

**DIMENSIONERING AV
BERGFÖRSTÄRKNING ENLIGT
EUROKOD MED
TILLFÖRLITLIGHETSBASERADE
METODER**

William Bjureland

2017-08-11

Förord

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

Projektet har varit uppdelat i två olika delar där den ena delen utgjorts av ett seniorforskarprojekt och den andra delen utgjorts av licentiatetappen i 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), Lars-Olof Dahlström (NCC/Chalmers), 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 Stefan Larsson, Fredrik Johansson och Johan Spross för deras stöttning och värdefulla bidrag till mitt arbete.

Stockholm, Augusti 2017

William Bjureland

Sammanfattning

Tunnelbyggande medför stora osäkerheter. Sedan 2009 kan dimensionering av bergtunnlar utföras i enlighet med Eurokoderna. Grundprincipen i Eurokoderna är att i samtliga dimensioneringsfall skall det visas att inget relevant gränstillstånd överskrids. Detta kan uppfyllas genom användningen av ett antal olika metoder där den vanligaste är dimensionering genom beräkning. För att ta hänsyn till osäkerheter vid dimensionering föreskriver Eurokoderna att dimensionering genom beräkning skall utföras med hjälp av gränstillståndsanalys, d.v.s. analys med tillförlitlighetsbaserade metoder eller partialkoefficientmetoden. Grundprincipen för gränstillståndsanalys är att det skall säkerställas att en konstruktions hållfasthet är större än lasten som verkar mot konstruktionen, med tillräckligt hög sannolikhet. Även om detta kan förefalla enkelt så har den praktiska användningen av tillförlitlighetsbaserade metoder för analys av bergförstärkning endast studerats i begränsad utsträckning.

Målet med det här projektet har varit att identifiera vilka bergmekaniska problem som är lämpliga att dimensionera med tillförlitlighetsbaserade metoder samt att utveckla praktiskt tillämpbara metoder för dimensionering av bergförstärkning enligt Eurokod med tillförlitlighetsbaserade metoder.

För att uppnå syftet med projektet utvärderades de bergmekaniska typfallen som presenteras i Trafikverkets uppdaterade projekteringshandbok med avseende på tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoders och partialkoefficientmetodens applicerbarhet. Resultaten av dessa studier visar för vilka typfall tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder och partialkoefficientmetoden är applicerbara vid dimensionering av bergförstärkning. Metodernas applicerbarhet och val av lämplig metod styrs i huvudsak av möjligheten att definiera en gränsfunktion samt huruvida lasten kan separeras från bärförmågan i gränsfunktionen eller om det är ett samverkansproblem.

Vidare så utvecklades en metod där tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder i kombination med observationsmetoden och bergets responskurva kan användas för dimensionering av bergtunnelförstärkning. I metoden används uppmätta deformationer, Bayesiansk uppdatering och extrapolering för att skatta slutlig deformation, vilket möjliggör att på ett så tidigt skede som möjligt sätta in fördefinierade åtgärder om så behövs. Detta möjliggör bl.a. en minskning av risken för exempelvis oplanerade stillestånd.

Slutsatserna som kan dras av genomfört arbete inom ramen för detta projekt är att partialkoefficientmetoden, som den definieras i Eurokoderna, inte är lämplig att använda vid dimensionering av bergtunnelförstärkning men att tillförlitlighetsbaserade metoder har potentialen att ta hänsyn till de osäkerheter som finns vid dimensionering. Detta gäller speciellt om de används inom ramen av observationsmetoden. Dock måste statistiska data för kvantifiering av indatavariabler samlas in och den nödvändiga tillförlitlighetsnivån samt definitionen av "brott" förtydligas.

