

VILKEN ROLL HAR OBSERVATIONSMETODEN I FRAMTIDENS BERGBYGGANDE?

What is the role of the observational method in future rock engineering?

Johan Spross, KTH Jord- och bergmekanik

Sammanfattning

BeFo-projektet Observationsmetoden och sannolikhetsbaserad dimensionering avslutades 2016. Detta doktorandprojekt har haft till syfte att undersöka hur observationsmetoden kan kopplas samman med sannolikhetsbaserad dimensionering och när detta är lämpligt. Resultaten visar att sannolikhetsbaserade designmetoder är väl lämpade att använda tillsammans med observationsmetoden, särskilt när detta kombineras med beslutsanalys. Det beror bland annat på att de sannolikhetsbaserade metoderna på ett stringent sätt kan hantera att osäkerheten minskar allteftersom mer kunskap om förhållandena i marken erhålls genom mätningar och observationer. Kombinationen med beslutsanalys ger möjlighet att jämföra olika designalternativ och designmetoder, så att den mest optimala metoden kan väljas av observationsmetoden och en konventionell design. I artikeln ger jag en överblick över projektets resultat och diskuterar observationsmetodens framtidsutsikter inom bergbyggnad.

Summary

In 2016, BeFo's research project Observational method and reliability analysis was completed. The aim of this PhD project was to investigate how the observational method can be linked to reliability-based design and when that is applicable. The result showed that reliability-based design methods are well adapted to apply together with the observational method, in particular when such methods are combined with decision analysis. The main reason is that reliability-based methods straightforwardly can account for the effect of increased knowledge gained from measurements and observations. The decision analysis allows comparison of design options and design methods, so the most favourable method can be chosen. In this paper, I briefly present the main research contributions of the project and discuss the future prospects of the observational method.

1 Inledning

Observationsmetoden är en designmetod för konstruktioner som anläggs i jord och berg. Enligt Eurokod 7 (CEN 2004) är metoden särskilt lämplig att använda när det är svårt att förutsäga konstruktionens beteende. Ett exempel är när stora osäkerheter råder kring de faktiska förhållandena i marken, exempelvis bergmassans egenskaper. Den grundläggande principen för observationsmetoden, för att komma åt detta problem, är att minska osäkerheterna med hjälp observationer och mätningar under själva byggtiden. Syftet är att kunna anpassa en preliminär design för konstruktionen till markens faktiska förhållanden med i förväg förberedda åtgärder. Den slutliga designen är alltså inte helt känd när bygget startar, utan blir helt fastställd först när observationer visat om någon av de förberedda åtgärderna behöver sättas in.

I mitt nyligen avslutade doktorandprojekt finansierat av BeFo kopplade jag ihop observationsmetoden med sannolikhetsbaserad dimensionering i ett sammanhängande ramverk (Spross 2016). Syftet var att förbättra metodens användbarhet inom bergbyggande. I denna artikel och tillhörande föredrag ger jag en kortfattad överblick över observationsmetoden och hur den tillsammans med sannolikhetsbaserad dimensionering har potential att i framtiden ge konstruktioner som är mer ekonomiskt försvarbara och miljömässigt hållbara, samtidigt som samhällets krav på säkerhet upprätthålls.

2 Observationsmetodens ursprung och utveckling

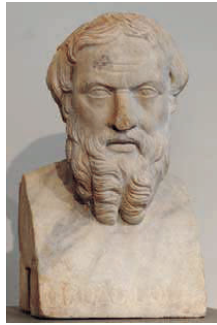
2.1 Historisk bakgrund

Ursprunget till den formellt beskrivna observationsmetoden brukar tillskrivas arbeten och tankar av Terzaghi och Peck under mitten av 1900-talet. Dessa idéer sammanfattades i en välkänd artikel i *Geotechnique*: Peck (1969). Den grundläggande principen att observera konstruktionens beteende medan man bygger kan dock härledas långt tillbaka i tiden, faktiskt ända till antiken. Den grekiska historikern Herodotus (ca 430 f.Kr.) beskriver exempelvis hur fenicierna överglänste omkringliggande folks ingenjörskunskaper, när de vid ett kanalbygge anpassade släntlutningen så att slänterna blev stabila, medan andra folkslag fick stora problem med skred (Figur 1).

