $pf$                  |
|---------|-----------------------|
| 2,5     | $6,210 \cdot 10^{-3}$ |
| 2,75    | $2,980 \cdot 10^{-3}$ |
| 3       | $1,350 \cdot 10^{-3}$ |
| 3,25    | $5,770 \cdot 10^{-4}$ |
| 3,5     | $2,326 \cdot 10^{-4}$ |
| 3,75    | $8,837 \cdot 10^{-5}$ |
| 4       | $3,162 \cdot 10^{-5}$ |
| 4,25    | $1,067 \cdot 10^{-5}$ |
| 4,5     | $3,391 \cdot 10^{-6}$ |
| 4,75    | $1,015 \cdot 10^{-6}$ |
| 5       | $2,859 \cdot 10^{-7}$ |

### 2.2.4. FORM/FOSM

För de flesta sannolikhetsbaserade problem går integralen i ekvation (2.6) inte att lösa analytiskt och då kan "First-order second-moment" FOSM, eller "First-order reliability method" FORM, användas istället (Melchers, 1999). Dessa metoder omvandlar  $G$  från att vara icke linjär till att vara linjär, och använder sig av de två första statistiska momenten i variablernas täthetsfunktion, det vill säga  $\mu$  och  $\sigma$ .

### 2.2.5. Hasofer & Lind

Som tidigare nämnts kan  $G$  vara definierad enligt:

$$G = R - S = 0 \quad (2.14)$$

men den kan även definieras som:

$$G = \frac{R}{S} - 1 = 0 \quad (2.15)$$

Dessa två ekvationer kan dock ge olika resultat vid en sannolikhetsanalys vilket innebär ett problem med invarians (Baecher & Christian, 2003). För att undkomma detta problem föreslog Hasofer & Lind (1974) en transformation av  $X_i$  till standardiserade normalfördelade variabler,  $Y_i$ , med ekvationen:

$$Y_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (2.16)$$

där  $\mu_{X_i}$  och  $\sigma_{X_i}$  är medelvärdet respektive standardavvikelsen av  $X_i$ . Dessa transformerade variabler kan sättas in i  $G$  vilket ger en linjär transformerad gränsv funktion:

$$G = R' - S' = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} - \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} = 0 \quad (2.17)$$

Värdet på  $\beta$  kan då beräknas som det kortaste avståndet från  $G$  till origo med följande ekvation:

$$\beta = \min \left( \left( \sum_{i=1}^n (y'_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (2.18)$$

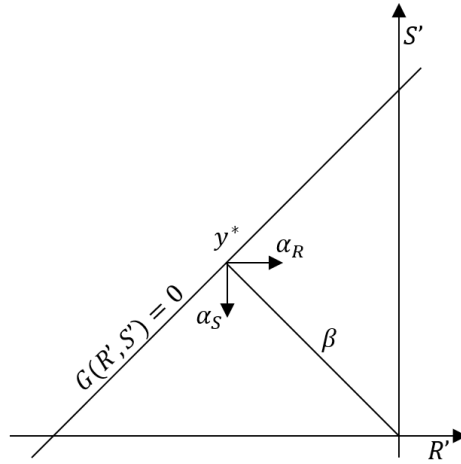
Dimensioneringspunkten,  $y_i^*$ , för konstruktionen erhålls av:

$$y_i^* = -\alpha_i \cdot \beta \quad (2.19)$$

samtidigt som:

$$\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2} = 1 \quad (2.20)$$

där  $\alpha_i$  är sensitivitetsfaktorn som anger hur mycket varje enskild variabel påverkar det slutliga resultatet. Små värden på  $\alpha_i$  gör att problemet kan förenklas genom att variabeln då kan betraktas som deterministisk och inte slumpmässig, utan att det ger stora fel. Ett annat sätt att beskriva  $\alpha_i$  är som cosinusriktningen för dimensioneringspunkten, illustrerad i Figur 2.4.



Figur 2.4 Illustration av  $\alpha_i$  som cosinusriktningen för dimensioneringspunkten tillsammans med  $\beta$  samt den transformerade gränsfunktionen (Westberg, 2010).

### 2.2.6. Monte-Carlo simulering

En metod där  $pf$  räknas ut med hjälp av simulering är med Monte-Carlo-simulering, som är beskriven i ekvation (2.21) (Lemaire, 2005). Metoden går ut på att simulera tillräckligt många slumpmässigt valda resultat av  $G$  för att räkna hur många av dessa som leder till brott. Om  $n$  är antalet simuleringar kommer  $pf$  gå mot den verkliga sannolikheten för brott då  $n \rightarrow \infty$ , givet att modellen som ställts upp är korrekt. Då det dock inte går att göra oändligt många simuleringar är detta endast en approximation.

$$pf \approx \frac{\text{Antal simuleringar då } G(R, S) \leq 0}{n} \quad (2.21)$$

### 2.2.7. Partialkoefficientmetoden

Partialkoefficientmetoden kan ses som en blandning av en sannolikhetsbaserad och en deterministisk metod. Där fasta partialkoefficienter används, som dock kan kalibreras genom sannolikhetsbaserade metoder (Stille et al., 2005).

Eurokoderna bidrar med partialkoefficienter, där grundvariablerna såsom last, bärförmågor och geometriska storheter omvandlas till aktuella dimensioneringsvärden med hjälp av partialkoefficienter (CEN, 2002). För att använda denna metod måste fem allmänna regler enligt Eurokoderna följas, vilka är:

- Då partialkoefficientmetoden används skall det säkerställas att inget aktuellt gränstillstånd överskrids.
- För de valda dimensioneringssituationerna och allmänna gränstillstånden bör de kritiska lasterna kombineras.
- Dimensioneringsvärdet bör fastställas genom att antingen välja karakteristiskt eller annat representativt värde tillsammans med de partialkoefficienter som finns presenterade i Eurokoderna.
- Ibland kan det vara fördelaktigt att välja dimensioneringsvärden direkt, och dessa bör då väljas med försiktighet.
- Då dimensioneringsvärden väljs direkt på statistiska grunder skall de motsvara minst samma säkerhetsklass som användandet av motsvarande partialkoefficienter leder till.

För partialkoefficientmetoden kan  $G$  skrivas som (Melchers, 1999):

$$G = \frac{R}{\gamma_R} - \gamma_S \cdot S \quad (2.22)$$

där  $\gamma_R, \gamma_S$  är partialkoefficienterna för  $R$  respektive  $S$ .

Partialkoefficienterna kan beräknas med hjälp av karakteristiska värdet,  $x_{ki}$ , och det dimensionerade värdet,  $x_i^*$ , enligt ekvation (2.23) för  $R$  och ekvation (2.24) för  $S$ . De två olika sätten att beräkna partialkoefficienterna finns till för att försäkra att de alltid skall vara större än 1.

$$\gamma_R = \frac{x_{kR}}{x_R^*} \quad (2.23)$$

$$\gamma_S = \frac{x_S^*}{x_{kS}} \quad (2.24)$$

Med hjälp av FORM kan  $x_i^*$  härledas enligt ekvation (2.25).

$$x_i^* = \mu_{y_i} (1 - \alpha_i \cdot \beta_{target} \cdot \sigma_{y_i}) \quad (2.25)$$

Det karaktäristiska värdet kan beräknas med hjälp av en percentil. För  $R$  används ofta den undre 5%-fraktilen vilket innebär att värdet understigs i 5% av fallen, medan  $S$  ofta tilldelas den övre 95%-fraktilen vilket innebär att  $S$  överstigs i 95% av fallen. Ett annat alternativ är att välja  $\mu$  som karaktäristiskt värde. Vilket av dessa alternativ som skall väljas framgår av den kod man följer.

### 2.2.8. Goodness-of-fit

När det finns tillgång till observerade data över de stokastiska variablerna, så går det att beskriva variablerna med statistiska fördelningar. För att avgöra vilken sannolikhetsfördelning som bäst passar observerad data räcker det ibland med att endast rita upp histogram över data tillsammans med några olika fördelningar. Ett alternativ till detta är att utföra ett så kallat goodness-of-fit test (Melchers, 1999). Det finns olika typer av goodness-of-fit test och två av de vanligaste förekommande är Kolmogorov-Smirnov test samt  $\chi^2$ -test (MathWave Technologies, 2016). Gemensamt för dessa två testmetoder är att en hypotes ställs upp, där nollhypotesen är "Data följer den specifika fördelningen". För var och en av metoderna tas ett specifikt index fram som jämförs vid en vald signifikansnivå,  $\varepsilon$ , med ett kritiskt värde som erhålls från tabeller. Om indexet är större än det kritiska värdet kan nollhypotesen förkastas.

Ofta väljs  $\varepsilon$  som 0,05 men för vissa områden krävs en lägre signifikansnivå och alla värden mellan 0 och 1 kan väljas.

### 3. Sprutbetongförstärkning

Sprutbetongförstärkning är en bergförstärkningsmetod som går ut på att betong appliceras, med hjälp av tryckluft, på bergytan (Nilsson, 2003). Det är en metod som använts i någon form ända sedan början av 1900-talet. Metoden är idag tillsammans med bergbultning en av de vanligaste förstärkningsåtgärder när det gäller berg i Sverige. Sprutbetongförstärkning brukar delas in i två olika kategorier: torrsprutning och våtsprutning. Torrsprutning går ut på att ingredienserna (cement, ballast och andra tillsatser) blandas i torrt tillstånd och blandas sedan med vatten i munstycket precis innan det sprutas mot bergytan. Vid våtsprutning, som är den vanligaste metoden idag, blandas istället alla ingredienser inklusive vatten från början. Denna metod har fördelen att en mindre del av den påförda betongen ”studsar” tillbaka jämfört med torrsprutning.

Vid mycket bra bergförhållanden kan oarmerad sprutbetong användas. Det är dock ett mycket sprött material och för sämre förhållanden brukar armering tillsättas i betongen. Detta kan göras genom att tillsätta stålfibrer, vilket förstärker betongens seghet samt  $f_{crk}$ .

#### 3.1. Böjbrott i Sprutbetong

Trafikverket har tagit fram handboken ”Projektering av bergkonstruktioner” som kan användas som riktlinje för dimensionering av väg och järnvägskonstruktioner i berg (Lindfors et al., 2015). I den finns rekommendationer för hur konstruktioner bör utformas för att följa gällande regelverk och lagstiftning. Rekommendationerna skall dock inte, till skillnad från exempelvis TRVK Tunnel 11, uppfattas som en norm eller anses vara gränssättande då de ej är heltäckande.

I handboken finns de vanligaste dimensioneringsfallen av sprutbetong i tunnlar beskrivna. Det finns fyra olika dimensioneringsfall som bör kontrolleras:

- God vidhäftning och vidhäftningsbrott i sprutbetong på grund av bergblock.
- Dålig vidhäftning och böjbrott i sprutbetong.
- Stansning av berg genom sprutbetong mellan bultar (god vidhäftning).
- Stansning av bultbricka genom sprutbetong (dålig vidhäftning).

