

DIMENSIONERING AV BERGFÖRSTÄRKNING ENLIGT EUROKOD MED TILLFÖRLITLIGHETSBAS ERADE METODER

William Bjureland

2020-06-30

FÖRORD

Projektet har genomförts vid KTH:s avdelning för Jord och Bergmekanik under ledning av Lektor Fredrik Johansson, Professor Stefan Larsson samt Postdoktor Johan Spross.

Projektet har utgjorts av ett doktorandprojekt. Doktorand, tillika författare av denna rapport, har varit William Bjureland.

Jag vill rikta ett stort tack till mina finansiärer som gjort detta projekt möjligt: SBUF, BESAB, SVC (Svenskt Vattenkraftcentrum), BeFo (Stiftelsen för Bergteknisk Forskning) samt SKB (Svensk Kärnbränslehantering).

Jag vill även rikta ett stort tack till personerna i min referensgrupp: Tommy Ellison (BESAB), Robert Sturk (Skanska), Cecilia Montelius (NCC), Lars-Olof Dahlström (Golder/LTU), Per Tengborg (BeFo), Diego Mas Ivars (SKB), Jonny Sjöberg (Itasca), Mats Holmberg (Tunnel Engineering), Håkan Stille (KTH), Fredrik Johansson (KTH), Stefan Larsson (KTH) och Johan Spross (KTH). Deras frågor, synpunkter och rekommendationer har varit mycket värdefulla för projektet.

Sist men absolut inte minst vill jag tacka mina handledare Fredrik Johansson, Stefan Larsson och Johan Spross för deras stöttning och värdefulla bidrag till mitt arbete.

Stockholm, Juni 2020

William Bjureland

SAMMANFATTNING

Användning av sannolikhetsbaserade metoder för dimensionering av bergförstärkning är ett tillvägagångssätt som är accepterat i Eurokoderna. Vid dimensionering med dessa metoder beaktas osäkerheter stringent genom att ansätta sannolikhetsfördelningar för relevanta parametrar. Konstruktionens säkerhet säkerställs genom att verifiera att sannolikheten att överskrida bärförmågan är lägre än den i Eurokoderna kravställda brottsannolikheten. För tillämpning av sannolikhetsbaserade metoder för dimensionering av sprutbetongförstärkning för lösa block har ett problem varit att data saknats för att kunna beskriva relevanta parametrar med representativa sannolikhetsfördelningar. Dessutom samverkar de olika brottmoderna och måste därför betraktas ur ett systemperspektiv, vilket inte beaktats i tidigare studier. I denna rapport presenteras resultatet av ett doktorandprojekt med finansiering av SBUF, BeFo, SVC och SKB. Baserat på ovanstående aspekter presenteras en metodik som framtagits inom projektet för dimensionering av sprutbetongförstärkning för lösa block med sannolikhetsbaserade metoder. Inledningsvis presenteras sannolikhetsfördelningar för sprutbetongens parametrar baserat på en stor mängd analyserade data från Citybanan. Därefter presenteras den utvecklade dimensioneringsmetodiken, vilken bygger på att en initial dimensionering av sprutbetongen utförs innan tunneldrivningen påbörjas och att den applicerade sprutbetongens bärförmåga därefter verifieras med hjälp av kontrollmätningar från fält och Bayesiansk statistik. Metodiken möjliggör en optimering av sprutbetongtjockleken med hänsyn till rådande osäkerheter och kostnader.

INNEHÅLL

INTRODUKTION.....	4
DIMENSIONERING AV SPRUTBETONG MED SANNOLIKHETSBASERADE METODER...	5
ANALYTISKA BERÄKNINGAR	5
SANNOLIKHETSBASERADE METODER.....	6
OSÄKERHETER I INDATA PARAMETRAR OCH DESS EFFEKT PÅ SPRUTBETONGENS KAPACITET.....	7
SANNOLIKHETSFÖRDELNINGAR FÖR INDATA PARAMETRAR.....	7
SPRUTBETONGTJOCKLEKENS RUMSLIGA SPRIDNING OCH DESS EFFEKT PÅ SPRUTBETONGENS BÄRFÖRMÅGA.....	109
FRAMTAGEN DIMENSIONERINGSMETODIK.....	12
INITIAL DIMENSIONERING	12
KONTROLL UNDER UTFÖRANDET	13
VERIFIERING AV DEN APPLICERADE SPRUTBETONGENS SÄKERHET.....	13
SLUTORD	13
REFERENSER	14
REDOVISNING	FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.14
DOKUMENTATION	FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.15
MINIMIKRAV PÅ NORMAL FOU-RAPPORT.....	FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.15