Även ingenjörlandet Sverige var tidigt ute. Statens järnvägars geotekniska kommission (1922) föreslog att man skulle observera järnvägsbankarnas beteende under byggtiden i kombination med larmgränser, snarare än att endast använda den tidens grova beräkningsmetoder för att garantera säkerhet. Orsaken var att man insåg att beräkningsmässigt helt säkra bankar inte skulle vara ekonomiskt försvarbart, men att tillräckligt säkra konstruktioner ändå skulle kunna uppnås med hjälp av observationer.

2.2 Tillämpningsproblem

Även om observationsmetodens grundläggande idé ofta förs fram som rimlig och tilltalande har den ändå inte riktigt slagit igenom. I Sverige använde man på 1980-talet och framåt en liknande metod kallad aktiv design (Stille 1986), som byggde på de tre



Figur 1. Den grekiska historikern Herodotus kan ha varit den första någonsin som beskrev en tillämpning av observationsmetoden inom geotekniken. (Foto: © Marie-Lan Nguyen 2011).

Figure 1. The greek historian Herodotus may have been the first ever to describe a practical application of the observational method.

delarna prediktion, observation och åtgärd, men inte heller denna variant slog igenom fullt ut. I andra delar av världen fick observationsmetoden dåligt rykte som en metod som förde med sig alltför låga säkerhetsmarginaler (Powderham 2002). Men när Eurokod 7 utarbetades kom ändå observationsmetoden med som ytterligare en möjlighet att verifiera gränstillstånd, utöver beräkningar, hävdvunna metoder och provning. Det har dock visat sig att riktlinjer för tillämpning av observationsmetoden saknas (diskussioner kring detta förs av ex. Powderham och Nicholson 1996; Spross och Larsson 2014; Spross et al. 2014; Harrison 2015). Detta gäller både Pecks version från 1969 och definitionen i Eurokod 7. I den senare definieras observationsmetoden på följande sätt:

(1) När förutsägelsen av det geotekniska beteendet är svår kan det vara lämpligt att tillämpa den metod som benämns 'observationsmetoden', där dimensioneringen följs upp under byggnadsskedet.

(2)P Följande krav skall uppfyllas innan utförandet påbörjas:

- *Acceptabla gränser för beteendet skall bestämmas;*
- *Gränserna för möjligt beteende skall beräknas och det skall visas att sannolikheten för att det verkliga beteendet ligger inom de acceptabla gränserna är godtagbar;*
- *En plan för uppföljning skall tas fram som skall visa om det verkliga beteendet ligger inom acceptabla gränser. Uppföljningen skall på ett tillräckligt tidigt stadium klargöra detta och med tillräckligt korta tidsintervall för att framgångsrikt kunna vidta korrigerande åtgärder [sic];*
- *Responstiden hos mätinstrumenten och i sättet att analysera resultaten skall vara tillräckligt snabbt för att möjliggöra förändringar i systemet;*

- *En plan för korrigerande åtgärder skall upprättas, vilken kan följas om uppföljningen visar ett beteende som ligger utanför acceptabla gränser.*

(3)P Under byggnadsskedet skall uppföljningen utföras som planerat.

(4)P Resultaten av uppföljningen skall utvärderas vid lämpliga steg och de planerade korrigerande åtgärderna skall vidtas om gränserna för beteendet överskrids.

(5)P Uppföljande instrumentering skall antingen bytas ut eller utökas om den inte ger tillförlitliga data av avsett slag eller i tillräcklig mängd.