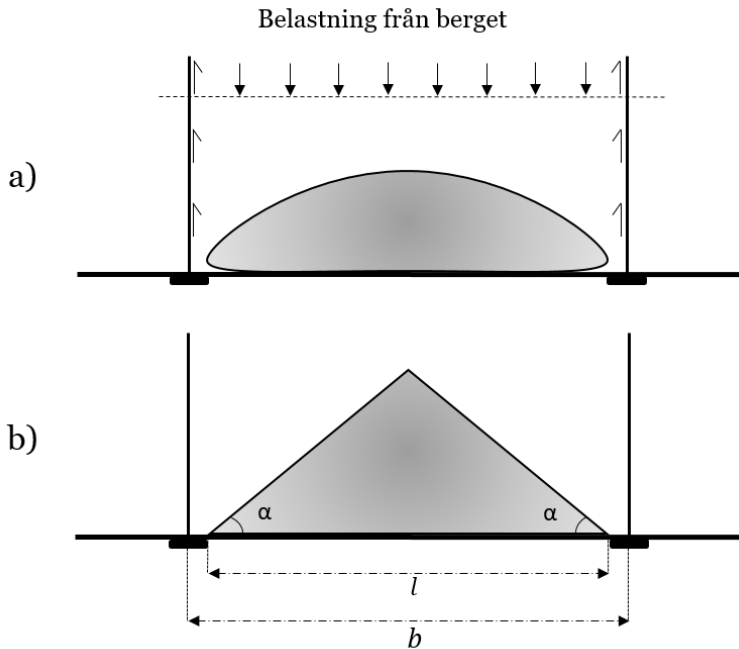
Det fall som är aktuellt i detta examensarbete är ”*Dålig vidhäftning och böjbrott i sprutbetong*”. Huvuddelen av bergmassan ovanför sprutbetongen bärs då via valvbildning i berget och överförs till stabilt berg genom bultarna. Det kan dock formos en löskärna, till exempel vid fall med väldigt uppsprucken bergmassa. Denna löskärna, vars volym ofta antas vara pyramidformad, måste sprutbetongen kunna bära med hjälp av sin momentupptagande förmåga,  $R_m$ , vilket illustreras i Figur 3.1 (Fredriksson, 1994).

Med hjälp av  $f_{lcrk}$  samt  $t_c$  kan  $R_m$  beräknas enligt (Lindfors et al., 2015):

$$R_m = \frac{f_{lcrk} \cdot t_c^2}{6} \quad (3.1)$$

För att brott inte skall uppstå måste  $R_m$  vara större eller lika med det maximala böjmomentet,  $M_{max}$ , som löskärnan kan ge upphov till. Följaktligen erhålls gränsuttrycket:

$$R_m \geq M_{max} \quad (3.2)$$



Figur 3.1 Det bergblock (a), vilket ofta approximeras som en pyramid (b), som belastar sprutbetongen. Den största delen av bergsbelastningen överförs dock till bultarna via valvbildning i berget (Fredriksson, 1994).

Trafikverkets handbok är anpassat efter partialkoefficienter i Eurokod. Detta innebär att  $R_m$  måste reduceras samtidigt som  $M_{max}$  multipliceras med partialkoefficienter. För ovanstående fall används följande partialkoefficienter i gränsuttrycket (Lindfors et al., 2015):

$$\frac{f_{ftrck} \cdot t_c^2}{\gamma_c \cdot 6} \geq M_{max} \cdot \gamma_d \cdot \gamma_G \quad (3.3)$$

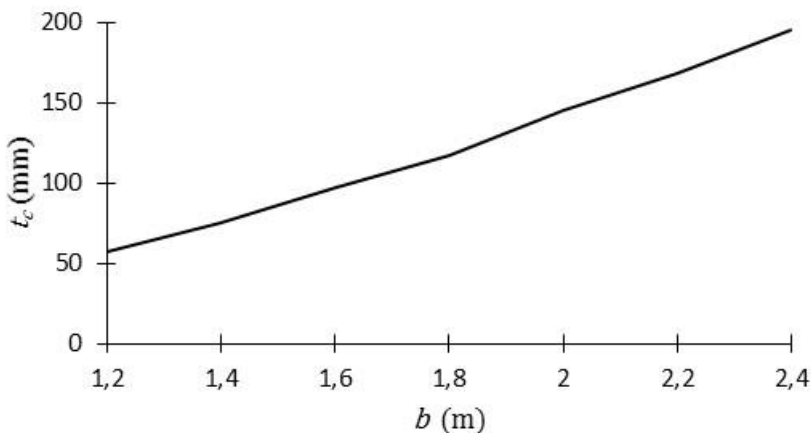
där partialkoefficienterna  $\gamma_d$  och  $\gamma_G$  är relaterade till lasten (CEN, 2004) och partialkoefficienten  $\gamma_c$  är relaterad till den fiberarmerade betongen (CEN, 2005). De hittas i Eurokod 7 respektive Eurokod 2 och värdena vid varaktig last med säkerhetsklass 3 återfinns i Tabell 3.1. I handboken finns även ett beräknat exempel, med ett diagram som visar erforderligt

$t_c$  med ett varierat bultavstånd,  $b$ , beräknat med partialkoefficienterna från Eurokod. Detta diagram illustreras i Figur 3.2.

I samband med att analys av vidhäftningsbrott görs brukar även brott på grund av genomstansning av bultbrickan utvärderas (Fredriksson, 1994). Det är dock ett mindre troligt brottstillstånd och Ansell (2009) skriver att ”*Det anses allmänt att risk för genomstansning normalt inte föreligger med bultbrickor som har ”normala” dimensioner, det vill säga diameter=160 mm*”.

Tabell 3.1 Partialkoefficienterna från Eurokod som Trafikverkets handbok refererar till.

| Partialkoefficient | Värde | Dimensioneringssituation |
|--------------------|-------|--------------------------|
| $\gamma_d$         | 1,00  | För säkerhetsklass 1     |
| $\gamma_G$         | 1,10  | För varaktig belastning  |
| $\gamma_c$         | 1,50  | För varaktig belastning  |



Figur 3.2 Erforderlig  $t_c$  med hänsyn till  $b$ . Ett exempel från Trafikverkets handbok med en pyramidformad last som har sidlutning  $45^\circ$  (Figur 3.1 b) (Lindfors et al., 2015).

## 3.2. Norrströmstunneln

I detta examensarbete har mätdata av  $t_c$  och  $f_{lcrk}$  inhämtats från sektioner av Norrströmstunneln, som är en del av Citybanan i Stockholm.

Den officiella byggstarten av Citybanan var år 2009, cirka 20 år efter att idén om att öka Stockholms järnvägskapacitet började diskuteras. Citybanan kommer att bestå av en cirka sex kilometer lång dubbelspårig järnvägstunnel. Då projektet är väldigt stort delades konstruktionen in i åtta olika delentreprenader. Den största av dessa entreprenader är Norrströmstunneln vilken NCC AB ansvarar för. Norrströmstunneln är den del av citybanan som sträcker sig mellan Riddarholmen och Gamla Brogatan. Den består av en bergtunnel på 1048 meter, samt en station som kommer vara belägen under Centralstationen i Stockholm. De förstärkningsmetoder som varit aktuella är främst bergbultning och sprutbetongförstärkning.

### 3.2.1. Kontroll av sprutbetong i Norrströmstunneln

Inför arbetet med Norrströmstunneln uppfördes en teknisk beskrivning för berg, samt ett kontrollprogram för berg som skall följas under projektet (von Matérn, 2009a, 2009b). Beträffande  $t_c$  anges det i den tekniska beskrivningen att:

*”Medeltjockleken vid ett prov får ej underskrida föreskriven tjocklek. Om mer än ett av närmast intilliggande kontrollerade bulthål underskrider tjockleken måste åtgärder vidtas.”*

För att kontrollera detta skall svensk standard, ”Provning av sprutbetong – Del 6: Tjockleksmätning”, användas (SIS, 2006a). Där finns angivet att någon form av djupmätare, som till exempel ett måttband, skall användas. Uppmätt  $t_c$  skall nedtecknas till närmsta millimeter.

I den tekniska beskrivningen finns även de krav som ställts på sprutbetongens hållfasthet. Krav för  $f_{lcrk}$  skall räknas som medelvärdet från minst 2 provbalkar och uppfylla  $f_{lcrk} \geq 4,0$  MPa. Vidare skall varje

enskild provbalk uppfylla  $f_{lcrk} \geq 3,2$  MPa. Kontrollen av  $f_{lcrk}$  skall göras enligt svensk standard, ”Provning av sprutbetong – Del 3: Böjdraghållfasthet (sprick-, maximal- och residualhållfasthet) hos fiberarmerade provbalkar” (SIS, 2006b).

### 3.3. Accepterad brottsannolikhet

Tunnlar och bergrum räknas i bygglagstiftningen som byggnadsverk. I förordningen om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk (BVL) ligger rätten att ansätta föreskrifter på byggnadsverk på Boverket (Stille et al., 2005). Dessa föreskrifter är samlade i Boverkets konstruktionsregler, BKR. I BKR står det att tunnlar och bergrum uteslutits från konstruktionsreglerna, då det varit svårt att tillämpa reglerna på dessa byggnadsverk (Boverket, 2016). Stille et al., (2005), tolkar detta som att man då ska dra nytta av de europeiska beräkningsstandarderna istället, alltså Eurokoderna.

I Eurokodens kapitel om tillförlitlighetsdifferentiering finns konsekvensklasser och säkerhetsklasser beskrivna (CEN, 2002). Brottgrenstillståndet med referensvärdet ett år är beskrivet med  $\beta_{target}$  enligt Tabell 3.2. I Eurokoderna finns det tre olika konsekvensklasser som är kopplade till säkerhetsklasserna. För den högsta säkerhetsklassen, RC3, är konsekvensklassen CC3 kopplad och anger att det finns hög risk för dödsfall eller mycket stora ekonomiska, samhälleliga eller miljöbetingade konsekvenser.

Eftersom Trafikverket är en svensk statlig förvaltningsmyndighet som ansvarar för planering, byggande, drift och underhåll av statliga vägar och järnvägar, har de tagit fram ett dokument med tekniska krav för dimensionering och utformning av tunnlar i Sverige, TRVK Tunnel 11 (Trafikverket, 2011). Där presenteras  $pf_{target}$  för bärande huvudsystem, vilket visas i Tabell 3.3. Säkerhetsklasserna är också här kopplade till hur tunneln skall användas och vilken konsekvens som förväntas om ett brott skulle inträffa. För den högsta säkerhetsklassen gäller att ett brott får allvarliga konsekvenser och  $pf_{target}$  är följaktligen låg.

Tabell 3.2 Säkerhetsklasserna med dess respektive  $\beta_{target}$  från Eurokod.

| Säkerhetsklass | $\beta_{target}$ |
|----------------|------------------|
| RC1            | 4,2              |
| RC2            | 4,7              |
| RC3            | 5,2              |

Tabell 3.3 Säkerhetsklasserna med dess respektive  $pf_{target}$  från Trafikverket.

| Säkerhetsklass | $pf_{target}$ |
|----------------|---------------|
| 1              | $10^{-4}$     |
| 2              | $10^{-5}$     |
| 3              | $10^{-6}$     |

### 3.4. Forskning om sannolikhetsbaserad dimensionering för tunnlår

Många har under de senaste åren forskat om sannolikhetsbaserad dimensionering för tunnlår. Forskarna har då oftast valt att fokuserat på olika parametrar, mätdata och brottsmekanismer i sin forskning. Sannolikhetsanalyser där sprutbetongförstärkning varit aktellt har bland andra gjorts av Oreste (2005), Lü et al. (2011), Langford & Diederichs (2013) och Mirzaeian et al. (2015). De har dock alla, i sina sannolikhetsanalyser antagit  $t_c$  som ett deterministiskt värde, det vill säga att dess spridning inte spelar någon större roll.

