

OM INSPEKTION AV TUNNLAR MED INNERTAK

Arvid Taube
Lars Olsson

STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

OM INSPEKTION AV TUNNLAR MED INNERTAK

**On the inspection of tunnels with inner lining
systems**

Lars Olsson

Arvid Taube

BeFo Rapport 226
Stockholm 2024
ISSN 1104-1773
ISRN BEFO-R-226-SE

FÖRORD

Ett inspektionssystem måste baseras på en systematisk metodik för effektiv identifiering av skador eller tecken på skador. I denna rapport studeras specifikt metodik för bedömning av det bärande huvudsystem i tunnlar där handnära inspektion inte kan genomföras. Bedömningarna måste därmed baseras på metodiker som inkluderar fjärrinspektion. Därtill studeras hur värdering av skadorna eller observationer skall göras; värdering måste uppfylla rimliga krav på transparens. Såväl teoretisk bakgrund som bakomliggande parametrar för värdering har studerats.

Arbetet, som inleddes 2015 har starka kopplingar med drift- och underhållsrutiner för tunnlar och i rapporten förekommer bland annat referenser till Trafikverkets krav och rutiner i sammanhanget. Krav och rutiner uppdateras ständigt och läsaren måste vara medveten om att vissa referenser inte längre är aktuella. Därtill behandlar rapporten ett område med mycket snabba tekniska landvinningar; så väl teknik kring fjärrinspektion, exempelvis utveckling av drönare, som analysmetoder där också AI baserade och maskininlärningsalgoritmer har utvecklats enormt bara under de senaste åren. Detta förminskar inte detta arbetes övergripande resultat, undersökta metodiker och studerade tekniker. Förutsättningar för olika anläggningsförvaltare att utveckla sina rutiner baserat på detta arbete är stora, och möjligheter för signifikanta effektiviseringar och säkrare bedömningar bedöms som stora.

Arbetsgruppen har haft stöd av Jan Johansson och andra experter som omnämns i referenslistan därtill har en referensgrupp bestående av Lars Rosengren, Håkan Stille, Jan Trädgårdh, Jan-Åke Åkesson, Peter Lund, Andreas Andersson och Per Tengborg bistått med stöd och värdefulla råd. Projektet har finansierats av BeFo tillsammans med Trafikverket och Geostatistik AB.

Stockholm

Patrik Vidstrand

SAMMANFATTNING

Studien som beskrivs i denna rapport syftar till att ta fram underlag för en metodik avseende inspektion av det bärande huvudsystemet i tunnlar med innertak. I sådana tunnlar finns det sällan utrymme för en handnära inspektion varvid fjärrinspektioner måste användas vilket innebär att rätt beslut skall fattas utgående från indirekta observationer. Fjärrinspektioner blir i detta fall det viktigaste underlaget för besluten om eventuella åtgärder. Vi har här valt att använda fotogrammetriska metoder för att registrera tecken på skador.

I rapporten beskrivs vidare ett system baserat på indikatorer och hur ett sådant system kan användas. Studien baseras i stor utsträckning på den kunskap som finns hos de bergsakkunniga som genomför inspektioner. Denna kunskap översätts till värden genom värdering av olika indikatorer, med fokus på sådana som kan observeras i bild. Vi har strävat efter att indikatorerna skall representera mätbara egenskaper som det är möjligt att kunna tolka med olika typer av bildbehandling. Detta har inneburit ett större antal möjliga indikatorer. I rapporten har vi dels utvärderat olika indikatorer, dels gjort fältförsök bl.a. bakom ett temporärt innertak där vi testat fotogrammetriska metoder. Metodikens användbarhet för att detektera förändringar över tid har testats samt ansatser till att bedöma osäkerheter vid konventionell inspektion har genomförts.

Vi rekommenderar att de subjektivt skattade vikterna (likelihoodkvoterna) används i ett pilotprojekt där de prövas på en tunnel. För att ta fram de slutliga vikterna krävs det ett större underlag med fler genomarbetade expertbedömningar. I detta arbete bör också ingå att pröva möjligheten att skatta likelihoodkvoten för sammansatta indikatorer för att på så sätt hantera korrelation mellan de individuella indikatorerna. Expertbedömningar kan kompletteras med olika modellansatser. Dels modeller för nedbrytning i syfte att tydliggöra sambanden mellan ingående material och miljöfaktorer för att skapa en god grund för bedömning av potentialen för nedbrytning. Såväl analytiska som numeriska modeller kan användas som komplement för att skatta storleksordningarna av de rörelser och deformationer som kan vara kritiska samt om de kan ge upphov till användbara indikatorer.

Olika system för automatisk bildtolkning måste anpassas så att de kan användas på fotogrammetriska modeller på berg. De måste även anpassas så att de registrerar de olika indikatorerna. Ett kvarvarande utvecklingsbehov är att bättre kunna mäta rörelser och deformationer även vinkelrätt bergytan t.ex. genom anpassning av metoder baserade på ”digital image correlation”. De fotogrammetriska modellerna blir datatekniskt tunga men pågående utveckling bedöms medföra stora förbättringar.

Studien har resulterat i en väl underbyggd och tillämpbar metodik för fjärrinspektion och värdering av observationer. Studien demonstrerar hur ett system kan byggas upp. Den använda metodiken med indikatorer bedöms ha tillräcklig potential för att basera ett inspektionssystem på. Den använda metodiken bedöms vidare ha en god potential för att kunna användas vid automatisk bildtolkning och i AI-system.

Det redovisade systemet baserat på indikatorer är så transparant och använd metodik, algoritmer och data som systemet baserats på är så tydligt beskrivna och spårbara att det går att modifiera systemet i takt med ökad kunskap.

Nyckelord: inspektion, fjärrinspektion, bärande huvudsystem, innertak, indikatorer, likelihoodkvot, fotogrammetriska metoder

SUMMARY

The study described in this report aims to develop a basis for a methodology regarding the inspection of the main load-bearing system in tunnels with inner lining. In such tunnels, there is rarely room for close-up inspection, whereby remote inspections must be used, which means that the right decision must be made based on indirect observations. In this case, remote inspections become the most important basis for decisions on possible measures. We have chosen here to use photogrammetric methods to record signs of damage.

The report further describes a system based on indicators and how such a system can be used. The study is based largely on the knowledge of the rock engineering experts who carry out inspections. This knowledge is translated into values through the evaluation of various indicators, with a focus on those that can be observed remotely by imaging. We have striven for the indicators to represent measurable properties that can be interpreted with different types of image processing. This has meant a greater number of possible indicators. In the report, we have evaluated various indicators, carried out field tests, e.g. behind a temporary ceiling where we tested photogrammetric methods. The usefulness of the methodology for detecting changes over time has been tested and approaches to assessing uncertainties in conventional inspection have been carried out.

We recommend the subjectively estimated weights (likelihood ratios) to be used in a pilot project where they are tested in a tunnel. To produce the final weights, a larger base with more elaborate expert assessments is required. This work should also include testing the possibility of estimating the likelihood ratio for composite indicators to handle correlation between the individual indicators in this way. Expert assessments can be supplemented with different model approaches. Part models for degradation with the aim of clarifying the connections between constituent materials and environmental factors to create a good basis for assessing the potential for degradation. Both analytical and numerical models can be used as a complement to estimate the orders of magnitude of the movements and deformations that may be critical and whether they can give rise to useful indicators.

Different automated image interpretation systems need to be adapted to be used on photogrammetric models of rock masses. They must also be adapted to record the various indicators. A remaining development need is to be able to better measure movements and deformations also perpendicular to the rock surface, e.g. by adapting methods based on "digital image correlation". The photogrammetric models will be computationally heavy, but ongoing development is deemed to bring improvements.

The study has resulted in a well-founded and applicable methodology for remote inspection and evaluation of observations. The study demonstrates how a system can be built. The used methodology with indicators is deemed to have sufficient potential for

becoming a base of an inspection system. The methodology used is further judged to have good potential for being used in automatic image interpretation and in AI systems.

The presented system based on indicators is so transparent and the methodology used, algorithms and data on which the system is based are so clearly described and traceable that it is possible to modify the system in steps with increased knowledge.

Keywords: inspection, remote inspection, load-bearing main system, ceiling, indicators, likelihood ratio, photogrammetric methods

INNEHÅLL

1.	Inledning.....	1
1.1	Projektets syfte och upplägg	1
1.2	Problemställningen	1
2.	Dagens praxis för inspektion.....	3
2.1	Handböcker och riktlinjer	3
2.2	Enkät om dagens inspektionssystem.....	3
2.3	Inspektionsnoggrannhet	3
2.4	Vad tittar man efter och hur värderar man observationerna?	10
2.5	Inspektionsosäkerhet. Spridning mellan besiktningmän	11
2.6	Klassning och redovisning, exempel BaTMan	11
2.7	Resultat av inspektioner i BaTMan.....	15
3.	Fjärrinspektion grundprinciper.....	19
3.1	Indikatorer och tunnelns tillstånd.....	19
3.2	Utvärdering av indikatorer	20
3.3	Indikatorernas vikt	21
3.4	Inspektionsosäkerhetens inverkan på tolkning av fjärrinspektion och indikatorer.....	26
4.	Metodik för att bedöma vikten av olika typer av indikatorer.....	27
4.1	Användning av likelihood och likelihoodkvot för uppdatering.....	27
4.2	Problem vid åsättande av likelihood och likelihoodkvot för indikatorer.....	28
4.3	Enskild indikator – likelihood.....	28
4.4	Enskild indikator - likelihoodkvot	29
4.5	Indikator observeras inte.....	30
4.6	Likelihood för flera enskilda indikatorer. Uppdatering	31
4.7	Likelihoodkvot för flera enskilda indikatorer	32
4.8	Likelihoodkvot för sammansatt indikator	33
4.9	Likelihood och likelihoodkvot för kontinuerlig indikator eller indikator i intervall.....	33

5.	Bergmekanik och indikatorer	37
5.1	Inledning	37
5.2	Bergmekanisk kontext	37
5.3	Brottmekanismer.....	38
5.4	Tänkbara observerbara indikatorer vid brott.....	47
5.5	Kontext.....	47
5.6	Generella faktorer	47
5.7	Berg.....	48
5.8	Förstärkningssystem	50
5.9	Stål, bergbult och infästningsmaterial	51
5.10	Sprutbetong	52
5.11	Påverkan på förstärkningssystem	57
5.12	Kopplingar observerbara indikatorer och nedbrytningsmekanismer	58
6.	Försöksplatsen (Torsgatan), beskrivning samt kartering och utvärdering av inspektioner	61
6.1	Platsen.....	61
6.2	Jämförelse inspektörer, resultat och analys	64
6.3	Sammanfattning och kommentarer	67
7.	Expertfrågor.....	71
7.1	Avsikt med frågorna	71
7.2	Formuleringen av frågorna	71
7.3	De ställda frågorna.....	73
8.	Osäkerheter vid subjektiva värderingar.....	75
8.1	Vad är erfarenhet?.....	75
8.2	Hur tänker man? Bias och heuristics.....	75
8.3	Bias	76
8.4	Heuristics	77
8.5	Osäkerheter vid sammanvägning av olika experters utlåtanden.....	77
9.	Urval och viktning av indikatorer för fjärranalysen.....	79

9.1	Inledning	79
9.2	Väsentliga egenskaper hos urvalet av indikatorer	79
9.3	Första urval	79
9.4	Viktning av indikatorer i urvalet.....	81
9.5	Utvärdering av svaren.....	83
9.6	Slutligt urval av indikatorer och förslag till vikter.....	85
9.7	Utvärdering av indikatorer vid olika brottyper.....	95
9.8	Förslag vidare viktning av indikatorer.....	97
10.	Fjärrinspektionsteknik allmänt.....	99
10.1	Problemställning	99
10.2	Översikt av metoder. Pågående utveckling.....	100
10.3	Fotografering och kameror.....	101
10.4	Övriga metoder för fjärrinspektion	103
11.	Bildanalys.....	105
11.1	Arbetsgång 3D modellering.....	105
11.2	Analys av bilder	107
12.	Bildbaserad 3D-modell och mätning.....	109
12.1	Noggrannhet hos olika metoder	109
12.2	Klassisk fotogrammetri	111
12.3	Structure from Motion.....	111
12.4	Laserscanning. RGBD-kameror.....	112
12.5	Digital image correlation (DIC).....	112
13.	Bildorienteringsproblemet.....	115
13.1	Allmänt.....	115
13.2	Igenkännbara strukturer i bild	115
13.3	Särskilda markörer	115
13.4	Lägesbestämd kamerapunkt.....	115
13.5	SLAM (Simultaneous Location and Mapping).....	116

13.6	Passning av modeller.....	116
13.7	Orientering vid punktobservationer (för interpolering)	116
14.	Bildbaserad mätning av förändringar och deformation.....	117
14.1	Problemställning	117
14.2	Mätning av förändringar.....	117
14.3	Mätning av deformation i planet	117
14.4	Tredimensionell deformation	117
15.	Fjärrinspektionsteknik praktiska aspekter.....	119
15.1	Kamerautrustning.....	119
15.2	Belysning.....	119
15.3	Datautrustning.....	119
15.4	Kamerabärare (robot).....	120
15.5	Orientering vid fotograferandet.....	122
16.	Hitta indikatorer i bild	125
16.1	Automatiserad tolkning av lineament	125
16.2	Automatiserad tolkning av skador och avvikelser	125
16.3	Manuell tolkning ur bilder och modeller	125
17.	Inspektionsresultat - Osäkerheter orsakade av bristande information	127
17.1	Brister i spatiell överblick.....	127
17.2	Punktvisa observationer (stick-prov).....	127
18.	Expertutvärdering ur digital bild.....	129
18.1	Typer av digital redovisning	129
18.2	Granskning av digital bildmosaik	129
18.3	Virtual reality och 3D-modeller	129
19.	Fältförsök med fjärrinspektion	131
19.1	Laserscanning.....	131
19.2	Innertaket.....	133
19.3	Utrustning.....	134

19.4	Försökens utförande	137
19.5	Fotogrammetrisk modell	139
20.	Utförda försök, observation av nerfall.....	149
20.1	Försökslokal	149
20.2	Tunnelmodell	149
20.3	Modifiering av apparatbäraren.....	149
20.4	Försökens utförande	152
20.5	Erhållen modell	152
20.6	Resultat, kommentarer	153
21.	Kommentarer om utformning av det tekniska systemet för fjärrinspektion	155
21.1	Fjärrstyrd eller autonom robot?.....	155
21.2	Utformningskriterier	155
21.3	Orientering	156
21.4	Fotografering vid anfang.....	156
22.	Fjärrinspektion som beslutsunderlag.....	157
22.1	Beslutssituationen. Problemställningen	157
22.2	Beslutsmetoder	158
22.3	Illustrerande exempel på trädanalys.....	158
22.4	Acceptanskriterier	161
23.	Beslutsanalys för en tunnel.....	165
23.1	Del av tunneln som berörs.....	165
23.2	Möjliga beslut.....	165
23.3	Beslutsunderlag	165
23.4	Resultat från fjärrinspektionen.....	167
23.5	Beslutsanalys säkerhet	167
23.6	Beslutsanalys tillgänglighet	167
23.7	Rekommendationer för utförande av beslutsanalys	167
24.	Sammanfattande kommentarer och rekommendationer.....	169

24.1	Val av inspektionsmetodik	169
24.2	Val av indikatorer	169
24.3	Sannolikhet för att en skada uppstår	171
24.4	Metod för fjärrinspektion	173
24.5	Utformning av tunneln och dess innertak	174
24.6	Beslutsfattande	174
24.7	Utvecklingsbehov och möjligheter	175
25.	REFERENSER	177
Bilaga 1.	Enkät till inspektörer	185
Bilaga 2.	Utvärdering av tunnelns tillstånd ur observerade indikatorer.....	189
Bilaga 3.	Brottmekanismer – detektion av respons i förstärkningssystemets komponenter	201
Bilaga 4.	Påverkan av nedbrytning på förstärkningssystem	219
Bilaga 5.	Analys av data i Batman	223
Bilaga 6.	Bruttolista indikatorer innan gallring	237
Bilaga 7.	Likelihoodfrågor till experterna	243
Bilaga 8.	Utvärdering av Indikatorer	249
Bilaga 9.	3 GSM Rapport från modellering av nedfall	313

1. Inledning

1.1 Projektets syfte och upplägg

Föreliggande arbete syftar fram till en metodik för inspektion av bärande huvudsystemet i tunnlar med innertak. I sådana tunnlar finns det inte utrymme för handnära inspektion utan fjärrinspektion måste användas. Det handlar om att fatta beslut under osäkerhet utgående från indirekta observationer.

Fjärrinspektionen blir i detta fall det viktigaste underlaget för beslut om eventuella åtgärder.

I rapporten beskrivs ett system baserat på indikatorer och hur det kan användas, se t.ex. Margo et al. (2009).

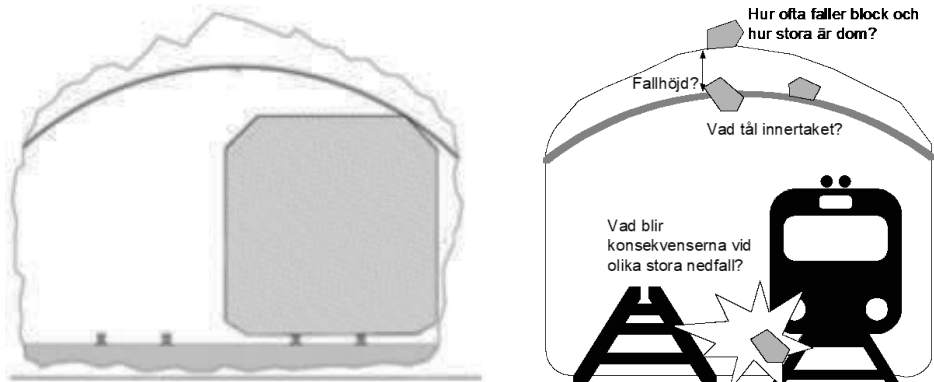
Arbetet utgår i stor utsträckning från den kunskap som finns hos bergsakkunniga som idag gör inspektioner. Denna kunskap skall översättas till värdering av olika indikatorer, främst sådana som endast kan observeras i bild eller med fjärrkamera. Det är därför väsentligt att få en bild av tillförlitligheten hos urval och värdering av indikatorer och för detta behövs en beskrivning/ analys av själva inspektionsprocessen som den görs idag.

1.2 Problemställningen

Problemet gäller i grunden att fatta *rätt beslut* om åtgärder för tunneln. Beslutsteori behandlas i kapitel 22 och 23. Det väsentliga här är funktionen hos trafikutrymmet, se Figur 1. Det gäller att genom de beslut som fattas kunna uppfylla kraven på säkerhet och tillförlitlighet men dessutom kravet på driftsekonomi. Kraven uppfylls när *kvarstående risker är acceptabla*.

Säkerhetskravet gäller i första hand personsäkerhet, men det gäller också säkerhet för fordon och andra material som kan förekomma i tunneln:

- Nerfallande föremål som träffar fordon och/eller person
 - Betong från innertaket
 - Bergblock som slagit igenom innertaket
 - Is från vatten som trängt igenom innertaket
- Nerfallet material som orsakar fara för trafiken
 - De ovan nämnda samt
 - Vattendropp som bildar is på körbanan



Figur 1 Det är trafikutrymmets funktion som är viktig

Man ställer krav på att trafikutrymmet i tunneln skall vara **tillförlitligt**, så att man kan anta att sannolikheten för att tunneln skall kunna nyttjas på avsett sätt är stor. Det gäller att tunneln är tillgängligt för trafik:

- med avsedda fordon
- vid avsedd tid
- med avsedd hastighet

Kraven gäller sådant som gör att tunneln hindrar att trafikutrymmet inte är tillgängligt enligt önskemål.

Det kan gälla fysiska hinder som begränsar den avsedda användningen, främst då oplanerade arbeten, men det kan också gälla hot mot säkerheten som gör att man måste begränsa tillgängligheten. Hoten behöver inte vara reella, det räcker med att de är upplevda.

En följd av dessa krav är att underhålls- och reparationsarbete behöver planeras långt i förväg för att inte inskränka på tillgängligheten.

Även med hänsyn till **driftsekonomin** är det viktigt att arbeten kan planeras tillräckligt långt i förväg. Oplanerade arbeten är ju väsentligt dyrare än sådana som finns i planerna.

2. Dagens praxis för inspektion

Eftersom fjärrinspektion ersätter dagens handnära inspektion vid tunnlar med innertak, är det viktigt att ha en klar bild av dagens praxis.

2.1 Handböcker och riktlinjer

Hur man skall utföra inspektioner av Trafikverkets tunnlar beskrivs i BaTMan, "Förvaltning av tunnlar med hjälp av BaTMan" (Trafikverket 2007). Underlaget till inspektionssystemet finns beskrivet i "Inspektionshandbok för bergtunnlar-slutrapport" (Bergab 2004). Viktigt att komma ihåg är dels att besiktningen görs handnära, med möjlighet att använda skrotspett etc. dels att det är möjligt att få en översikt av tunneltaket från tunnelgolvet.

2.2 Enkät om dagens inspektionssystem

I början av arbetet genomfördes en enkätundersökning där ett antal erfarna inspektörer fick svara på frågor om dagens praxis när det gällde inspektion och också om hur de såg på möjligheten att använda foton. Frågorna som ställdes och en sammanställning av svaren visas i Bilaga 1.

2.3 Inspektionsnoggrannhet

2.3.1 Faktorer som påverkar inspektionsresultatet

Det finns ett antal yttre faktorer som påverkar inspektionsresultaten:

- Inspektionssituationen.
- Det är mycket stora areor som ska inspekteras, en tunnel som är 1 km lång har en vägg- och takarea i storleksordningen 25 000 m².
- Det är svårt att lägesbestämma skador i tunnlarnas anfang och tak upp till 10 m över trafikytan med de traditionella metoder som används, som t.ex. måttband.
Detta påverkar möjligheterna att följa skadeutvecklingen.
- Det saknas många gånger fasta referenser i tunnlarna vilket innebär att längdmätningarna kan utgå från olika punkter vid olika inspektionstillfällen.
- Inspektion måste göras från liftar. Såväl lyftkapacitet som utrymme medger många gånger inte en samtidig och effektiv bomknackning, skadeobservation, fotografering och notering i korgen.

Inspektionssystemen är förenklingar av verkligheten och kan ge felaktiga resultat om de används okritiskt. Många gånger krävs det en bedömning av de platsspecifika förhållandena för att slutgiltigt kunna avgöra hur allvarlig en skada är. Det är inte heller helt säkert att inspektionsresultaten speglar riskerna vid användning av tunnlarna på ett

heltäckande sätt. Detta innebär att det finns felkällor och att det ställs stora krav på inspektörerna.

2.3.2 Inspektionssituationen

Vid en manuell handnära inspektion av tunnlar är arbetssituationen ofta besvärlig.

Det är ofta stor tidspress eftersom det bara finns vissa luckor i trafiken när det är möjligt att komma åt trafikutrymmet. Ofta är dessa tidsluckor korta och inte sällan nattetid.

Arbetsmiljön är inte optimal med mörker, trånga utrymmen fukt och kyla. Dessutom kan det finnas trafik i närheten och vid järnvägstunnlar också strömförande ledningar.

Vid den aktuella problemställningen: inspektion när tunneln har ett innertak tillkommer problem med att ta sig in på innertaket, att det område man kan se på det korta avståndet är mycket begränsat, att innertaket är valvformat så att det sluttar kraftigt i anfangen eller att man endast kan se taket från en inspektionslucka.

2.3.3 Bergteknisk kontext

Förhållandena i tunneln som t.ex. tillgång på vatten och vattenkemin, hur tunneln är utsprängd, om lasterna tas upp av berget eller förstärkningen kan styra såväl brottsannolikhet som konsekvenser av brott.

Bergmekanisk kontext dvs. det samband som en observation måste sättas in i kan härledas på flera olika sätt som t.ex:

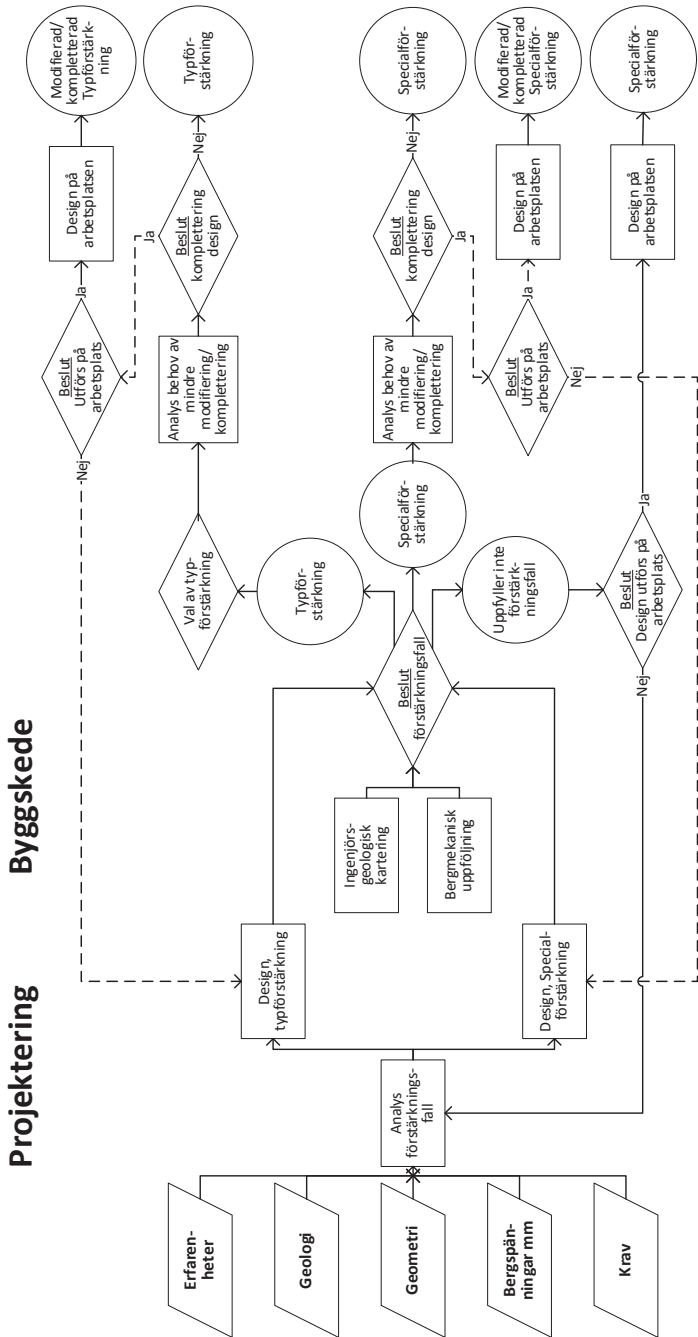
- Dimensioneringsunderlag
- Ritningar
- Karteringar
- Foton

I många fall är informationen ofullständig och det kan krävas direkta observationer på plats, tidigare utfall, stora sprängskador, geologi etc. Det finns större eller mindre osäkerheter förknippade med detta och i de flesta fall är berget insprutat vilket försvårar eller omöjliggör direkta observationer. Det finns också många potentiella felkällor som t.ex. fel i undersökningar, design eller utförande.

I samband med projektering dimensioneras anläggningen med utgångspunkt från en konceptuell modell av bergmassan som baseras på förundersökningar och prognoser. Dimensioneringen utmynnar ofta i ett urval av basförstärkningar, förstärkningsklasser som var och en speglar generaliseringar av en eller flera olika typmiljöer och olika geometrier. Dimensioneringen kan också utmynna i ett eller flera fall med specialförstärkningar som baseras på specifika förhållandena på platsen. Ett normalt förlopp i dimensioneringsprocessen visas i Figur 2.

Dimensionering för livslängd görs baserat på prognostiserad tunnelmiljö; primärt temperaturprognoser, vattensammansättning och påverkan från exempelvis tösalter. Det är ofta oklart hur livslängden för enstaka konstruktionselement prognosticerats och vad som ligger till grund för dimensioneringen. I dimensioneringsförutsättningarna kan ligga att utbyten av komponenter och förstärkningselement krävs för att uppnå dimensionerande livslängd för anläggningen.

Under drivning av tunneln utförs geologiska karteringar som är beslutsunderlag för om typförstärkning ska tillämpas och då vilken typförstärkning som ska väljas. Det görs ofta en slutlig utformning av förstärkningen som baseras på observationer. Det utförs i speciella fall ofta en mer djupgående bergmekanisk uppföljning som kan inkludera mätningar av rörelser och deformationer. Om förhållandena inte uppfyller villkoren för projekterad förstärkning görs en ny design.



Figur 2 Dimensioneringsprocessen

Sammantaget innefattar processen från förundersökning fram till beslut om förstärkning framme vid tunnelfronten många steg och ett flertal beslut. Det finns ett flertal tänkbara felkällor och det finns risker för att felaktiga beslut fattas vilket kan ge en direkt eller långsiktig påverkan på stabiliteten.

Ofta sker inte leverans och arkivering av dimensioneringsunderlagen för framtida bruk under driftskedet. De karteringar och uppföljningar som utförs på arbetsplatsen sammanfattas ofta på ritningar. Ritningarna är generaliseringar/förenklingar av verkligheten och det saknas ofta textbeskrivningar eller andra förtydligande dokument som beskriver bergmassan mer ingående.

Utförande som avviker från avsett utförande genererar också osäkerheter i överensstämmelse mellan modellkontext och verklig kontext. Det kan vara allt från avvikelser i utförande av bergförstärkning till att sprängningen inte utförs som avsett.

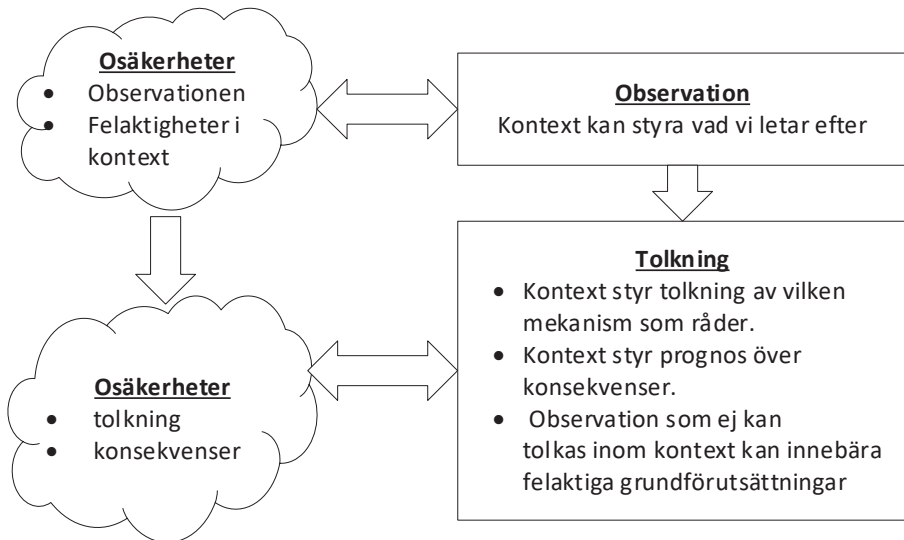
Delar av kontext kan betraktas som statisk medan andra delar av kontext kan förändras med tiden. Exempel på statisk kontext kan vara bergmaterialet medan exempel på föränderlig kontext kan vara inläckande vatten och vattenkemin.

Vi kan i samband med inspektion ställa upp modellkontexter som baseras på kända data från dimensionering och byggande samt eventuella tillkommande observationer under driftskedet. Den verkliga bergmekaniska kontexten kan vi inte säkert känna till. Med kontext menar vi i fortsättningen modellkontexter.

Kontexten kan ge en förväntansmodell över vilka skador (Figur 3) som kan uppstå och hur sannolikt det är att de ska kunna uppstå.

Det finns alltid osäkerheter i de observationer som görs men också osäkerheter kopplade till att en förväntansmodell kan vara felaktig. Kontext kan styra tolkningen av observationen dvs. hur troligt är det att det är en specifik brottmekanism som föreligger och i förlängningen också tolkning av hur skadan kan komma att utvecklas. En given observation kan tyda på olika orsaker beroende på tillämpad kontext. Förutom osäkerheter i själva observationen finns också osäkerheter som grundas i hur observationen ska tolkas beroende på kontext.

Den bergmekaniska kontexten ger underlag för prognos över tänkbara konsekvenser av det som observerats, vilket kan vara brott eller ökad nedbrytningshastighet. Observationer som inte kan tolkas inom ramen för given bergmekanisk kontext skulle kunna innebära att grundförutsättningarna dvs. modellkontexten är felaktig.



Figur 3 Osäkerheter kontext

Information om tunnelns förutsättningar, bergmekanisk kontext, tas fram i projekteringskedet i form av olika grundförutsättningar, skadeförstorande förhållanden samt själva dimensioneringen. Annan information som kan finnas är förändringar i produktionsskedet relativ dimensionering och underlag för dimensionering. Tunnelns historik är annan information som behövs för tolkning. En lista med exempel på olika faktorer som tillsammans utgör modell över kontext finns redovisad i Tabell 1.

Tabell 1 Kontext uppdelad efter dokumenterade förutsättningar

- Geometri - Geologi (material och strukturer) - Primärspänningar - Bergtäckning - Påförda laster - Hydrogeologi - Tunnelmiljö (Vattenkemi, temperatur mm)	Grundförutsättningar	Projektering och byggande
- Vattendrag, sjöar etc. - Intilliggande byggnader och byggnadsverk - Angränsande berggrum	Faktorer som kan ge förstörande konsekvenser	
- Uttagsmetodik - Sprängning, skador mm - Etapper - Förstärkningar - Förändringar i utförande jmf dimensionering - Avvikelsesrapporter med korrigerande åtgärd	Dimensionering/produktion	
- Kompletterande undersökningar geo, vatten mm. - Förändrade lastförutsättningar. - Schakter mm som utförts i närområdet. - Grundvattenflöden förändrats	Grundförutsättningar	
- Ålder - Utfört underhåll - Inspektionsresultat - Skadeutveckling - Skadeutredningar - Erfarenheter övriga delar av tunneln	Underhåll, historik	

Kontext kan också delas in efter följande indelning (se Tabell 2).

- Pådrivande, laster
- Mothållande, förstärkning
- Nedbrytande faktorer

Förändringar i de pådrivande krafterna, lasterna, påverkar sannolikheten för brott och indirekt även konsekvenserna. Inom kategorin ”Mothållande krafter, förstärkning” är det möjligt att göra observationer om förstärkningen går till brott och indirekt om bergmassans lastupptagande förmåga reduceras.

Nedbrytning är tidsberoende samt kan innebära såväl ökning av pådrivande laster som reduktion av mothållande krafter och påverkar därmed brotts sannolikheten. Nedbrytning kan observeras alternativt mätas med berörande metoder. Det kan gälla korrosion av luftexponerade delar av bergbult eller nedsättning av betongkvaliteten. Nedbrytning kan innebära att mothållande krafter reduceras så mycket att bärande huvudsystem går till brott. En svårighet i sammanhanget är att fastställa vilka lastupptagande reserver som en given förstärkning har dvs. hur långt kan nedbrytning tillåtas gå.

Tabell 2: Bergmekanisk kontext, uppdelning efter pådrivande och mothållande krafter samt nedbrytande faktorer.

- Bergmaterialet, tunghet - Strukturer, vattentryck, svällande leror mm	Geologi	Pådrivande, laster
- Sekundärspänningar - Påförda yttre laster	Laster	
- Brottyp, involverad volym	Brottyper	
- Materialegenskaper berg - Egenskaper strukturer - Valvbildning mm.	Bergmassan	Mothållande
- Strömbultning, mm - Samverkande förstärkning, bult-sprutbetong - Stödjande förstärkning	Bergförstärkning	
- Ålder - Klimat - Vattenflöde - Vattenkemi - Materialsammansättningar	Livslängdspåverkande	
		Nedbrytande

En generell tolkningsmodell av observationer mot Tabell 1 kan bli komplicerad att använda. Det är många faktorer som kan behöva vägas in för en enskild plats/indikator.

En tolkningsmodell av observationer mot Tabell 2 kan innebära förenklingar och att viktiga parametrar kommer att saknas.

2.4 Vad tittar man efter och hur värderar man observationerna?

Det finns lång erfarenhet av besiktning, inspektion, från särskilt gruvor och järnvägstunnlar. Traditionellt har inspektioner utförts av synnerligen erfarna skrotare vilket speglas av termen ”områdesansvarig skrotare” vilken återfinns i arbetsmiljöverkets anvisning för bergarbete. Under 1900-talet har geologer och ingenjörer besiktigat berganläggningar i ökande utsträckning, ofta som komplement till skrotarnas besiktningar. Erfarenheterna var inte systematiserade och bedömningarna har helt baserats på kunskap och erfarenhet.

Under senare hälften av 1990-talet har erfarenheter systematiserats och det har tagits fram system för inspektioner varav BaTMan är det mest använda i Sverige (Vägverket 2007).

Traditionellt utförs berginspektion med skrotspett. Den som utför besiktningen knackar i berget eller sprutbetongen för att se om det är uppsprucket och om det finns lösa block och provar att bryta försiktigt i öppna sprickor. Vid besiktningen observeras om det finns öppna sprickor, kilformade block, allmänt bergkvalitén och skador på bergförstärkningen. Har det skett bergutfall så observeras hur brottet uppträder och orsaken.

Det kan också ske översiktlig besiktning från tunnelns botten, sula, där man försöker se olika tecken på uppsprickning och instabilt berg. Detta är en avsevärt mycket mer osäker metod som kräver mycket stor erfarenhet.

I moderna tunnlar är berget insprutat med sprutbetong. Det är svårt att observera berget och få en klar bild över förutsättningarna (hädanefter oftast omnämnt som ”kontext”).

Slutsatser måste dras från observationer av sprutbetongen. Okulärt genom observationer av uppsprickning och förändring av uppsprickning och handnära genom att kartlägga bompartier och hur de utvecklas med tiden. Fördjupade undersökningar kan göras genom skrotning och i vissa fall även genom betongprovtagning.

I kapitel 2.6 så beskrivs det urval av indikatorer som BaTMan baseras på.

2.5 Inspektionsosäkerhet. Spridning mellan besiktningsmän

All manuell besiktning innebär en sannolikhet för misstag, särskilt under de förhållanden som är vanliga vid besiktning i tunnlar. En genomgång av noggrannheten och påverkande faktorer vid visuell inspektion för broar och en diskussion om utformning av bildbaserad metodik finns i McRobbie (2015).

Att manuellt gjorda inspektioner har stora subjektivt orsakade spridningar stöds av ett stort amerikanskt försök med broinspektörer, se Federal Highway Authority (2001) och Lea & Middleton (2002).

En mindre studie har gjorts i detta arbete, se Avsnitt 6.2 och även 2.7.

2.6 Klassning och redovisning, exempel BaTMan

Inspektionen skall utmytna i ett omdöme om tunneln (och innertaket) som skall tjänstgöra som beslutsunderlag när det gäller åtgärder.

I detta kapitel beskrivs BaTMan systemet som ett exempel på inspektionssystem.

2.6.1 Tillståndsklasser med beskrivning

Mätssystemen i BaTMan syftar enligt inspektionshandboken till ”att klargöra konstruktionernas fysiska och funktionella tillstånd samt ge underlag för planering och genomförande av sådana åtgärder som erfordras för att säkerställa ställda krav på kort och lång sikt”.

En huvudinspektion enligt BaTMan syftar till att ”upptäcka och bedöma sådana brister som kan påverka byggnadsverkets funktion eller säkerhet inom en 10 års period”. ”Syftet är också att upptäcka sådana brister, som om de inte åtgärdas inom tidsperioden, kan leda till förhöjda förvaltningskostnader”.

Det funktionella tillståndet anges med fyra tillståndsklasser, TK0-TK3 (Tabell 3).

För bedömning av skador används mätmetoder som ska spegla konstruktionens fysiska tillstånd. Systemet baseras på poängskalor enligt nedanstående tabell (Tabell 4).

Till mätmetoden för bärande huvudsystem finns angivet ett gränsvärde >20 poäng.

Tabell 3 Tillståndsklasser i BatMan

Tillståndsklass	Beskrivning
TK0	Noterade skador av mindre allvarlig art som kan innebära bristande funktionalitet bortom 10 år
TK1	Begynnande bristande funktionalitet inom 10 år
TK2	Nedbrytning pågående. Begynnande bristande funktionalitet inom 3 år
TK3	Bristande funktionalitet vid inspektionstillfället.

Tabell 4 Mätmetod 201 i BaTMan, poängskala

Mätmetod – 201, Berg bärande huvudsystem	Nivå (0=ingen skada)					
	0	1	2	3	4	5
Bedömning av skador	Poäng					
Utfall av block eller sten	0	2	4	6	8	10
Lös, bompartier	0	3	6	9	12	15
Deformation av tunneltvärsnittet	0	4	8	12	16	20
Spricka i sprutbetong	0	3	6	9	12	15
Spricka i förankrad sprutbetong	0	3	6	9	12	15
Krossning	0	4	8	12	16	20
Urlakning	0	3	6	9	12	15
Korrosion	0	3	6	9	12	15

Den fysiska tillståndsklassen, nivå 1 till 5 beskrivs i tabellerna nedan (Tabell 5).

För att ställa skadan i relation till bergmekanisk kontext används även en poängskala för bergkvaliteten (Tabell 6).

Poängen för en eller flera samverkande skador summeras inom ett skadat tunnelavsnitt.

Enligt mätmetoden bedöms det funktionella tillståndet, för det skadade konstruktionselementet, utifrån:

- aktuell och tidigare poängsättning (totalpoängen för mätmetoden)
- de vid projekteringen ställda funktionskraven
- förväntad framtida nedbrytning

Som ledning för bedömning anges ett gränsvärde om 20.

Tabell 5 Fysisk tillståndsklass BaTMan, 7 tabeller med beskrivningar

Utfall av block eller sten.	
Nivå 1	Utfall av sprutbetong eller betong. Orsak kan vara spänningsomlagring eller frostsprängning.
Nivå 2	Utfall av bergmaterial med eller utan sprutbetong, med blockstorlek ≤ 60 cm. Orsak kan vara vibrationer, spänningsomlagring eller frostsprängning.
Nivå 3	Utfall av block (blockstorlek > 60 cm) och bergskivor i tunnelavsnitt utan bultar och utfall av block och bergskivor med eller utan sprutbetong mellan utförd bultning. Orsak kan vara vibrationer, spänningsomlagring eller frostsprängning.
Nivå 4	Utfall av block med bult eller del av bult samt utfall av block kring kvarsittande bult. Orsak kan vara för kort bult, dålig ingjutning, korrosion eller spänningsomlagring.
Nivå 5	Utfall av berg och sprutbetong inom ytförstärkt tunnelavsnitt eller utfall i tunnelavsnitt med bergförankrad sprutbetong. Utfallet kan bestå av bergskivor eller block av varierande storlek. Orsak kan vara spänningsomlagring, svällande sprickmineral eller frostsprängning.

Lös, bompartier	
Nivå 1	Sprutbetong som lätt kan knackas ner med hjälp av hammare eller spett. Orsak kan vara vibrationer, spänningsomlagring eller frostsprängning.
Nivå 2	Fastsittande men bom sprutbetong. Bompartier har acceptabel diameter eller är sprutbetongen vid större bompartier bergförankrad (bultupphängd). I bilagor till mätmetoden beaktas såväl bärförmåga hos den bomma sprutbetongen som risk för utmattningsbrott vid existerande tryckpåkänningar från trafik. Orsak till bom sprutbetong kan vara spänningsomlagring eller frostsprängning.
Nivå 3	Fastsittande men bom sprutbetong. Bompartiernas diameter innebär nedsatt lastupptagande förmåga. I figurerna i bilagorna till mätmetoden beaktas såväl bärförmåga hos den bomma sprutbetongen som risk för utmattningsbrott vid existerande tryckpåkänningar från trafik. Orsak till bom sprutbetong kan vara spänningsomlagring eller frostsprängning.
Nivå 4	Block eller bergskiva med eller utan sprutbetong, som är bom vid bomknackning och/eller lätt kan brytas ner med hjälp av skrotspett. Orsak kan vara spänningsomlagring eller frostsprängning.
Nivå 5	Flera block eller bergskivor med eller utan sprutbetong, som är bomma vid bomknackning och/eller lätt kan brytas ner med hjälp av skrotspett. Orsak kan vara spänningsomlagring eller frostsprängning

Sprickor i sprutbetong	
Nivå 1	Krackelering i sprutbetong (spindelnät).
Nivå 2	Dragspricka som inte tycks följa sprickor i bergmassan eller som har en längd som är kortare än blockstorleken.
Nivå 3	Dragspricka som tycks följa sprickor i bergmassan eller som har en längd större eller lika med blockstorleken.
Nivå 4	Drag- eller skjvsprickor som tycks följa sprickor i bergmassan. Tecken finns på relativrörelser över sprickorna.
Nivå 5	Skjuvspricka i sprutbetongbåge eller betongbåge.

Sprickor i förankrad sprutbetong	
Nivå 1	Krackelering i sprutbetong (spindelnät) eller drag-/skjuvsprickor med en längd som är kortare än avståndet mellan förankringsbultarna.
Nivå 2	Dragspricka i fiberarmerad sprutbetong med en vidd $< 0,2$ mm och en längd större än avståndet mellan förankringsbultarna.
Nivå 3	Dragspricka i fiberarmerad sprutbetong med en vidd $> 0,2$ mm och en längd större än avståndet mellan förankringsbultarna.
Nivå 4	Skjuvspricka i ytförstärkning med en längd större än avståndet mellan förankringsbultar och/eller sprickbildning kring förankringsbultar.
Nivå 5	Skjuvspricka i sprutbetongbåge eller betongbåge.

Krossning	
Nivå 1	Lokalt tryckbrott i ytförstärkning med sprutbetong och/eller avdragen selektiv bult.
Nivå 2	Utbrett tryckbrott i ytförstärkning med sprutbetong.
Nivå 3	Utbrett tryckbrott i bergförankrad sprutbetong och/eller avdragna systembultar
Nivå 4	Tryckbrott i sprutbetongbåge eller lining.
Nivå 5	Tryckbrott i berg och sprutbetong- eller betongförstärkning.

Urlakning	
Nivå 1	Viss ytlig urlakning av ingjutningsbruk kring enstaka bergbultar.
Nivå 2	Allmän ytlig urlakning av ingjutningsbruk kring bergbultar.
Nivå 3	Viss urlakning av sprickfyllnad, injekteringsbruk och/eller sprutbetong.
Nivå 4	Omfattande urlakning av sprickfyllnad, injekteringsbruk, ingjutningsbruk för bergbultar och/eller sprutbetong.
Nivå 5	Mekanisk och/eller kemisk vittring av bergmassa, sprutbetong eller betongförstärkning.

Korrosion	
Nivå 1	Ytlig korrosion på bergbult/bricka.
Nivå 2	Ytlig korrosion på armeringsjärn.
Nivå 3	Viss korrosion på armering och/eller bergbultar/bultbricka.
Nivå 4	Omfattande korrosion på armering och/eller bergbultar/bultbricka, areaminskning < 20 %.
Nivå 5	Omfattande korrosion på armering och/eller bergbultar/bultbricka, areaminskning ≥ 20 %.

Tabell 6 BaTMan, poängskala för olika bergkvalitet (Q-index)

Mätmetod	Nivå					
	0	1	2	3	4	5
Bergkvalitet	Egenskaper					
Beskrivning	-	Ganska bra berg	Dåligt berg	Mycket dåligt berg	Extremt dåligt berg	Exceptionellt dåligt berg
Q-värde	-	4-10	1-4	0,1-1	0,01-0,1	<0,01
RQD	-	50-75	25-50	<25	0	0
Sprickgrupper	-	2-3 sprickgrupper	2-3 sprickgrupper	>3 sprickgrupper	Uppkrossat delvis vittrat berg	Uppkrossat delvis vittrat berg
	Poäng					
	0	3	6	9	12	15

2.6.2 Bedömning av säkerhet

Inspektionsmetoden i BaTMan syftar enbart på att bedöma det fysiska tillståndet på det bärande huvudsystemet i tunneln. Systemet tar liten hänsyn till risker för nedfall som kan påverka säkerheten i tunneln utan detta lämnas helt till inspektörernas bedömning.

Som exempel på allvarliga händelser ur ett rent säkerhetsperspektiv kan anges:

- Nedfall med en kantlängd <60 cm är enligt ”Utfall av block eller sten” nivå 2 och ger 4 poäng.
- Avdragen selektiv bult är enligt ”krossning” nivå 1 och ger 4 poäng.
- Block som lätt kan brytas ner med hjälp av skrotspett är enligt ”lös, bompartier” nivå 4 och ger 12 poäng.

Vid berg som klassas till $Q > 1$, dvs. dåligt berg eller bättre, genererar inga av dessa skador mer än gränsvärdet >20 poäng. Vid nedfall eller avdragen bult kombinerat med t.ex. bompartier i sprutbetong, nivå 3, överskrider inte riktvärdet.

Vid ganska bra berg, Q 4-10, genererar löst eller bomt berg en sammanlagd poäng som inte överskrider gränsvärdet.

