

OBSERVATIONSMETODENS GRUNDER OCH DESS TILLÄMPNING PÅ DESIGN AV KONSTRUKTIONER I BERG

Mats Holmberg

Håkan Stille

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

Observationsmetodens grunder och dess tillämpning på design av konstruktioner i berg

The application of the observational method for design of underground excavations

Mats Holmberg, Tunnel Engineering
Håkan Stille, KTH

SveBeFo rapport 80

Stockholm 2007
ISSN 1104 – 1773
ISRN SVEBEFO-R—80—SE

FÖRORD

Vid sidan av den övergripande europastandarden EN 1990 *Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk* finns standarder för olika typer av konstruktioner, där EN 1997 ("Eurokod 7") avser dimensionering av geokonstruktioner. Standarden införs successivt och inom ett par år ska nationella motstridiga dokument dras tillbaka. Implementeringen stöds av en "Implementeringskommission för Europastandarder inom Geotekniken". Eurokoden anger observationsmetoden som en lämplig metod att använda när det är svårt att förutsäga det geotekniska beteendet och preciserar också ett antal förutsättningar för tillämpningen.

Föreliggande rapport redovisar observationsmetodens grunder baserat på förutsättningarna i Eurokod och hur den kan tillämpas vid dimensionering och utförande av berganläggningar. Rapporten ska ses som ett led i det pågående implementeringsarbetet och utgår från att svenska beställare kommer att hänvisa till metoden i sina regelverk. Det finns ännu ingen direkt erfarenhet av kontraktsformer som är speciellt utarbetade för observationsmetoden. Frågan finns upptagen som ett projektförslag inom SveBeFos forskningsprogram. Rapporten utgår från att observationsmetoden som sådan kan tillämpas oberoende av kontraktsform.

Projektet har genomförts som ett uppdrag till KTH (Håkan Stille) med stöd av utomstående specialister, där Mats Holmberg, Tunnel Engineering, har svarat för huvuddelen av arbetet. Lars Olsson, Geostatistik, och Per Näsman, KTH, har granskat de statistiska avsnitten. Visst dataunderlag har välvilligt ställt till förfogande från projekt Hallandsås. Arbetet har finansierats inom SveBeFos forskningsprogram med särskilt stöd av Banverket, SKB och SBUF, och har följts av en referensgrupp bestående av Rolf Christiansson, SKB, Anders Fredriksson, Golder, Ulf Håkansson, Skanska Teknik, Beatrice Lindström, WSP, Olle Olofsson, Banverket, Jonny Sjöberg, Vattenfall Power Consultant och undertecknad.

Stockholm i april 2007

Tomas Franzén

*“What is often forgotten is that the observational method
is an adjunct to design, not a substitute for it”*

Ralph B. Peck

Innehållsförteckning

Förord.....	i
Summary.....	v
Sammanfattning.....	xi
1 Inledning.....	1
1.1 Observationsmetodens tillämplighet.....	2
1.2 Syfte och avgränsningar.....	4
1.3 Frekventistiskt och bayesianskt synsätt på statistik.....	5
1.4 Observationsmetodens bakgrund.....	6
1.5 Grundläggande begrepp.....	7
1.5.1 Eurokod och observationsmetoden.....	7
1.5.2 Tolkning av intentionen i Eurokod avseende observationsmetoden.....	9
2 Kopplingen mellan observationsmetoden och designprocessen.....	11
2.1 Inledning.....	11
2.2. Designprocessens övergripande struktur och innehåll.....	12
2.3 Designprocessens styrning och spårbarhet.....	19
2.4 Sammanfattning.....	21
3 Berganläggningars geotekniska beteende.....	23
3.1 Inledning.....	23
3.2 Förundersökningsrapport.....	24
3.3 Ingenjörsgelogisk prognos.....	24
3.4 Geoteknisk dimensioneringsrapport.....	27
3.5 Kontrollprogram.....	28
3.6 Designprocessens sakfrågor enligt BV Tunnel och VV Tunnel 04.....	29
3.7 Sammanfattning av designprocessen.....	32
4. Statistiska verktyg för att reducera osäkerheter i design under utförandeskedet.....	35
4.1 Inledning.....	35
4.2 Beskrivning av mätdata med bayesiansk statistisk.....	36
4.3 Statistisk beskrivning av mätdata.....	42
4.4 Statistisk processkontroll.....	44
5. Praktiska verktyg för tillämpning av observationsmetoden.....	47
5.1 Inledning.....	47
5.2 Kontroll av utförd åtgärd mot ställda designkrav.....	47
5.3 Kontroll av att stabila förhållanden råder genom analys av mätningar av deformation.....	54
5.3.1 Inledning.....	54
5.3.2 Problemställning.....	54
5.3.3 Teoriutveckling avseende data från enskild mätsektion.....	57
5.3.4 Statistisk analys avseende data från flera mätsektioner.....	67
5.3.5 Bayesiansk uppdatering.....	71
5.4 Sammanfattning av praktiska verktyg.....	72
6. Slutsatser och rekommendationer.....	77
7. Referenser.....	81

Summary

The title of this report is "The application of the observational method for design of underground excavations". It is a project within a portfolio of projects aimed at studying probability based engineering issues in the context of design, administrated by SveBeFo and taking requirements of the Eurocode into consideration.

In the process of design of an underground excavation parameters with varying degree of uncertainties must be taken into account. These uncertainties are in many cases related to sub-surface conditions and other site-specific requirements. Safety issues and providing underground structures with an economic design taking the geological setting into account were the key considerations when the basis for the observational method was formulated. The observational method is one of the designated design methods in Eurocode, EN 1997-1:2004. From an engineering point of view this allows the Designer to employ formal approaches towards design uncertainties as well as towards results from monitoring and observations made during construction.

The overall aim of this study is to:

- outline the design process based on requirements stipulated for the observational method,
- develop robust methods to help interpret results from monitoring and observations within the framework of the observational method,
- demonstrate ways of generating feedback for design purposes from monitoring results.

According to EN 1997-1:2004, section 2.7; "when prediction of geotechnical behaviour is difficult, it can be appropriate to apply the approach known as the observational method, in which design is reviewed during construction". The concept of geotechnical behaviour is not specifically defined when applied to underground excavations. In this study the difficulty to predict geotechnical behaviour is equal to the uncertain prospect of achieving a sufficiently accurate assessment of;

- the location of foreseen rock qualities,
- the quality in the applied rock support measures,
- the interaction and subsequent behaviour of rock mass and support elements.

The application of the observational method includes to take engineering decisions despite uncertainties in sub-surface conditions, as well as to employ construction experience and information from monitoring, all with the aim to reduce uncertainties in the parameters that govern the design. In Sweden the observational method approach is known by the designation, active design. The basis for both approaches is to establish a preliminary design, devise contingency actions for such a case that the structural behaviour deviates from the expected, select and execute relevant observations during construction and to conduct

modification of design to suit actual conditions. It is important to point out that this procedure in itself may be a source to faulty design and is therefore something that requires stringent handling of the design uncertainties. The preparation of contingency actions before construction is started is a mean to mitigate this specific problem.

There are formal requirements in Eurocode that the behaviour of the construction shall be monitored during construction. This implies that relevant design parameters must be devised that can both be predicted and monitored. These parameters are in this study designated as control parameters and are, in principal, the parameters that define the acceptable limits of design. Maintaining high quality in both the monitoring process and subsequent analysis is a prerequisite for a qualified decision making process. The analysis of results from monitoring is dealt with in this study by means of statistical methods. Methods are used for the purpose of assessing the stability of the structural system, rock mass and support, as well as for controlling design requirements related to durability and serviceability.

The design process

A critical element in the design process is to establish relevant control parameters that expose significant events that have influence on the geotechnical behaviour during construction. In practice one must be able to quantify such parameters in order to validate the design requirements. The control parameters may be linked to the quality of or to the structural behaviour of the rock mass and the support elements. The control parameters must be selected carefully and with a good understanding of the significance to the design situation. The monitoring plan must be devised taking into account the important aspect of documentation and analyses of monitoring results as well as means of communicating significant events so that contingency actions can be undertaken successfully.

A survey of current design practices and procedures reveals that design within the framework of the observational method;

- is comparable with today's practice,
- implies that observations shall focus on assessing the current rock mass quality, controlling that the support measures meet the requirements of the technical specification and revealing whether the structural behaviour lies within the acceptable limits of behaviour,
- introduces additional demand on transparency and traceability,
- introduces additional demand on the contractual relations and documents.

Development of practical analysis methods is necessary in order to meet the requirements in Eurocode when executing the observational method within the construction phase. The demands put by the observational method related to calculation tools, can be considered by common practice of today.

Analysis of monitoring results using statistical methods

The uncertainty due to lack of knowledge have to be taken into account in the design of underground excavations. Another factor to account for is the process of

assessing the relevancy of sparse geotechnical information based on sampling. In this study we have aimed to link the observational method with a probabilistic design approach. The use of statistical methods is hence mandatory. It is advantageous to apply a degree-of-belief view, in practice known as Bayesian statistics, in which current knowledge or experience about the structural behaviour can be included in the analysis. Bayesian statistics provides a formal basis for expanding the concept of probability by combining available information with new data or knowledge, related to the structural behaviour and especially the control parameter.

Robust and practical methods are required for analysing, supervising and visualising monitoring results. These methods must be devised in such a way that they can be practiced on the construction site. The methods presented here are supplementary to the observational system and shall be used as supporting tools in the sequential process of validating or modifying the design. High quality is required in the analysis methods that aim to reduce design uncertainties. Some important fundamentals in the Bayesian approach are therefore summarised below with a view towards the aim of the current study.

- Parameters which are assigned to design uncertainties can be assessed by means of monitoring and considers representing the underlying process that generates data. Control parameters are assumed to be stochastic variables that can be described with statistical parameters. The inherent variability of the underlying process can be assessed by modelling these “unknown” statistical parameters as stochastic variables. Such an approach provides a basis for assessing the probability for a specified event related to the control parameter. For instance the structural behaviour being outside the limits of acceptable behaviour or some other relevant limit value.
- Any prediction related to the uncertainty in the distribution of the control parameter shall include current knowledge. This implies that there may be an amount of subjectivity in the prediction. This requires that information must be made transparent in terms of facts, interpretations and judgements.
- New data can be combined with prior data to produce an update of the available information. The prior distribution expresses what is known before arrival of new data. Combining old and new data produces the posterior distribution that expresses the knowledge of the parameter after seeing the new data. The formal procedure for doing this is through Bayes Theorem.

Feedback to design from monitoring and observations made during construction

The term geotechnical behaviour comprises to validate structural stability and behaviour in relation to both a given design criterion and applied support measures. Therefore it may also include quality assurance of the executed support measures. Examples of a procedure in which statistical methods are employed for the above design problems are discussed in the report. The methods aim specifically to handle the following requirements of the observational method given by Eurcode:

- “The range of possible behaviour shall be assessed and it shall be shown that there is an acceptable probability that the actual behaviour will be within the acceptable limits”.
- “A plan of monitoring shall be devised, which will reveal whether the actual behaviour lies within the acceptable limits. The monitoring shall make this clear at a sufficiently early stage, and with sufficiently short intervals to allow contingency actions to be undertaken successfully”.

The first example is a case study on how to assess the quality of executed rock support measures for a design problem related to tunnelling and key block instability. The design stipulates a shotcrete lining with a minimum mean thickness of shotcrete in place. The required thickness is related to the safety margin as well as to an unwanted damage event and is therefore considered to be the uncertain parameter. Monitoring the thickness in this case gives enough data to use a frequentistic approach. The result of the analysis is a recommendation of the appropriate mean value for the shotcrete thickness in place that will fulfil the design requirement. The conclusion is that the measure of quality is a function of the recommended mean value, its variance and the sampling procedure. Theoretically, it can be shown that, increasing the number of tests with the aim to reduce the recommended mean value is not an efficient measure for reducing the variance of the control parameter. This methodology applied here can also be used to assess the extent of the monitoring programme as well as to interpret monitoring data in relation to a given design criterion. The method can be further developed and assist optimizing the thickness of shotcrete in place, from a cost point of view.

The second example is a case study on how to interpret deformation monitoring results. Deformation monitoring may be the most relevant control parameter for complex geological conditions, where uncertainties in sub-surface properties are common. The nature of the problem in such a case is defined by inadequate amount of information as well as by the fact that an assessment of structural stability for validating the design must be based on sparse monitoring data. Data are analysed using a Bayesian approach for assessing the tunnel structural behaviour in relation to a given design criterion. This can be done for investigating local stability based on measurements carried out in one tunnel cross-section as well as for assessing the overall stability based on data from monitoring at several locations along a stretch of the tunnel. When interpreting deformation monitoring data the final assessment must incorporate the expected structural behaviour based on design and sound rock engineering judgement.

By means of extrapolation it is possible to assess the final deformation value and its variance using deformation monitoring data from one cross-section. Such analyses can be used to determine if the support measures are appropriate on a local scale. Monitoring data from several monitoring stations must be used in order to make estimates of the mean value of deformation and its variance for a specific type of rock condition. This will in turn give enough data for assessing both the range of possible behaviour for the structure and the current safety level in relation to the design criterion. The requirements are that data is representative for the design problem and that other measures are in place to validate that the

rock conditions are as expected. If a prior distribution exists of the expected deformation it is possible to carry out Bayesian updating. When prior information of the variance of the control parameter is at hand it may be utilised to reduce the extent of monitoring.

Conclusions and recommendations

Design of underground excavations with the observational method fits well within the framework of current design practices and procedures. The implementation of the observational method is not considered to be a significant problem but will definitely be a positive development of today's design practices.

In order to facilitate the practical implementation and broaden the acceptance of the method we recommend that further studies are carried out with the aim to develop:

- Guidelines for establishing the safety level in relation to structural safety, serviceability and durability.
- Guidelines for the owner, designer and site organisation for the practical use of the observational method.
- Contractual and administrative procedures that establishes the principles for modifying the design during construction.

The nature of the degree-of-belief view on statistics is closely related to the basic principles of the observational method. An expected structural behaviour shall be established which is in close conjunction with the prior information that form the basis for Bayesian updating. During construction monitoring shall be employed for validating or modifying design. This is the practical way of dealing with uncertainty. In Bayesian statistics modelling can be used to describe such uncertainties and assess probabilities related to the uncertainties. In this context it should be pointed out that Bayesian and classical statistics will give the same results for monitoring programmes that produce sufficient amount of data.

Many future underground projects are likely to become more complex in nature and this is something that will raise additional focus on combining a safe and economical design. From a long term perspective it is therefore important to develop the application of probability based design. It will consider statistical methods, both more basic and advanced, such as Bayesian statistics. The use of probability based methods in the framework of the observational method requires additional studies before it can be fully used in design practice. The statistical description of the ground and structural behaviour need to be better developed and understood. This is a fundamental task as this process is the means of controlling that the structural behaviour lies within acceptable safety as well as validation or modification of design. Dealing with prior information and applying it for design purposes must be further studied. In geotechnical design there are ongoing research to

establish guidelines for assessing the variance of design parameters based on the coefficient of variation. Further research is also recommended to investigate means of using correlation and variance reduction methods. Subjects in particular are extrapolation procedures and the spatial distribution of parameter uncertainty.

Sammanfattning

Rapporten ”Observationsmetodens grunder och dess tillämpning på design av konstruktioner i berg” är ett projekt inom ramen för en projektportfölj som initierats av och administreras av SveBeFo. Portföljen syftar till att samla forskning inom bergmekanik med inriktning mot sannolikhetsbaserad dimensionering, speciellt med beaktande av de nya Eurokoderna (EN).

Dimensionering av konstruktioner i jord och berg innefattar normalt att hantera en mängd osäkerheter av olika dignitet. Osäkerheter relaterade till plastspecifika förutsättningar och svårigheter att utforma en ekonomisk design var utgångspunkten när observationsmetoden en gång formulerades.

Observationsmetoden är numera en av de föreskrivna designmetoderna enligt den standard i Eurokod som behandlar geotekniska konstruktioner, EN 1997-1:2004. Detta innebär att man för konstruktioner i berg kan använda sig av ett formellt förhållningssätt både till designosäkerheter och till resultat av mätningar och observationer under uppförandet av konstruktionen.

Syftet med denna studie är att;

- beskriva designprocessen på basis av de krav som ställs för att använda observationsmetoden,
- utveckla robusta metoder för att tolka mätningar och observationer som skall utföras inom ramen för observationsmetoden,
- demonstrera sätt att återkoppla resultaten av observationer till konstruktionens design.

Observationsmetoden kan enligt EN 1997-1:2004, kapitel 2.7, vara lämplig att användas när det är svårt att förutsäga det geotekniska beteendet. Detta begrepp är inte tidigare definierat med avseende på byggande i berg. Därför utgår denna studie från att svårigheten med att bestämma det geotekniska beteendet är synonymt med osäkerheten att med acceptabel noggrannhet;

- lägesbestämma förekommande bergkvalitéer,
- bedöma om utförda åtgärder innehåller förväntad kvalitet,
- bedöma det bärande huvudsystemets beteende, det vill säga insatta åtgärders verkningssätt och deras samverkan med berget.

Observationsmetodens användning i design av undermarksprojekt inbegriper att fatta beslut under osäkerhet och att successivt omsätta kunskap som erhålls från undersökningar och byggande med syfte att reducera osäkerheter i parametrar som styr konstruktionens design. Grunderna i observationsmetoden är i princip desamma som i den metodik som i Sverige benämns aktiv design. Grunderna är att upprätta en preliminär design, planera åtgärder för oförutsedda händelser, utföra relevanta observationer under byggandet och fastlägga slutgiltig design genom aktiv anpassning till aktuella platsförhållanden. Det är viktigt att påpeka att detta förfaringsätt kräver en stringent hantering av designosäkerheter då detta förfarande i sig kan vara grund för felaktig design. Därför är det ett krav i

observationsmetoden att planerade åtgärder skall föreligga som kan användas i utförandeskedet när konstruktionens beteende avviker från det förväntade.

Vidare finns formella krav som innebär att konstruktionens beteende skall kontrolleras i utförandeskedet med hjälp av relevanta och observerbara storheter. För dessa storheter används begreppet kontrollparametrar, med vilka i princip designens giltighet formuleras. Kvalitetssäkrade mätdata och analysmetoder är således en förutsättning för att fatta kvalificerade beslut om återkoppling till design. För att analysera mätdata presenteras i denna rapport applikationer som bygger på statistiska metoder. Dessa applikationer kan användas för kontroll av det bärande huvudsystemets bärförmåga men även för kontroll av krav som relaterar till beständighet och berganläggningens funktion.

Kvaliteten på utförda åtgärder inbegrips också i begreppet geotekniskt beteende. Anledningen är att designförutsättningarna förutsätter att en viss kvalitet uppnås i utförandet av berguttag, injektering och förstärkning för att uppfylla krav som ställs på det bärande huvudsystemet. När kvaliteten avviker från specifikationen, till exempel given i form av mekaniska egenskaper och mängder, har det konsekvenser för det bärande huvudsystemets beteende och är därmed en faktor att beakta när osäkerheterna omkring det geotekniska beteendet ska bedömas.

Designprocessen

Ett viktigt moment i projekteringen är att fastlägga robusta kontrollparametrar som avspeglar rådande designosäkerheter och på ett relevant sätt exponerar signifikanta händelser som påverkar det geotekniska beteendet. I praktiken måste dessa kontrollparametrar vara kvantifierbara för att designkraven skall kunna valideras. Kontrollparametrarna kan antingen vara relaterade till bergmassan, till utförda åtgärder eller till det bärande huvudsystemets beteende. Val av kontrollparametrar bör göras med omsorg och beakta att berganläggningarnas förutsättningar och funktion uppvisar låg grad av repeterbarhet emellan projekt. Designkraven skall sedan kontrolleras i utförandeskedet med hjälp av ett observationssystem. I detta ingår att utföra observationer, dokumentera och analysera mätdata samt att kommunicera signifikanta händelser så att vid behov kompletterande åtgärder kan utföras.

En genomgång av dagens designprocess inom bergbyggande samt diskussion om dess innehåll och struktur visar att design med observationsmetoden;

- liknar den arbetsmetodik som används idag för att upprätta design,
- innebär att observationer skall inriktas på att fastlägga rätt bergklass, att insatt åtgärd är korrekt utförd samt att kontrollera konstruktionens beteende mot fastlagda gränsvärden (designkrav),
- ställer utökade krav på tydlighet och spårbarhet gentemot normal praxis,
- ställer nya krav på utformningen av kontraktssdokument.

Det är inom de delmoment av designprocessen som hänför sig till utförandeskedet som störst behov av utveckling har identifierats för att observationsmetoden ska kunna implementeras i praktiskt bergbyggande. Vad gäller beräknings- och dimensioneringsverktyg är behovet inte lika påkallat. Författarnas åsikt är att de

som tillämpas med stöd av dagens praxis också kan användas för design inom ramen för observationsmetoden.

Analys av mätningar och observationer med statistiska metoder

Vi uppfattar att merparten av de osäkerheter som råder inom bergbyggnad är en följd av brist på kunskap om parametrar av betydelse för designprocessen. En annan osäkerhet följer av svårigheten att bedöma information som inhämtats från fåtalsprovning. Vi har därför i denna rapport strävat efter att beskriva kopplingen mellan observationsmetoden och en sannolikhetsbaserad dimensionering av berganläggningar. Vi har valt ett bayesiansk synsätt på sannolikhetsbegreppet, vilket innebär att detta kan innefatta aktuell kunskap om konstruktionens beteende som ej är frekventistisk. Detta utgår från en utsaga om den tilltro (*"degree of belief"*) som en person har att en händelse skall inträffa, när all relevant tillgänglig information tas med i övervägandet. Praktiska och robusta metoder behövs dels för att övervaka och visualisera mätningar och observationer, dels för att analysera mätdata. Ur användarsynpunkt måste därför metoder utvecklas som är tillräckligt robusta för att kunna tillämpas i produktionsförhållanden. De analysmetoder som presenteras i denna rapport har som mål att observationerna, i form av analyserade resultat, skall ge beslutsunderlag för successiv validering eller anpassning av design.

För att säkerställa kvaliteten i användandet av bayesiansk statistik och i de statistiska analyser som avser att reducera osäkerheterna i designen behöver vissa grundläggande principer klargöras och uppfyllas. Principerna för den bayesianska analysen är följande:

- Modellera kontrollparametern (den datagenererande processen) som en stokastisk variabel med tillhörande statistiska parametrar. Låt dessa statistiska parametrar vara stokastiska variabler med egna statistiska parametrar. Dessa senare variabler representerar osäkerheten i den datagenererande processen. Detta möjliggör att kvantifiera sannolikheten för en oönskad händelse relaterad till kontrollparametrarna. Till exempel skatta sannolikheten för den oönskade händelsen som innebär att överskrida gränsen för acceptabelt beteende eller något annat relevant gränsvillkor.
- Använd känd, relevant information för att göra en utsaga om dessa senare statistiska parametrar som utgörs av kontrollparameterns medelvärde och medelvärdets spridning. Detta ger den så kallade *å priori*-fördelningen för de stokastiska variabler som beskriver kontrollparameterns statistiska parametrar och innehåller aktuell kunskap om kontrollparametern innan nya data erhålls.
- När nya provdata tillkommer kan dessa kombineras med *å priori*-fördelningen för att bilda en ny och säkrare utsaga om de problem som studeras. Uppdatering utförs med hjälp av Bayes teorem och så kallad *likelihood*. Denna beräknas ur mätdata och den så kallade *likelihood*-funktionen. *Likelihood*-funktionen baseras på kontrollparameterns statistiska fördelning och även ur den statistiska principen för provtagning. Vid uppdateringen erhålls den så kallade *posterior*-fördelningen för de stokastiska variablerna som beskriver

kontrollparameterns statistiska parametrar. Det vill säga nya värden på kontrollparameterns medelvärde och medelvärdets spridning. Detta medger att komplexa problem kan hanteras, men med ökad komplexitet ökar också den matematiska svårighetsgraden.

- För vissa kombinationer av fördelningar för likelihood och för a priori kan uppdatering utföras med färdiga lösningar. Detta kallas konjugerad prior. Man måste dock överväga om det aktuella problemet och förhandskunskapen beskrivs av sådana fördelningar.
- Den uppdaterade fördelningen avser de statistiska parametrarna som beskriver kontrollparameterns statistiska parametrar. Det vill säga uppdateringen avser medelvärdet och medelvärdets spridning och inte den underliggande kontrollparametern. För att kunna använda den uppdaterade fördelningen för en utsaga om den mätbara kontrollparametern behövs den så kallade bayesianska fördelningen. Den erhålls genom att kombinera spridningen hos den underliggande stokastiska variabeln med medelvärdets spridning. Den kallas också prediktionsfördelningen .
- Utsagor om kontrollparametrars osäkerhet i form av en fördelningsfunktion och statistiska parametrar bör vara baserad på aktuell kunskap om kontrollparametern ifråga. All känd information om kontrollparametern såväl som ingenjörsmässiga bedömningar kan ingå i utsagan. Det kan innebära att det finns inslag av subjektivitet i fördelningsfunktionen och är något som kräver att osäkerhetsanalysen av kontrollparametern i fråga innehåller stringent redovisning av fakta, tolkningar och gjorda överväganden.

Återkoppling av observationer till konstruktionens design

Begreppet geotekniskt beteende bör i bergbyggnadssammanhang omfatta att säkerställa att den utförda förstärkningsinsatsen har acceptabel kvalitet i relation till designförutsättningarna. Vidare också att fastlägga att stabila förhållanden råder och att det bärande huvudsystemet uppför sig som förväntat i relation till utförd åtgärd. Metodiker för båda dessa fall beskrivs i rapporten med hjälp av exempel som baseras på mätdata från praktikfall. Där hanteras nedanstående krav som formulerats för observationsmetoden.

- Intervall för möjligt beteende skall fastläggas och det ska visas att det finns en acceptabel sannolikhet för att det faktiska beteendet ska vara inom de fastställda gränserna för acceptabelt beteende.
- En kontrollplan skall utarbetas som kan visa om det faktiska beteendet ligger inom gränserna för det acceptabla beteendet. Kontroller ska ske i god tid och med tillräckligt korta intervall för att möjliggöra att framgångsrika åtgärder kan vidtagas.

I det första exemplet analyseras den utförda förstärkningsinsatsens kvalitet för designproblemet blockstabilitet. Sprutbetongens medeltjocklek betraktas vara den parameter som är behäftad med störst osäkerhet i relation till konstruktionens förväntade beteende och uppfyller därför krav på att vara kontrollparameter. Designkravet definieras av den minsta tillåtna medeltjocklek som kan accepteras i relation till ett kvantifierat krav på säkerhet. Vid provning av sprutbetongens tjocklek erhålles en datamängd som gör att frekventistisk statistik kan användas.

Mätningarna av sprutbetongens tjocklek visualiseras i ett styrdiagram och ur den statistiska analysen erhålls skattningar av hur tjockleken varierar lokalt och för medeltjockleken över en yta. Detta kan i sin tur omsättas till en rekommendation om vilken praktisk tjocklek, ett riktvärde, som skall appliceras i utförandet. Slutsatsen är att den teoretiska beskrivningen av kvalitet i utförandet är en relation mellan riktvärde, spridning och provningsförfarande. Teorierna visar också att en ökning av antalet mätningar i syfte att reducera riktvärdet är inte lika effektivt som insatser att minska kontrollparameterns spridning. Metoden kan användas för att ge underlag till dels kontrollernas omfattning, dels hur uppmätta värden skall tolkas med avseende på ett specificerat gränsvärde. Den ger även underlag för en ekonomisk styrning med avseende på vilken praktisk tjocklek entreprenören bör sikta på.

I det andra exemplet analyseras mätningar av deformationer med syfte att kontrollera att stabila förhållanden råder och att det bärande huvudsystemet uppför sig som förväntat. I komplexa geologiska förhållanden med osäkra geotekniska och geometriska parametrar kan mätningar av deformation vara den mest lämpliga kontrollparametern. Problemställningens natur definieras i huvudsak av brist på tillräcklig information (fåtalsprovning) och av att bedömningar om konstruktionens beteende baseras på resultat från mätningar som inte kan liknas vid repeterbara ”försök”. På grund av detta är ett bayesianskt synsätt lämpligt och möjliggör skattningar av slutdeformationen och dess varians. Det gäller för bedömningen av lokal stabilitet baserat på information från en mätsektion såväl som för stabiliteten av en längre tunnelsträcka baserat på information från ett antal mätsektioner.

Tidiga observationer från deformationsmätning i en enskild mätsektion kan ligga till grund för beslut om att förstärkningsinsatsen är adekvat. Det är då ett krav att beslutet baseras på en bergmekanisk uppfattning om deformationsförloppet. Utifrån detta kan sedan skattningar göras med hjälp statistisk teori och extrapolation. Dels om förväntad slutdeformation, dels om vilken osäkerhet (variens) som finns i utsagan. Ytterligare forskning om grundläggande egenskaper hos deformationsförloppets statistiska egenskaper erfordras för den här typen av extrapolation baserad på mätdata. Det är viktigt att framhålla att konstruktionens verkliga säkerhetsnivå är relaterad till resultat baserat på fortsatta mätningar medan resultat från ovan beskrivna extrapolation kan appliceras direkt i arbetenas utförande.

Vid användande av deformationsmätning i flera tunnelsektioner i samma bergparti kan resultatet användas för att bedöma sannolikheten att oönskade deformationer uppkommer i en godtycklig sektion inom det studerade bergpartiet. Därmed är det ett underlag för bedömning av konstruktionens verkliga säkerhetsnivå. Utgångspunkten är dels att mätningen sker i en för stabilitetsproblemet signifikant mätsektion, dels att andra typer av observationer säkerställer att samma bergkvalité föreligger. Om en förhandsuppfattning av den förväntade deformationen föreligger kan en uppdatering göras för att kombinera förhandskunskap och mätresultat. Det faktum att metoden utnyttjar förhandskunskap och att osäkerheten delvis beror på antalet mätsektioner

möjliggör att kontrollprogrammets omfattning kan analyseras i förväg. Svårigheten i bergbyggnadssammanhang ligger i att säkerställa kvaliteten på förhandskunskapen och ytterligare studier behövs för att applicera dessa relativt oprövade metoder inom ramen för praktisk design.

Slutsatser och rekommendationer

För bergbyggande ser vi observationsmetoden som en vidareutveckling av dagens praxis och anser inte heller att det föreligger speciella problem för att implementera metoden inom ramen för dagens designprocess. Metoden förutsätter ett stringent handhavande då slutmålet är att validera att den byggda berganläggningen uppfyller de övergripande krav om bärighet, stadga och beständighet som ställs på byggnadsverk. Utförda observationer skall ses som ett sätt att reducera rådande osäkerheter till en acceptabel nivå. Ett viktigt moment i projekteringen är således att fastlägga robusta kontrollparametrar som avspeglar rådande designosäkerheter och på ett relevant sätt exponerar signifikanta händelser som påverkar det geotekniska beteendet. Parametrarna kan antingen vara relaterade till bergmassan, till utförda åtgärder eller till det bärande huvudsystemets (samverkanskonstruktionens) beteende. Val av kontrollparametrar bör göras med omsorg och beakta att berganläggningarnas förutsättningar och funktion uppvisar låg grad av repeterbarhet mellan projekt.

För att bidra till en ökad praktisk användning av observationsmetoden och till att den skall bli en allmänt accepterad designmetod rekommenderar vi att följande delområden studeras:

- Riktlinjer för hur säkerhetsnivån skall fastläggas relativt konstruktionens bärighet, stadga och funktion.
- Lämpliga organisationsformer vid tillämpning av observationsmetoden.
- Betalnings- och kontraktsformer som klarlägger principerna för hur anpassning av design i utförandeskedet skall regleras.