Innehåll

1	Bakgrund	4
2	Mål och syfte	6
3	Sammanfattning av publicerade rapporter och artiklar	6
3.1	Application of reliability-based design methods to underground excavation in rock	6
3.2	Artikel I: Challenges in applying fixed partial factors to rock engineering design ..	6
3.3	Artikel II: Some aspects of reliability-based design for tunnels using observational method (EC7).....	7
3.4	Artikel III: Reliability aspects of rock tunnel design with the observational method	8
4	Slutsatser	9
5	Fortsatt forskning.....	10
	Referenser	11

1 Bakgrund

I både städer och på landsbygden byggs tunnlar och bergrum av ett antal olika anledningar. I städer byggs tunnlar och bergrum huvudsakligen för infrastruktur, såsom tunnelbanor, vägar, järnvägar och avloppssystem. På landsbygden byggs undermarksanläggningar även för andra tillämpningar, såsom vattenkraftverk, gruvor och kärnavfall. Oavsett plats och avsedd tillämpning har dimensionering av undermarksanläggningar i berg den gemensamma egenskapen att de medför stora osäkerheter som effektivt måste hanteras för att säkerställa en miljömässigt och ekonomiskt optimerad konstruktion som uppfyller samhällets krav på strukturell säkerhet.

Design av undermarksanläggningar i berg kan utföras med ett antal bergmekaniska designverktyg, t.ex. Klassificeringssystem, New Austrian Tunneling Method (NATM), numeriska eller analytiska beräkningar, observationsmetoden och ingenjörsmässiga bedömningar (Palmstrom & Stille 2007). Beroende på bergmassans förväntade beteende och de anslutna osäkerheterna är olika verktyg och metoder för bedömning av säkerhet lämpliga att använda vid dimensionering.

Historiskt har design med hjälp av beräkningar i kombination med den deterministiska säkerhetsfaktormetoden haft en central roll i designkoder för hantering av osäkerheter och verifiering av strukturell säkerhet. Sedan 2009 skall, enligt EU-kommissionen, verifiering av strukturell säkerhet för anläggningskonstruktioner i europeiska länder utföras i enlighet med de nya europeiska dimensioneringsstandarderna, Eurokoderna. Eurokoderna består av tio europeiska designstandarder och omfattar de flesta konstruktioner och material som används inom anläggningsbyggnation: några exempel är grunder för dimensionering (EN1990), betong (EN1992), stål (EN1993) samt jord och berg (EN1997).

Det skall nämnas att i Sverige är dimensionering av tunnlar och tunnelförstärkning för närvarande, av Transportstyrelsen som är Sveriges tunnelmyndighet, undantaget från kravet att det skall göras i enlighet med Eurokoderna. Detta då det är oklart i vilken omfattning Eurokoderna är applicerbara på dimensionering av undermarksanläggningar i berg. Därför har enskilda anläggningsägare istället möjligheten att föreskriva hur dimensionering av undermarksanläggningar skall utföras och huruvida Eurokoderna är applicerbara eller ej på deras respektive anläggningar. Som exempel kan nämnas att Trafikverket tillhandahåller rekommendationer och riktlinjer för dimensionering av väg och järnvägstunnlar enligt vilka Eurokoderna får användas. Vidare pågår även arbete med att i större utsträckning inkludera bergbyggande i den uppdaterade versionen av EN1997, Eurokod 7, som skall publiceras år 2020.

Grundregeln i Eurokoderna är att för alla dimensioneringsfall måste det verifieras att inga relevanta gränstillstånd överskrids. I varje Eurokod specificeras en rad olika accepterade designverktyg eller gränstillståndsanalysmetoder. I EN1990 (CEN 2002) är de angivna metoderna bärvärksanalys och dimensionering genom provning. I Eurokod 7 (CEN 2004) är de angivna gränstillståndsanalysmetoderna geoteknisk design genom beräkning, införande av hävdvunna åtgärder, modellförsök och provbelastningar samt observationsmetoden. Gränstillståndsanalys för design av undermarksanläggningar i berg kan i många situationer utföras med hjälp av beräkningar (Palmstrom & Stille 2007). För

gränstillståndsanalys med beräkning föreslår Eurokod 7 att analytiska, semi-empiriska eller numeriska beräkningsmodeller är lämpliga.