Vid mycket dåligt eller extremt dåligt berg dvs. Q -värden mellan 0.01 och 1 genererar bergkvaliteten 12 respektive 9 poäng vilket gör att lättare skador kommer att få en avsevärt högre vikt. Vid bultupphängd sprutbetong saknas oftast vidhäftning och berget bakom sprutbetongen kan vara bomt. Förstärkningen är dimensionerad för detta men det tas ingen hänsyn till detta. Skadornas allvarlighet kan därför komma att överskattas om de inte sätts i relation till förstärkningssystemet.

Det krävs god erfarenhet hos inspektörerna för att kunna göra en egen bedömning rörande riskerna för nedfall i trafikutrymmet men också för att undvika att en alltför hög tillståndsklass ansätts. Det finns alltså en viss potential för så kallad ”bias” (snedvridning) orsakad av psykologiska faktorer, se Avsnitt 8.2.

2.7 Resultat av inspektioner i BaTMan

Statistik från inspektioner av 114 tunnlar med en sammanlagd längd av 66,7 km, där skador finns redovisade i BaTMan:s databas, har analyserats översiktligt, se Bilaga 5. Studien har varit översiktlig eftersom det saknas detaljerat underlag som t.ex. fysiskt tillstånd i databasen. Det fysiska tillståndet finns angivet på ritningar och i PM samman med underlag som visar hur stor del av tunnlar som är förstärkta med sprutbetong.

Det saknas även uppgift om hur stor andel av tunnlar som är inklädda med vatten- och frostisolerings. Det har inte heller funnits möjlighet att analysera om åtgärder utförts i tunnlar. Ett grovt antagande att tunnlar yngre än 30 år är till största delen förstärkta med sprutbetong och att det inte utförts nämnvärda underhållsåtgärder under den tidsrymden. Andelen inklädnad varierar mellan 5% och mer än 60%. Andelen inklädnad

är störst i moderna tunnlar vilket gör att skadefrekvensen för sprutbetong sannolikt underskattas.

Skadeutvecklingen för såväl brott i bärande huvudsystem som nedbrytning har analyserats. I många fall har en grundorsak som pekar på nedbrytning angetts men samtidigt har det skett brott i bärande huvudsystem. I dessa fall har skadan redovisats både som brott och nedbrytning.

Resultaten visar bl.a. att bomparter i sprutbetong är den vanligaste inspektionsanmärkningen som står för mer än 50 % av alla anmärkningar på sprutbetong. Det går inte att utläsa ur statistiken i vilken utsträckning det finns andra indikatorer av mindre tyngd som kunnat observeras i anslutning till bomparterna och det går inte att utläsa vad som är grundorsaken till bomparterna. För berg är bilden mer splittrad, för skador orsakade av brott dominerar bomparter medan frostsprängning är den dominerande grundorsaken vid nedbrytning.

Sammantaget visar statistiken på att en skadefrekvens som ökar med åldern på tunneln, se Tabell 7, Tabell 8 och Tabell 9.

För brott i bärande huvudsystem redovisas skador TK3 i bergmassa och sprutbetong. Skador på bult, infästningsmaterial mm finns knappast redovisade i statistiken. Skador TK 3 får anses som så allvarliga att de speglar ett tillstånd där någon komponent i bärande huvudsystem har så stora skador att åtgärd antingen i form av utredning eller som underhåll krävs.

Tabell 7 Antal skador – brott i bärande huvudsystem, TK3/km, fördelade efter tidsperioder.

Ålder	Inspekterad längd (km)	Bergmassa TK3/km	Sprutbetong TK3/km	Summa TK3/km	Skador TK3/km och år
0-5 år	7,3	0,0	0,0	0,0	0,01*
6-10 år	14,4	0,0	0,0	0,0	0,01*
11-15 år	13,9	0,1	0,4	0,5	0,1
16-20 år	10,2	0,3	0,6	0,9	0,2
20-30 år	7,5	1,5	4,3	5,8	0,6
>30 år	13,5	3,3	0,9	4,2	1,0**

Not: * Som antagande bassannolikhet, $P > 0$, Skadefrekvens per år ansätts till 0,01

** Andelen sprutbetong är så liten att skadorna inte speglas i statistiken. $P > P_{\text{(brott bergmassa 30 år)}}$ och $P_{\text{(brott sprutbetong 25 år)}}$. Skadefrekvens 1,0 skada TK3/km och år ansätts.

För skadefrekvens >30 år har antagits att skadorna på grund av brott i bärande huvudsystem uppstår under en tidsperiod om påföljande 10 år.

Skador på sprutbetong är underrepresenterade rent generellt på grund av inklädnad och i synnerhet för tunnlar äldre än 30 år där majoriteten saknar sprutbetong. Det är ett rimligt antagande att skadefrekvensen för sprutbetong är större än för perioden 20-30 år. Därför har en sammanlagd skadefrekvens om 1,0 skada TK3/km och år antagits.

Nedbrytning orsakar materialförsvagning hos delkomponenterna i bärande huvudsystem. Teoretiskt skall tillståndsklasserna spegla en nedbrytningskurva. Därför har även TK2 redovisats. För TK1 finns betydande osäkerheter om grundorsaken till skadan, är det utförande som t.ex. krympsprickor och bompartier eller är orsaken nedbrytning. TK1 har därför inte analyserats i detalj och redovisas inte.

Tabell 8 Antal skador – nedbrytning, TK2/km, fördelade efter tidsperioder.

Ålder	Inspekterad längd (km)	Bergmassa TK2/km	Sprutbetong TK2/km	Stål TK2/km	Summa TK2/km	Skador TK2/km och år
0-5 år	7,3	0,0	4,4*	0,0	4,4*	0,9*
6-10 år	14,4	0,0	0,5	0,0	0,5	0,1
11-15 år	13,9	0,1	0,3	0,0	0,4	0,1
16-20 år	10,2	0,1	2,2	0,3	2,5	0,5
20-30 år	7,5	0,1	2,1	0,0	2,3	0,2
>30 år	13,5	2,2	1,9**	2,2	6,3	0,6

Not: * Skadefrekvensen speglar sannolikt brister i utförandet.

** Andelen sprutbetong är så liten att skadefrekvensen inte speglas i statistiken.

P> P_(bergmassa 30 år) och P_(sprutbetong 25 år).

En svårighet är att översätta tillståndsklasserna till i vilken grad som bärförmågan reducerats. Eftersom tillståndsklassen styrs av hur bergmassan klassificerats är det svårt att överföra en tillståndsklass till reducering av bärförmåga. Som exempel ger mätmetoden TK 3 för bult vars area minskat på grund av gropfrätning med 20% eller mer vid ett Q-värde som är mindre än 4. I bättre berg ger bulten TK2.

För sprutbetong blir bilden ännu mer komplex.

Som tidigare nämnts så används vatten- och frostisolering i alla partier med vattendropp och våta ytor.

Andelen kan vara mer än 60% av tunnelns tak- och väggarea. Detta innebär att de fuktigaste partierna med störst potential för nedbrytning inte inspekteras. Det är svårt att analysera detta baserat på grunddata i BaTMan. Det behövs undersökningar av sprutbetongen, tunnslip och SEM, i fuktande och blöta partier av varierande ålder.

Tabell 9 Antal skador – nedbrytning, TK3/km, fördelade efter tidsperioder.

Ålder	Inspekterad längd (km)	Bergmassa TK3/km	Sprutbetong TK3/km	Stål TK3/km	Summa TK3/km	Skador TK3/km och år
0-5 år	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,01*
6-10 år	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,01*
11-15 år	13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,01*
16-20 år	10,2	0,2	0,0	0,1	0,3	0,1
20-30 år	7,5	0,1	2,4	0,1	2,6	0,3
>30 år	13,5	0,0	0,9	0,7	1,6	0,4*

Not: * Som antagande bassannolikhet, $P > 0$, Skadefrekvens per år ansätts till 0,01
 ** Andelen sprutbetong är så liten att skadorna inte speglas i statistiken.
 $P > P_{(\text{bergmassa } 30 \text{ år})}$ och $P_{(\text{sprutbetong } 25 \text{ år})}$. Skadefrekvens 0,4 skada TK3/km och år ansätts.

3. Fjärrinspektion grundprinciper

I detta kapitel ges en översikt av de grundprinciper som styr användandet av fjärrinspektion. Detaljer och fördjupningar ges i kommande kapitel. I begreppet fjärrinspektion ligger att inspektionen bara görs med avbildande metoder, handnära inspektion är inte möjlig. Vi har inte heller tagit med berörande metoder som skulle kunna göras med robot.

En översikt av icke-förstörande metoder för tillämpning på inklädnader i tunnlar finns i Wimsatt et al. (2014)

3.1 Indikatorer och tunnelns tillstånd

3.1.1 Vad är indikatorer?

Fjärranalysen baseras på användandet av *indikatorer*:

utvalda tecken som kan tyda på att brott håller på att utvecklas eller att antaganden om livslängd etc. kan visa sig vara fel. alternativt beskrivet:

observerbara förhållanden som bedöms kunna tjäna som underlag till en bedömning av de icke observerbara förhållanden som avgör åtgärdsbehovet.

Indikatorerna ska peka på att det finns ett hot som kan göra att kraven på tunnelns funktion inte uppfylls och även hur troligt detta är.

Det behöver här framhållas att när vi i rapporten skriver observera, så omfattar det inte bara rent okulär inspektion utan all sorts fotografering, bildbehandling och mätning som görs för att bestämma förekomsten av indikatorerna.

Användandet av indikatorer inom geotekniken har främst beskrivits när det gäller levéer, se Margo et al. (2009), Baecher & Christian (2013) och Govindasamy et al. (2017).

3.1.2 Krav på indikatorerna

De indikatorer som skall användas måste uppfylla minst tre krav:

- De måste vara observerbara
- De måste ha en urskillningsförmåga
- De måste vara möjliga att värdera

Eller med andra ord: indikatorn skall:

- Vara bra på att hitta hoten
- Inte orsaka falsklarm

Men det finns också praktiska och ekonomiska aspekter på indikatorerna.

3.1.3 Observerbarhet

Det syns självklart att en indikator skall vara (i vid mening) observerbar. Man måste ändå komma ihåg:

- Indikatorn måste vara entydigt beskriven så att beskrivningen inte inför onödig osäkerhet.
- Observerbarheten kan även gälla mätningar etc. så det kan komma in uppmätta värden i definitionen av indikatorn.

3.1.4 Urskillningsförmåga

För att en indikator skall ha stor urskillningsförmåga krävs att

- den skall vara relevant för den fysikaliska mekanismen,
- att den inte, eller bara, sällan förekommer där hot ej finns

3.1.5 Möjlighet att värdera

Det måste vara möjligt att värdera indikatorn på ett stringent och objektivt sätt, så att effekten av att man sett den kan utnyttjas som beslutsstöd. Resultatet av utvärderingen bör alltså kunna ges i någon lämplig skala.

3.2 Utvärdering av indikatorer

För att indikatorer skall vara användbara måste det finnas en metod att utvärdera dem så att man vet i vilken grad de uppfyller de krav som ställs på dem. Man vill kunna ge varje indikator en vikt, som beskriver hur bra de är på att mäta kopplingen till tunnelns tillstånd.

Koppling mellan indikatorer och tunnelns tillstånd

Huvudkravet på en indikator är att det finns en koppling mellan indikatorn och tunnelns verkliga tillstånd, t.ex. att ett brott håller på att utvecklas. Sammanhanget kan vara av två grundtyper:

- Orsakssammanhang, där man känner de mekanismer som gör att det finns en koppling
- Association, där man inte kan beskriva orsakerna, men där man vet att indikatorn brukar uppträda vid vissa tillstånd hos tunneln

Bergmekaniska/fysikaliska kopplingar mellan indikatorer och tunnelns tillstånd beskrivs närmare i Kapitel 5 och urvalet av de indikatorer som är lämpliga att använda och viktningen av dem behandlas i Kapitel 8.

3.2.1 Baserad på sannolikheter

Det mest användbara sättet att värdera indikatorerna är metoder som är baserade på sannolikhetsberäkningar som, baserat på förekomsten av indikatorn ger till svar hur troligt det är att en viss brottmekanism etc. förekommer i tunneln. Detta angreppssätt ger också

möjlighet att bedöma sannolikheten för att tunnelns funktionalitet inte är acceptabel, t.ex. ur säkerhetssynpunkt.

Grunderna för användandet av indikatorer för att uppdatera brottsannolikheter ges i Bilaga 2.

3.2.2 Andra tänkbara metoder

Det är också möjligt att utvärdera indikatorerna på andra grunder, t.ex. rent subjektiv värdering eller värdering baserad på AHP-metoden, se Olsson & Berggren (2010).

3.3 Indikatorernas vikt

För att man skall kunna använda indikatorerna måste man sätta ett mått på hur effektiva de är för att hitta mekanismer och även sätta ett mått på hur ofta de ger falsklarm.

3.3.1 Koppling till mekanismer

Indikatorernas vikt skall visa hur stark kopplingen är mellan mekanismen och indikatorn. Om man väljer en sannolikhetsbaserad metodik kan kopplingen bäst beskrivas med något som kallas likelihoodfunktionen, se t.ex. Baecher & Christian (2013).

Likelihood för skada beskriver hur troligt det är att man ser en viss indikator i om det verkligen finns ett skadehot: $P(i| \text{hot})$.

För en definierad bergmekanisk kontext och mekanism (skadehot) kan man göra en sannolikhetsbedömning av hur troligt det är att man (i princip) skulle kunna observera den aktuella indikatorn dvs att indikatorn finns.

Man svarar alltså på en fråga av typ:

Om den här mekanismen finns, hur troligt är det då att man skulle kunna observera den aktuella indikatorn?

Man svarar inte på den annorlunda formulerade frågan: *Om jag ser den aktuella indikatorn, hur troligt är det att den här mekanismen finns?*

Den mekanism man betraktar kan vara mer eller mindre snävt definierad. Den kan vara beskriven som "Brott i bärande huvudkonstruktion", eller "Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av en specifik mekanism såsom t.ex. kil/skjuvning pga. rörelse av rigid kropp".

3.3.2 Indikatorns koppling till andra tänkbara orsaker

Eftersom det kan finnas "falsklarm" kan man också ställa frågan: *Om den här mekanismen finns, hur troligt är det då att man ändå skulle kunna observera den aktuella indikatorn?*

Då blir likelihood $P(i|\text{inget hot})$. Men om det är så att ”hot” avser en specificerad mekanism, kan det vara svårt att skatta denna likelihood, eftersom den då, i ”inget hot” innehåller hot orsakade av andra mekanismer. Däremot är det vanligen möjligt att ge en uppgift om likelihood för ”inget hot” om man bara skiljer på ”brott” och ”inte brott”.

Frågan diskuteras vidare i Kapitel 7.

3.3.3 Indikatorns urskiljande förmåga

En effektiv indikator ska ha en god förmåga att påvisa hot men samtidigt också undvika falsklarm. Man måste ställa krav på dess urskiljande förmåga så att man inte använder ineffektiva indikatorer. Ett effektivt mått på en indikatorns urskiljande förmåga är den så kallade likelihoodkvoten.

Om man dividerar likelihood $P(i|\text{hot})$ med $P(i|\text{inget hot})$ får man likelihoodkvoten. Den består alltså av de två delarna:

- Sannolikheten för att se indikatorn om det finns ett hot och
- Sannolikheten att se indikatorn om det inte finns något hot

Betydelsen av likelihoodkvotens storlek framgår av det följande.

Om kvoten är nära 1 så har ingendera likelihood någon klar övervikt och det förhållande att man sett indikatorn ger ingen ytterligare ledning om det finns ett hot eller inte.

Tabell 10: Värdering av likelihoodkvot (ur SBU 2015)

Urskiljningsförmåga	Likelihoodkvot
Utmärkt	10
Mycket god	6
Rimlig	2
Oanvändbar	1

I andra sammanhang, t.ex. vid juridisk bevisprövning, anges betydligt högre värden på den likelihood-kvot som motsvarar en viss trolighetsnivå. Baecher (2019) citerar Evett et al. (2000) som ger rekommendationer enligt Tabell 11.

Vi har valt att mer förlita oss på dessa värden vid utvärdering och gallring av indikatorer.

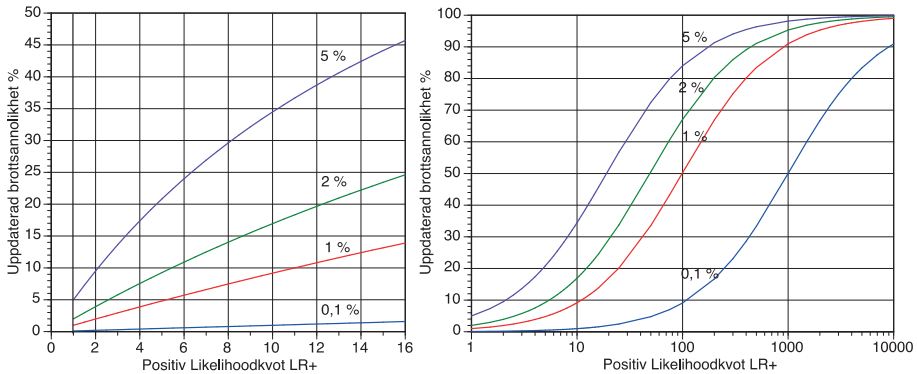
Generellt gäller att likelihoodkvoten kan användas för att uppdatera en tidigare känd sannolikhet. Detta innebär att beräkna sannolikheten för skada baserat på såväl tidigare sannolikhet som observation. Detta beskrivs i Avsnitt 7.1 och i Bilaga 2.

Den tidigare kända sannolikheten kallar vi för bassannolikhet. Den definieras som sannolikheten för skada hos en tunnel av en viss utformning.

Tabell 11; Qualitative scale for the degree of support provided by evidence efter Evett m. fl. (2000)

LR		Weight of Evidence
from	to	
1	10	Limited evidence to support
10	100	Moderate evidence to support
100	1000	Moderately strong evidence to support
1000	10 000	Strong evidence to support
10 000	∞	Very strong evidence to support

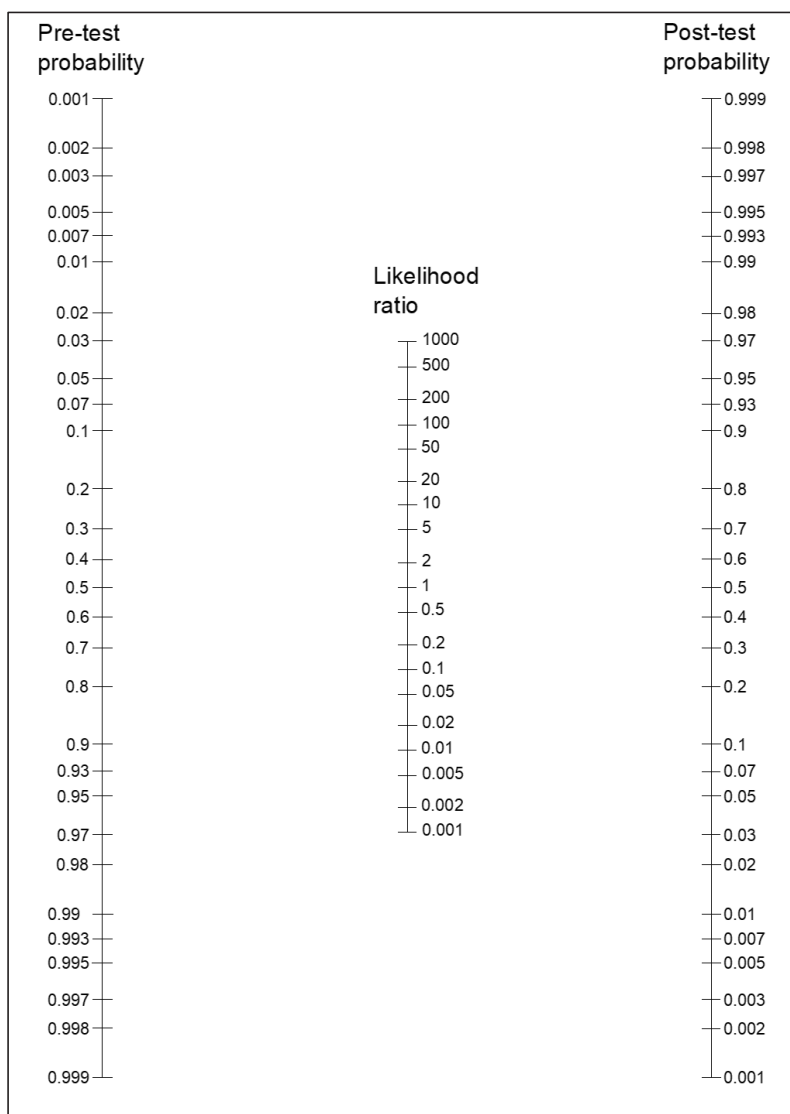
I Figur 4 visas effekten av olika storlek på likelihoodkvoten på den uppdaterade brotts sannolikheten för bassannolikheter mellan 0,1% och 5%. Sådana indikatorer som pekar på en ökad brotts sannolikhet kallas ofta positiva. Det finns också så kallade negativa likelihoodkvoter, se nedan och i Bilaga 4.



Figur 4 Inverkan av likelihoodkvotens storlek

Om likelihoodkvoten är stor, får man naturligtvis en stor ökning av brotts sannolikheten. Detta visas i den högra figuren, där man kan se att om man observerar en indikator med en likelihoodkvot på 100, så ökar en brotts sannolikhet av 2% till närmare 70%.

Inverkan av likelihoodkvoten vid uppdatering kan också visas i ett så kallat Fagan-nomogram, se Figur 5. I det kan man dra en rät linje från bassannolikheten (Pre-test probability) genom den aktuella likelihoodkvoten och se hur stor den uppdaterade sannolikheten blir.



Figur 5 Fagan-nomogram för uppdatering av sannolikhet

Av Figur 5 framgår tydligt att en likelihoodkvot som är 1 inte påverkar sannolikheten om man observerat indikatorn. Om likelihoodkvoten är mindre än 1, så motsäger den hypotesen att vi har brott och sannolikheten för brott blir mindre. Detta illustreras i Figur 6 och även i Figur 5. En likelihoodkvot som närmar sig 0 leder alltså till en uppdaterad sannolikhet som också närmar sig 0.

3.3.4 Positiv och negativ likelihoodkvot

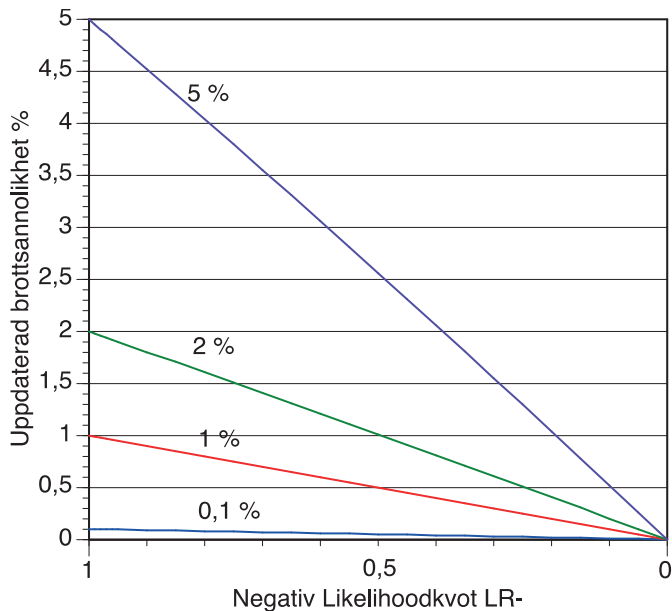
När man inspekterar ett område och tittar efter en viss indikator, så kan det ju finnas två utfall: Indikatorn finns eller så finns den inte.

Likelihoodkvoten för det fall att indikatorn finns har behandlats ovan. Den kallas ibland positiv likelihoodkvot.

Det kan också tänkas att man har en likelihoodkvot som är kopplad till frånvaron av en indikator. Den kallas vanligen negativ likelihoodkvot. Den beskriver hur troligt det är att man inte ser indikatorn där man har brott (falskt negativ) dividerat med troligheten att man inte ser den där man inte har brott (sant negativ), dvs $P(\text{inte } i | \text{ brott}) / P(\text{inte } i | \text{ inte brott})$.

Den är, namnet till trots, inte ett negativt tal, och vanligen i intervallet 0 – 1.

Om man har en negativ likelihoodkvot och inte observerar indikatorn (ett negativt testutfall) minskar den uppdaterade brotts sannolikheten, se Figur 6. I figuren visas hur mycket den ursprungliga sannolikheten ändras av den ”negativa” observationen.



Figur 6 Uppdatering vid negativ likelihoodkvot

3.3.5 Flera samtidiga indikatorer korrelation

Om man ser flera olika indikatorer som pekar åt samma håll när det gäller förekomst av hot, så bör man ju få ett starkare stöd för att det finns ett hot. Men här måste man tänka på vad som i statistiska termer kallas korrelation (samvariation). Om den ena indikatorn

alltid förekommer tillsammans med den andra, så ger den ju ingen ytterligare information, det hade räckt med att man ser den ena av dem. Naturligtvis är det ett ytterlighetsfall att man alltid ser dem tillsammans, men även om man bara oftast gör det så minskar det värdet av att man observerar bägge om man jämför med att det inte finns någon samvariation, se vidare Kapitel 7.

3.4 Inspektionssäkerhetens inverkan på tolkning av fjärrinspektion och indikatorer

Det finns inte historiska data när det gäller brottmekanismer och olika indikatorer.

Den ”golden standard” som finns tillgänglig är expertutsagor från erfarna inspektörer. Men det finns ju, som påpekades i Avsnitt 2.5, en del osäkerheter förknippade med manuell inspektion. Det inverkar givetvis på experternas utsagor, liksom också subjektiva faktorer (bias), se Kapitel 10.

Dessa osäkerheter har inte kunnat bedömas i projektet, eftersom endast ett fåtal experter deltagit i utvärdering av indikatorer. Det har därför varit omöjligt att göra en statistisk analys av de vikter som åsatts indikatorerna.

4. Metodik för att bedöma vikten av olika typer av indikatorer

Vi har valt att använda en statistisk metod kallad likelihood för att beskriva vikten hos olika observerade indikatorer. Eftersom likelihood (och likelihoodkvot) är centrala begrepp i utvärderingen av observationer beskrivs här ett antal aspekter.

4.1 Användning av likelihood och likelihoodkvot för uppdatering

Uppdateringen görs i båda fallen med utgångspunkt i Bayes' teorem. För en fylligare genomgång se Bilaga 2. Nedan ges ett kort utdrag.

I båda fallen utgår man från en känd eller skattad brotts sannolikhet, som sedan uppdateras efter observation av indikatorer

4.1.1 Direkt uppdatering med likelihood

Det matematiska uttrycket är

$$P''(F|z) = P'(F)L(z|F)/(\sum P'(Fi)L(z|Fi))P'(F) \quad \text{Ekvation 1 där}$$

$P''(F|z)$ sannolikheten för skada efter det att vi fått mer data z (åposteriori-sannolikhet)

$L(z|F)$ likelihood för F , givet observerade data z .

I det ingår en nämnare, en proportionalitetskonstant som kan vara tämligen besvärlig att beräkna. Det kan dock vara möjligt att åsätta den direkt (subjektivt). Denna möjlighet kan vara avgörande för om man skall välja direkt uppdatering eller uppdatering med likelihoodkvot.

Matematiskt är nämnaren sammansatt av sannolikheten för förekomsten av de olika orsaker som kan ge upphov till observationen, var och en multiplicerad med sannolikheten att se z om orsaken finns (likelihood). Här skall man komma ihåg att det finns orsaker som inte innebär en brottmekanism.

Nämnaren ger den totala sannolikheten för att man skall göra observationen z . Denna sannolikhet bör vara möjlig att uppskatta subjektivt med frågor av typen:

"Om man tittar längs hela tunneln: I hur stor andel av tunneln saknas indikatorn (i procent av arean)."

4.1.2 Utvärdering baserad på likelihoodkvot

Ett sätt att enkelt utvärdera observationer är genom den så kallade likelihoodkvoten. Likelihoodkvoten LR (eng. likelihood ratio) är likelihood för F givet observationen z_0 dividerad med likelihood för "icke- F " givet samma observation.

$$LR = L(z_0|F) // L(z_0|\bar{F}) \quad \text{Ekvation 2}$$

Formeln för uppdatering blir då:

$$\frac{P'(F|z_0)}{P'(\bar{F}|z_0)} = \frac{P'(F)}{P'(\bar{F})} \times LR \quad \text{Ekvation 3}$$

Man slipper alltså beräkna normaliseringskonstanten (nämnaren) i Bayes' teorem.

Uttryckt i sannolikheter:

$$P''(F) / (1 - P''(F)) = LR \times P'(F) / (1 - P'(F)) \quad \text{Ekvation 4}$$

4.2 Problem vid åsättande av likelihood och likelihoodkvot för indikatorer

4.2.1 Historiska data saknas

I litteraturen kring levéeer, som är den problemställning som ligger närmast, visar man hur historiska data används för att bestämma likelihood. Denna beräknas då ur frekvensen av olika indikatorer vid konstruktioner som gått till brott och vid sådana som inte gjort det. Detta görs för olika brottmekanismer.

I vårt fall saknas sådana data om indikatorer. Visserligen görs besiktningar, men dokumentationen är inte sådan att den kan användas. Dessutom har vi förhållandevis få brott eftersom man oftast åtgärdar skadan innan brottet är fullt utvecklat.

4.2.2 Måste baseras på expertkunskap

För vårt problem måste vi alltså förlita oss på expertkunskap genom hypotetiska scenarier. En svårighet är då att de flesta experterna inte är vana att tänka ”från brott till indikator” utan har lättare att tänka ”från indikator till hot”, men den statistiska utvärderingen kräver att man utgår från bergmekaniken och bedömer hur troligt det är att se en viss indikator.

4.2.3 Samma indikator – olika brottyper

Här finns ett problem som har sin grund i att en indikator, t.ex. sprickor kan vara kopplade till flera olika brottmekanismer och dessutom finnas när det inte är brott (t.ex. krympsprickor).

4.3 Enskild indikator – likelihood

Kan bestämmas genom att man frågar experten t. ex.:

Antag att vi har tunnlar förstärkta med vidhäftande sprutbetong. Om det är ett pågående brott i tunneln, i hur stor andel (X av hundra) skulle man se indikatorn ”*Sprickorna i sprutbetongen har ett sprickmönster med sprickor som följer strukturer i berget*”

Likelihood för den indikatorn är då X.

Frågan kan naturligtvis göras ytterligare specifik genom att man har en snävare bergmekanisk kontext, t.ex.: Antag att vi har tunnlar med bergtyp 2; *Medelblockigt berg med 3-5 sprickgrupper där berget normalt systembultas och block mellan sprutbetongen bärs upp av sprutbetong* (se kap 5.2.1 "Hur har vi delat in "berg"). Om det är ett pågående brott i tunneln, i hur stor andel, X, av tunnlar kan man se indikatorn "Sprickorna i sprutbetongen har ett sprickmönster med sprickor som följer strukturer i berget" vid den bergtypen?

4.4 Enskild indikator - likelihoodkvot

Kan bestämmas genom frågor av typen:

Antag att vi har tunnlar förstärkta med vidhäftande sprutbetong:

- Om det är ett pågående brott i tunneln, i hur stor andel (X av hundra) skulle man se indikatorn "Sprickorna i sprutbetongen har ett sprickmönster med sprickor som följer strukturer i berget"
- Om det inte är ett pågående brott i tunneln, i hur stor andel (Y av hundra) skulle man se indikatorn "Sprickorna i sprutbetongen har ett sprickmönster med sprickor som följer strukturer i berget".

Likelihoodkvoten för pågående brott i tunneln som kvoten X/Y mellan de båda andelarna.

Svårigheter vid åsättandet av likelihoodkvot för enskild indikator är:

- När man diskuterar en specifik brottmekanism
- Indikatorn är sällsynt vid brott, men är en säker indikator
- Vi kan inte se hela indikatorn

4.4.1 Likelihoodkvot vid specifika brottmekanismer

När man åsätter likelihoodkvoten för en indikator vid en specificerad brottmekanism är det ofta svårt att ge likelihood för att indikatorn orsakats av annan orsak. Exempel: om man söker likelihoodkvoten för kilbrott och indikatorn är "spricka" måste man ju ta med andra brottmekanismer, t. ex löskärna när man skall ge likelihood för indikatorn, när det inte är kilbrott. Detta kan vara svårt, och vi har därför rekommenderat direkt uppdatering med Bayes' teorem och att man skattar nämnaren subjektivt (Hur troligt är det att det finns en spricka orsakad av någon av alla tänkbara mekanismer?)

4.4.2 Likelihoodkvot vid sällsynta, men säkra, indikatorer

Ibland är en indikator mycket säker, men har ändå en liten likelihood. Ett exempel: en mycket bred spricka är ett tydligt tecken på brott. Men när man ställer frågan: "Om du har brott i bärande huvudsystemet, hur troligt är det att du ser en mycket bred spricka?" så är det lätt att man överskattar likelihood av psykologiska skäl, eftersom det är mycket

troligt att det är ett brott om man ser en mycket bred spricka. I verkligheten är likelihood liten, eftersom så stora sprickor bara finns vid en mycket begränsad andel av brotten. Trots att likelihood är liten, är indikatorn ändå kraftfull eftersom likelihood för mycket bred spricka är mycket, mycket liten när det inte är brott. Likelihoodkvoten blir mycket stor och vid uppdateringen blir det en hög sannolikhet för att det är brott.

Illustrerande räkneexempel:

Bassannolikhet för brott: 2 %

Likelihood för mycket bred spricka vid brott: $L(\text{mycket bred spricka}|\text{brott}) = 1 \%$

Likelihood för mycket bred spricka när det inte är brott: $L(\text{mycket bred spricka}|\text{inte_brott}) = 0,001 \%$

Likelihoodkvot: $1/0,001 = 1000$

Uppdatering ger en sannolikhet för brott av 95%, vilket nog känns intuitivt riktigt. Men man måste vid åsättandet av indikatorn ha hela bilden klar för sig. Annars är ju det lätt att man ger ett för stort värde.

4.4.3 Vi kan inte se hela indikatorn

Ett tänkbart fall är om indikatorn är längden på en spricka, och vi inte kan bestämma hela längden, eftersom sprickan går in över gränserna för observationsområdet. Vi har då ett "censurerat" prov. I princip samplar vi i ett fönster, se t.ex. Zeeb et al. (2013). Likelihood för ett sådant scenario är inte lätt att bestämma för det generella fallet.

För ett speciellt fall av statistisk fördelning (exponential) hos spricklängder har Baecher (1980) givit en analytisk lösning, men han påpekar att observationer i fält tyder på att andra fördelningar är bättre, men att det då saknas lösningar.

4.5 Indikator observeras inte

Om man tittar efter en indikator finns det två möjliga observationer: man ser indikatorn och man ser inte indikatorn. Om man inte ser en indikator vid inspektionen kan det finnas två orsaker:

- Indikatorn finns inte
- Indikatorn finns där, men vår observationsmetod är otillräcklig

Ett problem för oss är att vi inte kan vara helt säkra på vilken orsaken är till att vi inte observerar indikatorn

4.5.1 Indikatorn finns inte

Detta är vad som kallas ett negativt test i medicinsk litteratur.

Om indikatorn inte finns så har vi vanligtvis ett testresultat (i vårt fall observation) som pekar på att sannolikheten för att tunneln skall vara osäker har minskat. Men det kan också vara så att det finns en sannolikhet att indikatorn inte finns trots att det är brott

Man kan ställa frågor: vad är sannolikheten för ingen observation av indikatorn när man har brott respektive när man inte har brott? Man kan sedan beräkna den negativa likelihoodkvoten, som ofta benämns LR- i medicinsk litteratur, se t.ex. Kent & Hancock (2016). Detta behandlas ytterligare i Bilaga 2.

Ur de frågor som ställts till experterna kan man beräkna den negativa likelihoodkvoten, se Bilaga 2.

4.5.2 Vi observerar inte indikatorn

Om indikatorn finns, men missas av observationsmetoden påverkar missen vårt beslut om vad som skall göras med tunneln. Detta analyseras i Kapitel 22.

Ett utnyttjande av negativ likelihood, d.v.s. att man inte har sett indikatorn, något som kan peka på minskad brottsannolikhet, bör därför göras med försiktighet, och vi föreslår att man tills vidare inte gör det, genom att sätta negativa likelihoodkvoten till 1.

Det ger konservativa värden (för stora) på den uppdaterade brottsannolikheten. Om dessa värden blir stora, bör man dock möjligen att även inkludera observationer med negativ likelihood. Detta skall bara göras efter särskilt övervägande.

4.6 Likelihood för flera enskilda indikatorer. Uppdatering

Att göra en bayesiansk uppdatering med likelihood och normaliseringskonstant ("nämnaren") kan vara besvärligt om man observerar flera indikatorer.

Vi ifrågasätter om det inte är så att man i detta fall har att välja mellan:

- att betrakta indikatorerna som oberoende, vilket troligen är på säkra sidan genom att den uppdaterade brottsannolikheten överskattas
- att använda metoden med likelihoodkvoter. I det fallet torde det bli svårt att arbeta med annat än brott/icke brott, alltså utan att man skiljer mellan olika brottyper.

4.6.1 Oberoende enskilda indikatorer

Om vi vill göra en uppdatering med Bayes'teorem och observerar flera indikatorer, som vi betraktar som oberoende, är total likelihood lika med produkten av likelihood för de olika indikatorerna. Man kan ju se det som en tvåstegsuppdatering där åposteriorisannolikheten efter första uppdateringen blir åpriori-sannolikhet i nästa. I praktiken gör man det i ett steg.

4.6.2 Korrelerade enskilda indikatorer

Vi har inte hittat någon praktiskt tillämpbar lösning i litteraturen, se Bhat (2014) med referenser.

4.6.3 Likelihood för sammansatt indikator

I princip kan man åsätta likelihood (eller beräkna ur historiska data, se t.ex. Baecher & Christian (2013) för en sammansatt indikator på samma sätt som för en enskild indikator med en fråga som gäller att man ser flera angivna indikatorer samtidigt., t.ex. att se både *spricka* och *nedfall*, Möjligheten att tillförlitligt åsätta ”nämnaren” bedömer vi som relativt dålig, även om man rent principiellt kan ställa en fråga om hur stor den area är av en tunnel där man ser den sammansatta indikatorn. Detta är alltså en möjlig begränsning när det gäller sådana uppdateringar där man inte har en tillförlitlig likelihoodkvot, alltså när man tittar på specifika brottmekanismer.

Likelihoodkvoten för sammansatta indikatorer behandlas i Avsnitt 4.8.

4.7 Likelihoodkvot för flera enskilda indikatorer

4.7.1 Oberoende enskilda indikatorer

Ibland har man ett antal möjliga indikatorer som man kan observera var för sig. Om indikatorerna är statistiskt oberoende ges likelihoodkvoten för en viss observation där vi observerat indikatorerna $z_1, z_2 \dots z_n$ av

$$LR = \prod_{i=1}^n \frac{L(z_i|F)}{L(z_i|\bar{F})} \quad \text{Ekvation 5}$$

d.v.s. produkten av likelihoodkvoterna för de olika indikatorerna.

Detta samband gäller även om vissa likelihoodkvoter är negativa (och alltså talar mot att vi har brott). Vi rekommenderar försiktighet med att använda dem.

4.7.2 Korrelerade enskilda indikatorer

Om det finns ett statistiskt beroende mellan de olika likelihoodkvoterna säger man att de är korrelerade. I princip bör detta ofta vara fallet, eftersom det ligger en gemensam brottmekanism bakom indikatorerna och kausalitet leder till korrelation.

Viktigt att beakta är att positiv korrelation minskar den totala informationen man får av de observerade indikatorerna. Ett extremfall: om indikator A alltid finns där indikator B finns, så vet man inte mer om man observerar båda, än om man bara observerar B.

En konservativ ansats är därför att betrakta likelihoodkvoterna för korrelerade enskilda indikatorer som oberoende och behandla dem enligt Avsnitt 4.7.1.

4.8 Likelihoodkvot för sammansatt indikator

Eftersom det kan vara svårt att åsätta alla de betingade sannolikheterna som behövs för att hantera korrelerade enskilda indikatorer kan man sätta samman dem parvis och behandla dem som en enskild indikator.

Då kommer man vid expertbedömningen att ställa frågor av samma typ som vi använt indikatorer var för sig och göra det för fallet när man ser dem samtidigt.

Antag att det har inträffat ett brott. Hur troligt är det då att samtidigt se både indikatorn *spricka* och indikatorn *nedfall*?

Antag att det inte har inträffat ett brott. Hur troligt är det att i det fallet samtidigt se både *spricka* och *nedfall*?

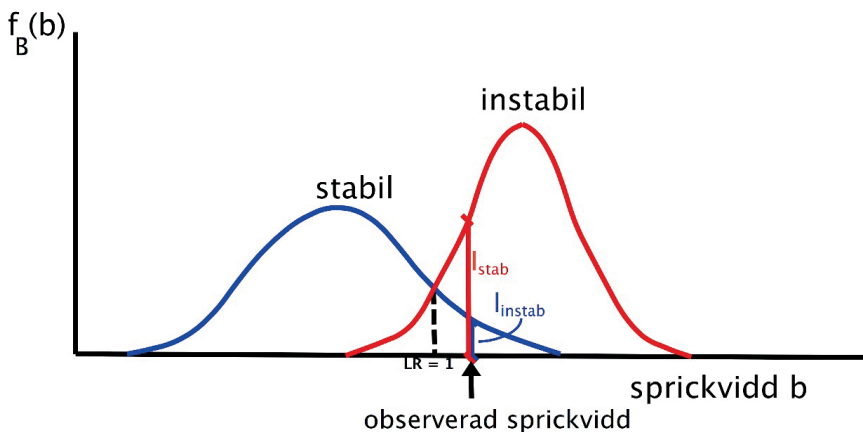
4.9 Likelihood och likelihoodkvot för kontinuerlig indikator eller indikator i intervall

Ibland är indikatorn av en typ där man inte bara noterar om den finns eller inte utan också hur stor den är.

4.9.1 Kontinuerlig indikator

Ett hypotetiskt exempel kan vara sprickvidd. Man kan naturligtvis använda indikatorer som är klasser och där man kan svara om indikatorn tillhör den klassen eller inte, t.ex. $1 \leq \text{sprickvidd [mm]} \leq 5$.

Ett annat sätt är att beskriva hur sannolikt det är att en viss sprickvidd pekar på att tunneln är stabil eller inte. Detta kan göras om man kan beskriva sprickvidderna för stabila och instabila tunnlar med sannolikhetsfördelningar. Detta illustreras i Figur 7.



Figur 7: Bestämning av likelihoodkvot för kontinuerlig indikator

För en fördelning är likelihood lika med höjden av täthetsfördelningen vid värdet för observationen. I Figur 7 har likelihood markerats för både fördelningen som gäller stabila tunnlar och för fördelningen som gäller instabila tunnlar.

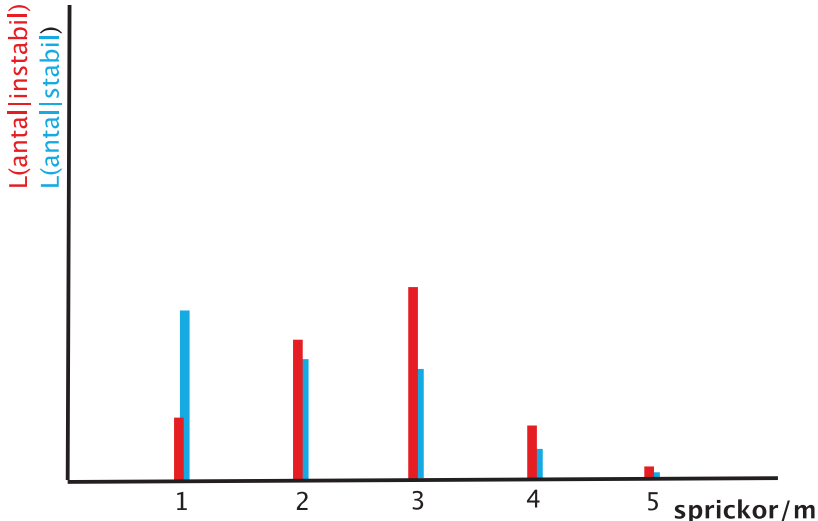
Kvoten mellan dessa båda höjder i fördelningen är likelihoodkvoten för den markerade observationen (den mätta sprickvidden). I figuren har också ritats in den punkt där kurvorna skär varandra, d.v.s. den punkt där likelihoodkvoten = 1. Observation av värden till vänster om denna punkt innebär att sannolikheten för att den specifika tunneln är instabil minskar (jämfört med grundsannolikheten), observationer till höger att den ökar.

Även om en expertbedömning i princip är möjligt, har författarna bedömt det som så svårt att få användbara sannolikhetsuppskattningar vid kontinuerliga indikatorer att några försök inte gjorts.

4.9.2 Indikator som beskrivs med diskreta tal

I vissa fall kan indikatorn vara mätbar så att måttet beskriver likelihoodkvoten, men den är inte kontinuerlig på samma sätt som ovan.

Ett exempel kan vara antal sprickor per meter, som ju anges som ett heltal. Man kan principiellt hantera detta på samma sätt som för kontinuerliga indikatorer, fast man får arbeta med diskreta fördelningar där man kan beskriva likelihood för stabil och instabil tunnel som funktion av antal sprickor per meter, se Figur 8.



Figur 8 Bestämning av likelihoodkvot för indikator som har diskreta värden

Man börjar med antagandet att en tunnel är stabil och beskriver sannolikheten att se olika antal sprickor per meter (0, 1, 2 etc.). Sedan gör man antagandet att tunneln är instabil och gör motsvarande beskrivning av sannolikheter.

När man på det sättet har givit värden på likelihood är det sedan enkelt att beräkna likelihoodkvoten för olika antal sprickor per meter.

Ett värde på indikatorn $=0$ [sprickor /m] kan också hanteras, men troligen är det svårt att få säkra svar från experterna. Frågorna skulle lyda:

Om det är brott, hur troligt är det att man observerar noll sprickor per meter?

Om det inte är brott, hur troligt är det då att man observerar noll sprickor per meter?

Man bör ju rimligtvis få ett mycket litet värde på indikatorkvoten om man inte observerar någon spricka, men i analogi med negativa likelihoodkvoter rekommenderas att man inte tar med denna observation i beräkningen av sannolikheter.

5. Bergmekanik och indikatorer

5.1 Inledning

Dagens inspektionssystem baseras på att det ska gå att göra handnära observationer, bomknacka och vid behov även göra provning. För att kunna ta fram, värdera och analysera olika tänkbara indikatorer för fjärranalys har det utförts en ingenjörsgelogisk och bergmekanisk analys.

5.2 Bergmekanisk kontext

5.2.1 Hur har vi delat in bergmassan

För beskrivning av bergmassan och för vidare utvärdering har vi som grundförutsättning att vi avser kristallint berg som t.ex. olika typer av granitoider eller gnejser. Tunnlrar i sedimentärt berg eller i t.ex. fjällkedjans bergarter och som inte är förstärkta med betonginklädnad förekommer i Sverige i så liten utsträckning att vi valt att bortse från dem.

Bergmassans egenskaper kan beskrivas på ett flertal olika sätt, det kan vara deskriptivt, med olika klassificeringssystem som Q-index eller RMR samt genom karaktärisering av bergmassans egenskaper. De olika klassificeringssystemen har svagheter att det är svårt att relatera specifika brottmekanismer till enbart siffervärden.

För att kunna hantera bergmassans egenskaper under det fortsatta arbetet har vi därför valt att definiera ett antal bergtyper där vi beskrivit bergmassans egenskaper i ord samt även att ge ett ungefärligt spann av Q-värde för respektive bergtyp samt även ange vilket förstärkningssystem som normalt används för respektive bergtyp.

Bergtyp 1: Storblockigt kompetent berg med 2-3 sprickgrupper. Normal förstärkning för denna bergtyp är vidhäftande sprutbetong och ströbulning.

Bergtyp 2: Medelblockigt berg med 3-5 sprickgrupper. Normalt systembultas berget och block mellan bultarna bärs upp av sprutbetongen. Saknas vidhäftning används fiberarmerad vidhäftande sprutbetong.

Bergtyp 3: Medelblockigt berg, 3-5 sprickgrupper, med förekomst av lerfyllda sprickytor där det finns potential för större skjuv/kilbrott. Normalt systembultas berget och block mellan bultarna bärs upp av sprutbetongen. Saknas vidhäftning används fiberarmerad vidhäftande sprutbetong.

Bergtyp 4: Medelblockigt berg, med flackt stående skivighet. Lerfyllda sprickytor och/eller förskiffringsplan förekommer. Normalt förstärks berget med systembultning och antingen vidhäftande eller bultupphängd sprutbetong. Ströbulning och vidhäftande sprutbetong kan förekomma.

Bergtyp 5: Finblockigt berg, krosszoner. Normalt förstärks berget med systembultning och bultupphängd fiberarmerad sprutbetong. Potentiellt instabila bergpartier mellan bultarna hängs upp med sprutbetong.