Det bayesianska synsättet på statistik ligger nära de principer som observationsmetoden grundas på. En förväntansmodell upprättas i design för till exempel bergmassans och förstärkningens respons på bergguttag. Denna förutsägelse bildar en a priori uppfattning. Under uppförandet av konstruktionen skall data från mätningar och observationer användas för validering och anpassning av design. Detta successiva tillvägagångssätt är ett praktiskt sätt att löpande reducera osäkerheten i de parametrar som valts för att kontrollera konstruktionens beteende. Genom att använda statistiska variabler för att beskriva dessa osäkerheter visar analyserna att det finns möjlighet till bayesiansk uppdatering. Principerna för åsättande av a priorifördelningar som beskriver vår förhandskunskap måste dock utvecklas vidare. Det bör påpekas att vid mer omfattande provning närmar sig det bayesianska synsättet det klassiska frekventistiska sannolikhetsbegreppet.

Vi vill framhålla vikten av att kontrollera analysresultat med visuella observationer och ingenjörsmässiga bedömningar. Detta gäller även vid brukande av ett administrativt och teoretiskt väl underbyggt system.

Många framtida bergprojekt kommer sannolikt att innehålla många komplexa frågor av teknisk natur. Ur ett långsiktigt perspektiv är det därför viktigt att utveckla tillämpningen av sannolikhetsbaserad dimensionering av berganläggningar. Detta innebär att använda statistiska metoder, både grundläggande och mer avancerade, som bayesiansk statistik. Vi kan också konstatera att ytterligare utveckling och fördjupning måste till för att en sannolikhetsbaserad applikation av observationsmetoden skall komma till användning. Utifrån bergmekaniska studier behöver vi förbättra den statistiska beskrivningen av den process i konstruktionens beteende som skall kontrolleras (den datagenererande processen). Den matematiska behandlingen blir enklare om standardavvikelsen är känd hos den datagenererande processen. En framkomlig väg som studeras inom geotekniken är att skatta standardavvikelsen via uppföljningar och därmed fastställa troliga värden på variationskoefficienten. En annan frågeställning som ytterligare bör studeras är förutsättningarna att reducera parameterns osäkerhet i fall vi har tillgång till närliggande data från samma fysikaliska process. Här är de centrala begreppen variansreduktion och korrelation av ingående variabler.

1 Inledning

I Sverige används begreppet aktiv design som benämning på en metodik för dimensionering av komplicerade konstruktioner i berg. Grunderna i aktiv design är att upprätta en preliminär design, planera åtgärder för oförutsedda händelser, utföra relevanta observationer under byggandet och fastlägga slutgiltig design genom aktiv anpassning till aktuella förhållanden. Metoden är baserad på principerna i observationsmetoden, en designmetod som formulerades av Peck (1969) men vars väsentliga innehåll framfördes av Terzaghi och Peck (1943) och (1967). Stille (1986) beskriver hur aktiv design framgångsrikt använts i ett antal komplicerade svenska bergprojekt. Den grundläggande skillnaden gentemot en fix design är att betrakta initial design som preliminär och aktivt använda möjligheten att anpassa designen i relation till observerade geologiska förhållanden. Det betonas att anpassning av design kan leda till både ökade och minskade förstärkningsmängder.

Observationsmetoden är en av de föreskrivna designmetoderna enligt den standard i Eurokod som behandlar geotekniska konstruktioner, EN 1997-1:2004. Det innebär att grundtankarna i den metodik som omfattas av begreppet aktiv design, har stöd i europeisk byggstandard. Observationsmetodens fördel relativt andra designmetoder förefaller mest uppenbar i komplexa designsituationer med osäkra indata och osäkra beräkningsmodeller. Då kan dimensionering med observationsmetoden visa sig vara det bästa alternativet, kanske det enda realistiska sättet att upprätta en ekonomisk design. Det faktum att metoden föreskrivs i europastandarden möjliggör användning av ett formellt förhållningssätt till designosäkerheter och resultat av observationer under uppförandet av konstruktionen.

”Observationsmetodens grunder och dess tillämpning på design av konstruktioner i berg” är ett projekt inom ramen för den projektportfölj som SveBeFo initierat för en samlad forskning inom bergmekaniken med inriktning mot sannolikhetsbaserad dimensionering, speciellt med beaktande av de nya Eurokoderna (EN).

Föreliggande rapport innehåller en diskussion om den övergripande strukturen för observationsmetodens designprocess, med tillämpning på dimensionering av berganläggningars bärande huvudsystem, bergmassa och dess förstärkning. Vidare diskuteras innehållet i designprocessen mer i detalj med avseende på de formella krav som formulerats för observationsmetoden i EN 1997-1:2004, kapitel 2.7. Krav som bland annat innebär att konstruktionens beteende skall kontrolleras i utförandeskedet med hjälp av relevanta observerbara storheter, så kallade kontrollparametrar med vilken designens giltighet formuleras. Hög kvalitet på mätdata och på analysmetoder som används för utvärdering är en förutsättning för att fatta kvalificerade beslut om återkoppling till design. För att analysera mätdata presenteras i denna rapport applikationer som bygger på statistiska metoder. Dessa applikationer kan användas för kontroll av det bärande huvudsystems bärförmåga men även för kontroll av krav som relaterar till beständighet och berganläggningens funktion. Exempel på observerbara storheter är geologiska

parametrar, deformation samt sprutbetongens tjocklek och vidhäftning. Det vill säga den typ av observationer som normalt utförs vid uppförandet av undermarksanläggningar. Exempel på kontroller som huvudsakligen rör berganläggningars funktion är att berg eller förstärkning inte inkräktar på teoretisk tunnelprofil och på sådana som berör beständighet är löpande provning av förstärkningselementens mekaniska egenskaper.

Beräkningsverktyg för dimensionering av konstruktioner i berg behandlas av andra projekt i den ovan nämnda projektportföljen och berörs därför bara i allmänna termer i denna rapport. I relation till innehållet i SveBeFo rapport nr. 70 ”Dimensionering av samverkanskonstruktioner i berg med sannolikhetsbaserade metoder – En inledande studie”, behandlar föreliggande rapport observationsmetodens användningsområde i ett bredare perspektiv.

1.1 Observationsmetodens tillämplighet

Den europeiska standarden EN 1997-1:2004 föreskriver att dimensionering kan utföras med någon eller en kombination av följande metoder;

- beräkningar baserade på partialkoefficientmetoden eller enbart på sannolikhetsberäkningar,
- hävdvunna metoder baserade på jämförbara projekt och erfarenhet,
- modellförsök och provbelastning,
- observationsmetoden.

Att bestämma vilken designmetod som är mest lämpad för en viss designsituation kan närmast liknas vid ett beslutsproblem som innebär att fastlägga vilken designmetod som har bäst förutsättningar att åstadkomma den lägsta slutkostnaden för projektet. Observationsmetoden kan enligt EN 1997-1:2004, kapitel 2.7, vara lämplig att användas när det är svårt att förutsäga det geotekniska beteendet. Detta begrepp är inte tidigare definierat med avseende på byggandet i berg. Därför utgår denna studie från att svårigheten med att bestämma det geotekniska beteendet är synonymt med osäkerheten att med acceptabel noggrannhet;

- lägesbestämma förekommande bergkvalitéer,
- bedöma om utförda åtgärder innehåller förväntad kvalitet,
- bedöma det bärande huvudsystemets beteende, det vill säga insatta åtgärders verkningsätt och deras samverkan med berget.

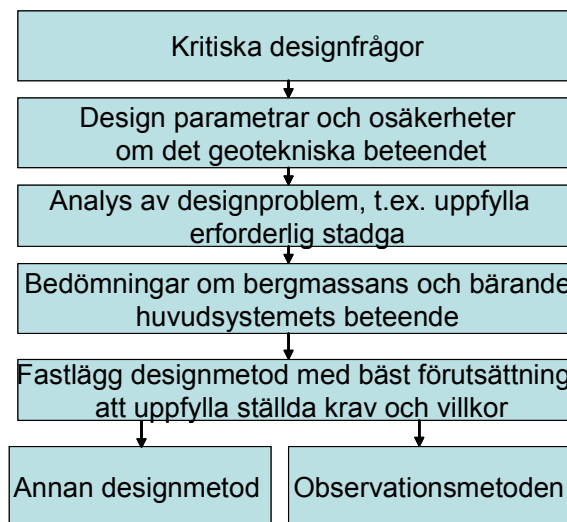
Ovanstående innebär att observationsmetoden kan vara aktuell att använda endast för vissa kritiska designfrågor i projektet. De sätt på vilket observationssystemet utformas skall utgå från aktuell designsituation. För att metoden skall vara tillämpbar behöver inte samtliga faktorer som listats ovan vara behäftade med osäkerheter.

Underlaget för beslut om att använda observationsmetoden bör omfatta en värdering om observationsmetoden gentemot andra designmetoder i tillräcklig

omfattning kan medverka till att reducera osäkerheterna för designfrågor som berör det geotekniska beteendet. Figur 1-1 visar principerna i logiken att välja designmetod. Nyttan av att använda observationsmetoden gentemot andra designmetoder kan till exempel bestå i möjligheten att på ett säkert och ekonomiskt sätt hantera:

- uttags-, förstärknings- och injekteringsmetodik, i syfte att rätt teknisk lösning utförs i rätt sammanhang och på rätt sätt,
- oförutsedda geologiska förhållanden, så att kontroller i god tid möjliggör planering och realisering av robusta designlösningar under byggandet.

Observationsmetodens fördel är den formella möjligheten att göra anpassningar till den initiala designen allteftersom ökad kunskap erhålls i utförandeskedet om de geotekniska osäkerheterna. Detta faktum utgör en stor potential för kostnadsbesparingar, men skall ställas mot merkostnader för det initiala designarbetet, utökad kontrollprogram och aktivt designarbete i utförandeskedet.



Figur 1-1. Principiell uppställning av proceduren att välja designmetod.

Observationsmetoden innebär utökade åtaganden för den organisation som har ansvar för att genomföra projektet. För att observationer och mätningar ska medverka till att reducera osäkerheterna innebär det att;

- observationsmetoden från början skall vara en integrerad del av designprocessen,
- val av observationssystem skall baseras på en tydlig definition av vilka problemställningar som är kritiska,
- observationsmetodens skall ha en tydlig roll i utförandeskedet och vara integrerad i produktionsprocessen.

I dagens situation har några formella frågor identifierats som ligger utanför syftet med denna studie men som ändå behöver omnämnas. En frågeställning rör kvantifiering av säkerhet eller säkerhetsnivån vid dimensioneringen av det bärande huvudsystemet. Vi utgår från att säkerhetsnivån och dess relation till konstruktionens stadga eller funktion fastläggs av byggherren och att detta kan

omformas till ett designkrav. Det är en viktig frågeställning eftersom det är gentemot säkerhetsnivån som analyser av mätdata relateras vid validering av att konstruktionens uppför sig som förväntat. En möjlig begränsning för effektiv användning av observationsmetoden är avsaknad av kontrakts- och betalningsformer som klarlägger principerna för hur anpassning av design i utförandeskedet kan regleras på ett rättvist och effektivt sätt. Vi förutsätter i denna rapport att dessa nämnda frågor inte utgör något långsiktigt hinder för implementering av observationsmetoden i Sverige.

1.2 Syfte och avgränsningar

Observationsmetodens användning i design av undermarksprojekt inbegriper att fatta beslut under osäkerhet och att successivt omsätta kunskap som erhålls från undersökningar och byggande med syfte att reducera osäkerheter i parametrar som styr konstruktionens design. Observationsmetoden är i princip ett sätt att formalisera den erfarna ingenjörens sätt att arbeta med komplexa designfrågor.

Utgångspunkten för föreliggande studie är att observationsmetoden i många designsituationer är lämpligare för dimensionering av konstruktioner i berg än de alternativa dimensioneringsmetoderna som föreskrivs i Eurokod. Det är därför angeläget att tolka observationsmetoden, som den anvisas i EN 1997-1:2004, kapitel 2.7, så att den uppmärksammas, utvecklas och kan tillämpas i undermarksprojekt med beaktande av krav och förutsättningar på den svenska marknaden.

Syftet med denna studie är att:

- beskriva designprocessen på basis av de krav som ställs för att använda observationsmetoden,
- ge exempel på robusta metoder för att tolka de mätningar och observationer som skall utföras inom ramen för observationsmetoden,
- demonstrera sätt att återkoppla resultaten av observationer till konstruktionens design.

När design inleds med begränsad information om platsspecifika förhållanden blir projekteringen en iterativ process och det synes rimligt att låta de grundläggande principerna i observationsmetoden vara styrande redan i inledningen av designprocessen. Det är därför nödvändigt att övergripande beskriva observationsmetodens designprocess. Vidare att redogöra för kopplingen mellan projekterings delmoment och observationer som skall utföras under uppförandet. Detta förklaras av att förutsättningarna för dimensionering också ligger till grund för val av vilka mätningar och observationer som skall utföras inom ramen för observationsmetoden.

Inom ramen för observationsmetodens användning behövs det praktiska och robusta metoder som kan användas för analys av mätdata. För demonstration av mätdatas tolkning och återkoppling till design används mätresultat från praktikfall. Dels för att kontrollera konstruktionens utförande och beteende, dels för validering av dimensionering av tunnelförstärkning.

Analysverktyg som utvecklas och presenteras i föreliggande rapport bygger på statistiska metoder. Studien tar inte ställning till vilken grad av komplexitet som krävs för att metoder som bakåt- eller framåtanalys bör eller behöver inbegripas i analysen. I dagsläget bedöms användningen av dessa vara för sofistikerade för att användas i den löpande analysen av mätdata. I litteraturen finns sådana metodiker beskrivna bland annat av Sakurai et al (2003).

En förutsättning i denna studie är att observationsmetoden redan från början (*"ab initio"*) är en integrerad del av projekteringen. Applikation av observationsmetoden i ett sent skede där en fix design redan föreligger (*"best-way-out"*) behandlas inte uttryckligen. Beräknings- och dimensioneringsverktyg behandlas inte i rapporten. Det är författarnas åsikt att de verktyg som kan tillämpas med stöd av dagens praxis också kan användas för design inom ramen för observationsmetoden.

Vad gäller grunderna för statistiska metoder finns det två grundläggande synsätt på hur sannolikhet skall tolkas, det frekventistiska och det subjektiva, som ofta kallas bayesianskt. Det bayesianska synsättet på statistiska metoder används som utgångspunkt i denna studie, eftersom den ligger närmare de frågeställningar som behandlas i rapporten. Därför förklaras de principiella skillnaderna mellan det frekventistiska och det subjektiva synsättet redan i inledningen av denna rapport.

1.3 Frekventistiskt och bayesianskt synsätt på statistik

Den frekventistiska (klassiska) sannolikheten definieras utgående från att man har ett stort antal försök och sannolikheten definieras som antalet "lyckade" försök dividerat med totala antalet försök (*"Long run probability"*). Sannolikheten är alltså helt kopplad till försöksdata från det aktuella försöket. Detta betyder att man behöver stora datamängder. Inom bayesiansk statistik definieras sannolikhet från en utsaga om den tilltro (*"degree of belief"*) som en person har att en händelse skall inträffa, när all relevant tillgänglig information tas med i övervägandet.

Observationer och data om design- och kontrollparametrar erhålls för undermarksprojekt normalt i form av fåtalsprovning. Det är därför önskvärt att all information och erfarenhet som bidrar till ökad kunskap om dessa parametrar kan hanteras i analys och design. En sådan utgångspunkt är tillåten med det bayesianska synsättet som grund. Det inslag av subjektivitet som finns i analys och design är något som kräver stringent redovisning av fakta, tolkningar och gjorda överväganden. Den grundläggande skillnaden mellan det klassiska synsättet på statistik och det bayesianska synsättet förklaras kortfattat nedan.

Det frekventistiska synsättet betraktar sannolikheten som ett fixt men okänt värde och ett grundläggande begrepp är hypotesprovning. För att undersöka om en hypotes är sann eller falsk förutsätts att erhållna data är stickprov från ett stort antal, i princip, repeterbara försök. Medelvärdet av dessa stickprov förutsätts vara en approximation av det verkliga (sanna) fixa parametervärdet. Datas spridning omkring det beräknade medelvärdet, till exempel uttryckt som standardavvikelse,

kan betraktas som ett mått på det sätt eller den regel som används för att inhämta stickprov. Den bakomliggande parametern, som representeras av stickproven, betraktas dock inte som en stokastisk variabel. Datas fördelning kan därför inte relateras till parametern utan endast till metoden eller regeln att anskaffa data. Eftersom hypotesen bara kan vara sann eller falsk går det inte heller att uttala sig om sannolikheten för att hypotesen är sann. Därför används ofta begreppet konfidensintervall i samband med hypotesprövningen. Om man anger ett 95%konfidensintervall för medelvärdet kan detta tolkas på följande sätt. Den statistiska metod som vi använt för att beräkna konfidensintervallet är sådan att om man använder den i ett stort antal fall, så kommer i 95 % av fallen det sanna medelvärdet att ligga inom det angivna konfidensintervallet.

I det bayesianska synsättet betraktas de parametrar som genererar data som stokastiska variabler (den datagenererande processen). Dessa statistiska parametrar betraktas också som stokastiska variabler med egna statistiska parametrar och beskriver osäkerheten i den datagenererande processen. Dessa stokastiska variabler kan användas för att beskriva tillgänglig information, till exempel i form av erfarenhet från liknande mätningar eller från litteraturen men också från beräkningar eller provdata.

Den bayesianska metodiken innehåller de verktyg som behövs för att på ett stringent sätt väga samman information från olika källor. Det innebär att uppdatering kan utföras av de stokastiska variabler som beskriver osäkerheten i den datagenererande processens parametrar. Här ingår begreppen *a priori*, innan man fått provdata, och *a posteriori*, efter det man uppdaterat med provdata.

Det bayesianska synsättet ligger nära de principerna som observationsmetoden grundas på. En förväntansmodell upprättas i design för till exempel bergmassans och förstärkningens respons på bergguttag. Denna förutsägelse bildar en *a priori* uppfattning. Under uppförandet av konstruktionen skall data från mätningar och observationer användas för validering och anpassning av design. Detta successiva tillvägagångssätt är i princip ett sätt att löpande reducera osäkerheten i de parametrar som beskriver den datagenererande processen. Genom att använda statistiska variabler för att beskriva dessa osäkerheter finns möjligheten till bayesiansk uppdatering. Med ökande datamängd och provdata kommer den bayesianska statistiken och den frekventistiska att generera samma resultat. Med det bayesianska synsättet kan tolkningen av resultatet baseras på parameterns sannolikhetsfördelning istället för parameterns konfidensintervall.

1.4 Observationsmetodens bakgrund

Terzaghi och Peck (1948) diskuterade inom ramen för jordmekanik grunderna för observationsmetoden. De relaterade till designproblem som exponerats i samband med byggandet och som berodde på att jordmaterialets verkliga egenskaper inte överensstämde med antaganden om jordens egenskaper utifrån förundersökningsresultat. Dessa författare konstaterar (1967) att design som baseras på de mest ofördelaktiga egenskaperna är oekonomisk och föreslår därför en annan designprincip för projekt där det under tiden för byggandet är möjligt att

anpassa designen. Information som saknas ska anskaffas under byggandet via observationer som sedan används för att anpassa designen.

Peck (1969) introducerade begreppet observationsmetoden. Han konkluderar att metoden innefattar följande beståndsdelar (fritt översatt).

- a. Förundersökning av området i tillräcklig omfattning, men inte nödvändigtvis i detalj, för att anskaffa en allmän överblick, kunskap om lagerföljder och om jordens egenskaper.
- b. Fastläggande av troliga förutsättningar samt även av de mest ofördelaktiga avvikelser som är tänkbara i relation till de troliga förutsättningarna. Här ingår ofta geologin som en betydande beståndsdel.
- c. Upprättandet av en design som utifrån en arbetshypotes om konstruktionens beteende baserats på de troliga förutsättningarna.
- d. Val av parametrar (storheter) som ska observeras under tiden för konstruktionens uppförande och beräkningar av deras förväntade beteende baserat på arbetshypotesen.
- e. Beräkningar av samma parametrars förväntade beteende för de mest ofördelaktiga förutsättningar i enlighet med föreliggande data beträffande förhållandena under mark.
- f. En åtgärdsplan eller en anpassning av design fastläggs i förväg för varje tänkbar signifikant avvikelse från förväntade observationer som baserats på arbetshypotesen.
- g. Mätningar av de parametrar (storheter) som ska observeras och bedömningar av aktuella förhållanden.
- h. Anpassning av design till aktuella förhållanden.

Vidare anger Peck i sin artikel att ovanstående beståndsdelar till sin omfattning inte alltid kan fullföljas i varje enskilt fall. Det beror främst på i vilket skede i projektet som observationsmetoden appliceras. Två olika typfall kan urskiljas. Det ena är när föreliggande problem redan är av sådan natur att metoden är det enda framkomliga sättet att klara av dessa svårigheter. Det andra fallet är då metoden från början är en integrerad del i projektets planering. Dessa typfall benämner Peck "*best-way-out*" respektive "*ab initio*". Teoretiskt sett kan alla varianter av dessa typfall förekomma.

Fram till dagens datum har ett antal författare rapporterat om applikationer där observationsmetoden använts och det har bidragit till att metoden gradvis blivit accepterad. En sammanställning finns bland annat i Ciria (1999).

1.5 Grundläggande begrepp

1.5.1 Eurokod och observationsmetoden

I den standard som rör geokonstruktioner, EN 1997-1:2004, kapitel 2.7 beskrivs, som en av flera accepterade designmetoder, möjligheten att basera en konstruktions design på observationsmetoden. Anvisningarna innehåller krav som ger viss ledning om på vilket sätt metoden ska appliceras. Där står, se citat nedan och den därpå följande svenska översättningen.

”(1) When prediction of geotechnical behaviour is difficult, it can be appropriate to apply the approach known as “the observational method”, in which the design is reviewed during construction.

(2)P¹ The following requirements shall be met before construction is started:

- acceptable limits of behaviour shall be established;*
- the range of possible behaviour shall be assessed and it shall be shown that there is an acceptable probability that the actual behaviour will be within the acceptable limits;*
- a plan of monitoring shall be devised, which will reveal whether the actual behaviour lies within the acceptable limits. The monitoring shall make this clear at a sufficiently early stage, and with sufficiently short intervals to allow contingency actions to be undertaken successfully;*
- the response time of the instruments and the procedures for analysing the results shall be sufficiently rapid in relation to the possible evolution of the system;*
- a plan of contingency actions shall be devised which may be adopted if the monitoring reveals behaviour outside acceptable limits.*

(3)P During construction, the monitoring shall be carried out as planned.

(4)P The results of the monitoring shall be assessed at appropriate stages and the planned contingency actions shall be put in operation if the limits of behaviour are exceeded.

(5)P Monitoring equipment shall either be replaced or extended if it fails to supply reliable data of appropriate type or in sufficient quantity.”

I EN 1997-1 anvisningar gällande observationsmetoden står följande (fritt översatt).

1. När det är svårt att förutsäga det geotekniska beteendet kan det vara lämpligt att tillämpa det tillvägagångssätt som benämns observationsmetoden, där designen granskas och revideras under konstruktionens uppförande.
2. Följande krav ska vara uppfyllda innan byggandet startar:
 - Gränser för acceptabelt beteende ska upprättas.
 - Intervall för möjligt beteende skall fastläggas och det ska visas att det finns en acceptabel sannolikhet för att det faktiska beteendet ska vara inom de fastställda gränserna för acceptabelt beteende.
 - En kontrollplan skall utarbetas som kan visa om det faktiska beteendet ligger inom gränserna för det acceptabla beteendet. Kontroller ska ske i god tid och med tillräckligt korta intervall för att möjliggöra att framgångsrika åtgärder kan vidtagas.
 - En åtgärdsplan skall utarbetas som kan användas om mätningarna visar på att konstruktionen inte uppför sig som förväntat.

¹ Förkortning (P) står för principer (“Principles”) se citat nedan ur Eurokod EN 1990:2002, 1.4 (2).

”The principles comprise: general statements and definitions for which there is no alternative, as well as; requirements and analytical models for which no alternative is permitted unless specifically stated.”

3. Under konstruktionens uppförande skall kontroller utföras som planerat.
4. Resultaten från kontrollplanen skall utvärderas vid lämpliga skeden och planerade åtgärder skall utföras om gränserna för beteendet överskridits.
5. Mätutrustning skall antingen bytas ut eller utökas om de inte tillhandhåller pålitliga data av rätt slag eller i tillräcklig omfattning.

År 2006 påbörjades den övergångsperiod som sträcker sig till och med 2009 för införandet av den standard i Eurokoderna som avser geokonstruktioner. På grund av att flera standarder refererar till varandra kan övergångsperioden komma att sträckas ut till 2010, Lindström (2006). I Sverige svarar en teknisk kommitté inom SIS för att implementera den svenska standarden inom geoteknikområdet. Eftersom SIS inte täcker hela behovet av implementering har IVA initierat arbete med att ta fram underlag till nationella annex och tillämpningsdokument under ledning av en kommission, IEG, Franzén (2006), se ieg.nu och www.sis.se.

Observationsmetoden har hittills kommit mer till användning inom traditionell geoteknik. Det gäller framförallt för design av komplicerade geokonstruktioner för grundläggning av hus och ovanjordsanläggningar, se till exempel Ikuta et al (1994). Ett internationellt nätverk för geoteknisk forskning och utveckling, Geotechnet www.geotechnet.org, arbetar också med utveckling av observationsmetoden som ett delområde i sitt program. I skrivande stund presenteras på deras hemsida ett antal studier av projekt där observationsmetoden använts.

1.5.2 Tolkning av intentionen i Eurokod avseende observationsmetoden

Man kan konstatera att texten i EN 1997-1:2004, kapitel 2.7 inte ger någon detaljerad vägledning om hur observationsmetoden ska tillämpas i praktiken. Det framgår inte heller hur man i detalj ska visa att den slutgiltigt anpassade designen uppfyller gällande regelverk med avseende på säkerhetsfaktorer eller säkerhetsindex. Anledningen till varför man i arbetet med Eurokod inte tydligare givit sådana anvisningar är inte känd men några anledningar kan vara att:

- tolkningen av normens intention ska vara öppen för att hålla metoden flexibel,
- anpassning ska kunna göras inom ramen för ett nationellt annex,
- betona att varje geoteknisk konstruktion har unika designförutsättningar,
- ge frihet att använda observationsmetoden tillsammans med andra anvisningar givna i Eurokoderna.

I byggnadslagstiftningen (SFS 1994:847) står det bland annat att byggnader och andra anläggningar skall uppfylla väsentliga tekniska egenskapskrav i fråga om bärförmåga, stadga och beständighet. Det betyder att observationsmetoden inte bara kan användas för dimensionering i designfrågor som rör bärförmåga utan även för frågor med avseende på konstruktionens funktion och beständighet. Det kan till exempel hänföras till viktiga funktioner för vilka beställare (ägaren) måste utföra periodiskt underhåll under konstruktionens tekniska livslängd. Exempelvis

sprutbetongens tjocklek i bra berg som inte dimensioneras för berglast utan för att optimera inspektionsintervall och underhållsskrotning eller för brandlast.

Det synes vara en brist i EN 1997-1:2004, kapitel 2.7 att observationsmetoden inte beskrivs med tillhörande råd och anvisningar. Det har säkert bidragit till att metoden kan uppfattas som komplex och medverkat till att den ännu inte kommit till allmän användning. En annan orsak är enligt Powderham (2002) att metoden på felaktiga grunder har förknippats med låga säkerhetsmarginaler samt potentiella tid- och kostnadsöverdrag på grund av kravet på villkorade åtgärder. Vi vill dock framhålla att observationsmetodens ställer nya krav på beställare, på den projekterande organisationen och på utföraren. Designprocessen blir normalt mer omfattande än för projektering och utförande på basis av en fix design, se också Powderham (1998). De grundläggande villkoren samt krav på uppföljning och planering medför att observationsmetoden varken får eller kan betraktas som en metod baserad på ”design as you go”.

2 Kopplingen mellan observationsmetoden och designprocessen

2.1 Inledning

I detta kapitel diskuteras en struktur på observationsmetodens designprocess som går ut på att indela projekteringen i delmoment. Den baseras på Europastandarden för geokonstruktioner EN 1997-1:2004, kapitel 2.7, observationsmetodens formuleringen enligt Peck (1969) samt en litteraturgenomgång. Den föreslagna designprocessens struktur, delmomentens omfattning och övergripande innehåll kan delvis relateras till Banverkets anvisningar BV Tunnel och i Vägverkets standard Tunnel 04. Det ska framhållas att Tunnel 04 refererar till BKR (Boverkets Konstruktionsregler), vilket tolkas som att dimensioneringen ska utföras med partialkoefficienter.

Normalt används klassificering som ett hjälpmedel för att hantera designfrågor som rör förstärknings-, injekterings- eller drivningsalternativ. Det är ett robust och ingenjörsmässigt sätt att beskriva de geotekniska förhållandena och klarlägga vilka problem som ska hanteras i designen. Klassificering som grund för design ger goda förutsättningar till ett flexibelt designförfarande. Det tydliggör inom vilka gränser dimensioneringen kan likformas samt möjliggör effektiv anpassning till projektets förutsättningar i utförandeskedet. Då erfarenhet av att använda klassificering inom ramen för observationsmetoden synes vara begränsad inbegriper diskussionen nedan hur klassificering kan användas i designprocessen.

Tillämpningen av observationsmetoden i utförandeskedet innehåller tre grundläggande moment. Det första är att via observationer fastställa bergförhållandena, bergklassen, vilken utgör grund för val av till exempel förstärkning. Vanligtvis kan man med viss precision i projekteringen förutsäga vilka bergklasser som förekommer i projektet men det är betydligt svårare att i förväg fastlägga inbördes läge och omfattning. Det andra momentet är att säkerställa att utförd åtgärd (förstärkning eller injektering) har acceptabel kvalitet. Det tredje momentet innefattar att genom observationer och analys konstatera huruvida det bärande huvudsystemet beteende uppfyller designkraven. Ett observationssystem kräver också ett fungerande system för att dokumentera och kommunicera observationer så att kompletterande åtgärder kan vidtas om så krävs. En viktigt moment i projekteringen är att fastlägga robusta parametrar som på ett relevant sätt exponerar signifikanta händelser när konstruktionens faktiska beteende och när kvaliteten på utförandet avviker från det förväntade. Val av dessa så kallade kontrollparametrar bör göras med omsorg eftersom generella lösningar inte beaktar att olika berganläggningarnas förutsättningar och funktion ofta skiljer sig från varandra.

Ett krav i EN 1997-1:2001, kapitel 2.7 är att planerade åtgärder skall föreligga som kan användas i utförandeskedet när konstruktionens beteende avviker från det förväntade. För konstruktioner i berg synes det rimligt att detta krav i de flesta fall

kan hanteras genom att växla till annan bergklass och förstärkningsklass inom ramen för befintlig design.

I vilken utsträckning anpassning av design kommer att ske varierar och beror både på hur väl designförutsättningarna fastlagts och på hur berguttag samt förstärknings- och injekteringsåtgärder utformats och utförts. I praktiken kan en anpassning av design under pågående utförande innebära att någon eller några designparametrar måste revideras på basis av gjorda mätningar och observationer. Den speciella typ av anpassning av mekaniska egenskaper eller mekanisk modell som baseras på gjorda observationer kan bedrivas under det allmänna begreppet bakåtanalys, se till exempel Finno och Cavello (2005). Dessa metodiker är komplicerade och i dagens läge inte tillräckligt användarvänliga för att användas som det ingenjörsvärktyg vi söker inom ramen för denna utredning.

Observationsmetoden bör också omfatta att förbereda åtgärder för det fall där förutsättningarna är bättre än förväntade. Detta utgör potentialen för kostnadsbesparingar och är något som bör tydliggöras för att realisera en ekonomisk design för projektet som helhet. Nya samarbetsformer bör innefatta incitament som omfattar projektets alla parter och där effektivisering och innovationer belönas, både på kort och på lång sikt.