Yang et al. (2007) skrev en forskningsartikel där de använder de sig av mätdata på sprutbetongens radiella förflyttning och utvecklar, med detta som grund, en sannolikhetsbaserad metod för att utvärdera sprutbetongförstärkningen vid tunnelkonstruktion. De har i artikeln undersökt oarmerad sprutbetong som beskrivs av en normalfördelning med  $\mu = 250$  mm och en variationskoefficient ( $\mu$  dividerat med  $\sigma$ ) av 5, 7 respektive 9 %, beroende på vilken bergsklass som avses. Underlaget för denna fördelning är en forskningsartikel gjord 1996.

Lü et al. (2013) har undersökt tre brottsmekanismer för tunnlar ur ett sannolikhetsbaserat perspektiv. De har antagit att den armerade sprutbetongen kan beskrivas av en lognormalfördelning med parametrarna  $\mu$ , som är lika med önskade  $t_c$ , samt en variationskoefficient av 25 %. Dessa data har de baserat på en mätning, med 370 mätpunkter, gjorda av Malmgren et al. (2005) i Kirunagruvan.

Low & Einstein (2013) har gjort en sannolikhetsanalys med avseende på block som förstärkts med bergbultar. De konstaterar dock att mer forskning krävs om modellosäkerheterna och mänskliga osäkerheter, samt att mer jobb krävs för att uppskatta och utvärdera de stokastiska variablerna som används i sannolikhetsbaserade analyser.

## 4. Bestämning av statistiska fördelningar

I detta kapitel beskrivs hur de statistiska fördelningarna för  $t_c$  samt  $f_{crk}$  erhållits.

För att bestämma sprutbetongens tjockleksfördelningar har data insamlats från Norrströmstunneln där mätning av  $t_c$  i bultborrhålen genomförts enligt dess kontrollprogram (beskrivet i Kapitel 3.2.1). Dessa data har sorterats med avseende på kraven för  $t_c$ , vilka var 50, 75, 100 respektive 200 mm. Antal mätpunkter för de olika kraven har specificerats i Tabell 4.1. Då för få mätpunkter för kravet 200 mm fanns att tillgå exkluderades dock dessa från vidare analys. De resterande tre kategorierna ritades med histogram och en lämplig fördelning passades in. För att erhålla den fördelning som passade bäst användes de goodness-of-fit metoder som presenterades i Kapitel 2.2.8.

Den fördelning valdes som generellt passade bäst för de tre olika kraven, då det är önskvärt att ha samma fördelning oavsett vilket krav på  $t_c$  som används. Ett praktiskt problem i den kommande analysen var att ett begränsat antal sannolikhetsfördelningar fanns att tillgå i programmet COMREL, varför den fördelningen som passade bäst, men som även fanns att tillgå där, valdes.

För att erhålla en bild av den rumsliga korrelationen av  $t_c$  har den undersökts grafiskt. Den rumsliga korrelationen användes för att kontrollera om det fanns stora områden med icke godkänd  $t_c$ .

Tabell 4.1 Antal analyserade mätpunkter av  $t_c$  för de fyra olika kraven på  $t_c$ .

| <b>Krav (mm)</b> | <b>Antal mätpunkter</b> |
|------------------|-------------------------|
| 50               | 1620                    |
| 75               | 1504                    |
| 100              | 1279                    |
| 200              | 6                       |
|                  | $\Sigma$ 4409           |

Även för  $f_{lcrk}$  insamlades data från Norrströmstunneln. Det var 477 olika balkar som kontrollerades i enlighet med vad som angivits i kontrollprogrammet. På samma sätt som för  $t_c$  ritades observerad data i ett histogram och den fördelning som passade bäst med goodness-of-fit metoderna, och som fanns tillgänglig i programmet COMREL, valdes.

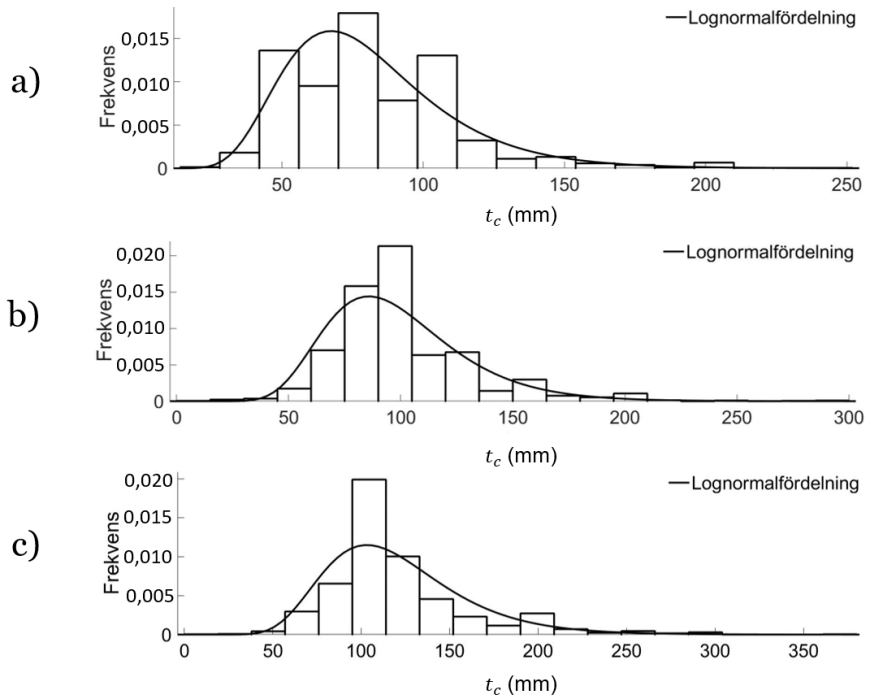
## 4.1. Resultat

De erhållna sannolikhetsfördelningarna för  $t_c$  visas i Figur 4.1. En lognormalfördelning var den sannolikhetsfördelning som passade bäst in på tillgänglig data och som även kunde användas i COMREL. En lognormalfördelning är på många sätt fördelaktig för data som alltid har ett värde högre än eller lika med noll, då fördelningen ej antar negativa värden. Den är härledd från normalfördelningen och beskriver en stokastisk variabel vars logaritm är normalfördelad. Parametrarna för en lognormalfördelning kan beskrivas av  $\mu$  samt  $\sigma$  och presenteras för  $t_c$  i Tabell 4.2.

Betafördelning samt Weibullfördelning var de fördelningar som passade bäst in på data med  $f_{lcrk}$ , och som även fanns att tillgå i programmet COMREL (Figur 4.2). Betafördelningen valdes att gå vidare med i senare analys, och den beskrevs med parametrarna  $r = 184,75$ ,  $z = 33,359$ ,  $a = -22,484$  och  $c = 12,107$ . Parametrarna  $r$  och  $z$  bestämmer formen av fördelningen, medan  $a$  och  $c$  bestämmer den undre respektive övre gränsen i fördelningen.

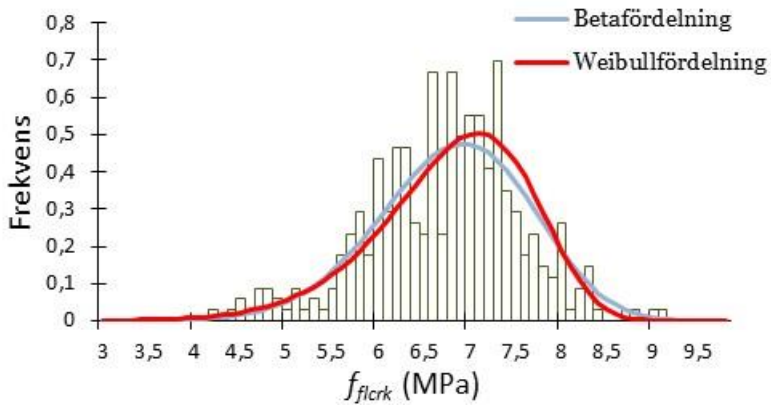
Tabell 4.2 Parametrarna för de lognormalfördelningar som passats in för data av  $t_c$ .

| <b>Krav (mm)</b> | <b><math>\mu</math> (mm)</b> | <b><math>\sigma</math> (mm)</b> |
|------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 50               | 81,1                         | 29,8                            |
| 75               | 98,8                         | 31,4                            |
| 100              | 120,3                        | 41,1                            |

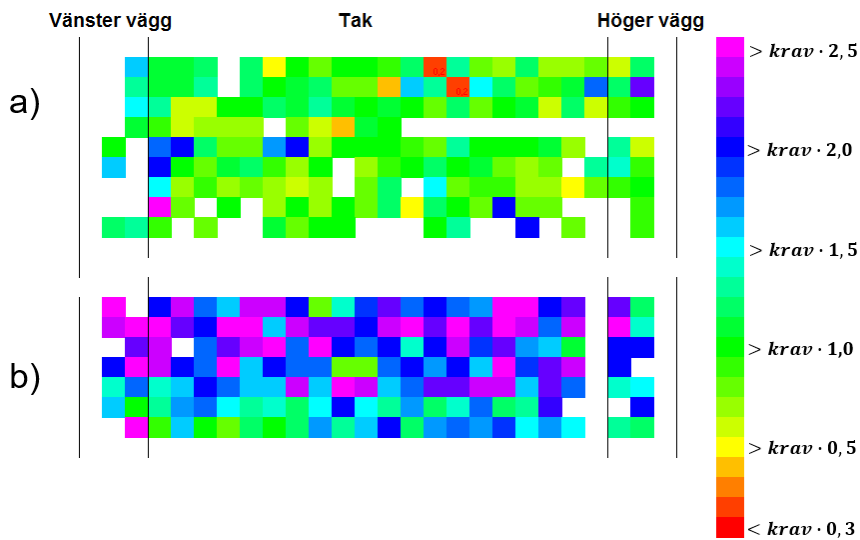


Figur 4.1 Histogram över uppmätt  $t_c$  med anpassad lognormalfördelning för kraven: a) 50 mm, b) 75 mm och c) 100 mm

Den rumsliga korrelationen av mätpunkterna undersöktes genom en färgkodning med alla mätpunkter och dess krav, där ett exempel visas i Figur 4.3.



Figur 4.2 Den Betafördelning respektive Weibullfördelning som bäst beskrev parametern  $f_{flcrk}$



Figur 4.3 Exempel av den rumsliga korrelationen vid två olika tunnelsegment. Varje kvadrat representerar ett mätvärde. Färgen som har tilldelats varje kvadrat beror på hur stor  $t_c$  var i förhållande till kravet för mätpunkten, vilket visas i skalan till höger.

## 4.2. Diskussion

Ju mer observerade data som finns att tillgå desto mer reduceras osäkerheten tills endast den naturliga spridningen återstår (Spross, 2016). Frågan är hur många prov som är tillräckligt. För  $t_c$  har 4409 prov analyserats, men dessa var fördelade i olika grupper baserade på kravet för  $t_c$  för tunnelsektionen.