5.3 Brottmekanismer

5.3.1 Generell beskrivning brott i berg och brottyper.

Det kan översiktligt urskiljas tre översiktliga styrande mekanismer för brott, strukturellt styrda brott, gravitativa brott i berg med låg hållfasthet samt spänningsstyrda brott. Dessa kan även underindelas i brottyper som t.ex. kilbrott och löskärnebildning.

A. Strukturellt styrda brott.

Brott sker längs sprickor och svaghetsplan i berget med låg eller ingen hållfasthet.

Vid låga spänningar kan de vara enbart gravitationsdrivna medan förhöjda spänningar även kan inducera skjuvrörelser längs sprickplanen.

Exempel på brottyper är blockutfall i form av kilar eller plana brott efter plan som definieras av sprickor eller mekaniska skador i berget. Lasterna som genereras på förstärkningen är dels skjuvpåkänningar på sprutbetongskikten och kombinerat drag och skjuv på bergbultarna.

Vid medel- till finblockigt berg kan löskärnebildning uppstå som brotttyp. Lastfallen på förstärkningen kommer att variera beroende på bergmassans egenskaper och vilket förstärkningssystem som valts.

Ett specialfall finns i sedimentärt berg där lagren statiskt verkar som balkar eller plattor och brott sker på grund av nedböjning. Lasterna på förstärkningen kommer vid brott att huvudsakligen verka som utbredd last på sprutbetongförstärkning och drag längs bergbultarna. Brotten kan utvecklas till löskärnebildning med skjuvbrott som eventuell följd.

B. Gravitativa brott på grund av alltför låg hållfasthet i materialet eller extremt lättvittrat berg.

I exempelvis partier med kraftigt uppkrossat berg som saknar kohesion kan den huvudsakliga brottmekanismen vara gravitativa utfall. Vid fina kornfraktioner kan även flytning av materialen ske vid vattenflöden genom materialen. Vissa bergarter och då i synnerhet bergarter som innehåller svällande leror kan även lösas upp i kontakt med vatten (slaking) på mycket kort tid.

Går bergmassan till brott kommer det huvudsakliga lastfallet på sprutbetongförstärkning att vara som utbredd last, löskärnebildning. Ett sekundärt lastfall kan vara skjuvbrott i löskärna som inte nödvändigtvis behöver ske över distinkta skjuvytor.

C. Spänningsstyrda brott.

Brott i bergmaterialet på grund av att det primära spänningsfältet inducerar sekundära spänningar som överstiger bergmaterialets hållfasthet. Exempel på brott kan vara spjälkbrott parallellt med tunnelns periferi kombinerat med skjuvbrott eller knäckning. Skjuvbrott kan även inträffa i såväl intakt berg som längs geologiska sprickor. Höga spänningar kan även leda till deformation av mjukare bergmaterial.

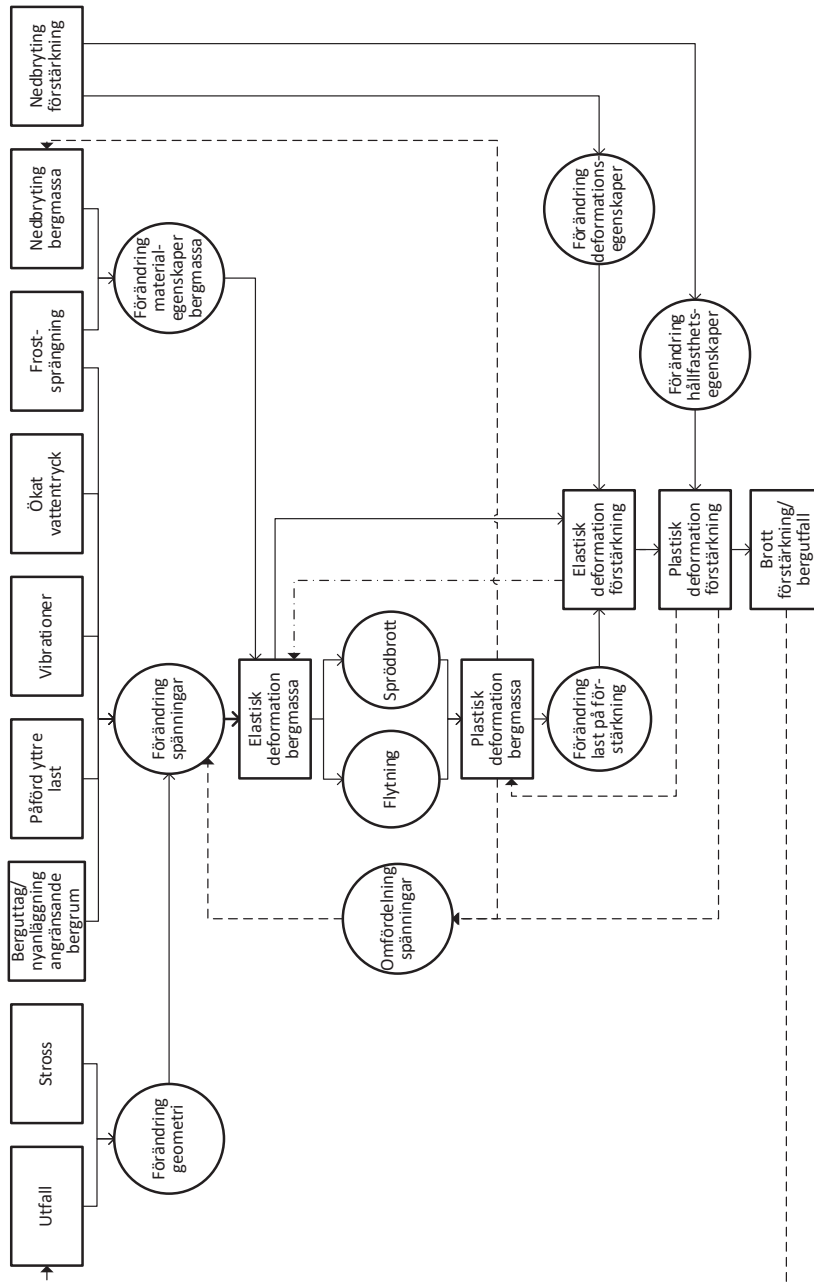
Spänningsstyrda brott är komplicerade. Den absoluta majoriteten av svenska berggrum är ytligt förlagda med så låga primärspänningar att spänningsstyrda brott är mycket ovanliga. En vanlig respons av brotten kan vid moderata spänningar vara löskärnebildning vid spjälkbrott eller skjuvrörelser som belastar förstärkningen.

5.3.2 Brottutveckling i tunnel under driftskedet.

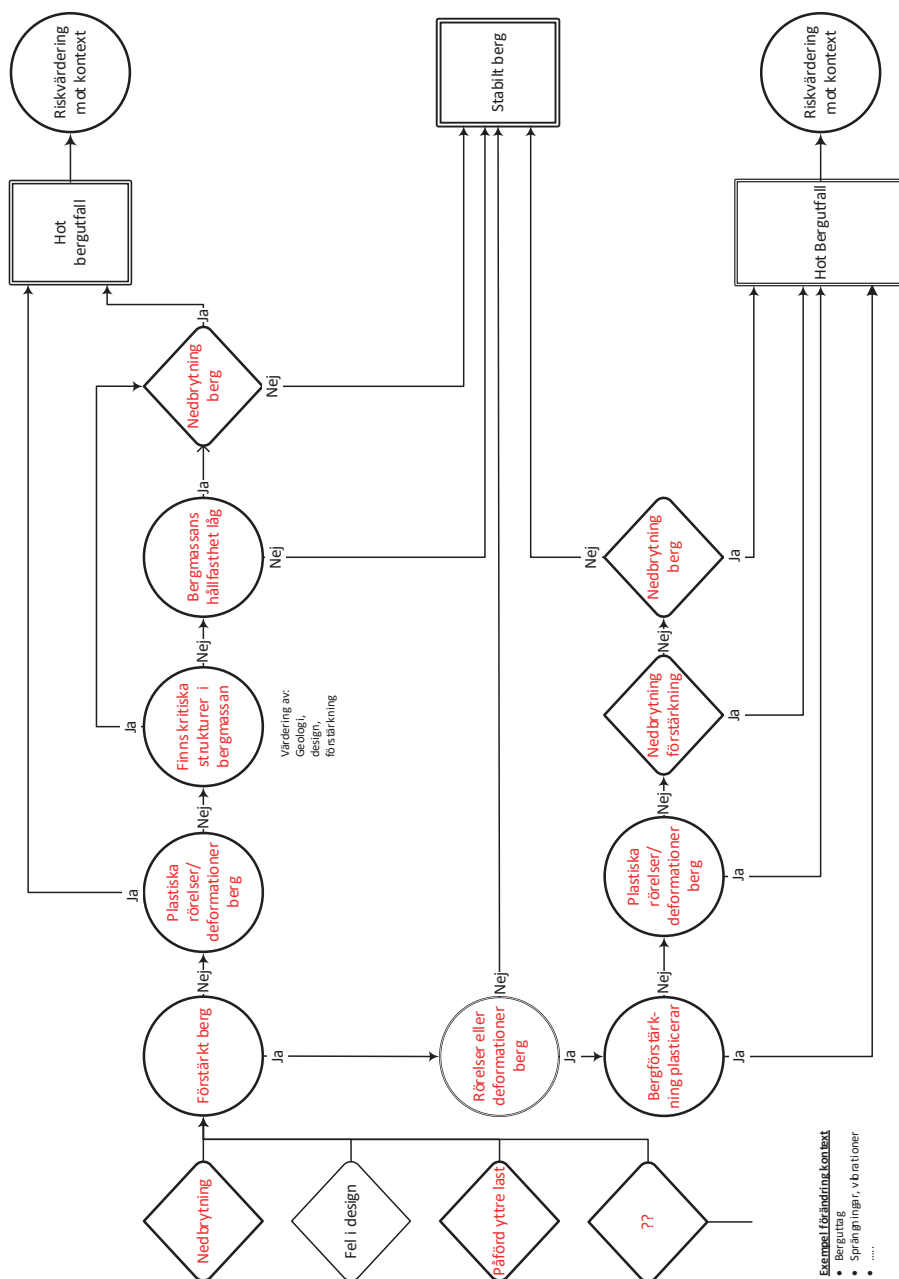
Brott i en förstärkt bergmassa som varit i drift under en period måste induceras av någon faktor, det kan vara påförda laster, avlastning eller nedbrytning av bergmassan. Det kan också vara nedbrytning av förstärkning och därmed en förändring av förstärkningens deformationsegenskaper.

En generell modell finns åskådliggjord i Figur 9. Notera att det i vissa fall finns alternativa eller parallella vägar för hur ett brott utvecklas. Förändringar i detta system ger upphov till exempelvis ett tillägg i deformation utifrån det tillstånd anläggningen befinner sig i. Nedbrytning av bergförstärkning ger i första hand en förändring av förstärkningens deformationsegenskaper och som följdverkan ökade elastiska eller plastiska deformationer i bergmassan.

Ett annat sätt att åskådliggöra mekanismerna finns redovisat i Figur 10. I flödesschemat finns redovisat ett generellt brottförlopp och till förloppet kopplade villkor vilka åskådliggörs som grindar. I de flesta fall kan villkoren kopplas till observationer eller mätningar (röd text). Svart text innebär att det är svårt eller omöjligt att koppla villkoret till observation eller mätning. Notera att nedbrytning finns åskådliggjort dels som ingående förutsättning dels som ingående i förloppet. Förloppen utmynnar i antingen stabila förhållanden eller i "hot" som måste värderas relativt bergmekanisk kontext. I värderingen måste även faktorer som nedbrytningshastighet tas med.



Figur 9 Driftskedet - Generell beskrivning av hur brott utvecklas och bakomliggande faktorer som kan medföra att brott utvecklas, rektangel representerar process eller händelse och cirkel representerar påverkan/förändring.



Figur 10 Exempel på modell, kopplad till brottmekanismer, som visar olika skeden där observationer kan göras och vad som leder till hot om nedfall av berg, en beslutssituation.

5.3.3 Rörelser och deformationer vid brott

Det är svårt eller omöjligt att ge generella utsagor om vilken storlek av deformationer som föregår brott och hur brottförloppen ser ut. De platsspecifika förhållandena, kontext, är styrande.

Vi använder indikatorer med deras egenskaper samt förändringar för att definiera om det skett brott som medfört rörelser och deformationer. Indikatorerna kan även visa på om exempelvis den lastupptagande förmågan i en förstärkning reducerats. Vid utvärdering måste man vara observant på att storleken på rörelser fram till brott och deformationsförloppen kan variera.

För att beteckna förloppen används termerna regressiva system för att beskriva cykliska kortvarigt retarderande (avstannande) brottförlopp och progressiva system för att beskriva accelererande förlopp. Ett regressivt system kan övergå i ett progressivt system (Hustrulid et al 2000). Deformationsförloppet fram till brott vara mycket snabbt i ett progressivt system medan ett regressivt system kan ge ett längre deformationsförlopp med periodvis avstannande rörelser. Typen av brottförlopp beror på ett flertal faktorer som t.ex. vilken brottmekanism som styr brottet, sprickors dilatationsvinkel och bergets hållfasthet men även på grundvattentryck mm.

Skaleffekter i bergmassan kan styra hur brott utvecklas. I mindre skala styrs strukturellt styrda brott i stor utsträckning av enstaka sprickors egenskaper där t.ex. råhet/undulation och dilatationsvinkel påverkar brottförloppens skalberoende. I större skala blir brottförloppen ofta mer komplexa och kan involvera flera sprickplan och block samt ökad yta av sprickplanen. En ökad volym ger också en reduktion av bergmassans styvhet. Vid brott som involverar en mindre volym, enstaka block, är oftast rörelserna fram till ras mindre än vid brott som involverar stora volymer. Spröda brottförlopp kan även inträffa i större skala och då i synnerhet för en bergmassa som är t.ex. förstärkt med ett styvt förstärkningssystem som kan lagra mycket energi eller i förhållanden med höga bergspänningar.

Värdering av storlek på rörelser och deformationer måste ställas mot platsspecifika kriterier som exempelvis kan komma från modellering eller vara erfarenhetsmässigt framtagna. Pågående förändringar kräver alltid någon form av utvärdering och om de visar en accelererande trend kan det krävas insatser inom en kort tidsrymd.

5.3.4 Respons i förstärkningssystemet på rörelser och deformationer i berget

I Bilaga 3 finns redovisat vilken respons på bergförstärkningen som olika typer av rörelser i bergmassan medför. I redovisningen finns konceptuella modeller som visar utfallet av olika brottmekanismer i förstärkningen och vilka indikatorer förväntas vara observerbara.

Bergbult

Responsten av en rörelse i en ingjuten slak bergbult kommer att bero på om bulten involveras, om det sker lossdragning av bulten eller om bulten plastiserar. Vid alla dessa fall kan rörelser detekteras genom att berget spricker upp och faller ut. Rörelser kan också detekteras genom att yttersta delen av bulten går till brott eller genom att bultbrickor plastiserar.

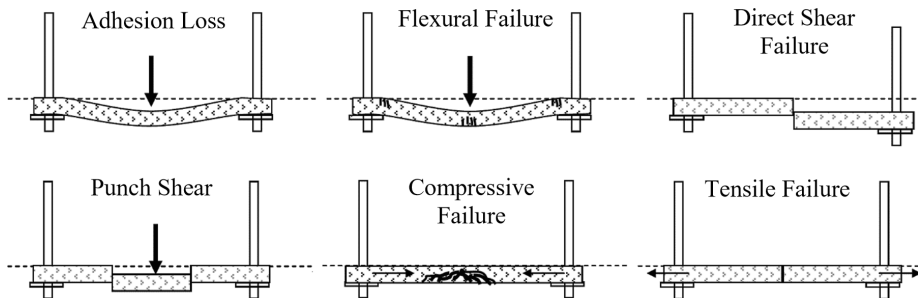
Sprutbetong

Sprutbetongen kan generellt utsättas för fyra underliggande mekanismer (system för deformationer):

- a. Skjuvrörelser i bergmassan
- b. Tension sub-tangentiellt sprutbetongen (dvs. längs sprutbetongskiktet)
- c. Tryckbelastning sub-tangentiellt sprutbetongen
- d. Utbredd last

Mekanismerna i bergmassan kan ge upphov till följande brottyper i sprutbetongen (Nilsson 2003), se Figur 11.

- Vidhäftningsbrott (Adhesion loss)
- Böjdragbrott (Flexural failure)
- Skjuvbrott (Direct shear failure)
- Stansbrott (Punch shear)
- Tryckbrott (Compressive failure)
- Dragbrott (tensile failure)



Figur 11 Brottmekanismer i sprutbetong (från Morton 2009).

I fallet att sprutbetongen är upphängd, som en platta, tillkommer även brottfallet med stansbrott runt infästningar samt även avskalning av betong (täcksikt) om insprutad upphängning plastiserar.

Skjuvrörelser i bergmassan

Effekten av en skjuvrörelse i bergmassan beror på hur god vidhäftning betongen har i förhållande till betongens skjuvkapacitet. Om vidhäftningshållfastheten inte överskrids leder en skjuvrörelse till uppsprickning av sprutbetongen (Figur 87, Bilaga 3) i form av ett skjuvbrott.

Om det sker vidhäftningsbrott kommer effekten att variera beroende på om det är bultupphängd eller vidhäftande sprutbetong. Sker vidhäftningsbrott och betongen har tillräcklig brottseghet propagerar vidhäftningsbrottet och det uppstår detekterbara bomparter.

Böjdragbrott kan ske som följbrott till ett vidhäftningsbrott. Dragsprickor kan uppstå såväl mot berget vilka inte är detekterbara eller mot trafikytan där de kan detekteras. I ett initialt skede sker ofta mikrouppsprickning i de zoner där brottöjningarna överskrids. I senare skedes utvecklas brotten så att det slår upp sammanhängande sprickor. Såväl ökning av sprickvidd som propagering kan observeras eller mätas. Det saknas en entydig bild över hur små skjuvrörelser som kan detekteras genom observationer av dragsprickor i underkant.

Vid bultupphängd sprutbetong kan brotten utvecklas till stansbrott av bultbrickorna eller till att bultbrickorna/upphängningen deformeras (Figur 88, Bilaga 3).

Sprickmönstren kan förväntas följa sprickplanen eller skjuvytorna antingen som distinkta sprickor eller flera parallella mer eller mindre uthålliga mindre sprickor.

Tension sub-tangentiellt sprutbetongen

Tension längs bergytan leder till tensionssprickor och sprickdilatation vinkelrät bergytan. Normalt är vidhäftningen så god att skjuvkapaciteten berg/sprutbetong inte överskrids och det uppstår tensionssprickor i sprutbetongen när brottöjningarna är tillräckligt stora (Figur 89, Bilaga 3).

Tensionssprickor kan uppstå på grund av avlastning eller t.ex. i kombination med geologiska sprickor vid blockutfall.

Tryckbelastning sub-tangentiellt sprutbetongen

Höga tangentialspänningar i tunneln kan leda till plasticering av berget (Figur 90, Bilaga 3). Responserna i sprutbetongen styrs i första hand av brottmekanismerna i berget och inte av att det byggs upp höga spänningar i betongen. Brotten kan vara av såväl spröd som plastisk karaktär och kan leda till olika typer av följbrott som vidhäftningsbrott, böjdragbrott, skjuv/tryckbrott i betongen och löskärnebildning på grund av att berget spricker upp.

Olika typer spänningsstyrda brott är sällsynta i ytliga tunnlar. Oftast är bergspänningarna så låga att det är andra mekanismer som styr.

Utbredd last

Lastfallet kan uppstå på grund av att bergmassan är uppsprucken, småblockig, eller på grund av brott i bergmassan som leder till uppsprickning av berget. I förlängningen skjuvbrott genom den uppspruckna bergmassan ske.

För vidhäftande oarmerad sprutbetong (Figur 91, Bilaga 3), där det inte sker vidhäftningsbrott, leder lastfallet normalt till böjdrag- eller tvärkraftsbrott. Om betongen är armerad kan såväl hängmatteverkan som vidhäftningsbrott uppstå med böjdragbrott som följd.

Löskärnebildning kan ge följande lastfall för bultupphängd sprutbetong:

- Uppsprucket berg ger upphov till löskärna som utbreder sig över flera bultar/bultrader.
Sprutbetongen bär last från berget mellan bultarna medan bultarna bär den totala lasten (Figur 92, Bilaga 3).
- Uppsprucket block som genererar utbredd last på sprutbetongen (Figur 93, Bilaga 3).
- Löskärna sträcker sig ovanför bultarna som inte förankrar löskärnan.

Lastfallen kan generera skjuvbrott genom bergmassan som en följdmekanism. Denna typ av brott sker inte nödvändigtvis över en distinkt skjuvzon utan kan vara en flytande övergång mellan ”Skjuvbrott i bergmassan” och ”Utbredd last”.

Sker det brott i bultar, bultupphängningen eller om löskärnan sträcker sig över bultarna leder det till hängmatteverkan och att det uppstår dragsprickor. Det kan även uppstå skjuvbrott i bergmassan (Figur 96, Bilaga 3).

Om bultupphängningen kan plasticera, antingen på grund av att brickor/armering deformeras eller att sprutbetongen spricker upp och går till stansbrott.

Uppsprickningen mellan bultarna kan följa teoretiska brottlinjer och eventuellt även leda till ”kuvertbildning” (Figur 94, Bilaga 3). Lokal geometri, variationer i sprutbetongens tjocklek och vidhäftning, kupolverkan, geologiska sprickor mm medför att sprickmönstren kan variera (Nilsson 2003). Sker brott i upphängningen är det sannolikt att det uppstår radiella sprickor och samman med brottlinjer ge upphov till mer komplexa sprickmönster.

5.3.5 Representativa brottyper.

Vi har valt att betrakta problemställningen ur synvinkeln vilka belastningssituationer som vi har på förstärkningen.

Vi ser de bakomliggande mekanismerna som sekundära i detta sammanhang. De styr självfallet hur tunneln är dimensionerad och samman med förstärkningssystemet hur troligt det är att tunneln ska gå till brott och i viss mån även brottförlöppen. Eftersom det

är flera okända eller osäkra parametrar som hur tunneln är dimensionerad, brister i utförandet, nedbrytning mm så fokuserar vi på om indikatorerna kan visa på vilken typ av belastningssituation som förstärkningen är utsatt för. För att kunna värdera de bakomliggande bergmekaniska faktorerna som styr en brottbild kommer det alltid att krävas en djupare och mer ingående analys av de bergmekaniska, plats specifika, förutsättningarna.

Eftersom den absoluta merparten av tunnarna är förstärkta med sprutbetong har vi fokuserat på lastfallen på förstärkningen och brottmekanismerna som styr att indikatorn uppstår.

För att kunna hålla nere antalet tänkbara mekanismer har vi renodlat det till tre typfall samt ett odefinierat typfall vilka vi bedömer som hanterliga i detta sammanhang:

- ”Distinkt skjuvrörelse”: Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av kil/skjuvning pga. rörelse av rigid kropp.
- ”Utbredd last”: Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av löskärnebildning blockigt berg eller zon/finblockigt berg mm.
- ”Skjuvning av löst berg (t.ex. vissa former av upplagsbrott)”: Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av skjuvrörelse i löskärna/mycket dåligt berg. Skjuvning sker således inte över ett distinkt plan utan i det lösa berget.
- Odefinierad klass för de fall som inte täcks in.

Vi har bedömt att de tre specificerade typfallen täcker in de flesta vanligt förekommande brottfallen.

Brott som exempelvis nedböjning av skiffrigt berg kommer att ge en respons i förstärkningssystemet som överensstämmer med ”Utbredd last”. Brottförloppet kommer dock att avvika på grund av momentfördelningen i den nedböjda, förstärkta, skivan jämfört med en sprutbetong som bär upp lasten från ovanliggande berg.

De bakomliggande mekanismerna som exempelvis spänningsstyrda brott kan leda till skjuvning, spjälkning, utböjning/knäckning eller i slutändan löskärnebildning. Responsen i en sprutbetongförstärkning blir primärt någon form av utbredd last vid löskärnebildning eller skjuvbrott. De specificerade typfallen täcker inte upp för olika typer av utknäckning och uppkrossning som kan uppstå vid spänningsstyrda brott utan de faller in under det odefinierade typfallet.

5.4 Tänkbara observerbara indikatorer vid brott.

De indikatorer som är tänkbara och som kan observeras med kamera kan delas in i olika grupper:

- Synbara skador på berg eller förstärkning, t.ex. sprickor
- Synbara rörelser och deformationer
- Vattendropp och is
- Nerfall på innertak
- Avvikande utseende på sprutbetong
- Förändringar i någon (några) av de ovanstående

5.5 Kontext

Givet att tunneln är dimensionerad och byggd på ett korrekt sätt bör bassannolikheten för skada på nybyggda tunnlar kunna anses vara densamma oavsett bergmassans egenskaper eller förstärkningssystem.

Bergmassan i kombination med det sekundära spänningsfältet genererar lastfallen men sannolikt är de tidsmässigt beroende förändringarna små. Bergförstärkningen ger de mothållande krafterna.

Tidsmässig påverkan på bergförstärkningen på grund av nedbrytning är troligt den viktigaste faktorn som kan påverka sannolikheten för brott. Åldring av förstärkningen kan medföra en ökning av den generella bassannolikheten för brott. Bergmassans egenskaper påverkar såväl konsekvenser av bergras som bassannolikheten för de fall bärförmågan nedsätts. Inverkan av kontext på likelihood för olika indikatorer har inte gått att utvärdera. Hur bassannolikheten förändras med tid har däremot utvärderats i detta projekt.

5.6 Generella faktorer

Nedbrytning leder till försämring av materialegenskaperna antingen så att lastbärande förmåga reduceras och materialen fragmenteras eller helt bryts ned alternativt som för nedbrytning av berg att bergmassans egenskaper förändras så att last överförs till bergförstärkningen.

Nedbrytningsmekanismerna är i många fall komplexa och en fullständig beskrivning av dem skulle bli mycket omfattande. Därför beskrivs de olika mekanismerna enbart översiktligt.

Nedbrytning är beroende av kontext. Dels fasta förutsättningar, som exempelvis delmaterial, dels variabla förutsättningar som t.ex. tillgång till vatten. Kontext har valts att behandlas som potential för nedbrytning och kritiska parametrar var för sig eller samman kan betraktas som indikatorer på potential för nedbrytning, Tabell 12.

Tabell 12 Nedbrytning, förändring av lastbärande förmåga

<ul style="list-style-type: none"> - Materialegenskaper som ökar risk för nedbrytning av bergmaterialet/sprickfyllnader. - Belastning/materialegenskaper som ger ökad risk för nedbrytning av bergmassan som genom t.ex. uppsprickning, krossning, skjuvrörelser mm - Miljöfaktorer som frost, vattenkemi mm - Skadehistorik som visar på fortgående försämring av materialegenskaper 	Bergmaterialet	Nedbrytning, förändring av egenskaper.
<ul style="list-style-type: none"> - Korrosion stål/bult som försämrar den lastbärande förmågan. - Nedbrytning betong som försämrar den lastbärande förmågan - Miljöfaktorer som frost, vattenkemi mm som i kombination med materialegenskaper ökar risk för nedbrytning - Skadehistorik som visar på fortgående försämring av materialegenskaper 	Bergförstärkning	
<ul style="list-style-type: none"> - Skador, uppsprickning av det förstärkta berget - Mekaniska skador på förstärkningen, t.ex. sprucken sprutbetong - Deformationer och rörelser 	Det förstärkta systemet	

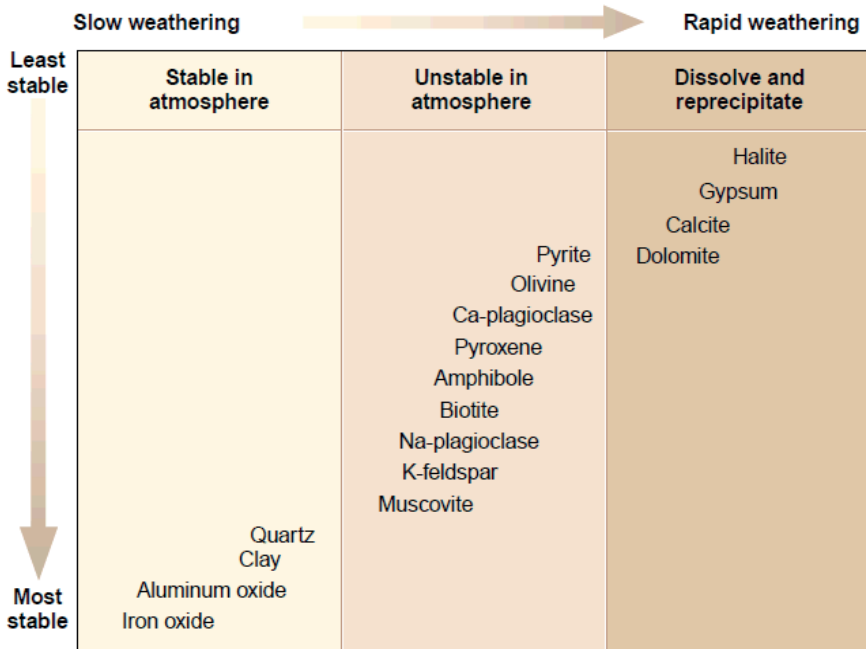
Tillgången på vatten och vattenkemin är kopplade till flertalet nedbrytningsmekanismer. Vid ostörda förhållanden är grundvattnet i kemisk balans med omgivande berg och mängden löst syre i vattnet är mycket låg vilket ger en långsam nedbrytningstakt. Utsprängning av en tunnel innebär inducering av en stor störning i grundvattnets strömning som innebär ökat vattenflöde i sprickorna. Detta innebär en ökad potential för en rubbning av det jämviktstillstånd som råder mellan berg och grundvatten samt ökad tillgång på syre vilket kan påskynda nedbrytning.

5.7 Berg

Nedbrytning av berg kan ske med olika processer, kemisk vittring, biologisk vittring och frostsprängning. I nordiskt klimat är mekanisk nedbrytning genom frost- och rotsprängning de dominerande nedbrytningsprocesserna. Frostsprängning av främst sprutbetong har studerats av Andren (2009).

Ofta sker vittring genom kombinationer av mekanismer. Det går därför inte att bortse från kemisk vittring. Ökade vattenflöden kan bidra till ökade vattentryck men också till tidsberoende nedbrytning (Hudson & Harrison 1997). Kemisk vittring brukar indelas i hydrolys, upplösning och oxidation.

Olika typer av kemisk vittring är beroende av ingående minerals löslighet, kornfogarnas egenskaper, tillgång till vatten och vattnets sammansättning samt temperatur. Lättlösliga mineral är ovanliga och förekommer främst som sprickfyllnad (Figur 12).



Figur 12 Nedbrytning av olika mineral (Från Hamblin & Christiansen, 2008)

De geologiska sprickorna är oftast helt eller delvis fyllda med mineral. En vanlig typ av sprickfyllnadsmaterial är sekundärt bildade material som fällt ut så att läkta sprickor bildats. Exempel på sådana material är kalk, olika kiselmineral och i exempel med högre temperaturer även grovkristallin kvarts. De sekundära mineralen är oftast mindre vittringsresistenta än ett kristallint sidoberg som är bildat vid högre temperatur och tryck. Sprickfyllnader kan även vara fragmenterat bergmaterial ned till sand- och siltfraktioner. Ofta är dessa mineral helt eller delvis leromvandlade. I sämsta fall består fyllningen av vittrat material som brutits ner till lermineral som smectit, illit eller kaolin och som har egenskaper likt vanliga lerjordar.

I större förkastningar och skjuvzoner kan längre partier bestå av fragmenterat och delvis omvandlat berg (breccia).

I kristallint berg har ofta sprickfyllnaderna lägre hållfasthet än sidoberget. Sker en urlakning eller omvandling av sprickmineralen kan sprickornas skjuvegenskaper förändras och den eventuella kohesion som finns i sprickmineralen kan reduceras till noll.

Ler- samt siltomvandling intar en särställning där man konstaterat att lermineral sakta eroderat bort i zoner antingen på grund av förlorad kohesion på grund av uttorkning eller på grund av urspolning. Det finns även fall där svällande leror inte observerats vid byggnationen och som har medfört större utfall.

Vid nedbrytning av många hårda bergarter sker ofta nedbrytning av kornfogar och cementering runt kornen snarare än att kristallerna påverkas. Sedimentärt berg har avvikande vittringsegenskaper från det kristallina berget med många gånger avsevärt lägre vittringsresistens än kristallint berg.

SKB har värderat olika miljöfaktorerers inverkan på bergmassan med avseende på berg som kan komma ifråga för djupförvar, dvs. i hårda kristallina bergarter som granit och vid större djup vilket medfört att vattenkemin avviker från i relativt ytliga tunnlar. En viktig slutsats i deras rapport är att påverkan på bergarterna är försumbar medan påverkan på sprickfyllnader kan vara mycket snabb (SKB T2010).

Sammantaget är det svårt, baserat på nuvarande kunskapsläge, att förutsäga vilken grad av påverkan som olika miljöfaktorer har på en tunnel eller i mindre skala på exempelvis ett enskilt block.

5.8 Förstärkningssystem

Svenska tunnlar är normalt förstärkta med sprutbetong och slak ingjuten kamstålsbult. De normalt förekommande förstärkningssystemen är:

Oförstärkt berg: I äldre tunnlar byggda före 1960 talet var den huvudsakliga förstärkningsmetoden platsgjutna stödjande förstärkningar för såväl stabilisering av enstaka block som partier med sämre berg medan berget mellan betongvalven ofta kan sakna förstärkning.

Ströbultning: Vid ströbultning är varje bult tänkt att stabilisera ett potentiellt instabilt block. Den huvudsakliga brottmekanismen är strukturellt styrda brott.

Systembultning: Systembultning innebär att bulten placeras efter ett förutbestämt system. Några förenklade betraktelsesätt är att bultarna ska samverka och stabilisera berget mellan bultarna genom någon form av valv eller platta bildas alternativt genom låsning av block. Berget mellan bultarna stabiliseras oftast med sprutbetong.

Vidhäftande sprutbetong: Den vidhäftande sprutbetongen är tänkt att ta upp last från mindre block med enbart vidhäftning. Eventuell last som kan överskrida sprutbetongens kapacitet förstärks normalt med ströbultning men systembultning kan även förekomma. I normalfallet sker stabilisering mot strukturellt styrda brott.

Bultupphängd sprutbetong: När vidhäftningen är alltför låg för att ta upp lasten av potentiellt instabilt berg mellan bergbultarna krävs upphängning, fastdubning av betongen. Bultupphängd sprutbetong utförs i samman med systembultning och bergbultarna nyttjas för upphängning av sprutbetongen. I äldre tunnlar är sprutbetongen nätarmerad medan fiberarmering använts i modernare tunnlar.

Stödjande förstärkning: Stödjande förstärkningar som normalt kan vara platsgjutna konstruktioner eller armerade sprutbetongvalv som dimensioneras för att ta upp lasten av ovanliggande potentiellt instabilt berg.

Vid design används ofta typförstärkningar som består av ovanstående delsystem. Typförstärkningarna speglar de bergmekaniska förutsättningarna och bergmassans

egenskaper som visat i kap 4.2.1. Vi har testat att utvärdera indikatorer relativt olika förstärkningssystem och funnit att förstärkningssystemen inte är påverkar utvärderingen av indikatorer i tillräcklig omfattning.

5.9 Stål, bergbult och infästningsmaterial

5.9.1 Bergbult, nedbrytningsmekanismer

Sederholm (2019) har visat att korrosionshastigheterna för olika material är mycket låg vid luftexponering, väl att observera, utan tillgång till fritt vatten till skillnad från material som är exponerade i miljöer där de utsätts för vatten. Förutom vissa betongtunnlar och mot trafikytan i helinklädda tunnlar finns det ingen renodlad miljö utan tillgång på fritt vatten och begreppet luftexponerad innebär att materialet utsätts för fritt vatten och att korrosionshastigheterna kan vara betydande och att felaktiga materialval kan innebära stora säkerhetsbrister.

Som material i bergbult används vanligen obehandlat kolstål, kamstål, men det kan även användas olika ytbehandlingar som varmgalvanisering eller galvanisering kombinerat med pulverlack. Andra material som glasfiber eller rostfria material används i dagsläget i mycket liten utsträckning.

I normalfallet består bergbulten av kamstål som är ingjutet med cementpasta (SN metoden). Bultarna är vanligen ingjutna med cementpasta $VCT \leq 0.3$ och centrerade i borrhålen så att de har ett täckskikt om 10 mm. Angrepp på bultsystemet kan dels vara nedbrytning av ingjutningsmassan dels korrosionsangrepp på bultmaterialet.

För bergbultar av kolstål är troligen gropfrätning mest kritisk. Det innebär en lokal reduktion av arean på bultstålet.

Enligt Sederholm (2019) påverkar nedanstående parametrar från DIN 50929, del 3, korrosionshastigheterna på stål.

- **pH värde** där $pH > 9$ har positiv inverkan.
- **Alkalinitet** (syrakapacitet) där > 120 mg/l HCO_3^- har positiv inverkan.
- **Kalciumhalt (Ca^{2+})** där > 80 mg/l har positiv inverkan
- **Kloridhalt (Cl)** där $> 150-200$ mg/l har negativ inverkan
- **Sulfathalt (SO_4^{2-})** där hög sulfathalt har negativ inverkan.

Hänsyn tas även till om vattnet är stillastående eller har stort flöde vilket kanske speglar syrehalterna bäst. Vid låga syrehalter, syresättning, är korrosionshastigheterna låga även om saliniteten är hög (Sederholm 2019, Eriksson et al. 2019).

Vid provningen i Äspö och Muskötunnlarna kunde Sederholm konstatera att alkaliniteten i vattnen var så hög att den hade en passiviserande verkan. Undersökningar har visat på betydande frättdjup (Sederholm 2019). I Vindötunneln visade testning av ca 40 år gammal bult att korrosion är vanligare närmare bergytan än inne i berget (Windelhed 2004). Man

kunde konstatera långt gången gropfrätning trots låg saliniteten. Det fanns fri tillgång på syre.

Sederholm (2019) har visat att varmförzinkningen frättes bort vid ingjutningen av galvaniserade bultar medan det var låga korrosionshastigheter för oskadade epoxibelagda varmförzinkade bultar och för rostfritt duplexstål.

Är vattenflödena stora i spricksystemen och flöden sker antingen tvärs bulten i sprickor eller längs bulten i kanaler sker det en urlakning av alkaliniteten. Cementpastans passiviserande verkan upphör med tiden och korrosionshastigheten ökar (Eriksson et al. 2019)

Såväl vattenkemi som vattenströmning i berget är kritiska faktorer. Vattendropp från bergbult innebär ökade korrosionshastigheter medan det är svårare att bedöma hur bergbultarna kan påverkas när vattendropp från sprickor kan observeras.

Avdunstning kan öka kloridhalten på exponerade ytor.

5.9.2 Effekt av nedbrytning, bergbult

Samverkan mellan passivt verkande helingjutna bultar och bergmassan är komplex. Flytning i en enskild bult kan ha avgörande inverkan på stabiliteten om bulten verkar som en direkt upphängning av ett block eller upphängning av sprutbetong. Berörs en större bergmassa, flera bergbultar, kommer samverkan mellan bergbult, bergmassa och eventuell ytförstärkning att vara avgörande. Sprickornas råhet och undulation kan t.ex. att innebära att en skjuvrörelse ger upphov till dilatation över sprickplanet och därmed en ökande normalspänning och skjuvmotstånd för att stabilisera bergmassan vilket innebär en avstannande deformation. Denna typ av resonemang kan vidgas till mer komplexa förstärkningssystem och en bergmassa som involverar fler sprickplan med låsningar mellan de block som definieras av sprickplanen.

Det kan för vissa fall även ansättas att en löskärna bildas runt tunneln och vid gynnsamma geometrier induceras ett tryckt valv runt tunneln. Bergförstärkningen verkar i detta fall som låsning av block och som upphängning av löskärnan. Rörelser i ett sådant system riskerar att störa valvverkan och kan leda till ökad last på förstärkningen och i slutändan ras.

5.10 Sprutbetong

5.10.1 Nedbrytningsmekanismer

Nedbrytning av betong kan, som för berg, klassas in i olika typer.

- Kemisk nedbrytning.
- Exogen nedbrytning (Nedbrytning av yttre orsaker).
- Mekanisk nedbrytning.

Kemisk nedbrytning är beroende på tillgång av vatten, betongens sammansättning och kemiska komponenter. Komponenterna som även kan betraktas som en delmängd av kontext medför potential för olika nedbrytningsmekanismer. Vissa faktorer som materialsammansättning, delmaterial, kan betraktas som fasta medan andra som exempelvis tillgång på vatten och vattenkemi är variabla och kan behöva observeras.

Sprutbetong med tillsatser av olika typer av acceleratorer, superplasticerare mm. har ofta en stor krympning. Det är ofta svårt att skilja krympsprickorna från andra typer av sprickor (Ansell 2010) och vid rörelser kan krympsprickor öppnas.

Exempel på kemisk nedbrytning kan vara urlakning, karbonatisering, Alkali-Kiselreaktioner och sulfatangrepp. Armeringskorrosion är ett delfall av nedbrytning sprutbetong men den involverar korrosion och vidhäftningshållfasthet armering-betong.

Den normalt förekommande exogena processen i tunnlar är frostsprängning.

Mekanisk nedbrytning kan dels vara beroende på rörelser och deformationer som behandlats i tidigare avsnitt. Andra möjliga mekanismer kan vara erosion eller utmattning på grund av lastväxlingar eller andra påförda olyckslaster.

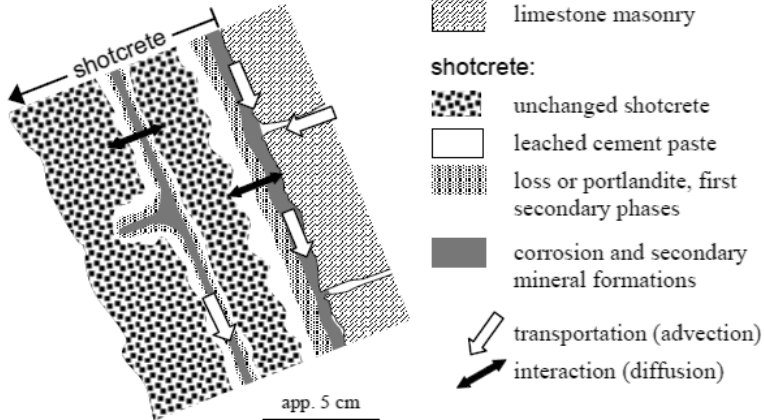
Kemisk nedbrytning

Den primära nedbrytningsmekanismen för betong är urlakning. När det gäller lakning kan man skilja mellan diffusionsstyrd lakning och transmissiv lakning (Lagerblad 2010). Den transmissiva urlakningen styrs av vattentryck och betongens genomsläpplighet. Den diffusionsstyrda lakningen går mycket långsamt. Enligt Lagerblad får man t.ex. diffusionsstyrd lakning av sprickväggarna i sprickor med flöde. Detta medför att sprickan ökar i vidd och därmed tillåter ett större flöde. Trädgårdh (1996) har visat att bindemedlen kan lakas ut så att betongen tappar sin hållfasthet och att det kan förekomma kraftiga sulfatangrepp i övergångszonen mellan berg och betong utan synliga tecken på nedbrytning.

Det finns ett klart samband mellan inläckagens storlek och nedbrytningstakten. Hagelia (2011) har påtalat att exponeringsklasserna enligt EN206 underskattar exponeringen i tunnlar som är förstärkta med sprutbetong. Även Romer (2003) har gjort liknande observationer.

Låg jonstyrka på vattnet och/eller lågt pH, under pH 4 – 5, påskyndar processen. I första hand sker urlakning av alkalinitet dvs. en sänkning av betongens pH vilket minskar betongens passiviserande verkan på stål och medför en ökad potential för korrosion. I ett andra steg urlakas bindemedlet dvs. betongen tappar hållfasthet. Det finns även

indikationer på att sprutbetongen även kan tappa vidhäftningshållfastheten mellan fibrer och betong på grund av urlakning.

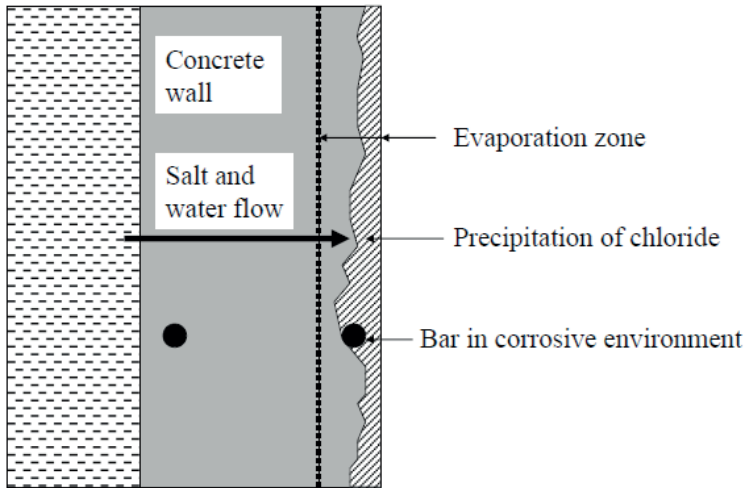


Figur 13 Schematisk illustration av sprutbetong på mur av kalksten med lokala flödesvägar längs skiktningar i sprutbetongen och längs kontakten med underlaget (Romer 2003)

Urlakning sker kontinuerligt men betongen buffrar i olika steg. När de buffrande komponenterna successivt förbrukats ökar urlakningshastigheten. Vid genomströmmande vatten sker urlakningen i första hand i övergången mellan berg och betong. Urlakningsprodukterna fälls ut i betongens porstruktur och på betongens yta som karbonater (Figur 13).

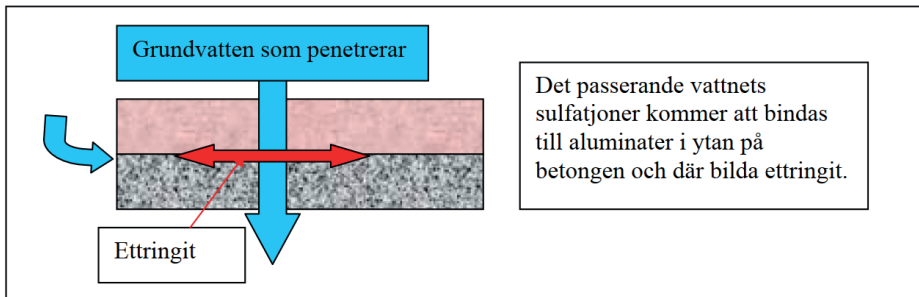
Bindemedlet i en betong verkar passiviserande och reducerar potentialen för armeringskorrosion. Vid urlakning eller karbonatisering av betongen minskar dess passiviserande verkan med ökad potential för korrosion som följd. Förekomst av löst vätekarbonat (HCO_3^-) ger upphov till karbonatisering.

Normalt finns tillräckligt med syre för att det ska finnas förutsättningar för armeringskorrosion i en sprutbetong. Förekomst av kloridjoner ökar potentialen för korrosion. Klorider kan antingen tillföras diffusivt genom inträngning av exempelvis sölsalter från betongytan eller från genomströmmande grundvatten (Figur 14).



Figur 14 Kloridanrikning i täcksikt på grund av avdunstning (Fagerlund 2008)

Förutom kemisk nedbrytning som beror på yttre faktorer kan det uppstå andra skademekanismer på en felaktigt sammansatt betong i förhållande till miljön i tunneln. Det kan t.ex. vara ballastreaktioner, sulfatreaktioner (Figur 15), Försenad ettringitbildning (DEF) och alkali-kiselreaktioner. Sulfatresistent cement med låg halt av kalciumaluminat (C3A) används för att motverka sulfatreaktioner. Acceleratorer med alkalialuminat kan dock medverka till sulfatreaktioner.



Figur 15 Sulfatreaktioner i gränsskiktet berg-betong (Lagerblad 2010)

Alkali-kiselreaktion (AKR) ger sprängning av betongen. Grundförutsättningar för att AKR ska kunna inträffa är att det finns reaktiv ballast och tillgång på alkali i bindemedlet. Det är omdebatterat om tillgång till alkali i grundvatten, tillsatser och i förekommande fall tölsalter kan generera förhöjd risk för AKR.

AKR reaktioner i betong ger upphov till sprickor som kan vara svåra att särskilja från exempelvis frostsador i långt gångna fall och kan generera sprickmönster som kan vara svåra att skilja från krympsprickor i sprutbetong.

Exogen nedbrytning

Frostangrepp är kanske den mest vanliga nedbrytningsmekanismen för sprutbetong i Sverige. Nedbrytning kan enligt Manouchehr (2010) ske på två olika sätt:

Inre skada

Inre skada uppstår när betongens vattenmättnadsgrad överstiger den kritiska vattenmättnadsgraden. En skada reducerar betongens drag- och tryckhållfasthet, elasticitetsmodul samt vidhäftningen mellan betong och armering

Yttre skada

Ytavskalning av betong orsakas av att betongens ytskikt fryser. Skadan påverkar initialt cementpastan så att den finare andelen av ballasten lossnar. Sekundärt lossnar även grövre ballastkorn.