2.2. Designprocessens övergripande struktur och innehåll

Flera författare har på ett systematiserat sätt beskrivit designprocessen och dess innehåll. Stille och Palmström (2003) framför att designprocessen ur geoteknisk synvinkel bör orienteras mot ett mer platsanpassat synsätt vad gäller metoder att karaktärisera och klassificera bergmassan än vad som blir fallet när generella empiriska system används. Martin et al (2003) diskuterar design av berganläggningar med utgångspunkt från att indela bergmassan i plastiskt och sprött beteende. Schubert (2004) redogör för en tolkning av de specifika anvisningarna i Österrike (2001) som avser design av undermarksanläggningar. Det utgör produkten av flera års arbete där flera författare bidragit med att systematisera och utveckla en designmetodik för undermarksanläggningar, se bland annat Schubert et al (2003), Pötsch et al (2004) och Goricki et al (2004). Resultatet är ett samlat synsätt på hur design bör genomföras med fokus dels på den aktuella bergvolymens egenskaper, dels på projektets platsspecifika förutsättningar. Metodiken omfattar både designfasen och utförandefasen och är en variant på hur observationsmetoden kan användas i praktiken. Beroende på projektens geologiska förutsättningar har mätningar och prognoser av deformationsförloppet presenterats som den viktigaste kontrollparametern för konstruktionens beteende under byggandet.

Observationsmetodens designprocess skall ha en struktur som underlättar ett iterativt arbetssätt, som inkluderar att hantera en löpande kvalitetskontroll och ger möjlighet till ett aktivt arbete med riskreducerande åtgärder. Det är därför lämpligt att dela in designprocessen i delmoment. Indelningen tydliggörs ytterligare genom principen att varje delmoment skall sammanfattas i ett dokument som utgör grund för nästa moment i designprocessen. Indelning av designprocessen blir på detta

sätt specifik för observationsmetoden men bygger i princip på känd och accepterad struktur.

I tabell 2-1 visas ett förslag på indelning av designprocessens olika delmoment och hur innehållet i framställda designhandlingar relaterar dels till krav ställda i Eurokod, dels förutsättningar beskrivna av Peck. I tabellen visas också vilka avsnitt i BV Tunnel som är tillämpliga för respektive delmoment. Delmoment ett till och med fem med tillhörande dokument skall framställas innan byggande påbörjas. Dokument gällande delmoment sex framställs under tiden för byggandet och utgör underlag till den slutgiltiga designen.

I tabell 2-2 anges delmomentens koppling till designparametrar samt vilka övergripande resurser som kan behövas tas i anspråk för att framställa tillhörande dokument. Tabellens innehåll är generellt och alla projekt innefattar inte osäkra förutsättningar av den dignitet som anges där. Den totala osäkerheten i designen skall bestämmas utgående från varje projekts förutsättningar och baseras på fakta, resultat från beräkningar och ingenjörsmässiga överväganden som vägs samman genom lämpliga metoder och modeller.

Figur 2-1 visar schematiskt designprocessens flöde, dess grundstruktur och innehåll. Vidare också hur delmomenten med tillhörande dokument utgör grund för nästa delmoment samt att återkoppling från utförandeskedet kan förekomma till flera delmoment i designprocessen.

Figur 2-2 visar gränssnittet mellan designprocessen och utförandeskedet. Gränssnittet består av klassindelningen för geologi, hydrogeologi och åtgärder. Klassificeringen bildar underlag både för dimensionering av det bärande huvudsystemet och för observation av kontrollparametrar. Kontrollparametrar används i utförandet för att bedöma hur faktiska bergförhållanden och insatta åtgärder överensstämmer med den arbetshypotes om konstruktionens beteende som designen grundats på. Dessutom visas schematiskt hur det geotekniska beteendet och det bärande huvudsystemets beteende beaktas i designprocessen via löpande observationer och återkoppling mot klassificering som används i utförandeskedet, det vill säga mot förekommande bergklasser och åtgärdsklasser.

Tabell 2-1. Designprocessens indelning samt hur innehållet i dokument som framställas i respektive delmoment relaterar till krav enligt Eurokod (EN 1997-1:2004, kapitel 2.7) och enligt Peck (1969). Det visas också vilka avsnitt i BV Tunnel som är tillämpliga inom ramen för delmomentets innehåll. Förklaringar till avsnitt i BV tunnel, se nedan.

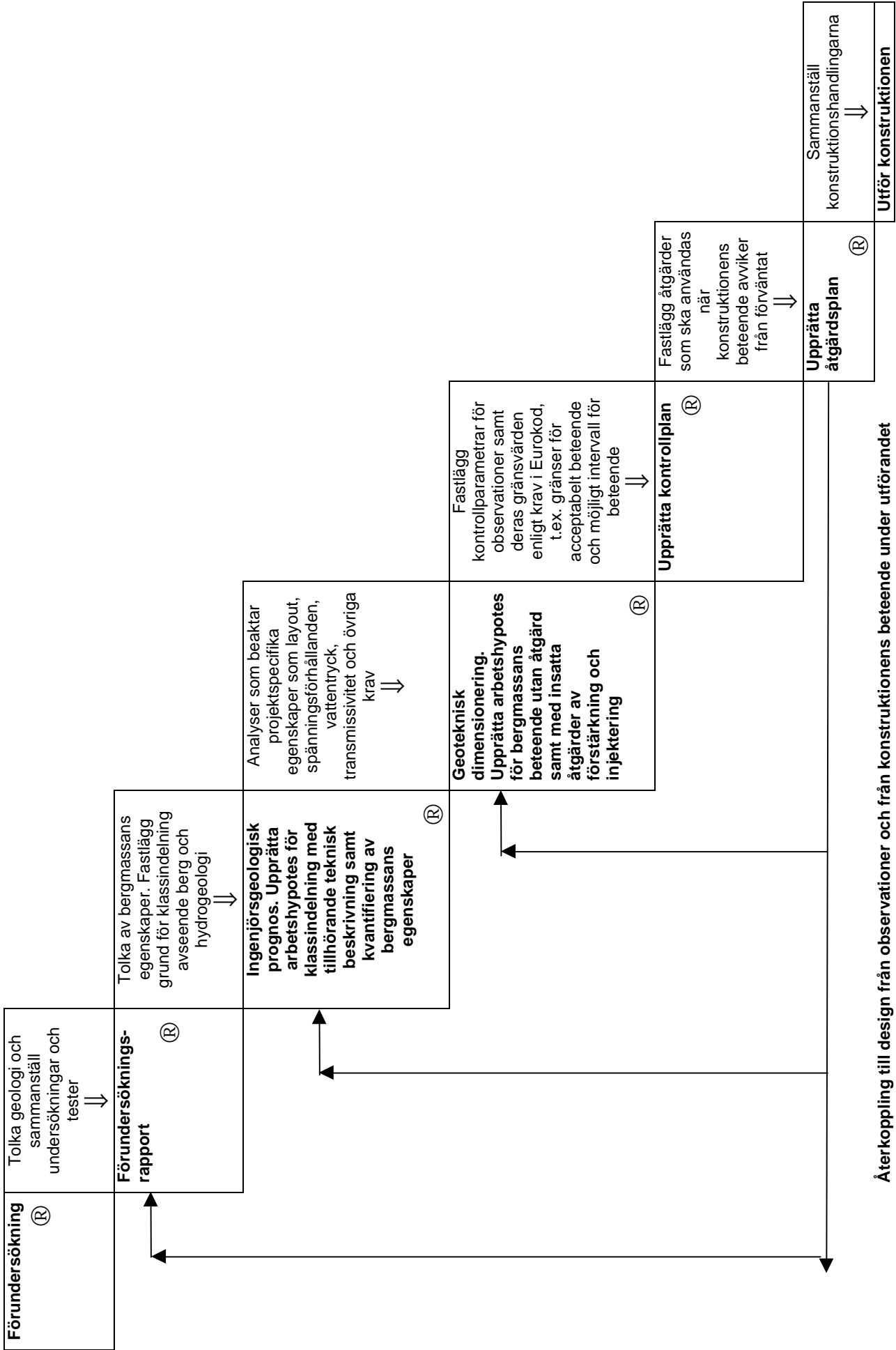
Designprocessens delmoment	Anvisningar i EN 1997-1:2004 samt nyckelord enligt, EN 1997-1:2004, kapitel 2.7	Nyckelord i krav enligt Peck	Kapitel i BV Tunnel
1. Förundersökningsrapport. Beskriver bergartsenheter och dess egenskaper, tektonik och grundvattensituation i den undersökta bergvolymen	Anvisningar i EN 1997-1:2004, kapitel 3.4.1 och 3.4.2.	Förundersökning av området i tillräcklig omfattning	Delar av 4.8.3/4, 4.8.7, 4.8.11, 8
2. Ingenjörsgelogisk prognos. Innehåller klassificering och karakterisering av bergmassan. Klassificering genom indelning av bergmassan i unika bergklasser. Dessa baseras på bedömningar av de geologiska parametrar som kontrollerar bergmassans respons på berguttag. Karakterisering genom beskrivning och kvantifiering av bergmassans mekaniska egenskaper, spänningsförhållanden och hydrogeologiska parametrar som behövs för dimensionering av berguttag, förstärkning och injektering.	Anvisningar i EN 1997-1:2004, kapitel 3.4.3. Svårighet att fastlägga det geotekniska beteendet. Tolkas här som svårigheten att i förväg, bestämma läget för olika bergklasser, fastlägga bergets egenskaper och uppförande eller att fastlägga att insatta åtgärder innehåller förväntad kvalitet och verkningsätt.	Fastläggande av troliga förutsättningar samt även de mest ofördelaktiga förutsättningarna relativt de troliga förutsättningarna	Delar av 4.8.4/5/6, 4.8.11, 5.1, 5.2, 4.8.9, 8
3. Geoteknisk dimensioneringsrapport. Design av berguttag, förstärkning, och injektering. Beskrivning av bergmassans beteende utan förstärkning och i samverkan med förstärkning samt av förstärkningens beteende. Beskrivning av olika konstruktions-, förstärknings- och injekteringslösningar relaterade till alla projektspecifika förutsättningar som layout, spänningsförhållanden och andra överordnade krav. Underlag för fastläggande av kontrollparametrar och tullgränser baserat på kritiska designförutsättningar.	Anvisningar i EN 1997-1:2004, kapitel 2.8. Gränser för acceptabelt beteende samt intervall för möjligt beteende. Tillsammans med underliggande klassning av berg och hydrogeologi utgör detta underlag för att visa på acceptabel sannolikhet att gränserna för acceptabelt beteende innehålls	Upprättandet av en design utifrån en arbetshypotes om konstruktionens beteende som baseras på de troliga förutsättningarna. Val av parametrar som ska observeras och beräkningar av deras förväntade beteende baserat både på de troliga förutsättningarna och de mest ofördelaktiga relativt de troliga förutsättningarna	Delar av 4.8.4/5/6, 4.8.8/9, 4.8.11, 5.1, 5.2, 8
4. Kontrollprogram. Fastläggande av kontrollparametrar som ska observeras och deras gränser för acceptabelt beteende. Samordnas med entreprenörens kvalitetssystem.	Plan för kontroll och uppföljning skall upprättas.	Mätningar av de parametrar som ska observeras.	Delar av 4.8.10/11, 4.11.6.2, 5.2, 8
5. Åtgärdsplan. Fastlägger relationen mellan kontrollparametrars gränser för acceptabelt beteende och eventuella åtgärder. Samordnad med entreprenörens arbetsbeskrivningar och riskanalyser.	Beskrivna åtgärder som ska användas om konstruktionen inte betar sig som förväntat.	En åtgärdsplan eller anpassning av design fastläggs i förväg för varje tänkbar signifikant avvikelse från arbetshypotesen	Delar av 4.8.10, 4.8.11, 5.2, 8
6. Återkoppling till och anpassning av design. Baseras på gjorda observationer och konstruktionens beteende under utförandet. Även koppling till tullgränser och konstruktionens slutgiltiga design.	Design skall utvärderas när det är lämpligt och revideras under byggandet.	Bedömningar av gjorda förhållanden och anpassning av design till aktuella förhållanden	4.8.8, 5.2.2 verifiering

Förklaring till ovan refererade kapitel i BV Tunnel. De är översiktliga och gör inte anspråk på att vara på heltäckande. Det finns andra kapitel i BV Tunnel vars innehåll också behandlar detaljfrågor som rymms inom ramen för observationsmetoden.

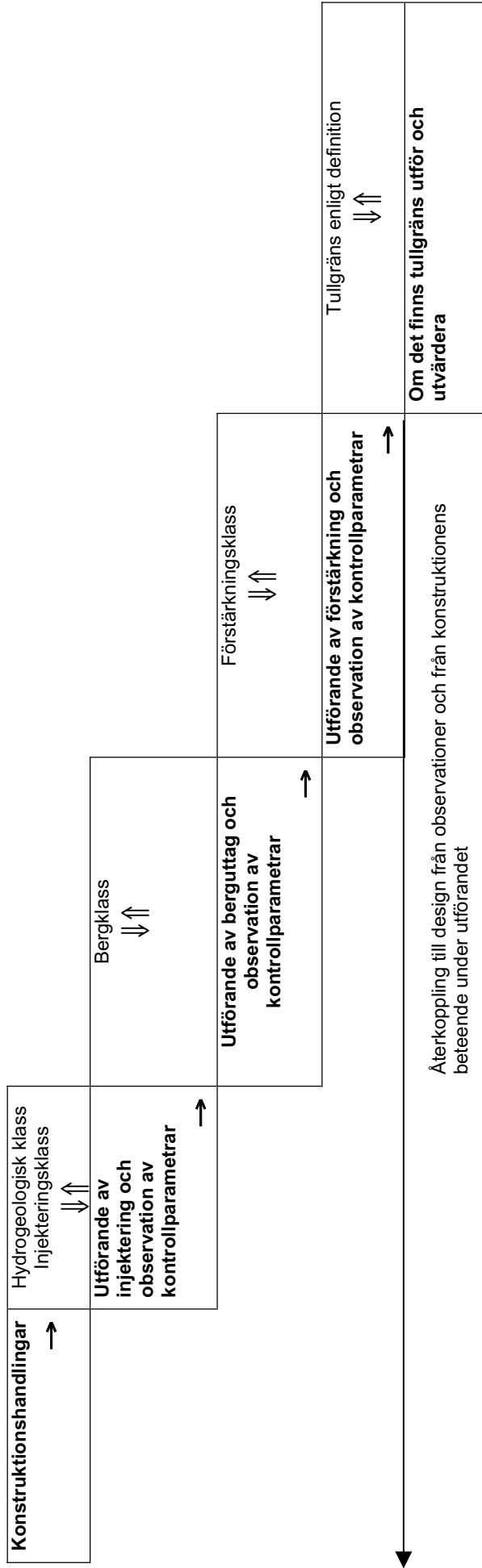
Kapitel	Rubrik
4.8.3	Förundersökningsrapport
4.8.4	Ingenjörsgelogisk rapport
4.8.5	Dimensioneringsunderlag
4.8.6	Dimensioneringsberäkningar
4.8.8	Detaljritningar med tillhörande handlingar
4.8.9	Detaljutredningar
4.8.10	Kontrollplan för tilläggskontroll
4.8.11	Bedömning och hantering av risker
4.11	Dokumentation
5	Bärförmåga, stadga och beständighet
5.1	Allmänt
5.2	Bergtunnel
5.2.2	Verifiering
8	Bedömning och hantering av risker

Tabell 2-2. Innehållet i handlingar som framställs i designprocessens olika delmoment.

Delmoment	Innehåll	Designparametrar	Resurser
1. Förundersökningsrapport	Ingenjörsgelogisk rapport som beskriver bergartsenheter och deras egenskaper, tektonik och grundvattensituation i den undersökta bergvolymen	Geologiska och hydrogeologiska sammanställningar baserade på faktiska data från tester i laboratorium och i fält. Beskriver det intakta bergets och diskontinuiteters mekaniska egenskaper. Litologisk indelning av bergvolymen.	ISRM metoder, kärnbörning, geofysik, hällkartering, spänningsmätningar, erfarenheter från liknande eller närliggande berganläggningar
2. Ingenjörsgelogisk prognos	Indelning av bergmassan i unika bergklasser. Dessa baseras på bedömningar av de geologiska parametrar som kontrollerar bergmassans respons på berguttag. Karakterisering genom beskrivning och kvantifiering av bergmassans mekaniska egenskaper, spänningsförhållanden och hydrogeologiska parametrar som behövs för dimensionering av berguttag, förstärkning och injektering.	Tolkning och beskrivning av bergmassan, dess mekaniska egenskaper och spänningsförhållanden. Bergklasser innefattar beskrivning av geologi och möjliga brottformer. Hydrogeologiska klasser innefattar parametrar som injekteringsdesign ska baseras på. Definition av kritiska designförutsättningar, klassificeringsregler och geotekniska osäkerheter.	Empiriska klassificeringssystem, GSI, ingenjörsmässiga bedömningar och erfarenhet från liknande anläggningar
3. Geoteknisk dimensioneringsrapport	Design av berguttag, förstärkning, injektering och konstruktionsdetaljer. Beskrivning av bergmassans beteende utan förstärkning och i samverkan med förstärkning samt av förstärkningens beteende. Beskrivning av olika konstruktions-, förstärknings- och injekteringslösningar relaterade till alla projektspecifika förutsättningar som layout, spänningsförhållanden och andra överordnade krav. Fastläggande av underlag för kontrollparametrar och tullgränser baserat på kritiska designförutsättningar.	Fastläggande av kontrollparametrars acceptabla gränser, intervall för möjligt beteende samt eventuellt gränser som beaktar projektspecifika krav. Visa på acceptabel sannolikhet att fastlagda gränser innehålls. Fastlägga förstärknings- och injekteringsklasser som baserats på bergklasser och hydrogeologiska klasser. Sammanfattning av kritiska designförutsättningar samt sammanställning av osäkerheter med avseende på geologi och projektspecifika krav.	Bedömning av bergmassans och förstärkningens beteende kan baseras på analytiska och numeriska beräkningar. Likväl bedömningar av injekterings effektivitet. Jämförelse med empiriska metoder som Q, RMR, ingenjörsmässiga bedömningar och erfarenhet från liknande anläggningar
4. Kontrollprogram	Fastläggande av kontrollparametrar som ska observeras och deras gränser för acceptabelt beteende. Samordnas med entreprenörens kvalitetssystem.	Beskrivning av kontrollparametrar som skall mätas och observeras och dess relation till aktuell problemställning. Specifikation av instrumentering, mätregler, aktuella gränsvärden och visualisering.	Rutiner, personal och system för att utföra och hantera mätdata och visualisera resultat från observationer
5. Åtgärdsplan	Fastlägger relationen mellan kontrollparametrars gränser för acceptabelt beteende och eventuella åtgärder. Samordnas med entreprenörens arbetsbeskrivningar och riskanalyser.	Beskrivning av relation mellan aktuell problemställning och åtgärder som ska vidtas om konstruktionens beteende avviker från förväntat, till exempel byte av förstärkningsklass.	Kompetent personal med mandat att fatta beslut. Visualisering av observerade kontrollparametrar samt god kommunikation är förutsättningar för möjligheten att utföra åtgärder med gott resultat.
6. Återkoppling	Anpassning av design baseras på observationer av konstruktionens beteende under utförandet. Även koppling till tullgränser och konstruktionens slutgiltiga design.	Ömfattar varierande grad av anpassning både inom och utom ramen för åtgärdsplanen. Kan vara justering av kontrollparametrar och gränsvärden, anpassningar av regler för berg- och åtgärdsklasser eller uppdatering av designparametrar.	Mätresultat, karteringar, numeriska och analytiska beräkningar, beräkningar baserade på statistiska data eller som är sannolikhetsbaserade



Figur 2-1. Figuren visar designprocessens schematiska flöde, grundstruktur, designhandlingarnas innehåll samt förekommande återkopplingar från utförandeskedet.



Figur 2-2. Gränssnittet mellan utförandeskedet och designprocessen består av gjord klassindelning för geologi, hydrogeologi och åtgärder. Klassificeringen bildar underlag både för dimensionering av det bärande huvudsystemet och för observation av kontrollparametrar. Återkoppling till design inriktas mot de grunder (regler) som klassindelningen baseras på.

- ⇕ Representerar val av klass baserat på regler för klassificering fastlagda i design.
- ↑ Representerar återkoppling till design och regler för klassificering.

2.3 Designprocessens styrning och spårbarhet

Tabell 2-1 och tabell 2-2 visar att den diskuterade indelningen av designprocessen i delmoment och att innehållet i de dokument som skall framställas kan ligga till grund för att uppfylla de krav som ställs på observationsmetoden i EN 1997-1:2004, kapitel 2.7. I tabell 2-3 visas en sammanfattande översikt av designprocessens delmoment och i vilka delmoment som observationsmetodens krav behandlas.

En av de grundläggande målsättningarna med att använda observationsmetoden är att upprätta en design som är ekonomisk i förhållande till de plastspecifika förutsättningarna. För att inte initial design, som är en arbetshypotes, skall inbegripa alltför konservativa konstruktioner och tekniska lösningar skall bygghandlingar baseras på troliga förutsättningar. Det är viktigt att påpeka att detta förfaringsätt kräver en stringent hantering av designsäkerheter därför att det är ett förfarande som i sig kan vara grund för felaktig design. Därför är det ett krav i observationsmetoden att planerade åtgärder skall föreligga som kan användas i utförandeskedet när konstruktionens beteende avviker från det förväntade

Osäkerheter kan vara grund för felaktig design och det är viktigt att osäkerheter successivt identifieras och beskrivs i designprocessens respektive delmoment. Det ger goda förutsättningar för kvalitetskontroll då osäkerheter identifieras efterhand och kan integreras i den fortsatta designprocessen. Kvalitetsarbetet kan förstärkas genom att låta erfaren projektör eller en eller flera oberoende experter granska resultatet av varje delmoment. De osäkerheterna som identifierats i projekteringskedet är grund för fastställande av kontrollplan, åtgärdsplan och tullgränser. Det är med hjälp av dessa konstruktionshandlingar som osäkerheterna hanteras och reduceras under byggskedet. Vilket i sin tur kan leda till återkoppling och anpassning av design.

Rapportering av designprocessens delmoment skall utföras så att data, analyser och underlag för metoder till arbetenas utförande är spårbara. Rapporteringen ska beredas på så sätt att det i sig inte är ett hinder för anpassning av design om förhållandena så kräver. Detta inbegriper också att upprätta ett system för att dokumentera och kommunicera signifikanta händelser om konstruktionens beteende. Detta skall möjliggöra att åtgärder kan vidtas på rätt sätt samt också att relevant information kommer till användning i återkopplingen till design, se också flödet i figur 2-1.

Tabell 2-3. Koppling mellan krav i EN 1997-1:2004, kapitel 2-7 och designprocessens delmoment.

EN 1997-1	Förutsägelse av geotekniskt beteende	Gränser för acceptabelt beteende	Intervall för möjligt beteende	Acceptabel sannolikhet för faktiskt beteende ska vara inom fastställda gränser för acceptabelt beteende	Kontroller ska utföras som planerat	Utvärdera resultat från kontrollplan och utför planerade åtgärder om gränserna för acceptabelt beteende överskridits	Bevakning av mätutrustnings tillhandahållande av data av rätt slag eller tillräcklig omfattning
Konstruktionshandling							
1. Förundersökningsrapport	X						
2. Ingenjörsgelogisk prognos	X	X	X				
3. Geoteknisk dimensioneringsrapport		X	X	X			
4 Kontrollplan					X	X	X
5. Villkorade åtgärder						X	
6. Återkoppling till och anpassning av design						X	X

2.4 Sammanfattning

Genomgången av dagens designprocess inom bergbyggnad samt diskussion om dess innehåll och struktur visar att design med observationsmetoden;

- liknar den arbetsmetodik som används idag för att upprätta design,
- innebär att observationer bör inriktas på att fastlägga rätt bergklass, att insatt åtgärd är korrekt utförd samt att kontrollera konstruktionen beteende mot fastlagda gränsvärden,
- ställer utökade krav på tydlighet och spårbarhet gentemot normal praxis,
- ställer nya krav på utformning av kontraktsdokument.

Observationsmetodens styrka är den formella möjligheten att upprätta design på basis av att kombinera krav på säkerhet med ekonomisk dimensionering. Den skall användas för komplexa designfrågor där andra designmetoder inte är lika ändamålsenliga. Det övergripande målet med observationsmetoden är således att påvisa att den slutgiltiga konstruktionen uppfyller ställda krav på beteende visavi såväl brottgräns- som bruksgränstillstånd. Begreppet, ”gräns för acceptabelt beteende”, anser vi vara kopplat till konstruktionens säkerhet och funktion och skall därför tolkas och relateras till de gränstillstånd som skall uppfyllas.

Begreppet, ”acceptabel sannolikhet för att det faktiska beteendet ligger inom gränserna för det acceptabla beteendet”, anser vi vara kopplat till den ekonomiska risknivån som projektet kan acceptera. Det vill säga risken för att behöva tillgripa åtgärder, genomföra designändringar eller ändra arbetsmetoder under pågående uppförande av konstruktionen. Begreppet skall därför tolkas och relateras till de kontrakts- och betalningsformer som tillämpas. Användningen av observationsmetoden jämfört med annan designmetod kan beskrivas med figur 2-3.



Figur 2-3. Principiell jämförelse mellan att använda observationsmetoden och annan designmetod. Anpassning av design är formellt möjlig med observationsmetoden. Inriktning på kontroller som görs för andra designmetoder har fokus på verifikation av antagna designförutsättningar.

För dimensionering med annan designmetod än observationsmetoden rekommenderas att aktiv anpassning av design inte inbegrips i designprocessen. Fokus på mätningar och observationer är för dessa fall att verifiera antagna designförutsättningar. För det fall att konstruktionen beteende avviker från det förväntade eller att oförutsedda händelser inträffar som kräver en anpassning av design eller konstruktionsmetod bör man formellt övergå till att använda observationsmetoden.

Denna studie har inriktning på att använda statistiska metoder dels för kontroll och analys av observationer, dels för återkoppling till designkrav. Det medför att proceduren för att validera att den slutliga konstruktionen uppfyller ställda krav på säkerhetsnivå är sannolikhetsbaserad och ställer krav på att utföraren har viss kunskap inom matematisk statistik.

3 Berganläggningars geotekniska beteende

3.1 Inledning

Observationer och analyser av följande övergripande frågeställningar kan behöva utföras för att validera designen med avseende på stadga och beständighet. Det gäller dels att med acceptabel noggrannhet bedöma bergmassans mekaniska egenskaper och beteende, dels att klarlägga osäkerheter kring förstärkningens verkningssätt. I tabell 3-1 visas med utgångspunkt från de krav som ställs i EN 1997-1:2004 kapitel 2.7, en översikt av designprocessens innehåll innan byggande påbörjas. Tabell 3-1 relaterar till innehållet i tabellerna 2-1 och 2-2.

Tabell 3-1. Översikt av designprocessen med utgångspunkt från EN 1997-1:2004, kapitel 2.7.

Delmoment	Innehåll	Kritisk designförutsättning	Uppfyller krav enligt EN 1997-1:2004, kapitel 2.7
1. Förundersökningsrapport	Sammanställning av faktiska data från förundersökningarna	Fastlägga relevanta geologiska sakförhållanden. Bergvolymen indelad i litologiska enheter	Inga krav med direkt koppling till observationsmetoden. Anvisningar på innehåll redovisas i kapitel 3.4
2. Ingenjörsgelogisk prognos.	Upprätta arbetshypoteser för klassindelning. Tolka bergmassans egenskaper.	Fastställa grunder för klassindelning som beskriver kritiska problemställningar. Val av designparametrar och bedöma spänningsförhållandena.	Svårigheten med att förutsäga det geotekniska beteendet kan klarläggas. Bergmassans möjliga beteende utan förstärkning med avseende på geologi och typer av brott beaktas med hjälp av klassindelning.
3. Geoteknisk dimensioneringsrapport.	Bedömningar av bergmassans beteende utan och med åtgärder. Dimensionering av det bärande huvudsystemet i form av arbetshypotes för dess funktion och beteende	Val av kontrollparametrar. Beräkningar av kontrollparametrarnas förväntade beteende baserat både på troliga förutsättningar och på mest ofördelaktiga relativt de troliga förutsättningarna.	Gränser för acceptabelt beteende och intervall för möjligt beteende kan upprättas med avseende på det bärande huvudsystemets funktion eller beteende. Beräkningar och beskrivningar används för att visa på en acceptabel sannolikhet att det faktiska beteendet ligger inom de fastställda gränserna för acceptabelt beteende.
4. Kontrollprogram	Övervakning av kritiska designförutsättningar med praktiska observationer.	Kvantifiering och beskrivning kontrollparametrarnas gränser med avseende på åtgärdsplanen. Vidare beskrivning av visualisering och dokumentation av utförda observationer.	Plan för kontroll och uppföljning skall upprättas.

Vilka av ovan nämnda frågeställningar som har relevans i det enskilda fallet beror av projektets natur. Till exempel, för ett bergrumsprojekt undersöks vanligtvis bergmassan i en omfattning som gör det möjligt att i förväg med acceptabel noggrannhet bestämma bergmassans kvalitet. Osäkerheterna kring det bärande

huvudsystemets beteende kvarstår och mätningar av deformationer utförs normalt för att kunna säkerställa att stabila förhållanden föreligger. Vad gäller tunnelprojekt föreligger normalt inte information i en omfattning som medger att man i projekteringen med acceptabel noggrannhet och i förväg skall kunna bestämma bergkvalitén invid tunnelfronten. I utförandet hanteras denna frågeställning via geologiska observationer eller geologisk kartering och på basis av detta bestäms insatsen av till exempel förstärkning. Observationer utförs av det bärande huvudsystemet för att fastlägga att stabila förhållanden föreligger. I många fall behövs även provningar av förstärkningens kvalité och utförande, dels för att säkerställa avsett verkningssätt, dels för att klargöra huruvida designförutsättningarna uppfylls. Oavsett typ av konstruktion ska observationssystemet också beakta att belastningen på det bärande huvudsystemet kan öka med tiden och i samband med fortsatt berggutttag. Detta beror på konstruktionens utformning, metod för berggutttag och geologi.

3.2 Förundersökningsrapport

Förståelsen för geologin och dess inflytande är viktig för att upprätta en säker och ekonomisk design. En förutsättning är att tydligt skilja föreliggande fakta från tolkningar och bedömningar som baserats på dessa fakta. Vi förordar att förundersökningsrapporten i huvudsak skall vara en framställning av faktiska data som inhämtats och faktiska resultat av förundersökningarna och laboratorieprovningar.

Även om det ligger utanför syftet med rapporten att diskutera innehållet i förundersökningsrapporten rekommenderar vi att en redovisning inkluderas där bergvolymen indelas i litologiska enheter. Motivet för detta är att bergartsgränser ofta kan utgöra en naturlig lokalisering av kross- eller svaghetszoner eller att bergarterna inbördes med stor sannolikhet uppvisar andra egenskaper för någon platspecifik förutsättning som spänningsförhållandet eller mekaniska egenskaper.

3.3 Ingenjörsgelogisk prognos

Ett motiv som Terzaghi och Peck angav för att använda observationsmetoden var möjligheten att på ett kontrollerat och säkert sätt dimensionera konstruktionen utan att initialt använda alltför konservativa designförutsättningar. Det är en form av optimering och det är viktigt att beakta vilka speciella risker detta förfarande kan innebära. Peck (1973) pekar på risken att projektören inte identifierar de mest ofördelaktiga förutsättningarna relativt föreliggande designparametrar. Det är något som kan medverka till att signifikanta händelserna inte noteras och att den förberedda åtgärdsplanen inte håller tillräcklig kvalitet. Peck pekar också på att potentialen för progressivt brott ska beaktas och detta kan utgöra en betydande del av rådande osäkerheter.