För att ta hänsyn till osäkerheter rekommenderar Eurokoderna att beräkningar åtföljs av en säkerhetsbedömning med hjälp av "partialkoefficientmetoden" för att verifiera gränstillstånd. Partialkoefficientmetoden är ursprungligen en tillförlitlighetsbaserad dimensioneringsmetod som tar hänsyn till osäkerheter genom att öka den beräknade lasten och minska den beräknade bärförmågan genom att applicera partialkoefficienter på deras respektive karakteristiska värden. Den ökade belastningen och den minskade bärförmågan benämns vanligen som designvärden. Strukturell säkerhet säkerställs genom att verifiera att lastens designvärde är mindre än bärförmågans motsvarighet. I Eurokodernas version av partialkoefficientmetoden anges dock fasta partialkoefficienter för specifika material och därmed riskerar den ursprungliga metodens kapacitet, att på ett stringent vis ta hänsyn till osäkerheter, att gå förlorade.

Som ett alternativ till partialkoefficientmetoden, accepterar Eurokoderna användning av tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder. I tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder tas hänsyn till osäkerheter genom att använda den statistiska fördelningen av alla relevanta ingångsparametrar för att beräkna sannolikheten för överskridande av gränstillståndet, d.v.s. sannolikheten att lasten överstiger bärförmågan. För alla möjliga gränstillstånd måste det visas att den beräknade sannolikheten för överskridande av gränstillståndet är tillräckligt låg. På samma sätt som partialkoefficientmetoden tar dock tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder primärt hänsyn till slumpmässig osäkerhet i indatavariabler medan dimensionering och byggnation av undermarksanläggningar i berg ofta innefattar osäkerheter som till stor del beror på bristande information om förväntade förhållanden (så kallade epistemiska osäkerheter). Därför är analys av undermarksanläggningar i berg i vissa fall inte lämplig att utföra uteslutande genom beräkningar.

Som exempel, för förhållanden som innefattar stora epistemiska osäkerheter, kan observationsmetoden vara att föredra. I observationsmetoden är huvudidén att beteendet hos en konstruktion predikteras innan byggnation påbörjas och åtgärder planeras om beteendet inte blir som förväntat. Genom övervakning under byggnationen utvärderas sedan konstruktionens beteende och jämförs med det predikterade. Om beteendet överskrider det acceptabla sättts de förberedda åtgärderna in. I motsats till design genom beräkningar ger dock Eurokod 7 inga rekommendationer, eller begränsningar, för hur kraven i observationsmetoden som anges i Eurokod 7 kan uppfyllas.

Det är emellertid klart från kraven i observationsmetoden att inkorporering av beräkningar som stringent hanterar slumpmässig osäkerhet i variabler behövs för att uppfylla dem. För att redogöra för, och minska så många osäkerheter som möjligt, av de som är involverade i design och byggnation av undermarksanläggningar i berg, vore därför en attraktiv metod att använda tillförlitlighetsbaserade beräkningar inom ramen för observationsmetoden.

2 Mål och syfte

Det övergripande målet med detta projekt har varit att utveckla tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder för en miljömässig och ekonomisk optimering av bergförstärkning i undermarksanläggningar i berg.

Med ett tillförlitlighetsbaserat perspektiv har tillämpbarheten av design genom beräkningar och design med observationsmetoden utretts. Syftet med studien har varit att identifiera möjligheter och svårigheter med att använda partialkoefficientmetoden och tillförlitlighetsbaserade metoder, enskilt eller i kombination med observationsmetoden, för dimensionering och byggnation av bergtunnelförstärkning. På så vis kan optimering av bergtunnelförstärkning med hänsyn till ingående osäkerheter möjliggöras utan att kompromissa på samhällets krav på strukturell säkerhet.