På sprutbetongförstärkta bergytor sker ofta frostsprängning i skiktet sprutbetong-berg. Andrén (2009) har genom laboratorieexperiment visat att vidhäftningshållfastheten sänks väsentligt för prover som genomgått ett antal fryscykler. I studien har visats att det vid tillgång till fritt vatten finns ofryst vatten i provkropparna och att det sker tillströmning av fritt vatten till partierna där sönderfrysning sker. Enligt Andrén (2009) kan även sprutbetong med god vidhäftning få vidhäftningsbrott i partier med vattentillrinning.

Vid uppsprickning på grund av t.ex. AKR kan uppsprickningen accelerera på grund av frysning och situationen förvärras.

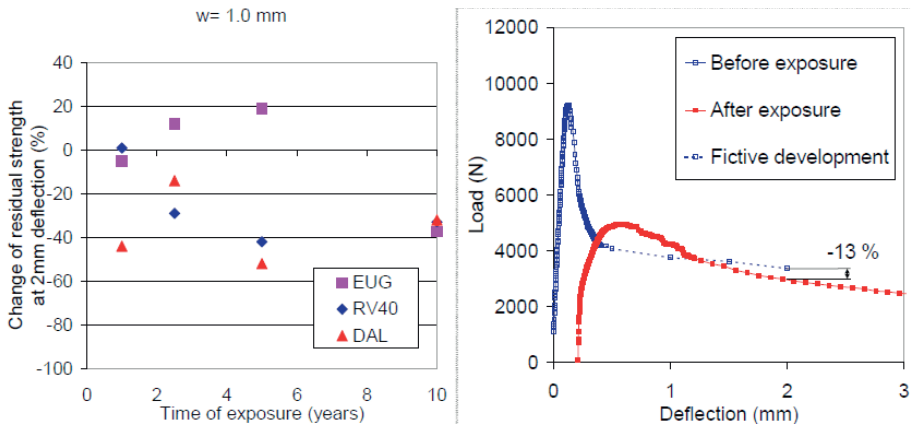
5.10.2 Effekt av nedbrytning, vidhäftande sprutbetong.

Den vidhäftande sprutbetongen är tänkt att ta upp last från mindre block med enbart vidhäftning. Eventuell last som kan överskrida sprutbetongens kapacitet förstärks normalt med strö-bultning men systembultning kan även förekomma. Skiktjockleken är ofta under 60 mm och vanligen utförs sprutbetongen med oarmerad betong. I normalfallet är förstärkningsverkan stabilisering av block. I äldre tunnlar förekommer sprutbetong med skiktjocklekar som understiger 30 mm och vars förstärkningsverkan kan ifrågasättas.

Nedbrytning av sprutbetongen kan innebära en nedsättning av vidhäftningen mellan berg och sprutbetong. Belastar ett bergblock sprutbetongen fås i första hand ett propagerande vidhäftningsbrott och i andra hand eventuellt ett böjdragbrott. Urlakning leder till nedsatt hållfasthet med ökad risk för stansbrott. Konsekvensen av denna typ av nedbrytning torde i första hand kunna vara enstaka blockutfall.

5.10.3 Effekt av nedbrytning, bultupphängd sprutbetong.

När vidhäftningen är lägre än erforderligt för att ta upp last av berget mellan bergbultarna krävs upphängning (fastdubning av) betongen. Bultupphängd sprutbetong utförs i samband med systembultning och bergbultarna nyttjas för upphängning av sprutbetongen. I äldre tunnlar är sprutbetongen nätarmerad medan fiberarmering använts i modernare tunnlar.



Figur 16 Exempel på förändring residualbärförmåga från Thorsell & Nordström (2009). Arbetskurvan i samband med att en spricka inducerats och dels en förnyad lastcykel efter att den uppspruckna sprutbetongen exponerats redovisas.

Thorell & Nordström (2009) har visat att nedsättning av sprutbetongens hållfasthet leder förutom en reduktion av vidhäftningen även till att betongens arbetskurva förändras så att böjdraghållfastheten (första sprickan) nedsätts och att residualhållfastheten reduceras (Figur 16). Residualhållfastheten i fiberarmerad sprutbetong påverkas sannolikt av att vidhäftningen mellan fiber och betong försämras.

Armeringskorrosion och korrosion av stålfibrer i betongen påverkar betongens residualhållfasthet. En reduktion av betongens hållfasthet leder till ökad risk för stansbrott i punkterna där betongen är upphängd och till försämrade draghållfasthet.

Konsekvenserna av försämrade arbetskurvor för betongen varierar självklart med lastfallen och vilken utnyttjandegrad betongen har.

Det finns ytterst lite undersökningar av hur sprutbetongens arbetskurvor förändras vid nedbrytning och vilka konsekvenser det kan för vid olika typer av lastfall.

5.11 Påverkan på förstärkningssystem

I ett system med en fortgående nedbrytning av bergförstärkningen kommer en reduktion av förstärkningens styvhet eller bergmassans egenskaper att påverka deformationsförloppen vid plasticering eller brott. Systemen är komplexa dels avseende de bakomliggande brottmekanismerna och responsen i förstärkningssystemen dels hur samverkan mellan berg och förstärkning påverkar brottförloppen (se Bilaga 4).

Det finns viss kunskap hur brotts sannolikheten ökar med ökande ålder på tunnarna (Bilaga 5). Det saknas dock tillräcklig kunskap om hur olika former av nedbrytningsmekanismer påverkar de mekaniska egenskaperna och i slutändan brotts sannolikheten.

5.12 Kopplingar observerbara indikatorer och nedbrytningsmekanismer

5.12.1 Kontext

Bergbult och sprutbetong är de viktigaste och vanligaste komponenterna i en tunnels bergförstärkning. Vid nedbrytning styrs nedbrytningshastigheten av kombinationer av ingående material och miljöfaktorer. Miljöfaktorerna har olika påverkan på olika material.

Tillgången på vatten och vattnets kemiska sammansättning är de viktigaste faktorerna tillsammans med ingående materials egenskaper. Olika materialsammansättningar i kombination med olika miljöfaktorer ger olika stor potential för olika nedbrytningsmekanismer och nedbrytningshastigheter. Betongens genomsläpplighet och uppsprickning är ytterligare faktorer som påverkar nedbrytningshastigheten.

I tidigare avsnitt finns en mycket översiktlig genomgång av olika tänkbara processer och vilka faktorer som kan vara styrande för nedbrytning.

Kontext ger vilken potential som det finns för nedbrytning. Finns exempelvis inte förutsättningar för nedbrytning, genom att ingående material och miljö ger mycket liten sannolikhet för nedbrytning, så bör bassannolikheten för aktuell mekanism reduceras. Det kan även finnas ett tidsberoende där bassannolikheten förändras med ålder.

För att utvärdera potential för nedbrytning krävs expertinsatser som vid i andra sammanhang tidigare utförda analyser för alkali-kiselreaktion (AKR).

5.12.2 Observerbara indikatorer

För bergbult går det alltid att observera hur korroderade luftexponerade delar är. Det är inte tydligt om det finns ett samband mellan synlig korrosion och sannolikheten för korrosionsangrepp i ingjutna delar. Om de luftexponerade delarna är insprutade med täcksikt finns alltid möjligheten att observera rostgenomslag och i slutändan rostsprängning av täcksikten.

Synliga brister i ingjutning och förekomst av vattenflöden i anslutning till bulten kan indikera ökad sannolikhet för korrosionsangrepp i de ingjutna delarna.

För sprutbetong finns det ett antal olika nedbrytningsprocesser som i första hand är beroende på om betongen är exponerad för vatten och i andra hand delmaterialen, såväl betongens som vattnets sammansättning och ballastens mineralogi. Sprutbetong kan vara utsatt för betydande krympning under byggskedet, upp till 0,2 % med uppsprickning som följd.

Normalt kan man konstatera urlakning av betongytan, nedsättning av betongens hållfasthet och vidhäftningsbrott genom att hammartest och bomknackning. Betongen kan skrotas eller bilas ned och undersökas okulärt och i laboratorium. Betongkärnor kan även tas.

Lakning av betong kan ge upphov till utfällningar. Samtidigt kan även utfällningarna bero på lakning av cementbruk i den tätade zonen runt tunneln eller möjligen även från grundvattnet.

Flera av nedbrytningsprocesserna ger direkt upphov till uppsprickning av betongen. Det är många gånger svårt att särskilja mellan de olika processerna eller om uppsprickning skett på grund av rörelser i berget eller krympning. Det är många gånger kombinationer av processer.

Ett specialfall är nät- eller stångarmerad betong där rostgenomslag är tydliga indikatorer. Detta i synnerhet om rostgenomslagen följer armeringsmönstren.

Med den teknik som finns tillgänglig idag är fjärrinspektion begränsad till okulärbesiktning. För sprutbetong är det i princip enbart möjligt att konstatera om det finns utfällningar, rostgenomslag och uppsprickning. För bergbult går det i princip enbart att konstatera korrosion på luftexponerade delar.

Förekomst av vatten; som torra, fuktande eller blöta förhållanden eller dropp från bergbult är lokala variationer i kontext som kan användas som indikatorer.

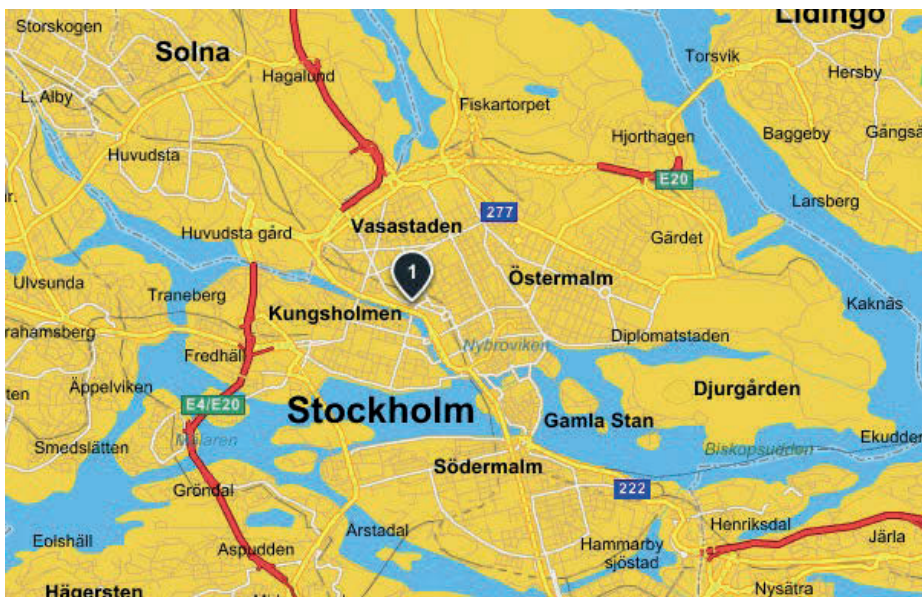
6. Försöksplatsen (Torsgatan), beskrivning samt kartering och utvärdering av inspektioner

6.1 Platsen

6.1.1 Tunnelns läge

Det visade sig svårt att hitta en bra försöksplats, som också skulle användas vid försöken med fjärrinspektion, eftersom de flesta åtkomliga tunnarna i Stockholmstrakten inte hade särskilt många skador. Försöken gjordes i en temporär arbetstunnel till Citybanan som drivits parallellt med ler- och kloritfyllda zoner och där man kunnat konstatera uppsprickning. Platsen är densamma som senare användes vid försök med fjärrinspektion, se Kapitel 21.

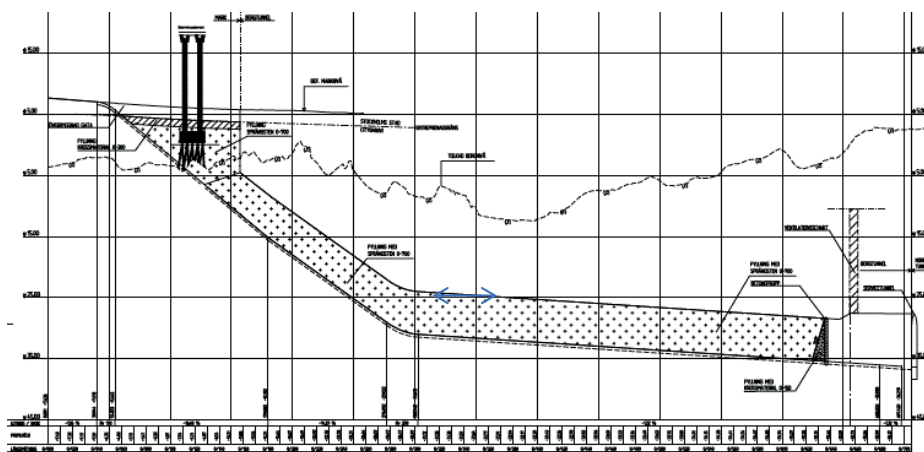
Tunnelmynningen befinner sig ungefär vid Barnhusbrons landfäste vid Torsgatan och sträcker sig till stationen Stockholm City.



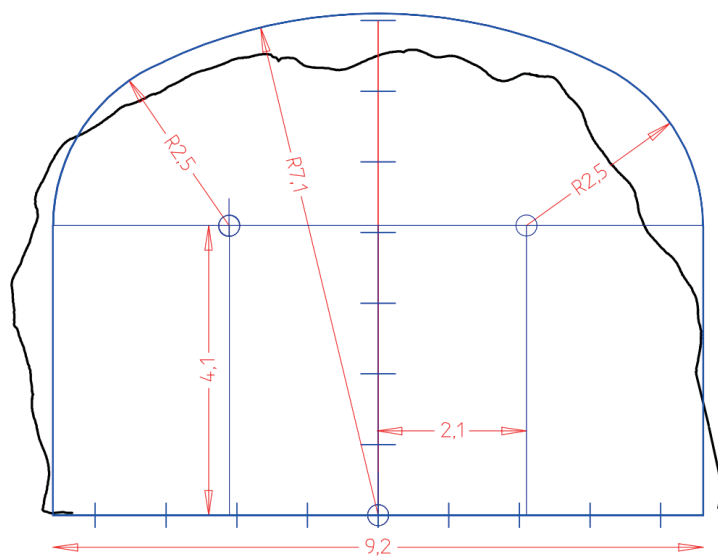
Figur 17: Försöksplatsens läge

6.1.2 Geometri, tunnelsektion och profil

Tunnelprofilen visas i Figur 18 och inmätt tunnelsektion i Figur 19. I Figur 19 redovisas teoretisk, projicerad sektion.



Figur 18 Tunnelprofilen. Försöksplatsens läge markerat med blå pil



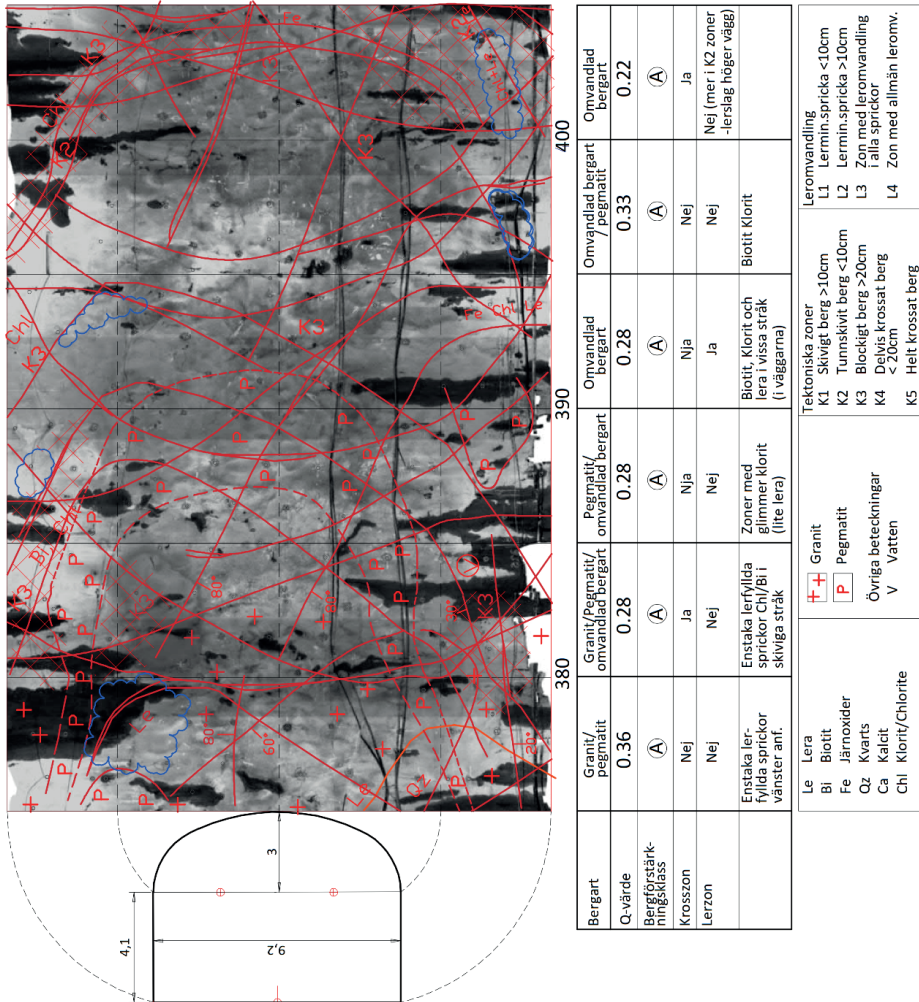
Figur 19: Inmätt tunnelsektion, km 0+390, och projicerad sektion i blått

6.1.3 Geologi, bergkvalitet och bergförstärkning

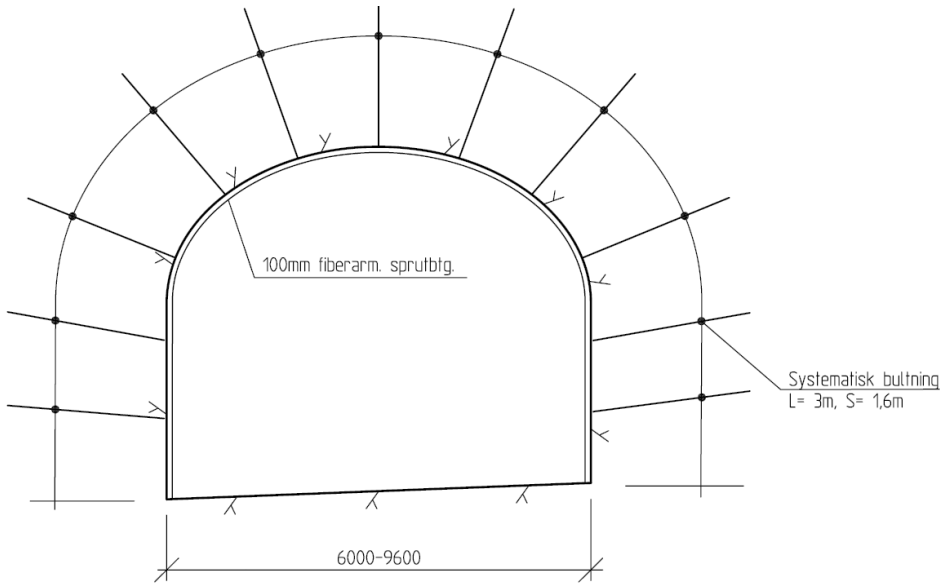
Enligt geologisk kartering består berget i det aktuella partiet av omvandlat berg, Granitoider och Pegmatiter. Den geologiska karteringen visar att berget genomskärs av flera zoner med blockigt berg och med ler- och kloritfyllda sprickor. I Figur 20 redovisas den geologiska karteringen från drivningen av tunneln samman med intensitetsbilden från

laserscanningen som utfördes i samband med försöken. Mörka partier i intensitetsbilden visar på inläckande vatten, fuktande eller blöt sprutbetong vid tiden för försöken.

Berget är av mycket dålig kvalitet med ett Q-värde mellan 0.22 och 0.36. Tunneln förstärktes enligt bergförstärkningsklass A, ($0.1 < Q < 1$) i det aktuella partiet, se Figur 21.



Figur 20: Geologisk kartering och klassificering av tunneln renritad från karteringsskiss (Bergab). Kartering redovisad över senare utförd laserscanning.



Figur 21: Bergförstärkningsklass A

6.1.4 Erfarenheter från bygget

Arbetstunneln drevs en längre sträcka längs med vad som karaktäriseras som en svaghetszon med uppsprucken och omvandlad gnejs och granit med förekomst av kloritskiffer. Det var stora läckage från stuff i området och injekteringskärmarna kompletterades med extrahål. Efterinjektering med kemiska injekteringsmedel (Taccs) utfördes i samband med drivningen.

Tunneln var inte tillräckligt tät och 2011 efterinjekterades berget med CarboPur. Inom försöksområdet tätades enstaka hål och mer omfattande injektering utfördes i två partier som angränsar till försöksplatsen. I dessa partier trycktes berget sönder på grund av injekteringstrycken och sprutbetongen sprack upp. I något fall trycktes sprutbetong och berg ut. De större sprickorna markerades med sprayfärg vilket medförde att de uppspruckna områdena inte kunde användas till försöken.

6.2 Jämförelse inspektörer, resultat och analys

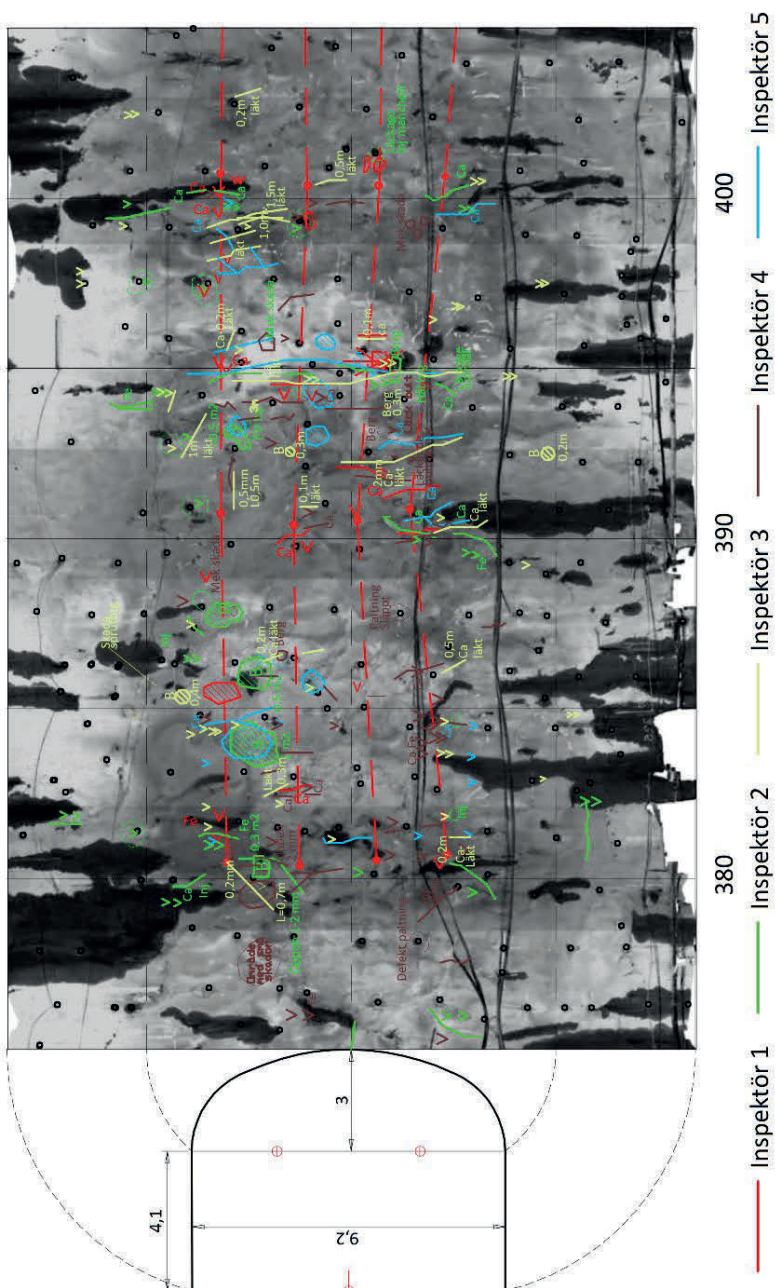
6.2.1 Skador, sprickor, bompartier och andra skador

I samband med försöken gjordes en skadekartering och kartering av sprickor i sprutbetongen i försöksområdet. Karteringen gjordes som ett jämförande test mellan fem olika inspektörer som karterade aktuellt avsnitt i tunneln, Figur 22.

Tunnelns längdmätning var befäst i väggarna och på asfalten. I taket fanns det 4 murarlinor som var uppsända mellan inmätta bultar för orientering i sida. Dessa är illustrerade med röda streckade linjer i Figur 22.

Av redovisningen i Figur 22 framgår att sprickor, bompartier och andra observationer är karterade med olika lägen samt att mönstren med observationer och antal observationer skiljer sig åt mellan inspektörerna.

Det är i de flesta fall svårt att avgöra om vilka observationer som avser samma spricka bomparti etc. och få fram exakta värden på skillnader i läge. En grov uppskattning är att skillnaden i läge mellan observationerna är mellan +/- 1 och 2 m. Det finns enstaka observationer som förefaller ligga ca 5 m fel. Såväl antal och läge som storlek mellan bompartier skiljer sig åt mellan inspektörerna.



6.2.2 Okulär besiktning ca 0.5 m från tunneltaket, maximalt avstånd längs tunneln där en skada är okulärt urskiljningsbar

Det genomfördes ett enkelt test där inspektörens ögonhöjd var ca 0.5 m under taket. Inspektören skulle avgöra på vilket avstånd från inspektören som en spricka i sprutbetongen kan vara okulärt urskiljbar. Inspektören tittade snett upp och längs med tunneltaket. Detta motsvarar inspektion från en inspektionslucka.

Tabell 13: Maximalt avstånd för observationer i tak från simulerad inspektionslucka. Höjd ca 0.5 m under taket.

	Tydlig observation	Maximal längd	Kommentar
Inspektör 1	2-3 m	< 4-5 m	-
Inspektör 2	-	-	-
Inspektör 3	1-3 m	< 5 m	Observationer dropp/fukt, utfällning observerades upp till 5 m. Skadad sprutbetong på 3-5 m avstånd observerades inte
Inspektör 4	-	-	-
Inspektör 5	2 m	< 5 m	Starkt beroende av ojämnheter. I längdled - ca 2-5 m. I sidled – ut till anfangen.

Inspektör 1, 3 och 5 skattade avståndet där det går att göra en bedömning av uppsprickning och andra skador i sprutbetongen till mellan 1 och 3 m. Det maximala avståndet bedömdes vara i storleksordningen 5 m. Förutom ökad svårighet att urskilja skador begränsar ojämnheter i taket den maximala sikt-längden, utstickande berg/sprutbetong skymmer bakomvarande tak, se Tabell 13.

6.2.3 Inspektion, bedömning av tillståndsklass enligt mätmetod BaTMan

Vid inspektionen gjordes en bedömning av tillståndsklassen baserat på de numeriska värdena enligt Mätmetod i BaTMan, se kapitel 2.6. Vid inspektionen testades ett förslag på ny mätmetod som inte kom att användas. Inspektörernas numeriska värden har därför omarbetats efter gällande mätmetod. Resultaten från tillståndsmätningen utförd av inspektör 2-5 har utvärderats.

Inspektörerna har också gjort en egen bedömning av berget där de redovisar att tunneln i området har tillståndsklass 1-3, se Tabell 14.

6.3 Sammanfattning och kommentarer

Resultaten visar på svårigheter att med nuvarande arbetssätt kunna följa upp skadeutvecklingen för enskilda skador. Lägesfelen i kombination med att alla skador inte detekteras gör det svårt att se om enskilda skador, sprickor, bompartier mm växer i storlek.

Tabell 14: Jämförelse mellan inspektörer vid tillståndsmätning (omräknade värden)

	Inspektör 2				Inspektör 3				Inspektör 4				Inspektör 5			
	380-387	387-390	390-396	396-400	380-387	387-390	390-396	396-400	380-387	387-390	390-397	397-400	380-387	387-390	390-396	396-400
Bergkvalitet	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Utfall av block eller sten	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2	2	0	0	2	0
Lös, bompartier	9	0	6	0	3	0	0	0	6	0	6	6	12	0	6	0
Deformation av tunneltvärsnittet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spricka i sprutbetong	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spricka i förankrad sprutbetong	9	0	9	6	6	0	9	6	3	0	9	3	6	0	9	6
Krossning	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Urlakning	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	3	0	0	0	0
Korrosion	0	0	0	0	3	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Numeriskt värde (summa)	27	9	24	15	21	9	23	21	21	9	27	21	27	9	26	15

I detta fall är tunneln förstärkt med bultupphängd, fiberarmerad sprutbetong. Förstärkningen är dimensionerad så att eventuell vidhäftning inte tillgodoräknas. Det är svårt att avgöra om det är sprutbetongen eller berget som är bomt. I dåligt eller mycket dåligt berg är det inte ovanligt att berget bakom sprutbetongen är bomt. Metoderna för bomknackning, lätt hammare, slägga eller spett ger olika anslagsenergi och styr om och hur väl bompartier kan detekteras vilket kan vara en delförklaring till skillnader mellan de olika inspektörerna.

Sammantaget i vårt fall så ger berget 9 poäng och eventuella bompartier i normalfallet 6 poäng men kan ge upp till mellan 9 och 12 poäng. Ett system med krympsprickor ger ytterligare 2 poäng. Man måste ställa sig frågan om tunneln i detta fall uppfyller de kriterium som den är dimensionerad efter och om en sammanlagd poäng i samma storleksordning som gränsvärdet, >20 poäng, är adekvat.

Sprickorna i bergmassan har utsatts för stora tryck vid efterinjekteringen av tunneln. Man kunde konstatera stora rörelser och deformationer på ett flertal platser i samband med efterinjekteringen. Uppsprickningen av sprutbetongen och bompartier kan även i aktuellt avsnitt bero på detta. Längre sprickor i sprutbetongen och i synnerhet förändringar kan

vara tecken på förändringar av lastfallen och en reduktion av bergförstärknigens bärförmåga.

I fall med bultupphängd sprutbetong är troligen nedbrytning av sprutbetongen och reducerad vidhäftning mot stålfibern samt korrosion av bultbrickor och bult som leder till en reduktion av bergförstärknigens bärförmåga de mest kritiska faktorerna vid tillståndsmätning. Bergkvaliteten kan indikera lastfallen men är kanske mest en indikator på ”allvarligheten”, konsekvenserna av nedsatt funktion hos bergförstärknigens.

7. Expertfrågor

De frågor som ställdes var av två typer. Den ena var inriktad mot användningen av likelihood-kvot, den andra mot bayesiansk uppdatering med likelihood och den normaliseringskonstant ("nämnaren") som man då behöver. Till frågorna hörde en beskrivning av likelihood och bergmekaniska termer.

Frågeformuläret och beskrivningen finns i Bilaga 5.

7.1 Avsikt med frågorna

Avsikten var att resultatet skulle kunna användas vid:

- Val av de indikatorer som skall behållas i analysen
- Bedömning av hur mycket information de ger

7.2 Formuleringen av frågorna

Frågorna formulerades under beaktande av flera önskemål:

- Frågorna skulle belysa frågeställningar om brott respektive nedbrytning generellt oavsett mekanism
- Frågorna skulle också belysa specifika mekanismer för brott respektive nerbrytning
- De skulle formuleras så att experterna inte upplevde det problematiskt att svara på dem
- De skulle ge tillräcklig information för att möjliggöra utvärdering
- Man skulle få viss möjlighet att se om det fanns motsägelser i svaren.

7.2.1 Frågor om brott/ nerbrytning generellt

Frågor om brott och nedbrytning generellt formulerades för att man skulle kunna beräkna likelihoodkvoten direkt ur svaren. Man tillfrågades därför om hur troligt det var att se indikatorn om det var brott eller nerbrytning och om hur troligt det var att ändå se den om det inte var brott eller nerbrytning.

Frågorna var uppställda på formatet:

"Om det är brott, hur troligt är det att indikatorn i finns?"
(Likelihood för indikatorn i om det är brott)

"Om det inte är brott, hur troligt är det att indikatorn i ändå finns?"
(Likelihood för indikatorn i om det inte är brott)

För brott ställdes dessa frågor dels för inträffat brott, dels för pågående (aktivt) brott.

7.2.2 Problematiskt att svara på frågorna

En sak som kan innebära svårigheter är att man alltid utgår från en orsak (t.ex. brottmekanism). Sedan ställer man frågan:

"Om den här mekanismen är aktiv, hur troligt är det då att se indikatorn i." Detta, att utgå från orsaken, är fundamentalt vid användning av Bayesianska metoder.

Men det är författarnas uppfattning att experterna är mer vana att tänka: *"om jag ser den här indikatorn, hur troligt är det att det är brott?"* Därför ställdes även denna fråga, som en kontrollfråga när det gäller inträffat brott och pågående brott.

7.2.3 Frågor om specifika mekanismer

Visserligen är den väsentligaste uppgiften man vill få är sannolikheten för brott generellt, utan specificerad brottmekanism, men det kan även vara av intresse att få en indikation på vilken brottmekanism som troligast ligger bakom brottet.

Som tidigare påpekats, är det mycket svårt att svara på frågan om hur sannolikt det är att se indikatorn om den specifika brottmekanismen inte inträffat. Exempel:

"Om det är ett kilbrott, hur troligt är det att indikatorn i finns?" (Likelihood för indikatorn, givet kilbrott)

"Om det inte är ett kilbrott, hur troligt är det att indikatorn i ändå finns?"

I svaret på den andra frågan ingår nu inte bara fallet att det inte är något brott alls, utan även fallen med andra brott som inte är kilbrott, t.ex. löskärna.

Det gjordes en bedömning att sådana frågor är mycket svåra att besvara och därför valdes en annan väg. Den fråga som ställdes var:

"Om man tittar längs hela tunneln, i hur stor andel av tunneln saknas indikatorn? (i procent av arean).

Ur svaret på den frågan kan man beräkna sannolikheten att indikatorn förekommer (av vilken orsak som helst). Det är nämnaren vid Bayesiansk uppdatering som kan göras tillsammans med likelihood för indikatorn givet den aktuella mekanismen. Uppdatering av brottsannolikheten kan sedan göras med direkt tillämpning av Bayes' teorem. På detta sätt undviks problemet med att bestämma en likelihoodkvot.

7.2.4 Tillräcklig information

Den information man söker skall vara tillräcklig för en utvärdering. För det behövs antingen likelihoodkvoten, eller likelihood tillsammans med nämnaren i Bayes' teorem.

Likelihoodkvoten kan fås genom frågor om indikatorn förekommer vid brott och om den förekommer när det inte är brott, se avsnitt 7.2.1.

Nämnamnaren kan ges direkt som svar på en fråga, se avsnitt 7.2.3 och 7.2.5 eller så kan den beräknas om ett antal faktorer anges, se Bilaga 2.

En annan information som behövs i utvärderingen i vissa fall är den relativa frekvensen av olika brottyper. Därför ställdes frågor om detta för olika bergmekaniska kontexter.

7.2.5 Motsägelser och kontrollfrågor

Några kontrollfrågor ställdes för att ge möjligheten att se om det fanns några oavsiktliga själv motsägelser hos experterna.

Därför ställdes också frågor av den typen:

"Givet att indikatorn finns, hur troligt är det att den orsakats av annat än brott?"

Denna uppgift ger ju enkelt det svar vi söker, nämligen sannolikheten för brott, givet att indikatorn har observerats, se Bilaga 2.

7.3 De ställda frågorna

7.3.1 Frågor om indikatorerna

Frågorna ställdes i form av en matris, med frågorna i vänstra kolumnen, se Bilaga 7 och de olika tänkbara indikatorerna i övriga kolumner. Experterna skulle sedan svara på frågor om indikatorn, de flesta som sannolikheter. Utvärderingen gjordes sedan enligt de metoder som redovisas i Bilaga 2.

Frågorna var av olika typer. Här visas och kommenteras typerna.

Huvudgrupper och typfrågor	Kommentarer till frågan
Brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem	Motsvarande frågor ställs vad gäller nerbrytning av olika typer
Det har inträffat ett brott orsakad av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem. <i>Hur troligt är det att indikatorn förekommer vid brott?</i>	Likelihood att se indikatorn, givet brott
Det har inte inträffat ett brott. <i>Hur troligt är det att ändå se indikatorn?</i>	Likelihood att se indikatorn, givet att brott inte inträffat. Ger likelihoodkvoten tillsammans med svaret på frågan ovanför
Givet att indikatorn finns; I hur stor andel av observationerna har indikatorn orsakats av annat än brott?	Kontrollfråga. Ger uppskattning av brotts sannolikheten. Se avsnitt 7.2.5
Olika brottyper; inträffat brott	Inga motsvarande frågor vad gäller nerbrytning

Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av kil/skjuvning pga. rörelse av rigid kropp. <i>Hur troligt är det att det att indikatorn förekommer vid denna brotttyp?</i>	Likelihood för den specifika brottmekanismen, Kan användas för beräkning av brottsannolikhet tillsammans med en normaliseringskonstant, se nedan.
Total förekomst av indikator	Ingen motsvarande fråga vad gäller nerbrytning
Om man tittar längs hela tunneln. I hur stor andel av tunneln saknas indikatorn (i procent av arean).	Ger normaliseringskonstanten för uppdatering

7.3.2 Frågor om fördelning av brottyper

För vissa kontrollberäkningar behövde vi en uppskattning av bassannolikheten för en viss brotttyp. Det ställdes därför frågor om fördelning av de använda brottyperna för dels alla tunnlar, dels för fem olika bergtyper som beskrevs i frågan.

Brottyperna:

- Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av kil/skjuvning pga. rörelse av rigid kropp?
- Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av löskärnebildning blockigt berg eller zon/finblockigt berg mm
- Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av skjuvrörelse i löskärna eller mycket finblockigt/uppkrossat berg
- Hur sannolikt är det att det att överbelastningen orsakats av annan brotttyp.

Brottmekanismer kopplat till bergtyp:

För att göra det möjligt att beräkna sannolikheten för de olika brottmekanismerna behövs bassannolikheten för respektive mekanism. Frågor ställdes därför om hur troliga olika brottyper var relaterat till olika bergtyper. Formuläret visas i Bilaga 7.

8. Osäkerheter vid subjektiva värderingar

Som påpekades i Avsnitt 7.2 så måste värderingen av indikatorer i huvudsak utgå från subjektiva värderingar eftersom historiska data saknas. Det är därför viktigt att titta på möjliga osäkerheter som kan finnas i en sådan utvärdering, som baseras på såväl teori som erfarenhet.

8.1 Vad är erfarenhet?

Liksom i medicinsk diagnostik är berginspektionen till stor del erfarenhetsbaserad. Men det finns skäl att fundera lite på vad ”erfarenhet” egentligen är i dessa sammanhang.

”Gott omdöme får man av erfarenhet. Erfarenhet får man av dåligt omdöme”. Man behöver få ett facit på sina bedömningar, antingen att en insats krävs eller att säkerhet och tillförlitlighet är acceptabla, men det är inte säkert att man kan få detta. Eller med andra ord: om man inte gör något som leder till fel så lär man sig inte särskilt mycket. Man kan jämföra med geoteknikens säkerhetsfaktorer: man minskade storleken på krävd säkerhetsfaktor tills man fick brott i någon konstruktion, då ökade man för att sedan börja minska igen till dess man fått ett värde som verkligen var baserat på erfarenhet.

- En insats man beslutat om kan ha varit obehövlig, fast det får vi aldrig veta.
- Å andra sidan kan det visa sig att en ”tillförlitlig” tunnel borde åtgärdas betydligt tidigare än vad man angav vid inspektionen, men inspektören får sällan/aldrig någon återkoppling.

Begreppet ”lång erfarenhet” kan alltså vara mer urvattnat än vad man tror vid en första anblick. Här skall man tänka på att beslut om insatser kan vara mycket motiverade om det är så att de kostar lite jämfört med en möjlig skada. Men man får ingen ytterligare bergteknisk erfarenhet när man föreslår insatsen.

Det är möjligen så, att det vi kallar erfarenhet, i detta fall mer återspeglar branschpraxis vad gäller ställningstagande till behov av åtgärder och inte en underliggande bergmekanisk bedömning av möjliga brottmekanismer och trolighet för brott.

Man kan se en koppling till vad som kallas förtrogenhetskunskap och hur den skall kunna användas, se t.ex. Johannisson et al (2008), liksom också till så kallade heuristics, se Avsnitt 8.4.

8.2 Hur tänker man? Bias och heuristics

Det finns källor till fel när man skall åsätta likelihood för olika brottmekanismer. Olika system i hjärnan används (Kahneman 2012). Det finns också två huvudgrupper av felkällor som inverkar, bias (snedvridning) och heuristics.(mentala genvägar)

8.3 Bias

Man kan urskilja två huvudtyper av bias, motivationsbias och kognitiv bias.

Motivationsbias orsakas av att den bedömning personer uttalar inte återspeglar personens uppfattning: jag känner att det finns skäl att *säga något annat än vad jag egentligen tror*

Kognitiv bias orsakas av att den bedömning personen gör inte återspeglar den information personen har. Det finns alltså ett antal undermedvetna psykologiska felkällor som snedvrider resultatet genom att man bortser från information eller att man feltolkar den: *jag ser bara det jag tror.*

8.3.1 Exempel på motivationsbias

Expertbias

Om den som skall åsätta värden känner sig ha en expertroll, så kan det göra att man uppger en mindre osäkerhet i värdena. ”En expert skall ju vara säker!”



Bild: Peter Olsson

Konfliktbias

Orsakas av att de kan finnas någon typ av belöning som påverkas av de värden som åsätts. Det kan till exempel vara frågan om att få ett kontrakt om man underskattar en sannolikhet för höga kostnader.

Konservativ bias

Orsakas av en önskan att vara på säkra sidan och leder till att man ger en överskattad sannolikhet för skadliga händelser.

8.3.2 Exempel på kognitiv bias

Ankringsbias (anchoring)

Orsakas av att man ”klänger sig fast” vid ett första värde och inte justerar tillräckligt. Det är denna typ av bias som gör att man skall åsätta yttervärdena först.



Bild: Peter Olsson

Tillgänglighet

Man styrs av sådana uppgifter som man lätt kommer ihåg. Om man varit med om ett stort vatteninflöde är det troligt att man sätter en högre sannolikhet på vatteninflöden än vad man skulle ha gjort annars.

Law of small numbers

Man tittar bara på en viss specifik information och glömmar bort att det finns mer allmängiltig information. Med andra ord, man betraktar ett litet statistiskt sampel som om det korrekt representerar hela populationen. Kallas också ”base rate bias”.

Sannolikheter för sammansatt händelse

Ett vanligt fel som görs är att man inte bedömer sannolikheten för en sammansatt händelse eller en händelsekedja på ett korrekt sätt:

Om det krävs att bägge delhändelserna A och B måste inträffa för att händelsen E skall inträffa så gäller:

$$P(E) = P(A) \times P(B) \qquad \text{Ekvation 6}$$

Det vill säga, sannolikheten för den sammansatta händelsen är mindre än sannolikheten för endera delhändelsen. Detta är det så kallade konjunktionsfelet.

Overconfidence

Orsakas av att personen underskattar sin osäkerhet om värdet av en parameter till exempel genom att inte inse att det finns andra värden som är möjliga.

8.4 Heuristics

Heuristics (svenska mer korrekt heuristik) är ”förenklade sätt”, erfarenhetsbaserade tekniker för problemlösning, inläring och upptäckt att fatta beslut eller lösa problem. Metoden är inte garanterat optimal, logisk eller rationell men är tillräcklig för att nå det omedelbara målet. En fara med heuristics är att de kan leda till kognitiv bias.

8.5 Osäkerheter vid sammanvägning av olika experters utlåtanden.

I Avsnitt 2.5 har påpekats att det finns en del osäkerheter vid expertbesiktningar som man behöver ta hänsyn till.

En viktning av indikatorer som är baserad på expertutsagor kommer ofta att innehålla sammanvägningar av olika experters utsagor, eftersom man tillfrågar flera experter men vill ha fram ett värde på indikatorvikten. Man är alltså tvungen att ge olika experters utsagor olika stor vikt och sedan väga samman dem.

Vid sammanvägning av experters utlåtanden i vårt fall finns det olika faktorer som inverkar:

- olika erfarenhetsbakgrund (bergmekanisk kontext)
- expertstatus
- förmåga att arbeta i osäkerhetstermer

Ämnet finns behandlat i litteraturen se t.ex. Chatterjee (1981) och Leung et al. (2007), men det lilla antalet hittills erhållna expertutsagor gör att vi inte behandlat vårt material med hänsyn till detta.

9. Urval och viktning av indikatorer för fjärranalysen

Grundläggande principer för indikatorer och indikatorkvoter och deras användning har behandlats i Kapitel 3.

9.1 Inledning

Indikatorernas vikt kan ibland bedömas ur historiska data med statistiska metoder, se t.ex. Margo et al. (2009). Ett annat sätt kan vara att utnyttja sig av expertutsagor.

Historiska data

Normalt för Trafiktunnlar sker regelbunden inspektion och åtgärder sätts in i så god tid att nedfall av berg inte sker. Det har historiskt inträffat ett fåtal nedfall. De har emellertid inrapporterats på olika sätt och de historiska händelserna är därför svåra att spåra. Det finns därför inget tillförlitligt underlag som kan spegla bassannolikheten för bergras. Däremot finns historiska data i BaTMan. Dessa relateras då till skadebegreppet i BaTMan men ofta saknas en beskrivning av indikatorerna och skadans grundorsak som visats i Avsnitt 2.7 och Bilaga 2.

Baserat på expertutsagor

Om det är så att de experter som bidragit vid åsättandet av vikter i själva verket baserar inspektionen på ett totalintryck eller påverkas av olika typer av bias, så kan systemet med indikatorvikter bli ineffektivt. Det är alltså väsentligt att sådana felkällor granskas i samband med val och viktning av indikatorer av indikatorer. Detta problem behandlas i Kapitel 8.

9.2 Väsentliga egenskaper hos urvalet av indikatorer

De egenskaper som man efterfrågar hos en indikator har beskrivits i Avsnitt 3.13.2. När det gäller urvalet är viktiga egenskaper att beakta dels urskiljande förmåga, t.ex. en hög likelihoodkvot dels att indikatorer helst inte har en stark positiv korrelation sinsemellan, eftersom det minskar informationsinnehållet om man ser flera av dem, se Avsnitt 4.6.2.

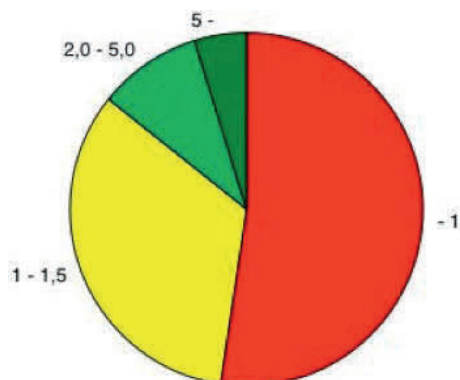
9.3 Första urval

9.3.1 Workshop

Till en inledande workshop fick deltagarna innan workshopen en enkät för att om möjligt sälla fram indikatorer att gå vidare med. Dessutom gjordes gruppövningar vid workshopen där grupperna själva fick välja indikatorer att värdera. Värderingen gjordes både med likelihoodkvot och med parvisa jämförelser (AHP-metoden) mellan indikatorer, se Avsnitt 3.2.

Från workshopen noterades:

- Diskussionerna visade på att en större del än förväntat av indikatorerna i screeningen hade visst eller stort värde att gå vidare mer.
- I diskussionen belystes problemet att indikatorerna är kontextberoende och att man vid inspektion letar efter flera samverkande indikatorer, vilket enkäten inte tog upp.
- Många indikatorer och kontexter var så kortfattat skrivna att de blev otydliga och ibland missuppfattades.
- En intressant notering är, att grupperna själva valde kontext/mekanism och indikatorer att ge likelihood för. Det känns ju inte orimligt att anta att man skulle välja kombinationer med starka indikatorer, alltså med stor urskiljande förmåga och höga likelihoodkvoter. Så visade sig inte fallet, se Figur 23.



Figur 23 Fördelning av åsatta likelihoodkvoters storlek

Något entydigt svar på frågan om urvalet kom inte fram utan man rekommenderade att författarna skulle använda materialet till att gå vidare med ett ytterligare urval.

9.3.2 Referensgruppsmöte

Vid ett referensgruppsmöte diskuterades principer för val och viktning av indikatorer ytterligare. Bland annat framhölls att den bergmekaniska kontexten var av ytterligst stor vikt, se Tabell 15.

Författarna gjorde i samband med arbetet att ta fram matrisen med indikatorer och mekanismer ett urval för att ta bort indikatorer som vi inte ansåg ha de egenskaper som angivits i Avsnitt 3.1.