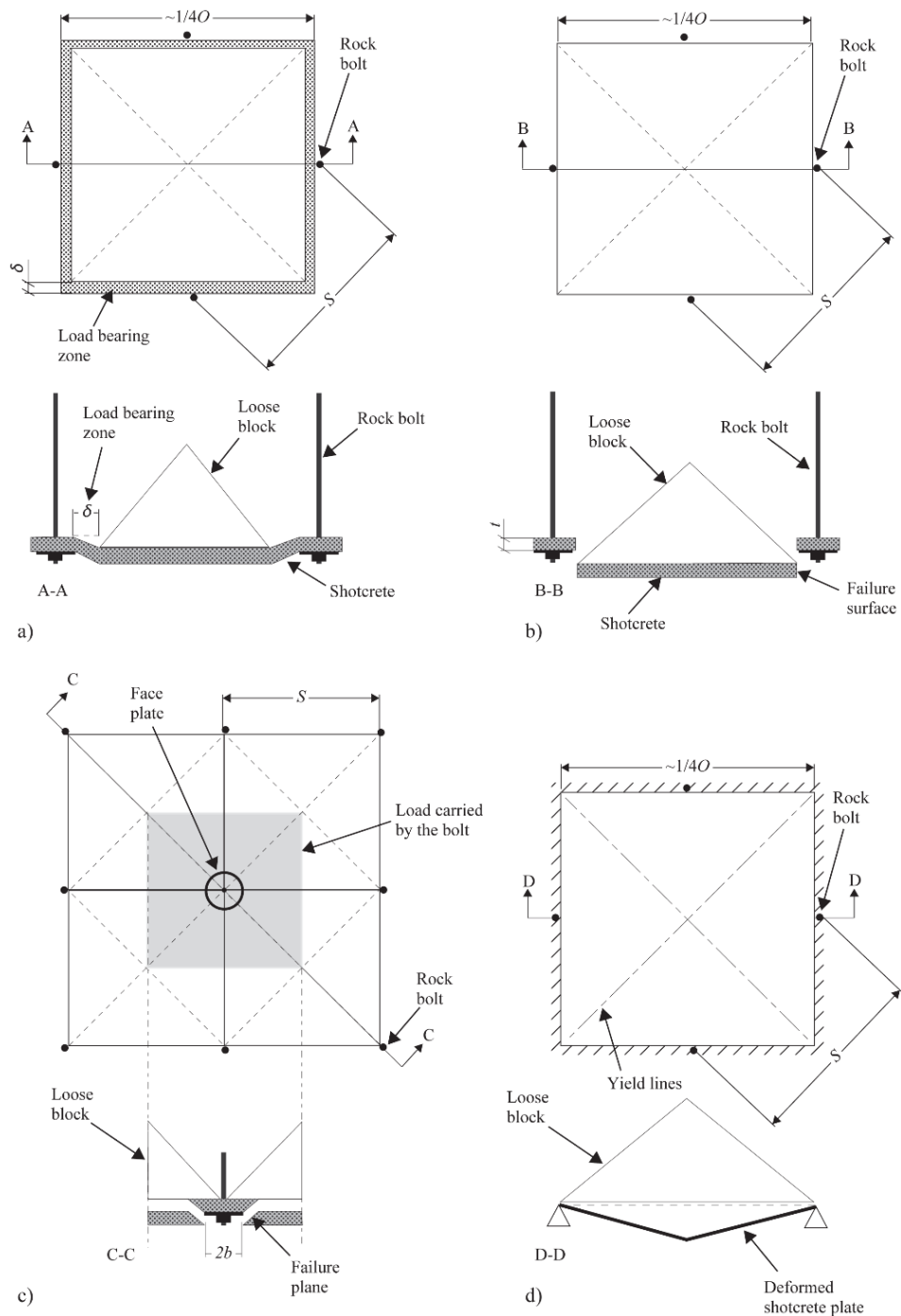
INTRODUKTION

Lösa block som kan glida eller falla in i en tunnel är ett vanligt förekommande lastfall som måste beaktas vid dimensionering och byggnation av tunnlar i hårt sprickigt berg. En vanlig förstärkningsmetod för att säkra dessa block är systematiskt installerade bultar i kombination med sprutbetong. Denna förstärkningsmetod verkar på så sätt att stora block säkras av de systematiskt installerade bultarna och små block som får plats mellan bultarna säkras av sprutbetongen.

För att säkerställa sprutbetongens bärförmåga är det vanligt att använda analytiska beräkningsmetoder. Bärförmågan analyseras då genom att beakta tre idealiserade brottmoder: stansning av berg genom sprutbetongen, stansning av bultbricka genom sprutbetongen samt böjbrott i sprutbetongen, vilka alla är beroende av sprutbetongens vidhäftningsförmåga mot bergytan. Samtliga brottmoder redovisas i Figur 1.

För att beakta osäkerheter vid dimensioneringen kan olika tillvägagångssätt nyttjas. Ett tillvägagångssätt som är accepterat i Eurokoderna (CEN 2002) är att använda sig av sannolikhetsbaserade metoder. Osäkerheter beaktas då genom att ansätta sannolikhetsfördelningar för alla relevanta parametrar. Konstruktionens säkerhet säkerställs genom att tillse att den beräknade brottsannolikheten är mindre än den i Eurokoderna (CEN 2002) krävda brottsannolikheten. För tillämpning av sannolikhetsbaserade metoder vid dimensionering av sprutbetongförstärkning för lösa block har ett problem varit att data saknats för att kunna beskriva relevanta parametrar med representativa sannolikhetsfördelningar. Dessutom samverkar de olika brottmoderna och de måste därför betraktas ur ett systemperspektiv, vilket inte beaktats i tidigare studier (som exempelvis Barrett & McCreath 1995). I tidigare studier finns det inte heller beskrivet hur sannolikhetsbaserade metoder kan nyttjas för att stringent ta hänsyn till ingående osäkerheter kopplat till sprutbetongen i de olika stegen i designprocessen (den initiala dimensioneringen, kontrollerna under utförandet samt verifiering av den färdiga konstruktionen).