3 Sammanfattning av publicerade rapporter och artiklar

3.1 Application of reliability-based design methods to underground excavation in rock

Fredrik Johansson, William Bjureland, Johan Spross

BeFo-rapport 155

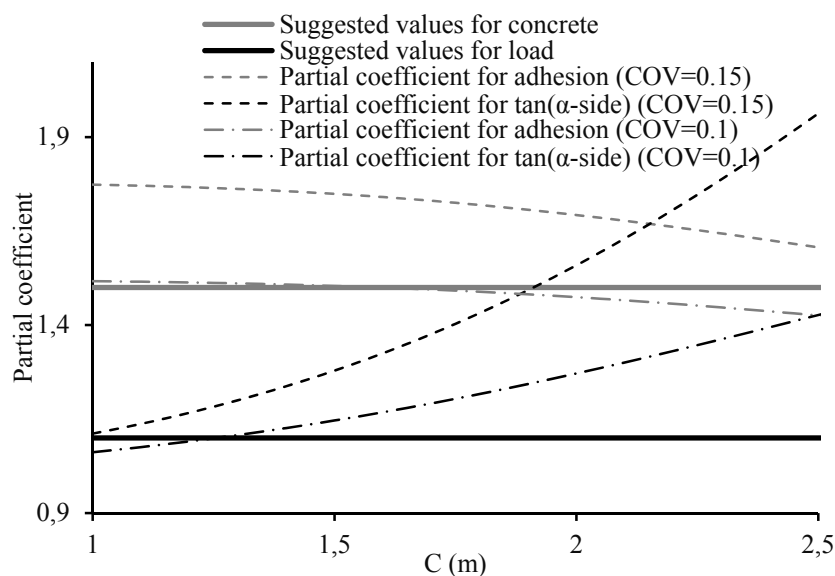
Denna rapport undersöker fördelar och nackdelar med sannolikhetsbaserad dimensionering av undermarksanläggningar i berg och vilka bergmekaniska typfall, av de som illustreras i Trafikverkets nya projekteringshandbok, som är lämpliga att analysera med tillförlitlighetsbaserade metoder. I rapporten delas de olika typfallen in i två olika kategorier: de med separerbar last och bärförmåga samt samverkansproblem. Rapporten visar vilka typfall som är lämpliga att analysera med tillförlitlighetsbaserade metoder och hur detta kan utföras för respektive typfall. Vidare beskrivs vilken ytterligare forskning som erfordras för att tillförlitlighetsbaserade metoder skall kunna tillämpas för dessa fall.

3.2 Artikel I: Challenges in applying fixed partial factors to rock engineering design

William Bjureland, Johan Spross, Fredrik Johansson, Anders Prästings & Stefan Larsson

Presenterad på *Geo-Risk 2017 i Denver, Colorado, USA*.

I denna artikel behandlas några utmaningar med att tillämpa de fasta partialkoefficienter som föreslås av Eurokoderna vid dimensionering av bergstärkning i ett vanligt bergmekaniskt lastfall, dimensionering av sprutbetong mot ett löst block med vidhäftning i gränssnittet sprutbetong–berg. I artikeln illustreras, genom ett beräkningsexempel, hur statistiskt beräknade partialkoefficienter varierar med en förändring i c-c avstånd mellan bergbultar (se Figur 1). De varierande partialkoefficienterna belyser problemet med att använda fasta partialkoefficienter, vilka används idag, vid dimensionering av bergförstärkning eftersom förhållandet mellan belastningen och motståndet kommer att variera med geometriska förändringar. Därför är användandet av fasta partialkoefficienter, vilka förutsätter ett konstant sådant förhållande, olämpligt.