Tabell 15: Tabell över osäkerheter

Huvudfaktor	Osäkerhet	Identifiering	Likelihoodskattning
Bergmekanisk kontext	kontext förstärkning; övrig information	Bergkunnande, erfarenhet, (AHP)	Historiska data, erfarenhet, kunskap
Mekanismer	Mekanism kontext	Bergkunnande, erfarenhet, (AHP)	D:o
Indikatorer	Indikator mekanism	Bergkunnande, erfarenhet, (AHP)	D:o
Skadesannolikhet	Skada mekanism (för den specifika tunneln)		Bergkunnande, erfarenhet

9.3.3 Subjektivt urval gjort av författarna

9.3.4 Val av metod för viktning

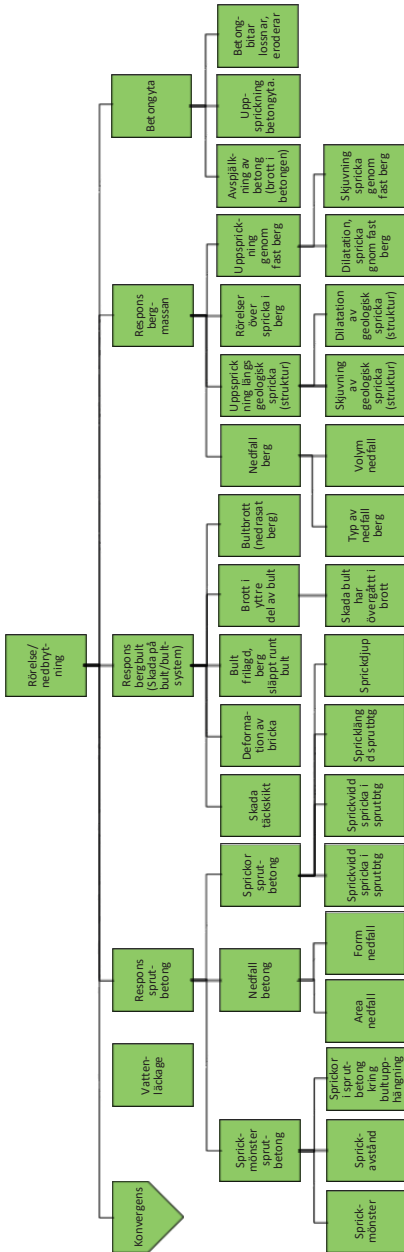
Under arbetet med analysen av det preliminära urvalet gjordes ett övervägande om AHP-metoden skulle användas tillsammans med metoden med likelihood-kvot. Med hänsyn till för- och nackdelar med metoderna, se Tabell 16, bestämdes att i fortsättningen skulle vi enbart använda direkt åsättande av likelihood och likelihood-kvot, och att inte gå vidare med försök med AHP-metoden.

Tabell 16: Jämförelse AHP-metoden och likelihood-kvot

Krav/önskemål		Likelihood-kvot	AHP
Bra beslutsstöd		ja	nja
Flexibelt			
	Multipla observationer	ja	ja
	Bortfall av observation	ja	nej
	Osäkra observationer	ja	nej
Transparent		ja	ja
Etablerat		ja	?
Lätt att kalibrera (sätta vikter)		Inte helt	Något enklare

9.4 Viktning av indikatorer i urvalet

Vid det första urvalet enligt avsnitt 9.3.3 ställdes en matris upp med tänkbara indikatorer och med olika brottmekanismer. Indikatorerna redovisas i två huvudgrupper, orsakade av rörelser i bergmassan eller av nedbrytning. Många av indikatorerna kan visa på såväl rörelser, brott, och nedbrytning. I Figur 24 visas huvudgrupperna för indikatorerna. Detaljerad beskrivning finns i Bilaga 6.



Figur 24: Tänkbara indikatorer brott i eller nedbrytning av bärande huvudsystem i tunnel.

En matris skickade till ett antal utvalda sakkunniga för ifyllnad av vikter på de enskilda indikatorerna. Vikterna avsågs sedan användas i en slutlig gallring bland indikatorerna.

9.5 Utvärdering av svaren

Vid en genomgång av de likelihoodkvoter som kunde beräknas ur svaren visade det sig att svaren hade en mycket stor spridning. Det fanns tecken på missuppfattning av frågorna.

9.5.1 Troliga fel bland svaren

Diskrepans i trolighet mellan inträffat och pågående brott

Ett pågående brott bör ges en större trolighet än ett inträffat, eftersom det ju kräver att ett brott har inträffat. I beskrivningen till frågorna påpekas att inträffat brott kan vara ett aktivt brott.

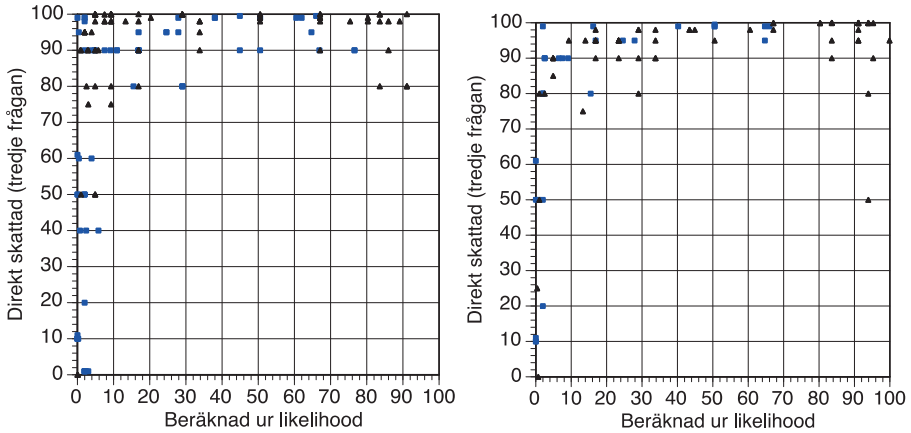
Ovanliga indikatorer får för högt värde

Indikatorer som man sällan ser men är starkt förknippade med brott får höga värden på likelihood, se avsnitt 4.4.2.

9.5.2 Kontrollfrågor och självutsagelser

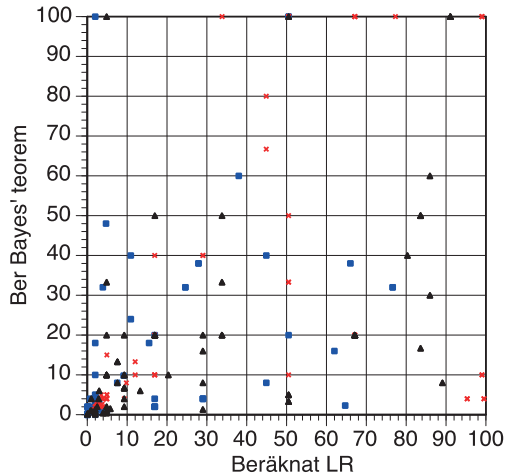
Kontrollfrågan: ”Givet att indikatorn finns, hur troligt är det att den orsakats av annat än brott?” ger det svar vi söker, nämligen sannolikheten för brott, givet att indikatorn har observerats, se Bilaga 2. Detta svar kan sedan jämföras med det vi får när vi arbetar med likelihood och uppdaterar bassannolikheten. Förhållandet mellan brottsannolikheter beräknade med de två metoderna visas i Figur 25. Det framgår att man vid direkt skattning troligen överskattar brottsannolikheten avsevärt. Detta fenomen är känt från litteraturen, se t.ex. Vick (2002).

En stor skillnad är att när vi arbetar med uppdatering så ingår bassannolikheten i beräkningen, medan kontrollfrågan ger samma brottsannolikhet oavsett bassannolikheten.



Figur 25 Skillnad mellan beräknad och direkt skattad sannolikhet för inträffat brott (vänstra bilden) och pågående brott (högra bilden)

En annan vanlig självmotsägelse är också kopplad till skattningen av den totala troligheten att se indikatorn och till skattningen av likelihood för en indikator.



Figur 26 Förhållande mellan brottsannolikhet beräknad med likelihoodkvot och brottsannolikhet beräknad med normaliseringskonstant

Det har visat sig att när vi beräknat brottsannolikheten ur likelihood med hjälp av Bayes' teorem med en normaliseringskonstant (baserad på totala sannolikheten att se indikatorn) har vi fått ett antal resultat med en sannolikhet överskridande 100%. Det är dessutom dålig överensstämmelse med brottsannolikheten beräknad med likelihoodkvot, se Figur 26.

Orsaken till dessa resultat torde huvudsakligen finnas i två faktorer: dels överskattning av likelihood (jämför avsnitt 4.4.2) dels underskattning av sannolikheten att se indikatorn oavsett orsak. Detta kan kanske vara kopplat till overconfidence bias, där man sätter för små eller för stora värden utan att ta hänsyn till möjlig spridning).

9.5.3 Påverkan av olika kontext.

För brott har påverkan av olika bergtyper på i första hand hur stor andel av alla brott som en viss brottyyp har.

För nedbrytning har påverkan av kontext inte utvärderats. Det är dels många olika material och delmaterial dels variationer i grundvattenmiljö och olika nedbrytningsprocesser med sinsemellan olika beroenden.

9.6 Slutligt urval av indikatorer och förslag till vikter

9.6.1 Metodik för urval och viktning av indikatorer

Vid analys av svaren konstaterades en stor spridning i svaren. Det har funnits uppenbara svårigheter att svara på frågorna. Många av indikatorerna är t.ex. sällsynt förekommande vid brott men förekommer sällan eller aldrig om det inte är brott. Beroende på hur täljare och nämnare skattats varierade likelihoodkvoten i flera fall med en eller flera tiopotenser. I vissa fall så kan likelihoodkvoten variera med något svar som avviker från övriga, t.ex. ett svar nära 1 och i övriga svar av storleksordningen 100 eller mer.

Ett slutligt urval gjordes i följande steg:

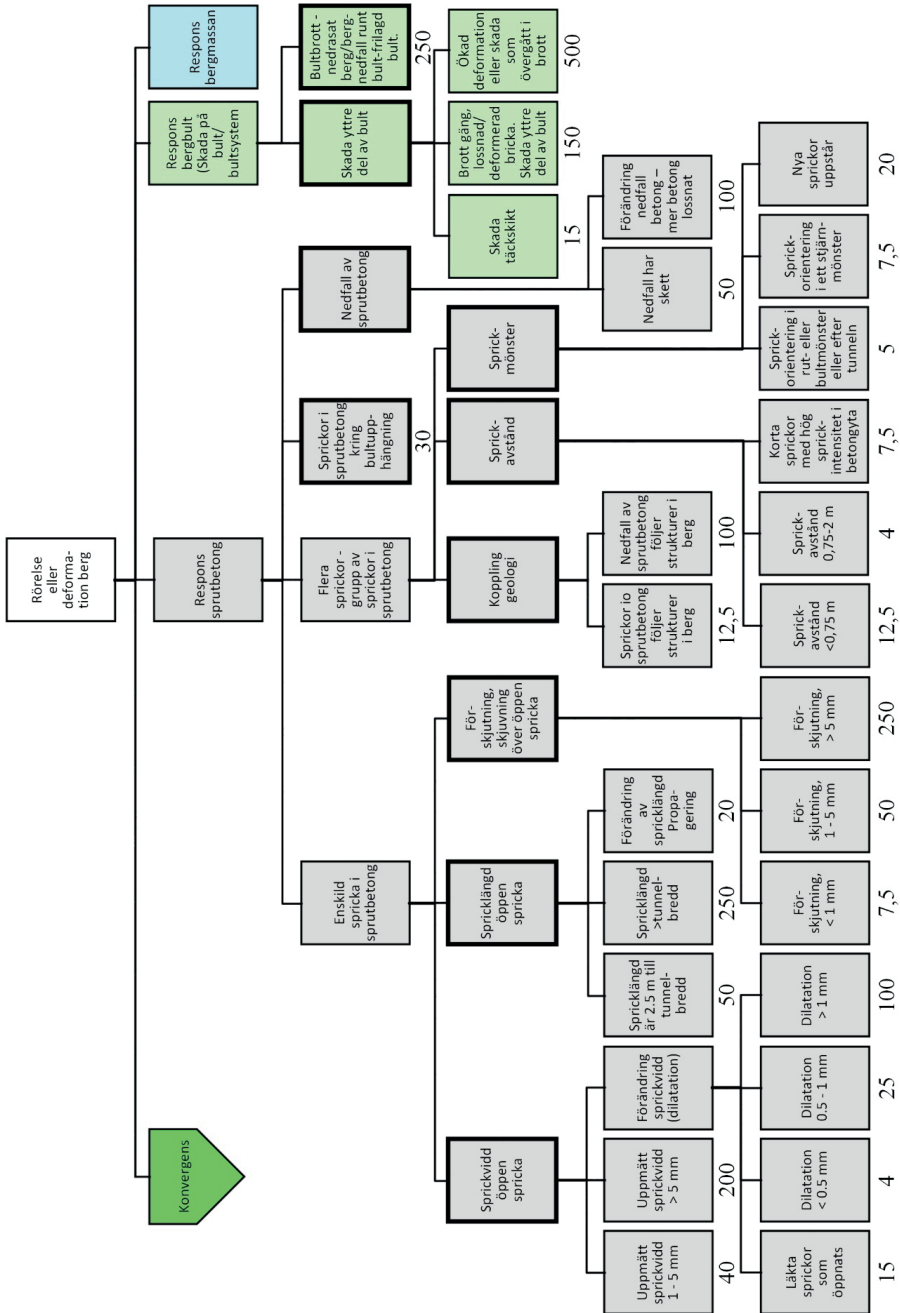
- A. Vissa indikatorer som analyserar egenskaper som sprickvidder mm och som inte är urskiljande har slagits ihop till en, för att ge färre indikatorer.
- B. Efter sammanslagningen sorterades en del indikatorer bort, baserat på likelihoodkvot, och på subjektiva bedömningar av de underliggande svarens möjliga fel.
- C. Indikatorer som inte blir urskiljande har reducerats bort. Det är ofta fall där indikatorerna är mycket starkt korrelerade, se Kapitel 8.8.
- D. Baserat på medelvärden av expertsvaren och på subjektiva bedömningar togs ett förslag till likelihoodkvot fram.
- E. Värden under 2.5 redovisas inte på grund av att sambandet är alltför svagt. Värden över 500 redovisas som 500 (Med så höga värden på likelihoodkvoten blir brottsannolikheten alltid så hög att åtgärd krävs).

Det fanns avvikelser mellan svaren på frågorna som var ställda rörande inträffat och pågående brott där i vissa fall oddsen för pågående brott var större än oddsen för inträffat brott. De slogs ihop till en kategori, brott på grund av rörelse eller deformation i berg där högsta likelihoodkvot av inträffat och pågående brott valdes.

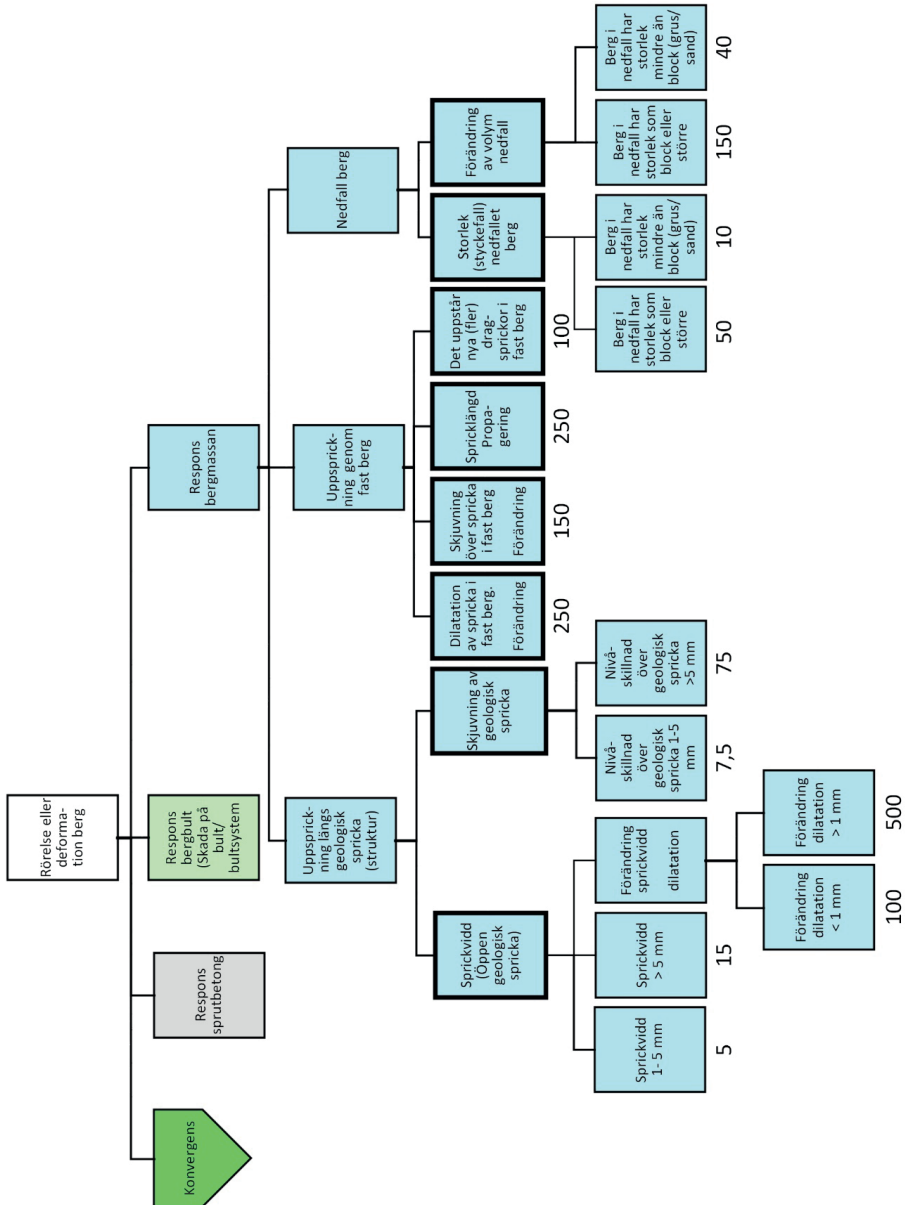
Indikatorerna finns redovisade i tabellformat i Bilaga 6.

9.6.2 Urval och viktning av indikatorer kopplade till brott

Slutligt valda värden på likelihoodkvot redovisas vid respektive indikator i Figur 27 och Figur 28. Indikatorerna redovisas med fet ram med underliggande mätvärden som analyserats.



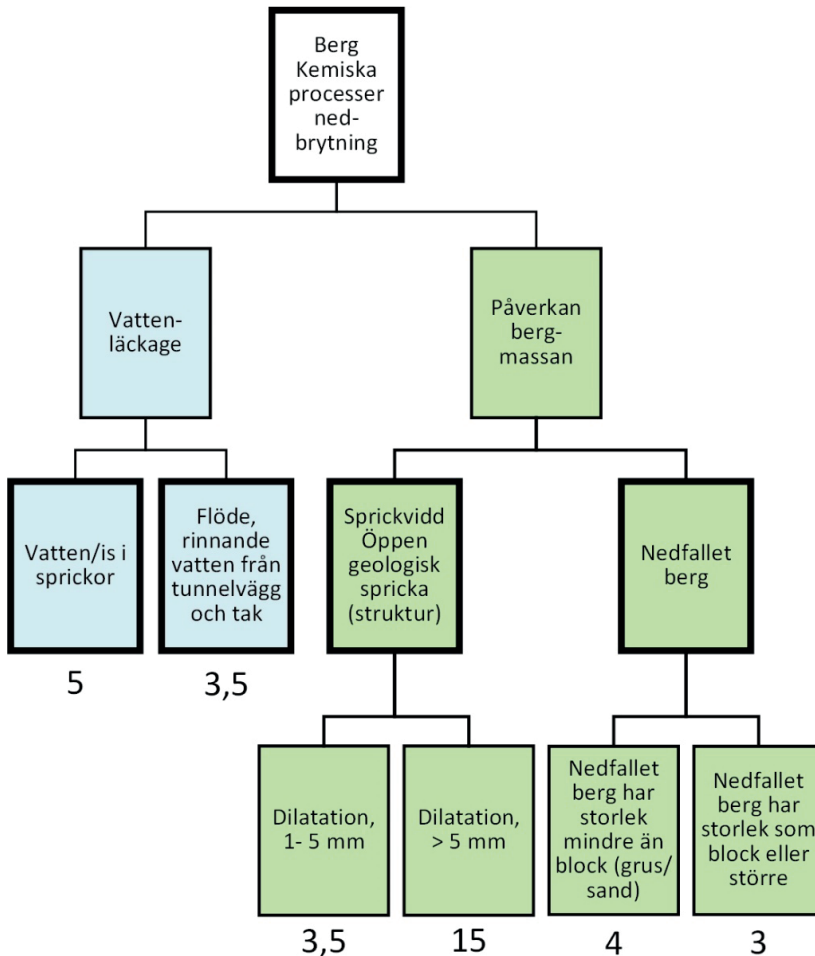
Figur 27: Gallrade indikatorer på rörelse eller brott i berg med ansatt likelihoodkvot



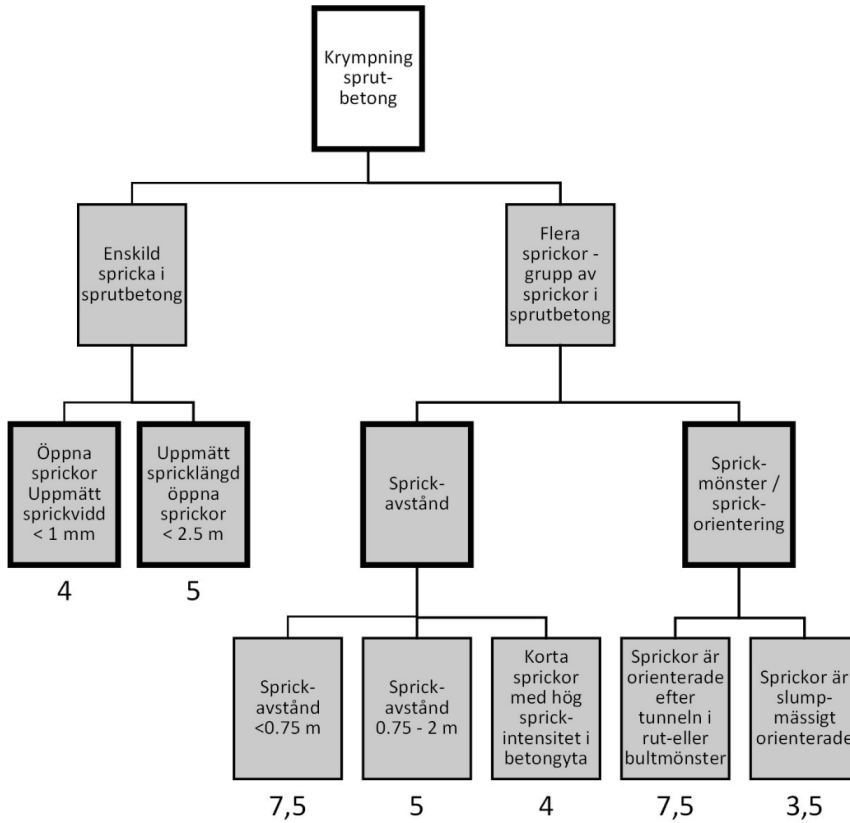
Figur 28: Bergmassan, gallrade indikatorer på rörelse eller brott i berg med ansatt likelihoodkvot

9.6.3 Urval och viktning av indikatorer kopplade till nerbrytning

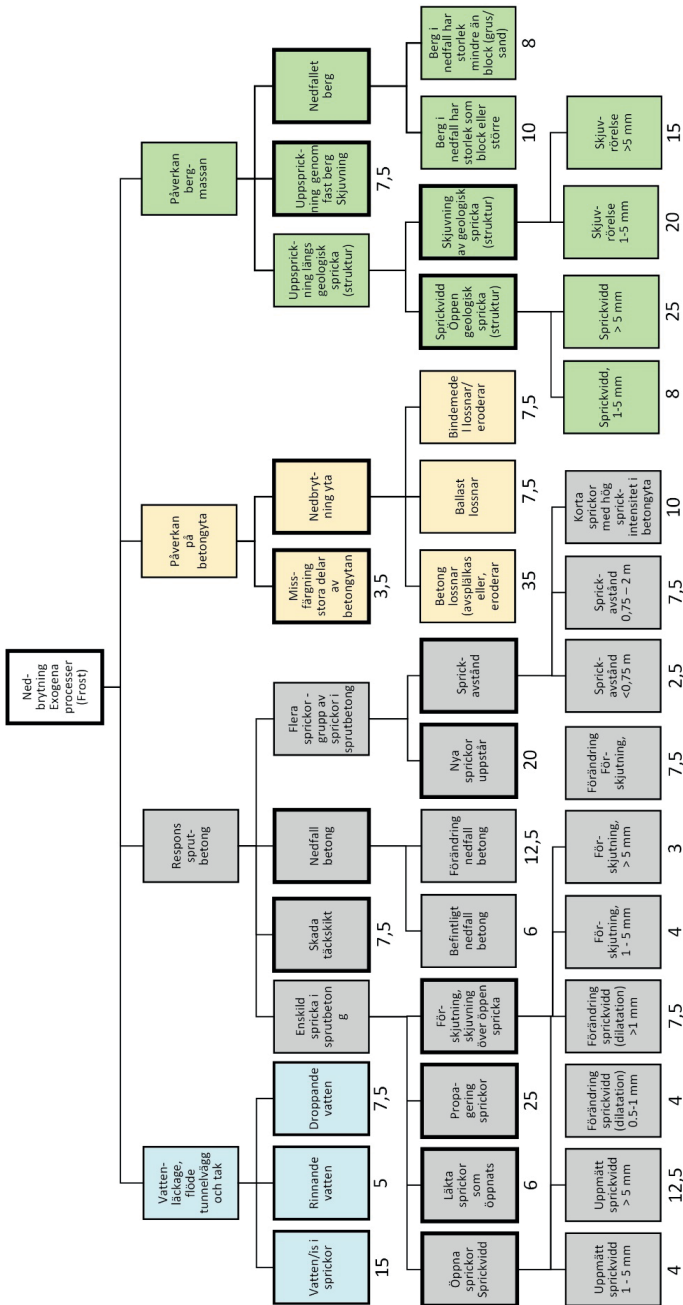
Detta gjordes på samma sätt som för indikatorer kopplade till brott. Redovisning har skett i följande grupper, krympsprickor (Figur 30), exogena processer-frost (Figur 31), kemisk nedbrytning i betong (Figur 32), kemisk nedbrytning av berg (Figur 29) och luftexponerat stål (Figur 33) samt korrosion ingjutet stål (Figur 34).



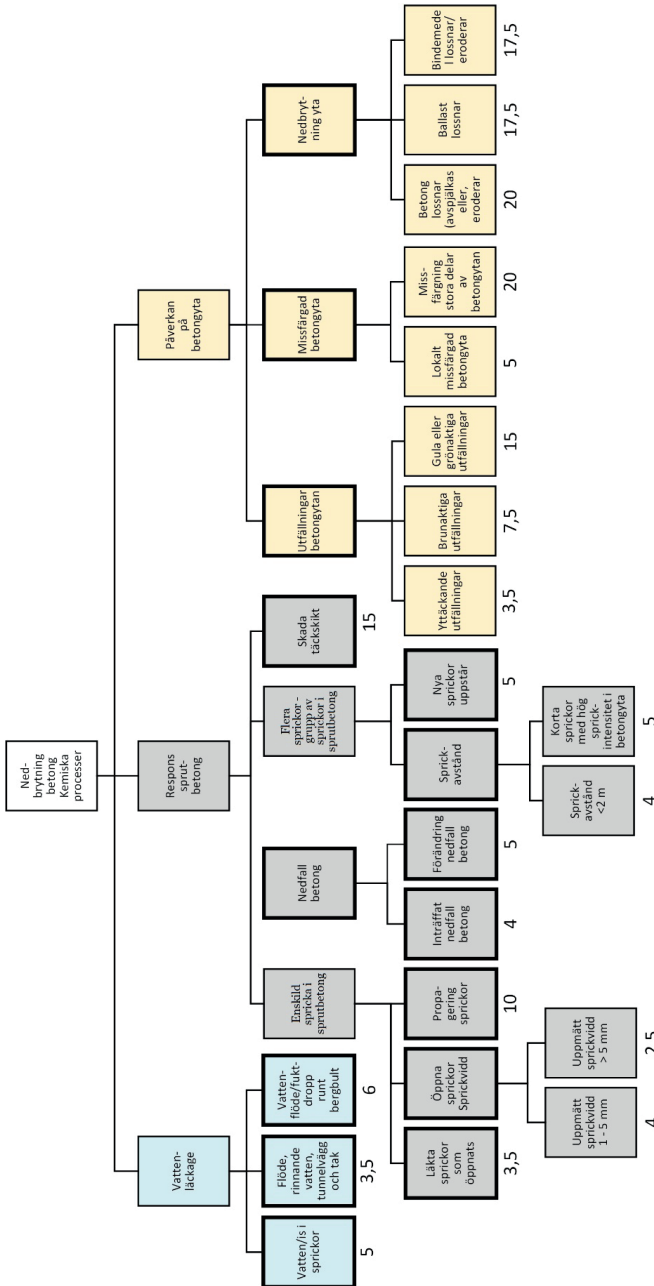
Figur 29: Indikatorer på kemisk nedbrytning av berg såsom vittring och urlakningsprocesser.



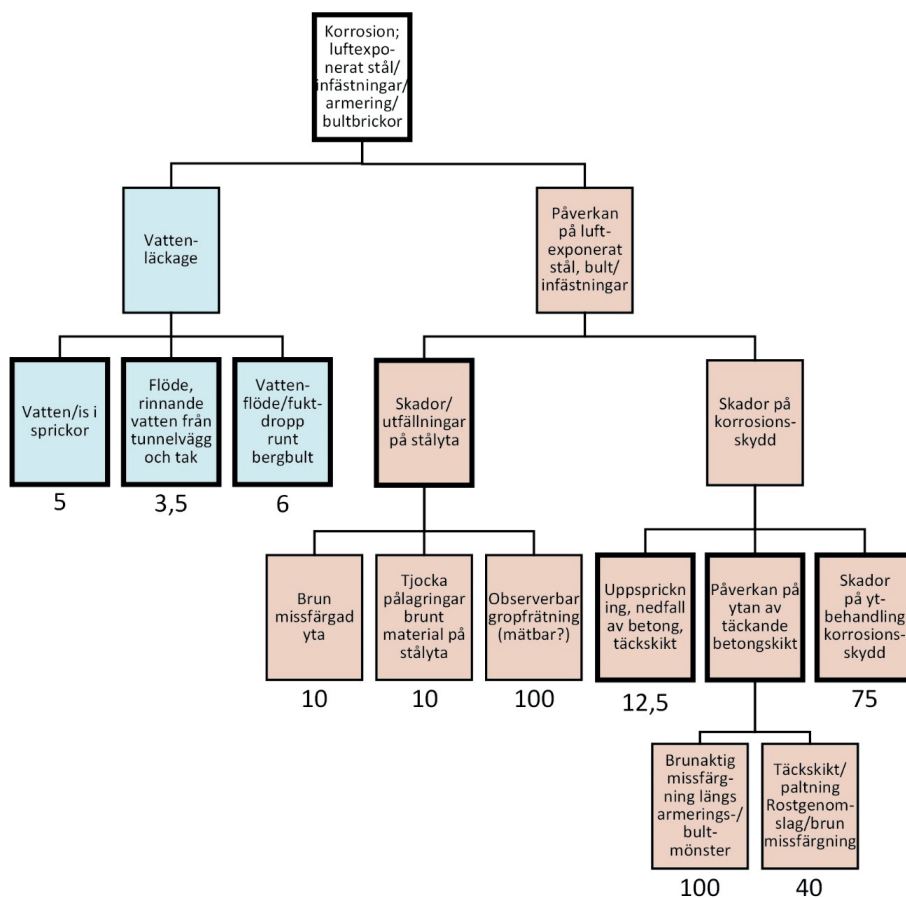
Figur 30: Indikationer på krypning, krypsprickor, sprutbetong



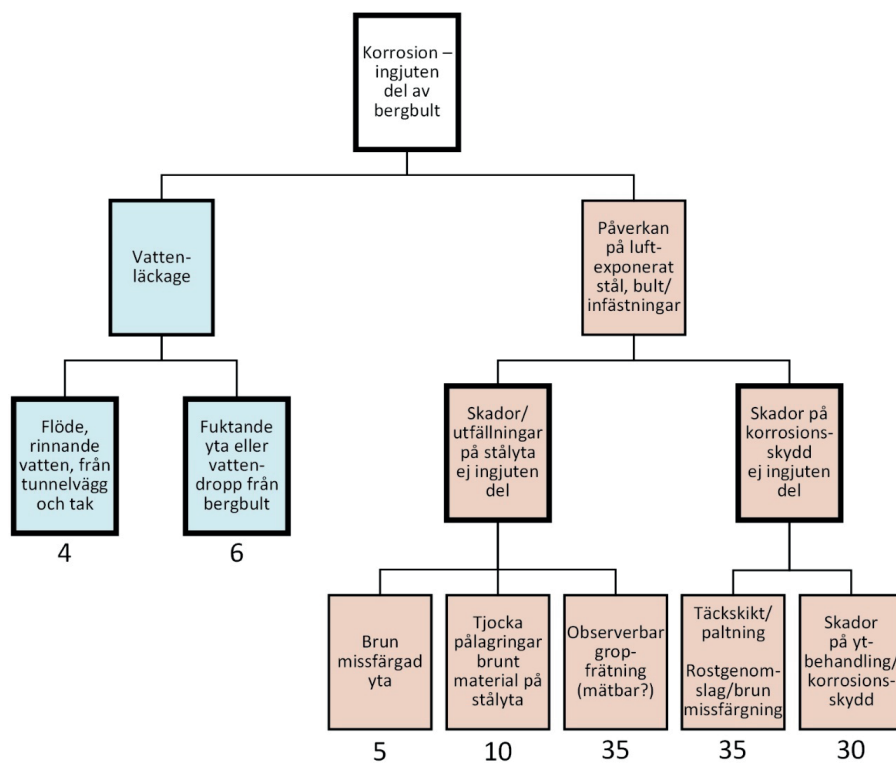
Figur 31: Indikatorer påverkan av exogena processer, främst frostsprängning på tunneln.



Figur 32: Indikatorer på nedbrytning av sprutbetong, kemiska processer som urlakning, AKR, sulfatreaktioner mm.



Figur 33: Indikatorer påverkan på metalliska material, främst korrosion av luftexponerat stål.



Figur 34: Indikatorer på korrosion av ingjutna delar av bergbult.

9.6.4 Flera indikatorer som pekar på samma tillstånd observeras samtidigt

I trädstrukturerna i Figur 27 - Figur 34 kan man se storleken av likelihood för indikatorer som i många fall kan observeras samtidigt. I Avsnitt 4.7 visas att om indikatorerna är (statistiskt) oberoende, så skall man i detta fall multiplicera likelihoodkvoterna, något som skulle kunna ge mycket höga värden på en uppdaterad brottsannolikhet.

Antagandet om statistiskt oberoende är konservativt, men tills vidare rekommenderar författarna ändå att de multipliceras ihop, fram till dess att det finns ett bättre underlag för bedömning av likelihood.

Huvudgrupperna av indikatorer kan inträffa var för sig utan att någon av de andra inträffar. Det kan för brott vara respons sprutbetong, respons bergbult, respons bergmassan och konvergens. För nedbrytning är huvudgrupperna vattenläckage, respons sprutbetong, påverkan på betongyta, påverkan på luftexponerat stål och påverkan på bergmassan. Korrelationen mellan huvudgrupperna är svagare medan korrelationen inom huvudgrupperna kan vara starkare. En spricka har exempelvis alltid egenskaper som

sprickvidd, längd och förskjutning/skjuvning. Dessa egenskaper samt förändring av dem bör ha en starkare korrelation än korrelationen mellan huvudgrupperna.

I vissa fall är indikatorerna inte urskiljande. Det kan vara fall där indikatorerna är mycket starkt korrelerade som t.ex. nedfall av betong och typ av betongnedfall, alternativt inträffat nedfall förändring av nedfall och där de ger en likelihoodkvot i samma storleksordning. I vissa av dessa fall har vi valt att inte ta med den minst utslagsgivande.

9.6.5 En indikator observeras som kan innebära olika tillstånd

Det kan inträffa att man ser en indikator som kan betyda både brott och nerbrytning. Eftersom det är två olika fall behandlas de separat, så att man tar fram uppdaterad sannolikhet för brott respektive för nerbrytning och använder dessa för beslut om åtgärd.

9.7 Utvärdering av indikatorer vid olika brottyper

9.7.1 Urval och viktning av indikatorer kopplade till specifik brotttyp

Till experterna ställdes frågor som skulle kunna användas för att ta fram vikter för indikatorerna när det gällde en specifik brottmekanism. Det visade sig att de svar som gavs, var så svåra att besvara att de blev mycket ”spretiga” och gav sådana resultat att viktningen inte fullföljdes. Det bör dessutom enbart vara i mycket speciella fall som en uppskattning av vilken brotttyp som är aktuell, påverkar beslut om åtgärd vilket reducerar värdet av indikatorerna.

Vi visar metodiken för att beräkna uppdaterad sannolikhet i Bilaga 2.4.1.

9.7.2 Koppling mellan kontext och brotttyp

I Tabell 17 finns redovisat fördelningen mellan de olika brottyperna som använts i enkäten för dels hela tunnelbeståndet dels för olika bergtyperna. Resultatet har stor spridning men visar att bergtypen har potential för att kunna användas för uppdatering av sannolikheten för de olika mekanismerna. Inverkan av kontext har i övrigt inte utvärderats.

Tabell 17: Fördelning av olika brottyper för hela tunnelbeståndet och för olika typberg.

Bergklasser (typberg)	Bedömt spann Q-värde			Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av kil/skjuvning pga. rörelse av rigid kropp	Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av löskärnebildning blockigt berg eller zon/finblockigt berg mm	Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av skjuvrörelse i löskärna eller mycket finblockigt/uppkrossat berg	Hur sannolikt är det att det att överbelastningen orsakats av annan brotttyp.
	A	B	MedC				
Alla tunnlar	A			10%	40%	25%	25%
	B			50%	39%	10%	1%
	MedC			29%	38%	14%	20%
				30%	39%	16%	15%
Bergtyp 1: Storblockigt kompetent berg med 2-5 sprickgrupper. Normal förstärkning för denna bergtyp är vidhäftande sprutbetong och strömbultning.	A						
	B	8 till 50	80%	15%	5%	0%	
	> 10		20%	50%	5%	25%	
	MedC		50%	33%	5%	13%	
Bergtyp 2: Medelblockigt berg med 3-5 sprickgrupper. Normal systembultas berget och block mellan sprutbetongen bärs upp av sprutbetongen. Saknas vidhäftning används fiberarmerad	A						
	B	4 till 16	60%	30%	5%	5%	
	4 till 10		30%	30%	20%	20%	
	MedC		45%	30%	13%	13%	
Bergtyp 3: Medelblockigt berg, 3-5 sprickgrupper med förekomst av lerfyllda sprickor där det finns potential för större skjuv/kilbrott. Normalt systembultas berget och block mellan	A						
	B	1 till 8	70%	20%	10%	0%	
	1 till 4		50%	20%	20%	10%	
	MedC		60%	20%	15%	5%	
Bergtyp 4: Medelblockigt berg, med flackt stående skivighet. Lerfyllda sprickor och/eller forskifningsplan, förekommer. Normalt förstärks berget med systembultning och antingen	A						
	B	8 till 50	80%	15%	5%	0%	
	> 10		20%	50%	5%	25%	
	MedC		50%	33%	5%	13%	
Bergtyp 5: Finblockigt berg, krosszoner. Normalt förstärks berget med systembultning och bultupp-hängd fiberarmerad sprutbetong. Potentiellt instabila bergpartier	A						
	B	0,5 till 4	45%	45%	10%	0%	
	1 till 4		50%	20%	20%	10%	
	MedC		48%	33%	15%	5%	

9.8 Förslag vidare viktning av indikatorer

9.8.1 Ny enkät med färre frågor

Den enkät, matrisen, som användes, var ytterst omfattande. Förmodligen var det den tyngsta orsaken till att det inte kom in särskilt många svar (3 st.). Resultatet har till stor del kunnat användas som underlag för reduktion av antalet indikatorer. Resultatet har även använts som en bas för en subjektiv värdering av likelihoodkvoterna för kvarvarande indikatorer i syfte att ge en bild av hur systemet kan fungera.

För att få ett bättre underlag, där man också kan få möjligheten att analysera variationen i svaren bör man skicka ut ytterligare en enkät, då med mycket hårt beskurna frågor, så att bara de indikatorer som valts ut enligt ovan tas med.

Eftersom motsägelser etc. som förekommit troligen har sin grund i att experterna inte helt förstått frågan eller haft tillräckliga insikter i statistiska samband föreslås att enkäten fylls i som en gruppövning på nätet och att konsensus söks.

9.8.2 Ytterligare enkät med sammansatta indikatorer

Som påtalats ovan gör en positiv korrelation mellan indikatorer att en samtidig observation har en lägre vikt.

Eftersom det är svårt för sakkunniga inspektörer att ge en värdering av korrelation i statistiska termer har man ofta gjort så att man skapat en sammansatt indikator (indikator C = både indikator A och indikator B) och viktat den.

En ytterligare enkät, se ovan, bör därför innehålla några sådana sammansatta indikatorer.

9.8.3 Använda AI

En hittills oprövad möjlighet är att använda AI (artificiell intelligens) för att utvärdera indikatorer. Eftersom det krävs omfattande datamängder för att träna applikationen skulle man behöva en mer omfattande datainsamling. Den skulle kunna bygga på att inspektörer i fält tar en bild av tunneltaket på ett standardiserat sätt och samtidigt anger om det fotograferade förstärkta berget kan accepteras eller ej. Då får man möjligheten att med AI ta fram väsentliga indikatorer utan att man själv behöver välja ut dem på förhand.

I vårt fall gäller det att den algoritm som används kan användas för klassificering, möjligen i några olika klasser.

Det finns ett antal olika algoritmtyper som används inom AI, till exempel:

- Neurala nät
- Kunskapsbaserade system
- Bayesianska nät
- Stödvektor maskiner (support vector machine)
- CART (Classification and Regression Trees)

Man kan för olika tillämpningar när det gäller bildbaserad övervakning också tänka sig tillämpningar baserade på bayesianska principer för att få med expertkunskap.

10. Fjärrinspektionsteknik allmänt

10.1 Problemställning

Inspektionstekniken skall på ett tillförlitligt sätt kunna registrera de indikatorer som finns och göra det under besvärliga fysiska förhållanden. Man skall också kunna registrera förändringar hos indikatorerna.

10.1.1 Indikatorer att observera

Bland indikatorer kan nämnas

- Sprickor
 - I planet (tensionssprickor)
 - Vinkelrätt planet (skjuvsprickor)
- Nerfall av betong och berg
- Vatten och is
- Deformationer
- Rörelser
- Tecken på nedbrytningshotande förhållanden

Systemet skall kunna observera sådana indikatorer och också kunna användas för att konstatera förändringar hos någon indikator eftersom förändringar är en viktig indikator i sig.

10.1.2 Observationsförhållanden

Observationerna, d.v.s. fotograferingen skall göras i det trånga utrymmet mellan berg och innertak. Miljön där är mörk, fuktig och smutsig och det finns ofta hinder i form av stag för takupphängning samt nerfall.



Graversfors Södra segment 38



Norra Länken (Foto:Thomas Dalmalm)

Figur 35 Exempel på utrymmet ovanför innertaket

Utrymmet begränsas normalt kraftigt i höjddled till ca 0,5 – 0,7 m. Detta har stor inverkan på mängden bilder som måste tas, eftersom varje bild tas på nära håll och täcker en liten yta.

Vad gäller geometrin behöver noteras att innertaket ofta lutar kraftigt ner mot tunnelväggen vid anfangen, något som kan skapa problem för en kamerabärare ("robot").

Underlaget, alltså innertaketets ovsida, kan vara dammig och fuktigt vilket kan ge problem både vad gäller sikt (upprivet damm) och fäste för drivhjul.

Till observationsförhållandena hör också att det kan vara svårt att få tillgång till inspektionsområdet och inspektionsluckorna annat än under begränsade tider. Innertaket kan normalt endast nås med sky-lift eller motsvarande. Åtkomligheten styrs därför av luckornas storlek och inbördes avstånd, samt av trafikintensitet och andra faktorer (t.ex. kontaktledning vid järnväg) som begränsar användandet av skylift.

10.1.3 Tidsaspekter

Inspektionen av tunnlar sträcker sig över långa tidsperioder, tiden mellan två inspektioner kan vara över 10 år (vid stabila förhållanden) men kan naturligtvis vara mycket kortare om hot upptäckts.

Den långa tidsaspekten är väsentlig vid utformandet av systemet, särskilt dokumentation av såväl utrustningen och mätproceduren som av erhållna data. Med hänsyn till den snabba teknikutvecklingen inom området behöver man troligen vara mycket mer detaljerad än vad som är vanligt.

10.2 Översikt av metoder. Pågående utveckling

Man kan notera att utvecklingen inom området nu går mycket snabbt, beroende på att det inom andra teknikområden, t.ex. självkörande fordon och robotar, efterfrågas metoder för bildanalys.

Dessutom har den tekniska utvecklingen vad gäller (digitala) kameror gått långt och även personatorer är idag mycket kraftfulla.

De utrustningar och metoder som kan vara aktuell när det gäller fjärrinspektion i tunnlar är:

- Fotografering och kameror
- Bildanalys
- Bildbaserad mätning
 - Fotogrammetri och Structure from motion (för att skapa 3D-modeller)
 - Laserscanning och RGBD-kameror (för att skapa 3D-modeller)

Digital Image Correlation (DIC) för att mäta rörelser och för att detektera förändringar

Inom bygg- och anläggningsbranschen tillämpas dessa metoder bl.a. för kontroll och övervakning av broar och andra byggnadsverk (Structural health monitoring), se till exempel Ye et al. (2016).

En omfattande översikt av teori, metoder och tillämpningar finns i Luhmann et al. (2014). Där ges också bibliografi för olika områden samt länkar till arbetsgrupper och konferenser. En översikt av metoder lämpade för övervakning vid geotekniska arbeten finns i SGF (2019).

10.3 Fotografering och kameror

Merparten av fjärrinspektionen kommer att vara baserad på fotografiska metoder. Här skall noteras att det i dag handlar om digitala kameror, inte analoga med film.

10.3.1 Fotografering allmänt

Fotograferingen görs, som tidigare påpekats, under tämligen besvärliga förhållanden, mörkt, smutsigt och med konstgjord belysning och på varierande avstånd. Det gör att det är svårt att få en jämn exponering över hela bilden och att återgivningen av färger inte är den bästa.

Om avståndet varierar mycket relativt sett i en bild kan det också ge problem med skärpedjupet.

Man har också krav på korta exponeringstider, eftersom kamerorna rör sig. Därför vill man undvika filter som tar mycket av ljuset.

10.3.2 Synligt ljus

Merparten av fotograferingen görs i det synliga spektret. Detta är ju konventionell fotografering.

10.3.3 Infrarött ljus

Man kan tänka sig, särskilt när det gäller att hitta vissa indikatorer på nedbrytning, att använda infrarött ljus. Det är dock något mer problematiskt, eftersom vanliga digitala kameror ofta har ett inbyggt IR-filter, så en särskild kamera (eller en modifierad kamera) behövs.

IR-ljus har testats för att hitta skador på betong i vägsammanhang, se tex Rocha & Póvoas (2017) och Hiasa(2016), men det krävs ytterligare utveckling innan metoden kan tillämpas för vår typ av fjärrinspektion. En orsak är att man ofta använder skillnad i yttemperatur när lufttemperaturen ändrat sig och att man behöver möjlighet att registrera små temperaturskillnader.

10.3.4 Ultraviolett ljus

Det är också möjligt att använda UV-ljus, men då behövs särskild optik och filter. Dessutom behövs en speciell belysning, möjligen kan man använda speciell LED-belysning. UV-ljus kan ha samma användningsområde som IR, dvs för att hitta indikatorer som pekar på hot om nedbrytning.

Någon litteraturreferens har inte hittats när det gäller användningen av UV-ljus för inspektioner.

10.3.5 Kameror

Storlek

När det gäller kameror för fjärranalys behöver man hitta en balans mellan storlek och prestanda.

Kravet på liten storlek (och därmed låg vikt) kommer från behovet att hålla nere storleken på den kompletta inspektionsroboten, som ju i normalfallet skall bära flera kameror.

Ett speciellt fall när det gäller storlek är vid användningen av flygande drönare (UAV) som kamerabärare, något som testats bl.a. i gruvschakt.