Baserat på ovan beskrivna aspekter har en sannolikhetsbaserad dimensioneringsmetodik för sprutbetongförstärkning av lösa block utvecklats i detta projekt, vilken presenteras kortfattat i denna rapport. Inledningsvis presenteras sannolikhetsfördelningar för sprutbetongens parametrar baserat på en stor mängd data från Citybanan. Därefter presenteras den utvecklade dimensioneringsmetodiken, vilken bygger på att en initial dimensionering av sprutbetongen utförs innan tunneldrivningen påbörjas och att den applicerade sprutbetongens bärförmåga därefter verifieras med hjälp av kontrollmätningar från fält och Bayesiansk statistik.



Figur 1. Brottmoder för sprutbetong. a) vidhäftningsbrott; b) stansning av berg; c) stansning av bultbricka; d) böjbrott (© Bjureland et al., 2019, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

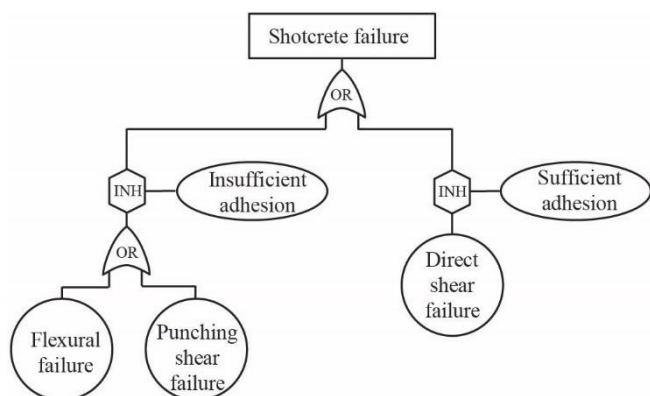
DIMENSIONERING AV SPRUTBETONG MED SANNOLIKHETSBASERADE METODER

Analytiska beräkningar

Ett vanligt tillvägagångssätt för att dimensionera sprutbetong mot lösa block är att använda sig av analytiska beräkningsmetoder, se exempelvis Lindfors et al. (2018). Bärförmågan analyseras

då genom att beakta tre idealiserade brottmoder: stansning av berg genom sprutbetongen, stansning av bultbricka genom sprutbetongen samt böjbrott i sprutbetongen. Ekvationer för respektive brottmod går att finna i exempelvis Lindfors et al. (2018) men de härstammar från Barrett & McCreath (1995). Vilken eller vilka brottmoder som är dimensionerande är betingat av sprutbetongens vidhäftningsförmåga relativt tyngden från det lösa blocket.

Om vidhäftningsförmågan överstiger tyngden av det lösa blocket styrs sprutbetongens kapacitet av dess förmåga att motverka stansning av det lösa blocket. Om vidhäftningsförmågan inte är tillräcklig och sprutbetongen därför släpper från bergytan styrs sprutbetongens kapacitet istället av dess förmåga att motverka stansning av bultbrickan genom sprutbetongen och dess kapacitet att motstå böjmoment. Sprutbetongen agerar således som ett korrelerat betingat strukturellt system. Korrelerat eftersom alla brottmoder innehåller lasten från blocket samt att brottmoderna delar vissa parametrar och betingat eftersom de är betingade av sprutbetongens vidhäftningsförmåga. Det strukturella systemet beskrivs i Figur 2 med hjälp av ett felträd (Bjureland et al. 2019).



Figur 2. Felträd för sprutbetong (© Bjureland et al., 2019, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Sannolikhetsbaserade metoder

För att ta hänsyn till ingående osäkerheter vid dimensionering av sprutbetongen kan sannolikhetsbaserade metoder användas. Osäkerheter hanteras då genom att man definierar ett antal gränsv funktioner, G_i , som innehåller alla relevanta osäkra parametrar i vektorn \mathbf{X} . Sannolikheten att överskrida sprutbetongens kapacitet analyseras därefter genom att skatta sannolikheten att överskrida gränsen mellan säkert och osäkert beteende i gränsv funktionen. Denna skattning kan utföras genom att utvärdera den multidimensionella integralen över alla osäkra regioner, D_i , (Melchers 1999):

$$p_{f,\text{sys}} = P \left[\bigcup G_i(\mathbf{X}) \leq 0 \right] = \int_{\bigcup D_i \in X} \dots \int f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{x}. \quad (1)$$