I detta arbete har de fördelningar som tagits fram direkt från mätdata använts. Det är dock inte säkert att spridningen för dessa fördelningar är lämpliga att använda. För att veta vilken spridning som ska användas är det nödvändigt att förstå vilket mekaniskt system som bäst beskriver hur det går till brott. Mekaniska system kan exempelvis utgöras av serie- eller parallellsystem (Stille et al., 2005). Ett seriesystem innebär att sprutbetongen går till brott så fort ett element i systemet har överskridit sin bärförmåga, medan parallellsystem innebär att brott inträffar då alla element i systemet har gått till brott. Om systemet kan beskrivas som ett parallellsystem är det parametrarnas medelvärde och dess spridning som styr brotts sannolikheten. I dessa fall kommer spridningen av den ursprungliga fördelningen reduceras kraftigt genom variantsreduktion och brotts sannolikheten kraftigt reduceras.

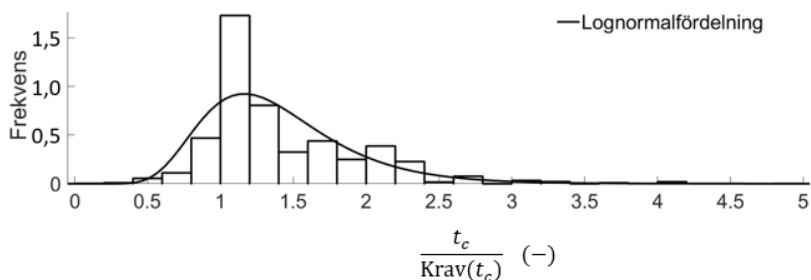
Variantsreduktion beskriver hur egenskaper hos en parameter, i detta fall  $t_c$ , i ett system är korrelerad i rymden. Det kan förklaras genom att två mätpunkter som är tillräckligt nära varandra förväntas ha samma värde på  $t_c$ , de kan således betraktas som identiska och bildar ett element. Om punkterna ligger långt ifrån varandra betraktas de istället som olika och ingående i två på varandra oberoende element. Följaktligen behövs kunskap om vilket mekaniskt system som beskriver hur sprutbetongen går till brott, samt hur många oberoende element som ingår i systemet i olika analyserade fall. Detta är ett område där vidare forskning krävs innan en korrekt brotts sannolikhet kan bestämmas för blockutfall mellan bultar.

För att få en fördelning oberoende av kravet kan alla mätpunkter divideras med dess krav och en normaliserad fördelning enligt Figur 4.4 erhålls. Denna fördelning beskrivs av  $\mu = 1,40$  mm samt  $\sigma = 0,52$  mm.

De sammanställda histogrammen över  $t_c$ , (Figur 4.1) visade på en likhet som är oberoende av kravet, nämligen att alla visade en klar topp på värdet 100 mm. Det kan finnas många olika förklaringar till detta och det mesta talar för att det rör sig om en operativ osäkerhet. Det kan till exempel bero på att de som sprutat vissa av tunnelsegmenten ansett det enklare att utgå från kravet 100 mm för att undvika eventuella kompletteringar efter kontrollerna, vilket skulle vara både kostsamt och tidskrävande.

En annan brist, och möjlig mätosäkerhet, som uppenbarade sig var att mätningarna inte verkade följa det kontrollprogram som skrivits. Enligt kontrollprogrammet skall  $t_c$  nedtecknas till närmsta mm. Efter att ha studerat mätdata kan dock konstateras att istället närmaste centimeter, alternativt närmsta 5 millimeter för vissa tunnelsektioner, nedtecknats. Det kan dock inses att ett närmare värde kan vara svårt att utläsa beroende på vilket instrument som använts.

Då den rumsliga korrelationen studerats har tecken på att olika personal varit inblandad i sprutningen av olika sektioner utlästs. Där ses att vissa sektioner har ett  $t_c$  väldigt nära det krav som är satt medan andra sektioner har ett  $t_c$  som kraftigt överstiger kravet. Detta kan naturligtvis även bero på att exponerat berg är allt annat än jämnt vilket kan göra att mer sprutbetong sprutas i nedsänkningarna än vid upphöjningarna.



Figur 4.4 Normaliserad fördelning av  $t_c$  då alla mätpunkter dividerats med dess krav.

Att använda data med ett specifikt krav samtidigt som de som utför sprutningen förbiser kravet, leder till vissa problem. Detta trots att de i detta fall tenderat till att överdimensionera. Problemet uppkommer eftersom den framtagna fördelningen då ger en inbyggd säkerhetsmarginal, vilket ger en överdimensionering. Det är således viktigt, för att erhålla en pålitlig sannolikhetsfördelning, att sprutningen sker lika och i enlighet med kraven, oavsett vem som utför arbetet så fördelningen av  $t_c$  kan förutses.

För att minimera modellosäkerheten måste den sannolikhetsfördelning som representerar observerad data bäst, erhållas. För  $t_c$  var det ingen fördelning som var uppenbart bättre än de andra. Det som kunde observeras var en tendens av skevhet samt, naturligtvis, att endast positiva värden uppmättes. Dessa egenskaper tillsammans med goodness-of-fit resultaten gjorde att en lognormalfördelning valdes.

Ett alternativ, som ej undersöktes ytterligare, vore att göra en egen fördelning med kombinationer av olika fördelningar inom varierande intervall. Till exempel en normalfördelning inom ett visst intervall och en lognormalfördelning inom nästa. Detta hade förmodligen resulterat i en mindre modellosäkerhet, om det gått att passa in samma kombination för alla tre kravkategorierna. Detta hade dock inte kunnat genomföras i denna analys på grund av begränsningar i analysprogrammet COMREL.

För  $f_{lcrk}$  återfanns inte samma kraftiga topp som för  $t_c$  vilket gjorde det enklare att se vilken fördelning som passade bäst in på observerad data. Tillgänglig data visade även här på en liten skevhet och de två fördelningar som passade bäst (Figur 4.2) var betafördelning samt weibullfördelning. Båda dessa gav väldigt lika resultat i goodness-of-fit-testerna. Betafördelningen valdes för den fortsatta analysen då den fördelningen har större stöd i programmet Excel vilket använts i den senare sannolikhetsanalysen för beräkning av partialkoefficienter.



## 5. Sannolikhetsanalys för böjbrott i sprutbetong

I följande kapitel kommer gränsfunktionen samt de modeller och indata som antagits, för att genomföra sannolikhetsanalysen, att beskrivas. De stokastiska variabler som använts i sannolikhetsanalysen har beskrivits med de sannolikhetsfördelningar som beräknats i föregående kapitel. Målet med denna analys var att beräkna partialkoefficienter för dimensioneringsfallet ”*dålig vidhäftning och böjbrott i sprutbetongen*”. I sannolikhetsanalysen har programmet COMREL använts (RCP, 1998). För att undersöka modellosäkerheten har även alternativ för lasten samt  $M_{max}$  beaktats, vilket beskrivs i slutet av kapitlet.

### 5.1. Gränsfunktion

Det  $G$  som använts är densamma som definierats i Trafikverkets handbok, beskrivet i kapitel 3.1, det vill säga att  $R_m$  skall klara av det  $M_{max}$  som ett löst bergblock kan påverka sprutbetongen med. Den har skrivits om till standardformen för en gränsfunktion enligt:

$$G = R_m - M_{max} \quad (5.1)$$

#### 5.1.1. Maximalt böjmoment

Hur  $M_{max}$  skall väljas beror av lastfördelningen på sprutbetongen. Ett sätt att modellera  $M_{max}$  är att anta att sprutbetongen beter sig som en betongplatta på pelare där sprutbetongen motsvarar plattan och bultbrickorna motsvarar pelarna (Fredriksson, 1994). Det kan dock diskuteras om plattan ska ses som fast inspänd eller fritt upplagd. Om bultarna inte antas kunna vinkeländras, erhålls en fast inspänd situation, dock endast i ett snitt precis mellan bultarna och inte över hela plattan.

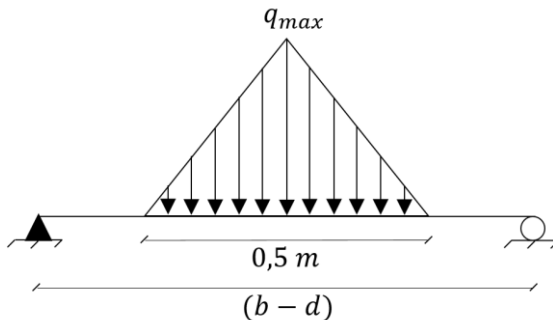
Om det tänkta snittet inte är placerat vid bultarna erhålls istället en inspänningsgrad mellan 0 och 1. Det värst tänkbara scenariot är därför ett snitt med mycket liten inspänningsgrad, vilket kan approximeras som en fritt upplagd platta (eller balk om det ses i två dimensioner).

I TRVK Tunnel 11 står det att:

*”En ytförstärkning eller en inklädnad ska dimensioneras för lasten av ett enstaka lossnande bergblock. Lasten ska förutsättas vara 6 kN och riktad vinkelrätt mot förstärkningsskiktet eller inklädnaden.*

*Lastens yta ska sättas till 0,5 x 0,5 m.”* (Trafikverket, 2011).

Om Trafikverkets krav för dimensionering följs erhålls en situation enligt Figur 5.1, givet det värst tänkbara scenariot med låg inspänningsgrad samt pyramidformat block, vilket ger den största kraftintensiteten vid mitten av det tänkta snittet (för att ge en uppfattning av storleken på ett sådant pyramidformat block kan det nämnas att höjden blir cirka 2,7 m, om bergets tunghet är 27 kN/m<sup>3</sup>).



Figur 5.1 Lastsituationen vid ett pyramidformat bergsblock.

För denna situation har det maximala momentet i mitten av balken beräknats med grundläggande balkteori enligt:

$$M_{max} = \frac{q_{max}}{16} \cdot (b - d) - \frac{q_{max}}{96} \quad (5.2)$$

där  $q_{max}$  är den maximala lastintensiteten och  $d$  är diametern på bultbrickan. Bultbrickans diameter har antagits ha samma storlek,  $d = 160$  mm, som i exempel från Fredriksson (1994) samt Ansell (2009). För ett pyramidformat block, enligt Figur 5.1, har  $q_{max}$  beräknats till 72 kN/m.

### 5.1.2. Momentupptagande förmåga

Med ekvation (3.1) har  $R_m$  beräknats (Lindfors et al., 2015).

$$R_m = \frac{f_{lcrk} \cdot t_c^2}{6} \quad (3.1)$$

där de två stokastiska variablerna  $f_{lcrk}$  samt  $t_c$  beskrivits av de sannolikhetsfördelningar som valdes i förgående kapitel.