Ett praktiskt sätt att hantera geologiska osäkerheter är att utifrån kända förutsättningar indela bergvolymen i olika klasser, bergklasser eller geohydrologiska klasser beroende på syfte. Varje bergklass eller hydrogeologisk klass skall representera ett beteende eller karaktär som entydigt utesluter sammanblandning med någon annan klass. Klasserna utgör tillsammans en

heltäckande beskrivning avseende de bergmekaniska och hydrogeologiska frågeställningar som skall beaktas i projekteringen.

För att klasserna ska vara heltäckande krävs att klassificeringsmetodiken behandlar geotekniska osäkerheter som avser oförutsedda geologiska förhållanden. Det kan till exempel gälla förekomst av svaghetszoner, låg eller ingen bergtäckning, oacceptabla konsekvenser av vattenläckage, etc. Principerna för klassindelning behandlas utförligt av Stille och Palmström (2003). Grundläggande begrepp är indikatorer som väljs med hänsyn till det problem som ska hanteras och regler som beskriver hur indikatorerna kombineras och gränssätts för att bilda unika klasser. Den praktiska tillämpningen av indikatorer och regler är när bergklassen bestäms i samband med att den geologiska karteringen upprättas. Denna är således en del i det totala observationssystemet och avser att bestämma läget för olika bergkvaliteter, eller att bestämma bergets egenskaper.

I linje med observationsmetodens grundläggande principer är utformning av bergklassificeringssystemet en iterativ process och klassindelningen skall också betraktas som arbetshypotes. Varje klass skall baseras på bergmassans troliga egenskaper och beteende. Gränsdragning mellan bergklasser kan göras genom att låta de mest ofördelaktiga egenskaperna relativt de troliga egenskaperna vara de bästa egenskaperna i angränsande ”sämre” bergklass. För samtliga bergklasser skall indikatorer fastläggas som med en eller flera observerbara parameter definierar bergklassens beteende eller karaktär. Reglerna för respektive bergklass definierar och fastlägger gränssnittet mot andra bergklasser och pekar därmed på de typer av problemställningar som ska beaktas i dimensioneringen av det bärande huvudsystemet.

Bergklassens kan till exempel definieras med hjälp av, bergklassens indikatorer, geologisk beskrivning med fotografi eller skiss, designparametrars egenskaper, allmän beskrivning av kriterier för stabilitetsproblem och andra problemställningar som designen ska hantera. Ett exempel på beskrivning av en bergklass visas i tabell 3-2. Bergklassbeskrivningen utgör arbetshypotesen för bergmassans geotekniska beteende. För att utföra beräkningar av bergmassans beteende i samband med berguttag behöver bergmassan ytterligare karakteriseras genom att skatta bergmassans mekaniska egenskaper. De grundläggande mekaniska egenskaperna bör normalt finnas i förundersökningsrapporten. Typiska sådana är medelvärden och standardavvikelse som erhållits från provning av ingående bergarters elasticitetsmodul och hållfasthet samt eventuellt mätningar av initiala spänningsförhållanden. Vidare bör också diskontinuiteternas egenskaper beskrivas.

Det är viktigt att man i detta sammanhang utvärderar syfte och tillvägagångssätt i den undersökning som ligger till grund för att bestämma bergmassans egenskaper. Detta bör göras för att grundlägga uppfattningen om osäkerheten i karakteriseringen och dess inverkan på den problemställning som dimensioneringen ska hantera. Det är viktigt att erfarenheter från andra projekt och ingenjörsmässiga bedömningar noggrant beaktas. Hur ovanstående rekommendationer ska omsättas i praktiken ligger utanför syftet med denna rapport men vi vill påpeka vikten av att detta görs.

Tabell 3-2. Exempel på hur beskrivningen av en bergklass kan framställas.

Bergklass	B3				
Bergartsbeskrivning	Gnejs, medelkornig tydligt bandad. Gångar av amfibolit förekommer med bredder både större och mindre än 300 mm.				
Brottformer	Stabila förhållanden, instabila bergkilar kan förekomma beroende på sprickriktning. Med minskad bergtäckning väntas ökad frekvens av horisontella sprickor ge ökad potential för förekomst av lösa block i tak. Förekomst av vatten måste bedömas baserat på sondering. Ökad förekomst av horisontella sprickor bör beaktas i injekteringsdesign.				
Vatten	Förekomst av vatten skall baseras på sondering. Ökad förekomst av horisontella sprickor bör beaktas i injekteringsdesign.				
Designparametrar berg	Enhet	Intakt berg (min-max)	Kommentar	Bergmassa Min-max/trolig värde	Kommentar
Densitet	kN/m ³	26		- / 26	-
Enaxiell tryckhållfasthet	MPa	150-225	Medel: 180	20-25 / 25	Hoek & Brown
Elasticitetsmodul	GPa	50-75	Medel: 65	20-35 / 30	Hoek & Brown
Kohesion	MPa	-	Inga data	2-4 / 3	Hoek & Brown
Friktionsvinkel	°	-	Inga data	50-55 / 55	Hoek & Brown
Poissons tal		-	Inga data	- /0.25	Erfarenhet
Dilatationsvinkel	°	-	Inga data	-	Inga data
Designparametrar sprickor		(min-max)	Kommentar		
RQD	%	50-90	Troligt värde 75 från borrhävar		
Antal spricksystem	st.	3	Strykning/Stupning Foliation: Ej distinkt, ondulerad, subhorisontell Nr. 1:45°/subvertikal, variation ± 10° Nr. 2:135°/subvertikal, variation ± 10° Nr. 3: 80°/subhorisontell, variation ± 10°		
Sprickavstånd	m	0.3-0.6			
Spricklängd	m	-	Inga data, spricksystem antas vara ihålliga > 15 m		
Sprickytor			Slåta, plana, täta sprickor		
Sprickfyllnad			Inga omvandlingsprodukter, rostfärgade sprickytor förekommer		
Spänningsförhållanden	m	20-60 m	Antas att vertikalspänning lika med överlast och bergtäckning		
Designparametrar hydrogeologi		(min-max)	Kommentar		
Transmissivitet	m ² /s	-			
Konduktivitet	m/s	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁹	Troligt värde: 5x10 ⁻⁸ baserad på Lugeon-test		
Porositet		-	Inga data		
Hydrogeologisk klass		H1, H2	H1 är troligt		
Vattentryck	m	15-50	Avser grundvattenytans nivå i berg		
Osäkerheter	Vid vilken bergtäckning ökad sprickfrekvens av horisontella sprickor förekommer Vittringsgraden i amfibolitgångar Konduktivitet från endast två borrhål, högre konduktivitet förväntad lokalt				
Empiriska system	GSI:	60-70	RMR:	70-80	Q: 10-40
Foto eller skiss	Representativ bild eller skiss				

Förståelsen för bergmassans egenskaper, typ av brottformer samt eventuella stabilitetsproblem som kan förekomma är viktig för att upprätta en säker och ekonomisk design. I litteraturen har denna problemställning behandlats av flera författare. GSI (Geological Strength Index) beskriven av Hoek et al (1995) för hårt berg och Hoek et al (1998) för svagt berg är en praktisk metod för att bedöma

bergmassans egenskaper som funnit bred acceptans. Metoden finns tillgänglig på www.rocsience.com. Det finns också andra beprövade metoder för detta förfarande beskrivna i litteraturen, till exempel RMR, Q-metoden och RMI. En mer detaljerad genomgång av befintliga system kan återfinnas i Banverkets projekteringsanvisningar, Lundman (2006). Exempel på en grundläggande beskrivning av stabilitetsproblem har sammanställts av Stille och Palmström (2006). Brottformerna har indelats baserat på de drivande krafterna gravitation, spänningsinducerade eller de som kan relateras till vatten. Författarna refererar också till arbeten och beskrivningar av bergmassans brottformer av Schubert och Goricki (2004), Martin et al (1999) och Hoek et al (1995).

3.4 Geoteknisk dimensioneringsrapport

Den geotekniska dimensioneringsrapporten behandlar i huvudsak design av det bärande huvudsystemet som är att utforma tekniska lösningar för berguttag, förstärkning och injektering. Bedömningar av bergmassans mekaniska egenskaper och av aktuella laster samt övriga projektspecifika förutsättningar och krav utgör grund för detta delmoment i designprocessen. Det ligger utanför syftet här att beskriva förfarandet för att upprätta de tekniska lösningarna, men det är författarnas åsikt att de beräknings- och dimensioneringsverktyg som kan tillämpas med stöd av dagens praxis också kan användas för design inom ramen för observationsmetoden. Detta innefattar att använda numeriska och analytiska beräkningar, ingenjörsmässiga bedömningar samt empiriska system. Svensk praxis har sammanställts av Lundman (2006).

Analyser och ingenjörsmässiga bedömningar sammanfattas och beskrivs med hjälp av åtgärdsklasser som kan vara förstärkningsklasser eller injekteringsklasser. Tidigare definierade bergklasser och hydrogeologiska klasser utgör tillsammans med de platsspecifika förutsättningarna grunden till de olika åtgärdsklasserna. Eftersom dessa klasser kan förekomma på flera ställen i berganläggningen men med varierande projektspecifika förutsättningarna kan olika åtgärdsklasser förekomma för samma bergklass. Typiska projektspecifika förutsättningar som kan variera med läget i bergvolymen är spänningsförhållanden, vattentryck, tunnelns eller bergrummets geometri. Andra typer av projektspecifika krav är begränsningar i vibrationer och buller som också kan styra val av åtgärdsklass.

Designrapporter, tekniska specifikationer och ritningar bör indelas på något logiskt sätt, till exempel kan respektive byggdel vara överordnad och underlagen utgöras av bergklasser och åtgärdsklasser för förstärkning och injektering. Ritningarna skall på ett adekvat sätt beskriva indikatorer och regler för klassindelning. Dessa ska vara möjliga att snabbt, enkelt och rationellt fastställa i en produktionssituation.

Åtgärdsklasserna utgör tillsammans arbetshypotesen för en heltäckande beskrivning av det bärande huvudsystemet avseende de funktionella problemställningar som beaktats i design. För att fastlägga det bärande huvudsystemets beteende inom respektive åtgärdsklass krävs att de kontrollparametrar som skall observeras är kvantifierade. Detta skall ske genom beräkningar och med ingenjörsmässiga bedömningar av det bärande

huvudsystemets beteende, både med avseende på troligt utfall och på mest ofördelaktiga utfall i relation till det troliga utfallet. Då kan gränser för acceptabelt beteende fastläggas tillsammans med intervall för det bärande huvudsystemets möjliga beteende. Tillsammans med underliggande klassning av berg och hydrogeologi och föreliggande osäkerheter skall detta utgöra ett tillräckligt underlag för att föra en diskussion huruvida det föreligger en acceptabel sannolikhet för att det bärande huvudsystemets faktiska beteende ska ligga inom gränserna för det acceptabla beteendet.

Att fastlägga kontrollparametrar som skall observeras och att kvantifiera gränser för det bärande huvudsystemets acceptabla beteende är inte helt okomplicerat. Många designparametrar som ingår i beräkningar och i ingenjörsmässiga bedömningar låter sig inte enkelt mätas eller observeras. Ett praktiskt observationssystem kan således inte grundas på de grundläggande storheterna nämnda i kapitel 3.4, gravitation, bergspänningar eller svällkrafter. Observationssystemet måste baseras på andra parametrar som relaterar till fysikaliska förutsättningar som direkt påverkar eller har konsekvens för det bärande huvudsystemets beteende och som praktiskt kan mätas eller observeras i tillräcklig omfattning för den statistiska analysen.

Kontrollparametrar kan antingen vara relaterade till bergmassan, till utförandet eller till det bärande huvudsystemets (samverkanskonstruktionens) beteende. För sprött beteende är kontrollparametrar som styr bergmassans beteende och funktion till exempel, spänningssituation och blockstorlek i form av sprickfrekvens och sprickorientering. För plastiska beteenden är deformation den naturliga kontrollparametern. Parametrar, med vilka det går att mäta kvaliteten på utförd åtgärd som förstärkning och berggutttag, kan användas som kontrollparametrar gentemot designen eftersom minskad eller ökad omfattning påverkar det bärande huvudsystemets beteende. Typiska sådana kontrollparametrar kan vara sprutbetongens tjocklek och vidhäftning. Till stöd för utvärdering av kontrollparametrar skall geologisk kartering utföras. Andra kompletterande observationer är notering av skador på berg eller förstärkning eller att sammanställa förstärkningsmängder samt avstånd till tunnelfront vid installation.

3.5 Kontrollprogram

Kontrollplanen skall vara en praktisk syntes av tidigare delmoment i designprocessen och baseras på identifikation av designosäkerheter och kvalitetskritiska arbeten i utförandet. Kontrollplanen utgör underlag för bedömning om konstruktionen uppför sig som förväntat eller om åtgärder som förberetts innan byggandet startar behöver sättas in. I kontrollplanen beskrivs vilka kontrollparametrar som ska användas, deras respektive gränsvärden och vilka mätregler som gäller. Gränsvärden kan utgöras antingen av fastlagda gränser för acceptabelt beteende inom respektive åtgärdsklass eller av något annat relevant gränsvärde.

För att tolka mätdata behövs tekniska verktyg som kan strukturera och hantera mätdata men också verktyg för visualisering av mätdata. Vidare behövs ett fungerande system för att dokumentera och kommunicera de signifikanta

händelserna på ett sätt som möjliggör att framgångsrika åtgärder kan vidtas. Dels när konstruktionens beteende avviker från förväntat, dels när utförandet i sig utgör en oacceptabel risk för att inte rätt kvalitet ska uppnås. Synpunkter på utformning av observationssystem och fastställande av larmgränser finns i Olsson och Stille (2002).

Insamlingen av mätdata avseende fastlagda kontrollparametrar utförs när produktionsprocessen pågår och i detta hänseende närbesläktat med övervakning av industriella processer. För det senare finns robusta metoder utvecklade som bland annat bygger på att approximera mätdata med statistiska fördelningsfunktioner. Genom att utveckla motsvarande applikationer för byggandet i berg ges förutsättningar dels för visualisering och tolkning av mätdata, dels för snabb respons vid avvikelser. Statistisk bearbetning av mätdata ger också möjlighet till löpande avstämning mot de krav som ställs i EN 1997-1:2004, kapitel 2.7. De krav som avses är att visa att det faktiska beteendet ligger inom gränserna för det acceptabla beteendet. Vidare krav som ställs på att kontroller sker i tillräckligt god tid och med tillräckligt korta intervall för att möjliggöra att framgångsrika åtgärder kan vidtagas. Vidare erhålls också underlag för att kontrollera gjord utsaga om att det finns en acceptabel sannolikhet för att det faktiska beteendet ligger inom fastställda gränser för acceptabelt beteende.

3.6 Designprocessens sakfrågor enligt BV Tunnel och VV Tunnel 04

De problemställningar som ska hanteras i designprocessen är i princip likvärdiga för design med observationsmetoden och för design enligt Banverkets anvisningar och Vägverket standard, BV Tunnel (2005) respektive Tunnel 04. Delar av observationsmetodens grundläggande tankar innefattas i dessa både dokument. Det är därför intressant att studera hur sakfrågor i observationsmetodens designprocess hanteras i dessa dokument jämfört med här framförda förslag. Vägverkets standard, Tunnel 04, föreskriver dimensionering med partialkoefficientmetoden medan BV Tunnel inte har denna begränsning i val av dimensioneringsmetod. Vad gäller designprocessens struktur och sakfrågor för den detaljeringsnivå som behandlas här kan dock innehållet i Tunnel 04 och BV Tunnel jämföras.

Delresultat från tabell 2-1 samt från kapitel 3.2 till och med 3.5 gällande diskussion om observationsmetodens struktur och innehåll redovisas i tabell 3-3 tillsammans med inkopierad text från anvisningar i BV Tunnel. Texten från BV Tunnel har hämtats från de kapitel som anges i tabell 2-1.

Krav som ställs i BV Tunnel på designprocessen sammanfaller med vissa grundläggande principer inom observationsmetoden. Det gäller främst designprocessens innehåll fram till och med design av det bärande huvudsystemet. Även andra sakfrågor sammanfaller med förslag i denna studie. Med detta avses att designfrågor som rör konstruktionens funktion och beständighet skall hanteras inom ramen för observationsmetoden om de utgör grund för svårigheter att bestämma det geotekniska beteendet.

Innehållet i kontrollplan, villkorade åtgärder och anpassning av design ges i BV Tunnel inte samma uttalade syfte som i observationsmetoden. Det beror på att BV Tunnel inte ställer krav på att fastlägga kontrollparametrar eller kvantifiera dessa i termer av konstruktionens förväntade beteende. I BV Tunnel saknas också krav med avseende på att fastlägga de mest ofördelaktiga avvikelserna relativt de troliga förhållandena samt att förbereda åtgärder som kan sättas in om konstruktionens beteende avviker från de förväntade. Vidare saknas krav på att tydligt beskriva vilka förutsättningar som kan leda till en modifiering av upprättad prognos avseende bergkvalitet och hur detta ska tillämpas med avseende på anpassning av design.

Tabell 3-3. Designprocessens sakfrågor, enligt förslag till observationsmetodens struktur och innehåll och enligt anvisningar i BV Tunnel.

Designprocessens delmoment	Relevant formulering enligt Peck (1969)	Rekommendation om konstruktionshandlingens grundläggande innehåll inom ramen för observationsmetoden	Omfattning enligt BV Tunnel
Förundersökningsrapport	Förundersökning i tillräcklig omfattning. Anskaffning av allmän överblick, kunskap om lagerföljder och om jordens egenskaper	Sammanställning av data från förundersökningar och geologiska saktörförhållanden. Indelning av bergvolym i litologiska enheter. Redovisning av faktiska resultat från laboratorieprovningar av intakt bergs och diskontinuiteters mekaniska egenskaper.	Förundersökningsrapporten ska ge all nödvändig information angående de geologiska, hydrogeologiska och bergmekaniska förhållandena som framkommit vid förundersökningen.
Ingenjörsgelogisk prognos	Bestäm troliga designförutsättningar samt även mest ofördelaktiga avvikelser som är tänkbara i relation till de troliga förutsättningarna	Tolkning och beskrivning av bergmassans dess mekaniska egenskaper och spänningförhållanden. Klassificering används för indelning av bergmassan i unika bergklasser. Dessa baseras på bedömningar av geologiska parametrar eller brottformer som kontrollerar bergmassans respons på berguttag. Fastläggande av en eller flera indikatorer som fysikaliskt beskriver bergklassens beteende eller karaktär. Fastläggande av bergmassans troliga och samt mest ofördelaktiga designparametrar i relation till de troliga.	Ingenjörsgelogisk prognos ska upprättas och grundas på resultat från förundersökning. I den ingenjörsgelogiska prognosen ska framgå vad som är tolkad respektive faktisk information. Osäkerheterna i den ingenjörsgelogiska prognosen ska värderas och graderas. Graden av osäkerhet i såväl delresultat som i den totala bedömningen ska anges. Karakteristiska materialvärden för bergmassa ska normalt bestämmas som medelvärden. För bergmassa gäller att inverkan av bergarter och deras mekaniska egenskaper, spricksystem, sprick- och krosszoner, vittring samt vattenförekomst ska beaktas. Prognos ska upprättas över bergmassans egenskaper, och ska utgå från förutsättningarna för bergmekaniska utredningar och bergmekanisk dimensionering. Rapporten (dimensioneringsunderlaget) ska vara tydligt uppräddad och försecd med uppgifter om dimensioneringsstrategier och metoder, samt vilka antaganden och tolkningar som gjorts så att den lätt kan kontrolleras. Det ska klart framgå vad som är tolkad respektive faktisk information.
Geoteknisk dimensioneringsrapport	Design är en arbetshypotes om konstruktions beteende baserad på troliga designförutsättningar. Val av parametrar som ska observeras och beräkningar av dessa parametrars beteende för de mest ofördelaktiga förutsättningarna i föreliggande data	Dimensionering av berguttag, det bärande huvudsystemet samt uppräddande av förstärkningsklasser. Kontrollparametrar som skall observeras fastläggs och deras gränser för acceptabelt beteende kvantifieras genom beräkningar. Det bärande huvudsystemets beteende bedöms för varje åtgärdsklass med avseende på troligt utfall och mest ofördelaktiga utfall.	Beräkningar ska upprättas för verifiering av bärförmåga för bärande huvudsystem, inklädnad, inredning och installationer. Bergmassa skal, tillsammans med bergförstärkning, betraktas som bärande huvudsystem och dimensioneras som en sammanhållen enhet. Beräkning ska omfattas av lastkombinationer och belastningssteg som är dimensionerande för konstruktionens olika delar och skeden under utförande och i drift. Vid utförande av bergmekanisk beräkning ska inverkan av bergart och dess mekaniska egenskaper, spricksystem, sprick- och krosszoner, vittring samt vattenförekomst bedömas var för sig och tillsammans. På ritningarna ska tunneln indelas i avsnitt med likartade förstärknings- och tätningförhållanden med tydligt definierade förstärknings- och tätningstyggar. Dimensionering ska ske med hänsyn till krav på livslängd och behov av underhåll.
Kontrollplan	Mätningar av de parametrar som ska observeras och bedömningar av aktuella förhållanden	Fastläggande av kontrollparametrar och deras gränser för acceptabelt beteende. Beskrivning av kontrollparametrar och deras relation till aktuellt problem, specifikation av instrumentering, mätregler och visualisering.	Kontroll av bergmassa ska omfattas av överensstämmelse mellan verkliga berg- och grundvattenförhållanden och de förutsättningar på vilka projekteringen baserats. Vid krav på bergmekanisk mätning av stabilitet och belastningar på förstärkningskonstruktion ska kontrollen styras med mätprogram. Verifiering av bergtumels bärförmåga ska i tillämplig omfattning innefatta bergkarteringsning med kontroll av att verkligt utfall stämmer med antagna förutsättningar och utfört arbete dokumenteras. Kontroll av bergkonstruktion i GK2 ska omfattas av objektsanpassad kontroll av konstruktionens bärförmåga, funktion och beständighet samt omgivningspåverkan. Kompletterande kontroll av bergkonstruktion i GK 3 ska utföras av en från projektet fristående expert i omfattning enligt teknisk beskrivning.
Åtgärdsplan	En åtgärdsplan eller en anpassning av design fastläggs i förväg för varje tänkbar signifikant avvikelse från förväntade observationer som bygger på arbetshypotesen.	I förväg färdigställd åtgärdsplan som fastlägger relationen mellan kontrollparametrars gränsvärden och vilka eventuella åtgärder som skall användas om konstruktionens beteende avviker från förväntat.	- (Saknas)
Återkoppling	Anpassning av design till aktuell förhållanden	Anpassning av design baserad på observationer och konstruktionens beteende. Varierande grad av justering av kontrollparametrar och gränsvärden, anpassningar som berör existerande berg- eller åtgärdsklasser eller upp-datering av designparametrar.	Om resultatet av bergkarteringen efter utsprängning visar att angivna förhållanden väsentligt ändrats, ska detaljritningen revideras. Om förutsättningar väsentligen ändrats kan konstruktionerna behöva ändras varvid även beräkningar revideras.

3.7 Sammanfattning av designprocessen

Observationsmetoden kan enligt Eurokod EN 1997-1:2004, kapitel 2.7, användas när det är svårt att fastlägga det geotekniska beteendet. I denna studie har detta begrepp definierats med avseende på byggandet i berg och anses vara synonymt med osäkerheten att med acceptabel noggrannhet;

- lägesbestämma förekommande bergkvalitéer,
- bedöma om utförda åtgärder innehåller förväntad kvalitet,
- bedöma det bärande huvudsystemets beteende, det vill säga åtgärdernas förväntade verkningsätt och deras samverkan med berget.

Lägesbestämning av förekommande bergkvalitéer utförs vid tunnelfronten för varje tunnelprojekt. Det ligger i sakens natur att det är svårt, om det överhuvudtaget är möjligt, att i förväg bestämma i vilken tunnelsektion en viss bergkvalité förekommer. Förutsättningen för användandet av observationsmetoden är i detta avseende uppfyllda för nästa alla underjordiska bergprojekt.

Svårighet att bedöma beteendet hos det bärande huvudsystemet är framför allt kopplat till stora bergrum eller dåliga bergförhållanden. Stora bergrum är ofta unika vilket innebär att vi saknar erfarenheter om deras geotekniska beteende. Svårigheterna accentueras om bergförhållanden är dåliga och med ökande osäkerheter blir det svårare att förutsäga tunnelstabiliteten i dåligt berg. Flera exempel finns där observationsmetodens grundkoncept (aktiv design) varit en avgörande faktor för framgång vid dessa förhållanden, se till exempel Stille och Nord (1983), Stille och Fredriksson (1988) och Stille och Sturk (1995).

Anledningen till att kvaliteten på utförda åtgärder inbegrips i begreppet geotekniskt beteende är följande. I designförutsättningarna förutsätts att en viss kvalitet uppnås vid utförandet av bergguttar, förstärkning och injektering för att uppfylla krav som ställs på det bärande huvudsystemet. Tekniken att utföra dessa åtgärder är kopplad till metod samt berg- och arbetsförhållanden. När kvaliteten avviker från specifikationen, given i form av mekaniska egenskaper och mängder, har det konsekvenser för det bärande huvudsystemets beteende och är därmed en faktor att beakta när osäkerheterna omkring det geotekniska beteendet ska bedömas. Detta resulterar ofta i att behov föreligger att kontrollera resultatet av utförda åtgärder och är också något som utförs regelmässigt i alla underjordsprojekt.

Vilka eller vilken av ovan nämnda faktorer som i det enskilda fallet bidrar till svårigheterna att fastlägga det geotekniska beteendet är avhängigt av projektets natur. I projekteringen används osäkerheterna i det geotekniska beteendet som grund för att formulera designkrav med avseende på stadga och beständighet i form av gräns för acceptabelt beteende och intervall för möjligt beteende. Ett viktigt moment i projekteringen är således att fastlägga robusta kontrollparametrar som avspeglar rådande designosäkerheter och på ett relevant sätt exponerar signifikanta händelser som påverkar det geotekniska beteendet. I praktiken måste dessa kontrollparametrar vara kvantifierbara för att kunna kontrolleras mot designkraven. De kan antingen vara relaterade till bergmassan, till utförda åtgärder eller till det bärande huvudsystemets (samverkanskonstruktionens)

beteende. Val av kontrollparametrar bör göras med omsorg och beakta att berganläggningarnas förutsättningar och funktion uppvisar låg grad av repeterbarhet emellan projekt. Designkraven skall sedan kontrolleras i utförandeskedet med hjälp av ett observationssystem. I detta ingår att utföra observationer, dokumentera och analysera mätdata samt att kommunicera signifikanta händelser så att vid behov kompletterande åtgärder kan utföras.

Observationsmetodens designprocess bör grundas på användning av klassificeringsmetodik som omfattar att fastlägga bergmassans kvalitet och vilka åtgärder som skall utföras. Det bidrar till ett flexibelt designförfarande och är ett strukturerat sätt att klargöra rådande osäkerheter och beakta projektets förutsättningar. Klassindelning med avseende på de geologiska förutsättningarna har här givits benämningen bergklass eller hydrogeologisk klass beroende på vilka syfte som avses. För dessa klasser skall bergets egenskaper eller beteende beskrivas på ett ändamålsenligt sätt innan förstärknings- eller injekteringsåtgärder genomförs. Beskrivning av åtgärder som skall utföras samt deras omfattning har samlats under begreppet åtgärdsklass, vilket indelas i förstärkningsklass eller injekteringsklass beroende på syfte. Sammantaget kan konstateras att klassificering kan bidra till;

- bättre överblick av de problemställningar som har identifierats i projektet,
- bättre kommunikation mellan parter i projektet som använder klassificeringssystemet,
- snabbare beslutsprocess i utförandeskedet då klassificeringssystemet skall inbegripa de frågeställningar som avses,
- att underlätta prissättning för konstruktionens uppförande.

Det är inom de delmoment av designprocessen som hänför sig till utförandeskedet som störst behov av utveckling har identifierats för att observationsmetoden ska kunna implementeras i svenskt bergbyggande. Vad gäller beräknings- och dimensioneringsverktyg är behovet inte lika påkallat. Författarnas åsikt är att de som tillämpas med stöd av dagens praxis också kan användas för design inom ramen för observationsmetoden.

I praktiken handlar det om att utveckla praktiska och robusta metoder dels för att övervaka och visualisera mätningar och observationer, dels för att analysera mätdata. Målet är att observationssystemet i form av analyserade resultat skall ge beslutsunderlag för successiv validering eller anpassning av design. Ur användarsynpunkt måste därför metoder utvecklas som är tillräckligt robusta för att kunna tillämpas i produktionsförhållanden.

I nästa kapitel presenteras metoder för visualisering som bygger på accepterad metodik från övervakning av industriella processer. En anpassning har gjorts med avseende på design och uppförande av konstruktioner i berg. I därefter följande kapitel presenteras statistiska beräkningsmodeller som utvecklats för att analysera och fastlägga att konstruktionen uppfyller uppställda designkrav gällande både utförande och stabilitet.

4. Statistiska verktyg för att reducera osäkerheter i design under utförandeskedet

4.1 Inledning

Dimensionering av konstruktioner i jord och berg innefattar att en mängd osäkerheter skall hanteras. I princip kan den totala osäkerheten indelas i två olika typer, se till exempel Ang & Tang (2007). Den ena typen avser den slumpmässiga spridningen hos parametrar som styr konstruktionens beteende. Här avses främst naturlig spridning på materials mekaniska egenskaper, men även noggrannheten i utförda aktiviteter som berguttag, förstärkningsarbeten samt mätningar. Denna typ av osäkerhet kan inte minskas genom utökade mätningar, endast kvantifieras. Den andra typen av osäkerhet kan härledas till bristande kunskap. Där ingår de förenklade mekaniska (matematiska) modeller som beskriver konstruktionens beteende, men också otillräcklig kunskap om aktuell geologi, bland annat i form av dålig precision gällande egenskaper och geometrier. Denna typ av osäkerhet kan reduceras genom att man anskaffar mer information, till exempel genom mätningar.

En genomlysning av problemställningarna inom design av geotekniska konstruktioner med inriktning på sannolikhet, statistik och riskanalys ges av Christian (2004). Där konstateras att geotekniska designproblem i huvudsak härrör från brist på kunskap. Bristen på kunskap bidrar i första hand till osäkerheter och svårigheter att i förväg fastlägga det geotekniska beteendet. Brister i kunskapen om designförutsättningar visade sig i utförandeskedet och var en av orsakerna till varför observationsmetoden formulerades. Grundläggande i observationsmetoden är att osäkerheter skall reduceras genom ett aktivt val av kontrollparametrar och att de skall kvantifieras i design och observeras under byggandet av anläggningen. Dessa observationer av konstruktionens beteende omfattar i princip alla för dimensioneringen viktiga parametrar, säkra och osäkra såväl som kvantifierade och ej kvantifierade. För konstruktioner i berg kan observationerna både vara inriktade på att kontrollera konstruktionens beteende såväl som att säkerställa att de åtgärder som utförs uppfyller ställda designkrav.

De analysmetoder som presenteras här avser att utgöra stöd för att reducera osäkerheter som härrör från brist på kunskap samt analysera eventuellt behov av anpassning av design. Metodiken bygger på att systematiskt applicera statistisk på resultat från mätningar som görs under utförandet. Utgångspunkten är att betrakta kontrollparametrarna som stokastiska variabler. Resultat från mätningar kan i många fall betraktas som information från fåtalsprovning. Det är därför mycket viktigt att ett aktivt arbete bedrivs för att säkerställa kvaliteten i de analyser som avser att reducera osäkerheterna i designen.