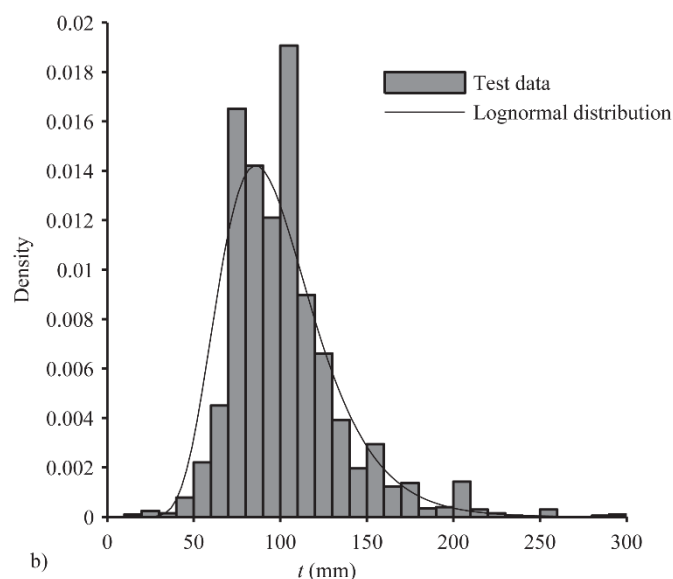
Det är värt att notera att denna integral i många fall är omöjlig att lösa analytiskt. Därför används normalt förenklade metoder eller numeriska metoder som Monte Carlo simuleringar för att lösa den.

OSÄKERHETER I INDATA PARAMETRAR OCH DESS EFFEKT PÅ SPRUTBETONGENS KAPACITET

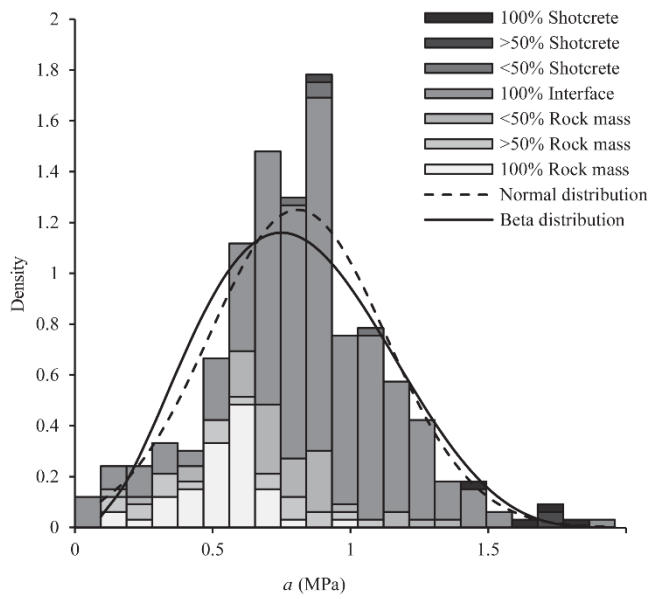
Sannolikhetsfördelningar för indata parametrar

En grundläggande förutsättning för att kunna utföra sannolikhetsbaserade beräkningar är att alla ingående parametrar är statistiskt kvantifierade och finns beskrivna i form av en sannolikhetsfördelning. Detta har varit ett problem som tidigare begränsade tillämpbarheten av dessa metoder för dimensionering av sprutbetong. I Bjureland et al. (2019) kvantifierades dock samtliga av sprutbetongens ingående parametrar. Även passande sannolikhetsfördelningar togs fram för respektive parameter. Som underlag för kvantifieringen användes en stor mängd data erhållen från de kontrollmätningar som utfördes i kontrollprogrammet i projekt Citybanan. Resultatet från den statistiska kvantifieringen framgår av Tabell 1 samt Figur 3–6. Notera att samtliga av de kvantifierade parametrarna inte redovisas här i figur-form.

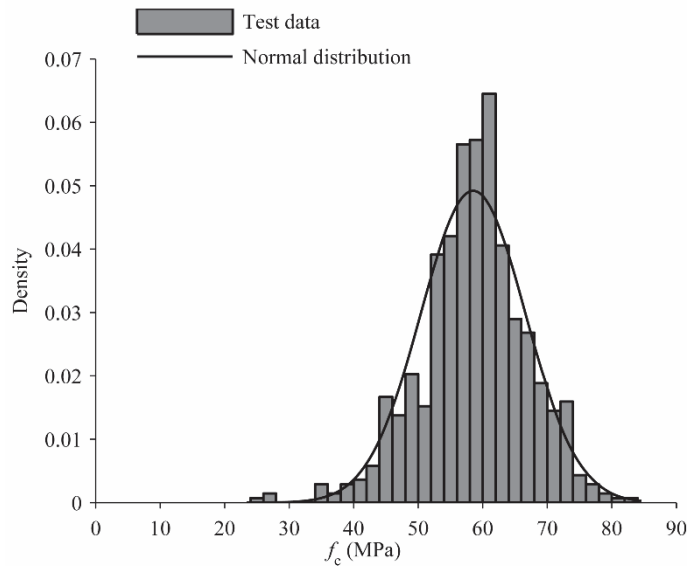
Som framgår av tabellen beskrevs osäkerheten i parametrarna i de flesta fall bäst med en normalfördelning. Undantaget från detta var tjockleken som bäst beskrevs med en lognormalfördelning. En intressant aspekt i resultaten var att medelvärdet för samtliga studerade parametrar var mycket högre än de krav som ställdes på respektive parameter. Kravställningen för de olika parametrarna samt en omfattande beskrivning av den statistiska analysen går att finna i Bjureland et al. (2019).