## 5.2. Analys i COMREL

COMREL använder sig av FORM för att behandla icke-linjära gränsfunktioner. Tre olika grundfall har analyserats baserat på kraven för  $t_c$  som var 50, 75 respektive 100 mm. För att undersöka hur partialkoefficienterna påverkades av geometrin i problemet varierades  $b$  i olika analyser från 0,8 till 3 m. I COMREL har  $\alpha$ -värden beräknats för de stokastiska variablerna  $t_c$  samt  $f_{lcrk}$ . Med hjälp av  $\alpha$ -värden har partialkoefficienterna beräknats med ekvationerna (2.11), (2.19), (2.23) och (2.24). Med de nya partialkoefficienterna skrevs  $G$  som:

$$G = \frac{f_{fcrk} \cdot \left(\frac{t_c}{\gamma_t}\right)^2}{6 \cdot \gamma_f} - \left(\frac{q_{max}}{16} \cdot (b - d) - \frac{q_{max}}{96}\right) \quad (5.4)$$

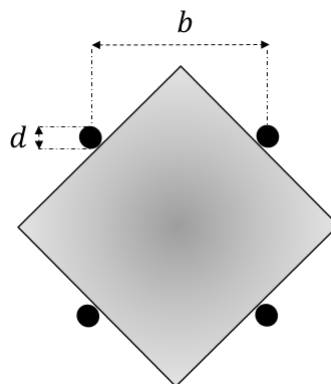
Det valda  $pf_{target}$  har tagits från Trafikverkets tekniska krav vid säkerhetsklass 3 (Trafikverket, 2011). Det vill säga  $pf_{target} = 10^{-6}$ , vilket ger  $\beta_{target} = 4,75$ .

För  $t_c$  har det karaktäristiska värdet valts till dess krav, det vill säga 50, 75 samt 100 mm för de tre olika grundfallen. För  $f_{lcrk}$  har medelvärdet av den observerade data beräknats som 6,8 MPa.

För att verifiera modellen i COMREL har  $G$  även analyserats genom en Monte-Carlo simulering i MATLAB.

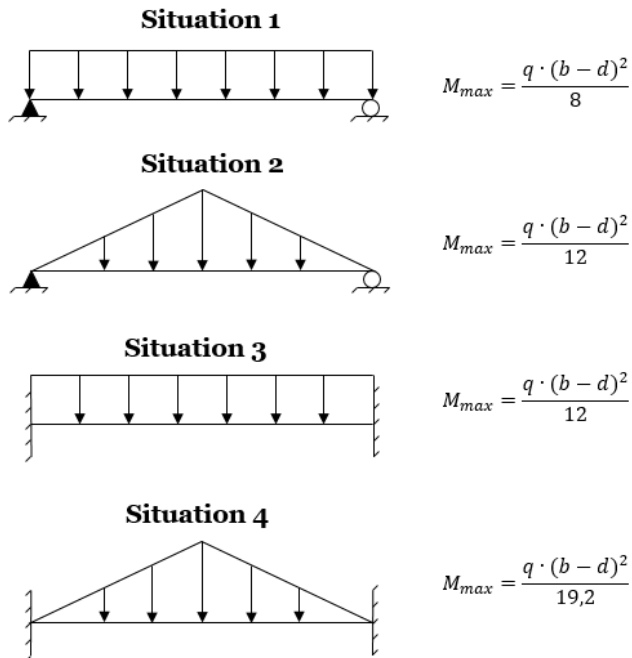
### 5.3. Alternativt böjmoment

Även då Trafikverket specificerat i sina tekniska krav, *TRVK Tunnel 11*, att vid dimensionering av löst block skall en specifik last verksam på en specifik area beaktas, tillämpar de en annan metod för denna brottmekanism i sitt vägledande dokument, *Projektering av bergkonstruktioner*. Där antas istället att bergblocket breder ut sig över hela sprutbetongskiktet mellan fyra bultar enligt Figur 5.2.



Figur 5.2 Det största block som får plats mellan fyra bultar.

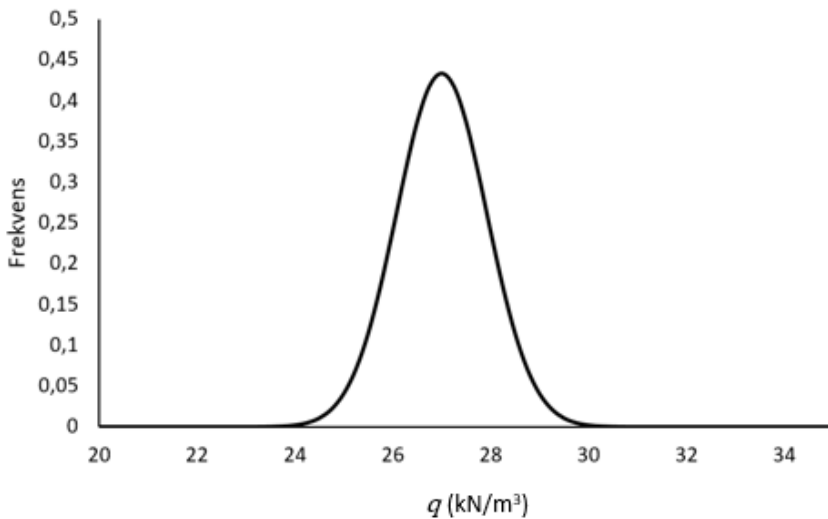
Vilket det maximala momentet som blocket kan påverka sprutbetongen med är inte helt redogjort för i handboken. Därför undersöktes fyra olika lastsituationerna, vilka gav upphov till olika moment (Figur 5.3). Detta tillsammans med samma last som antogs i handboken, vars storlek motsvarades av en pyramid med 45° sidvinkel.



Figur 5.3 De fyra olika lastsituationerna. Situation 1 är fritt upplagd med en utbredd last och har ett  $M_{max}$  i mitten av balken. Situation 2 är också den fritt upplagd men med en triangulär last och har ett  $M_{max}$  i mitten av balken. Situation 3 är fast inspänd med en utbredd last och har ett  $M_{max}$  vid infästningen. Situation 4 är också den fast inspänd men med en triangulär last och har ett  $M_{max}$  vid infästningen.

### 5.3.1. Stokastiska variabler

Gällande de stokastiska variablerna antogs samma  $f_{icrk}$  som i tidigare sannolikhetsanalys tillsammans med  $t_c$  som gällde då kravet var 100 mm. Även en stokastisk variabel av bergets tunghet,  $q$ , var nödvändigt att beaktas för dessa fall. Denna antogs kunna beskrivas på samma sätt som Spross et al. (2013) gjorde i sin artikel. Där beskrivs  $q$  av en normalfördelning med  $\mu = 27 \text{ kN/m}^3$  och  $\sigma = 0,92 \text{ kN/m}^3$ , vilket visas i Figur 5.4.

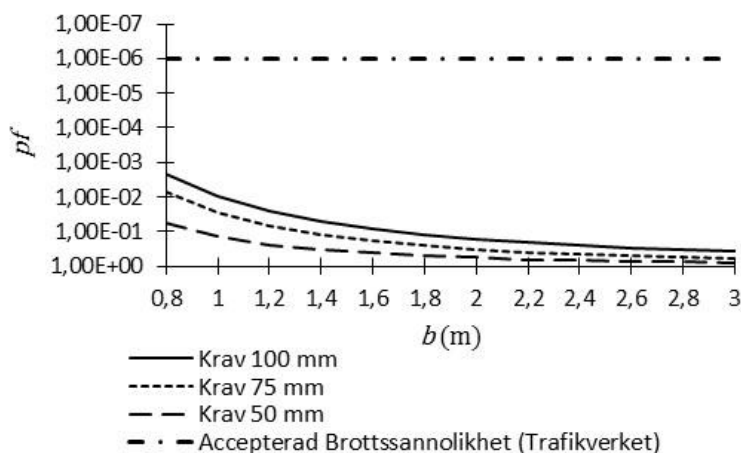


Figur 5.4 Den stokastiska variabeln  $q$ , beskriven av en normalfördelning.

## 6. Resultat

### 6.1. Brottssannolikhet från COMREL

För de tre grundfallen då kravet för  $t_c$  var 100, 75 respektive 50 mm, samt då  $M_{max}$  beräknades enligt ekvation (5.2), sammanställdes  $pf$  från analysen i COMREL, vilket visas i Figur 6.1 med varierande  $b$ , tillsammans med  $pf_{target}$  från Trafikverket (Trafikverket, 2011). Som väntat fås lägst  $pf$  för kravet 100 mm följt av 75 mm och 50 mm. I figuren kan utläsas att för alla de tre grundfallen når ingen upp till  $pf_{target}$ , inte ens för det lägsta  $b$ . Med COMREL beräknades även motsvarande  $\beta$  för alla simuleringar, vilka presenteras i Tabell 6.1 tillsammans med motsvarande  $\alpha$ -värden för  $t_c$ ,  $\alpha_t$ , samt  $f_{flcrk}$ ,  $\alpha_f$ . Från denna tabell kan det utläsas att  $\alpha$ -värdena inte förändras mycket då  $b$  varieras från 0,8 till 3 m, samtidigt som  $\beta$  minskar för ökande  $b$ .

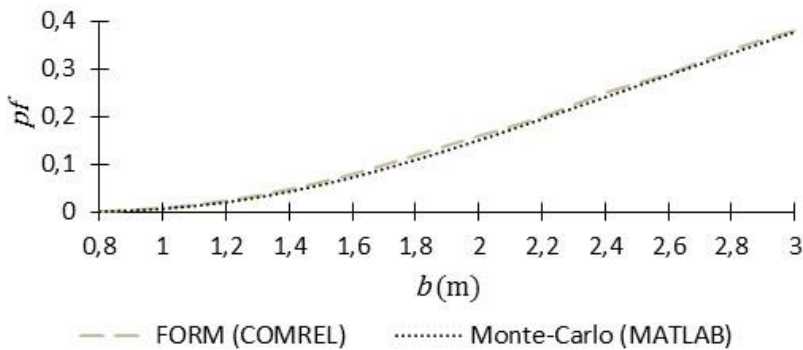


Figur 6.1  $pf$  för de tre grundfallen då kravet för  $t_c$  var 50, 75 respektive 100 mm, samt  $pf_{target}$  hämtat från Trafikverket.  $M_{max}$  beräknades med ekvation (5.2).

Tabell 6.1 En sammanställning av de numeriska resultaten från sannolikhetsanalysen för de tre olika kraven av  $t_c$ , då  $M_{max}$  beräknades med ekvation (5.2).

| Bult-avstånd (m) | Krav 50 mm |            |         | Krav 75 mm |            |         | Krav 100 mm |            |         |
|------------------|------------|------------|---------|------------|------------|---------|-------------|------------|---------|
|                  | $\alpha_t$ | $\alpha_f$ | $\beta$ | $\alpha_t$ | $\alpha_f$ | $\beta$ | $\alpha_t$  | $\alpha_f$ | $\beta$ |
| 0,8              | 0,98       | 0,18       | 1,57    | 0,98       | 0,22       | 2,46    | 0,98        | 0,20       | 2,86    |
| 1,0              | 0,98       | 0,18       | 1,08    | 0,98       | 0,21       | 1,91    | 0,98        | 0,20       | 2,35    |
| 1,2              | 0,99       | 0,17       | 0,72    | 0,98       | 0,21       | 1,50    | 0,98        | 0,20       | 1,96    |
| 1,4              | 0,99       | 0,17       | 0,44    | 0,98       | 0,20       | 1,71    | 0,98        | 0,19       | 1,66    |
| 1,6              | 0,99       | 0,17       | 0,20    | 0,98       | 0,20       | 0,90    | 0,98        | 0,19       | 1,40    |
| 1,8              | 0,99       | 0,17       | 0,00    | 0,98       | 0,20       | 0,67    | 0,98        | 0,19       | 1,19    |
| 2,0              | 0,99       | 0,17       | -0,18   | 0,98       | 0,20       | 0,47    | 0,98        | 0,19       | 1,00    |
| 2,2              | 0,99       | 0,17       | -0,34   | 0,98       | 0,20       | 0,29    | 0,98        | 0,19       | 0,83    |
| 2,4              | 0,99       | 0,17       | -0,48   | 0,98       | 0,20       | 0,13    | 0,98        | 0,19       | 0,68    |
| 2,6              | 0,99       | 0,17       | -0,60   | 0,98       | 0,19       | -0,02   | 0,98        | 0,19       | 0,55    |
| 2,8              | 0,99       | 0,17       | -0,72   | 0,98       | 0,19       | -0,15   | 0,98        | 0,18       | 0,42    |
| 3,0              | 0,99       | 0,17       | -0,83   | 0,98       | 0,19       | -0,27   | 0,98        | 0,18       | 0,31    |

Monte-Carlo simuleringen som utfördes för att kontrollera de erhållna  $pf$  från COMREL visas, som en jämförelse av de två sätten att beräkna  $pf$ , i Figur 6.2. Observera att endast fallet med kravet 100 mm visas. De två övriga fallen gav liknande resultat och beskrivs i Bilaga 1.