Det är rimligt att anta att många av de kontrollparameter som används i observationssystem för att kontrollera konstruktionens uppförande är normalfördelade. Det kan förklaras av den centrala gränsvärdessatsen. Där visas att en summa av oberoende stokastiska variabler med godtycklig fördelning oftast är ungefär normalfördelad, åtminstone i den centrala delen, bara antalet

komponenter i summan är tillräckligt stort och ingen komponent dominerar. De fysiska processer som avspeglas i kontrollparametern och i mätdata består ofta av summan av flera delprocesser som i sig innehåller stokastiska element och stokastiska variabler. Till exempel är uppmätta deformationer summan av en komplex samverkan mellan bergets mekaniska egenskaper, tunnelfrontens avancemang och förstärkningens styvhet som i sin tur beror av mängd, verkningsätt och hållfasthetens tillväxt. Andra typer av fördelningar kan användas men uppdateringar kräver normalt användning av Monte Carlo simulering eller andra numeriska metoder.

I EN 1990 rekommenderas användandet av lognormalfördelning för att beskriva materials bärförmåga. Motiveringen är att lognormalfördelningen ej kan anta negativa värden. Skillnaden mellan normal- och lognormalfördelning är mycket marginell, speciellt för en variationskoefficient mindre än cirka 30 %. Vad gäller deformationer kan de vara såväl positiva som negativa, det vill säga tunnelväggen kan röra sig i princip såväl utåt som inåt. Andra kontrollparametrar såsom sprutbetongens tjocklek kan ej vara negativ. Vi är dock intresserade av frågor hur medelvärdet förhåller sig till acceptabla gränsvärden vilket innebär att felet att beskriva en kontrollparameter med normalfördelning är acceptabelt litet. Vi har därför valt att i denna rapport utgå från normalfördelade variabler. Den bayesianska statistiken kan också relativt enkelt tillämpas för lognormalfördelade variabler.

4.2 Beskrivning av mätdata med bayesiansk statistisk

För att säkerställa ett riktigt användande av bayesiansk statistik behöver vissa grundläggande principer klargöras och uppfyllas. En översikt av dessa principer ges bland annat av O'Hagan och Luce (2003). Dessa sammanfattas nedan med fokus på syftet i denna studie.

I begreppet "degree of belief" eller dess praktiska applikation Bayesiansk statistik, erbjuds en formell möjlighet att vidga sannolikhetsbegreppet så att det kan innefatta aktuell kunskap om konstruktionens beteende som ej är frekventistisk. Det betyder att ny kunskap om kontrollparametern kan införlivas med tidigare känd information. Detta förutsätter för kontrollparametern att;

- den är relevant för designfrågan, kvantifierbar och observerbar,
- att brottgränsuttrycket tecknas eller att gräns för acceptabelt beteende fastläggs,
- kontrollparameterns fördelning bestäms, till exempel med normalfördelning eller lognormalfördelning, eller med annan typ av simulering.

Dessa förutsättningar är i analogi med krav som ställs för att genomföra design med observationsmetoden. För analys av resultat från mätningar av till exempel deformationer kan den praktiska användningen av bayesiansk statistik omsättas till att successivt uppdatera slutdeformationens medelvärde samt dess standardavvikelse vartefter som ny information tillkommer från mätningar av deformationerna.

Principerna för den bayesianska analysen är som följer:

- Modellera kontrollparametern (den datagenererande processen) som en stokastisk variabel med tillhörande statistiska parametrar. Låt dessa statistiska parametrar vara stokastiska variabler med egna statistiska parametrar. Dessa senare variabler representerar osäkerheten i den datagenererande processen. Detta möjliggör att kvantifiera sannolikheten för en önskad händelse relaterad till kontrollparametrarna. Till exempel skatta sannolikheten för den önskade händelsen som innebär att överskrida gränsen för acceptabelt beteende eller något annat relevant gränsvillkor.
- Använd känd, relevant information för att göra en utsaga om dessa senare statistiska parametrar som utgörs av kontrollparameterns medelvärde och medelvärdets spridning. Detta ger den så kallade *apriori-fördelningen* för de stokastiska variabler som beskriver kontrollparameterns statistiska parametrar och innehåller aktuell kunskap om kontrollparametern innan nya data erhålls.
- När nya provdata tillkommer kan dessa kombineras med *apriori-fördelningen* för att bilda ny och säkrare utsaga om de problem som studeras. Uppdatering utförs med hjälp av Bayes teorem och så kallad *likelihood*. Denna beräknas ur mätdata och den så kallade *likelihoodfunktionen*. *Likelihoodfunktionen* baseras på kontrollparameterns statistiska fördelning och även ur den statistiska principen för provtagning. Vid uppdateringen erhålls den så kallade *aposteriorifördelningen* för de stokastiska variablerna som beskriver kontrollparameterns statistiska parametrar. Det vill säga nya värden på kontrollparameterns medelvärde och medelvärdets spridning. Detta medger att komplexa problem kan hanteras, men med ökad komplexitet ökar också den matematiska svårighetsgraden.
- För vissa kombinationer av fördelningar för *likelihood* och för *apriori* kan uppdatering utföras med färdiga lösningar. Detta kallas *konjugerad prior*. Man måste dock överväga om det aktuella problemet och förhandskunskapen beskrivs av sådana fördelningar.
- Den uppdaterade fördelningen avser de statistiska parametrarna som beskriver kontrollparameterns statistiska parametrar. Det vill säga uppdateringen avser medelvärdet och medelvärdets spridning och inte den underliggande kontrollparametern. För att kunna använda den uppdaterade fördelningen för en utsaga om den mätbara kontrollparametern behövs den så kallade *bayesianska fördelningen*. Den erhålls genom att kombinera spridningen hos den underliggande stokastiska variabeln med medelvärdets spridning. Den kallas också *prediktionsfördelningen*.
- Utsagor om kontrollparametrars osäkerhet i form av en *fördelningsfunktion* och statistiska parametrar bör vara baserad på aktuell kunskap om kontrollparametern ifråga. All känd information om kontrollparametern såväl som ingenjörsmässiga bedömningar kan ingå i utsagan. Det kan innebära att det finns inslag av subjektivitet i *fördelningsfunktionen* och är något som kräver att osäkerhetsanalysen av kontrollparametern i fråga innehåller stringent redovisning av fakta, tolkningar och gjorda överväganden.

Anta att vi kan visa att den observerade kontrollparametern, X , är en normalfördelad stokastisk variabel med ett okänt medelvärde μ och med en känd standardavvikelse σ . Detta kan tecknas på formen

$$f(x) \in N(\mu, \sigma) \quad (4.1)$$

Man kan modellera det okända medelvärdet μ till exempel med en normalfördelning av den stokastiska variabeln μ , Ang & Tang (2007). Den bayesianska statistiken kräver, som tidigare sagts, att man har en modell för a priorifördelningen. Om man inte har någon kunskap a priori om μ (medelvärdet) kan man ansätta en så kallad diffus prior för fördelningens medelvärde. Fördelningen a posteriori (efter provtagning) kan då tecknas med följande uttryck.

$$f(\mu) \in N\left(\bar{x}, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (4.2)$$

Det vill säga, fördelningen av det okända medelvärdet μ kan beskrivas med en variabel, \bar{X} . Denna variabel har ett medelvärde som är lika med det aritmetiska medelvärdet från provtagning, \bar{x} , och har standardavvikelsen, σ/\sqrt{n} . En förutsättning för detta antagande är att mätdata är oberoende. Sannolikheten att \bar{X}^2 ska vara mindre än ett visst specificerat medelvärde, a , kan tecknas

$$P(\bar{X} < a) = \Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma/\sqrt{n}}\right) \quad (4.3)$$

där

a = specificerat värde på medelvärdet

σ = populationens standardavvikelse

\bar{x} = populationens skattade medelvärde

n = antal mätvärden som bildar medelvärdet

Med ekvation 4.3 kan man skatta sannolikheten för att ett specificerat medelvärde ska uppträda i en population vars fördelning är baserad på resultat från provtagning.

Både kontrollparameterns enskilda värde och det skattade medelvärdet betraktas som stokastiska variabler. Osäkerheterna i respektive variabel beskrivs med spridningsmättet, σ , respektive σ/\sqrt{n} . Det senare representerar osäkerheten i den datagenererande processen. Den totala osäkerheten i skattningen av en kontrollparameter, X , är den bayesianska fördelningen och erhålls genom att kombinera spridningen hos den underliggande stokastiska variabeln med medelvärdets spridning (Ang & Tang 2007). Fördelningen för den totala osäkerheten kan tecknas med följande uttryck

² Genomgående används konventionen att stokastiska variabler beskrivs med stor bokstav.

$$f(X) \in N\left(\bar{x}, \sqrt{\sigma^2 + \frac{\sigma^2}{n}}\right) \quad (4.4)$$

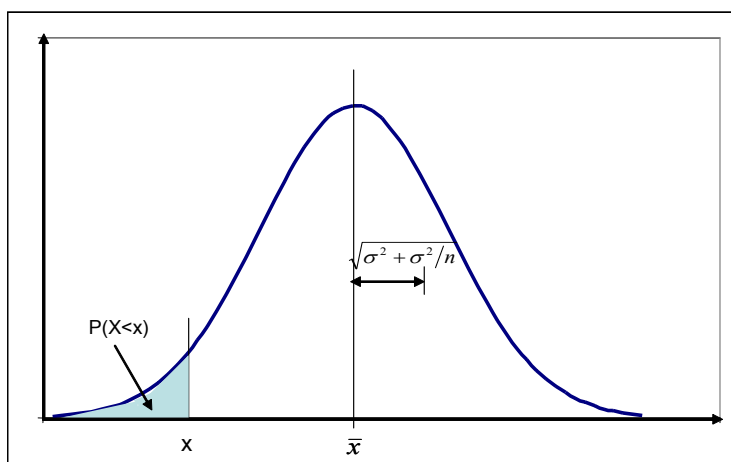
Sannolikheten för att värdet på kontrollparametern ska vara mindre än ett visst specificerat värde b kan då tecknas

$$P(X < b) = \Phi\left(\frac{b - \bar{x}}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma^2/n}}\right) \quad (4.5)$$

där

b = specificerat värde

Ekvation 4.5 kan användas för att skatta sannolikheten för att kontrollparametern ska anta ett specificerat mätvärde inom en population med det skattade medelvärdet \bar{x} . I figur 4-1 visas sannolikheten att underskrida ett tillåtet gränsvärde, b , på kontrollparametern.



Figur 4-1. Sannolikheten att underskrida ett tillåtet gränsvärde på kontrollparametern.

I fall där variabeln beskrivs med lognormalfördelning istället för normalfördelning skall följande ekvationer användas. Lognormalfördelning är i analogi med normalfördelningen och för det fall att man inte har någon kunskap a priori om μ (medelvärdet) kan man ansätta ett diffust värde för fördelningens medelvärde enligt ekvation 4.2. Det vill säga fördelningen av det okända medelvärdet μ kan beskrivas med en variabel, \bar{X} . Sannolikheten för att \bar{X} ska vara mindre än ett visst specificerat medelvärde, a , kan för lognormalfördelning tecknas

$$P(\bar{X} < a) = \Phi\left(\frac{\ln a - \lambda}{\zeta \sqrt{n}}\right) \quad (4.6)$$

där

a = specificerat värde på medelvärdet

$$\lambda = \ln \bar{x} - \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (4.7)$$

$$\zeta^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma}{x} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

Ekvation 4.4 beskriver den totala osäkerheten för en kontrollparameter. Sannolikheten för att värdet på en lognormalfördelad kontrollparameter ska vara mindre än ett visst specificerat värde X kan tecknas

$$P(x < X) = \Phi \left(\frac{\ln \bar{X} - \lambda}{\sqrt{\zeta^2 + \zeta^2/n}} \right) \quad (4.9)$$

För det fall att förhandsinformation finns om det okända medelvärdet kan också en uppdatering utföras. Om kontrollparametern antas vara normalfördelad $N(\mu, \sigma)$, där σ är känt, och man modellerar informationen a priori som en normalfördelning, $N(\mu', \sigma')$, följer att funktionens fördelning a posteriori också är en normalfördelning (konjugerad prior). Baserat på n stycken observationer av den stokastiska variabeln (kontrollparametern) X som har medelvärdet \bar{x} , kan kunskapen om variabelns medelvärde och standardavvikelse uppdateras med en färdig lösning. Kontrollparameterns fördelning tecknas med den bayesianska prediktionsfördelningen enligt

$$X \in N(\mu'', \sqrt{\sigma'^2 + \sigma''^2}) \quad (4.10)$$

där

$$\mu'' = \frac{\bar{x} \sigma'^2 + \mu' \sigma^2 / n}{\sigma'^2 + \sigma^2 / n} \quad (4.11)$$

$$\sigma'' = \sqrt{\frac{\sigma'^2 \sigma^2 / n}{\sigma'^2 + \sigma^2 / n}} \quad (4.12)$$

μ' = förhandsinformation (a priori) om kontrollparameterns medelvärde

σ' = förhandsinformation (a priori) om medelvärdets standardavvikelse

σ = kontrollparameterns standardavvikelse (känd eller skattad)

\bar{x} = ny information om kontrollparameterns medelvärde (= $\sum x_i / n$)

n = antal mätvärden eller antal mätresultat (kopplad till aktuell frågeställning).

Vår uppfattning om medelvärdet blir normalfördelat och tecknas

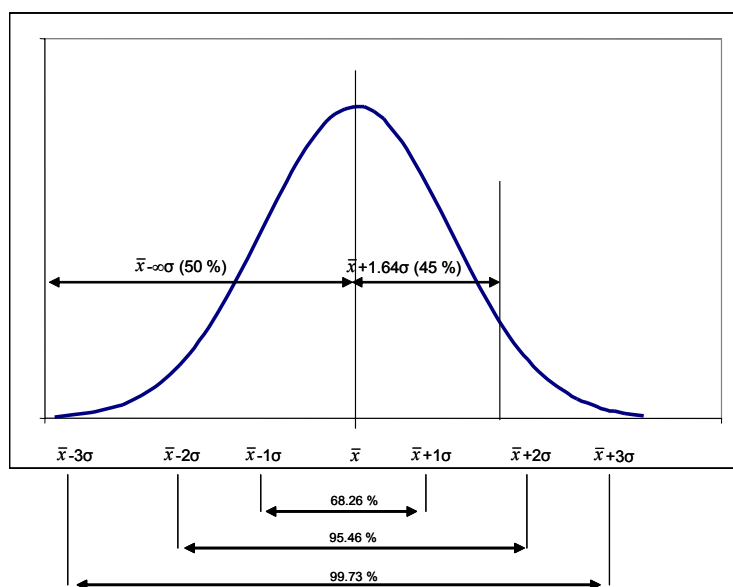
$$\bar{X} \in N(\mu'', \sigma'')$$

Ovanstående ekvationer förutsätter att populationens standardavvikelse är känd. Som tidigare påpekats gäller detta inte utan vidare för applikationer som avser byggandet i berg och förhandsuppfattningen om spridningen kommer därför att innehålla ett mått av subjektivitet. Detta bör beaktas när praktiska slutsatser om

konstruktionens beteende baseras på det teoretiska betraktelsesätt som demonstreras ovan.

Populationens standardavvikelse kan baseras på observerade mätvärden (skattning) eller kan vara känd från tidigare erfarenheter. För det sistnämnda fallet kan till exempel variationskoefficienten användas om denna är känd eller accepterad. Det vill säga populationens standardavvikelse kan skattas som en konstant multiplicerat med medelvärdet.

Designberäkningar om konstruktionens förväntade beteende och andra erfarenheter kan ligga till grund för uppfattningen om kontrollparameterns prediktionsfördelning a priori. I designberäkningar kan inte kontrollparameterns värde predikteras i enskilda mätsektioner, till exempel kan inte deformationernas storlek kvantifieras för enskilda tunnelsektioner. Däremot går det med hjälp av designberäkningar och baserat på erfarenheter att etablera en uppfattning om deformationens medelvärde och medelvärdets spridning för en viss bergkvalitet och förstärkningsinsats. Dessa värden kan användas för att upprätta kontrollparameterns bayesianska prediktionsfördelning a priori, enligt ekvation 4.10.



Figur 4-2. Olika sannolikheter i normalfördelningen visas som funktion av produkten $\pm L\sigma$.

Ekvation 4.3 respektive 4.5 kan omformas till

$$a_{1,2} = \bar{x} \pm L \sigma / \sqrt{n} \quad (4.13)$$

$$b_{1,2} = \bar{x} \pm L \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2/n} \quad (4.14)$$

där L är en multiplikator som anvisar avståndet från det skattade medelvärdet ut till en given fraktion på normalfördelningskurvan. Faktorn L motsvaras av

gränserna för konfidensintervallet enligt klassisk statistik och beror också av om den avser ett enkelsidigt eller dubbelsidigt intervall.

I figur 4-2 visas normalfördelningskurvan och vilken yta under kurvan (sannolikheten) som olika värden på L motsvarar i ett dubbelsidigt och enkelsidigt intervall. Värden på L kan hämtas från standardtabeller för både enkelsidigt och dubbelsidigt intervall. Exempelvis bildas ett dubbelsidigt intervall för värdena a_1 och a_2 då $L = \pm 1.96$. I geotekniska sammanhang är ofta sannolikheten för det enkelsidiga förhållandet mer relevant. Ett enkelsidigt intervall med 95 % sannolikhet för det övre värdet a_2 , bildas med $L = 1.64$.

4.3 Statistisk beskrivning av mätdata

Finns det tillräckligt många mätvärden kan klassisk statistik användas när standardavvikelsen inte är känd utan måste skattas. Normalfördelningen kan ersättas med en t -fördelning för att bedöma stokastiska variabelers fördelningar. Detta gäller i högre grad när underlaget för bestämning eller stickprovets storlek, n , är litet. Detta beaktas i t -fördelningen med begreppet frihetsgrader som definieras av storheten $(n-1)$. Liksom normalfördelningen är t -fördelningen är symmetrisk men har bredare svansar vid låga frihetsgrader. Normalfördelningen och t -fördelningen är identisk när antalet frihetsgrader är oändligt och med frihetsgrader över 30 kan normalfördelningen användas med god approximation. Ekvation 4.13 och 4.14 tecknas med t -fördelning

$$a_{1,2} = \bar{x} \pm t s / \sqrt{n} \quad (4.13a)$$

$$b_{1,2} = \bar{x} \pm t \sqrt{s^2 + s^2/n} \quad (4.14a)$$

där

$$s = \text{populationens skattade standardavvikelse, } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Tabell 4-1. Jämförelse mellan multiplikatorerna L och t som anvisar avståndet från det skattade medelvärdet ut till en given fraktion på normalfördelningskurvan respektive t -fördelningskurvan.

Enkelsidig Fraktion	Normalfördelning L	t -fördelning, 5 frihetsgrader T	t -fördelning, 10 frihetsgrader t	t -fördelning, 25 frihetsgrader t
90 %	1.28	1.48	1.37	1.32
95 %	1.64	2.02	1.81	1.70
99 %	2.33	3.36	2.76	2.49

I tabell 4-1 jämförs storleken på faktorerna L och t vid samma fraktion, se också figur 4-1. Tabellen visar den praktiska konsekvensen av fåtalsprovning. Jämförs resultat från ekvation 4.13 och 4.13a för samma fraktion erhålls från ekvation 4.13a ett bredare intervall för parameterns förväntade värde, vilket därmed avspeglar att större osäkerheten råder. Med ökade frihetsgrader går resultat från ekvation 4.13a och 4.14a mot det som erhålls ur ekvation 4.13 och 4.14.

Kontrollparametern används för att skatta värdet på den underliggande designparametern. Osäkerheten i skattningen beskrivs av standardavvikelsen. Krav på en konstruktions säkerhet uttrycks oftast i relation till brottgränsen till designparameterns värde. Designkravet kan till exempel uttryckas som sannolikheten att överskrida brottgränsen eller någon annan relevant gräns. Multiplikatorerna L och t anvisar avståndet från det skattade medelvärdet ut till den fraktion på medelvärdets fördelningskurva, normal- eller t-fördelning, som bestämts av designkravet på acceptabel sannolikhet. Genom att lösa ut medelvärdet i ekvation 4.13 och i ekvation 4.13a kan ett riktvärde bestämmas som beror av både osäkerheten (standardavvikelsen) och designkravet (sannolikheten). För känd standardavvikelse respektive skattad standardavvikelse tecknas riktvärdet (det skattade medelvärdet)

$$\bar{x} = \text{brottgräns} + L\sqrt{\sigma^2 + \sigma^2/n} \quad (4.15)$$

$$\bar{x} = \text{brottgräns} + t\sqrt{s^2 + s^2/n} \quad (4.15a)$$

Riktvärdet är det värde på kontrollparametern som måste uppfyllas enligt design för att konstruktionens beteende ska vara som det förväntade. Riktvärdet beräknad med lämplig ekvation ovan är ett relativt enkelt sätt att bestämma kontrollparameterns gräns för acceptabelt beteende.

En metodik för validering av att mätdata kan approximeras med en normalfördelning eller t-fördelning (som också har en Gaussiansk fördelningsfunktion) är att använda ett så kallat normalfördelningspapper (som är ett diagram) och mätdatas kumulativa fördelning. Principen är att gruppera mätdata i stigande ordning och plotta dessa mot den empiriska kumulativa fördelningen

$$p(m) = \frac{m}{N+1} \quad (4.16)$$

där

m = ordningstalet i den stigande ordningen

N = antalet mätdata

Den kumulativa fördelningen utgör x- axel i normalfördelningsdiagrammet men skall uttryckas med hjälp av normalfördelningens funktion uttryckt som

$$\phi^{-1}\left(\frac{m}{N+1}\right)$$

Om mätdata som plottats på detta sätt är linjära eller har en linjär trend så indikerar detta att den bakomliggande fördelningen av parametern är normalfördelad. Ur detta diagram kan mätdatas medelvärde och standardavvikelse utvärderas. Genom hjälpfunktionen

$$P(\bar{x} < x_m) = \Phi\left(\frac{x_m - \bar{x}}{\sigma}\right) = \frac{m_x}{N+1}$$

kan den kumulativa sannolikheten tecknas

$$P(m) = \phi^{-1}\left(\frac{m}{N+1}\right) = \left(\frac{x_m - \bar{x}}{\sigma}\right) \quad (4.17)$$

Den linjära approximationen i normalfördelningsdiagrammet blir

$$x_m = \bar{x} + \sigma P(m) \quad (4.18)$$

Standardavvikelsen är lika med lutningen på kurvan och populationens medelvärde kan avläsas vid den kumulativa sannolikheten $p=50\%$, för vilket $P(m)=0$ och $x_m = \bar{x}$.

4.4 Statistisk processkontroll

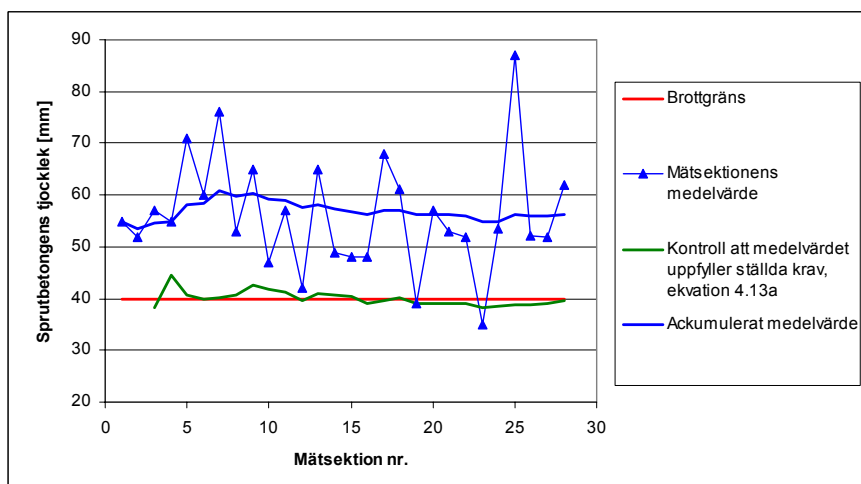
Att uppföra en konstruktion i berg, till exempel en tunnel, är i princip en löpande process och en sammansatt produkt för vilken en mängd olika krav ställs, både på den slutgiltiga produkten likväl som på ingående delprodukter. Av speciellt intresse är att övervaka och visualisera mätningar och observationer utgående från de krav som formulerats för observationsmetoden i EN 1997-1:2004, kapitel 2.7. I processindustrin eller i tjänsteproducerande företag finns standardiserade metoder för löpande processövervakning som bygger på statistik. Montgomery (2001) lämnar en utförlig beskrivning av olika metoder för att utföra så kallad statistisk processkontroll. Följande text har hämtats från sv.wikipedia.org.

”Statistisk processkontroll, SPC (*Statistical Process Control*) benämns även som statistisk processtyrning, samlingsnamn på det metodpaket inom kvalitetstekniken som används för att övervaka processer av olika slag. Metoderna syftar till att övervaka huruvida processen är i kontroll eller inte och vilken förmåga den har att producera enheter (kan vara såväl varor som tjänster) som ligger inom uppsatta toleranser. I alla typer av processer förekommer variation. I en tillverkningsprocess kan det handla om till exempel spel i lager och styrningar, varierande temperatur och fuktighet eller dåligt kalibrerade mätinstrument. Denna variation är en källa till bristande kvalitet, och måste därför kartläggas, övervakas och om möjligt reduceras. Syftet med SPC är att identifiera orsaker till urskiljbar variation och eliminera dessa, övervaka processen när den är i statistisk jämvikt (ingen urskiljbar variation förekommer) så att inte nya urskiljbara orsaker introduceras utan processoperatörens vetskap, samt fortlöpande fånga information från processen så att nya orsaker till variation kan identifieras som urskiljbara och sedan elimineras.”

Visualisering av kontrollparametrar som fastlagts för att övervaka konstruktionens beteende eller utförandet av kritiska arbeten bidrar liksom klassificering till bättre överblick, förbättrar kommunikationen och underlättar beslutsfattande. Inom SPC

finns verktyg och metoder för visualisering, där en av de viktigaste är styrdiagrammet.

Styrdiagrammet är en generell visualiseringsmetod som kan användas för alla kontrollparametrar. Följande exempel förklarar styrdiagrammets funktion. Anta att kontrollparametern utgörs av sprutbetongens tjocklek. Provtagning sker i en mätsektion med fem stycken borrhål enligt förutbestämt mönster och avstånd. Mätvärdena betraktas som oberoende och medelvärdet bildas av uppmätt tjocklek i varje hål. Mätningarna kan redovisas som i figur 4-3 där medelvärdet visas för varje mätsektion. Som exempel visas i styrdiagrammet populationens medelvärde, designkrav i form av brottgränsen som skall innehållas med en viss given sannolikhet (säkerhetskravet). Vidare visas hur ekvation 4.13a kan användas för att kontrollera att populationen uppfyller detta brottgränsvärdet. Beräkningen baseras på mätta värden och med populationens statistiska parametrar, \bar{x} och s , samt t-fördelningens givna multiplikator, t , som ges av säkerhetskravet. Principiellt skall brottgränskurvan inte underskridas om designkravet ska innehållas.



Figur 4-3. Styrdiagram som visar sprutbetongens medeltjocklek, populationens ackumulerade medeltjocklek samt brottgräns. Vidare visas kontroll med ekvation 4.13a att brottgränsen innehålls då den beräknas med populationens statistiska parametrar och ett givet säkerhetskrav (sannolikhet att gränsen ska innehållas).

Att använda styrdiagrammet som hjälpmedel i det löpande arbetet med kontrollplanen underlättar att uppfylla observationsmetodens krav under utförandeskedet. Det vill säga;

- en kontrollplan skall utarbetas som kan visa om det faktiska beteendet ligger inom gränserna för det acceptabla beteendet,
- kontroller ska ske i god tid och med tillräckligt korta intervall för att möjliggöra att framgångsrika åtgärder kan vidtagas.

Gräns för acceptabelt beteende bestäms i detta fall av riktvärdet för sprutbetongens medeltjocklek och dess spridning som tillsammans gör att säkerhetskravet uppfylls. Omständigheterna kring när mätdata ska föreligga skall bestämmas av konsekvenserna av att inte kunna utföra korrigerande åtgärder på

ett framgångsrikt sätt. I arbetet med styrdiagrammet inryms också potential för besparingar eftersom det fastläggs om kontrollparameterns värde är konservativt i förhållande till gräns för acceptabelt beteende.

De finns metoder som kan kopplas till styrdiagram i syfte att snabbare kunna detektera en trend eller en oönskad avvikelse från medelvärdet. En sådan metod är EWMA (eng: *Exponential Weighted Moving Average*). Fördelen med denna metod är att den tar hänsyn till information från tidigare observationer. Med en algoritm viktas data med mest vikt på den sista i mätserien. EWMA definieras enligt Montgomery (2001) på följande sätt.

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (4.19)$$

där

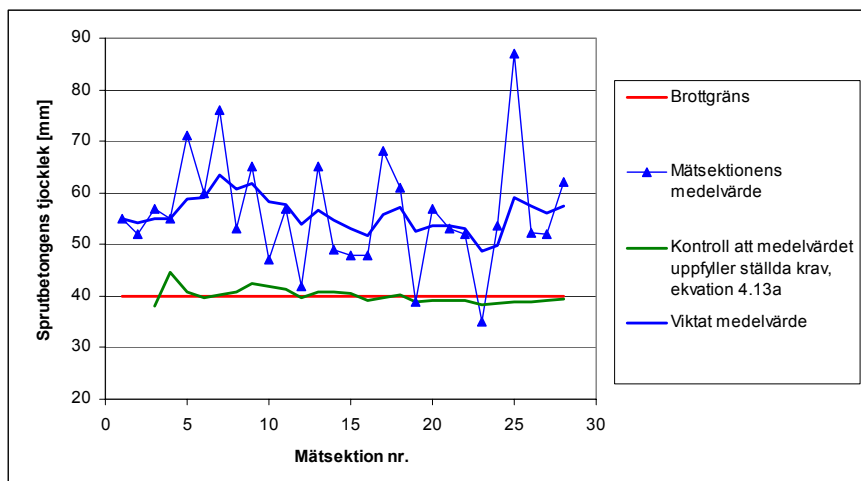
z_i = viktat medelvärde i steg i

z_{i-1} = det viktade medelvärdet i steg $i-1$.

x_i = stickprovets aktuella medelvärde

λ = konstant som reglerar hur medelvärden i tidigare steg påverkar i steg i .

Valet av viktkonstanten, λ , bestämmer både styrka och antalet värden i dataserien som inverkar på det aktuella viktade medelvärdet. Värden nära 0 ger liten vikt på senaste mätvärdet och omfattar värden långt tillbaka i mätserien. Montgomery (2001) har funnit att $0.05 \leq \lambda \leq 0.25$ fungerar i praktiken samt också att det viktade medelvärdet EWMA är tillförlitligt även om data inte är normalfördelade. Istället för att använda det ackumulerade medelvärdet i styrdiagrammet kan EWMA användas för att plottas stickprovets viktade värde, se figur 4-4. Jämfört med det ackumulerade medelvärdet i figur 4-3 erhålls en tydligare trend på att medelvärdet sjunker mellan cirka mätning 5 och 25.



Figur 4-4. Styrdiagram som visar sprutbetongens medeltjocklek i varje mätsektion, populationens viktade medeltjocklek samt brottgräns. Vidare visas kontroll med ekvation (4.13a) att brottgränsen innehålls då den beräknas med populationens statistiska parametrar och ett givet säkerhetskrav (sannolikhet att gränsen ska innehållas).

5. Praktiska verktyg för tillämpning av observationsmetoden

5.1 Inledning

I kapitel 3 konstaterades att begreppet geotekniskt beteende i bergbyggnadssammanhang också bör omfatta att säkerställa att utförd åtgärd (exempelvis förstärkning) har acceptabel kvalitet i relation till designförutsättningarna. Vidare också att fastlägga att stabila förhållanden råder och att det bärande huvudsystemet uppför sig som förväntat i relation till utförd åtgärd. Metodiker för båda dessa fall beskrivs i avsnitt 5.2 respektive avsnitt 5.3 med hjälp av hypotetiska exempel som baseras på mätdata från praktikfall. Dessa metoder avser att hantera följande krav i observationsmetoden.