Förkortningen P står för ”principer”, som enligt Eurokoden måste följas.

Tillämpningsproblemen rör främst nummer två bland kraven som ska uppfyllas innan utförandet kan börja. Hur ska man kunna *visa* att det är en godtagbar sannolikhet att det verkliga beteendet ligger inom de acceptabla gränserna (d.v.s. att den preliminära designen med godtagbar sannolikhet kommer att lyckas utan att dyra åtgärder behöver sättas in)? Och hur ska man egentligen definiera ordet *godtagbar*? En annan svårighet är att sätta larmgränser på en nivå så att konstruktionen blir tillräckligt säker utan att bli överdimensionerad.

2.3 Intryck från sannolikhetsbaserade metoder

Under andra halvan av 1900-talet utvecklades även en annan typ av metod för dimensionering, nämligen de sannolikhetsbaserade. Inte heller dessa metoder har riktigt slagit igenom. En orsak kan vara att sådana metoder är mer krävande än andra metoder med avseende på nödvändig indata: man behöver känna till inte bara ett deterministiskt medelvärde, utan även ha en uppfattning om parameterns variation i form av exempelvis statistisk fördelning och standardavvikelse. Med allt mer sofistikerade mätmetoder blir dock denna svårighet ett allt mindre problem och det senaste decenniet har detta forskningsområde ökat starkt, främst inom geotekniken (se t.ex. Phoon och Ching 2015). Inom bergbyggande ligger man en bit efter, men just i Sverige har vi kommit förhållandevis långt inom detta forskningsområde. BeFo har finansierat ett flertal projekt inom tillämpning av sannolikhetsbaserade metoder genom åren (ett urval utgörs av Sturk 1996; Stille et al. 2005; Holmberg och Stille 2007, 2009; Zetterlund 2014; Bjureland et al. 2015; Spross 2016).

Det var just kombinationen av observationsmetodens konceptuella idé att minska osäkerheter genom mätningar och de sannolikhetsbaserade metodernas stringens i hanteringen av osäkerheter i designen som låg till grund för mitt doktorandprojekt. I följande kapitel ger jag en överblick över de mest centrala forskningsresultaten i projektet.

3 Det sannolikhetsbaserade ramverket för observationsmetoden

3.1 Poängen med ramverket

I det sannolikhetsbaserade ramverket kombineras sannolikhetsbaserad dimensionering med bayesiansk beslutsteori. Detta upplägg gör det möjligt att jämföra den förväntade kostnaden för olika möjliga designalternativ för en konstruktion, samtidigt som ramverket säkerställer att samhällets krav på acceptabel säkerhet hos konstruktionen uppnås, oavsett vilket designalternativ som i slutändan väljs. Den observanta läsaren har kanske noterat att Eurokod 7 formellt faktiskt inte ställer krav på att en viss säkerhetsnivå ska uppnås hos den färdiga konstruktionen, vilket kan tyckas märkligt. (Den välvilliga läsaren av Eurokoden kan förstås välja att tolka in att det är upp till ingenjören att välja en metod att verifiera konstruktionens säkerhet, utöver att tillämpa observationsmetodens principer, men detta framgår alltså inte explicit i Eurokoden).