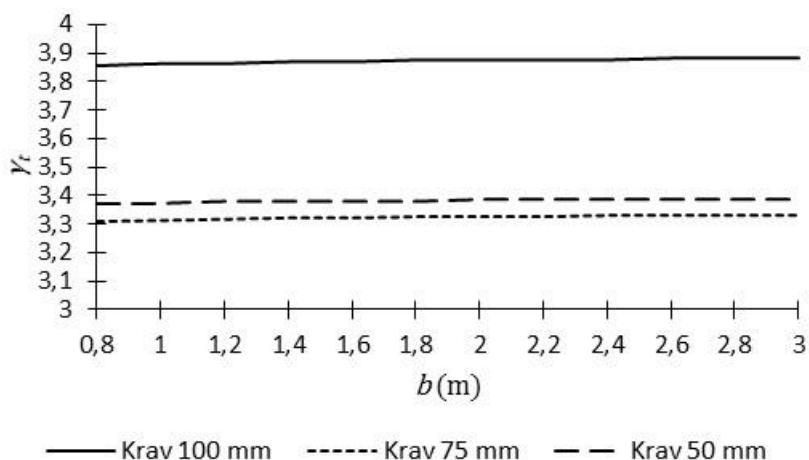


Figur 6.2 Jämförelse mellan  $pf$  beräknat med FORM och Monte-Carlo simulering, då  $t_c$  med kravet 100 mm använts samt  $M_{max}$  enligt ekvation (5.2). De synbara skillnaderna i resultaten vid  $b = 1,8$  samt  $b = 2,4$  antas bero på avrundningsfel.

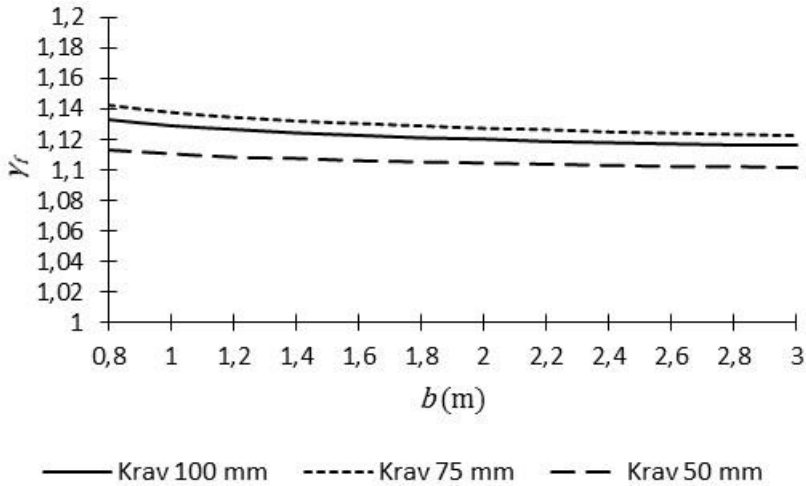
## 6.2. Partialkoefficienter

De nya partialkoefficienterna beräknades med hjälp av  $\alpha$ -värdena från Tabell 6.1, tillsammans med  $\beta_{target}$  från Trafikverket. Exempel på beräkningarna kan ses i Bilaga 2. Resultatet av beräkningarna visas i Figur 6.3 för  $t_c$ , där det kan ses att tjockleksfördelningen med krav 100 mm ger något högre  $\gamma$ -värden, cirka 0,5 enheter, än de två övriga kravkategorierna. I Figur 6.4 presenteras motsvarande resultat för  $f_{crk}$ , där alla tre kategorierna har partialkoefficienter som skiljer sig med som mest 0,03 enheter mellan kategorierna. Men tanke på att  $\gamma$  för armerad betong i Eurokod är 1,5 så kan det konstateras att de  $\gamma$ -värden som presenteras i Figur 6.3 är mycket höga, med värden från 3,3 till 3,9. Det är dock viktigt att komma ihåg att de  $\gamma$  som beräknats i denna analys och  $\gamma$  från Eurokod inte är direkt jämförbara då Eurokod endast presenterar ett värde för betong och inte för varje betong-variabel.

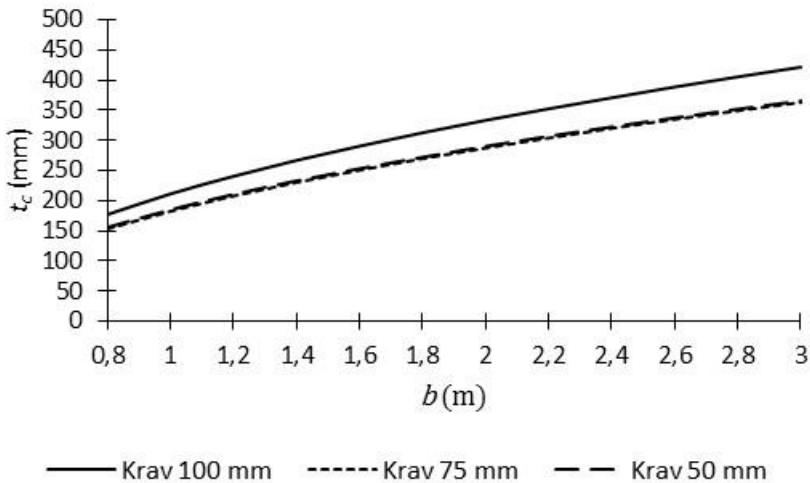
För att erhålla en bättre bild av hur de nya partialkoefficienter kan användas beräknades även erforderliga  $t_c$  för varierande  $b$ . Detta illustreras i Figur 6.5, och där kan ses att det för lägsta  $b$  krävs ett  $t_c$  mellan 150 till 180 mm för de tre kategorierna.



Figur 6.3 Beräknade partialkoefficienter av  $t_c$  för olika  $b$  med ett  $\beta_{target}$  av 4,75.



Figur 6.4 Beräknade partialkoefficienter av  $f_{fcrk}$  för olika  $b$  med ett  $\beta_{target}$  av 4,75.



Figur 6.5 Genom att använda  $\gamma$ -värdena från Figur 6.3 samt Figur 6.4 erhålls följande erforderlig  $t_c$  med varierande  $b$  för ett  $\beta_{target}$  av 4,75. Det är tre olika kurvor beroende på att  $\gamma$ -värdena togs fram för tre olika fördelningar av  $t_c$ .

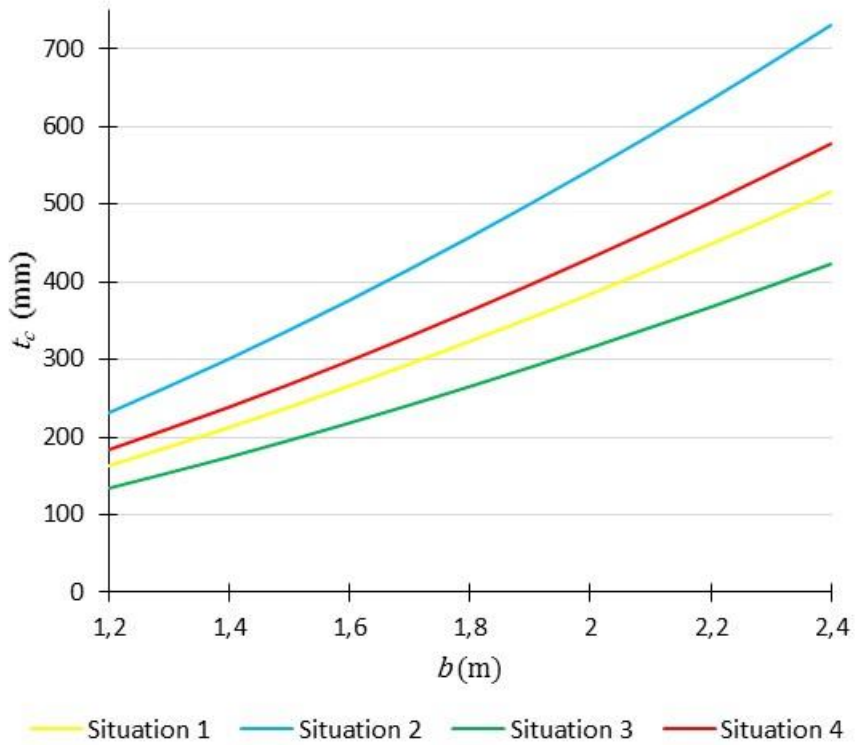
### 6.3. Alternativt böjmoment

Då de alternativa sätten att se böjmomentet (Kapitel 5.3) analyserades i COMREL erhöles  $\alpha$ -värdena samt  $\gamma$ -värden. Dessa skiljer sig dock inte mycket för de olika situationerna. Ett exempel på detta visas i Tabell 6.2 för  $b = 1,8$  m och för kravet  $t_c = 100$  m.

Tabell 6.2 Värden på  $\alpha$  samt  $\gamma$  för de stokastiska variablerna  $t_c$ ,  $f_{f1crk}$  samt  $q$  då kravet för  $t_c = 100$  mm samt  $b = 1,8$  m.

| Situation | $\alpha_t$ | $\alpha_f$ | $\alpha_\gamma$ | $\gamma_t$ | $\gamma_f$ | $\gamma_q$ |
|-----------|------------|------------|-----------------|------------|------------|------------|
| 1         | 0,981      | 0,189      | -0,05           | 3,870      | 1,121      | 1,008      |
| 2         | 0,982      | 0,182      | -0,05           | 3,876      | 1,115      | 1,008      |
| 3         | 0,980      | 0,194      | -0,05           | 3,864      | 1,124      | 1,008      |
| 4         | 0,981      | 0,187      | -0,05           | 3,870      | 1,119      | 1,008      |

Med partialkoefficienterna från Tabell 6.2, erhöles erforderlig  $t_c$  enligt Figur 6.6. Mest sprutbetong krävs således för en situation som kan ses som fritt upplagd med en pyramidformad last, och minst sprutbetong för situationen som är fast inspänd med en utbredd last.