- Intervall för möjligt beteende skall fastläggas och det ska visas att det finns en acceptabel sannolikhet för att det faktiska beteendet ska vara inom de fastställda gränserna för acceptabelt beteende.
- En kontrollplan skall utarbetas som kan visa om det faktiska beteendet ligger inom gränserna för det acceptabla beteendet. Kontroller ska ske i god tid och med tillräckligt korta intervall för att möjliggöra att framgångsrika åtgärder kan vidtagas.

5.2 Kontroll av utförd åtgärd mot ställda designkrav

I exemplet antas att bergmassans beteende och bergklassen är relaterad till blockstabilitet. Varken lokaliseringen av ett blockutfall eller de deformationer som föregår ett blockutfall kan med tillräcklig säkerhet kontrolleras med direkta observationer. För instabila bergkilar kan kontroll direkt inriktad på den dimensionerande lasten utföras genom att utföra statistisk analys av kontrollparametrarna, sprickriktningar och sprickfrekvens. Som komplement till detta kan analys med kommersiell programvara utföras att studera fördelningen av storleken på potentiellt instabila kilar. För det fall sprutbetongens dimensioneras med vidhäftning som ett lastupptagande element kan också vidhäftning vara en kontrollparameter. Vidare är också kvaliteten på utförandet av förstärkningen, i detta fall sprutbetongens tjocklek, en parameter behäftat med osäkerhet och utgör därför en kontrollparameter i observationssystemet. Denna kontrollparameter modelleras som en stokastisk variabel.

I detta exempel har man i designarbetet med hjälp av kinematiska analyser, erfarenheter från liknande bergförhållanden och ekonomiska överväganden beslutat att förstärkningen skall dimensioneras utgående från en bestämd kritisk blockstorlek. Det är troligt att det finns instabila block med dimensionerande storlek längs cirka 5 % av takytan, $p_b=5/100$. Sprutbetongens bärförmåga för det dimensionerande lastfallet uppfylls med en tjocklek av 40 mm. Denna formulering av brottgränsvärdet kan ses som en observerbar storhet och ur bergmekanisk synvinkel är, enligt diskussion ovan, sprutbetongens medeltjocklek över den yta som den dimensionerande lasten verkar på en möjlig och rimlig kontrollparameter.

Den minsta tillåtna medeltjocklek som krävs enligt design skall relateras till ett krav på säkerhet. Här antages att aktuell standard anger att säkerhetskravet mot brott skall vara 3.3. Baserad på normalfördelning är den acceptabla sannolikheten, p_b , för en skadehändelse, 1 på 2000 ($p_b=1/2000=5 \times 10^{-4}$). Skadehändelsen är samtidig förekomst av att sprutbetongens medeltjocklek understiger 40 mm över den yta där ett löst block är beläget. Brots sannolikheten kan teoretiskt beskrivas

$$p_f = p_t \times p_b$$

Det vill säga acceptabel sannolikhet för att sprutbetongens tjocklek, p_t , ska understiga 40 mm kan skattas till cirka

$$p_t = \frac{p_f}{p_b} = \frac{5 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-2}} = 10^{-2}$$

Låt kontrollparameterns gräns för acceptabelt beteende vara lika med brottgränsen, 40 mm. För känd standardavvikelsen respektive skattad standardavvikelse kan riktvärdet på sprutbetongens medelvärde tecknas med hjälp av ekvationerna 4.15 respektive 4.15a.

$$\bar{x} = \text{brottgräns} + L_t \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2/n} \quad (5.1)$$

$$\bar{x} = \text{brottgräns} + t_{t,n-1} \sqrt{s^2 + s^2/n} \quad (5.1a)$$

Multiplikatorerna L_t och t_t anvisar avståndet från det skattade medelvärdet ut till den fraktion på normalfördelningskurvan respektive t-fördelningskurvan som ges av kravet på acceptabel sannolikhet, i detta fall 99 % ($p_f=0.01$). Medelvärdets riktvärde beror av kontrollparameterns totala osäkerhet, det vill säga både spridningen på sprutbetongens tjocklek och medelvärdets spridning. Spridningen har således stor betydelse för vilket riktvärde utföraren bör uppnå. Spridningen är påverkbar och därmed en parameter som styrs av kvaliteten på arbetenas utförande. Man bör notera att spridningen har motsvarande betydelse vad gäller kontroll av att inte påföra för mycket sprutbetong.

Innan arbetena startar med att applicera sprutbetong behöver ett riktvärde ansättas och en uppfattning bildas om hur tjockleken varierar (spridningen). Detta eftersom båda parametrar inverkar på förutsättningarna att uppfylla designkravet givet av fastlagd gräns för acceptabelt beteende. Då spridningen inte är känd beskrivs den totala osäkerheten på medeltjockleken med ekvation 5.1a, där den skattade standardavvikelsen ingår i båda termerna under rottecknet, det vill säga spridningen med avseende på kontrollparameterns enskilda mätvärden såväl som för dess medelvärde.

Spridningen beror bland annat på utförandet och på bergkonturens råhet. För att skatta riktvärde och spridning skall sprutbetongens tjocklek kontrolleras längs en provsträcka. Den standardiserade provningen innebär att fem stycken borrhål borras i tunneltak i en mätyta vars storlek är anpassad till den förväntade blockstorleken. Medelvärdet bildas av uppmätt tjocklek i enskilda hål. Formellt

utgör medelvärdet ett stickprov i en population som består av oberoende mätningar av sprutbetongens tjocklek längs tunnelns tak. Detta illustreras schematiskt i figur 5-1. Figuren visar tunneltaketets yta mellan anfangen och antalet potentiella mätsektioner längs en sträcka i tunneln. Vidare visas i grått 12 stycken mätsektioner där fem stycken hål skall borraras. Det är totalt 60 hål (59 frihetsgrader) av 300 potentiellt möjliga positioner eller 12 mätsektioner av 60 möjliga (11 frihetsgrader). Data från mätningarna visas i tabell 5-1. I provningen utvärderas således inverkan av platsspecifika förutsättningar som bergkontur, metod att applicera sprutbetong, betongkvalitet, återslag, etc.

1							8				
			5						10		
	2					7					12
			4					9			
		3			6					11	

Figur 5-1. Schematisk illustration var mätningar av sprutbetongens tjocklek utförts. Numrering motsvarar mätsektion angiven i tabell 5-1.

Tabell 5-1. Mätdata från respektive mätsektion.

Mätsektion	Mätpunkt 1	Mätpunkt 2	Mätpunkt 3	Mätpunkt 4	Mätpunkt 5	Medelvärde
1	60	55	70	55	60	60
2	80	50	40	50	40	52
3	50	60	50	50	50	52
4	70	60	60	70	55	63
5	60	45	60	70	65	60
6	45	120	70	60	60	71
7	60	75	35	40	75	57
8	80	80	70	90	90	83
9	60	50	50	50	90	60
10	55	55	55	55	55	55
11	40	35	50	50	50	45
12	55	55	55	55	55	55

Ur tabell 5-1 kan följande statistiska parametrar beräknas; $\bar{x} = 60$ mm, $s = 15$ mm. Observera att standardavvikelsen betecknas med s för att visa att det skattade värdet används. Medelvärdets skattade standardavvikelse för de mätsektioner som provats längs sträckan är s/\sqrt{n} . Det är fem borrhål som bildar medelvärdet för mätsektionen och med $n=5$ är medelvärdets skattade standardavvikelse för provsträckan cirka 6.7 mm. Detta gäller för fallet att vi inte har någon förkunskap om medelvärdet.

För att illustrera betydelsen och tolkningen av de statistiska parametrarna som beräknats ur data från tabell 5-1, visas i figur 5-2 tre fördelningsfunktioner. De avser sprutbetongens tjocklek dels för enskilda borrhål i en mätsektion, dels för enskilda borrhål över hela populationen. Vidare medelvärdets fördelning för enskilda mätsektioner. I beräkningen ingår det skattade värden på medelvärdet, \bar{x} , men istället för känd standardavvikelse används den skattade standardavvikelsen, s . Fördelningen av sprutbetongens förväntade tjocklek i

enskilda hål som borrats vid slumpvis utvalda positioner tecknas med ekvation 4.3 som

$$P(X < a) = \Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sqrt{s^2}}\right) = \Phi\left(\frac{a - 60}{\sqrt{15^2}}\right) = \Phi\left(\frac{a - 60}{15}\right)$$

där

$$\sigma \approx s$$

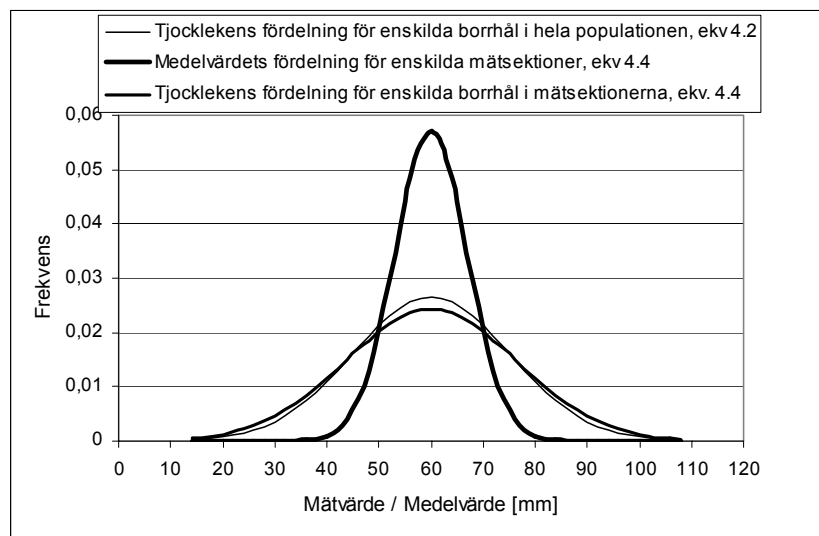
Fördelningen av sprutbetongens tjocklek i enskilda borrhål som borrats i mätsektioner på det sätt som föreskrivits här, kan skattas med ett uttryck som inbegriper den totala osäkerheten. Detta tecknas med ekvation 4.5

$$P(X < b) = \Phi\left(\frac{b - \bar{x}}{\sqrt{s^2 + s^2/n}}\right) = \Phi\left(\frac{b - 60}{\sqrt{15^2 + 15^2/5}}\right) = \Phi\left(\frac{b - 60}{16.5}\right)$$

där

$$\sigma \approx s$$

Här används sprutbetongtjocklekens skattade standardavvikelse tillsammans med $n=5$, vilket representerar antalet borrhål i en mätsektion längs provsträckan.



Figur 5-2. Fördelningsfunktioner på basis av provning av sprutbetongs tjocklek och spridning.

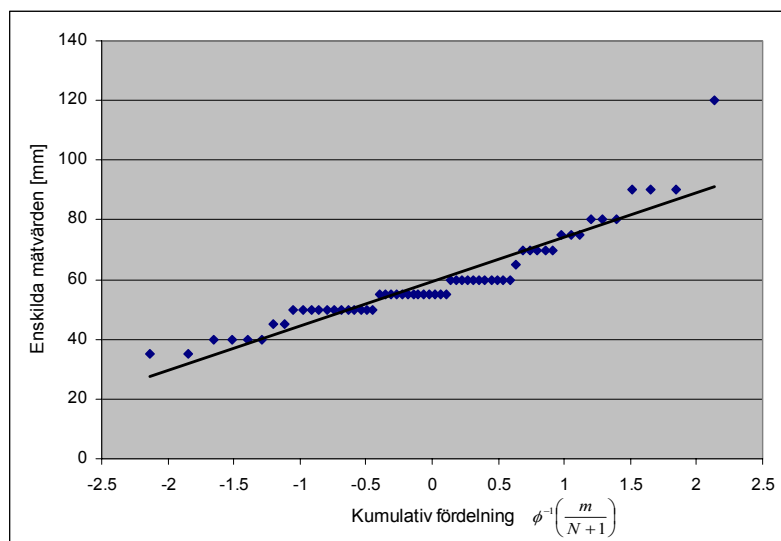
Fördelningen av enskilda mätsektioners medelvärde kan också skattas med ett uttryck som inbegriper den totala osäkerheten och ekvation 4.5 tecknas då

$$P(X < c) = \Phi\left(\frac{c - 60}{\sqrt{6.7^2 + 6.7^2/12}}\right) = \Phi\left(\frac{c - 60}{7}\right)$$

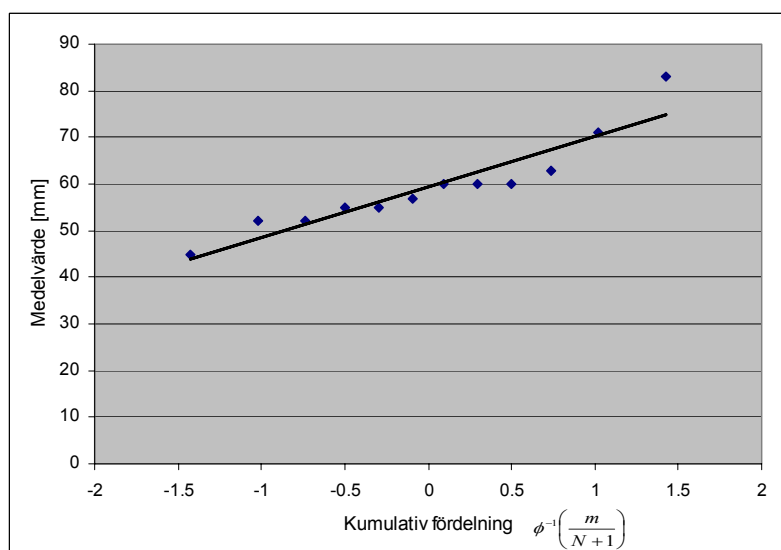
där

$$\sigma \approx s$$

Här används medelvärdeets skattade standardavvikelse tillsammans med $n=12$ vilket representerar antalet mätsektioner längs provsträckan. Ovan ekvationer kan sägas beskriva kontrollparameterns intervall av möjligt beteende.



Figur 5-3. Alla mätvärden på sprutbetongens tjocklek i enskilda borrhål från provsträckan plottad på normalfördelningspapper.



Figur 5-4. Alla beräknade medelvärden på sprutbetongens tjocklek i enskilda mätsektioner från provsträckan plottad på normalfördelningspapper.

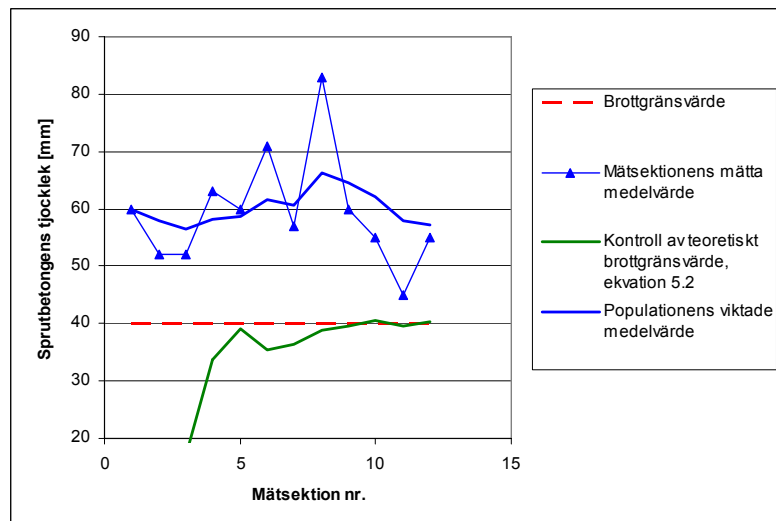
I kapitel 4.3 beskrivs en procedur för validering av approximationen att mätdata är normalfördelade. Mätdata grupperas i stigande ordning och plottats mot den empiriska kumulativa fördelningen. Figur 5-3 visar resultatet från alla enskilda mätningar av tjockleken och i figur 5-4 visas mätsektionernas medelvärden. Den ungefär linjära trenden visar att det är rimligt att anta att medelvärdet av sprutbetongens tjocklek är normalfördelat. Notera i figurerna att det finns ett högt värde i vardera figuren som indikerar att de förmodligen inte tillhör denna

population, en så kallad outlier. Det är en typ av avvikelse som kan uppkomma när till exempel av någon orsak felaktig mängd sprutbetong appliceras. För det fall att sådana värden skall uteslutas ur undersökningen bör detta vara motiveras, till exempel med visuella observationer samt kontroll av mängd och lokalisering av sprutbetong.

I relation till designkraven är tolkningen av mätdata som berör mätsektionerna de intressanta. Figur 5-3 visar att enskilda borrhål i mätsektionerna kan med viss sannolikhet ha värden som understiger 20 mm och som överstiger 100 mm. Figur 5-4 visar att medelvärdet för mätsektionerna med en viss sannolikhet kan vara lägre än 40 mm och större än 80 mm.

I figur 5-5 visas styrdiagrammet för provsträckan. Enligt designkravet skall medeltjockleken över ytan som lasten verkar på, med 99 % sannolikhet överstiga brottgränsvärdet. Den teoretiska brottgränsen kan för varje mättillfälle (varje frihetsgrad) studeras med hjälp av ekvation 4.14a genom att beräkna den nedre gränsen för intervallet givet av

$$b_1 = \bar{x} - t_i \sqrt{s^2 + s^2/n} \quad (5.2)$$



Figur 5-5. Styrdiagram som visar sprutbetongens medeltjocklek i varje mätsektion samt provsträckans viktade medeltjocklek. Vidare redovisas brottgränsvärdet 40 mm samt det teoretiska värdet beräknad med populationens statistiska parametrar och given förutsättning att medelvärdet med 99 % sannolikhet ska vara högre än brottgränsvärdet.

Diagrammet visar att detta uppfylls efter cirka 10 mätningar vilket leder till slutsatsen att riktvärdet på medeltjockleken är rimligt. Teoretiskt kan sprutbetongens medeltjocklek bestämmas med ekvation 5.1a och baseras på skattat medelvärde, standardavvikelse och acceptabel sannolikhet som här är 99 %. Den enkelsidiga t-fördelningen ger multiplikatorn, $t_i = 2.7$ och med 11 frihetsgrader och ekvation 5.1a erhålls

$$\bar{x} = \text{brottgräns} + t_i \sqrt{s^2 + s^2/n} = 40 + 2.7 \sqrt{6.7^2 + 6.7^2/12} = 59 \text{ mm}$$

Således är rekommendationen till utföraren att i fortsatt arbete använda ett riktvärde på sprutbetongens medeltjocklek som ligger nära 60 mm. Denna rekommendation är då relaterad till;

- värdet på gräns för acceptabelt beteende som är 40 mm,
- designkravet på säkerhet som är 99 %,
- att kvaliteten på utförandet upprätthålls, vilken beskrivs av relationen mellan riktvärde, spridning och provningsförfarande enligt ekvation 5.1a.

När medeltjocklekens riktvärde fastlagts kan också en skattning göras med avseende på hur enskilda håls tjocklek inom mätsektionerna kommer att vara fördelade. Detta approximeras med normalfördelning eftersom antalet prov gällande standardavvikelsen överstiger 30. Genom att lösa ut L ur ekvation 5.1 kan sannolikheten skattas med avseende på borrhål som uppvisar en tjocklek större än brottgränsvärdet. Detta kan tecknas med uttrycket

$$L = \frac{\bar{x} - \text{brottgräns}}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma^2/n}} = \frac{60 - 40}{\sqrt{15^2 + 15^2/5}} = 1.2$$

Ur normalfördelningskurvan erhålls att cirka 88 % av hålen som borrar i en mätsektion provsträckan förmodas ha en tjocklek som överstiger 40 mm. Det vill säga, i medeltal förekommer ett hål i varannan sektion där tjockleken är mindre än 40 mm. Figur 5-3 visar hela population med medeltjockleken 60 mm och där har 54 av 60 hål en tjocklek över 40 mm, vilket stämmer bra med gjord normalapproximation.

En reduktion av sprutbetongtjocklekens riktvärde minskar volymen sprutbetong som appliceras och förbättrar det ekonomiska utbytet. Ovan exempel visar att både provningsförfarandet och spridningen inverkar på val av riktvärde. Multiplikatorn t_i är relaterad till antalet prov (frihetsgrader). Om antalet prov fördubblas (23 frihetsgrader) blir $t_i=2.5$, vilket teoretiskt ger en reduktion av riktvärde med 1.5 mm. En ökning av antalet kontroller för att undersöka om riktvärdet kan reduceras är således inte lika effektivt som att minska spridningen. Spridningen kan till exempel minska genom att kontrollera att rätt volym appliceras eller genom att bergytans råhet reduceras.

I nedanstående exempel visas att det inte är relevant att ställa krav på enskilda mätvärden som ingår i en mätserie avsedd att kontrollera ett designkrav baserat på en medelvärdesbildande process. Resultat från tidigare exempel visar om designkrav ställs på lägsta tillåtna enskilda värde är detta förmodligen ett strängare krav än dimensionering för säkerhet mot brott. Det strängaste kravet styr därför valet av riktvärde och indirekt kostnaden för att uppföra sprutbetongkonstruktionen. I Sverige förekommer till exempel krav att enskilda värden inte får understiga 80 % av föreskriven tjocklek, vilket kan vara det värde som erhålls vid brottgränsdimensionering. Med stöd av data från ovan exempel förväntas cirka 5 % av alla enskilda mätvärden understiga 32 mm, det värde som motsvarar 80 % av 40 mm. Det visar att krav på att enskilda värden ska överstiga

ett visst minsta värde är ett mycket strängare krav än dimensionering för säkerhet mot brott. Detta designkrav uppfylls i exemplet, det vill säga att det är minst 99 % sannolikhet att medeltjockleken överstiger föreskriven tjocklek på en yta som den dimensionerande lasten verkar på.

5.3 Kontroll av att stabila förhållanden råder genom analys av mätningar av deformation

5.3.1 Inledning

Mätningar av deformationer utförs ofta under uppförandet av konstruktioner i berg för att visa att tunneln eller berggrummet har en acceptabel stabilitet. Vikten av den information som anskaffas via mätningar av deformationer får ökad betydelse dels i komplexa geologiska förhållanden med delvis osäkra geotekniska parametrar, dels där konstruktionens geometriska villkor är en faktor att beakta. Exempel på det senare är berggrum med stora spännvidder eller tunnlar med relativt liten bergtäckning där sättningar eller hävningar på markytan måste beaktas. Storleken på de deformationer som utbildas är ett mått på konstruktionens geotekniska beteende, något som i sin tur beror av hur förstärkningen och berget samverkar i ett lastupptagande system. Inom ramen för observationsmetoden och vid ökande grad av svårighet att förutsäga det geotekniska beteendet kan mätningar av deformation vara den mest lämpliga kontrollparametern.

För att skapa ett praktiskt verktyg till den aktiva designprocess som observationsmetoden möjliggör har vi eftersträvat att upprätta direkta samband som relaterar till de parametrar som kan observeras, till konstruktionens beteende samt dess säkerhetsnivå. Följande grundläggande ansatser utgör basen i detta fall.

1. Säkerhetsnivåer angivna i normer kan användas.
2. Konstruktionens säkerhetsnivå relaterar till deformation eller töjning och inte som vanligt till last eller tryck.
3. Sambanden avser att beskriva hur deformationer utvecklas vid berguttag och beaktar även samverkan mellan berg och förstärkning.
4. Sambanden ska visa hur gjorda observationer minskar osäkerheten med avseende på konstruktionens beteende och därmed på graden av svårighet att fastlägga det geotekniska beteendet.
5. Analysen beaktar inte explicit osäkerheten i enskilda geotekniska egenskaper.

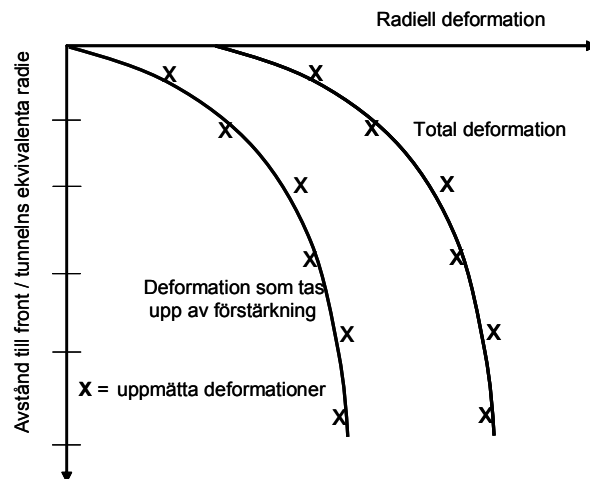
Visualisering av uppmätta deformationer kan göras med ett styrdiagram. Med deformation som kontrollparameter upprättas en likvärdig koppling till observationsmetodens krav som beskrivits i kapitel 5.1.

5.3.2 Problemställning

Vid berguttag sker spänningsomlagringar i den omgivande bergmassan och relativt berggrummet eller tunneln sker avlastning i radiell riktning och pålastning i tangentiell riktning. I ett tredimensionellt perspektiv medverkar initialt tunnelfronten i den totala bärförmågan som ett stödjande element. På längre avstånd från fronten sammansätts den totala bärförmågan av en del som

bergmassan har mobiliserat och en del som förstärkningen mobiliserat. I figur 5-6 visas principiellt hur deformationen utvecklas i en tunnelsektion som funktion av det relativa avståndet till tunnelfronten. Beroende på hur stora deformationer som utvecklas innan deformationerna avklingar kan för normal tunneldrivning det relativa avståndet mellan tunnelfront och aktuell sektion variera mellan cirka fyra och åtta gånger den representativa radien. Detta förutsätter dock att deformationerna inte uppvisar något krypbeteende. I komplicerade belastningssituationer som till exempel i gruvor eller bergguttar i sekvenser tillkommer ytterligare av- och pålastning som då också omfattar redan installerad förstärkning.

En viktig frågeställning med avseende på konstruktionens beteende är att fastlägga gränser för acceptabelt beteende. I princip förekommer två gränser, en för bergmassan gällande hur stora deformationer som berget kan ta upp innan oacceptabel ”uppluckring” eller plasticering sker. Den andra gränsen gäller installerad förstärkning och hur stor deformation eller töjning den kan ta upp innan bärförmågan nedsätts på ett oacceptabelt sätt eller innan oacceptabla skador uppstår på förstärkningselementen. Figur 5-6 visar den principiella frågeställningen med ett schematiskt exempel på uppmätta deformationer. Den högra kurvan visar den totala deformationen som berget omkring tunneln påverkas av. En viktig parameter är den deformation som uppstår innan fronten passerar aktuell sektion. Denna del av den totala deformation är svår att mäta, i praktiken endast möjligt då något mätsystem kan installeras i förväg och på tillräckligt långt avstånd från tunnelfronten, till exempel extensometrar. Den vänstra kurvan visar samma data med dagens normala mätsystem givet att förstärkningen och mätningarna installerats nära tunnelfronten. Det vill säga den del av deformationsförloppet som förstärkningen omkring denna mätsektion påverkas av.



Figur 5-6. Principiellt visas hur deformationen utvecklas i en tunnelsektion som funktion av det relativa avståndet till tunnelfronten. De deformationer som berget omkring tunnelns periferi utsätts för är större än de deformationer som förstärkningselementen utsätts för.

En mer detaljerad beskrivning och genomgång av forskning med avseende på deformationsförlopp som funktion av avståndet till tunnelns front ges av Chang (1994) samt av Carranza-Torres och Fairhurst (2000). Förhandsbedömningar av detta förlopp kan göras med såväl analytiska som numeriska beräkningar. I litteraturen visas att detta förlopp har ett icke-linjärt samband oavsett om bergmassan befinner sig i ett elastiskt eller plastiskt tillstånd.

Säkerhetsnivån för berg och förstärkning fastläggs i princip om man för respektive konstruktionselement kan bestämma med vilken sannolikhet slutdeformationen eller töjningen är större än fastlagd gräns för acceptabelt beteende. Detta innebär således kontroll av gränserna både för berg respektive förstärkning, se figur 5-7. Med en förutbestämt krav på säkerhet kan problemet teoretiskt beskrivas

$$p(d(x/r = \infty) > d_{gr\ddot{a}ns}) < p_{krav}$$

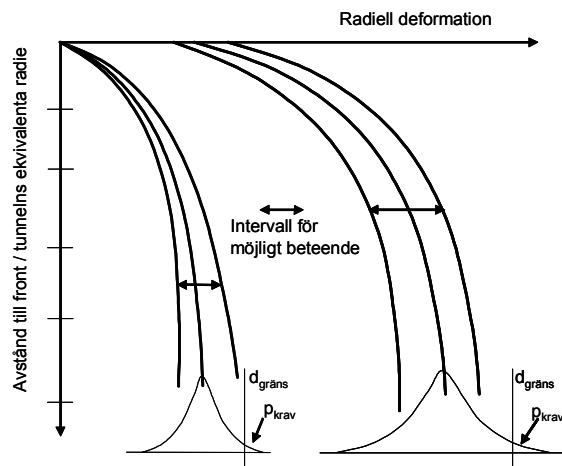
där

x = avståndet mellan aktuell sektion och tunnelns front

r = tunnelns eller bergrummets representativa radie

$d_{gr\ddot{a}ns}$ = gräns för acceptabelt beteende, berg eller förstärkning

p_{krav} = angivet säkerhetskrav.



Figur 5-7. Det principiella sambandet visas mellan osäkerhet i konstruktionens beteende (fördelningsfunktionen) och given säkerhetsnivå relaterad till fastlagd gräns för acceptabelt beteende.

I princip kan två typfall urskiljas. I det första typfallet utgörs frågeställningen av hur man med hjälp av mätningar i en sektion kan förbättra bedömningen av stabiliteten i den sektion som mätningarna utförs. Utförs mätningar tills hela tunneln är klar går det att uttala sig om uppkomna deformationer är acceptabla eller ej. I många fall önskas en förhandsuppfattning för att man i tid skall kunna utföra ytterligare förstärkningsåtgärder om resultatet från mätningarna inte är acceptabelt. Detta fall kallas nedan för "data från enskild mätsektion".

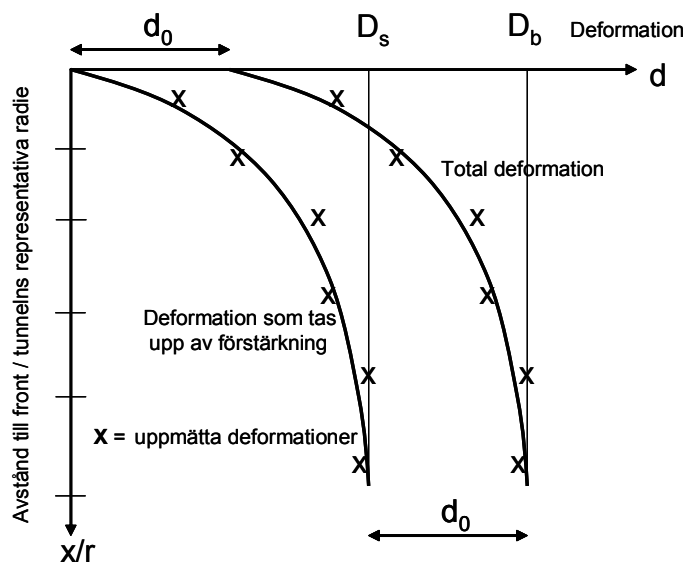
I det andra typfallet utgörs frågeställningen av hur man med hjälp av resultat från mätningar i några sektioner längs en tunnelsträcka kan göra bedömningar om

stabiliteten i en godtycklig sektion där inga mätningar utförts. Detta fall kallas nedan för ”data från flera mätsektioner”.