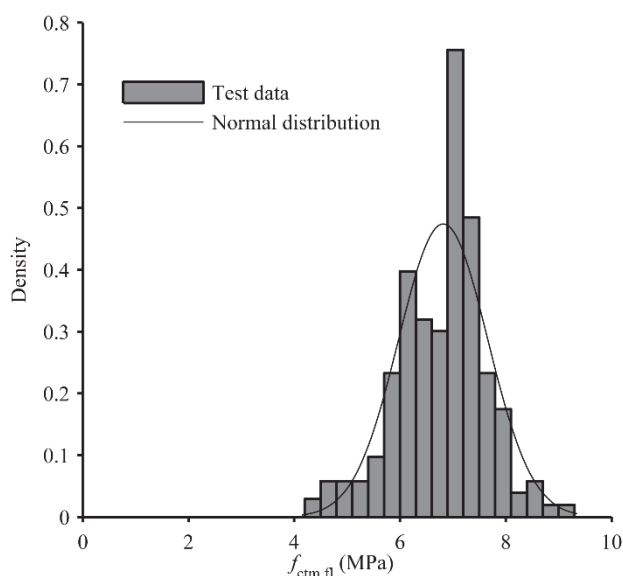
Figur 3. Exempel på sannolikhetsfördelning för sprutbetongtjocklek. Det kravställda värdet uppgick i detta fall till 75 mm (© Bjureland et al., 2019, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Figur 4. Sannolikhetsfördelning för vidhäftning samt information om vart brottet gick vid vidhäftningsprovnigen (© Bjureland et al., 2019, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Figur 5. Sannolikhetsfördelning för tryckhållfasthet (© Bjureland et al., 2019, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Figur 6. Sannolikhetsfördelning för böjdraghållfasthet (© Bjureland et al., 2019, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Tabell 1. Statistiska parametrar för de kvantifierade variablerna tillsammans med föreslagen sannolikhetsfördelning. Tre olika värden presenteras för tjockleken med anledning av den varierande kravställda tjockleken på 50 mm, 75 mm och 100 mm (© Bjureland et al., 2019, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

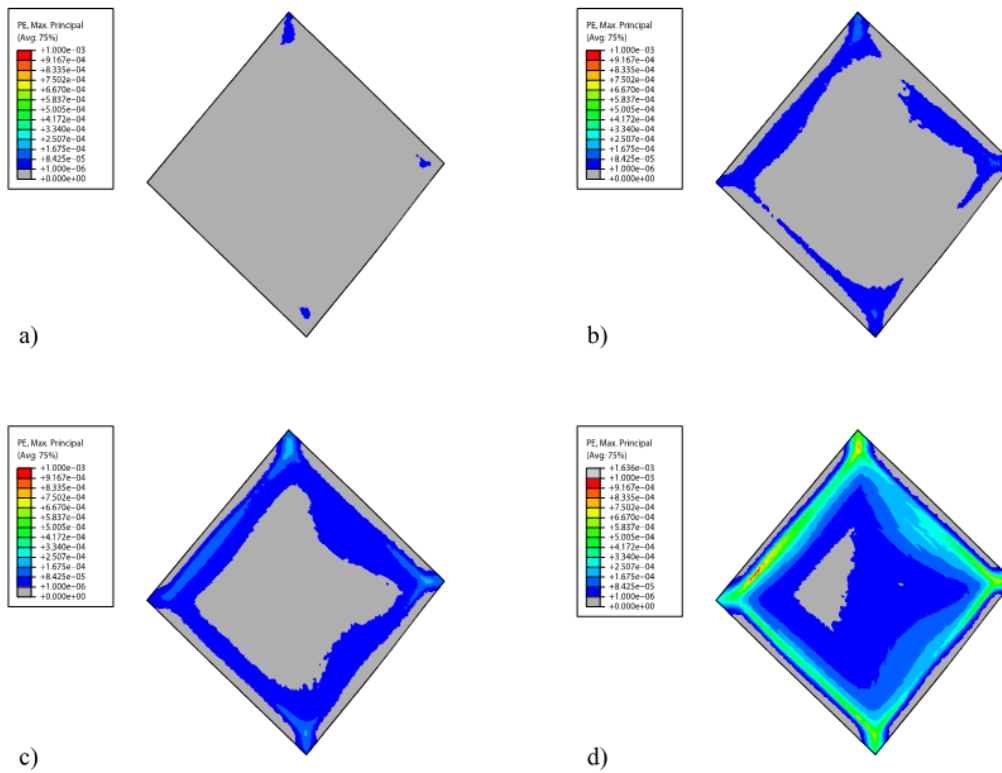
Parameter	Symbol	Medel- värde	Standard- avvikelse	Variations- koefficient	Föreslagen fördelning
Sprutbetong tjocklek	t	81 mm	31 mm	38%	Lognormal
		100 mm	32 mm	32%	
		123 mm	42 mm	34%	
Vidhäftnings- förmåga	a	0.81 MPa	0.32 MPa	40%	Normal
Böjdraghåll- fasthet	$f_{ctm,fl}$	6.8 MPa	0.84 MPa	12%	Normal
Residual böjdraghåll- fasthet	$f_{ctm,fl}^{re}$	3.8 MPa	0.80 MPa	21%	Normal
Tryckhållfast- het	f_c	59 MPa	8.1 MPa	14%	Normal