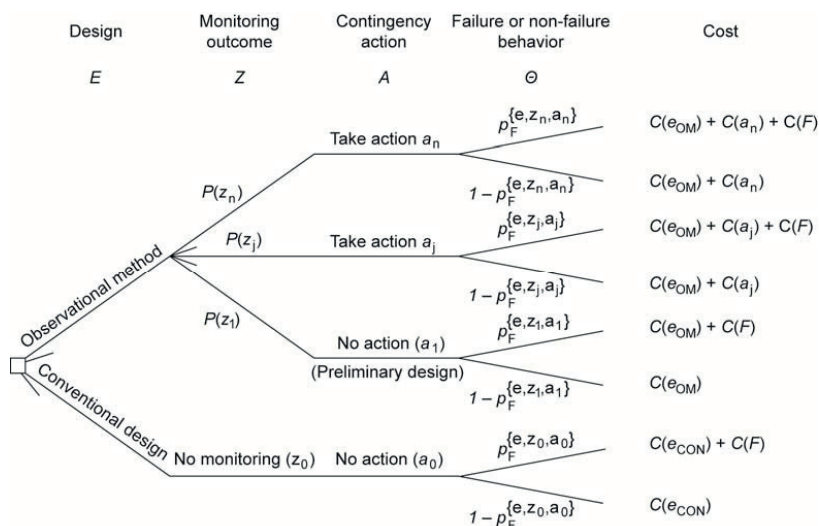
Ramverket kommer dessutom åt stötestenarna i tillämpningen av Eurokod 7 som nämndes ovan: hur man ska sätta larmgränser och hur man därefter visar att sannolikheten att dessa överskrids är godtagbar. I det följande ges en kortfattad konceptuell beskrivning av hur detta går till. En komplett beskrivning publicerades nyligen i Structural Safety (Spross och Johansson 2017). Artikeln är fritt tillgänglig för nedladdning.

3.2 Så funkar ramverket

Med utgångspunkt i klassisk bayesiansk beslutsteori kan man dela upp tillämpningen av observationsmetoden i fyra delar (Figur 2). Från noden till vänster i figuren utgår alla tänkbara designalternativ. Det övre alternativet är *en* möjlig tillämpning av observationsmetoden och det undre är *en* möjlig konventionell designlösning utan möjlighet till förändrad design. (I figuren jämförs två alternativ, men rent principiellt finns förstås ett oändligt antal möjliga utformningar och konstruktionsmetoder att ta ställning till).

Om man använder observationsmetoden ser vi att beroende på vilket mätresultat, Z , som vi får, så får vi olika slutlig design. Om vi får ett mätresultat som ligger under den fastställda larmgränsen (resultatet z_1 i figuren), så är den preliminära designen acceptabel och ingen åtgärd behöver sättas in. För mätresultat som ligger över larmgränsen krävs däremot en åtgärd. I figuren visas det generella fallet, där man principiellt kan tänka sig att man har olika åtgärder beroende på hur ”illa” mätresultatet är, d.v.s. man har flera larmgränser.

Den sista förgreningen, till höger i figuren, avser överskridet brottgränstillstånd eller ej. (Benämningen *brott* används här för enkelhets skull; man kan lika gärna definiera dessa två tillstånd som med hjälp av en bruksgräns eller någon annan gräns som man inte vill ska överskridas.) Längst till höger redovisas vilka kostnader som kan hänföras till respektive utfall: kostnaden för den ursprungliga designlösningen, $C(e_{OM})$, kostnaden för eventuell åtgärd, $C(a)$, och kostnaden för eventuellt överskridet brottgränstillstånd, $C(F)$.