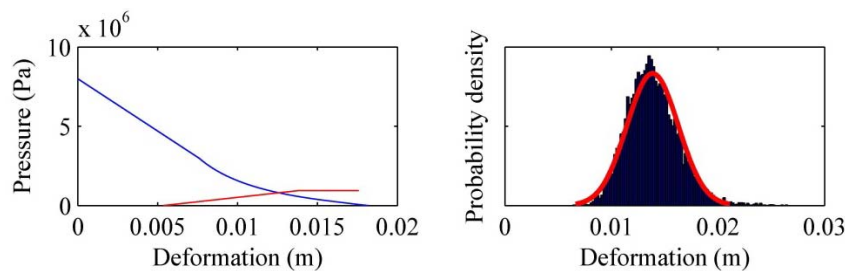
Figur 1-Framräknade partialkoefficienter för sprutbetong dimensionerad för att uppta lasten från lösa block. Figuren visar hur framräknade partialkoefficienter varierar med antaget c-c avstånd på bergbultar. Figuren visar två olika fall med en variationskoefficient på 10 respektive 15% för en av de ingående parametrarna i både lasten och bärförmågan (Bjureland et al. 2017).

3.3 Artikel II: Some aspects of reliability-based design for tunnels using the observational method (EC7)

William Bjureland, Johan Spross, Fredrik Johansson & Håkan Stille

Presenterad på *EUROCK 2015 i Salzburg, Österrike*.

I denna artikel presenteras en översikt över en metod för utnyttjandet av deformationsmätningar som grund för att förutse den slutliga radiella deformationen av tunnelperiferien och bedöma sannolikheten för gränsöverskridande. Den föreslagna metoden uppfyller kraven i observationsmetoden, som de definieras i Eurokod 7, genom att tillämpa tillförlitlighetsbaserade metoder inom ramen för observationsmetoden. Metoden illustreras genom ett fiktivt beräkningsexempel där Monte Carlo-simuleringar används för att beräkna sannolikheten för gränsöverskridande i den preliminära designen (Figur 2). Resultaten från Monte Carlo-simuleringen uppdateras sedan under byggnation genom en regressionsanalys och extrapolering tillsammans med Bayesiansk uppdatering. I artikeln dras slutsatsen att även om endast ett förenklat fiktivt beräkningsexempel används så framgår potentialen med den föreslagna metoden på grund av att kraven i observationsmetoden enligt Eurokod 7 var möjliga att uppfylla. Därmed kan observationsmetoden användas som ett verktyg för att eftersträva en ekonomisk och miljömässig optimering av erforderliga förstärkningsåtgärder utan att tumma på samhällets krav på erforderlig säkerhet.



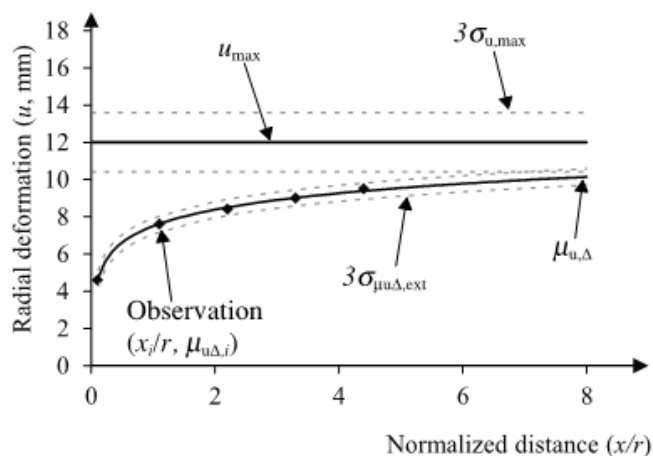
Figur 2-Resultatet av 10000 realiseringar av bergets responskurva för ett fiktivt beräkningsexempel med en cirkulär tunnel belägen på stort djup. Den vänstra delen av figuren illustrerar medelvärdet på bergets förväntade beteende vid uttag och den högra delen av figuren visar en fördelning av den deformation som kan förväntas uppkomma i omkringliggande bergmassa vid uttag av tunneln (Bjureland et al. 2015).

3.4 Artikel III: Reliability aspects of rock tunnel design with the observational method

William Bjureland, Johan Spross, Fredrik Johansson, Anders Prästings & Stefan Larsson

Publicerad i *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.