Figur 6.6 Erforderlig  $t_c$  för de fyra situationerna enligt Figur 5.3, med varierat  $b$ . Skillnaden mellan situationerna beror på att de har olika  $M_{max}$ .

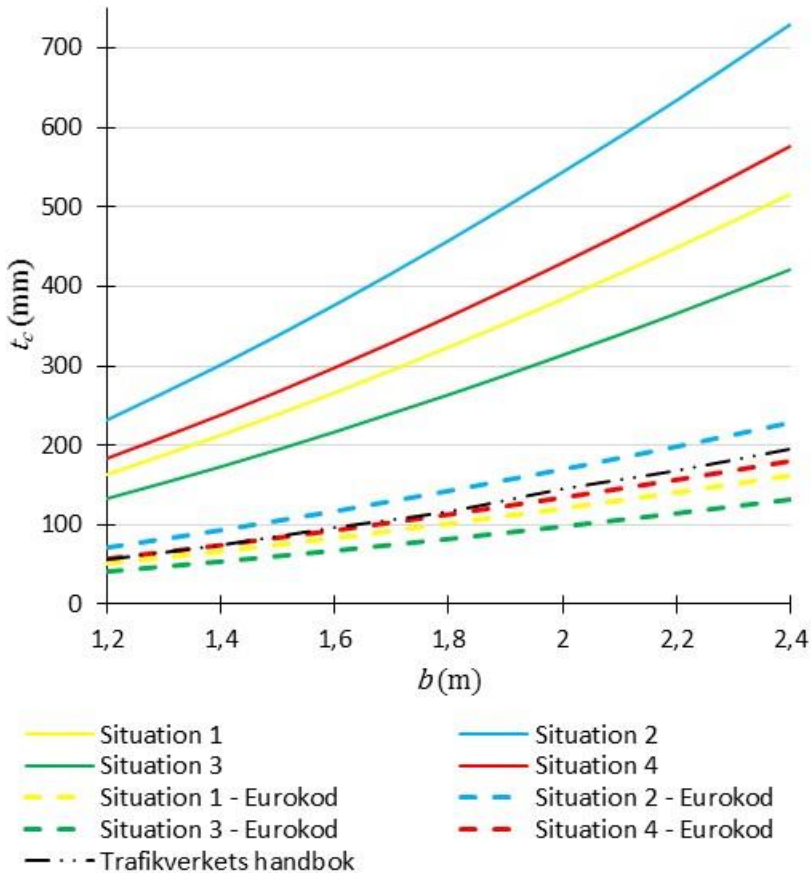
## 7. Diskussion

Den stora spridningen för  $t_c$  gör att den erhöll höga  $\alpha_t$ -värden, cirka 0,98 för samtliga simuleringar. Detta innebär att  $t_c$  är helt dominerande för  $pf$  jämfört med  $f_{lcrk}$ . Tillsammans med det höga värdet på  $\beta_{target}$  gavs även höga partialkoefficienter för  $t_c$  som låg mellan 3,3 och 3,9.

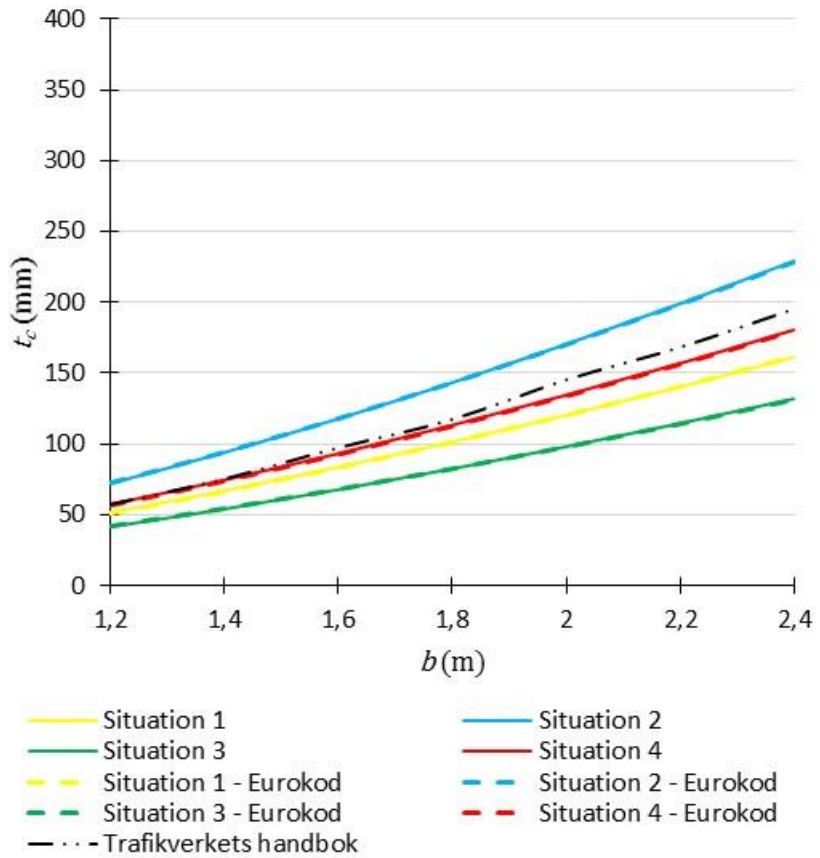
Det  $M_{max}$  som berget påverkar sprutbetongen med måste ses som en stor osäkerhet i analysen. Det är en modellosäkerhet och kan därför reduceras med mer information och kunskap om de aktuella förutsättningarna. Det  $M_{max}$  som användes i analysen valdes dock ”på den säkra sidan” då det gav upphov till det största momentet på sprutbetongen. De fyra alternativa  $M_{max}$  undersöktes för att se hur stor inverkan detta hade. Dessutom användes samma last som Trafikverket använder i sin handbok, varför en rättvisare jämförelse kan göras av den erforderliga  $t_c$ . Figur 7.1 visar den erhållna erforderliga  $t_c$  enligt Figur 6.6, men som en jämförelse har även samtliga situationer beräknats med de partialkoefficienter som Trafikverkets handbok refererar till i Eurokod (Kapitel 3.1). Även Figur 3.2 har ritats in som är det exempel som användes i handboken. Från Figur 7.1 kan utläsas att Trafikverket i sin handbok förmodligen förutsätter att bergslasten kan ses som pyramidformad, samt att sprutbetongen kan ses som relativt inspänd, det vill säga att den har en hög inspänningsgrad. Det är följaktligen en stor skillnad mot den fritt upplagda plattan som antogs i sannolikhetsanalysen i detta examensarbete.

För att erhålla samma nivå på  $t_c$  för de fall med de nyligen beräknade partialkoefficienterna som i situationerna från Trafikverket krävdes att  $\beta_{target}$  sänktes från 4,75 till 1,2, vilket illustreras i Figur 7.2. Ett  $\beta_{target}$  av 1,2 innebär ett årligt  $pf_{target}$  på cirka 12 % vilket givetvis inte skulle vara acceptabelt. Det är dock viktigt att beakta är det genomgående i denna rapport förutsatts att ett bergblock av en specifik storlek *alltid* belastar

sprutbetongen. Sannolikheten för att detta skulle vara sant är mycket liten. För att åstadkomma samma erforderliga  $t_c$  som Trafikverket idag använder i sin handbok skulle det krävas att sannolikheten för att bergblocket finns, gick att kvantifiera till  $8 \cdot 10^{-6}$ , enligt grundläggande sannolikhetsteori. Problemet ligger dock i att kvantifiera just denna sannolikhet.



Figur 7.1 Erforderlig  $t_c$  med varierat  $b$ . De heldragna linjerna visar de fyra situationer som visas i Figur 7.2, med partialkoefficienter beräknade på ett sannolikhetsanalytiskt sätt, med ett  $\beta_{target}$  av 4,75. De fyra färgade, streckade linjerna beskriver samma fyra situationer, men med de partialkoefficienter som återfinns i Eurokod. Den svarta streckade linjen visar ett exempel från Trafikverkets handbok (Figur 3.2).



Figur 7.2 Samma linjer som från Figur 7.3, men då de fyra heldragna linjernas  $\beta_{target}$  sänkts från 4,75 till 1,2 och därför sammanfaller med de streckade, färgade linjerna.



## 8. Avslutande kommentarer

### 8.1. Statistiska fördelningar

De fördelningar som tagits fram i detta examensarbete visas i Figur 4.2 för  $f_{lcrk}$  och Figur 4.1 för  $t_c$ . Då det kan vara önskvärt med en fördelning av  $t_c$  oavsett kravet kan istället den normaliserade fördelningen i Figur 4.4 användas. Det är dock viktigt att komma ihåg min föreliggande misstanke om att kravet på vissa sektioner har förbisetts, och att användning av fördelningen därför kan ge upphov till en viss överdimensionering.

För att få en klarare bild över osäkerheten i data skulle det vara nödvändigt med mer insyn i hur mätningarna är utförda. De mätningar för  $t_c$  som ligger till grund för den här rapporten förefölls inte riktigt ha följt det uppsatta kontrollprogrammet, där det är angivet att varje mätpunkt skall nedtecknas till närmaste millimeter. Vilka instrument som använts och vilken noggrannhet instrumentet har måste därför undersökas.

### 8.2. Sannolikhetsbaserad dimensionering

Den stora skillnaden för de beräknade partialkoefficienterna, för de olika fallen, visar på begränsningen med att använda fasta partialkoefficienter såsom Eurokoderna föreslår. För partialkoefficienterna som beräknas med sannolikhetsbaserade metoder kan säkerheterna hos varje enskild variabel beaktas samtidigt som det ger en förstärkning där partialkoefficienterna är anpassade till just det aktuella fallet, till skillnad mot de som finns i Eurokod där samma partialkoefficienter används oberoende av vilken slags konstruktion materialet skall användas till. Man kan tänka sig att det är en viss skillnad på sprutbetongförstärkning

och annan användning av armerad betong, vilket inte återspeglas i dessa partialkoefficienter.

Att tillräckligt med data finns att tillgå är dock viktigt, och för sannolikhetsanalysen som utförts i detta arbete saknas just data för hur stor sannolikheten för att det finns något bergblock som belastar sprutbetongen överhuvudtaget. Att då som i detta arbete utgå från att ett stort block alltid belastar sprutbetongen skulle, vilket kan ses i Figur 6.5, innebära en kraftig överdimensionering.

En bra metod för att kvantifiera sannolikheten för blockets *eventuella* existens krävs för en rimlig sannolikhetsbaserad dimensionering, då brottmekanismen är böjbrott i sprutbetong. Även mer forskning gällande det mekaniska systemet, som beskriver hur sprutbetongen går till brott, samt hur många oberoende element som ingår i systemet för  $t_c$ , skulle innebära en reducerad osäkerhet för parameterns spridning.