Sprutbetongtjocklekens rumsliga spridning och dess effekt på sprutbetongens bärförmåga

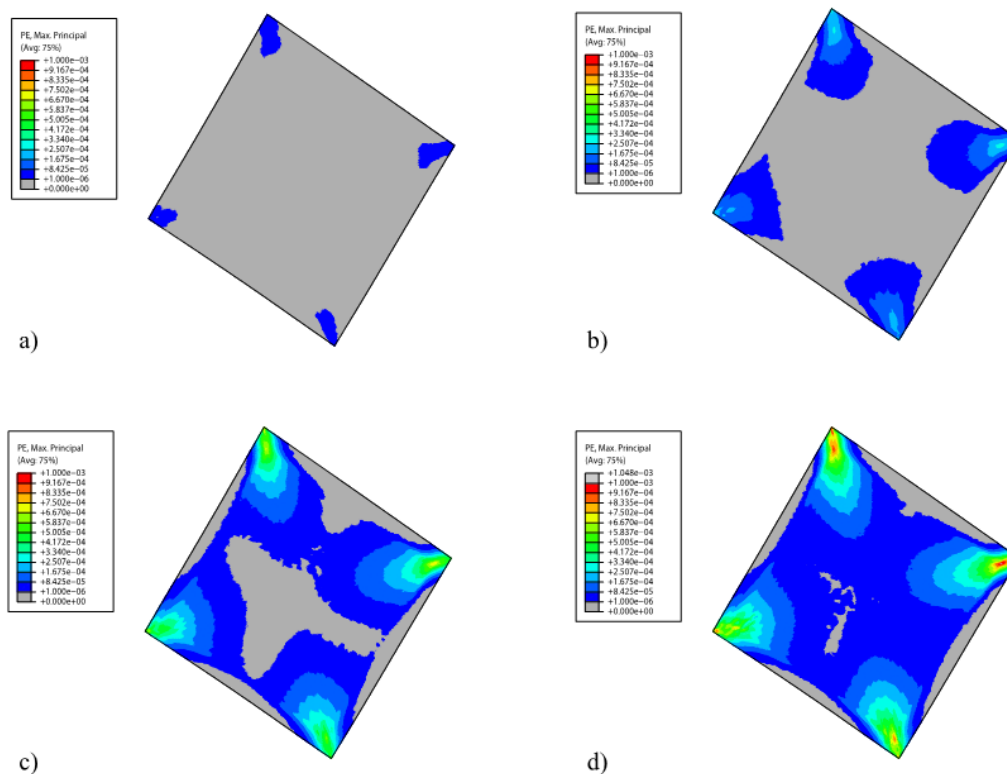
En begränsning med den kvantifierade datan från Citybanan är att den inte beskriver parametrarnas rumsliga spridning, då dagens kontrollmetoder inte är utformade på ett sätt så att de fångar denna. En osäkerhet har även funnits i hur den rumsliga spridningen påverkar sprutbetongens bärförmåga och därmed hur sprutbetongen beter sig som mekaniskt system, det vill säga huruvida sprutbetongen agerar som ett medelvärdesbildande system eller ej och därmed huruvida lasten kan överföras från svagare delar till starkare delar. Vikten av denna aspekt bör understrykas då de ovan beskrivna sannolikhetsbaserade beräkningarna förutsätter att systemet är medelvärdesbildande.

För att studera hur den rumsliga spridningen i sprutbetongtjocklek påverkar sprutbetongens bärförmåga samt för att utreda huruvida sprutbetongen agerar som ett medelvärdesbildande system utförde Bjureland et al. (2020a) numeriska simuleringar. I de numeriska simuleringarna analyserades en sprutbetongplatta med varierande tjocklek, vilken generades med slumpmässiga fält baserade på resultaten från den kvantifiering som Klaube (2018) utförde av den rumsliga spridningen för sprutbetongtjockleken i Äspö laboratoriet samt tjockleksmätningarna i Bjureland et al. (2019). Enligt Klaube (2018) uppgick sprutbetongtjocklekens fluktuationsavstånd till ca 0.8 m, vilket alltså är det avstånd inom vilket storleken på sprutbetongtjockleken uppvisar en stark korrelation med sig själv (Vanmarcke 1977).