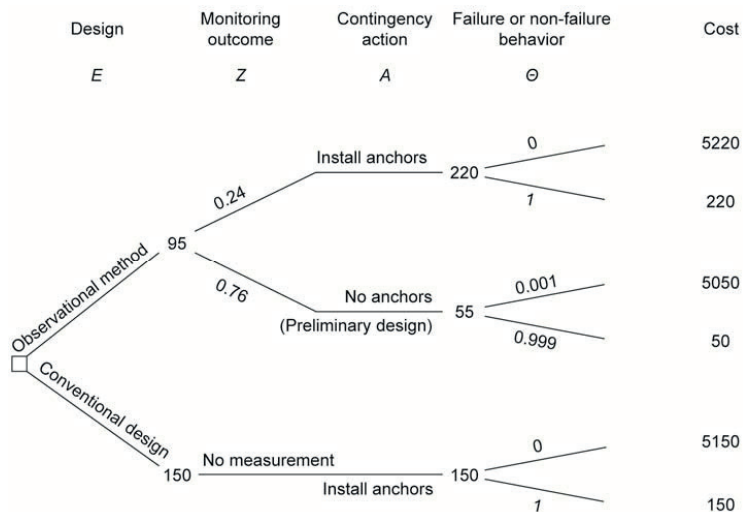


Figur 2. Ramverket delar upp observationsmetoden i fyra delar: val av design, mätresultat, åtgärd och slutligt beteende. Varje möjlig design och utfall förknippas med en bedömd kostnad. Den förväntade kostnaden för att använda observationsmetoden ges av en sammanvägning av sannolikheterna för de olika utfallen. (Figur: © Spross och Johansson 2017)

Figure 2. The reliability framework consists of four parts: choice of design, monitoring outcome, contingency action, and final behaviour. Each design alternative and the related outcome are associated with a certain cost. The cost of applying the observational method is found by weighing the probabilities of the various outcomes.

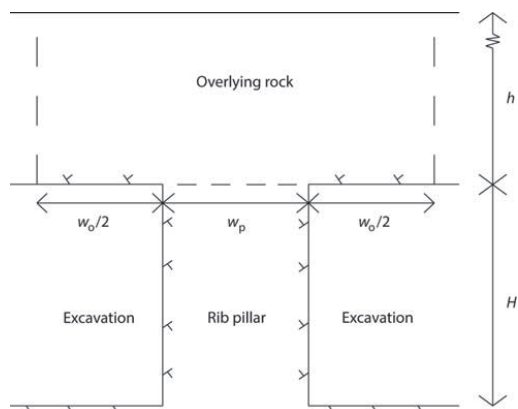
Med hjälp av sannolikhetsbaserade metoder kan man sedan dels beräkna sannolikheten för överskridet brottgränstillstånd, p_F , dels beräkna sannolikheten att larmgränsen överskrids eller underskrids, $P(z)$. Hur själva beräkningarna går till presenteras i ett illustrativt exempel i Spross och Johansson (2017).

I Figur 3 ges ett exempel på hur resultatet av en sådan analys kan se ut. Där används ramverket för att bedöma om linstag ska installeras direkt för att förstärka en bergpelare, eller om det kan löna sig att avvakta medan man observerar pelarens beteende allteftersom den belastas (Figur 4). Där har kostnaderna för respektive möjligt utfall av slutlig konstruktionslösning vägts samman i ramverket. Exempelvis ses att bästa möjliga utfall är att den preliminära designen är framgångsrik, så att linstag inte behöver installeras, samtidigt som konstruktionen inte går till brott. Detta utfall bedöms kosta 50 valutaenheter (förkortas VE i det följande). Om man väger samman detta med en beräknad sannolikhet för brott på 0,1 % för denna design och brottillståndets förväntade kostnad om 5050 VE, så blir den förväntade kostnaden för den preliminära designen 55 VE.



Figur 3. Exempel på beräkningsresultat när ramverket tillämpas. Observationsmetoden bedöms mer fördelaktig än en konventionell designlösning, eftersom den förväntade kostnaden för observationsmetoden är lägre. (Figur: © Spross och Johansson 2017)

Figure 3. An example of calculation results, when the framework is applied. The observational method is found more favourable than conventional design, because the expected cost of applying the observational method is less.



Figur 4. Den analyserade bergpelaren i exemplet. Är det mest fördelaktigt att installera linstag omedelbart eller först observera pelarens deformation och installera linstag endast om mätningarna visar att det behövs? (Figur: © Spross och Johansson 2017)

Figure 4. The analysed rock pillar in the example. Is it more favourable to install rock anchors immediately or first observe the pillar deformation and install rock anchors only if measurements show that they are needed?

Med hjälp av ramverket kan man också beräkna att den preliminära designen endast är framgångsrik med en sannolikhet på 76 %. Om man därmed tar hänsyn till att linstag trots allt behöver installeras med sannolikheten 24 %, blir den förväntade kostnaden för att använda observationsmetoden 95 VE.