## 9. Källförteckning

- Ansell, A., 2009. *3D-modellering av samverkan mellan berg och sprutbetong - Förstudie*. Stockholm: SveBeFo.
- Baecher, G. B. & Christian, J. T., 2003. *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Boverket, 2016. *Boverkets konstruktionsregler, EKS 10*. Karlskrona: Boverket.
- CEN, 2002. *EN 1990 Eurocod - Basis of structural design*. Bryssel: European Committee for standardisation.
- CEN, 2004. *EN 1997-1:2004 Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 1: Allmänna regler*. Bryssel: European Committee for standardisation .
- CEN, 2005. *EN 1992-1-1:2005 Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*. Bryssel: European Committee for standardisation.
- Fredriksson, A., 1994. *Bergmekanik. Dimensionering av sprutbetong. PM 94-02-15*. Stockholm: Södra Länken Konsulterna.
- Hasofer, A. M. & Lind, N. C., 1974. *Exact and invariant second-moment code format*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 100(1), pp. 111-121.
- Langford, C. J. & Diederichs, M. S., 2013. *Reliability based approach to tunnelling design using a modified point estimate method*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 60, pp. 263-276.
- Langford, C. J. & Diederichs, M. S., 2015. *Reliable support design for excavations in brittle rock using a global response surface method*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(2), pp. 669-689.
- Lemaire, M., 2005. *Structural reliability*. London: ISTE Ltd.

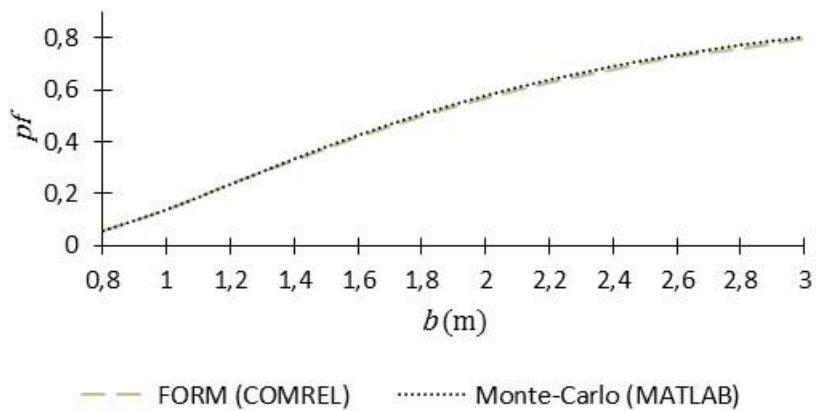
- Lindfors, m.fl., 2015. *Projektering av bergkonstruktioner*. Sundbyberg: Trafikverket.
- Low, B. K. & Einstein, H. H., 2013. *Reliability analysis of roof wedges and rockbolt forces in tunnels*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, pp. 1-10.
- Lü, Q., Chan, C. L. & Low, B. K., 2013. *System reliability assessment for a rock tunnel with multiple failure modes*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(4), pp. 821-833.
- Lü, Q., Sun, H. Y. & Low, B. K., 2011. *Reliability analysis of ground-Support interaction in circular tunnels using the response surface method*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48(8), pp. 1329-1343.
- Malmgren, L., Nordlund, E. & Rolund, S., 2005. *Adhesion strength and shrinkage of shotcrete*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(1), pp. 33-48.
- MathWave Technologies, 2016. *Mathwave - Data analysis & simulation*. [Online] URL: [http://www.mathwave.com/help/easyfit/html/analyses/goodness\\_of\\_fit/chi-squared.html](http://www.mathwave.com/help/easyfit/html/analyses/goodness_of_fit/chi-squared.html) [Använd 4 oktober 2016].
- Melchers, R. E., 1999. *Structural reliability analysis and prediction*. 2 red. Chichester: John Wiley & sons.
- Mirzaeian, Y., Shahriar, K. & Sharifzadeh, M., 2015. *Tunnel probabilistic structural analysis using the FORM*. *Journal of Geological Research*, 2015, pp. 1-9.
- Müller, R., 2013. *Probabilistic stability analysis of embankments founded on clay*. Doktorsavhandling TRITA-JOB PHD 1018. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan, KTH.
- Nilsson, U., 2003. *Structural behavior of fibre reinforced concrete anchored in rock*. Doktorsavhandling TRITA-BKN 71. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan, KTH.
- Oreste, P., 2005. *A probabilistic design approach for tunnel supports*. *Computers and Geotechnics*, 32(7), pp. 520-534.
- RCP, 1998. *COMREL & SYSREL: Users manual (STRUREL)*. München: RCP.

- SIS, 2006a. *Proving av sprutbetong - Del 6: Tjockleksmätning*. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2006b. *Proving av sprutbetong - Del 3: Böjdraghållfasthet (sprick-, maximal- och residualhållfasthet) hos fiberarmerade provbalkar*. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- Spross, J., 2016. *Toward a reliability framework for the observational method*. Doktorsavhandling TRITA-JOB PHD 1023. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan, KTH.
- Spross, J., Johansson, F. & Larsson, S., 2013. *On the use of pore pressure measurements in safety reassessments on concrete dams founded on rock*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 8(2), pp. 117-128.
- Stille, H., Holmgren, M., Olsson, L. & Andersson, J., 2005. *Dimensionering av samverkanskonstruktioner i berg med sannolikhetsbaserade metoder - En inledande studie*, Stockholm: SveBeFo.
- Trafikverket, 2011. *TRVK Tunnel 11*. Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket, 2015. *Skötsel av tunnlar*. [Online] URL: <http://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall-av-vag-och-jarnvag/Sa-skoter-vi-broar-och-tunnlar/Skotsel-av-tunnlar/> [Använd 24 oktober 2016].
- Westberg, M., 2010. *Reliability-based assessment of concrete dam stability*. Doktorsavhandling TVBK 1039. Lund: Lunds univeritet.
- von Matérn, M., 2009a. *Citybanan i Stockholm - Del B, 9523 - Norrströmstunneln, Gemensam teknisk beskrivning, Berg*. Stockholm: Trafikverket, WSP.
- von Matérn, M., 2009b. *Citybanan i Stockholm, 9523 - Norrströmstunneln, Gemensamt kontrollprogram, Berg*. Stockholm: Trafikverket, WSP.
- Yang, C. Y., Xu, M. X. & Chen, W. F., 2007. *Reliability analysis of shotcrete lining during tunnel construction*. Journal of Construction Engineering and Management, 133(12), pp. 975-981.

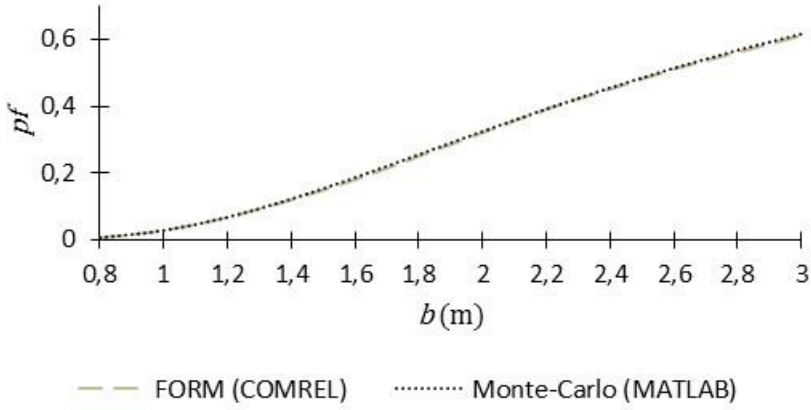


## Bilaga 1

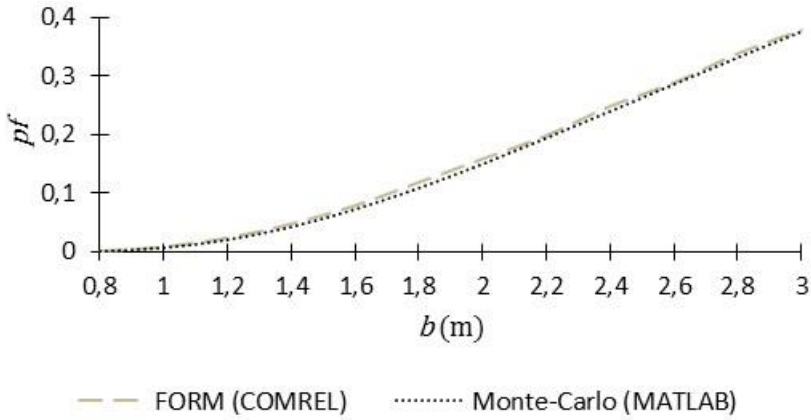
I denna bilaga presenteras resultaten från Monte-Carlo simuleringen som användes för att bekräfta att COMREL hittat de rätta  $pf$ - samt  $\beta$ -värdena. Dessa resultat erhöles efter 100 000 000 simuleringar.



Figur B1 Erhållna  $pf$ -värden från Monte-Carlo simuleringen, samt jämförelse med  $pf$ -värden från COMREL, då fördelningen Krav 50 användes för att beskriva  $t_c$ .



Figur B2 Erhållna  $pf$ -värden från Monte-Carlo simuleringen, samt jämförelse med  $pf$ -värden från COMREL, då fördelningen Krav 75 användes för att beskriva  $t_c$ .



Figur B3 Erhållna  $pf$ -värden från Monte-Carlo simuleringen, samt jämförelse med  $pf$ -värden från COMREL, då fördelningen Krav 100 användes för att beskriva  $t_c$ .

## Bilaga 2

I denna bilaga beskrivs hur beräkningarna är genomförda i Excel för att erhåll partialkoefficienterna. Först bestämdes det  $\beta_{target}$  som bäst motsvarar  $pf_{target} = 10^{-6}$ , som hämtats från Trafikverket. Genom att se i Tabell 2.1. erhöles  $\beta_{target} = 4,75$  då  $pf_{target} = 1,015 \cdot 10^{-6}$ . Det hade varit möjligt att interpolera mellan två punkter för ett mer exakt värde på  $\beta_{target}$  men detta ansågs tillräckligt nära.

Dimensioneringspunkten beräknades med ekvation (2.19).

$$y_i^* = -\alpha_i \cdot \beta_{target} \quad (2.19)$$

Sannolikheten att denna punkt överskrids har beräknats med ekvation (2.11). Detta har genomförts med Excels inbyggda funktion NORM.S.FÖRD.

$$pf = \text{NORM.S.FÖRD}(y_i^*; \text{SANT}) \quad (B.1)$$

Det dimensionerande värdet erhöles av inversen av  $pf$ . Detta har beräknats utifrån variabelns ursprungliga fördelning med hjälp av någon av följande Excel-funktioner:

$$x_i^* = \text{LOGNORM.INV}(pf; \lambda; \zeta) \quad (B.2)$$

$$x_i^* = \text{BETA.INV}(pf; r; z; [a]; [c]) \quad (B.3)$$

Partialkoefficienten erhöles av ekvation (2.23) eller (2.24)

$$\gamma_R = \frac{x_{kR}}{x_R^*} \quad (2.23)$$

$$\gamma_s = \frac{x_s^*}{x_{ks}} \quad (2.24)$$

Nedan följer ett räkneexempel för  $b = 0,8$  m och då kravet för  $t_c = 50$  mm

$$y_t^* = -0981 \cdot 4,75 = -4,662$$

$$pf = \text{NORM.S.FÖRD}(-4,662; \text{SANT}) = 1,57 \cdot 10^{-6}$$

$$x_t^* = \text{LOGNORM.INV}(1,57 \cdot 10^{-6}; 4,33; 0,35) = 14,89$$

$$\gamma_t = \frac{50}{14,89} = 3,35$$

ISSN 1652-599X; 17:03

[www.kth.se](http://www.kth.se)