Prestanda

Kamerans prestanda gäller främst faktorerna:

- Upplösning
- Ljuskänslighet
- Felteckning
- Närgräns för optiken
- Skärpedjup för optiken
- Färgdynamik för sensor och optik

Upplösning

Upplösningen är väsentlig, eftersom den avgör hur små detaljer man kan se i bilden. Bilden fångas ju upp som pixlar (bildelement) av kamerans sensor och man vill ha många pixlar och även små ”pixlar på marken” dvs den storlek en pixel skulle ha om man projicerade den på marken.

Ljuskänslighet

Eftersom den enda belysningen är konstgjord och bärs av roboten, och man vill ha kort exponeringstid, är ljuskänsligheten viktig. Det är inte ett problem med moderna kameror, om man inte använder speciella filter eller måste arbeta med mycket liten bländare av hänsyn till skärpedjupet.

Felteckning

Optiken i en kamera har alltid någon grad av felteckning (distorsion) så att det blir fel i bilderna. Detta är särskilt fallet vid de vidvinkliga (och ganska enkla) kameror som är användbara för dessa ändamål.

Eftersom man samtidigt vill ha stort överlapp mellan bilderna betyder det att man ofta utnyttjar bilderna ända ut till randen, där samtidigt felteckningen är störst.

Det sätt man har att hantera felteckningen är att kalibrera kameran, oftast genom att fotografera ett särskilt mål med inmätta punkter eller linjer, och sedan matematiskt beräkna en korrektion som används på bilderna innan man bygger den fotogrammetriska modellen. Detta kan även tillämpas på enklare s.k. Actionkameror, se t. ex. Baletti et. al (2014).

Ett problem kan vara att korrektionen varierar med det avstånd man fokuserar kameran på. Så om man inte arbetar med fixt fokus, måste man först läsa ut fokuseringsavståndet ur bilddata innan man kan kalibrera, se Fraser et al. (2012).

Närgräns för optiken

Närgränsen har betydelse, eftersom bilder kan komma att tas på kort avstånd från bergytan.

Skärpedjup för optiken

Kamerans fokus bör inte ändras under arbetets gång, eftersom man då ändrar dess inre orientering och tvingas korrigera felteckningen för varje använd bild. Därför är ett stort skärpedjup önskvärt, men det konkurrerar i viss mån med önskemål om ljuskänslighet (liten bländare)) eller med sensorn storlek och pixeltäthet och med krav på närgränsen.

Ofta används kameror med små sensorer i kombination med vidvinkelobjektiv vilket ger en liten närgräns och ett förhållandevis stort skärpedjup. Arbetsområdet för dessa kameror är oftast inget problem.

Färgdynamik för sensor och optik

Prestanda styrs av de två huvudkomponenterna optik och sensor. Vid en given upplösning ger små sensorer (korta brännvidder) en hög pixeltäthet med försämrad ljuskänslighet och färgdynamik än större sensorer (längre brännvidder). Större sensorer (brännvidder) medför mindre skärpedjup och ofta svårigheter med att uppnå ett rimligt arbetsområde. Vi tar i övrigt inte upp detaljer här utan hänvisar till bl.a. Golowczynski (2016).

10.4 Övriga metoder för fjärrinspektion

Förutom visuella metoder finns det andra sätt att fjärrinspektera, både sådan som kräver ytkontakt och sådan som inte behöver detta.

Bland sådana metoder finns både mätning av ledningsförmåga, seismiska metoder och ground probing radar.

11. Bildanalys

Med bildanalys menar vi här att identifiera sådana element i bilden som kan användas som indikatorer utan att man för den skull använder en fullständig 3D-modell med möjlighet till mätning. Användningsområdet för detta kan vara när man vill göra en manuell granskning av bilder och då gärna har ett format som man är van vid. Det är då ofta en plan bild som är ett ”utviket” tunneltak, på samma sätt som man ofta redovisar inspektioner i fält.

Det finns omfattande beskrivningar i litteraturen gällande bildanalys och 3D-modellering, se t.ex. Chaiyasarn (2011), Stent et al. (2016), Lee et al. (2013).

Det är dock ofta så att man vill kunna göra mätningar, se Kapitel 12. I det fallet kan man visserligen ibland tänka sig att arbeta med 2D-bilder, men en 3D-bild ger större möjligheter, särskilt om man vill titta på en krökt och eller oregelbunden yta.

11.1 Arbetsgång 3D modellering

För att ta fram material som kan användas för bildanalys följer man vanligen arbetsgången i Figur 36. Figuren visar bara huvudstegen, från planering till färdig modell.

Förarbete och Planering.

Detta moment innehåller bland annat val av utrustning och då ofta kalibrering av kameran. Andra viktiga delar är att ta del av den dokumentation som kan finnas och att själv dokumentera arbetet.

Fältarbete

Innehåller både själva fotograferingen och att hitta eller skapa kontrollpunkter (referenspunkter) som kan användas när man skall ange den färdiga modellen i ett yttre koordinatsystem. Givetvis är dokumentationen viktig

Bearbetning av bilderna

Görs digitalt med speciell programvara, ofta baserad på SfM (Structure from Motion), se Avsnitt 12.3. Identifierade punkter matchas i bilderna så de kan läggas ihop till en stor modell. Modellen kopplas till omvärlden genom externa kontrollpunkter. De kan även användas för att man skall kunna jämföra två modeller från olika tidpunkter för att se förändringar,

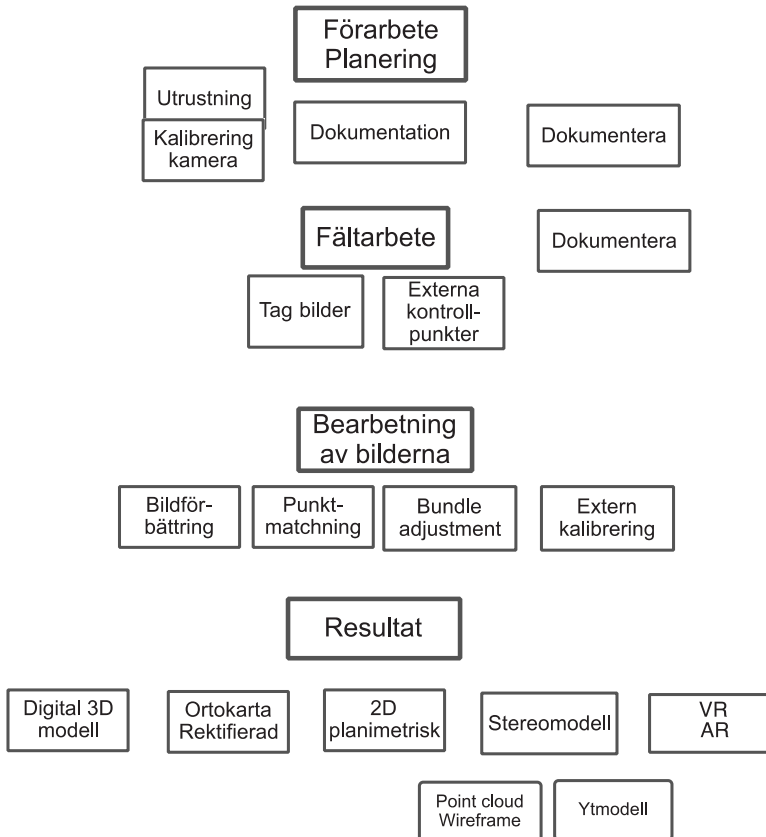
Olika metoder för bildförbättring kan erfordras. Med hänsyn till förhållandena när bilden tas kan ett första steg behöva vara att justera färger och exponering med hjälp av lämplig programvara, eventuellt görs det till en gråskala.

Resultat

Huvudresultatet är en digital 3D modell som sedan kan visualiseras på olika sätt, från ortokarta till Virtual reality. Oftast används en renderad ytm modell där man lagt på fotografiet så att man ser bergytan.

När man gör en modell, fotogrammetrisk eller från laserscanning kan man redovisa resultatet på olika sätt. Ett alternativ är att man gör ett plant foto, andra möjligheter är tredimensionella redovisningar som punktmoln, trådmodell, digitalmodell med eller utan bild av ytan pålagd (renderad). En ytterligare möjlighet är VR och AR.

3D-modellen kan även redovisas i 2D, i olika projektioner eller som en ”utvikningsmodell. Projektionen görs ofta på en teoretisk modell av tunneln eller en modell som tagits fram ur en 3D-modell som byggts upp ur bilddata. Se t.ex. Lee et al. (2013), Chaiyasarn et al. (2015). Viktigt är här att man bevarar ex. sådant som parallellitet hos linjer.



Figur 36 Arbetsgång 3D modellering för inspektion med fotogrammetri

Andra alternativ kan vara olika typer av 2D-representationer i form av hopläggning av bilder som bildmosaik. Eftersom bilderna tagits ur olika vinklar mot ytan behöver man rektifiera dem (”rikta upp dem till vinkelrätt”) så att man får en ”ortokarta” ur varje bild.

De rektifierade bilderna kan sedan läggas samman till en mosaik, genom att man passar punkter som finns i båda bilderna. Detta görs ofta automatiskt, men om det finns särskilda kända punkter kan de behöva markeras manuellt. Metoder för att passa ihop bilder beskrivs t.ex. i Zitová & Flusser (2003).

11.2 Analys av bilder

I det följande avser ”bilder” de visualiseringar som tagits fram ur den digitala 3D-modellen.

11.2.1 Automatiserad tolkning av bild

Det är naturligtvis önskvärt med en automatiserad tolkning av bilder, i syfte att hitta indikatorer. Detta beskrivs i Kapitel 16.

Ett alternativ som kan vara användbart för att hitta förändringar är 2D DIC, se t.ex. McCormick et al. (2014). Man hittar då med statistiskt baserad metodik områden med förändringar och kan sedan göra en manuell inspektion av modellen. På det sättet kan omfattningen av manuell inspektion minskas.

11.2.2 Manuell tolkning av bild

Den manuella tolkningen innebär att man låter en inspektör titta på en bild. Det är härvid viktigt att använda en projektion som inspektören är van vid, t.ex. att projicera en tunnelvägg som en ortokarta där bilden vikts ut, se Avsnitt 11.1.

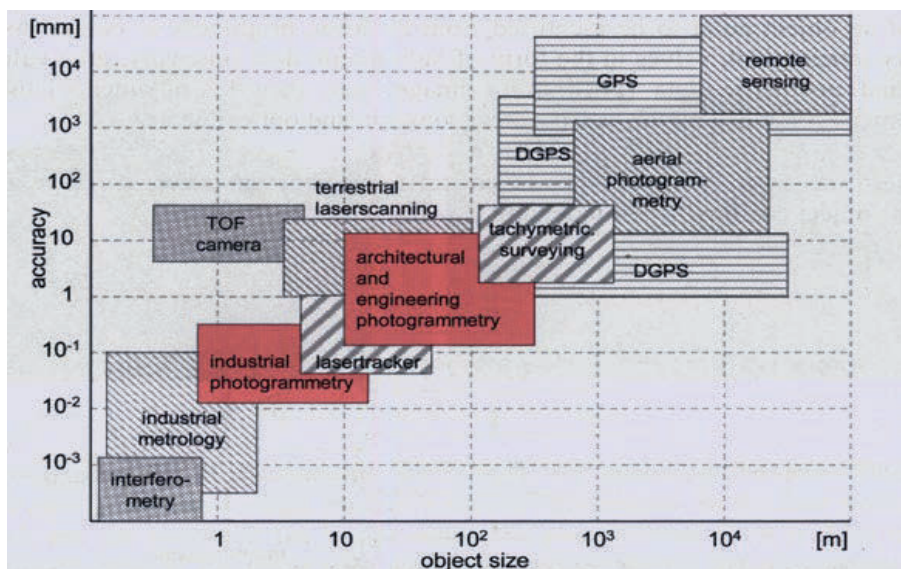
En jämförelse mellan manuell geologisk hällkartering och med fotogrammetrisk metod finns i Osterman (2017) och Jandrisevits (2012). Någon sådan jämförelse för tunneltak har inte hittats i litteraturen.

12. Bildbaserad 3D-modell och mätning

I många fall är indikatorn sådan att man vill mäta in den. Då krävs att man har en skalriktig modell. Det kan också vara så att man vill jämföra mellan två modeller från olika tillfällen och då behöver skalan vara känd och man vill dessutom ha möjligheten att passa ihop dem.

12.1 Noggrannhet hos olika metoder

Olika metoder har olika noggrannhet och lämpar sig för olika stora objekt. En översikt över noggrannheten vid fjärrmetoder hämtad ur Luhmann et al. (2014) visas i Figur 37. Enligt den är det för vår tillämpning möjligt att nå en noggrannhet av tillräcklig storleksordning med fotogrammetri.



Figur 37: Noggrannhet vid olika fjärrinspektionsmetoder. Luhmann et al. (2014)

Några noggrannheter för fotogrammetri visas i Figur 38.

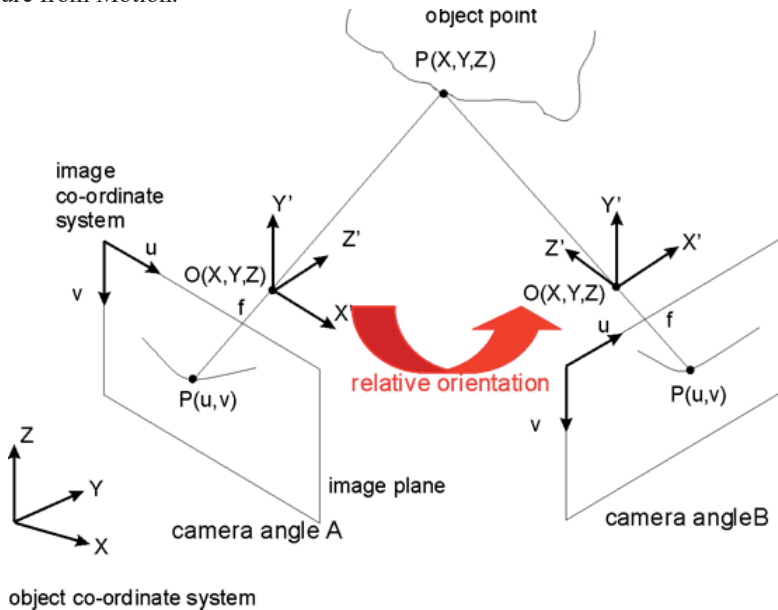
Camera Resolution	Camera Calibration Method	Point Angles +	Photo Orientation Quality	Photo Redundancy	Targets
Low (eg Video) 640x480	No calibration → Inverse Camera	15 degrees or less	Few points per photo, low point coverage	Points mostly on only 2 photos	No circular targets, all user marked points
Medium (eg basic/older digital camera) 8MP 3264x2468	PhotoModeler Camera Calibrator (good solution)	20-90 degrees	15+ points per photo, up to 60% coverage	Most points on 3 or more photos	Some points marked on naturally lit targets at key locations
High (eg good quality digital camera) 20MP+ 5400x3600 or higher	Field Calibration	Close to 90 degrees	35+ points per photo, up to 60% coverage	Most points on 8 or more photos	Many points marked on standard target points All points marked on well-defined targets

Figur 38: Figur 37 Noggrannhet hos fotogrammetri vid olika förhållanden, från Phtomodeler Technologies.

12.2 Klassisk fotogrammetri

När man använder fotogrammetriska metoder bestämmer man läget av valda punkter i ett lämpligt koordinatsystem. Om man bestämmer läget av ett stort antal punkter kan man skapa en modell.

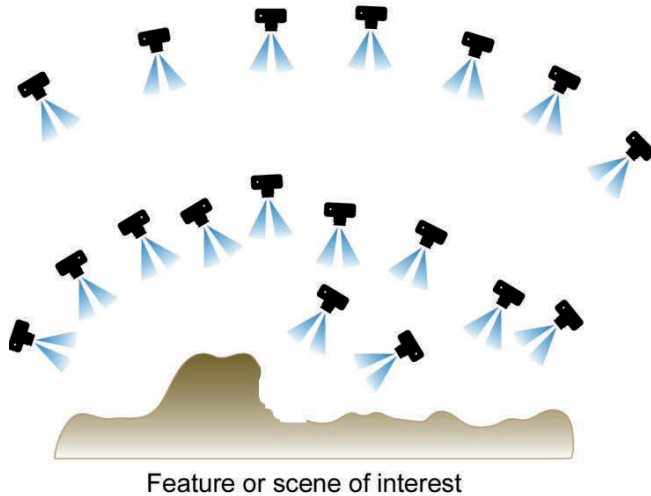
Med fotogrammetri kan man göra mätningar i en modell uppbyggd av fotografier, analoga eller digitala. Vid den klassiska fotogrammetrin använder man mätkameror med känd yttre och inre orientering t.ex. känd bas mellan dem, se Figur 39. I takt med att datorer utvecklats och kamerorna har blivit digitala används i stället en metod som ibland kallas Structure from Motion.



Figur 39 Geometrin vid klassisk fotogrammetri. Gaich et al 2006.

12.3 Structure from Motion

Tillämpningen av fotogrammetrisk mätning har utvecklats i och med att man fick enkel tillgång till kraftfulla datorer. Det är då den analytiska fotogrammetrin som utvecklats, och den vanligaste metoden kallas "Structure from Motion" (SfM). När man använder SfM använder man inte parallella kameror, men man skaffar sig ett stort antal överlappande bilder, se Figur 40.



Figur 40 Överlappande bilder vid SfM. Micheletti et al. (2015)

Man bestämmer kamerornas egenskaper, läge och orientering ur bilderna genom vad som kallas bundle adjustment. Sedan kan man skapa en modell, i form av först ett gles och sedan ett tätt punktmoln. I följande steg skapas en bild av ytan (oftast ett nät av små trianglar) som kan renderas genom att de ursprungliga bilderna "klistras" på ytan.

För en beskrivning av processen rekommenderas t.ex. Westoby et al. (2012), Micheletti et al. (2015) och referenser däri samt Brunier et al. (2016)

12.4 Laserscanning. RGBD-kameror

Med laserscanning (LIDAR) får man en "bild" som visar avståndet till ytan. Mätningen görs med en ljuspuls.

En liknande metod är så kallade range-kameror, till exempel Kinect, där avståndet kan mätas på olika optiska sätt, t.ex. genom att man projicerar ett mönster på yta. Så kallade RGBD-kameror (Red, Green, Blue, Depth) ger dessutom en färgbild.

Vi har valt att inte använda denna typ av kameror i projektet främst beroende på en sämre bildupplösning än fotogrammetriska metoder och på behovet av stor beräkningskapacitet i fält. Man kan dock se en utveckling där 3D kameror kommer att ingå som en del av mobiltelefoners kamerasystem.

12.5 Digital image correlation (DIC)

DIC skiljer sig från de fotogrammetriska metoderna genom att man inte skapar en modell utan i stället arbetar med att jämföra bilder och mäta förändringar mellan bilderna. Namnet kommer sig av att man använder statistisk korrelation för att identifiera samma delelement i bilderna och bestämma hur delelementet rört sig. Metoden kräver att man tar

bilderna med samma kamerauppställning eller att man har orienteringselement monterade på den avbildade strukturen. Metodik för att använda metoden när man har identifierbara element i de två bilderna finns beskriven i Malesa & Kujawinska (2012, 2013). Sjölander (2019) beskriver en metod där mindre skillnader (några centimeter) mellan kamerapositionerna vid två fototillfällen kan hanteras vid analysen.

Ett alternativ, 3D Digital Image Correlation, arbetar med kamerapar som är inbördes fast monterade och där man kan ha fri uppställning av kameraparet. En tillämpning av metoden på rörelser i sprutbetong med kommentarer om olika aspekter finns i Sjölander (2019).

Metoden kan också användas för att identifiera områden med förändringar eftersom korrelationskoefficienten är liten inom dessa områden (McCormick 2019).

13. Bildorienteringsproblemet

13.1 Allmänt

De modeller som skapas vid fjärrinspektionen är uppbyggda av ett antal separata bilder som lagts ihop. Detta ger krav på att man kan passa ihop bilderna med minsta möjliga fel, eftersom felet ju påverkar resultatet. Ju mer man vet om hur respektive bild är orienterad dess mindre fel.

Ett liknande krav kommer när man skall jämföra två modeller för att se förändringar. Här vill man kunna passa ihop modellerna på ett sådant sätt att det inte uppstår några falska förändringar (artefakter).

Ytterligare ett fall uppkommer om man har gjort punktopbservationer och inte har en kontinuerlig modell. Då vill man ha bildernas lägen i ett koordinatsystem, så att man kan interpolera.

13.2 Igenkännbara strukturer i bild

Ofta finns det någon sorts strukturer i bilderna som är igenkännbara på konsekutiva bilder och därför kan användas när bilder skall passas ihop. Sådan hoppassning görs normalt automatiskt i de datorprogram som används. Man måste observera att strukturerna är små och behöver vara många i varje bild. Eftersom vi oftast har sprutbetong, som har tillräckligt många små detaljer räcker det normalt för sammanläggningen.

Man bör dock observera att ytan kan förändras på grund av nedsmutsning vilket kan försämra bildpassningen.

13.3 Särskilda markörer

Om man planerar för fjärrinspektion redan vid bygget kan man använda sig av särskilda markörer som placeras i taket. De kan med fördel mätas in i lämpligt koordinatsystem vilket ger möjligheten att få modellerna koordinatsatta med hög noggrannhet i ett absolut system. Annars blir de koordinatsatta i ett lokalt system som sedan eventuellt kopplas till ett absolut (globalt) system.

Markörerna kan vara befintliga, lätt igenkännbara punkter, eller speciella som monteras. Ett speciellt fall är när man monterar skalor som direkt ger en måttsatt modell utan att man behöver ha inmätta punkter.

13.4 Lägesbestämd kamerapunkt

Om kamerans läge är känt när bilden tas kan detta användas för orientering av bilder. Denna princip används ofta vid inspektioner ovan mark, där man kan orientera med GPS. Den möjligheten finns ju inte under jord, och några metoder som finns för att styra kamerabäraren under jord omnämns i Avsnitt 15.5.

13.5 SLAM (Simultaneous Location and Mapping)

SLAM hanterar problemet att samtidigt bestämma kamerans läge och att kartera omgivningen. Används till olika tillämpningar, även undermark. Är dock beräkningsintensivt och når kanske inte den kartnoggrannhet vi söker. Ofta använder man avståndsmätning med laser, men även fotogrammetriska metoder kan tillämpas men kräver mer beräkningar. Utvecklingen går dock snabbt (robotar, självkörande bilar) så SLAM kan kanske bli aktuellt för användning i fjärrinspektion. En överskådlig beskrivning av metoden finns i Riisgaard & Blas (2005).

13.6 Passning av modeller

För att man skall kunna se förändringar över tiden måste man kunna jämföra två eller flera inspektioner. Detta görs genom att man passar ihop modellerna från inspektionerna.

Detta görs vanligen automatiskt i programvaran, men det kan ge ökad noggrannhet om man kompletterar med manuell identifiering av några gemensamma punkter.

Det finns olika metoder (algoritmer) för passningen. Översikt över metoder finns t.ex. i Zitová & Flusser (2003) och Szeliski (2006).

Bland programvaror kan nämnas: Cloudcompare och MeshLab.

13.7 Orientering vid punktobservationer (för interpolering)

Om man skall kunna orientera bilder som inte ingår i en kontinuerlig modell måste de vara lägesbestämda i ett koordinatsystem, det vill säga att det krävs att vi har särskilda markörer (inmätta), Avsnitt 13.3 , eller lägesbestämda kamerapunkter, Avsnitt 13.4.

14. Bildbaserad mätning av förändringar och deformation

14.1 Problemställning

En av de viktigare indikatorerna är förändringar över tiden. Detta medför krav på att man skall kunna jämföra fotogrammetriska modeller från olika tidpunkter, ibland med mycket lång tid emellan.

Detta ger upphov till krav på att lagring av data görs så att modellens läge är definierat, att data har ett format som kan användas (framåtkompatibel) och att information om programvaror och själva programvarorna finns tillgängliga.

14.2 Mätning av förändringar

En del observationer som är förändringar är i princip observation av nya skador vid ett senare tillfälle:

- Nya nerfall
- Nya skador på t.ex. bult
- Nya sprickor eller sprickmönster
- Utglidningar av block

Andra är ändringar i tidigare observerade fenomen:

- Ändring av befintliga sprickor eller sprickmönster
- Ökat nerfall
- Ökade deformationer och rörelser

Mätning av deformationer och rörelser behandlas nedan.

14.3 Mätning av deformation i planet

Deformationer i planet, det vill säga i tunnelväggens plan kan mätas genom att man jämför två modeller, tagna med ett tidsmellanrum och mäter lägesförändringar hos punkter som kan identifieras i båda modellerna.

En annan möjlighet är att använda 2D DIC (Digital Image Correlation) se Avsnitt 12.5. Man måste observera att kameran måste placeras i samma position som när man tog första bilden, vilket torde göra det svårt att använda metoden för vårt problem.

14.4 Tredimensionell deformation

Med tredimensionell deformation avser vi att deformationen eller en komponent av den är vinkelrät mot tunnelväggens plan. Principiellt kan man göra som vid deformationer i planet, men att man nu mäter även rörelser både parallellt och vinkelrätt tunnelväggen. Mätnoggrannheten är dock mindre när man mäter vinkelrätt än när man mäter i planet.

Möjligen kan man använda 3D DIC, men då krävs att man har en stereokamera. Användning av 3D DIC från drönare har beskrivits i litteraturen, så det verkar troligt att man kommer att få fram små kameror med god kvalitet. Ett problem kan vara att tillräckligt noggrant återfinna platsen, ett annat att ha en yta som har igenkännbara punkter, bl.a. med hänsyn till nedsmutsning och nerbrytning av ytskiktet.

Tills vidare torde den mest lämpade metoden vara den fotogrammetriska, med jämförelse mellan två tredimensionella modeller. Jämförelsen kan göras med hjälp av speciell programvara som finns, t.ex. CloudCompare.

15. Fjärrinspektionsteknik praktiska aspekter

15.1 Kamerautrustning

Den väsentligaste utrustningen är givetvis kamerorna. Det behövs i normalfallet tre stycken:

- Framåtriktad kamera för styrning och fotografering av innertak
- Sidoriiktad kamera för fotografering av nerfallet material
- Uppåtriktad kamera för fotografering av innertaket

Alla kamerorna måste givetvis monteras med fritt synfält. För den uppåtriktade kameran gäller dessutom att den bör placeras lågt, för att den skall se en så stor del av taket som möjligt.

Det har visat sig att man kan få acceptabel kvalitet med så kallade actionkameror av god klass, ofta används GoPro-kameror. Dessa kameror är små och lätta.

För att få en bättre bildkvalitet (högre upplösning) behövs en digital kamera av hög klass, en systemkamera med bra vidvinkeloptik. En sådan kamera är givetvis större och betydligt tyngre.

15.2 Belysning

För fotograferingen ställs krav att belysningen är jämn, tillräckligt kraftig och av rätt färgtemperatur. Det är dock i viss mån en avvägningsfråga mellan utrustningen i fält och möjligheten att färgkorrigera i de färdiga bilderna. Det krävs batteridrivna belysningar som kan ge tillräckligt ljus för manövrering respektive för fotografering.

15.3 Datautrustning

Den datautrustning som behöver medföras kan ha två olika ändamål, dels för kommunikation med kameror etc. dels för styrning i det fall man vill ha en autonom (självgående) utrustning. Manuell styrning görs i normalfallet via en analog radiostyrningsutrustning.

Kommunikation

För kommunikation visade det sig i fältförsöken att wifi inte var tillräckligt snabbt utan gav en sådan tidsfördröjning att det behövdes en särskild utrustning för att sända analog video från den frontriktade kameran. Sådan utrustning är inte stor eller tung och är relativt strömsnål.

Styrning av roboten

För att fjärrinspektion skall bli riktigt effektiv bör roboten vara autonom och alltså programmerad att fotografera området med det bildöverlapp som önskas och sedan återvända.

För detta krävs en datautrustning med kapacitet att manövrera förbi dittills okända hinder, orientera och hitta tillbaka till utgångspunkten.

Moderna mikrodatorer (enkortsdatorer) har förmodligen tillräcklig kapacitet att hantera dessa beräkningar, annars kan man utnyttja en modifierad PC.

Eftersom bilderna innehåller mycket data är kravet på datalagringskapacitet stort. Det kan troligen räcka med lagring lokalt på roboten, annars krävs dataöverföring till en mer central lagring.

Lagringsbehovet beror också på om bilderna tas kontinuerligt eller om det finns en dator på roboten som styr fotograferandet och därigenom minskar lagringsbehovet.

15.4 Kamerabärare (robot)

Kamerabäraren kommer troligen att för en längre tid framåt vara en robot som rör sig på innertaket, även om UAV:er ("drönare") föreslås. Deras förmåga att bära en kamera med belysning och krav på förmåga att undvika hinder kan vara begränsande faktorer.

15.4.1 Miljötålighet

Den fysiska miljön bakom innertaket ställer krav på apparatbäraren, eftersom det är mörkt och fuktigt, ibland med droppande vatten och även dammigt eller smutsigt. Andra faktorer som inverkar är det begränsade utrymmet i vertikalled, olika hinder och lutningen i tvärlängd (vid anfang).

15.4.2 Kapacitet

Räckvidden behöver vara sådan att roboten kan klara av att täcka ett område som naturligt styrs av att man flyttar mellan inspektionsluckor etc. så att man inte behöver göra inspektionen i flera omgångar.

Det måste givetvis finnas reserver så att roboten kan återvända till startpunkten.

Roboten drar ganska mycket energi, för elektronik, framdrift och belysning. Det enda rimliga alternativet är batterier eller möjligen bränsleceller. Batterierna behöver känna av när återfärden hotas, alternativt behövs reservbatteri till detta.

Man skall tänka på att batterier kan behöva laddas på plats, och att vissa (LiPo) kräver säkerhetsåtgärder när det gäller brandrisk.

Roboten måste ha en tillräcklig bärförmåga för att kunna bära den utrustning som nämnts.

15.4.3 Framkomlighet

Kamerabäraren måste ha förmågan att hantera hinder. De hinder som måste kunna hanteras är dels nerfall, dels konstruktionsdelar som t.ex. upphängningar för innertaket och nerstickande bergbult.

Den måste också kunna hantera lutningar. Innertaket har ofta en kraftig lutning intill anfangen. Det krävs att kamerabäraren kan nå detta område för att man skall få en fullständig modell.

Lutningen kan medföra två typer av incidenter:

- Bristande friktion mot underlaget gör att kamerabäraren rutschar ner.
- Lutningen i sig kan få kamerabäraren att välta, i sidled eller över ända, beroende på körriktning.

För att kunna få en bild av tunnelväggen i det ”svåra” området kan man tänka sig speciallösningar, t.ex. att ge roboten en styrbar arm som den kan sticka ner för att ta bilder. Ett annat alternativ är en robot som kan klättra. Utvecklingen av robotar går ju mycket snabbt och det verkar troligt att avancerade robotar snart finns allmänt tillgängliga. Klättrande robotar och system för klättring finns beskrivet i litteraturen, se t.ex. Guo et al (2015) och Bazargan (2012). Sådana robotar har ibland hjul eller banddrivning, kombinerat med ett system för att få anliggningskraft mot den sub-vertikala väggen, se t. ex. Nallusamy et al. (2016). I vårt fall kan man möjligen tänka sig att roboten tar spjörn mot berget. En robot som efterliknar mänskliga friklättrare beskrivs av Zhang (2014).

15.4.4 Styrbarhet

Styrbarheten är viktigt för att man skall kunna få erforderlig överlapp mellan bildserier utan att missa delar.

Man kan ha en styrning som är manuell, där en operatör styr roboten under hela tiden, eller så kan man ha en robot som är autonom och inte behöver samma kontinuerliga övervakning.

Man skall i detta sammanhang tänka på att det är stora areor som kan behöva besiktigas, vilket gör att operatörskostnaden kan bli kännbar. Samtidigt kan manuell styrning vara att föredra vid vissa riktade punktinspektioner.

Manuell styrning

Fördelen är att det inte krävs utveckling av ett styrsystem. Nackdelen är kostnaden för en operatör, att det kan krävas särskilda anordningar för att ge något att styra efter och att man måste ha onödigt stora överlapp som ger extra datahantering.

Autonom robot

Fördelarna är att den kan ”lämnas åt sig själv” och inte behöver styras hela tiden, samt att den kan programmeras att fotografera med minimal överlappning.

Det krävs dock att roboten kan hantera hinder så att den kör förbi eller runt, och samtidigt att den kan identifiera nerfall och fotografera det.

15.5 Orientering vid fotograferandet.

När man tar bilder för fjärrinspektion är det i de flesta fall för att skapa en modell, vilket kräver att man har överlappande bilder. Av det skälet (och för att man skall inspektera rätt område) är det viktigt att man kan orientera var kameran befinner sig vid fotograferingen. Det betyder att man behöver känna till inte bara läget utan också riktningen.

Det är dessutom en stor fördel om man kan ordna orienteringen på ett sådant sätt att man kan orientera den färdiga modellen i ett yttre koordinatsystem.

I det fall att man använder sig av tvådimensionell digital image correlation för att observera förändringar behöver man komma tillbaka med kameran till den punkt där jämförelsebildens togs. Detta ställer speciella krav på orienteringen.

15.5.1 Kända punkter i modellen

Om man har kända, identifierbara punkter i modellen kan de användas både om man använder manuell styrning och om man har en autonom robot. De utförda fältförsöken på Torsgatan visade att man kan behöva särskilda anordningar för styrning eftersom de körda stråken ligger tätt, detta på grund av överlappningskravet. I försöken på Torsgatan nyttjades centrum på koordinatsatta bergbultar som referenspunkter.

Vid anläggning av tunnlar bör det därför sättas upp koordinatsatta markörer, signaler i taket. Vid långa kedjor med tolkade bilder riskerar felfortplantning att deformera 3D-modellerna om koordinatbestämning på annat sätt inte kan ske.

15.5.2 Tröghetsnavigering

En möjlig lösning är att använda tröghetsnavigering och man kan då utgå från en känd punkt vid inspektionsluckan vid start och slut av körningen. Tillräckligt små utrustningar finns på marknaden. Det rapporteras nu i litteraturen om små utrustningar, som har eliminerat avdriften (ROMOS 2020)

15.5.3 SLAM

SLAM (Simultaneous Location And Mapping), se vidare i Avsnitt 13.5, bör kunna vara ett sätt för orientering av kameran. Möjligen behövs utveckling av beräkningsmetoder för att klara kravet på realtid.

15.5.4 Triangulering

Man kan tänka sig att ha tre eller flera uppsatta signaler (ledfyror) och att från kamerabäraren mäta vinklarna mot dessa och på så sätt bestämma kamerans läge, se t.ex. Pierlot & van Droogenbroeck (2014).

En liknande metod är att mäta in kamerabäraren från två eller flera punkter med hjälp av kameror i punkterna. Tekniken används bland annat i filmindustrin när man vill animera en figur utgående från rörelserna hos en verklig skådespelare, så kallad MoCap (motion capture). Metoden finns även utvecklad för tekniska tillämpningar (Vicon).

Triangulering och kanske MoCap kan vara en möjlig metod för att orientera kameran tillbaka till en tidigare bildpunkt och skulle då kunna användas ihop med 2D Digital Image Correlation.

Inmätning av fordonet med automatisk totalstation är också en tänkbar metod för koordinatbestämning.

16. Hitta indikatorer i bild

16.1 Automatiserad tolkning av lineament

Stent et al. (2015) beskriver ett system för att upptäcka förändringar över tiden i tunnelväggar. Systemet bygger på att man skapar tredimensionella modeller med Structure from Motion teknik och sedan tolkas de med hjälp av artificiell intelligens. Man uppger att försök visar på att systemet är bättre än manuell inspektion i fält, när det gäller att upptäcka förändringar avseende sprickor. Man anger att trots att systemet är dyrare och tar längre tid än manuell inspektion, det har fördelar när det gäller objektivitet och möjligheten att spara data för framtida användning.

En mycket vanlig skadeindikator är sprickor. Mycket forskning om automatisk detektering av sprickor finns publicerad och metodiken verkar mogen. Se till exempel Feng (2001), Valença et al. (2013) och Nishiyama et al. (2015).

16.2 Automatiserad tolkning av skador och avvikelser

Stent et al (2016) beskriver hur ett system motsvarande det i Stent et al (2015) kan användas för att hitta andra förändringar än sprickor i gjuten tunnel-lining. Man pekar dock på de praktiska problemen med att tunnelväggen kan smutsas ner mellan inspektionstillfällena och försvåra en korrekt passning av bilderna.

En intressant möjlighet är att använda automatisk identifiering av förändringar som skett mellan två bilder och att sedan göra en manuell analys av förändringen, McCormick & Lord (2011).

16.3 Manuell tolkning ur bilder och modeller

16.3.1 Tolkning ur bilder

Som ett resultat från inspektionen kan man få fram en 3D-bild som kan granskas i detalj, med hjälp av lämplig programvara. Ett exempel visas i Figur 41. Bilden är hämtad från fältförsöken vid arbetstunneln Torsgatan, se Kapitel 19.



Figur 41 Exempel på 3D-bild

16.3.2 VR (Virtual Reality)

En möjlighet att göra en manuell bildtolkning ur en modell är att skapa en VR-modell, som man i princip kan gå omkring i. Metoden har utvecklats mycket på senare tid. I Figur 42 visas en VR-modell som skapats med material från Torsgatan



Figur 42 VR-modell från försöken vid Torsgatan

17. Inspektionsresultat - Osäkerheter orsakade av bristande information

17.1 Brister i spatiell överblick

Det är möjligt att det finns effektiva indikatorer som vi inte registrerar eftersom de egentligen kräver ett större ”fönster” än det vi tittar på. Spricklängden i betong är en utslagsgivande faktor och i synnerhet i kombination med sprickavstånd och uttolkningar av sprickmönster. Vid alltför små areor kan dessa faktorer inte bestämmas.

Det ”fönster” som vi har, alltså det inspekterade området, är en större eller mindre del av den modell vi byggt upp av tagna bilder. För att få en heltäckande bild med möjlighet till stora ”fönster” krävs att en stor datamodell skall hanteras i analysen, vilket ger stor bearbetningstid och möjligen inte så stor vinst.

För en direkt, automatiserad utvärdering bedöms inte vinsten stor. Å andra sidan kan man förutse att den digitala modellen kan användas för manuell inspektion i tveksamma fall, och då ger en samlad bild över ett större område troligtvis ett bättre beslutsunderlag. Det är då inte rent indikatorbaserat.

17.2 Punktvisa observationer (stick-prov)

Även om man använder en mer eller mindre automatiserad metodik för inspektionen blir det nog i praktiken så att man tittar på delområden och inte hela tunneln, observationerna blir alltså ”punktvisa”, bland annat med hänsyn till datahanteringen.

Frågan om vad finns mellan och bortom observationspunkterna ändras givetvis inte om man använder en metod baserad på observerade indikatorer. Denna fråga behandlas dock inte vidare i denna rapport.

18. Expertutvärdering ur digital bild.

Ibland vill eller kan man inte använda indikatorer utan man vill i stället direkt utvärdera en tunnels tillstånd ur en digital bild. Det kan till exempel vara fallet då man vill ha en expertbedömning men föredrar att inte göra den i fält med nedtagning av innertak.

Detta är samma problemställning som till en del beskrivs i Avsnitt 16.3.

18.1 Typer av digital redovisning

De bilder som tagits i fält är digitala och kan redovisas på olika sätt, från det enskilda fotot till en VR-modell. I området däremellan finns de olika typer av 3D-modeller som kan tas fram, från wireframe och punktmoln till renderade ytmodeller.

18.2 Granskning av digital bildmosaik

Att man gör en mosaik av de digitala bilderna torde vara önskvärt, eftersom varje bild täcker ett litet område och man vill ha en överblick. Mosaiken redovisas som en fold out dvs. projektion av tunnelytan på ett ”papper”, dvs. som dagens handritade inspektionsbilder. Detta gör att den som granskar ”känner sig hemma”. Man måste komma ihåg att det kan bli projektfel vid sammanläggningen som ger stor distorsion i bilden.

18.3 Virtual reality och 3D-modeller

Virtual reality (VR) används för att skapa en modell som är verklighetstrogen och där användaren tycker sig finnas inne i den. Den kan ha varierande grad av input till användaren, t.o.m. beröringsåterkoppling (haptiska interface).

Tekniken har utvecklats mycket snabbt på senare tid och kommer troligen att bli vanlig. Det finns redan idag möjligheter att skapa en VR-modell av ett avfotograferat rum.

Metoden i sig är inte ”automatisk” utan skall ses som ett sätt att göra en okulärinspektion av det utrymme som undersökts med hänsyn till indikatorer. Den skulle då kunna vara en möjlig åtgärd i beslutsprocessen om screeningen med indikatorer visar att ytterligare information behövs.

19. Fältförsök med fjärrinspektion

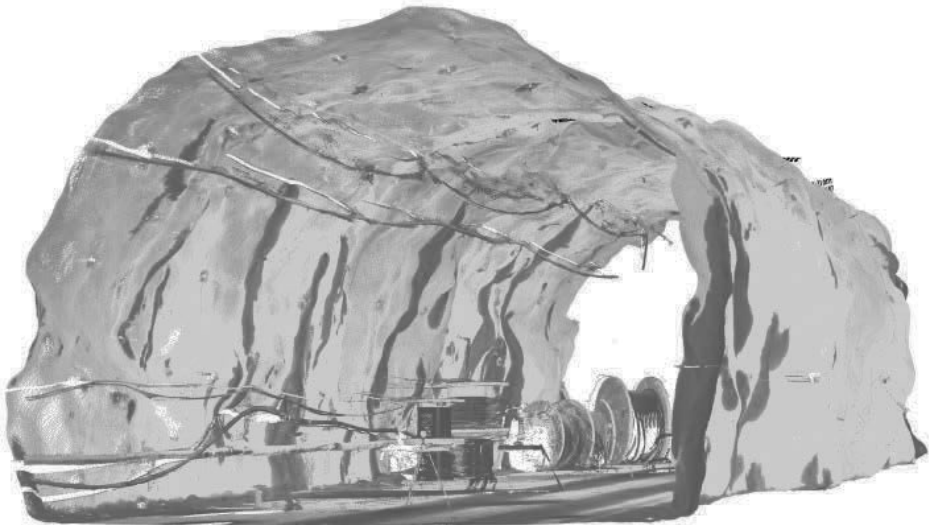
Som en del av projektet genomfördes försök med fjärrinspektion av berg i en tunnel. För detta pilotprojekt var det önskvärt med en tunnel som hade innertak och var byggd i ett berg där man kunde förvänta sig skador att observera.

Trots ansträngningar från både arbetsgruppen och referensgruppen var det inte möjligt att hitta en sådan tunnel. I stället valdes att välja en lättåtkomlig tunnel med skador, för att sedan skapa ett ”fingerat” innertak.

Försöksplatsen finns redovisad i Kapitel 6. Arbetstunneln vid Torsgatan användes under byggandet av Citybanan, men efter användandet slopades den genom att den fylldes med sprängsten. Fyllningsarbetet pågick samtidigt som försöken, med tung trafik i tunneln, varför vårt arbete förlades till tider med liten verksamhet i tunneln.

19.1 Laserscanning

Det utfördes en laserscanning av tunneln runt försöksplatsen, se Figur 43. Tunneln redovisades i ett lokalt koordinatsystem baserat på tunnelns längdmätning.



Figur 43: Laserscanning av tunnel. 3D-modell.

Punktmolnets täthet varierar med vinkeln mellan tunnelytan och scannern. Punktmolnet har en skattad mediantäthet om ca 5 mm, se Figur 44.

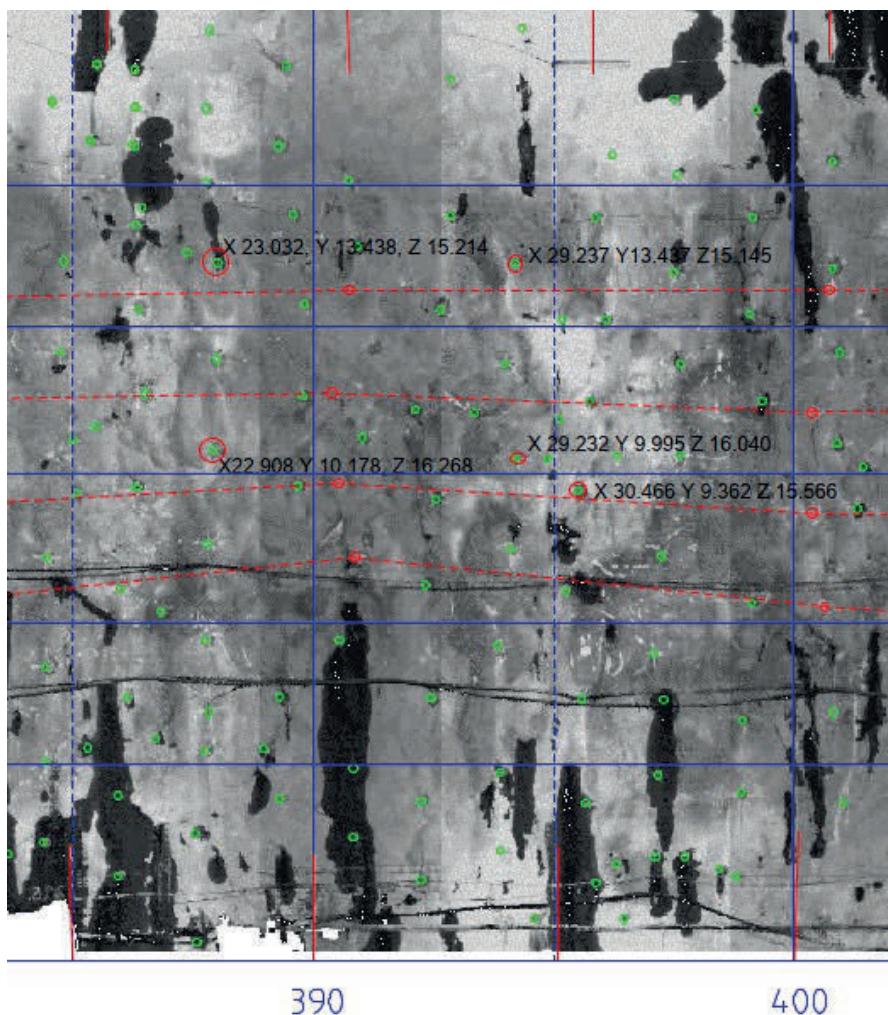
Den reflekterade intensiteten mäts vid scanning i en skala mellan 0 och 1. Intensiteten representeras i svart-vitt som gråtoner. I Figur 43 kan exempelvis urskiljas mörkgrå band eller fläckar i tunnelväggen vilket är fukt och vatten som försämrar reflektionsförmågan.



Figur 44: Detalj av 3D modell laserscanning där punktmolnet kan urskiljas som raster.

Laserscanningen är även redovisad i en projektionsmodell. Denna är tidigare redovisad som svart-vitt underlag för inspektionen i Figur 20, Figur 22 och Figur 45.

Koordinater på ett antal bultar avsedda att användas som signaler i de fotogrammetriska försöken togs fram ur laserscanningen.



Figur 45: Koordinater tagna ur 3D modell och redovisade på intensitetsmodell.

19.2 Innertaket

Eftersom det inte fanns ett innertak på platsen så byggdes ett temporärt tak av trä och plywood på platsen. Taket hängdes upp i bultar i berget och var tillgängligt via en byggställning. Storleken på taket var ca 4,5 x 10 m². Av säkerhetsskäl fick taket inte beträdas varför det var åtkomligt endast från ena gaveln, där byggställningen fanns.

Taket var försett med sarger för att hindra att apparatbäraren (tidigare kamerabäraren) körde över kanten. Ett foto av taket finns som Figur 46.



Figur 46 Innertaket vid fältförsöken

19.3 Utrustning

Den utrustning som behövdes för försöken var en apparatbärare (robot) som kunde bära kameror och belysning och styras så att man fick bilder med tillräckligt stort överlapp.

19.3.1 Apparätbärare

De kommersiella kamerabärare av robottyp som var avsedda för ändamålet visade sig betinga ett mycket högt pris. Eftersom fältförsöken mest var avsedda att ge erfarenhet och som ”proof-of-concept” vad gäller fjärrinspektion med indikatorer valdes en mindre sofistikerad lösning.

För fältförsöken användes därför en radiostyrd bil som var fyrehjulsdriven med el-motorer. Eftersom den hade ”stridsvagnsstyrning” kunde den vända runt en punkt vilket gjorde den mycket manövrerbar.

Apparatbäraren styrdes manuellt med hjälp av en radiostyrningsutrustning.

För orientering monterades på bilen en framåtriktad kamera typ GoPro Hero 3+. Vid ett första försök skedde bildöverföringen med wifi, men fördröjningen var så stor att det var omöjligt att styra bilen. Bildöverföringen skedde därefter med en separat radiosändare på 5,8 GHz -bandet.

19.3.2 Kameror

I samråd med 3GSM, det företag som avsågs anlitas för den fotogrammetriska utvärderingen, valde vi att använda så kallade actionkameror, typ GoPro. Förutom den GoPro Hero 3+ som användes som framåtriktad kamera för styrningen, användes en GoPro Hero 5 för att ta bilderna. I ett av försöken att fotografera taket användes en Fujifilm X-E2 systemkamera med ett Fujifilm XF 2.0/18 mm objektiv. GoPro-kamerans optik är inte högklassig ur mätsynpunkt så den kalibrerades av 3GSM. En beskrivning av användandet av denna kameratyp för kartering finns i Gonçalves & Pinhal (2018).