Resultat från *enskilda mätsektioner* visar lokalt omkring mätsektionen hur aktuell deformation förhåller sig till någon angiven gräns. En metodik för detta redovisas i kapitel 5.3.3. och 5.3.4. Med *data från flera mätsektioner* kan vi skatta intervallet för det bärande huvudsystemets möjliga beteende i en godtycklig sektion eftersom vi erhållit kunskap om den verkliga slutdeformationens medelvärde och spridning. En metodik för detta redovisas i kapitel 5.3.5. För det fall att förhandskunskap föreligger om deformationens statistiska parametrar redovisas i kapitel 5.3.6 en metodik att via mätdata från flera mätsektioner applicera statistik för att skatta medelvärdet. Vid upprättandet av design kan beräkningar eller erfarenhet användas för att upprätta en förhandsuppfattning. Som ett alternativ för att anskaffa denna förhandsinformation kan resultat användas från mätningar av deformationer i liknande bergförhållanden. Vi kan dock inte använda samma data till såväl förhandsinformation som att uppdatera vår uppskattning om det möjliga beteendet.

5.3.3 Teoriutveckling avseende data från enskild mätsektion

Den här presenterade modellen för att skatta deformationskurvans trend som funktion av avståndet till tunnelns front bygger på icke-linjär kurvanpassning. Mätningarna av deformationsförloppet skall vara representativt för designproblemet och konstruktionens beteende. Kurvanpassningsfunktionen förutsätter inte med automatik att det är designens förväntade beteende som råder. Det vill säga modellen bygger på att deformationskurvans krökning är okänd och att detta skall bestämmas med hjälp av observationerna.



Figur 5-8. Definition av grundläggande parametrar som beskriver det bärande huvudsystemets principiella beteende.

I figur 5-8 definieras de grundläggande parametrar som beskriver det bärande huvudsystemets beteende. Teoretiskt kan bergmassans beteende beskrivas med följande gränsvillkor.

$$x/r = 0 ; d = d_0$$

$$x/r = \infty ; d = d_b$$

där

d_0 = deformation som uppstått när tunnelfronten befinner sig i aktuell sektion.

d_b = total deformation som bergmassan tagit upp.

Den del av den totala deformationen som normalt observeras via mätningar avser konstruktionens beteende när bergmassa och förstärkning samverkar. Den del av deformationen som förstärkningen utsätts för när den installeras direkt invid tunnelfronten beskrivs med följande gränsvillkor.

$$x/r = 0 ; d = 0$$

$$x/r = \infty ; d = d_s$$

där d_s = total deformation som förstärkningen tagit upp.

Gränsvillkoren för förstärkningen kan användas oberoende av om förstärkningen installeras på något annat avstånd från tunnelfronten. Vid uppritning blir konsekvensen att förstärkningens deformationskurva inte startar i origo utan vid en punkt längs y-axeln (x/r -axeln) som motsvarar det avstånd på vilket förstärkningen installerats.

Utgående från mätningar av hur deformationerna utvecklas söks ett direkt samband som möjliggör att skattningar kan göras av konstruktionens slutdeformation, där varje nytt mätresultat kan användas till en ny skattning. Funktionen för slutdeformationen värde som funktion av deformationsförloppet och gjorda observationerna kan tecknas

$$D_i = f \left\langle X_1, \dots, X_m \left| \frac{x_i}{r}, d_i \right. \right\rangle \quad (5.3)$$

där

X_j = är stokastiska variabler som påverkar deformationsförloppet men som ej är direkt mätbara, totalt m stycken.

D_i = skattning av slutdeformation som också är en stokastisk variabel.

x_i/r och d_i är uppmätta värden på avstånd till tunnelfront respektive deformation.

Funktionen för deformationsförloppet är givetvis relaterad till de bergmekaniska lagarna som gäller för tunneluttag. Svårigheter att hitta analytiska lösningar innebär dock att förenklingar måste göras. Flera olika funktioner kan tänkas som alla har rimligt förlopp. Nedanstående icke-linjära uttryck (hyperbel) är en sådan rimlig funktion för att teckna slutdeformation och deformationsförlopp som beskrivs av figur 5-8. De uppfyller gränsvillkoren som givits ovan. Ekvation 5.4 avser total deformation och ekvation 5.5 avser den del av den totala deformation som bergmassa och förstärkning i samverkan utsätts för.

$$\frac{x}{r} = \frac{B(d - D_0)}{D_b - d} \quad (5.4)$$

$$\frac{x}{r} = \frac{B d}{D_s - d} \quad (5.5)$$

där

B = stokastisk variabel som styr deformationsförloppet och ej direkt mätbar.

D_0 = stokastisk variabel som betecknar deformation som uppkommit när tunnelfronten befinner sig i aktuell sektion.

D_b = stokastisk variabel som betecknar bergmassans slutdeformation (total deformation).

D_s = stokastisk variabel som betecknar bergförstärkningens slutdeformation.

I de allra flesta fall är det förstärkningselementens deformationstålighet i det bärande huvudsystemet som är dimensionerande för bärförmågan hos det samverkande systemet av bergmassa och förstärkning. I den fortsatta framställningen antas att gränsen för konstruktionens acceptabla beteende bestäms av förstärkningssystemets töjnings- eller deformationstålighet. Samma metodik är dock i princip användbar för att bedöma bergmassans deformationstålighet.

Genom att lösa ut den uppmätta deformationen, d , i ekvation 5.5 kan följande uttryck tecknas för deformationskurvan som funktion av avståndet till tunnelfronten

$$d_i = \frac{\frac{x_i}{r} D_s}{\frac{x_i}{r} + B} \quad (5.6)$$

där

x_i/r och d_i representerar de $i=1,2,..n$ par av mätvärden som erhålls då fronten avancerar.

Inversen av detta uttryck tecknas

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{D_s} + \frac{B}{D_s} \frac{1}{\frac{x_i}{r}} \quad (5.7)$$

Genom variabeltransformation erhålls

$$y = \alpha + \beta x \quad (5.8)$$

där

$$y = \frac{1}{d_i}$$

$$x = \frac{1}{\frac{x_i}{r}}$$

Regressionskoefficienterna är konstanter och tecknas

$$\alpha = \frac{1}{D_s} \quad (5.9)$$

$$\beta = \frac{B}{D_s} \quad (5.10)$$

Ekvation 5.8 är ett linjärt uttryck med de stokastiska variablerna α och β . Det går därmed att utföra regressionsanalys baserat på uppmätta data på deformation och på avståndet mellan mätsektionen och tunneln. Genom regressionsanalys med minsta kvadratmetoden kan man erhålla en skattning på deformationens medelvärde som funktion av x . Vidare kan också variansen av medelvärdet erhållas som funktion av x (villkorad varians).

För att förbättra bedömningen av stabiliteten i den sektion som mätningarna utförs söker vi skatta medelvärde och standardavvikelse på den stokastiska variabeln D_s . Skattningar av D_s kan i princip göras successivt för varje nytt mätvärde som föreligger genom att sätta $x=0$ i ekvation 5.8. Detta är dock per definition en extrapolation, eftersom det sökta värdet på slutdeformationen inte är en del av intervallet för den datamängd som är underlag till regressionen. Denna osäkerhet behöver beaktas.

När avståndet mellan tunneln och aktuell mätsektion ökar avklingar normalt deformationerna. Det kan betraktas som att osäkerheten om slutdeformationen medelvärde gradvis minskar. Det är därför rimligt att anta att variansen omkring slutdeformationen värde kan reduceras med minskande värden på x , givet ett avklingande deformationsförlopp, dvs vid ett ökande avstånd, x_i , från mätsektionen enligt ekvation 5.8. I Ang & Tang (2007) beskrivs en metodik för att vikta data i samband med linjär regressionsanalys. Denna metod sammanfattas nedan. Väntevärdet för den linjära regressionen av ekvation 5.8 är

$$E\langle Y|X = x \rangle = \alpha + \beta x \quad (5.8a)$$

Anta att den villkorade variansen för denna linjära funktion styrs av en känd funktion $g(x)$ enligt

$$V\langle Y|X = x \rangle = \sigma^2 g^2(x) \quad (5.11)$$

där
 $\sigma^2 =$ okänd konstant

Låt viktningen av data ske med ett värde som är proportionell med inversen på variansen enligt

$$w_i = \frac{1}{V\langle Y|X = x \rangle} = \frac{1}{\sigma^2 g^2(x)} \quad (5.12)$$

I enlighet med principerna för minsta kvadratmetoden uppställs kvadratsumman av avståndet mellan det observerade värdet och värdet från regressionslinjen. Detta kan tecknas

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \quad (5.13)$$

Regressionskoefficienterna kan bestämmas genom att söka minimum av kvadratsumman. Det kan utföras genom att derivera ekvation 5.13 med avseende på α och β , sätta båda dessa uttryck lika med noll och lösa det ekvationssystem som bildas. Minsta kvadratskattningen av regressionskoefficienterna tecknas

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum w_i y_i - \hat{\beta} \sum w_i x_i}{\sum w_i} \quad (5.14)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum w_i (\sum w_i x_i y_i) - (\sum w_i x_i)(\sum w_i y_i)}{\sum w_i (\sum w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i)^2} \quad (5.15)$$

där

$$w_i = \sigma^2 w_i' = \frac{1}{g^2(x_i)}$$

En väntevärdesriktig skattning av variansen baserad på n stycken värden är

$$s^2 = \frac{\sum w_i (y_i - \alpha - \beta x_i)^2}{n-2} = \frac{\sum w_i (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-2} \quad (5.16)$$

Den villkorade skattningen av medelvärdets standardavvikelse uttrycks som en funktion av x och blir enligt ekvation 5.11

$$s_{y|x}^2 = s^2 g^2(x) \quad (5.17)$$

Eftersom regressionskoefficienterna baseras på ett begränsat antal mätvärden är dessa t-fördelade och man kan visa att koefficienterna har (n-2) frihetsgrader. Detta betyder att det med regressionsanalys skattade medelvärdet enligt ekvation 5.8a, också är t-fördelat med (n-2) frihetsgrader för ett givet värde x. Med detta som utgångspunkt kan ett godtyckligt konfidensintervall bestämmas för den linjära ekvationen 5.8a. Givet ett värde $x=x_i$ erhålls

$$(\mu_{y|x})_{1-\alpha} = \bar{y}_i \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-2} s_{y|x} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{x_i^2 - n\bar{x}^2}} \quad (5.18)$$

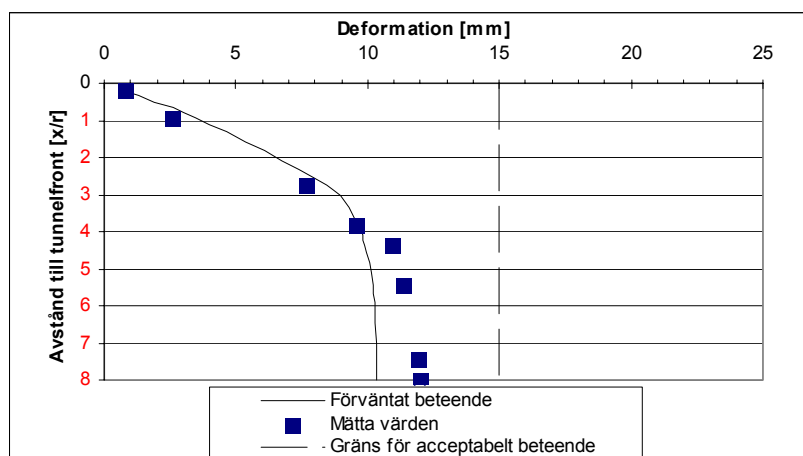
Vid prognostisering av deformationsförloppet enligt ovanstående teorier bör data som används kvalitetssäkras. Det är speciellt viktigt för de första mätvärdena då det relativa mätfelet kan vara stort. Det vill säga då värden på deformationer och avstånd till fronten ligger relativt nära upplösningen på mätningarna.

Den här presenterade beräkningsmodellen för deformationsförloppet förutsätter inte att trenden på deformationen ska avklinga på något förutbestämt sätt. Den prognostiserade slutdeformationen bör därför alltid jämföras och relateras till konstruktionens förväntade beteende enligt designberäkningar och erfarenhet från liknande bergförhållanden.

I ett hypotetiskt exempel åskådliggörs hur den löpande skattningen av slutdeformationen för förstärkningselementen i det bärande huvudsystemet kan utföras för en enskild mätsektion. Använda data kommer från ett praktikfall och från en tunnel där bergguttaget utfördes med galleri och pall. Här redovisade värden på deformationer avser de som uppkom efter installation av förstärkning i den undre delen av tunnelsektionen i samband med bergguttag av pallen. Mätdata visas i tabell 5-1 samt i figur 5-9. I figur 5-9 visas också det förväntade deformationsförloppet baserad på designförutsättningarna. Deformationsförloppet visar att det är rimligt att anta att variansen på skattningen av medelvärdet med avseende på slutdeformationen D_s , minskar med antalet uppmätta värden på deformationen. I figur 5-10 visas mätdata presenterade i tabell 5-2 efter variabeltransformation. Det första mätvärdet i tabell 5-2 visas inte i figuren men medverkar i beräkningarna. Mätdata indikerar också att spridningen av mätdata minskar med minskande x .

Tabell 5-2. Mätdata och förväntade värden för ett hypotetiskt exempel.

Mätning	Uppmätta värden	
	Deformation, d_i [mm]	Avstånd till tunnelfront x_i/r
1	0.9	0.2
2	2.5	0.9
3	7.7	2.7
4	9.6	3.8
5	11	4.4
6	11.3	5.5
7	11.9	7.5
8	12	8



Figur 5-9. Mätdata och förväntat deformationsförlopp enligt design för ett hypotetiskt exempel.

Figur 5-10 visar också regressionslinjen och beräkningsgången baserad på åtta par mätvärden visas i tabell 5-3 samt exemplifieras nedan. Först beräknas regressionskoefficienterna. Därefter kan regressionslinjen och standaravvikelsen skattas för varje givet x_i . För dessa beräkningarna används ekvation 5.14, 5.15, 5.16 samt 5.17. Ett exempel på hur konfidensintervallet beräknas för regressionslinjen baserat på diskreta värden visas också. För det används ekvation 5.18.

$$\hat{\beta} = \frac{\sum w_i (\sum w_i x_i y_i) - (\sum w_i x_i)(\sum w_i y_i)}{\sum w_i (\sum w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i)^2} = \frac{191.24 \times 3.51 - 32.91 \times 17.24}{191.24 \times 8 - 32.91^2} = 0.23$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum w_i y_i - \hat{\beta} \sum w_i x_i}{\sum w_i} = \frac{17.24 - 0.23 \times 32.91}{191.24} = 0.050$$

$$s^2 = \frac{\sum w_i (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - 2} = \frac{0.0119}{(8 - 2)} = 0.00199$$

$$s_{y|x} = \sqrt{s^2 g^2(x)} = \sqrt{0.00199 \times x^2} = 0.0446 \times x$$

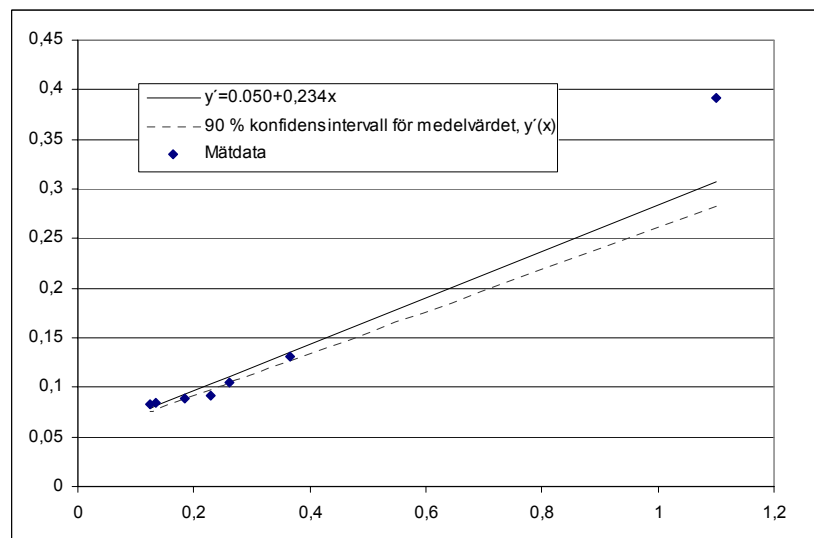
$$(\mu_{y|x})_{1-\alpha} = \bar{y}_i \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-2} s_{y|x} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{x_i^2 - n\bar{x}^2}} \Rightarrow$$

$$(\mu_{y|0.125})_{0.90} = 0.079 - 1.44 \times 0.0446 \times 0.125 \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{(0.125 - 0.99)^2}{(31.78 - 8 \times 0.99^2)}} = 0.076$$

där

$$\bar{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i = 0.050 + 0.234 \times 0.125 = 0.079$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{7.9}{8} = 0.99$$



Figur 5-10. Deformationsförloppet som funktion av det växande avståndet mellan mätsektionen och tunnelfronten efter variabeltransformation. Regressionslinjen och 90 % konfidensintervall för regressionslinjen är baserat på dessa mätdata.

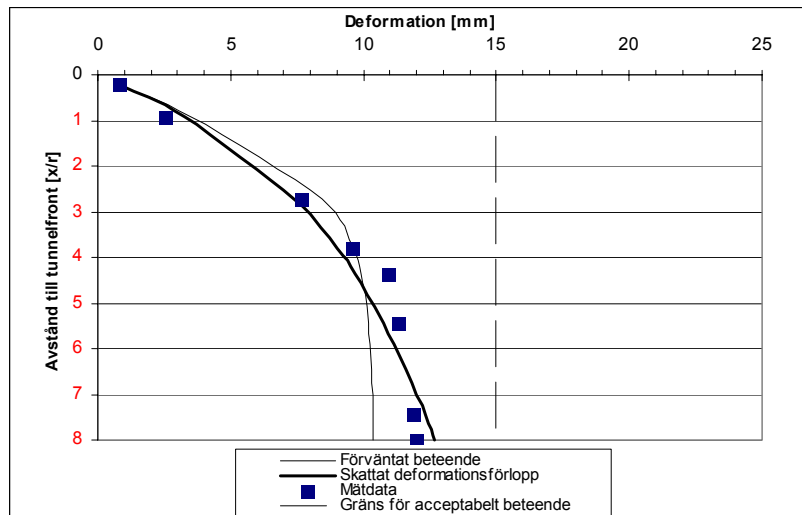
Tabell 5-3. Beräkningsgång enligt ovan exempel.

N	x/r	d _i [mm]	x _i = r/x	y _i = 1/d _i	x _i ²	w _i	w _i x _i	w _i y _i	w _i x _i y _i	w _i x _i ²	y' _i =	w _i (y _i -y' _i) ²
1	0,2	0,8	5,5	1,25	30,25	0,03	0,18	0,04	0,23	1	1,34	0,0003
2	0,9	2,6	1,1	0,39	1,21	0,83	0,91	0,32	0,36	1	0,31	0,0059
3	2,7	7,7	0,37	0,13	0,13	7,44	2,73	0,97	0,36	1	0,14	0,0002
4	3,8	9,6	0,26	0,10	0,07	14,58	3,82	1,53	0,40	1	0,11	0,0006
5	4,4	11	0,23	0,09	0,05	19,04	4,36	1,74	0,40	1	0,11	0,0028
6	5,4	11,3	0,18	0,09	0,03	29,75	5,45	2,63	0,48	1	0,09	0,0005
7	7,4	11,9	0,13	0,08	0,02	55,57	7,45	4,67	0,63	1	0,08	0,0004
8	8	12	0,12	0,08	0,02	64	8	5,33	0,67	1	0,08	0,0011
SUMMOR			7,90	2,22	31,78	191,24	32,91	17,24	3,51	8		0,0119

Syftet är att löpande skatta värden på slutdeformationen D_s . För att utföra minsta kvadratskattningen efter varje ny mätning behöver ett antal summor beräknas. Alla dessa summor baseras på existerande värden i tabell 5-2. I tabell 5-4 visas summorna för $n \geq 3$. Där visas också regressionskonstanterna samt minsta kvadratskattningen av de stokastiska variablerna D_s och B .

Tabell 5-4. Summor av variabler i tabell 5-2 för att löpande bestämma regressionskoefficienterna i ekvation 5.14 och 5.15.

N	$\sum x_i$	$\sum x_i^2$	$\sum w_i$	$\sum w_i x_i$	$\sum w_i y_i$	$\sum w_i x_i y_i$	α'	β'	$D_s = 1/\alpha'$ [mm]	$B = D_s \times \beta'$
3	6,97	31,59	8,30	3,82	1,34	0,94	0,041	0,26	24,4	6,4
4	7,23	31,66	22,88	7,64	2,86	1,34	0,037	0,26	27,1	7,2
5	7,46	31,72	41,92	12	4,60	1,74	0,033	0,27	30,5	8,2
6	7,64	31,75	71,67	17,45	7,24	2,22	0,037	0,26	27,0	7,1
7	7,78	31,77	127,24	24,91	11,91	2,85	0,046	0,24	21,8	5,3
8	7,90	31,78	191,24	32,91	17,24	3,51	0,050	0,23	20,1	4,7



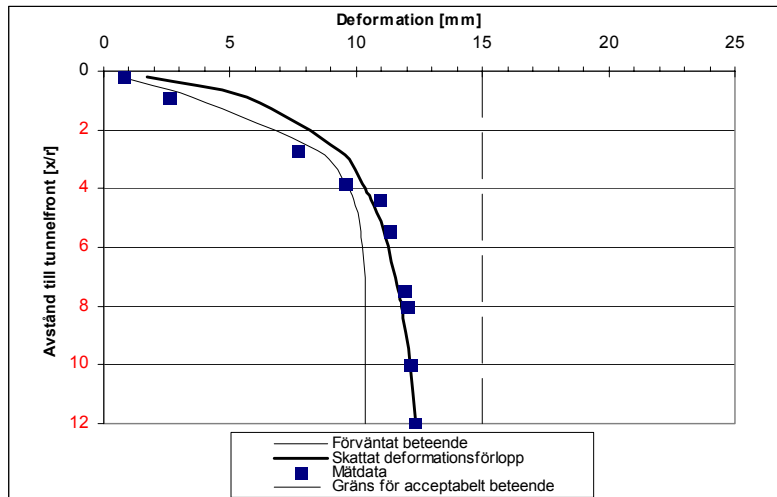
Figur 5-11. Mätdata, förväntat och prognostiserat deformationsförlopp för det här genomräknade exemplet.

Med ekvation 5.18 kan medelvärdet på slutdeformationen D_s skattas för $x=0$, givet antagandet att variansen är konstant och lika som i den sista regressionspunkten. Ekvation 5.18 beaktar också att spridningen beror av avståndet till datamängdens medelvärde, det är med den sista termen under rottecknet. Genom att betrakta D_s som en stokastisk variabel kan extrapolationen av medelvärde och varians för $x=0$

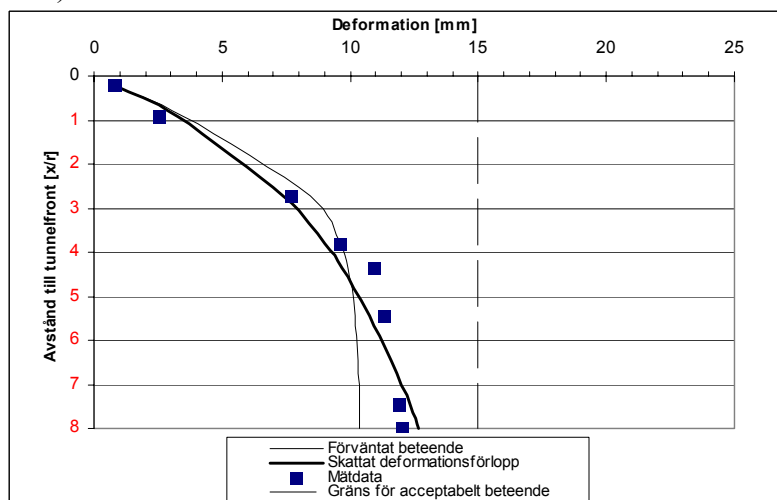
användas för att bedöma sannolikheten för att medelvärdet befinner sig inom ett visst givet intervall. På basis av ekvation 5.18 görs bedömningen att det är 90 % sannolikhet att D_s ligger i intervallet mellan 19 mm och 21.5 mm. Det beräknas enligt

$$(\mu_{Y|0.0})_{0.90} = 0.050 \pm 1.44 \times 0.0446 \times 0.125 \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{(0.0 - 0.99)^2}{(31.78 - 8 \times 0.99^2)}} = (0.047 \rightarrow 0.053)$$

Enligt det frekventistiska synsättet är konfidensen 90 % att det verkliga medelvärdet på D_s befinner sig i intervallet mellan 19 mm och 21.5 mm. Figur 5-11 visar mätdata, det förväntade deformationsförloppet samt den skattade kurvan för deformationsförloppet som baserats på de extrapolerade värdena för $D_s=20.1$ mm och $B=4.7$. Ovanstående exempel visar att teorin för att vikta mätdata har goda egenskaper och kan användas för att skatta slutdeformationen i ett avklingande deformationsförlopp. I tabell 5-3 visas att slutdeformationen minskar från och med $n=6$, vilket också motsvarar det avstånd från tunneln när deformationsförloppet tydligt börjar avklinga. Det har här antagits för ett avklingande deformationsförlopp att variansen minskar linjärt med minskande x , det vill säga när avståndet, x_i , från mätsektionen till tunneln ökar, se ekvation 5.8. Ett ytterligare antal mätvärden skulle naturligtvis ha stärkt prognosen, men det intressanta är att erhålla tidig information för att fatta beslut om kompletterande förstärkningsinsatser skall utföras. Man finner att viktningen är den faktor som påverkar regressionslinjens lutning snabbast och därmed möjligheten att erhålla en tidig och säker prognos på slutdeformationen. Ytterligare studier behövs för att kunna ge riktlinjer för hur viktningen skall anpassas, exempelvis till hur snabbt deformationsförloppet avklingar. I exemplet ovan ger förmodligen den linjära viktningen ett konservativt värde vid extrapolationen för att skatta D_s . För det aktuella exemplet avstannade också deformationen i tunneln omkring det relativa avståndet $x/r=12$ och då uppgick deformationen till $d_s=12.3$ mm.



a)



b)

Figur 5-12. Resultat av regressionsanalys med a) kvadratiska vikter och b) linjära vikter (figur 5-11). Bägge uppritade i deformation - avståndsdigram. Notera den mycket bra anpassningen som erhålles vid kvadratiska vikter.

Val av vikter bör utgå från dels det bergmekaniska problemet, dels mätnoggrannheten. Det branta förloppet som beskriver deformationsutvecklingen när mätsektionen ligger nära fronten är mer osäkert än när mätsektionen ligger långt ifrån fronten. Deformationsutvecklingen vid fronten påverkas även lokalt av berguttagsmetod och installerad bergförstärkning speciellt vid dåligt berg. Vid dessa förhållande kan det vara rimligt att icke linjära vikter används, se jämförelsen i figur 5-12. Ytterligare studier behövs för att kunna ge riktlinjer för hur viktningen skall anpassas, exempelvis till hur snabbt deformationsförloppet avklingar.

Det finns också framtagna lösningar för en uppdatering av regressionsparametrarna utgående från Bayesiansk statistik, se Ang & Tang (2007).

För funktioner med flera ingående stokastiska variabler kan enligt Ang & Tang (2007) medelvärdet och variansen approximeras genom serieutveckling med Taylors formel kring funktionens medelvärde. Första ordningens approximation av medelvärde och varians av funktionen, $f(X_1, X_2, \dots, X_m)$, kan tecknas med följande uttryck

$$E(d_{x/r}) \approx f(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_m}) \quad (5.22)$$

och

$$VAR(d_{x/r}) \approx \sum_{j=1}^m \sigma_{x_j}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^2 + \sum_{j,k=1}^m \sum_{j \neq k} \rho_{jk} \sigma_{x_j} \sigma_{x_k} \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial X_k} \right) \quad (5.23)$$

där

μ_X = medelvärdet hos ingående stokastiska variabel, dvs. D_s och B

X_j är ingående stokastiska variabler, totalt m stycken, i detta fall två, D_s och B .

ρ_{jk} = korrelationskoefficienten, i detta fall mellan D_s och B .

Det är rimligt att anta att D_s och B är korrelerade eftersom de beror av samma process. Det medför att deformationsförloppets medelvärde i den valfria punkten x/r och dess varians tecknas

$$E(d_{x/r}) \approx \bar{d}(x/r) = \frac{x/r \bar{d}_s}{x/r + \bar{b}} \quad (5.24)$$

$$VAR(d_{x/r}) \approx \sum_{j=1}^2 s_{x_j}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^2 + 2s_{d_s} s_b \left(\frac{\partial f}{\partial X_{d_s}} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial X_b} \right) \quad (5.25)$$

där ingående partiella derivator av ekvation 5.24 tecknas

$$\frac{\partial f}{\partial X_b} = -\frac{x/r \bar{d}_s}{(x/r + \bar{b})^2} \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial f}{\partial X_{d_s}} = \frac{x/r}{x/r + \bar{b}} \quad (5.27)$$

Deformationsförloppets standardavvikelse är

$$s_{x/r} = \sqrt{VAR(d_{x/r})} \quad (5.28)$$

där variansen bestäms med ekvation 5.25.

Med ekvationerna 5.19 till och med 5.28 kan medelvärdet och medelvärdets spridning för det kontinuerliga deformationsförloppet bestämmas. Kraven på gränstillstånden som ställts i design, det vill säga sannolikheten för att innehålla gräns för acceptabel beteende, kan också skattas.

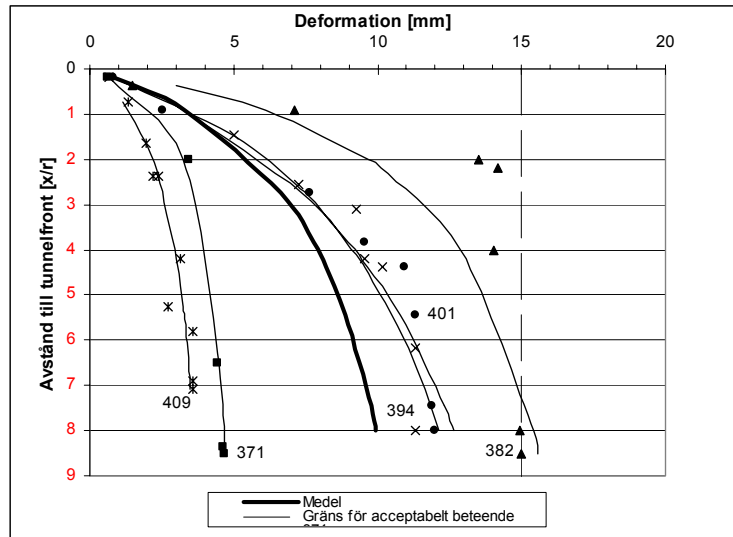
I ett hypotetiskt exempel åskådliggörs principerna för skattning av slutdeformationen för förstärkningselementen i det bärande huvudsystemet. Indata

är resultat från oberoende mätningar av slutdeformationer i ett antal mätsektioner där bergförhållandena bedöms likvärdiga. I figur 5-14 visas från ett praktikfall det uppmätta deformationsförloppet i fem mätsektioner för det bärande huvudsystemet. Deformationsförloppet betraktas vara representativt för aktuell tunnelsektion. Figur 5-14 visar dels det skattade deformationsförloppet beräknat med regressionsanalys för varje mätsektion, dels gränsen för acceptabelt beteende enligt design som är 15 mm. Regressionsanalysen är utförd med de teorier som beskrivits i avsnitt 5.3.4 och utförd med linjär viktning. Dessutom visas deformationsförloppets medelvärde baserat på alla fem mätsektioner enligt teorier redovisade i detta avsnitt. I tabell 5-5 visas resultatet tillsammans med referenser till de ekvationer som använts i beräkningarna. Som visas i figur 5-14 avstannar deformationerna när det relativa avståndet, x/r , är mellan 8 och 9.