Om man gör en motsvarande beräkning för det mer robusta, konventionella designalternativet ser man dels att brottsannolikheten för detta alternativ är obetydlig ("0"), men att detta alternativ ändå förväntas bli mer kostsamt: 150 VE. Denna jämförelse ger alltså vid handen att observationsmetoden blir billigare i genomsnitt, men att om linstag måste installeras, så blir observationsmetodens lösning dyrare än det konventionella alternativet.

3.3 Kort om larmgränserna

En viktig aspekt av ramverket gäller hur larmgränser sätts för att säkerställa att sannolikheten för brott är acceptabel. I nuvarande Eurokod 7 fastslås endast att "[larm]gränser för acceptabelt beteende skall fastställas", men det finns inga som helst riktlinjer för hur detta ska göras. Med hjälp av det sannolikhetsbaserade ramverket låter sig dock larmgränser sättas på ett stringent sätt. Genom att utgå från en acceptabel sannolikhet för brott (eller annat oönskat beteende) sätts larmgränsen, x_{larm} , så att sannolikheten för överskriden gränsfunktion, G , är lika med den acceptabla brottsannolikheten, $p_{F,T}$, så länge som den observerade parametern, x , underskrider x_{larm} :

$$P(G < 0 \mid x < x_{\text{larm}}) = p_{F,T} \quad (1)$$

När larmgränsen är definierad kan man beräkna sannolikheten att denna överskrids eller ej (i exemplet ovan beräknades detta till 24 % respektive 76 %).

4 Slutord om observationsmetodens framtidsutsikter

Även om jag i mitt doktorandprojekt löste en del svårigheter med hur Eurokodens krav på observationsmetoden kan uppfyllas, så återstår arbete med praktisk implementering. Artikeln i Structural Safety (Spross och Johansson 2017) ger visserligen den teoretiska lösningen på problemet, tillsammans med ett enklare illustrativt exempel, men hur detta ska tillämpas i större och mer komplexa problem behöver ytterligare studeras. Exempelvis finns begränsningar i tillämpbarheten om brottgränstillståndet är svårt att beskriva analytiskt.

Vi på KTH Jord- och bergmekanik har därför initierat ett fortsättningsprojekt, som beviljats finansiering av BeFo. Syftet med fortsättningsprojektet är att tillgängliggöra det teoretiska ramverket, som jag utvecklade i mitt doktorandprojekt, genom rekommendationer till användaren och utförligare tillämpningsexempel. Spridningen av den här typen av forskningsresultat kräver att vi kan visa på praktisk nytta i verklighetstroga exempel, enligt vår uppfattning. Vi arbetar därför just nu med att hitta tydliga fallstudier där ramverket kan användas för att visa att observationsmetoden utgör en ekonomiskt fördelaktigare designmetod än andra möjliga metoder.

En annan stötesten som återstår att åtgärda är hur kontrakt- och ersättningsformer ska anpassas för att fungera tillsammans med observationsmetoden. Detta har tidigare studerats i två BeFo-projekt av Kadefors och Bröchner (2008, 2015). De konstaterar att det knappast saknas förslag på hur nya ersättningsformer kan se ut, men för att nå en lösning på detta problem behöver flera olika kompetenser engageras: bergkompetens, upphandlingskompetens och projektledningskompetens. Vi på KTH Jord- och bergmekanik hoppas kunna ta oss an även sådana frågeställningar i framtiden i vår strävan att göra svenskt bergbyggande effektivare och samtidigt långsiktigt hållbart. Observationsmetoden kan vara en av pusselbitarna vi behöver.