Exempel på foton tagna med systemkamera finns i Figur 47, Figur 62 och Figur 52.

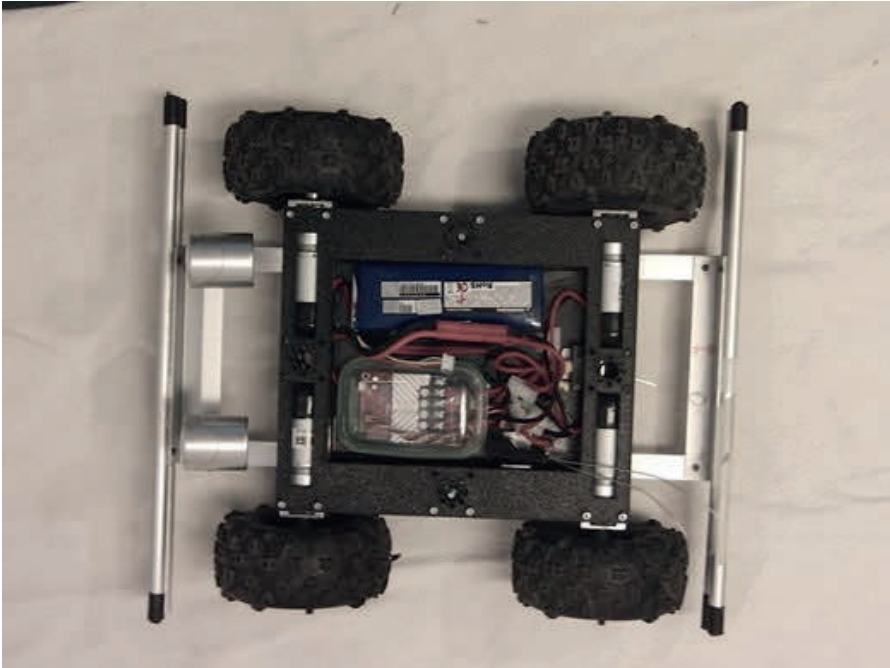
Såväl ej insprutade stålfibrer som sprickor och murarband framträder tydligt. Det går att urskilja lineament efter fina sprickor i sprutbetongen.



Figur 47: Foto taget med systemkamera. Naturlig spricka (bild 5393).

19.3.3 Belysning

För belysning använde vi två batteridrivna videobelysningar av LED-typ som var placerade liggande på apparatbäraren se Figur 49. I Figur 67 visas apparatbäraren i det utförande den hade vid fotografering av nerfall. Under fältförsöken vid Torsgatan hade apparatbäraren ingen sidoriktad belysning eller kamera. Dessa monterades senare, vid försöken med fotografering av nedfall som genomfördes på annan plats, se Avsnitt 20.3.



Figur 48 Apparatbäraren s chassi



Figur 49 Apparatbäraren med belysning och uppåtriktad kamera vid körning Torsgatan

19.3.4 Utrustning för inriktning av bilen

Eftersom det var nödvändigt att ha stort överlapp mellan bilderna, och det samtidigt var ett kort fotograferingsavstånd, måste körningen ske i parallella linjer utan någon större avvikelser.

För att underlätta styrningen hade markeringar ritats på innertaketets sarger. Detta kompletterades med att flyttbara riktmärken anordnades.

19.4 Försökens utförande

19.4.1 Första körningarna

De första körningarna fick upprepas, bland annat på grund av problemen med bildöverföring och för att få rutin. Figur 50 visar apparatbäraren och styrutrustningen under körning.



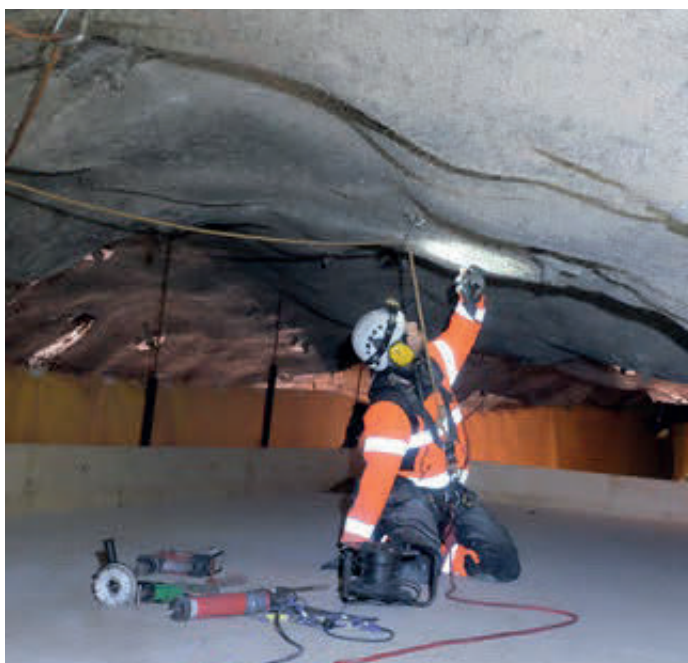
Figur 50 Körning på innertaket

19.4.2 Konstgjorda sprickor

För att undersöka möjligheten att se förändringar, som ju är en viktig indikator, skapades konstgjorda sprickor dels med slipstift, dels med vinkelslip. Ur arbetsskyddssynpunkt utfördes detta arbete av klättringsspecialister, se Figur 51.

Därefter gjordes ytterligare en körning med fotografering av innertaket med samma kamera som tidigare. Dessutom gjordes vid ett något senare tillfälle en körning där en digital systemkamera användes.

Foto av en av ritsarna finns i Figur 52. Utsnitt av 3D-modell över samma parti som i Figur 52 finns i Figur 64.



Figur 51 Skapande av konstgjorda sprickor

Ett enkelt försök gjordes också att skapa en VR-modell ur 3D-modellen. För att ge en känsla av att man var inne i en tunnel fick en artist rita dit väggar och golv med nerfall, se Figur 54.

Försöket visade att det är fullt möjligt att skapa en VR-modell med vanligt förekommande programvara. Vi gör bedömningen att VR kan vara ett hjälpmedel när man vill göra en manuell besiktning för att komplettera en indikatorbaserad analys för att få en allmän känsla av förhållandena, men att det även i den användningen krävs stor datorkapacitet. Man skall dock komma ihåg att utvecklingen går mycket snabbt framåt.



Figur 54 VR-modell baserad på 3D-modellen

19.5.2 Se sprickor och förändringar

En planprojektion av modellerna skapade med GoPro kamera visas i Figur 55 och Figur 56. Modell skapad på basis av fotografier tagna med systemkamera visas i Figur 57.



Figur 55: Första modellen skapad med film från GoPro kamera



Figur 56: Modell efter slitsar ristats in, skapad med film från GoPro kamera



Figur 57: Modell efter slitsar ristats in, skapad med foton från systemkamera

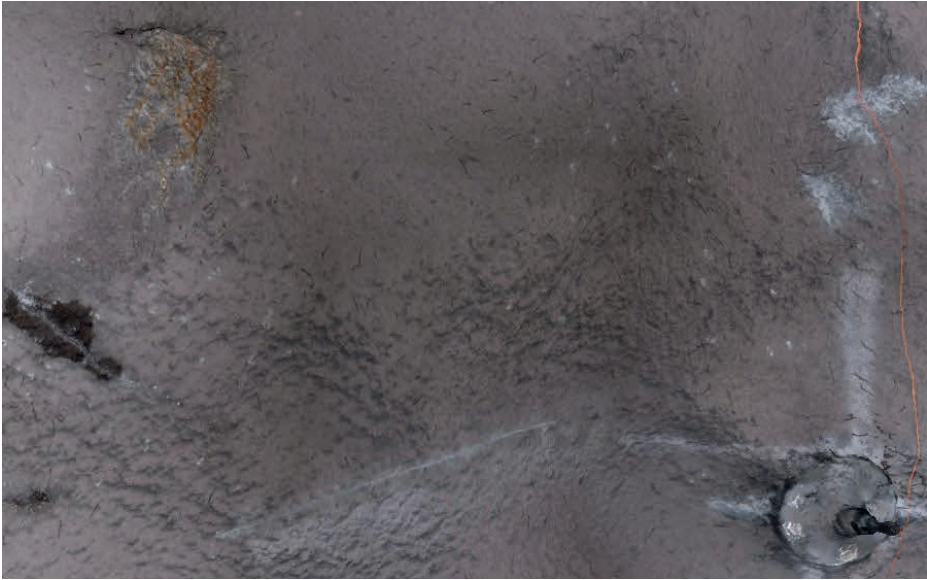
I Figur 58 och Figur 59 jämförs modellen baserat på GoPro före och efter en ”spricka” ristats in. Figur 60 visar motsvarande utsnitt från modellen baserat på fotografier från systemkameran och Figur 61 visar ett fotografi över motsvarande utsnitt taget med systemkameran.



Figur 58: Parti där rits gjordes från 3D-modell skapad med film från GoPro.



Figur 59: Parti efter rits från 3D-modell skapad med film från GoPro kamera.



Figur 60: Parti med rits från 3D-modell skapad med fotografier tagna med Fujifilm X-E2 systemkamera.

Med GoPro kameran man inte urskilja merparten stålfibrer. Med modell skapad med systemkamera är såväl färgdynamik som upplösning bättre. Det går att urskilja stålfibrer och sprickor. Generellt ger obehandlade fotografier tagna med systemkameran en något bättre upplösning än modellen.



Figur 61: Parti med rits, bild/foto taget med Fujifilm X-E2 systemkamera

Mellan Figur 62 och Figur 63 går det att jämföra hur väl en naturlig spricka samt stålfibrer visas i modellen baserat på fotografier tagna på systemkameran och ett obehandlat fotografi.

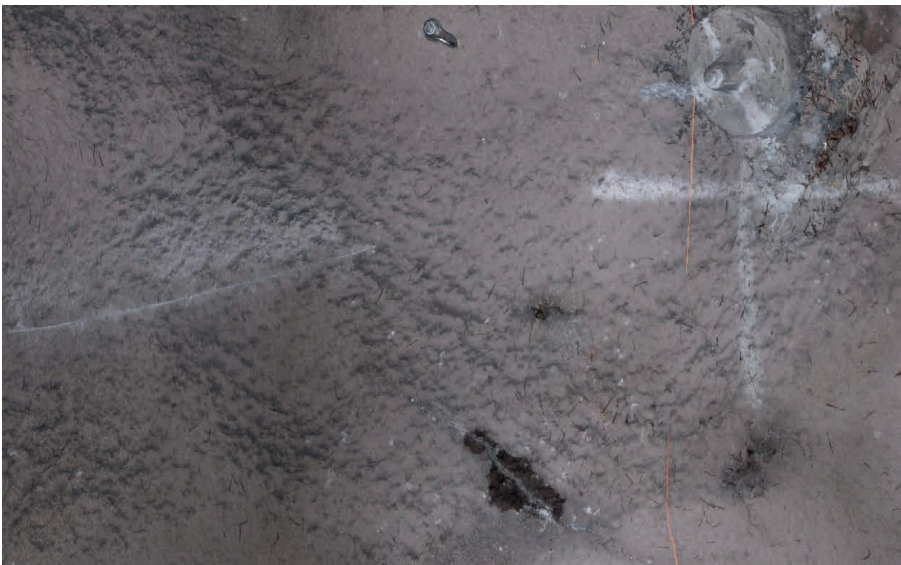


Figur 62: Bild/foto taget med systemkamera. Naturlig kalkfylld och öppen spricka.



Figur 63: Naturlig spricka från 3D-modell baserat på fotografier med Systemkamera Fujifilm X-E2

Mellan Figur 64 och Figur 52 går det att göra motsvarande jämförelse.



Figur 64: Rits samt naturlig spricka från 3D-modell skapad efter foton från systemkamera, Fujifilm X-E2

Vid tidpunkten när modellerna skapades och utvärderades var programvaran inte så utvecklad att den klarade av att ta fram skillnader mellan modellerna, s.k. differensmodeller. Modellerna blev alltför stora och tunga att bearbeta. Det här därför inte varit möjligt att ta fram data som visar upplösningen i vertikalled.

Upplösningen i horisontalled framgår av fotografierna. Vår bedömning är att det går lika bra att urskilja sprickor i modellen som med ögat vid inspektion på handnära avstånd. Såväl stålfibrer (diameter 0.5 mm) som hårfina sprickor syns mycket tydligt.

Eftersom modellerna är skalriktiga går det att mäta sprickvidder i modellerna. Även en mindre procentuell mätosäkerhet i modellen ger ett försumbart fel i sprickvidd.

20. Utförda försök, observation av nerfall

Nerfall på innertaket är en viktig indikator, liksom ändringar (ökningar) av mängden nerfall. För att prova detta gjordes ett försök att fotografera nerfall och att mäta mängden av det.

20.1 Försökslokal

Eftersom försöket bara avsåg nerfall valdes att göra fotograferingen inomhus på ett betonggolv. Ett första försök gjordes i en kulvert på KTH, men kameraproblem gjorde att det misslyckades.

Försöket upprepades därför i källaren i Trafikverkets parkeringslokal i Solna.

20.2 Tunnelmodell

20.2.1 Fingerad tunnel

För att i någon mån avskärma platsen och fingera tunneltaket gjordes en överbyggnad av brädor klädd med wellpapp. I taket på denna fanns en pyramidformad hållighet som skulle visa var utfallet kom ifrån.

20.2.2 Nerfallet material

Vid försöken användes material bestående av stenar och betongbitar som placerades ut för hand i en inte orealistisk hög.

20.3 Modifiering av apparatbäraren

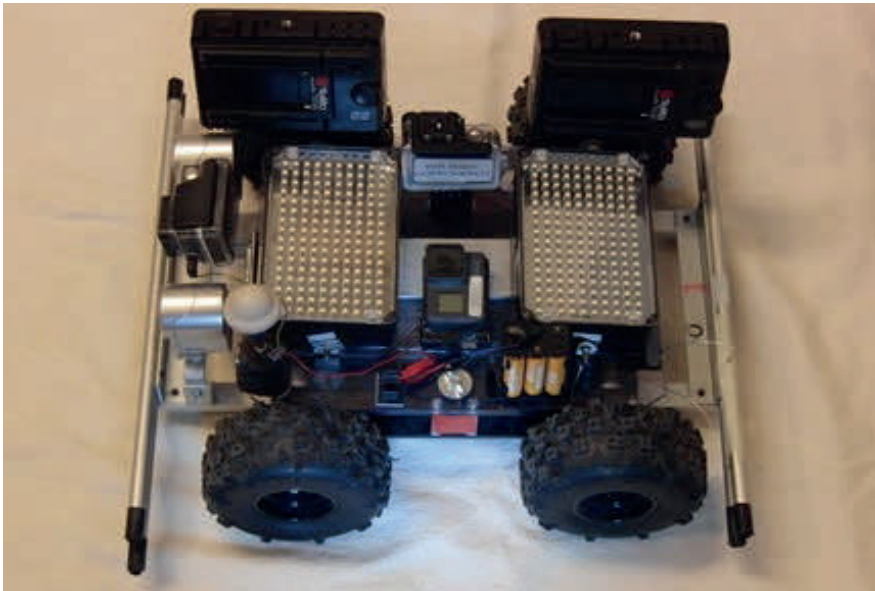
20.3.1 Kameror

För försöken kompletterades apparatbäraren med en sidriktad GoPro3- kamera. Eftersom fotografering nu skulle ske även med den framåtriktade kameran så skickades båda dessa kameror till kalibrering vid 3GSM.

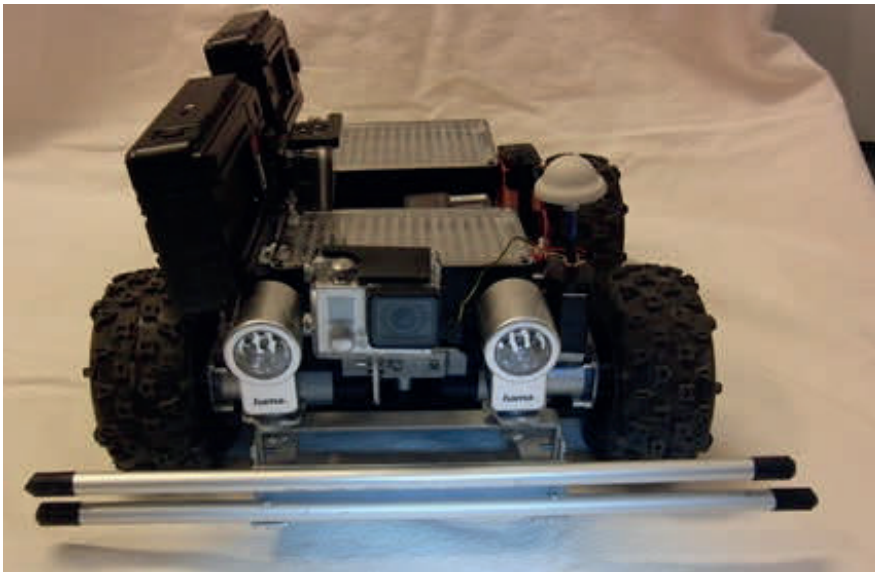
20.3.2 Belysning

Belysningen kompletterades med två sidriktade LED-belysningar (videobelysningar) och en framåtriktad.

Apparatbäraren hade alltså belysningar och kameror riktade framåt, uppåt och åt sidan, se Figur 65 - Figur 68.



Figur 65 Apparatbäraren uppifrån med belysning och kameror vid fotografering av nerfall



Figur 66 Apparatbäraren framifrån vid fotografering av nerfall



Figur 67: Apparatbärarens högra sida med kamera och sidbelysning.



Figur 68 Apparatbäraren med all belysning påslagen

20.4 Försökens utförande

Försöken gjordes i två omgångar, en första med den ursprungliga högen och en med ytterligare material. Försöksuppställningen med tunnelmodell med hålrum i taket, nerfall och apparatbäraren med påslagen belysning visas i Figur 69.



Figur 69 Försöksuppställning vid fotografering av nedfall

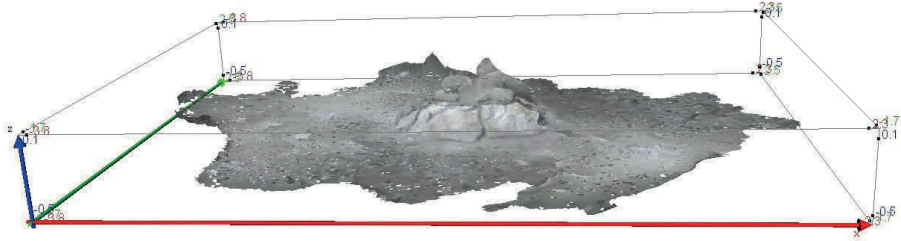
Vid försöken gjordes en körning runt högen så att den sidriktade kameran skulle kunna filma nerfallet. Dessutom gjordes körningar där apparatbäraren passerade rakt förbi, samt körningar där apparatbäraren kördes fram mot högen från fyra håll, för att se om man skulle kunna få fram en modell av högen om man inte hade en sidriktad kamera.

Under körningarna var den uppåtriktade kameran i gång, för att undersöka om man kan få en användbar bild av utfallsområdet i taket utan att köra direkt under det.

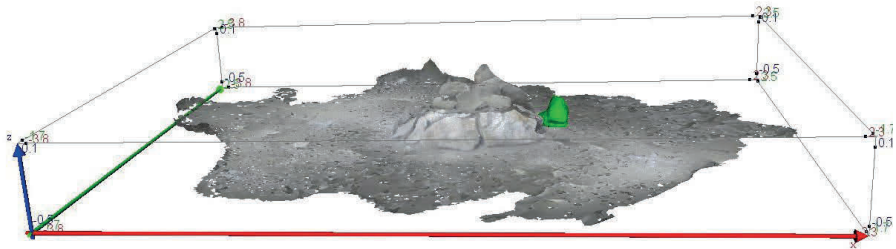
20.5 Erhållen modell

Det filmade materialet skickades till 3GSM för skapandet av en tredimensionell bild av nerfallet och av förändringarna.

Två modeller skapades, en med den ursprungliga högen och en där material hade lagts till den ursprungliga högen. Den första modellen visas i Figur 70. Ändring i nerfallen volym kunde sedan bedömas genom att man subtraherade modellerna från varandra. I Figur 71 visas nerfallet med en av de ändrade volymerna markerad.



Figur 70 Modell av nedfallet



Figur 71 Nedfallet med en tillagd sten markerad (grönt)

Taket kunde modelleras, även om det ursprungligen fanns farhågor att det var för regelbundet för en säker koppling av bilderna.

En rapport från 3GSM över modelleringen med kommentarer återfinns i Bilaga 9.

20.6 Resultat, kommentarer

Man kan sammanfatta försöksresultatet:

- Det går bra att bygga en modell när man kör runt högen och har en sidriktad kamera.
- Om man skall bygga en modell från den framåtriktade kameran krävs det små vinklar mellan körningarna
- Det är i och för sig möjligt bygga modell med 90 grader mellan körningarna men det kräver mycket beräkningsarbete och provades därför inte
- Det är möjligt att få med taket i modellen

Nedfall torde vara en av de säkraste indikatorerna. Därför bör man använda en utrustning som har sidriktad kamera som standard.

Styrandet vid fotograferingen är svårt, eftersom man inte vill köra upp på kanten av nerfallet och rubba det och därigenom skapa artefakter.

21. Kommentarer om utformning av det tekniska systemet för fjärrinspektion

21.1 Fjärrstyrd eller autonom robot?

Man kan ha en styrning som är manuell, där en operatör styr roboten under hela tiden, eller så kan man ha en robot som är autonom och inte behöver samma kontinuerliga övervakning.

Man skall i detta sammanhang tänka på att det är stora areor som kan behöva besiktigas, vilket gör att operatörskostnaden kan bli kännbar. Samtidigt kan manuell styrning vara att föredra vid vissa riktade punktinspektioner.

Manuell styrning:

Fördelen är att det inte krävs utveckling av ett styrsystem. Nackdelen är kostnaden för en operatör, att det krävs särskilda anordningar för att ge något att styra efter och att man måste ha onödigt stora överlapp som ger extra datahantering.

Autonom robot:

Fördelarna är att den kan "lämnas åt sig själv" och inte behöver styras hela tiden, samt att den kan programmeras att fotografera med minimalt överlapp. Möjligheter till orientering under färden beskrivs i Avsnitt 15.5.

Det finns dessutom möjligheten att roboten anpassar körningen efter upptäckta nerfall etc. Det behöver framhållas att utvecklingen inom detta område går mycket snabbt, t.ex. med autonoma drönare.

21.2 Utformningskriterier

Mått och vikt:

Eftersom inspektionsroboten skall kunna användas på befintliga innertak är det nödvändigt att den inte har större yttermått än att den kommer igenom en vanlig inspektionslucka, som kan ha en diameter i storleksordningen 0.5 m.

Eftersom man med hänsyn till att den behöver lyftas manuellt till skylift, upp genom luckan etc. där utrymmet är trångt bör vikten inte överskrida 25 kg.

Drivning och styrning.

Även om utvecklingen visar att klättrande robotar är under stark utveckling torde konventionell drivning med hjul eller band vara bästa alternativ. Väsentligt är att drivningen möjliggör så kallad stridsvagnsstyrning, där man kan diva framåt på ena sidan och bakåt på den andra så att roboten kan rotera runt en fast punkt.

Räckvidd:

Räckvidden måste vara sådan att det finns reserver för roboten att ta sig tillbaka eller till någon annan inspektionslucka när hela området är fotograferat.

Förutom framdriften krävs energi till belysningen, varför man bör överväga möjligheten att släcka den på ”transportsträckor”.

Kamera- och belysningsmanövrering:

Det finns två tänkbara alternativ för manövrering av kameror och belysning. Det första är att använda videoläge och låta kameror och belysning vara på kontinuerligt. Detta är dock energikrävande och en lösning med en datorstyrning av kamerorna torde vara att föredra, men den måste kunna hantera kravet på bildöverlapp.

21.3 Orientering

För orienteringen av apparatbäraren krävs att man känner till apparatbärarens läge i planet och dess riktning, så att fotograferingsriktningen blir känd.

Flera möjliga lösningar finns:

- Tröghetsnavigering
- SLAM
- Inmätning av fyror från bilen
- Inmätning av bilen från kända punkter t.ex. med MoCap (motion capture)

21.4 Fotografering vid anfang

Anfangen är ofta känsliga delar av tunnarna. Strukturer i kombination med geometri kan innebära att det inte uppstår någon egentlig valvverkan mer än den som induceras av förstärkningen. Det kan även vara svårt att spåra nedfall som kan rasa ned i spalten mellan vägg och inklädnad. Det behöver finnas möjlighet att fotografera vid anfangen. Om man i huvudsak tittar efter nedfall är bildkraven möjligen mindre än när man tittar efter sprickor och liknande.

Fotograferingen kan göras på flera sätt, till exempel med en extra kamera på en arm, eller genom att roboten förses med ”räddningslina”. Alternativt kan man ta fram en robot som endast är avsedd att fotografera vid anfangen.

Ett alternativ är då att använda en klättrande robot, se Avsnitt 15.4.3.

22. Fjärrinspektion som beslutsunderlag

Med beslutsunderlag avses här resultatet av en process som beaktar såväl möjliga konsekvenser som troligheter och andra relevanta faktorer. I generella termer kan man se beslutsunderlaget som ett klassningsproblem, där tunneln (tunneldelen) skall klassas in en bestämd klass med till den klassen hörande åtgärder.

Vid klassningen finns det två gränser med ett antal klasser däremellan. Dessa gränser utgörs av friklassning (ingen åtgärd före nästa ordinarie besiktning) och omedelbart trafikstopp av säkerhetsskäl.

Beslutsunderlaget, som tas fram, skall vara en underbyggd rekommendation till åtgärd. Åtgärd kan vara fysisk åtgärd i anläggningen men också en fördjupad utredning.

22.1 Beslutssituationen. Problemställningen

Syftet med inspektionen är att ge beslutsunderlag för beslut som skall säkerställa en tillräcklig sannolikhet för att tunnelns primära funktion uppfylls, eller med andra ord att risknivån är acceptabel.

De möjliga besluten är:

- Fortsatt drift till nästa ordinarie inspektion
- Tidigarelagd inspektion
- Åtgärd i form av detaljerad undersökning/utredning. Kan innefatta partiell rivning eller installation av nya inspektionsluckor.
- Drift med övervakning och/eller restriktioner
- Avstängning.
- Omedelbara åtgärder, reparation, rivning och/eller förstärkning.

Det är viktigt att skapa underlag för ett rationellt beslut, men beslutet kan senare visa sig vara felaktigt. Metodiken får därför inte vara statisk utan behöver ständigt ses över och uppdateras.

Den primära funktionen är att trafikutrymmets användning inte begränsas. En sådan begränsning kan orsakas av:

- Skador, t.ex. nerfall som slår genom innertaket och som kräver omedelbart trafikstopp
- Hotande skador som bedöms kräva en begränsning i trafiken av säkerhetsskäl
- Inskränkningar orsakade av undersökningar och underhåll, särskilt om de är oplanerade.

Det måste observeras, att fjärrinspektionen i huvudsak gäller det bärande huvudsystemet av bergmassa och förstärkningar. Verkan på trafikutrymmet av ett brott (eller hot om brott) i huvudsystemet styrs ju till en hög grad av innertakets bärförmåga och tålighet som kan bedömas baserat på inspektion av dess undersida, från trafikutrymmet. Vi har ju egentligen ett tekniskt system där innertaket ger en viss redundans, alltså ett

parallellsystem. För brott i betydelsen skada på trafikområdet krävs ju både att man får ett nerfall på grund av brott i bärande huvudsystemet och att nedfall slår igenom innertaket.

Exempel på analys av bärigheten hos innertak av sprutbetong finns i SGI (2009). Den gjordes i samband med att järnvägstunneln i Graversfors utreddes för risken skador orsakade av blocknedfall på innertaket. En utredning av sprutbetongvalvs tålighet (Holmgren & Sundquist 2008) finns som bilaga i SGI (2009).

22.2 Beslutsmetoder

Metoderna som används för att fatta beslut bör vara sådana att besluten är rationella. I varje enskilt fall kommer det sedan att visa sig om beslutet var rätt, se t.ex. Peterson (2017).

Den metod för utvärdering av de gjorda observationerna som används bygger på sannolikheter och ger en uppdaterad sannolikhet för att ett brott har inträffat eller pågår (och eventuellt vilken bromsmekanism som är orsaken) eller om det finns ett hot om nerbrytning av det bärande huvudsystemet. Därför är det logiskt att använda en beslutsmetod som bygger på sannolikheter, till exempel beslutsträd eller Bayesianska nät. Eftersom händelse- och beslutsträd är lätta att överskåda och förstå föreslår vi att sådana används. För en beskrivning av användning av beslutsträd, se t.ex. Olsson & Stille (1980). För att illustrera de skeenden som leder fram till en viss händelse i ett sådant träd kan felträd användas.

22.3 Illustrerande exempel på trädanalys

22.3.1 Händelseträd: Möjliga utfall av inspektionen,

Ett hypotetiskt och starkt förenklat exempel med möjliga resultat av inspektion och sannolikheter visas i Figur 72. I trädet visas, med utgångspunkt från möjliga verkliga förhållanden hur de olika möjliga observationerna av indikatorn kan ge olika kostnadsutfall, från 0 till "Reparation +extrakostnad", där extrakostnaden även kan innehålla skadekostnader för ett utvecklat brott. Kostnaden: "Onödig reparation" är kostnaden för en reparation som inte erfordras, men som görs p.g.a. feltolkningar. Det förutsätts i exemplet att om hot finns så är åtgärd påkallad.

I exemplet finns de faktorer med som behandlats tidigare:

- Grundsannolikhet för att det finns ett hot
- Koppling mellan bergmekanisk kontext och likelihood att indikatorn finns
- Osäkerheten i att identifiera en indikator som finns respektive att falskt identifiera en indikator som inte finns
- Hur effektiv inspektionen är som beslutsunderlag (likelihoodkvot och uppdaterade odds)

I händelseträdet visas den sista gren som en beslutsnod, dvs en förgrening som visar ett fattat beslut. I exemplet baseras det beslutet på hur tillförlitlig indikatorn och inspektionen anses vara och på hur stor man bedömer bassannolikheten (före inspektion). Men givetvis kan ett antal andra faktorer vägas in i beslutet ex. kostnader och planering.

Några kommentarer till trädets delar:

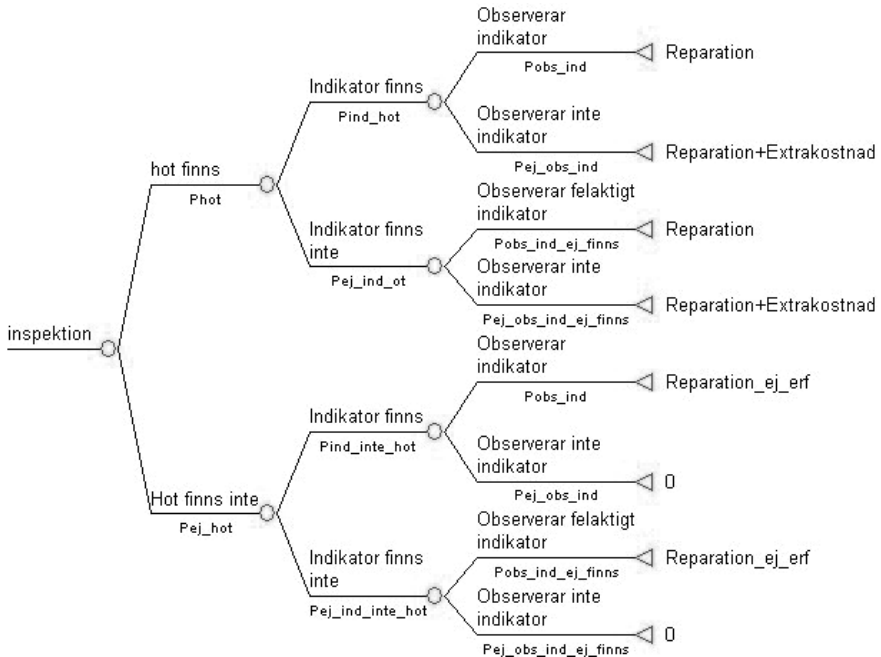
Bassannolikheten för att ett hot om skada skall finnas har behandlats i Avsnitt 2.7 och i Bilaga 2. Den kan vara skattad med olika grad av tillförlitlighet, från en allmän sannolikhet för tunnlar av denna typ till en uppdaterad sannolikhet för just denna tunnel.

Likelihood, är sannolikheten att observera indikatorn när hot finns. I praktiken kan indikatorn vara en sammanslagning av olika observerade indikatorer om man observerat flera, se Avsnitt 4.6.3.

Det finns ju också en likelihood att man observerar en indikator som i verkligheten inte finns, t.ex. om en bildtolkning är otillförlitlig och visar fel.

Osäkerheten i att observera en indikator (observationsosäkerheten) har endast kort berörts i Kapitel 4. Den kommer att belysas ytterligare i Avsnitt 22.3.2.

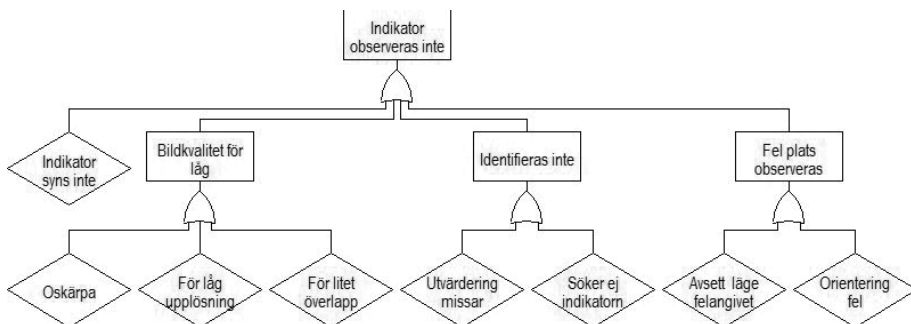
Beslutet efter inspektionen baseras bland annat på den uppdaterade sannolikheten, men också på acceptanskriterier för säkerhet och på ekonomiska kriterier. Detta kommenteras i Avsnitt 22.4.



Figur 72 Exempel på händelseträd för inspektion

22.3.2 Felträd: Källor till bristande observationsnoggrannhet,

Även om en indikator finns gör brister i observationsnoggrannhet att det inte är säkert att den kommer med i den fortsatta analysen. Det finns ett antal tänkbara orsaker till att indikatorn inte observeras fast den finns där. I Figur 73 visas ett enkelt felträd med några av de viktigaste orsakerna till att en indikator inte observeras.



Figur 73 Felträd: orsaker till att indikator inte observeras

- Indikatorn syns inte.

- en orsak kan vara att bergytan blivit nersmutsad av damm eller att fukt och eventuellt att is skymmer indikatorn
- Bildkvaliteten är för låg fotografiskt genom oskärpa genom att man valt en för låg upplösning eller att modellen som byggs av bilderna är osäker på grund av litet överlapp
- Indikatorn identifieras inte.
- Utvärderingen kan missa indikatorn/man tittar inte efter just den indikatorn.
- Fel plats observeras (indikator som bygger på förändringar) angivet läge där observation skall göras är felangivet (brist i dokumentation) man orienterar fel vid fotografering eller vid analys av modellen.

22.4 Acceptanskriterier

Man måste ha i åtanke att beslutet gäller både säkerhet (risk att skada) och tillförlitlighet (bristande förmåga att uppfylla transportfunktionen med åtföljande kostnader). När det gäller säkerheten, som ju är en samhällsangelägenhet, finns det vedertagna kriterier.

22.4.1 Acceptanskriterier i nuvarande system

Trafikverkets riskhantering styrs av interna föreskrifter, t.ex. TDOK 2010:18, TDOK 2014:0308 och TDOK 2016:0088.

Med dagens inspektionssystem ges acceptanskriterierna genom tillståndsklasserna, som också definierar lämpligt beslut.

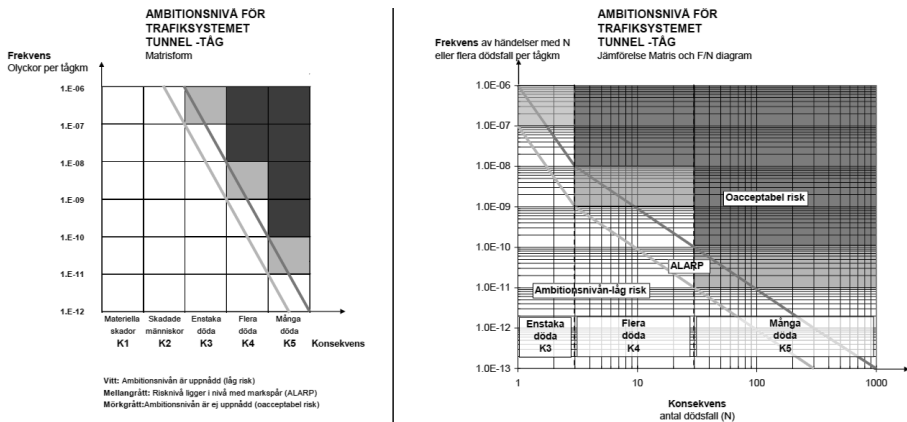
22.4.2 Acceptanskriterier för säkerhet

Det logiska beslutsunderlaget när det gäller säkerhetskravet är maximal tillåten sannolikhet för personskada.

Denna sannolikhet ges i Trafikverkets TDOK 2015:0166 för järnvägstunnlar och i Transportstyrelsens TSG 2016-1621. Kort kan sägas att man för tunnlar anger att:

Risken vid färd i tunnel för väg, järnväg och tunnelbana ska vara likvärdig, uttryckt som risk att förolyckas per personkilometer.

”Järnvägstrafik per kilometer i tunnlar skall vara lika säker som järnvägstrafik per kilometer på markspår, exklusive plankorsningar”. För järnvägstrafik anges ambitionsnivåer i form av matris- och FN-diagram, se Figur 74.



Figur 74 Trafikverkets ambitionsnivå i matrisform respektive i FN-diagram

För bärande huvudsystem i bergtunnlar tillämpas normalt inte Eurokod 7, Dalmalm (2019). För andra konstruktioner än bärande huvudsystem i berg gäller TSFS 2018:57 ”Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av eurokoder”. För bärande huvudsystem i bergtunnlar skall enligt TRVINFRA-00233 ”Tunnelbyggande”, säkerhetsklass 3 tillämpas i trafikutrymmet, utrymningsvägar och i utrymmen där kollaps kan allvarligt påverka trafikutrymmet eller där intilliggande byggnader, fritt vatten mm kan verka allvarligt konsekvensförstörande. Säkerhetsklass 3 ska även tillämpas för installationer innertak mm som ligger ovanför trafikutrymmet. Enligt TSFS 2018:57 ska säkerhetsklass 4 tillämpas för broar, konstbyggnader och andra konstruktioner vid järnväg där villkoren för säkerhetsklass 3 uppfylls men där kollaps får mycket stora ekonomiska, samhälleliga eller miljöpåverkande konsekvenser.

Enligt TRVINFRA 00233 får den årliga brotts sannolikheten inte överstiga 10^{-6} vid säkerhetsklass 3.

För sådana byggnadsverk där Eurokod gäller finns det minimikrav på säkerhetsindex enligt Tabell B.2 i SS-EN 1990: Eurokod – Grundläggande dimensioneringsregler för bärrverk, se Tabell 18.

Tabell 18: SS-EN 1990 - tabell B.2 Rekommenderade minimivärden för säkerhetsindex □□(brottngränstillstånd)

Säkerhetsklass	Minimivärden för □□	
	referensperiod 1 år	referensperiod 50 år
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Det finns ett matematiskt samband mellan säkerhetsindex och brottsannolikheten, se Tabell 19, men det är inte klart att den brottsannolikheten är en korrekt uppskattning av en verklig brottsannolikhet utan är en nominell sannolikhet.

Tabell 19 Samband mellan \square och P_f

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
\square	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Ett liknande resonemang finns i Trafikverket (2015)

För tekniska system där funktionsfel sannolikt kan få direkta katastrofala konsekvenser behöver, enligt TDOK 2015-0478, den därtill knutna risken inte minskas ytterligare om graden av förekomst för felet högst är 10^{-9} per driftstimme.

Om man anser att tunneln alltid är i drift får man en acceptabel sannolikhet när det gäller fel som kan leda till katastrofala konsekvenser av ca 10^{-5} , alltså i nivå med säkerhetsklass 1 i Eurokod.

22.4.3 Acceptanskriterier för tillgänglighet och tillförlitlighet

Några uttalade kriterier för tillgänglighet tycks inte finnas, men när det gäller beslut som främst gäller tillförlitligheten kan man använda metoder som baseras på kostnader. Man måste dock vara uppmärksam på att det finns flera kostnadskategorier och att man bör ta med följdverkningar. Dessutom finns det ju när det gäller järnväg ofta flera operatörer som vill använda tunneln.

Tunneln är ju en länk i ett system, där ett avbrott påverkar hela den del av systemet där tunneln finns, men den kan också påverka delar av, med följdverkningar. Det är alltså inte möjligt att sätta ett generellt besluts Kriterium som gäller alla tunnlar utan man måste beräkna konsekvenserna av begränsad tillgänglighet av tunneln för varje enskilt fall.

Ett sådant kriterium blir sammansatt av ett antal olika delar:

- Samhällskostnader
- Bortfall av intäkter
- Förlängda restider
- Fördyrad kostnad för åtgärder om de måste göras oplanerat inkludera ökade finansiella kostnader?

Det går möjligen att använda sannolikheten för skada som ett överslagsmässigt acceptanskriterium för någon form av "friklassning" av tunneln eller tunneldelar. Kriteriet skulle då vara att likelihoodkvoten inte får överstiga ett visst värde, dvs att ökningen av brottsannolikhet är acceptabel. En mer detaljerad analys av konsekvenskostnaderna görs alltså inte.

Samhällskostnader

Hur man kan beakta samhällskostnader för trafikolyckor beskrivs i ASEK, (Trafikverket 2018) Där sägs: ” Olycksvärderingen består av riskvärdering samt en värdering av materiella kostnader. Riskvärderingen består av ett humanvärde som speglar samhällets nyttoförlust vid förlust av ett människoliv eller uppoffringen på grund av fysiskt och psykiskt lidande för skadade i en trafikolycka.” Man ger kalkylvärden som kan användas.

Man skall härvid tänka på att det gäller en risk, alltså något som består av sannolikhet och konsekvens (antal döda och skadade).

Råden i ASEK gäller främst transporter på markytan, inte i tunnlar. Man är därför hänvisad till att själv göra ett överslag över möjliga konsekvenser och deras sannolikhet, där sannolikheten skall vara den som gäller om man observerat en indikator, dvs. en betingad sannolikhet.

En sådan beräkning gjordes i samband med renoveringen av tunnlar i Graversfors (SGI 2009).

Bortfall av intäkter

Detta är helt beroende av vilken tunnel det gäller och analyseras för varje objekt.

Förlängda restider

Uppgifter kan hämtas ur ASEK.

Fördyrad kostnad för åtgärder

Om det endast finns möjlighet att arbeta vissa tider så ökar kostnaderna avsevärt. Möjligheten till åtkomst av trafikutrymmet beror naturligtvis också på vilken tunnel det gäller.

23. Beslutsanalys för en tunnel

Beslutsanalysen skall ge stöd för ett beslut som fattas av ansvarig instans, den är inte beslutet! Det finns ett stort antal parametrar som ingår i det tunnelspecifika beslutet och att skapa ett färdigt dataprogram eller motsvarande som direkt kan hantera analysen är mycket omfattande och ryms inte inom denna studie. Därför ges här nedan endast allmänna kommentarer och råd.

23.1 Del av tunneln som berörs

Ofta är nog fallet att fjärrinspektionen visar att det bara är en del av tunneln som inte är acceptabel utan någon form av åtgärd medan övriga delar kan accepteras.

I båda fallen är det tämligen uppenbart hur frågan skall hanteras:

Om det gäller säkerhet så får acceptabel sannolikhet inte överskridas.

Om det gäller tillgänglighet kan en ”vanlig” beslutsanalys användas på samma sätt som om hela tunneln är oacceptabel, men man måste givetvis ta med hela den påverkade sträckan i konsekvensbedömningen.

23.2 Möjliga beslut

Beslutet som kan tas ger olika grad av inskränkning i användningen av tunneln. De listas nedan i stigande grad av inskränkning.

- Fortsatt användning utan inskränkningar:
 - till nästa ordinarie inspektionstillfälle
 - till tidigarelagt inspektionstillfälle
 - till planerad åtgärd
- Fortsatt användning, men utökad undersökning inom viss tid:
 - Kontroll av vissa partier genom manuell granskning av bilder
 - Kontroll av vissa partier genom inspektion på plats
- Inskränkning av användningen, (t.ex. genom hastighetsnedsättning)
 - I avvaktan på undersökningsresultat
 - I avvaktan på planerad åtgärd
 - I avvaktan på åtgärd som ej ligger i planeringen
- Användning avbryts omgående (säkerhetsskäl)

23.3 Beslutsunderlag

23.3.1 Tunnelns läge och längd

Tunnelns läge har betydelse i så måtto att en inskränkning i tillgängligheten kan få stora inverknings på annan trafik (tunneln saknar robusthet). Detta gäller kanske oftast järnvägstunnlar men också vägtunnlar kan vara icke-robusta.

Tunnelns längd har betydelse när det gäller att beräkna tid som krävs för insatser, om man väljer att åtgärda hela tunneln även om det kanske är vanligare med riktade insatser mot de delar som efter inspektionen bedöms vara i behov av åtgärd, t.ex. en utökad inspektion.

23.3.2 Trafikflöde

Trafikflödet, person- och godstrafik, inverkar på konsekvensen av ett avbrott. Variation med tiden kan vara viktig.

23.3.3 Berget och förstärkningar

Data om berget från geologisk kunskap och från inspektioner tillsammans med data från byggandet (relationshandlingar) är givetvis av en mycket stor vikt när det gäller att bedöma bassannolikheten för skador och att bedöma vilka brottmekanismer som är troligast. Detta har i sin tur betydelse för vilka indikatorer som primärt är intressanta vid inspektionen.

Bergmassans egenskaper, tunnelns geometri och utformningen hos förstärkningarna är grunder för bedömning av konsekvenser av ett brott t.ex. involverad volym och tidsförlopp.

23.3.4 Livslängd, förutsättningar för nedbrytning.

Generellt ökar bassannolikheten för brott med åldern på tunnelns bärande huvudsystem.

Bassannolikheten för brott påverkas av såväl ingående material som miljöfaktorer och ålder och eventuella livslängdsförlängande åtgärder. Potentialen för nedbrytning kan variera såväl lokalt inom tunneln som mellan olika tunnlar.

Förekommer det inte vatten är potentialen för nedbrytning låg. Bassannolikheten bör då reduceras vilket innebär att det inte är troligt att indikatorn pekar på en kopplad nedbrytningsmekanism. Man kan även ha okända förhållanden eller tillgång på mycket vatten vilket ökar bassannolikheten. Vatten och en ogynnsam vattenkemi kan öka sannolikheten ytterligare.

23.3.5 Innertaket

Innertakets förmåga att motstå skador, t.ex. nerfall och vatten har betydelse främst för att minska konsekvenserna av en skada.

23.3.6 Tidigare inspektionsdata

Ett effektivt system för lagring och hantering av både inspektionsdata och relationshandlingar för tunnlar är av största vikt. Tidigare inspektionsdata skall ju användas för bedömning av om förändringar inträffat och i så fall hur fort de sker.

Förändringen i sig är ju en indikator om hot och förändringshastigheten ingår i beslutsunderlaget vid bedömningen av när åtgärd måste sättas in.

23.4 Resultat från fjärrinspektionen

Resultatet från fjärrinspektionen blir primärt en uppdaterad sannolikhet för att någon typ av hot föreligger. Men det ingår också en redovisning av vilka indikatorer som observerats och var samt av de beräkningar som gjorts.

23.5 Beslutsanalys säkerhet

Analysen när det gäller säkerhet skall baseras på sannolikheten för skada på person. Vid bedömningen av sannolikheten skall innertakets skyddande förmåga tas med i beräkningen.

Beslutet skall styras av de acceptanskriterier som finns och som ger accepterad sannolikhet.

23.6 Beslutsanalys tillgänglighet

Denna beaktar risken för ekonomisk skada (inklusive goodwill) och skall inkludera både sannolikheten och kostnaderna. Något fixt acceptanskriterium finns inte utan man får använda sig av förväntad kostnad ur ett beslutsträd, eller ännu bättre av den beräknade risken

23.7 Rekommendationer för utförande av beslutsanalys

Beslutsanalysen bör primärt vara riskbaserad så att den tar med både sannolikheter och konsekvenser. Den skall ha två delar, en del som beaktar sannolikheten för personskada och en som beaktar tunnelns (trafikutrymmets) tillgänglighet.