Resultaten från simuleringarna visade att sprutbetongens momentkapacitet riskerar att överskattas om den enbart beräknas med tjocklekens rumsliga medelvärde mellan fyra bultar, härifrån benämnd som \bar{t}_{block} . Istället bör det minsta värdet av \bar{t}_{block} och tjocklekens medelvärde längs periferin på det lösa blocket, härifrån benämnd som \bar{t}_{per} , användas vid dimensionering. Anledningen till detta är att den rumsliga korrelationen i sprutbetongtjocklek i förhållande till storleken på blocket medför att sprutbetongtjockleken i centrum av blocket kan vara relativt stor medan tjockleken längs blockets periferi är relativt liten. I ett sådant fall är sprutbetongen i blockets centrum inte involverat i brottet på samma sätt utan brottet sker längs periferin på blocket (jämför figur 7a-d med figur 8a-d). Tjockleken i centrum drar dock upp värdet för \bar{t}_{block} och därför bör man istället använda värdet för \bar{t}_{per} i detta fall. Se Bjureland et al. (2020a) för en mer omfattande och detaljerad presentation av resultaten.



Figur 7 a-d) Illustration över hur plastiska töjningar initieras vid hörnen på blocket och sedan utbreder sig mot hörnen på plattan samt längs med blockets periferi vid en tjockare sprutbetong i centrum av blocket (© Bjureland et al., 2020a, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Figur 8 a-d) Illustration över hur plastiska töjningar initieras vid hörnen på blocket och sedan utbreder sig mot hörnen på plattan samt dess centrum vid en mer jämntjock platta (© Bjureland et al., 2020a, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

FRAMTAGEN DIMENSIONERINGSMETODIK

För att tillse att resultaten från Bjureland et al. (2019) och Bjureland et al. (2020a) blir praktiskt tillämpbara har en sannolikhetsbaserad dimensioneringsmetodik för sprutbetongtjocklek tagits fram som på ett stringent vis hanterar ingående osäkerheter (Bjureland et al. 2020b). Metodiken grundar sig i resultaten från Bjureland et al. (2019) och Bjureland et al. (2020a) samt det normala dimensioneringsförfarandet för tunnelförstärkning kombinerat med det dimensioneringskoncept för sprutbetongtjocklek som föreslogs av Stille & Holmberg (2006), det vill säga att man gör en initial dimensionering och baserat på observationer under byggnation verifierar att den slutgiltiga förstärkningen är tillräcklig med hjälp av Bayesiansk statistik.

Initial dimensionering

I den initiala dimensioneringen säkerställs sprutbetongens bärförmåga genom att tillse att den beräknade brottsannolikheten är mindre än den i Eurokoderna kravställda brottsannolikheten. Det finns olika sätt att göra detta på men ett fördelaktigt sätt är att analysera det strukturella systemet i Figur 2 med hjälp av Monte Carlo simuleringar. Korrelationen mellan brottmoderna och dess beroende på vidhäftningsförmågan tas då hänsyn till direkt i simuleringarna.

En utmaning med den initiala dimensioneringen är att det i dagsläget inte finns information om lämpliga sannolikhetsfördelningar för \bar{t}_{block} och \bar{t}_{per} i förhållande till den sprutbetongtjocklek

som entreprenören har som riktvärde för sina arbeten. Tills sådan information finns tillgänglig kan detta lösas genom att generera slumpmässiga fält med en storlek motsvarande utrymmet mellan fyra bultar baserat på den kvantifierade spridningen i tjocklek som presenteras i Bjureland et al. (2019) och Klaube (2018). Utifrån resultaten av dessa slumpmässiga fält kan a priori-fördelningar för \bar{t}_{block} och \bar{t}_{per} erhållas och brottsannolikheten kontrolleras.

Kontroll under utförandet

För att reducera osäkerheten i sprutbetongtjocklek utförs sedan observationer under tunneldrivningen. Olika metoder kan användas för detta men i denna dimensioneringsmetodik används laser-skanning före och efter applicering av sprutbetongen. På så vis kan sprutbetongtjockleken rumsliga spridning kvantifieras och \bar{t}_{block} och \bar{t}_{per} i samtliga fack mellan bergbultar kan utvärderas.

Verifiering av den applicerade sprutbetongens säkerhet

För att verifiera att den applicerade sprutbetongförstärkningen har en brottsannolikhet som är mindre än den i Eurokoderna kravställda brottsannolikheten, kan den initiala dimensioneringen uppdateras med informationen från laser-skanningen genom att använda bayesianska metoder. De a priori-fördelningar som användes i den initiala dimensioneringen kan därmed uppdateras till a posteriori-fördelningar allteftersom information från laser-skanningen erhålls. Med hjälp av den uppdaterade a posteriori-fördelningen kan brottsannolikheten för den färdiga konstruktionen tas fram. Det skall dock noteras att eftersom mätnoggrannheten är så hög i laser-skanningen kan osäkerheten i tjocklek i \bar{t}_{block} och \bar{t}_{per} för varje utrymme mellan bultar i princip försummas. Detta medför att a posteriori-fördelningarna för \bar{t}_{block} och \bar{t}_{per} utgörs av ett deterministiskt värde för de båda i varje utrymme mellan bultarna. På så vis har osäkerheten i tjocklek kraftigt reducerats och därmed kan en potentiell optimering av tjockleken tillåtas. Detta genom att entreprenörens riktvärde för sprutbetongtjockleken ger en viss sannolikhet att \bar{t}_{block} och \bar{t}_{per} underskrider den tjocklek som krävs för att den beräknade brottsannolikheten ska vara mindre än den i Eurokoderna kravställda brottsannolikheten. Desto mindre entreprenörens riktvärde är desto större är sannolikheten att \bar{t}_{block} och \bar{t}_{per} överskrider kravet och därmed att entreprenören behöver gå tillbaka och applicera mer sprutbetong. Denna sannolikhet tillsammans med kostnaden att gå tillbaka jämfört kostnaden att applicera ett tjockare lager från början ger en optimerad tjocklek.