5 Referenser

- Bjureland, W., Spross, J., Johansson, F. & Stille, H. 2015. Some aspects of reliability-based design for tunnels using observational method (EC7). In: W. Schubert & A. Kluckner (eds.), *Proceedings of the workshop "Design practices for the 21st Century" at EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, 7 October 2015*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 23–29.
- CEN 2004. *EN 1997-1:2004 Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Harrison, J. 2015. Design practices for the 21st Century. In: W. Schubert & A. Kluckner (eds.), *Proceedings of the workshop Design practices for the 21st Century at EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, 7 October 2015*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 1–10.
- Herodotus ca 430 f.Kr. Books V–VII. In: T. E. Page, E. Capps, W. H. D. Rouse, L. A. Post & E. H. Warmington (eds.), *The histories*. Translated by A. D. Godley 1922. London: William Heinemann.
- Holmberg, M. & Stille, H. 2007. *Observationsmetodens grunder för tillämpning på design av konstruktioner i berg*. Stockholm: SveBeFo.
- Holmberg, M. & Stille, H. 2009. *Observationsmetoden och deformationsmätningar vid tunnelbyggande*. Stockholm: SveBeFo.
- Kadefors, A. & Bröchner, J. 2008. *Observationsmetoden i bergbyggande: kontrakt och samverkan*. Stockholm: BeFo.
- Kadefors, A. & Bröchner, J. 2015. *Organisering och kontrakt i bergtunnelprojekt – kunskap i samverkan*. Stockholm: BeFo.
- Peck, R.B. 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171–187.
- Phoon, K.-K. & Ching, J. 2015. *Risk and reliability in geotechnical engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Powderham, A.J. 2002. The observational method—learning from projects. *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering*, 155(1), 59–69.

- Powderham, A.J. & Nicholson, D.P. 1996. The way forward. In: D. P. Nicholson (ed.) *The observational method in geotechnical engineering*. London: Thomas Telford.
- Spross, J. 2016. *Toward a reliability framework for the observational method*. Ph.D. thesis, TRITA-JOB 1023. Stockholm, KTH.
- Spross, J. & Johansson, F. 2017. When is the observational method in geotechnical engineering favourable? *Structural Safety*, 66, 17–26.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.01.006>
- Spross, J. & Larsson, S. 2014. On the observational method for groundwater control in the Northern Link tunnel project, Stockholm, Sweden. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 401–408.
- Spross, J., Johansson, F., Stille, H. & Larsson, S. 2014. Towards an improved observational method. In: L. R. Alejano, A. Peruchó, C. Olalla & R. Jiménez (eds.), *EUROCK 2014, Vigo, Spain, 26–29 May 2014*. London: Taylor & Francis group, 1435–1440.
- Statens Järnvägar. 1922. *Statens Järnvägars geotekniska kommission 1914–22: Slutbetänkande avgivet till Kungl. Järnvägsstyrelsen den 31 maj 1922*. Stockholm: Statens Järnvägar.
- Stille, H. 1986. Experiences of design of large caverns in Sweden. In: K. H. O. Saari (ed.), *Proceedings of the International Symposium on Large Rock Caverns, Helsinki, 25–28 August 1986*. Oxford, UK: Pergamon Press, 231–241.
- Stille, H., Holmberg, M., Olsson, L. & Andersson, J. 2005. *Dimensionering av samverkanskonstruktioner i berg med sannolikhetsbaserade metoder*. Stockholm: SveBeFo.
- Sturk, R. *Besluts- och riskanalys samt statistiskt synsätt inom undermarksbyggandet*. Stockholm: SveBeFo.
- Zetterlund, M. 2014. *Value of information analysis in rock engineering investigations*. Ph.D. thesis. Gothenburg: Chalmers University of Technology.

6 Upphovsrättslig information till figurer

Figur 1. © 2011. Marie-Lan Nguyen. Wikimedia Commons, CC–BY 2.5,
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/deed.en>

Figur 2–4. © 2017. Spross, J. & Johansson, F. When is the observational method in geotechnical engineering favourable? *Structural Safety*, 66, 17–26, CC–BY 4.0.
 DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.01.006, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>