Tabell 5-5. Uppmätta värden samt beräknade värden gällande regressionskoefficienter och medelvärde och standardavvikelse för deformationsförlopp av fem mätsektioner.

Sektion	Uppmätt slutdeformation vid $\sim x/r=8-9$	Regressionsanalys d_s [mm]	b	$d'(x/r=8)$ [mm] (ekvation 5.24)
371	4.7	5.4	1.3	4.6
382	15.0	19.1	1.9	15.4
394	11.3	17.9	3.8	12.1
401	12.0	20.1	4.7	12.6
409	3.6	4.6	2.1	3.5
Medelvärde	-	13.4 (ekv. 5.19)	2.8 (ekv. 5.20)	10.0 (ekvation 5.24)
Standardavvikelse	-	7.7 (ekv. 5.21)	1.4 (ekv. 5.21)	7.0 (ekvation 5.28)

I den statistiska analysen av deformationsförloppet har $x/r=8$ antagits vara den praktiska slutdeformationen. Motivet är att det är slutdeformationen som är intressant med avseende på att reducera osäkerheterna dels omkring bärande huvudsystemets beteende, dels om säkerhetsmarginalen innehålls till gräns för acceptabelt beteende eller något annat gränsvärde. Därför har deformationsförloppets skattade slutdeformation beräknats med det värde på x/r där de observerade deformationerna avstannat.



Figur 5-14. Slutdeformationen för förstärkningselementen i fem mätsektioner för det bärande huvudsystemet. Vidare också beräknade medelbeteendet baserat på de fem mätsektionerna samt gränsen för acceptabelt beteende enligt design.

Den beräknade slutdeformationens medelvärde är 10 mm och dess standardavvikelse är 7 mm. Spridningen är således stor vilket också kan förstås av uppmätta deformationsförlopp. Det kan tyda på att den första och sista mätsektionen på sträckan kan tillhöra en annan population. Vi har dock antagit här att dessa två sektioner tillhör samma population.

Med antagandet att den slutdeformationen är normalfördelad går det att skatta sannolikheten för att den ska understiga ett angivet gränsvärde. Fastlagt värde på gränsen för acceptabelt beteende är 15 mm och sannolikheten för att denna gräns ska innehållas i relation till det beräknade medelvärdet tecknas med ekvation 4.3 som

$$P(X < 15) = \Phi\left(\frac{15-10}{7}\right) = \Phi(0.72) = 0.76$$

alternativt kan man se det som t-fördelning med $n-1=4$ frihetsgrader, vilket ger

$$P(X < 15) = F_t\left(\frac{15-10}{7}\right) = F_t(0.72) = 0.74$$

eller om slutdeformationen är lognormalfördelad erhålls från ekvation 4.6

$$P(x < 15) = \Phi\left(\frac{\ln 15 - 2.22}{\sqrt{0.41}}\right) = \Phi(0.77) = 0.78$$

där λ och ζ erhålls ur ekvation 4.7 respektive 4.8 enligt

$$\lambda = \ln 10 - \frac{1}{2} 0.41^2 = 2.22$$

$$\zeta^2 = \ln\left[1 + \left(\frac{10}{7}\right)^2\right] = 0.41$$

Som väntat är det t-fördelningen som ger den mest konservativa bedömningen av att sannolikheten överstiger 15 mm. Den skattade sannolikheten är i detta fall cirka 0.26 att deformationerna överskrider 15 mm i en godtycklig tunnelsektion. Mätningarna visar att i en av mätsektionerna tangerar också slutdeformationen det angivna gränsvärdet på 15 mm. Det bör påpekas att i det aktuella fallet är avståndet mellan mätsektionerna litet, i medel ca 9.5 m. Detta innebär i praktiken att sträckan med de aktuella bergförhållandena är för kort för att uppfylla kravet på att en ”godtycklig” sektion existerar. Detta faktum skall därmed beaktas i utsagan om sannolikheten för överskridande av gräns för acceptabelt beteende. Om den studerade sträckan hade varit lång är därför sannolikheten stor att deformationerna lokalt skulle överstiga 15 mm.

Mätningarna av deformationerna indikerar att de geologiska förhållandena på sträckan varierar och att mätdata eventuellt kan härröra från mer än en population. Det bör i praktiken föranleda en noggrannare studie av de bergmekaniska och geologiska förutsättningarna i syfte att undersöka om så är fallet. Vidare bör man också besiktiga förstärkningens integritet för att kunna bedöma förstärkningens beteende med avseende på dess deformationsupptagande. Som ett komplement bör man också klarlägga om förstärkningsinsatsen varierat längs sträckan. Först därefter föreligger tillräcklig information för att göra ingenjörsmässiga bedömningar om förstärkningsinsatsen behöver omvärderas och vilken återkoppling som ska ske till design.

5.3.5 Bayesiansk uppdatering

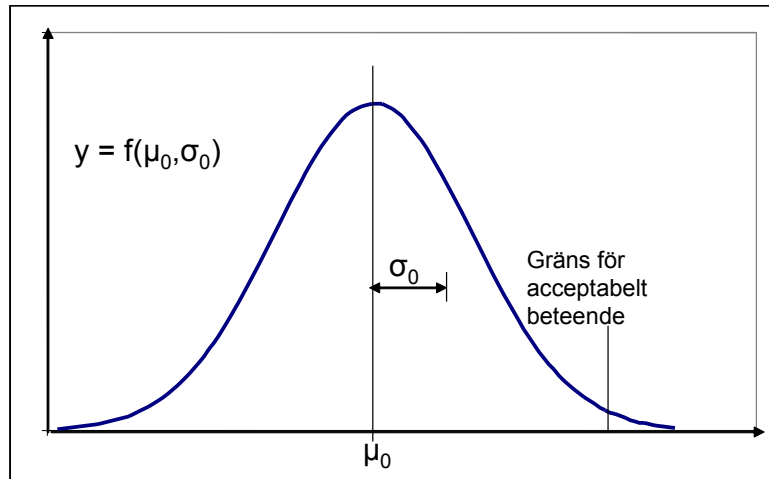
I kapitel 4 har teorier presenterats med vars hjälp bedömningar kan utföras gällande det bärande huvudsystemets säkerhet. I princip kan dessa appliceras för bedömningar både med avseende på lokal stabilitet baserat på information från en mätsektion och på stabilitet längs en tunnelsträcka baserad på information från ett antal mätsektioner. Problemställningens natur och de bedömningar om säkerhet som görs definieras i huvudsak av brist på tillräcklig information och av att resultat från mätningar inte kommer från repeterbara ”försök”. Nedanstående exempel visar bayesiansk uppdatering avser analys av data från flera mätsektioner och förutsätter ingen förhandsinformation om det förväntade beteendet, så kallad diffus prior.

I figur 5-15 visar en hypotetisk bayesiansk prediktionsfördelning för en godtycklig kontrollparameter. I fördelningen finns all osäkerhet om parametern samlad och för en normalfördelad parameter beskrivs den med ekvation 4.10. Den totala osäkerheten, σ_0 , bestäms med hjälp av dels förhandsuppfattningen om medelvärdets spridning, σ' , dels parameterens spridning, σ . Den totala osäkerheten kan då tecknas

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma^2 + \sigma'^2} \quad (5.29)$$

och för medelvärdena gäller

$$\mu_0 = \mu' \quad (5.30)$$



Figur 5-15. En godtycklig kontrollparameters bayesianska fördelning.

Om kontrollparametern antas vara normalfördelad $N(\mu, \sigma)$, där σ är känt, och man modellerar informationen om det okända medelvärdet, a priori, som en normalfördelning, $N(\mu', \sigma')$, följer att funktionens fördelning a posteriori också är en normalfördelning (konjugerad prior). Baserat på n stycken observationer av den stokastiska variabeln (kontrollparametern) X som har medelvärdet \bar{x} kan kunskapen om variabelns medelvärde och standardavvikelse uppdateras med en färdig lösning. Kontrollparameterns fördelning kan då tecknas med den bayesianska prediktionsfördelningen som redovisats i kapitel 4. Ekvationerna 4.10 till 4.12 upprepas nedan för tydlighetens skull. Den bayesianska uppdateringen tecknas med

$$X \in N\left(\mu'', \sqrt{\sigma^2 + \sigma''^2}\right) \quad (5.31)$$

där

$$\mu'' = \frac{\bar{x}\sigma'^2 + \mu'\sigma^2/n}{\sigma'^2 + \sigma^2/n} \quad (5.32)$$

$$\sigma'' = \sqrt{\frac{\sigma'^2\sigma^2/n}{\sigma'^2 + \sigma^2/n}} \quad (5.33)$$

μ' = förhandsinformation (a priori) om kontrollparameterns medelvärde

σ' = förhandsinformation (a priori) om medelvärdets standardavvikelse

σ = kontrollparameterns standardavvikelse (känd eller skattad)

\bar{x} = ny information om kontrollparameterns medelvärde ($= \sum x_i/n$)

n = antal mätvärden eller antal mätresultat (kopplad till aktuell frågeställning).

Designberäkningar om konstruktionens förväntade beteende och andra erfarenheter kan ligga till grund för uppfattningen om kontrollparameterns bayesianska prediktionsfördelning a priori. I designberäkningen kan normalt inte deformationernas storlek kvantifieras för enskilda tunnelsektioner. Däremot går det med hjälp av designberäkningar eller baserat på erfarenheter att etablera en

uppfattning om deformationens medelvärde, μ_0 , och spridning, σ_0 , för en viss bergkvalitet och förstärkningsinsats. Dessa värden kan användas som fördelningen a priori. Vidare förutsetts att populationens standardavvikelse, σ , är känd.

Som tidigare påpekats ligger det i problemets natur att spridningen inte är känd för applikationer som avser byggandet i berg. Därför kommer förhandsuppfattningen om spridningen att innehålla ett mått av subjektivitet. Detta bör beaktas när praktiska slutsatser om konstruktionens beteende baseras på det teoretiska betraktelsesätt som demonstreras här.

Kontrollparameterns standardavvikelse kan baseras på observerade mätvärden (skattning) eller vara känd från tidigare erfarenheter. För det sistnämnda fallet kan till exempel variationskoefficienten användas om denna är känd eller accepterad. Det vill säga medelvärdets spridningen kan skattas som en konstant multiplicerat med medelvärdet. Villkoret är dock att den uppskattade osäkerheten, σ_0 , alltid är större än det uppskattade värdet på σ som är den underliggande processens spridning. I praktiskt ingenjörsarbete betyder det att vår a priori uppfattning av medelvärdets statistiska parametrar erhålles med följande ekvationer:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_0^2 - \sigma^2} \quad (5.34)$$

$$\mu' = \mu_0$$

Nedanstående exempel visar principen för hur medelvärdet och medelvärdets spridningen kan uppdateras. Vidare hur den totala osäkerheten för en kontrollparameters fördelning beräknas i syfte att göra en utsaga om den mätbara kontrollparametern. Vi har här på basis av designberäkningarna och tidigare erfarenheter uppskattat att $\mu_0=12$, att $\sigma_0=5$ och att $\sigma=3$. Exemplet baseras på deformationsdata diskuterade i kapitel 5.3.4, se tabell 5-6.

Tabell 5-6. Data och beräknade värden gällande parametrar för Bayesiansk uppdatering av konstruktionens förväntade beteende med hjälp av uppmätta värden på slutdeformation.

Sektion	Uppmätt vid $\sim x/r=8$ [mm]	Förväntat beteende enligt designberäkningar [mm]
371	4.7	-
382	15.0	-
394	11.3	-
401	12.0	-
409	3.6	-
Medelvärde	9.3	$\mu_0 = 12$
Standardavvikelse		$\sigma_0 = 5$
Medelvärdets standardavvikelse		$\sigma' = \sqrt{5^2 - 3^2} = 4$

Uppdateringen av kontrollparameterns medelvärde och medelvärdets standardavvikelse utförs med ekvationerna 5.32 respektive 5.33 enligt följande

$$\mu'' = \frac{\bar{x}\sigma'^2 + \mu'\sigma^2/n}{\sigma'^2 + \sigma^2/n} = \frac{9.2 \times 4^2 + 12 \times 3^2/5}{4^2 + 3^2/5} = 9,5 \text{ mm}$$

$$\sigma'' = \sqrt{\frac{\sigma'^2\sigma^2/n}{\sigma'^2 + \sigma^2/n}} = \sqrt{\frac{4^2 \times 3^2/5}{4^2 + 3^2/5}} = 1.3 \text{ mm}$$

Kontrollparameterns uppdaterade fördelning kan då tecknas med ekvation 5.31 enligt

$$X \in N(9.5, \sqrt{3^2 + 1.3^2}) = N(9.5, 3.3) \text{ mm}$$

Det vill säga, konstruktionens förväntade beteende har uppdaterats genom att bestämma nya statistiska parametrar för normalfördelningen. Observera att spridningen avser den totala osäkerheten, det vill säga fördelningen för slutdeformationen i en godtycklig mätsektion.

Gränsen för acceptabelt beteende har fastlagts till 15 mm. Skattningen av sannolikheten för att gränsvärdet 15 mm ska innehållas i relation till det beräknade medelvärdet tecknas med ekvation 4.3 som

$$P(X < 15) = \Phi\left(\frac{15 - 9.5}{3.3}\right) = \Phi(1.73) = 0.96$$

Detta kan jämföras med den initiala säkerheten baserad på design och erfarenhet som tecknas

$$P(X < 15) = \Phi\left(\frac{15 - 12}{5}\right) = \Phi(0.6) = 0.73$$

Uppdateringen av medelvärdet och medelvärdets spridning indikerar en minskad sannolikhet att deformationerna ska överskrida gräns för acceptabelt beteende. Teoretiskt från cirka 27 % till cirka 4 % för en godtycklig tunnelsektion längs den studerade sträckan. Resultatet visar att osäkerheten om medelvärdets spridning reduceras med relativt få observationer. Det är viktigt att påpeka att detta gäller under förutsättning att spridningen hos den underliggande processen är känd.

5.4 Sammanfattning av praktiska verktyg

Vi har i detta kapitel visat exempel på hur statistisk analys av observationer av en konstruktions beteende kan bidra till att reducera den totala osäkerheten avseende det geotekniska beteendet. Det vill säga att med ökad säkerhet kunna;

- lägesbestämma förekommande bergkvaliteter,
- bedöma om utförda åtgärder innehåller förväntad kvalitet,
- bedöma det bärande huvudsystemets beteende, det vill säga åtgärdernas förväntade verkningsätt och deras samverkan med berget.

De statistiska analyserna visar och beaktar att konstruktionens säkerhetsmarginal inte bara beror av den observerade storhetens (kontrollparametern) värde. Den beror i lika hög grad av omfattningen av gjorda observationer. Detta beaktas via variansen (standardavvikelsen) som har stor betydelse vid skattning av osäkerheter. Vi har valt att visa på möjliga statistiska verktyg utifrån tre exempel. De är sprutbetongens tjocklek, deformationsmätning i enskild tunnelsektion och deformationsmätning i flera tunnelsektioner i samma bergparti. Vi har inte haft för avsikt att utifrån resultatet av våra analyser mer detaljerat diskutera säkerhetsmarginalen för den aktuella designen och kopplingen till osäkerheterna i det geotekniska beteendet. Vår strävan har varit att;

- ge exempel på robusta metoder för att tolka de mätningar och observationer som skall utföras inom ramen för observationsmetoden,
- demonstrera sätt att återkoppla resultaten av observationer till konstruktionens design.

Vi har utgått från ett bayesianskt synsätt och därför tolkat sannolikhetsbegreppet lite friare än vad som normalt kan göras med det frekventistiska synsättet. I några fall blandas, både i teoriframställning och i diskussion, dessa båda synsätt. Detta är medvetet och syftet har både varit att presentera praktiska verktyg och göra framställningen lättare. Det är av vikt att framhålla att användning av statistiska metoder inte skall ske på ett okritiskt sätt. Varje analys bör grunda sig på bergmekanisk förståelse och kvalitetssäkring av mätdata, annars kan helt missvisande resultat erhållas.

Vid provning av sprutbetongens tjocklek erhålles en datamängd som gör att den klassiska frekventistiska statistiken kan användas. Utgående från problemet kan de i rapporten diskuterade metoderna användas till att ge underlag till dels kontrollernas omfattning dels hur uppmätta värden skall tolkas med avseende på godkänt resultat. Det ger även möjlighet att ge underlag för en ekonomisk styrning med avseende på vilka mål entreprenören bör sikta på.

Vid användande av deformationsmätning av enskild sektion, det vill säga när tidiga observationer skall ligga till grund för beslut om att förstärkningsinsatsen är adekvat, måste utgångspunkten vara en bergmekanisk grundad uppfattning om deformationsförloppet. Utifrån detta kan sedan utsagor göras om förväntad slutdeformation och vilken osäkerhet som finns i utsagan med hjälp av statistisk teori. På grund av att underlaget oftast är ett fåtal mätningar är det lämpligt att ha ett bayesianskt synsätt för att kunna förutsäga (extrapolera) slutdeformationen och dess varians. Forskning om grundläggande egenskaper hos deformationsförloppets statistiska egenskaper erfordras för att kunna ge underlag för den nödvändiga extrapolationen. Vi vill framhålla att konstruktionens verkliga säkerhetsnivå är relaterad till resultatet av fortsatta mätningar medan ovan beskrivna extrapolation är ett beslutsunderlag för arbetenas direkta utförande.

Vid användande av deformationsmätning i flera tunnelsektioner i samma bergparti kan resultatet användas för att bedöma sannolikheten att oönskade deformationer uppkommer i en godtycklig sektion inom det studerade bergpartiet. Utgångspunkten är dels att mätningen sker i en för stabilitetsproblemet signifikant mät punkt dels att andra typer av observationer säkerställer att samma bergkvalité

föreligger. På grund av att endast normalt ett fåtal mätsektioner installeras är ett bayesianskt synsätt att föredra. Om en förhandsuppfattning av förväntade deformationer föreligger kan en uppdatering göras för att kombinera förhandskunskapen och mätresultatet. Eftersom osäkerheten beror på antalet mätsektioner kan värdet av kontrollprogrammets omfattning analyseras i förväg.

6. Slutsatser och rekommendationer

Observationsmetoden är en godkänd design- och dimensioneringsmetod enligt Eurokod. Den förutsätter ett stringent handhavande. För bergbyggnad ser vi metoden som en vidareutveckling av dagens praxis och ser inte heller några speciella problem med att implementera metoden inom ramen för dagens designprocess. Slutmålet är att den byggda berganläggningen skall uppfylla de övergripande krav om bärighet, stadga och beständighet som ställs på byggnadsverk. Utförda observationer skall ses som ett sätt att reducera rådande osäkerheter till en acceptabel nivå. Vi har därför i denna rapport strävat efter att beskriva kopplingen mellan observationsmetoden och en sannolikhetsbaserad dimensionering av berganläggningar.

Observationsmetoden kan användas när det är svårt att fastlägga det geotekniska beteendet enligt Eurokod. I denna studie har detta begrepp definierats med avseende på byggandet i berg och anses vara synonymt med osäkerheten att med acceptabel noggrannhet;

- lägesbestämma förekommande bergkvalitéer,
- bedöma om utförda åtgärder innehåller förväntad kvalitet,
- bedöma det bärande huvudsystemets beteende, det vill säga åtgärdernas förväntade verkningsätt och deras samverkan med berget.

Vilka eller vilken av ovan nämnda faktorer som i det enskilda fallet bidrar till svårigheterna att fastlägga det geotekniska beteendet är avhängigt av projektets natur. I projekteringen används osäkerheterna i det geotekniska beteendet som grund för att formulera designkrav med avseende på bärighet, stadga och beständighet i form av gräns för acceptabelt beteende och intervall för möjligt beteende. Designkraven skall sedan kontrolleras i utförandeskedet med hjälp av ett observationssystem. I detta ingår att utföra observationer, dokumentera och analysera mätdata samt att kommunicera signifikanta händelser så att vid behov kompletterande åtgärder kan utföras.

Ett viktigt moment i projekteringen är således att fastlägga robusta kontrollparametrar som avspeglar rådande designosäkerheter och på ett relevant sätt exponerar signifikanta händelser som påverkar det geotekniska beteendet. Att fastlägga kontrollparametrar som skall observeras är inte helt okomplicerat. Många designparametrar som ingår i beräkningar och i ingenjörsmässiga bedömningar låter sig inte enkelt mätas eller observeras. Observationssystemet måste dock baseras på sådana kontrollparametrar som dels är mätbara, dels relaterar till fysikaliska förutsättningar med direkt påverkan på eller konsekvens för den studerade frågeställningen. Parametrarna kan antingen vara relaterade till bergmassan, till utförda åtgärder eller till det bärande huvudsystemets (samverkanskonstruktionens) beteende. Val av kontrollparametrar bör göras med omsorg och beakta att berganläggningarnas förutsättningar och funktion uppvisar låg grad av repeterbarhet emellan projekt.

Säkerhetstänkande och förståelse för möjliga konsekvenser av avvikelser behöver kommuniceras för att säkerställa ett effektivt genomförande av åtgärder eller förändring av design när faktiska bergförhållanden är sämre än förväntade. Man

får dock inte förbise att ett aktivt arbete med designanpassning kräver att projektet har eller kan aktivera resurser för sådana frågor.

En annan typ av kontrollfunktion som kan underlätta att genomföra anpassning av design är att införa ”tullgränser” eller hållpunkter som identifierats av projektören. Tullgränser är i förväg bestämda avstämningpunkter vilka inte får passeras utan att klartecken har givits från ansvarig konstruktör. Inför passage av en tullgräns krävs att ett specificerat underlag skall vara projektören tillhanda vid en given tidpunkt eller givet geometriskt läge. Tullgränsens syfte är att upprätthålla en effektiv designprocess och kan omfatta att säkerställa att designen grundas på rätt förutsättningar eller att sammanställa fakta för kritiska beslut. Exempel på en tullgräns kan vara att kontrollera design inför tunnelpassage av en svaghetszon eller en vattenförande zon. Vid en i förväg bestämd lokalisering kan till exempel kärnboring utföras dels för att fastställa zonens läge, dels för att säkerställa att projektören har rätt förutsättningar för design. Tullgränser ska användas för komplexa designfrågor där det inte med tillräcklig säkerhet varit möjligt att i förväg och i detalj precisera arbetenas utförande till såväl metodik som geometriskt läge.

Vi vill framhålla vikten av att kontrollera analysresultat med visuella observationer och ingenjörsmässiga bedömningar. Detta gäller även vid brukande av ett administrativt och teoretiskt väl underbyggt system.

För att bidra till den praktiska användningen av observationsmetoden och till att den skall bli en allmänt accepterad designmetod rekommenderar vi att följande delområden studeras:

- Riktlinjer för hur säkerhetsnivån skall fastläggas relativt konstruktionens bärighet, stadga och funktion.
- Lämpliga organisationsformer vid tillämpning av observationsmetoden.
- Betalnings- och kontraktsformer som klarlägger principerna för hur anpassning av design i utförandeskedet skall regleras.

Vi uppfattar att merparten av de osäkerheter som råder inom bergbyggnad är relaterade till brist på kunskap om parametrar av betydelse för design och utförande. En annan osäkerhet följer av svårigheten att bedöma information som inhämtats från fåtalsprovning. Detta innebär att vi har valt ett bayesiansk synsätt på sannolikhetsbegreppet. Detta utgår från en utsaga om den tilltro (*”degree of belief”*) som en person har att en händelse skall inträffa, när all relevant tillgänglig information tas med i övervägandet.

Det bayesianska synsättet ligger nära de principer som observationsmetoden grundas på. En förväntansmodell upprättas i design för till exempel bergmassans och förstärkningens respons på bergguttar. Denna förutsägelse bildar en a priori uppfattning. Under uppförandet av konstruktionen skall data från mätningar och observationer användas för validering och anpassning av design. Detta successiva tillvägagångssätt är i princip ett sätt att löpande reducera osäkerheten i de parametrar som valts för att kontrollera konstruktionens beteende. Genom att använda statistiska variabler för att beskriva dessa osäkerheter finns möjligheten till bayesiansk uppdatering. Åsättande av a priori fördelningar som beskriver vår

förhandskunskap måste dock utvecklas. Det bör påpekas att vid mer omfattande provning närmar sig det bayesianska synsättet det klassiska frekventistiska sannolikhetsbegreppet.

Vi kan konstatera att ytterliggare utveckling och fördjupning måste till för att en sannolikhetsbaserad applikation av observationsmetoden skall komma till användning. Vi måste från bergmekaniska studier bättre kunna beskriva den process i konstruktionens beteende vi vill kontrollera (den datagenererande processen). Den matematiska behandlingen blir enklare om standardavvikelsen är känd hos den datagenererande processen. En framkomlig väg som studeras inom geotekniken är att via uppföljningar fastställa troliga värden på variationskoefficienten och på så sätt få en uppfattning om standardavvikelsen. I brist på underlag har vi i denna rapport både använt värden från provning och antagit värden som vi bedömt vara rimliga. I detta sammanhang ingår också frågan om en kontrollparameters rumsliga fördelning. Det är grundläggande för att kunna diskutera variansreduktion och korrelation av ingående variabler, det vill säga frågan om parameterns osäkerhet kan reduceras när vi har tillgång till närliggande data från samma process.

Ett generellt problem som vi anser föreligga är bristen på grundläggande statistisk kunskap hos dagens ingenjörer. Vidareutbildning fordras även när det gäller de mer grundläggande statistiska sambanden. I mer komplicerade fall än de som har redovisats i rapporten finns numeriska lösningsrutiner. Vissa av dessa är dock så komplicerade att de i dagen läge synes vara svåra att introducera i det praktiska ingenjörsarbetet. Vi bedömer dock att det är viktigt ur ett långsiktigt perspektiv att följa utvecklingen och tillämpningen av mer avancerad bayesiansk statistik med tanke på morgondagens alltmer komplexa bergprojekt.

7. Referenser

- Ang, A., Tang, W. 2007. Probability concepts in engineering. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York
- Aydan, Ö., Agaki, T., Kawamoto, T., 1993. The squeezing potential of rock around tunnels. Theory and prediction. *Rock Mech. and Rock Eng. Vol 26.*
- Banverket (2005), BV Tunnel. Standard BVS 585.40.
- Carranza-Torres, c., Fairhurst, C., 2000. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 15, No. 2.*
- Chang, Y., 1994. Tunnel support with shotcrete in weak rock – A rock mechanics study. Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Christian, J.T., 2004. The thirty-ninth Karl Terzaghi lecture. Geotechnical Engineering reliability: How well do we know what we are doing? *J. of Geotech. and Geoenv. Eng, October.*
- Ciria, 1999. The Observational method in ground engineering: Principles and applications. *Construction Industry Research and Information Association. Report 185.*
- Eurocode 1997-1:2004. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules. European Committee for Standardization.
- Franzén, G., 2006. Europastandarder ett onödigt påfund eller en möjlighet. Bygg och Teknik.
- Finno, R.J., Cavello, M., 2005. Support excavations: Observational method and inverse modelling. *J. of Geotech. and Geoenv. Eng, July.*
- Goricki, A., Schubert, W., Riedmüller, A., 2004. New developments for the design and construction of tunnels in complex rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.41, No. 3 CD-ROM.*
- Geotechnet. www.geotechnet.org.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1982. Underground excavations in rock. A.A. The institute of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., Kaiser P.K., Bawden W.F., 1995. Support of underground excavations in hard rock. A.A. Balkema, Rotterdam.

Hoek, E., Marinos, P., Benissi M., 1997. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak rock and sheared rock masses. The case of Athens schist formation. *Bull. Eng. Geol. Env, No 57*.

IEG, 2005. www.sis.se.

Ikuta, Y., Maruoka, M., Aoki, M., Sato, E., 1994. Application of the observational method to a deep basement excavated using the top-down method. *Géotechnique Vol. 44, No. 4*.

Lindström, B., 2006. Eurokod 7 – Hur påverkas dimensionering av bergkonstruktioner. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, SveBeFo Rapport 78.

Lundman, P., 2006. Projekteringsanvisningar. Dimensionering av det bärande huvudsystemet för bergtunnlar. *Banverket Järnvägssystem Rapport BB 06-04*.

Martin, D.M., Tannant, D.D., Kaiser, P.K., 1999. Stress path and instability around mine openings. *Proc. 9th ISRM congress on rock mechanics, Paris, Vol 1*.

Martin, D.M., Kaiser P.K., Christiansson, R., 2003. Stress, instability and design of underground excavations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.40, 1027-1047*.

Montgomery, D., C., 2001. Introduction to statistical quality control. 4th edition. John Wiley & Sons, New York.

O'Hagan, A., Luce, B.R., 2003. A primer on Bayesian statistics in health economics and outcomes research. MEDTAP International Inc.

Olsson, L., Stille, H., 2002. Observation systems with alarm thresholds and their use in designing underground facilities. SKB R-02-05.

Palmström, A., Stille, H., 2006. Ground behaviour and rock engineering design tools for underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology, accepted for publishing in Vol. 22*.

Peck, R.B., 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique 19, No. 2*.

Peck, R.B., 1973. Influence of Nontechnical Factors on the Quality of Embankment Dams. *Embankment-Dam Engineering. Casagrande Volume*, Wiley, New York, pp. 201-208.

Powderham, A.J., 2002. The Observational method – Learning from projects. *Geotechnical Engineering Vol. 115, Issue 1*.

Powderham, A.J., 1998. The Observational method – Application through progressive modification. *Civil Engineering practice, fall/winter*. Boston Society of Civil Engineers.

- Pötsch M., Schubert W., Goricki, A., Streidl, A., 2004. Determination of rock mass behaviour types – a case study. *Proceedings EUROROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium, Salzburg*.
- Pöschl, I., Kleberger, J., 2004. Geotechnical risk in rock mass characterisation – A concept. www.ic-vienna.at.
- Sakurai, S., Akutagawa, S., Takeuchi, K., Shinji M., Shimizu N., 2003. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method. *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18*.
- Schubert, W., Goricki, A., Reidmüller, G., 2003. The guideline for the geomechanical design of underground structures with conventional excavation. *Felsbau 21*.
- Schubert, W., 2004. Basics and application of the Austrian guideline for the geomechanical design of underground structures. *Proceedings EUROROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium, Salzburg*.
- Schubert, W., Goricki, A., 2004. Probabilistic assessment of rock mass behaviour as basis for stability analyses of tunnels. *Föredrag vid bergmekanikdag, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, SveBeFo*.
- Stille, H., Nord, G., 1983. Support technique for a large silo in poor rock. *Rock Mech. and Rock Eng. Vol. 16*.
- Stille, H., 1986. Experiences of design of large caverns in Sweden. *Proceedings Large Rock Caverns, Helsinki. Pergamon Oxford*.
- Stille, H., Fredriksson, A., 1988. Measurements, calculations and stability prognoses at the SRF undersea repository for low and medium level nuclear waste. *Tunnelling and Underground Space, Vol. 3, No. 3*.
- Stille, H., Sturk, R., 1995. Design and excavation of rock caverns for fuel storage – A case study from Zimbabwe. *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10, 1995*.
- Stille, H., Holmberg, M., Olsson, L., och Andersson, J., 2005. Dimensionering av samverkanskonstruktioner i berg med sannolikhetsbaserade metoder – En inledande studie. *Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, SveBeFo Rapport 70*.
- Stille, H., Palmström, A., 2003. Classification as a tool in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, No. 4*.
- Terzaghi, K., and Peck, R.B., 1948. *Soil mechanics in engineering practice*, 1st edition. John Wiley & Sons, New York.

Terzaghi, K., and Peck, R.B., 1967. Soil mechanics in engineering practice, 2nd edition. John Wiley & Sons, New York.

Vägverket. Tunnel 04, 2004.

Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2001. Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagearbeiten mit Zyklischem Vortrieb.

SveBeFo

Box 47047
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • info@svebefo.se
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--80--SE

tblk.