SLUTORD

I den här rapporten har resultaten från ett nyligen avslutat doktorandprojekt kortfattat redogjorts för. Projektet har utvecklat metoder för sannolikhetsbaserad dimensionering av sprutbetong. Jag har visat hur sprutbetongen kan definieras som strukturellt system och hur detta system kan analyseras med analytiska beräkningsmetoder i kombination med sannolikhetsbaserade metoder. Vidare har storleken och osäkerheten i sprutbetongdimensioneringens ingående parametrar beskrivits statistiskt genom kvantifiering av dess medelvärden, standardavvikelse och passande sannolikhetsfördelningar. Slutligen har en praktiskt användbar sannolikhetsbaserad dimensioneringsmetodik presenterats som beaktar resultaten från kontrollmätningar av sprutbetongens tjocklek genom laser-skanning. Detta gör att man kan reducera de osäkerheter

som normalt finns i dimensioneringsskedet avseende den färdiga sprutbetongens tjocklek. För en fördjupad presentation av de studier och resultat som redovisas i denna rapport hänvisar jag till Bjureland (2020c).

Den stora fördelen med den framtagna dimensioneringsmetodiken är att den på ett stringent vis hanterar osäkerheter kopplat till sprutbetongens ingående parametrar i samtliga steg av dimensioneringsprocessen (den initiala dimensioneringen, kontrollmätningarna under utförandet och verifiering av den färdiga konstruktionens säkerhet). Ytterligare en fördel är att laser-skanning används som kontrollmetod för sprutbetongtjockleken istället för dagens kontrollmetod, då den sistnämnda inte är utformad på ett sådant sätt att den kvantifierar sprutbetongtjocklekens rumsliga spridning. Metodiken möjliggör en optimering av erforderlig sprutbetongtjocklek med hänsyn till rådande osäkerheter och ingående kostnader.

En svårighet med den presenterade dimensioneringsmetoden är att det idag endast finns en begränsad mängd information gällande sprutbetongtjocklekens rumsliga spridning. Detta gör att den initiala dimensioneringen riskerar att bli onödigt konservativ för att kunna säkerställa att de krav på acceptabel brottsannolikhet som Eurokoderna ställer uppfylls. En annan svårighet är att de analytiska beräkningsmetoder som finns idag inte tar hänsyn till blockets styvhet och dess reducerande inverkan på de moment som sprutbetongen utsetts för i det fall att vidhäftningsförmågan inte är tillräcklig. Dessa aspekter bör därför utredas vidare.

REFERENSER

- Barrett, S. & McCreath, D. 1995. Shotcrete support design in blocky ground: Towards a deterministic approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(1), 79-89.
- Bjureland, W., Johansson, F., Sjölander, A., Spross, J. & Larsson, S. 2019a. Probability distributions of shotcrete parameters for reliability-based analyses of rock tunnel support. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 87, 15-26.
- Bjureland, W., Johansson, F., Spross, J. & Larsson, S. 2020a. Influence of spatially varying thickness on load-bearing capacity of shotcrete. *Tunneling and Underground Space Technology*, 89, 103336.
- Bjureland, W., Johansson, F., Spross, J. & Larsson, S. 2020b. Reliability-based design principles of shotcrete support for tunnels in hard rock. Submitted to *Tunneling and Underground Space Technology*
- Bjureland, W. 2020c. *Reliability-based design of rock tunnel support*. Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- CEN 2002. EN 1990 – Basis of Structural Design. European Committee for Standardization, Bryssel.
- Klaube, M. 2018. Spatial Variability of shotcrete thickness. MSc. uppsats, TRITA-ABE-MBT 188. KTH Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Lindfors, U., Swindell, R., Rosengren, L., Holmberg, M., Sjöberg, J., Edelbro, C., Johansson, F. & Evins, P. 2018. *Projektering av bergkonstruktioner*. Trafikverket, Sundbyberg.
- Melchers, R.E. 1999. *Structural reliability analysis*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Stille, H. & Holmberg, M. 2006. En tillämpning av Bayesiansk statistik för kontroll av tjockleksdata på sprutbetongförstärkning. *Bergmekanikdag, Stockholm, Sweden, 2006*. SveBeFo, 77-88.
- Vanmarcke, E. 1977. Probabilistic Modeling of Soil Profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(11), 1227-1246.