I denna artikel beaktas deformationskapaciteten hos en sprutbetongförstärkning i bedömningen av sannolikheten för gränsöverskridande. På samma sätt som i artikel II fokuserar artikeln på hur kraven i observationsmetoden, enligt definitionen i Eurokod 7, kan uppfyllas genom tillämpning av tillförlitlighetsbaserade metoder. Ett liknande beräkningsexempel som i artikel II utförs, men en förlängning görs för att inkludera kapaciteten hos sprutbetongförstärkningen, korrelationen mellan ingångsparametrarna och en fördelning i maximal tillåten deformation kopplad till deformationskapaciteten hos sprutbetongen. Även i denna artikel uppdateras resultaten från Monte Carlo-simuleringen under byggnation genom en regressionsanalys och extrapolering tillsammans med Bayesiansk uppdatering. Extrapoleringen möjliggör att storleken på den slutgiltiga deformationen kan predikteras och därmed kan, om prediktionen antyder att uppsatta gränser kommer att överskridas, förberedda åtgärder planeras och sättas in innan gränserna överskrids (Figur 3). I artikeln dras slutsatsen att kombinationen av tillförlitlighetsbaserade metoder, observationsmetoden och prediktionen av tunnelns framtida beteende möjliggör en utvärdering av utförda förstärkningsåtgärder i ett tidigt skede. På så vis kan besluts- och byggprocessen optimeras genom att minimera risken för stillestånd med anledning av eventuella nödvändiga förstärkningsåtgärder då sådana åtgärder kan förberedas i god tid.



Figur 3-Prediktion av slutgiltig deformation baserad på fem utförda deformationsmätningar. Den predikterade slutdeformationen redovisas i form av en normalfördelning som jämförs mot uppsatt fördelning över gräns för tillåten deformation. Därmed erhålls sannolikheten för att gränsen kommer att överskridas (Bjureland et al. 2017).

4 Slutsatser

Vid dimensionering av förstärkning för undermarksanläggningar i berg är det viktigt att den använda metoden tar hänsyn till osäkerheter på ett konsekvent och stringent vis. Syftet med denna studie var att identifiera möjligheter och svårigheter med att använda partialkoefficientmetoden och tillförlitlighetsbaserade metoder, uteslutande eller i kombination med observationsmetoden, för dimensionering av bergtunnelförstärkning. Den granskning som gjorts i projektet har framhävt några viktiga aspekter när dessa metoder tillämpas vid dimensionering av förstärkning för undermarksanläggningar i berg.

De exemplifierande partialkoefficienterna i artikel I belyser problemet med att använda fasta partialkoefficienter vid dimensionering av bergförstärkning, då förhållandet mellan last och bärförmåga kommer att variera med geometriska förändringar. Användandet av fasta partialkoefficienter, vilka förutsätter ett konstant förhållande mellan lasten och bärförmågan och därmed många gånger en konstant geometrisk utformning, är därför olämpligt. Den ursprungliga versionen av partialkoefficientmetoden, i vilken partialkoefficienterna varierar, kan användas i gränstillstånd där lasten och bärförmågan är separerbara. Partialkoefficientmetoden tar dock huvudsakligen hänsyn till slumpmässiga osäkerheter, medan osäkerheter som finns vid dimensionering och byggnation av undermarksanläggningar i berg i stor utsträckning istället beror på avsaknaden av information. Därför är det inte lämpligt att uteslutande använda design genom beräkning åtföljd av en säkerhetsbedömning med partialkoefficientmetoden vid dimensionering av undermarksanläggningar i berg.

Tillförlitlighetsbaserade metoder, i likhet med den ursprungliga versionen av partialkoefficientmetoden, kan på ett stringent vis ta hänsyn till osäkerheter i parametrar som används vid dimensionering av förstärkning för undermarksanläggningar i berg. På samma vis som partialkoefficientmetoden är dock tillförlitlighetsbaserade metoder även de

bättre lämpade att ta hänsyn till slumpmässig osäkerhet. Därför bör dimensionering och byggnation av undermarksanläggningar i berg helst utföras genom användning av tillförlitlighetsbaserade metoder inom ramen för observationsmetoden, såsom föreslås i artikel II och III. Detta då kombinationen av dessa metoder möjliggör att erforderliga förstärkningsåtgärder kan optimeras genom att flera olika typer av osäkerheter bättre kan beaktas. Vidare så möjliggör utnyttjandet av prediktioner av ett framtida beteende tillsammans med ett Bayesianskt uppdateringsförfarande en optimering av beslutsfattande under byggnation. Därmed kan risken för ex. stillestånd minimeras.

5 Fortsatt forskning

Som framgår i de publicerade rapporterna och artiklarna i detta projekt erfordras dock ytterligare ansträngningar inom området för tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder för dimensionering av undermarksanläggningar i berg. Några förslag på fortsatt forskning listas nedan:

- Ytterligare ansträngningar måste göras för att reda ut begreppet ”brott” och hur det kan kopplas till olika gränser för acceptabelt beteende. Vid sidan av detta bör det klargöras vad den definierade målsäkerhetsnivån som beskrivs i Eurokoderna faktiskt hänför sig till.
- Information om parametrar relaterade till utformningen av undermarksanläggningar i berg, vad gäller statistiska fördelningar, är grunden för tillförlitlighetsbaserad dimensionering. Därför måste data från konstruerade undermarksanläggningar i berg samlas in och kvantifieras i statistiska termer.
- En djupare granskning av kombinationen av att använda de gränstillstånd som används idag och tillförlitlighetsbaserade metoder skulle vara till nytta. Om det gränstillstånd som presenteras i artikel I tas som ett exempel så antogs i denna studie att beräkningsmodellen är anpassad för tillförlitlighetsbaserade dimensioneringsmetoder. Den villkorade sannolikheten att blocket existerar kommer dock att spela en avgörande roll i en tillförlitlighetsbaserad analys av detta gränstillstånd, och därför är beräkningsmodellen inte lämplig att använda i kombination med den givna målsäkerhetsnivån, utan att detta beaktas.
- Tillförlitlighetsbaserade metoder har framgångsrikt använts inom ramen för observationsmetoden i artikel II och III. Fortsatta studier om hur man definierar acceptabla gränser för konstruktionens beteende samt hur dessa kan användas i tillförlitlighetsbaserad dimensionering erfordras dock.
- Tillförlitlighetsbaserade metoder har framgångsrikt använts i kombination med analytiska beräkningar. I framtida studier bör tillförlitlighetsbaserade metoder kombineras med numeriska beräkningar.

Om ovan nämnda framtida forskningsfrågor besvaras skulle det vara intressant att jämföra olika säkerhetsbedömningsmetoder i en fallstudie.

Referenser

Palmstrom A, Stille H. Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007;22(4): 363-376.

CEN. *EN 1990 - Basis of structural design*. Brussels: European committee for standardisation; 2002.

CEN. *EN 1997-1:2004 Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*. Brussels: European Committee for Standardisation; 2004.

Johansson F, Bjureland W, Spross J. *Application of reliability-based design methods to underground excavation in rock*. Stockholm: BeFo; 2016.

Bjureland W, Spross J, Johansson F, Prästings A, Larsson S. Challenges in applying fixed partial factors to rock engineering design. *Geo-Risk 2017*. Denver, CO: Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers; 2017:384-393.

Bjureland W, Spross J, Johansson F, Stille H. Some aspects of reliability-based design for tunnels using observational method (EC7). Schubert W and Kluckner S, ed. In: *Proceedings of the Workshop Design Practices for the 21st Century at EUROCK 2015 and 64th Geomechanics Colloquium, 7 October 2015*. Salzburg: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik; 2015:23-29.

Bjureland W, Spross J, Johansson F, Prästings A, Larsson S. Reliability aspects of rock tunnel design with the observational method. *Int J Rock Mech Min*. 2017;98: 102-110.