Vi rekommenderar att man använder metodik baserad på ett Bayesianskt synsätt för beräkning av sannolikheter.

För att öka överskådligheten och även förståelsen vid presentationer rekommenderas att man använder grafiska metoder, främst trädmetoder. Besluts- och händelsetråd används för att visa händelsekedjor utgående från en händelse. Felträd används för att illustrera kedjor som leder fram till en händelse.

För en beskrivning av användning av beslutsträd, se t.ex. Olsson & Stille (1980).

24. Sammanfattande kommentarer och rekommendationer

24.1 Val av inspektionsmetodik

Vår analys avser primärt att ge underlag för bedömning av bärande huvudsystem i tunnlar där handnära inspektion inte kan genomföras. Underlaget måste därför baseras på metodiker för ”remote sensing”, fjärrinspektion.

Ett inspektionssystem måste baseras på en systematisk metodik för effektiv identifiering av skador eller tecken på skador. En svårighet är välja ett system för värdering av skadorna eller observationerna som uppfyller rimliga krav på transparens. Såväl teoretisk bakgrund som bakomliggande parametrar för värdering måste vara så tydliga att systemet kan uppdateras.

Ett system bör också vara så väl (och objektivt) uppbyggt att det minimerar risken för inspektörsberoende bias.

Vi har valt att använda fotogrammetriska metoder för att registrera tecken på skador. Dessa tecken benämner vi indikatorer. Vi har strävat efter att indikatorerna skall representera mätbara egenskaper som det är möjligt att i största möjliga utsträckning kunna tolkas med olika typer av bildbehandling. Detta har inneburit ett större antal möjliga indikatorer.

I rapporten har vi dels utvärderat olika indikatorer dels gjort fältförsök bl.a. bakom ett temporärt innertak där vi testat fotogrammetriska metoder. Vi har också testat metodikens användbarhet för att detektera ändringar i nedfall.

Vi har även gjort ansatser till att bedöma osäkerheter vid konventionell inspektion.

24.2 Val av indikatorer

24.2.1 Metodik för val av indikatorer.

Vi har valt att använda likelihoodkvot som mått på indikatorernas särskiljande förmåga. Detta är en tydlig och väl etablerad metodik för värdering av observationer. För att kunna ta fram en första bruttolista med indikatorer har såväl bergmekaniska mekanismer som mekanismer för nedbrytning analyserats.

Det slutliga urvalet av indikatorer och deras vikter har baserats på expertutlåtanden. I samband med att likelihoodkvoten ansatts har antalet indikatorer gällrats.

Det krävs dock ytterligare analys som måste baseras på ett större antal experter eftersom resultatet blev alltför ”spretigt” och antalet utlåtanden så litet att osäkerheterna blev stora.

En första skattning av likelihoodkvoter redovisas i Kapitel 9.6. Den baseras på en subjektiv värdering av resultaten från expertutlåtandena.

Vi har valt att dela upp indikatorerna i dels sådana som baseras på förhållandena vid inspektionstillfället och sådana som visar på förändring sedan tidigare inspektion.

Vi har indelat indikatorerna i huvudgrupperna ”brott” och ”nedbrytning”. Vi har definierat brott i detta sammanhang så att det är en skada på bärande huvudsystem som uppstår på grund av en rörelse i eller deformation av bergmassan.

Det kan antingen vara en tydligt pågående process eller det kan vara fallet att det inte går att avgöra om det är en avstannad eller fortskridande process. I det senare fallet har vi använt termen ”inträffat brott”.

Nedbrytning avser en tidsmässig förändring av materialegenskaperna så att bärförmågan försämras.

24.2.2 Indikatorer brott

Vi har utvärderat indikatorer för inträffat och pågående brott samt även för olika brottyper. Utvärderingen gäller enbart för ytliga tunnlar i hårt berg och vid låga bergspänningar.

Vi har även gjort en ansats att bedöma likelihood för ett antal vanligt förekommande brottyper som t.ex. kilbrott eller bärighetsbrott på grund av löskärnebildning. Det var tänkt att koppla denna analys till en bedömning av hur trolig de olika brottyperna är vid olika bergförhållanden, kontext. Det visade sig att det var alltför svårt att göra en expertbedömning av likelihood för de olika indikatorerna kopplade till definierade brottyper. Det är också tveksamt om indikatorerna kommer att vara tillräckligt urskiljande för en enskild brottyp.

Flera av indikatorerna är skalärer, t.ex. sprickvidd, spricklängd och andra egenskaper. Vi har i vår utvärdering valt ut enskilda värden som indikatorer i syfte att kunna avgränsa området för indikatorernas urskiljande förmåga och ge en storleksordning på likelihoodkvoten.

Baserat på resultaten av expertutlåtandena bedömer vi att indikatorerna som vid fortlöpande inspektion baseras på observerade förändringar är de starkaste. Indikatorer som inte baseras på förändringar behöver ge större utslag som t.ex. större sprickvidd eller annan mätbar egenskap än vid en förändring.

Ett tänkbart framtida steg är att som stöd för expertutlåtanden göra analyser med hjälp av olika typer av modeller.

24.2.3 Indikatorer nedbrytning

Vi har valt att analysera indikatorer för olika typer av nedbrytningsmekanismer. Nedbrytningsmekanismer innebär reduktion av bärförmågan och därmed ökat hot om ras eller nedfall av berg och förstärkning. Det finns ofta en stark koppling mellan kontext och

nedbrytningsmekanismer. Miljöparametrar som temperatur, tillgång på vatten och geokemi i kombination med ingående material ger en sådan kontext.

Flera av indikatorerna är gemensamma för såväl brott som för olika nedbrytningsmekanismer.

24.2.4 Indikator pekar på olika hot i samma tunnelsektion

Nedbrytning och brott kan förkomma samtidigt. Någon observerad indikator kan visa på både brott och nedbrytning, fast med olika vikter. Man får då göra en utvärdering för brott och en annan för nedbrytning med rätt sannolikhet för de olika fallen. Dessa värden går in i beslutsanalysen.

24.2.5 Flera observerade indikatorer

När flera olika indikatorer observeras i samma tunnelsektion är deras sammanlagda vikt beroende av deras inbördes korrelation, statistisk ”koppling”. Ett exempel kan vara spricka i sprutbetong och skadad bergbult där respektive indikator kan uppträda enskilt och därför har låg korrelationen.

Om två indikatorer är korrelerade, så att man oftast ser dem tillsammans, så tillför det fall att man ser bägge inte mycket information, eftersom man ju förväntar sig att se paret.

Om korrelationen är liten så innebär en observation av paret ett informationstillskott och bägge indikatorerna skall tas med i bedömningen. Om indikatorerna oftast uppträder tillsammans är korrelationen stor och informationstillskottet blir litet.

Ett stringent sätt att hantera korrelerade variabler är tämligen svårt, men ett sätt att hantera problemet kan vara att arbeta med sammansatta indikatorer som består av flera olika typer av observationer, t.ex. ”spricka tillsammans med skadad bergbult”. Denna behandlas sedan som en ”vanlig” indikator.

Vi rekommenderar tills vidare att man bortser från korrelation åtminstone mellan huvudgrupperna av indikatorer. Detta bedöms vara konservativt.

Vi har antagit att det görs en löpande utvärdering av indikatorerna inom ett område upp till en tunnelbredd i längdutsträckning. Denna bedömning tillsammans med en närmare analys av möjliga korrelationer kan rimligen göras när det finns en databas.

24.3 Sannolikhet för att en skada uppstår

24.3.1 Definition av skada och brott

Inom Trafikverket finns den systematiska dokumentationen av skador på grund av brott eller nedbrytning redovisad i BaTMan. Dokumentationen baseras på mätmetoderna i BaTMan.

Vid analys av bassannolikhet betraktar vi skada enligt BaTMan, TK3 (bristande funktionalitet vid inspektionstillfället) som ”brott” som är orsakat av nedbrytning eller rörelser i bergmassan. Skada innebär i detta fall ett hot mot tunnelns funktion. Skada behöver däremot inte nödvändigtvis innebära att bärförmågan för bärande huvudsystem överskridits utan kan t.ex. betyda att osäkerheten om systemets tillstånd kräver beslut som t.ex. fortsatt undersökning.

Det innebär att analysen baseras på antagande att bärförmågan i det bärande huvudsystemet underskrider ett tänkt börvärde vilket innebär att tunneln inte uppfyller tekniska krav.

24.3.2 Bassannolikhet

Bassannolikheten definieras som sannolikheten för skada hos tunnlar av en viss utformning. Den behövs för att skatta sannolikheten för skada hos en inspekterad tunnel givet förekommande indikatorer.

Vi har beräknat bassannolikheten för skador baserat på statistik i BatMan. Vi har dels analyserat sannolikheten för skada som innebär någon form av brott och fall där skadan innebär nedbrytning med nedsättning av bärande huvudsystems funktion som konsekvens.

Den statistik som analyserats visar på ett tydligt samband mellan tunnelns ålder och sannolikheten för skador på grund av såväl nedbrytning som brott.

Underlaget medger inte att bassannolikheten anges på individnivå. Bassannolikheten kan dock anges för olika grupper av tunnlar baserat på ålder, förstärkningssystem mm. Då kan man noggrannare skatta sannolikheten för skada för den aktuella tunneln.

För att nedbrytning ska kunna ske krävs att kombinationen av materialval och miljöfaktorer är ogynnsam. Nedbrytningstakten påverkas av såväl miljöfaktorer som materialegenskaper. Detta innebär att negativa miljöfaktorer och ogynnsamma material ökar bassannolikheten medan avsaknad av negativa miljöfaktorer och goda materialval reducerar potentialen för nedbrytning. En skattad potential för nedbrytning kan användas för att uppdatera en generell bassannolikhet kopplat till en specifik nedbrytningsprocess.

En fortlöpande analys av statistiken kombinerat med fördjupade skadeutredningar rekommenderas. Den kan ytterligare förbättra underlaget för bedömning av såväl sannolikhet för skada relativt såväl ålder som ingående material och miljöfaktorer. Fortsatt arbete bör inriktas på potential för nedbrytning och utvärdering av sannolikhet för en skada vid en given nedbrytningsmekanism.

Inom ramen för denna rapport redovisas beräkningar av den uppdaterade sannolikheten baserat på skattade likelihoodkvoter och en bassannolikhet om 0.5 respektive 2.5% för de olika indikatorerna i Bilaga 8.

24.3.3 Osäkerheter

Vi har valt att inte särskilja mellan hur indikatorerna viktas för olika förstärkningssystem. Responsen på en rörelse i t.ex. en bultupphängd, armerad sprutbetong som saknar vidhäftning skiljer sig från responsen i en oarmerad, vidhäftande sprutbetong. Detta skulle innebära en avsevärd ökning av komplexiteten i systemet och introducera nya osäkerheter kopplade till förstärkningssystemets egenskaper och de ingående materialparametrarna.

Vid de analyser som gjorts har sannolikheten för brott analyserats givet att en indikator observerats. Det kan krävas en djupare analys av sannolikheten för brott givet att det inte finns någon observerbar indikator eller att den finns men inte observeras (se Figur 73). Med hänsyn till osäkerheter om man inte observerar en indikator har vi valt att inte tillgodoräkna oss så kallad negativ likelihood.

Storleken av en deformation eller rörelse i bergmassan relativt såväl bergets som bergförstärkningens brottegenskaper styr när, var och om en indikator kan observeras. Vi har kommit fram till att det är ett mycket omfattande arbete att analysera detta och att vi kommer att ha en kvarstående osäkerhet i att avgöra vilka rörelser eller deformationer som är kritiska för varje specifikt fall. Vi bedömer att denna osäkerhet måste hanteras i det enskilda fallet.

Beslutsmodellen baseras på de sannolikheter som beräknas fram med observerade indikatorer, och ett beslut kan innebära en djupare analys baserad på lokala förhållanden. Som stöd för denna analys kan såväl konceptuella som analytiska och numeriska modeller användas.

Det saknas i de flesta fall information utöver den som är given i relationshandlingar och historiska data. Det är svårt eller omöjligt att avgöra hur det bärande huvudsystemet är dimensionerat och hur dess bärförmåga är för en given situation. Bassannolikheten för den enskilda tunneln eller tunneldelen är svår att skatta givet dessa osäkerheter. Bassannolikheten för en större population går däremot att skatta med rimlig säkerhet liksom även en subjektivt uppskattad bassannolikhet baserat på den enskilda tunnelns skadehistorik.

24.4 Metod för fjärrinspektion

Vi ser framför oss att lämpligaste metod för fjärrinspektion är fotogrammetri. En stor vinst med metodiken är att det är möjligt att detektera förändringar som t.ex. sprickpropagering, förändring i sprickvidd, rörelser samt nedfall.

Vi rekommenderar en metod som innebär att fotografering nära vinkelrät mot bergytan med överlappande fotografier. De modeller som vi testat har utgått från inmätta koordinater på centrum av utstickande bergbultar.

De inklädda tunnlarna har en så stor sammanlagd area att det erfordras olika typer av automatisk bildtolkning. Utvecklingen går mycket snabbt. Det gäller såväl hårdvara som algoritmer bl.a. med hänsyn till exempelvis kartering, autonoma apparatbärare mm.

De fotogrammetriska modeller som vi provat har en bildupplösning som är tillräcklig för bildanalys direkt i modellen. Med ett fotograferingsavstånd om ca 1 m kan vi i 3D modellen tydligt urskilja hårfina sprickor och exempelvis stålfibrer med diameter 0.5 mm. När de fotogrammetriska modellerna upprättades i detta projekt var metodiken för att jämföra förändringar mellan tunga 3D modeller som våra inte tillräckligt långt framme för att, utan programutveckling, medge en skattning av modellens vertikala upplösning, i form av differentialmodeller.

Det går inte att utesluta att det i framtiden kan behövas manuell tolkning av modeller över partier där inspektionsresultatet inte är entydigt och där det erfordras fortsatt utredning.

24.5 Utformning av tunneln och dess innertak

För att möjliggöra inspektion krävs att tunneln utformas så att berget bakom innertaket är åtkomligt för inspektionen.

Praktiska mått på avståndet mellan innertak och berget ges av dels prestanda på bärare och optik men även av hur stor bilyta som täcks vid fotogrammetriska metoder.

Ett litet avstånd innebär liten bilyta med många fotografier som följd. En annan konsekvens är att kraven på precision i körningen ökar för att säkerställa tillräckligt överlapp mellan fotografierna. Ett minsta teoretiskt avstånd bedöms vara 0.5 m.

Avståndet mellan accesspunkter (inspektionsluckor) måste anpassas efter typ av apparatbärare och dess styr- och navigationssystem. Speciell utformning kan krävas för att möjliggöra inspektion av anfang och väggar.

Objekt som skulle kunna användas för koordinatbestämning eller navigation som t.ex. signaler måste projekteras i samband med detaljutformning av systemet.

24.6 Beslutsfattande

Vid beslutsfattande måste hänsyn tas till metodens osäkerheter. Det finns osäkerheter i alla typer av inspektionssystem och det vanligaste beslutet som följer av en skada är att utreda skadan bättre i syfte att avgöra om åtgärd måste vidtagas och i sådana fall inom vilka tidsramar. I vissa fall kan beslutet vara åtgärd inom begränsad tid och i enstaka fall även trafikavstängning.

I beslutsfattandet finns följande huvudalternativ.

- Friklassning (kan möjligen göras med automatisk bildtolkning).
- Total avstängning på grund av allvarliga hot.

- Åtgärder som innebär:
 - Skadeutredning- manuell bildtolkning- kompletterande undersökningar.
 - Planering och utförande av underhållsåtgärder.
 - Begränsningar i tunnelns användande.

Denna beslutssituation gäller även vid fjärrinspektion.

Konsekvenserna av ett brott som t.ex. ges av den involverade volymen i förhållande till exempelvis innertaketets tålighet måste analyseras beroende på lokala förhållanden.

Det är viktigt att det går att friklassa de delar av tunnlnarna där det är försumbar risk för brott och att det går att fokusera resurserna på ett begränsat antal fall.

24.7 Utvecklingsbehov och möjligheter

Tunneln där vi utförde fältförsöken skulle fyllas med bergmassor vilket medförde att försöksplatsen disponerades under en kortare tid. Vid denna tidpunkt var fjärrinspektionstekniken inte så utvecklad att det var möjligt att göra en fullständig utvärdering. Underlaget är dock tillräckligt för att det ska gå att ge följande rekommendationer och dra nedanstående slutsatser.

Vi har i detta projekt visat på en väl underbyggd och tillämpbar metodik för fjärrinspektion och värdering av observationer. Vi har demonstrerat hur ett system kan byggas upp. Den använda metodiken med indikatorer bedöms ha tillräcklig potential för att basera ett inspektionssystem på. Den använda metodiken bedöms ha en god potential för att även kunna användas vid automatisk bildtolkning och i AI-system.

Vi bedömer att det redovisade systemet baserat på indikatorer är så transparent och att använd metodik, algoritmer och data som systemet baserats på är så tydligt beskrivet och spårbart att det går att modifiera systemet i takt med ökad kunskap.

Vi rekommenderar att de subjektivt skattade vikterna (likelihoodkvoterna) används i ett mindre pilotprojekt där de prövas på en tunnel. För att ta fram de slutliga vikterna krävs det ett bättre underlag med fler genomarbetade expertbedömningar. I detta arbete bör också ingå att pröva möjligheten att skatta likelihoodkvoten för sammansatta indikatorer för att på så sätt hantera korrelation mellan de individuella indikatorerna.

Expertbedömningar kan kompletteras med olika modellansatser. Dels modeller för nedbrytning i syfte att tydliggöra sambanden mellan ingående material och miljöfaktorer för att skapa en god grund för bedömning av potentialen för nedbrytning. Såväl analytiska som numeriska modeller kan användas som komplement för att skatta storleksordningarna av de rörelser och deformationer som kan vara kritiska samt om de kan ge upphov till användbara indikatorer.

Olika system för automatisk bildtolkning måste anpassas så att de kan användas på fotogrammetriska modeller på berg. De måste även anpassas så att de registrerar de olika

indikatorerna. Ett utvecklingsbehov är att bättre kunna mäta rörelser och deformationer även vinkelrätt bergytan t.ex. genom anpassning av metoder baserade på ”digital image correlation”. De fotogrammetriska modellerna blir datatekniskt tunga men pågående utveckling bedöms medföra stora förbättringar.

Det krävs standardisering av utdata från modeller som innebär att olika system kan samverka och säkra att systemen är ”framåtkompatibla”. Detta gäller såväl 3D-modellformat som hur skadorna ska representeras i 3D och i olika planeringsverktyg som t.ex. BaTMan.

VR är en användbar metodik för att manuellt kunna utvärdera ett tunnelavsnitt. AR (augmented reality) är en möjlighet att använda indikatorer vid sådan inspektion där innertak saknas.

25. REFERENSER

- Andrén, A., (2009). Degradation of rock and shotcrete due to ice pressure and frost shattering, Licentiate thesis, Luleå Tekniska Universitet
- Ang, A. H-S., Tang, W. H., (1984). Probability concepts in engineering planning and design. Vol II Decision, Risk, and Reliability. John Wiley & Sons, New York.
- Ansell A., (2009),” 3D-modellering av samverkan mellan berg och sprutbetong. BeFo rapport K33
- Ansell, A., (2010). Investigation of shrinkage cracking in shotcrete on tunnel drains. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (2010) 607–613
- Baecher, G., (1980). Progressively censored sampling of rock joint traces. *Mathematical Geology* 12(1):33-40
- Baecher, G., (2017). Bayesian Thinking in Geotechnics. *Geo-Risk 2017*
- Baecher, G., (2019) Putting Numbers on Geotechnical Judgment. *Companion whitepaper to the 27th Buchanan Lecture*,
- Baecher, G. B., Christian, J. T. (2013). “Screening Geotechnical Risks.” *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty*, American Society of Civil Engineers,
- Balletti, C., Guerra, F., Tsioukas, V., Vernier, P., (2014). Calibration of Action Cameras for Photogrammetric Purposes. *Sensors* 2014, 14, 17471-17490.
- Bazargan, A., (2012). Design, development, and human analogous control of a climbing robot. MSc Thesis, University of Regina, Saskatchewan, Kanada
- Bhat, Ch., (2014). The Composite Marginal Likelihood (CML) Inference Approach with Applications to Discrete and Mixed Dependent Variable Models. *Data-Supported Transportation Operations & Planning Center (D-STOP)*. *Technical report 101* September 2014
- Björklund L-E., (2008), Från Novis till Expert: Förtrogenhetskunskap i kognitiv och didaktisk belysning. Avhandling Linköpings universitet
- Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E.J., Pothin, V., Vella, C., Dussouillez P., Gardel, A., Michaud, E., (2016), Structure-from-Motion photogrammetry for high-resolution coastal and fluvial geomorphic surveys. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*. *Proceedings of the 16th Young Geomorphologists Days, Nantes*.
- Chaiyasarn, K., Kimb, T-K., Violac, F., Cipollad, R., Sogae, K., (2015). Towards distortion-free image mosaicing for tunnel inspection based on robust2 cylindrical

surface estimation via structure from motion. *Journal of Computing in Civil Engineering* 30(3)

Chaiyasarn, K., (2011). Damage Detection and Monitoring for Tunnel Inspection based on Computer Vision. Thesis. Christ's College, University of Cambridge

Chatterjee, S., (1981). On combining expert opinion. *Technical report No. 49*. Dep't of Statistics, Stanford university

Ericsson L-O., Mossmark F., Norin M., Sederholm B., Trägårdh J., (2019), Konstruktionsförutsättningar för berganläggningar med fokus på den vattenkemiska miljön, korrosion och betongdegradering, BeFo-rapport 187

Evelt, I. W., Jackson, G., Lambert, J. A., McCrossan, S. (2000). "The impact of the principles of evidence interpretation and the structure and content of statements." *Science and Justice*, 40(1), 233–239.

Fagerlund, G., (2008). Chloride transportation and reinforcement corrosion in concrete exposed to seawater pressure, Lund.

Federal Highway Authority, (2001). Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges. Vol 1 och Vol 2. FHWA-RD-01-020.
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/nde/01021.cfm>

Feng, Q., (2001). Novel methods for 3-D semi-automatic mapping of fracture geometry at exposed rock faces. Thesis. Dep't of Civil and Environmental Engineering. Royal Inst. Of Technology, Stockholm

Fraser, C.S. , Cronk, S., Stamatopoulos C., (2012). Implementation of zoom-dependent camera calibration in close-range photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012*, Melbourne, Australia

Golowczynski, M., (2016). Digital camera sensors explained. *What digital camera June 2016*. <https://www.whatdigitalcamera.com/technical-guides/technology-guides/sensors-explained-11457>

Gonçalves, J.A., Pinhal, A., 2018. Mobile Mapping System Based On Action Cameras. *ISPRS TC I Mid-term Symposium "Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications"*, 10–12 October 2018, Karlsruhe, Germany

Govindasamy, A., Marr, W.A., Brouillet, R.P., Christian, J.T. (2017). Bayesian Probabilistic Asset Management Protocol for Infrastructure Systems: Example Application to a Flood Protection System. *Geo-Risk* 2017

Guo, J., Justham, L., Jackson, M., (2015). A concept selection method for designing climbing robots. *Key Engineering Materials*, 649, pp. 22-29.

Hamblin, K., Christiansen, E.H., (2008). *Earth's Dynamic Systems* 10th edition, Utah

- Hagelia, P., (2011). Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels, Doctoral thesis, Technische§ Universiteit Delft
- Hiasa, Sh., (2016), Investigation of infrared thermography for subsurface damage detection of concrete structures. Thesis U. of Central Florida
- Hill, P., Bowles, D., Jordan, P., Nathan, R. (2003). Estimating the Overall Risk of Dam Failure: Practical Considerations in Combining Failure Probabilities, *ANCOLD 2003 Risk Workshop*.
- Holmgren J., (1979), Shotcrete - Punch-loaded shotcrete linings on hard rock, BeFo rapport 7:2
- Holmgren J., (1987), Bolt-anchored steel-fibre-reinforced shotcrete linings, Tunneling and underground space technology, Volume 2, Number 3
- Holmgren, J., Sundquist, H., (2008). Faller blocket genom sprutbetongbågen? *Teknisk Rapport 2008:13, KTH Bygghälsa Betongbyggnad*
- Hudson J.A., Harrison, J.P., (2000). Engineering rock mechanics. An introduction to the principles. Pergamon, London, ISBN: 0080419127
- Hustrulid, W.A., McCarter, M., Van Zyk, D.J.A., (2000): Slope stability in surface mining, Colorado, USA
- Jandrisevits, C. (2012). Contact-free measurement of rock–mass structures. Method comparison. Thesis. Graz University of Technology, Inst. of Applied Geosciences.
- Johannisson, B., Gunnarsson, E., Stjernberg, T., (red). (2008). Gemensamt kunskapande - den interaktiva forskningens praktik. *Acta Wexionensia* Nr 149/2008
- Kahneman, D., (2012). Thinking, Fast and Slow. Penguin Books, UK.
- Kent, P., Hancock MJ. (2016). Interpretation of dichotomous outcomes – sensitivity, specificity, likelihood ratios, and pre-test and post-test probability. *J Physiother. (2016)*,
- Lagerblad B., (2010), ”Livslängdsbedömning av sprutbetong i tunnlar” Cement och betong Institutet och KTH
- Lea, F.C., Middleton, C.R. (2002). Reliability of visual inspection of highway Bridges. CUED/D-STRUCT/TR. 201.
- Lee, Ch-H., Chiu, Y-C., Wang, T-T., Huang, T-H., (2013). Application and validation of simple image-mosaic technology for interpreting cracks on tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology* 34 (2013) 61–72
- Leung, K., Verga, S., (2007). Expert Judgement in Risk Assessment *DRDC CORA TM 2007-57*, Defence R&D Canada

- Luhmann, Th., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J., (2014). Close-range photogrammetry and 3D imaging. 2nd edition. De Gruyter, Berlin.
- Malesa, M., & Kujawska, M., (2012). Modified two-dimensional image correlation method with capability of merging data distributed in time. *Applied Optics, Vol 51, No 36*
- Malesa, M., & Kujawska, M., (2013). Deformation measurements by digital image correlation with automatic merging of data distributed in time. *Applied Optics, Vol. 52, No. 19*
- Manouchehr H., (2010), "Tillståndsbedömning av erosionsskador vid vattenlinjen i Porsi kraftverk" Elforsk rapport 10:75
- Margo, D., Harkness, A., Needham, J. (2009). Levee screening tool. *United States Society on Dams Conference, Nashville, TN.*
- McCormick, N., (2019). Personlig kommunikation.
- McCormick, N., ord, J., (2011). Image based techniques for monitoring large civil structures: Hastings Pier. National Physics Laboratory. Nedladdad från: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/image_mccormick.pdf
- McCormick, N., Jonas, D., Lane, B., (2014). Digital imaging for condition asset management (DIFCAM). *RRUKA Annual Conference, 21 November 2013*
- McCormick, N., Kimkeran, S., Najimi, A., Atkins, D., (2014). Assessing the condition of railway assets using DIFCAM: Results from tunnel examinations. *6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014)*
- McRobbie, S., G., (2015). Development of an image based system for routine visual inspection of UK highways bridges. Thesis. School of Civil Engineering. University of Birmingham
- Micheletti, N., Chandler, J., Lane, S., (2015). *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry*. Geomorphological Techniques, Chap. 2, Sec. 2.2. British Society for Geomorphology
- Morton, E., Villaecusa, E., Thompson, A.G., (2009), Determination of energy absorption capabilities of large scale shotcrete panels., Shotcrete for underground support
- Nallusamy, S., Manikanda Prabu, N., Jayaprakask, J., Rajan, K. (2016). Analysis of design features for inspection robot make use of concrete structures-an assessment. *International Journal of Engineering Research in Africa Vol. 17*
- Nilsson U., (2003), Bärverkan hos bergförankrad fiberarmerad sprutbetong, SvBeFo rapport R64

- Nishiyama, S., Minakata, N., Kikuchi, T. & Yano, T., (2015). Improved digital photogrammetry technique for crack monitoring. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), pp. 851-858.
- Olsson, L., Berggren, B., (2010). System för utvärdering av indikatorer och observationer. Rapport projekt F08-6661/AL50, SGI.
- Olsson, L., Stille, H., (1980). "Lönar sig en kompletterande grundundersökning?" Beslutsteori tillämpad på ett spontningsobjekt. *BFR Rapport R 174:80*.
- Osterman, F., (2017). Comparison of Photogrammetry Interpretation with Physical Structural Field Measurements. Självständigt arbete vid Uppsala Universitet, Inst. för Geovetenskaper
- Peterson, M., (2017). An Introduction to Decision Theory, 2nd ed. Cambridge University Press.
- Pierlot, V., van Droogenbroeck, M., (2014). A New Three Object Triangulation Algorithm for Mobile Robot Positioning. In *IEEE Transactions on Robotics*, 2014.
- Riisgaard, S., Blas, M. R., (2005). SLAM for Dummies. A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping.
https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/119149/16-412j-spring-2005/contents/projects/laslam_blas_repo.pdf
- Rocha, J., Póvoas, Y., (2017), "Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art", *Revista ALCONPAT*, 7 (3), pp. 200-214
- Romer, M., (2003), "Detachment of Shotcrete lining due to long term interaction with ground water". International Seminar The Thaumasite Form of Sulfate Attack of Concrete, Centre for Cement and Concrete, University of Sheffield, pp. 1-6.
- ROMOS, (2020). <http://www.romos.io/index.asp?FPFHFGFHIRJEIJLIG>
- SBU, (2015) Är diagnosmetoden bra? <http://www.sbu.se/sv/Vetenskap--Praxis/Vetenskap-och-praxis/Ar-diagnosmetoden-bra/>
- Sederholm, B., Pahverk, H., (2019), Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i Tunnlar – Långtidsexponering, BeFo-rapporter 193
- SGF, (2019). Bildbaserad metod för mätning och övervakning av rörelser hos konstruktioner vid geotekniska projekt. Förstudie. *SGF Notat 1:2019*
- sig, (2009). Södra Stambanan, Graverforstunnlarna, Norr Åby, Riskanalys. *SGI Dnr 2-0801-0320, Banverket Dnr F08-11749/IN60*
- Sjölander, A., (2019). Utvärdering av fältmetod för mätningar på sprutbetong. SBUF ID: 13332

- SKB, (2010) "Geosphere process report for the safety assessment SR-Site", Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-10-48
- Snively, N., Seitz, S., Szeliski, R. (2006). Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006)*
- Snively, K. N. (2008). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Thesis, U of Washington
- Stent, S., Gherardi, R., Stenger, B., Soga, K., Cipolla, R. (2016). Detecting Change for Multi-View, Long-Term Surface Inspection. *British Machine Vision Conference 2015*
- Stent, S., Gherardi, R., Stenger, B., Cipolla, R. (2015) Visual change detection on tunnel linings. *Machine Vision and Applications* (2016) 27:319–330
- Szeliski, R., (2006). Image Alignment and Stitching: A Tutorial. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision* Vol. 2, No 1 (2006) 1–104
- Thorsell P-E., Nordström, E., (2009). Erfarenheter från 10 års fältexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong, BeFo Rapport 88
- Trafikverket, (2015). Tillämpning av Gemensamma säkerhetsmetoden för riskvärdering och riskbedömning (CSM RA). *TDOK 2015:0478*.
- Trafikverket, (2018). Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1.
- Trädgårdh J., (1996). Utredning av skador på sprutbetong i Muskötunneln, CBI Uppdragsrapport 96126.
- Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E., Araújo, H., Costa, H. (2013). Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing. *Measurement* 46 (2013) 433–441
- Vick, St., (2002). Degrees of belief. Subjective Probability and Engineering Judgment. ASCE Press, Reston, Virginia, USA
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179 (2012) 300- 314.
- Wigblad, R., Jonsson, S. (2008). "Praktivdriven teori - mot en ny interaktiv forskningsstrategi." I Bengt Johannisson, Ewa Gunnarsson, Torbjörn Stjernberg (red.) Gemensamt kunskapande– den interaktiva forskningens praktik. *Acta Wexionensia* Nr 149/2008, Växjö University Press
- Wimsatt, A., White, J., Leung, C., Scullion, T., Hurlebaus, S., Zollinger, D., Grasley Z., Nazarian, S., Azari, H., Yuan, D., Shokouhi, P., Saarenket, T., (2014). Mapping Voids,

Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings. Transportation Research Board, Washington, D.C. USA

Windelhed K., Lagerblad B., Sandberg B. (2002), Cementingjutna bultars beständighet, SveBeFo-rapport 58

Vägverket, (2007). Förvaltning av Tunnlar Med hjälp av BaTMan, 2007-05-25

Ye, X.W., Dong, C.Z., Liu, T., (2016). A Review of Machine Vision-Based Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications, *Journal of Sensors Volume 2016*

Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P., Blum, Ph. (2013). Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin*, v. 97, no. 9

Zhang, R., (2014). Design and implementation of an autonomous climbing robot. PhD Thesis, Stanford University, USA

Zitová, B., Flusser, J., (2003). Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing* 21 (2003) 977–1000

Bilaga 1. Enkät till inspektörer

1. Använder du/ni något inspektionssystem? vilket/vilka i sådana fall?

Svar: i Trafikverkets tunnlar används BaTMan.

I övriga fall så används system som överenskommit med anläggningsägaren. Ofta är det mer åtgärdsbaserad rapportering.

Tycker du att systemet ger en rättvisande bild av bergförhållandena eller behöver du korrigera utifrån erfarenhet?

Svar: De som använder BaTMan tycker att systemet kräver viss "handpåläggning". Det har även framförts att BaTMan mest ger en sammanställning av skador på förstärkningen som i sin tur kan bero på berget.

Det har framförts att systemet behöver uppdateras.

2. Vilka faktorer värderar du som mest väsentliga?

Svar: Flera har uttryckt att det viktigaste är att man kan komma åt berget, bomknacka och "känna på" det och kunna konstatera bompartier.

Förstärkningen och dess tillstånd, bergets kvalitet, blockighet (utfallsrisk) och vattenläckage är viktiga. Läge av skador och konsekvenser av funktionsbortfall för skadade element.

Det har också framförts att det är mycket viktigt att observationerna görs med ett enhetligt system så att det går att följa skadornas utveckling över tiden och att det går att göra rätt prioriteringar av åtgärder.

Tolkning av observationer bör vara så enhetliga som möjligt.

3. Vilka underlag går du igenom innan inspektion och hur stort värde anser du att de har?

Svar: De flesta anser att:

Befintligt material hjälper till att lokalisera känsliga avsnitt som bör specialstuderas.

- Tidigare inspektionsritningar / rapporter
- Relationsritningar (berg, förstärkning, injektering, dräner etc.)
- Uppgifter om tidigare utförda åtgärder
- Eventuella dimensioneringsrapporter
- Konstruktionsritningar för innertak, dräner, ev. installationer
- Andra eventuella tidigare utredningar om t.ex. vattenkemi

Materialet är viktigt för att förstå konstruktionen, hur tunneln är dimensionerad och att för att rätt kunna förstå behovet av åtgärder.

Föregående protokoll från skotning/besiktning innehållande nedtagna bergmängder och ev. förstärkning samt foton är viktiga.

De gamla inspektionsprotokollen med skador dokumenterade på ritningar gör det enkelt att följa upp skadeutveckling och man ser vilka områden man skall koncentrera sig på till en början.

4. Vid okulärbesiktning, hur viktigt är avståndet, exempelvis från sula och handnära?

Svar: De flesta ser handnära avstånd som klart bäst, förutom att man dessutom kan känna på berget. Det går att se detaljer, sprickor, infästningar mm.

Vid dålig belysning, pannlampa o ficklampa framför flera att det definitivt krävs handnära avstånd.

Flera framför även vikten av att kunna se berget på lite avstånd för att kunna tolka ut skadebilden mer översiktligt och att kunna avgränsa skadeområden.

5. Hur värderar du handnära inspektion med bomknackning relativt enbart okulär besiktning-

a) från sulan?

b) från armlängds avstånd?

c) Vad missar du vid okulärbesiktning relativt bomknackning?

a) från sulan?

Svar: Okulärt utan bomknackning ger sprickriktningar, orientering i förhållande till utrymme, ev bergart och därmed en status på stabiliteten i förhållande till tänkt eller utförd förstärkning. Däremot inget om ytsäkringens kvalitet eller latent block med dålig inspänning som bomknackningen ger. Dragsprickor och läckage i sprutbetong kan vanligtvis karteras rätt bra från sulan. Korroderade bultar och upphängningar är svårt om dem är mer än ett par meter bort.

b) från armlängds avstånd?

Svar: På riktigt nära avstånd kan man även addera sprickegenskaper vilket höjer kvaliteten. armlängdsavstånd duger oftast för inklädda konstruktioner (sprutbetong t.ex.). För oinklädda konstruktioner behövs handnära för att kunna observera sprickvidder och fyllnader mm.

c) Vad missar du vid okulärbesiktning relativt bomknackning?

Svar: Bomknackning alltid bäst och enligt ovan är det förstås bäst med armlängds avstånd visavi sulan. Okulärbesiktning missar bomma partier både på berg och sprutbetong. Den ger inget om ytsäkringens kvalitet eller latent block med dålig inspänning som bomknackningen ger. Sprickvidder och urlakning av sprutbetongen missas. Bergkvaliten i stort, bompartier...

6. Vilket värde har fotografier vid utvärdering och uppföljning?

Svar: Bra som minnesstöd vid utvärdering stort värde men markering i fotot underlättar om inte typiska objekt kommit med för orientering. Det har även framförts att de endast är indikativa för utvärdering.

Vid Uppföljning – de ger ett underlag för bedömning av förändringar/skadeutveckling – t.ex. sprickor (spricklängd och vidd). Med en fotoserie borde det gå att få en uppfattning om skadeutvecklingen. Så är dock mycket sällan fallet. Sen är det alltid svårt att värdera vilket värde bilder kan ha då förhållanden som utrymme, ljus, fukt etc. påverkar. Tunnelbilder är ju ofta svåra att relatera till då de ofta saknar referenser dvs vad är upp och ner mm. För uppföljning (att något blivit utfört) har de inte så stort värde. Foton är bilder i situationen när de togs. Efter åtgärd kan man vid behov ta ett nytt foto för att t ex visa en specifik åtgärd.

7. Vilka erfarenheter har du av inspektion genom lucka i innertak som det enbart går att kika in genom?

Svar: Flera har erfarenheter av inspektion genom lucka. De ser det som mycket svårt att få en bild av förhållandena. Flera uttrycker att erfarenheterna är dåliga. I sämsta fall går det inte ens att få upp huvudet mellan innertak och berg/förstärkning. Det absoluta närområdet till luckan kan studeras. Eventuellt kan det vara möjligt att se inträffade nedfall på avstånd från luckan.

Vilken siktsträcka utgör smärtgränsen när du tittar in snett i spalten mellan innertak o berg?

Svar: Det har framförts att spaltens storlek är helt avgörande för siktsträckan. Tunnelkonturens utformning (ojämnheter) begränsar starkt siktsträckan. Det flesta anser att det går att inspektera upp till någonstans mellan 2 och 5 meter. Möjligen går det att få en översiktlig bild på något större avstånd.

8. Vilka yttre faktorer är mest begränsande vid besiktning som t.ex.

Ljus

Luftkvalitet, dimma/avgaser

Buller

Tidspress

Svar: I trafiktunnlar och i synnerhet järnvägstunnlar uppger de flesta att tidspressen är avgörande. Tidspress – t.ex. i en järnvägstunnel med begränsade tillgängliga tider kan vara begränsande för möjligheten att samla in relevanta data dvs kan definiera ambitionsnivån för inspektionen. Ibland har man bara ett par timmar på sig för en hel tunnel, vilket kräver många personer och bra organisering av arbetet. Inget utrymme för strul. Det har framförts att dokumentation av detta kan behövas så det tas med vid jämförelser mellan olika tillfällen och/eller objekt t ex vid prioriteringar.

Det har även framförts att följande faktorer är begränsande:

Åtkomst. Trånga spalter och inspektionsluckor sänker produktiviteten rejält. Lifjar och annan utrustning kan i viss mån underlätta.

Bristfälligt underlag. Det vore önskvärt att allt material fanns tillgängligt vid inspektionsstart, men pga. tidspress blir det inta alltid så. Allt på ett ställe vore bra, tex BaTMan.

Samtliga tillfrågande anser att alla eller flera av parametrarna är begränsade:

- Bra ljus är viktigt – särskilt för att få en god överblick
- Dimma reducerar sikt och det kan behöva inväntas till dess de lättar
- Luftkvaliteten kan i värsta fall medföra krav på mask, som begränsar sikten
- Buller stör bomknackning och är ett allmänt störande moment vid en inspektion.

9. Hur värderar du att enbart kika på ett (bra) foto jämfört med att kika på berget på nära avstånd?

Svar: En direkt inspektion av berget/förstärkningarna kan inte ersättas av att enbart studera foton. Foton kan däremot vara en god "minnesbild" och utgöra underlag för bedömning av vissa förändringar.

En synpunkt är att det beror på vilken bakgrundskunskap som man har om berget innan man tittar på fotot. Är anläggningen välkänd och dokumenterad innan den blev otillgänglig för inspektion så visst kan ett foto lämna värdefull upplysning, t ex stennedfall eller sprickviddstillväxt samt kanske även fungera för utbredning av sprickor i sprutbetong och läckageområden.

Det har också framförts att det utesluter att enbart använda foton för att bedöma berg eftersom man måste in och gräva i sprickfyllnader och identifiera sprickor i fält. Alla sprickor kan man dessutom inte se på ett foto. Fysisk närvaro är ett måste för inspektionerna.

Inmätning av sprickor och provtagningar kräver naturligtvis också fysisk närvaro vid inspektionsobjektet. Man skall inte heller undervärdera den samlade bedömningen man kan göra genom närvaro.

Det är inte alls jämförbart med att enbart kika på ett bra foto jämfört med att kika på nära avstånd, det är klart bäst att se på nära håll

Bilaga 2. Utvärdering av tunnelns tillstånd ur observerade indikatorer. Grunderna

Avsikten med inspektionen är att bidra till ett beslutsunderlag för eventuella åtgärder. Det underlaget bör vara baserat på sannolikheter för att möjliggöra en transparent och strukturerad analys och för att ge möjlighet att jämföra säkerheten hos tunneln med de risker som kan tillåtas. Detta kan göras med söker efter sådana tecken som vi kallar indikatorer.

BILAGA 2.1 PROBLEMSTÄLLNINGEN

Den grundläggande problemställningen vid inspektion är att man vill ha ett beslutsunderlag. Antingen visar inspektionen att ställda krav är uppfyllda eller så visar den att åtgärder behövs.

Vi har dock problemet att kraven inte är tydligt formulerade: eftersom inspektionen till sin natur är riskbaserad vill man ha ett riskmått som krav. Det är dock långt ifrån klarlagt vilka sannolikheter som accepteras för olika skador.

Vi vill alltså kunna utgå från en bassannolikhet och sedan uppdatera den med hjälp av de observationer som vi gjort. Vi gör detta utgående från hur effektiva indikatorerna är när det gäller att hitta brott. Detta görs utgående från de expertbedömningar som gjorts där experter fått svara på frågor.

För en definierad bergmekanisk kontext och mekanism (skadehot) vill man göra en sannolikhetsskattning av hur troligt det är att man (i princip) skulle kunna observera den aktuella indikatorn dvs att indikatorn finns.

Man svarar alltså på en fråga av typ:

Om den här mekanismen finns, hur troligt är det då att man skulle kunna observera den aktuella indikatorn?

Man svarar inte på den annorlunda formulerade frågan: *Om jag ser den aktuella indikatorn, hur troligt är det att den här mekanismen finns?*

Mekanism omfattar inte bara brott och nedbrytning, i begreppet kan också ingå t.ex. tillstånd som bedöms hotande. I den kommande texten gör vi förenklingen att kalla alla mekanismer för ”brott”, eftersom vi tror att det förenklar läsande och förståelsen.

Troligheten kallas i dessa sammanhang för likelihood och beskriver hur troligt det är att man ser en viss indikator i om det verkligen är brott: $P(i|\text{brott})$

(Ibland brukar man skriva likelihood som $L(\text{brott} | i)$ alltså likelihood för brott givet den observerade indikatorn i . Man menar ändå samma sak: Givet att det är brott, hur troligt är det att se indikatorn).

BILAGA 2.2 BASSANNOLIKHET

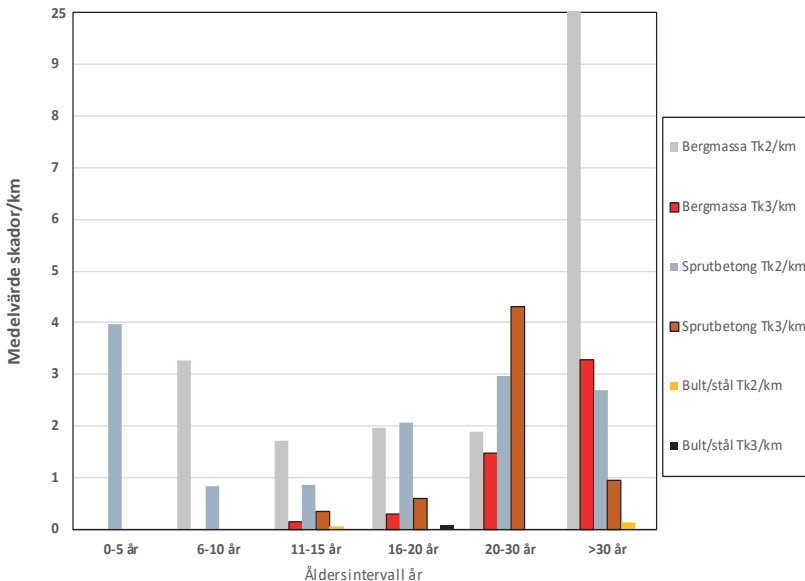
Som visas nedan bygger fjärrinspektionsmetodikerna med indikatorer på att man uppdaterar en sannolikhet med den information man får ur inspektionen. Vi behöver alltså ha en bassannolikhet för olika skador på tunneln. Denna sannolikhet kan gälla både inträffat och pågående brott, liksom nedbrytning. Brott kan dessutom delas upp i olika brottyper.

Bassannolikheten är kontextberoende och beror av faktorer som bergtyp, design, utförande, ålder och underhåll etc.

Det har inom studien gjorts en analys av skadefrekvensen i de svenska järnvägstunnelarna som den rapporterats i BatMan. Syftet är att göra en bedömning av den årliga brottsannolikheten alternativt sannolikheten för att det ska uppstå en allvarlig skada som föranleder åtgärd antingen i form av fördjupad utredning eller förstärkning.

Ett exempel på analysresultat visas i Figur 75. Där visas skadefrekvensen för olika delar av det bärande huvudsystelet och för olika ålder på tunneln för brott. Frekvensen visas som antal skador /km och femårsintervall. Notera att andelen tunnel med sprutbetong är låg för tunnlar äldre än 30 år vilket speglas i statistiken. Den sammantagna skadefrekvensen, TK3, bedöms vara ca 1 skada per år och km för tunnlar som är äldre än 30 år.

I våra analyser har vi antagit två bassannolikheter, 0.5 och 2.5% som vi anser bör spegla spannet i bassannolikhet.



Figur 75 Skadefrekvens antal skador per km och 5 år

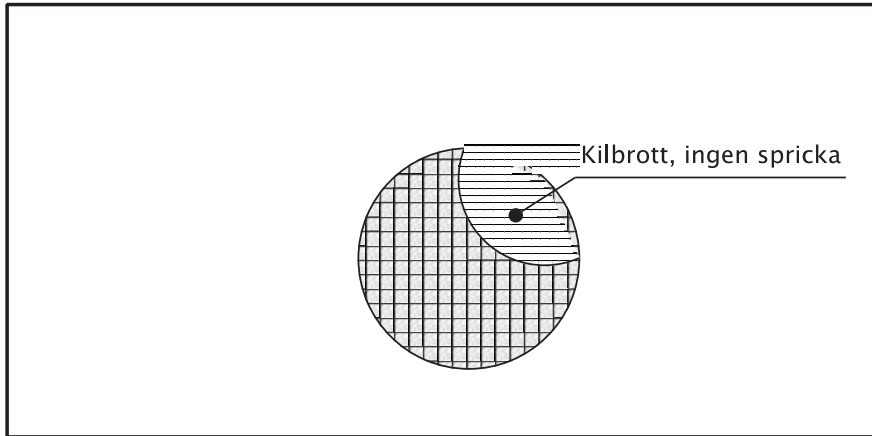
BILAGA 2.3 SANNOLIKHETSBASERAD BAKGRUND TILL ANVÄNDNINGEN AV INDIKATORERNA

Bilaga 2.3.1 GRUNDPROBLEMET

För att öka förståelsen för det statistiska tänkesättet ges här ett exempel.

Vi är intresserade av ett tunnelsegment där vi tittar efter en indikator som vi här kallar *spricka*. Här går vi inte in på bergmekaniska funderingar utan nöjer oss med att spricka kan vara en indikator på antingen kilbrott eller löskärnebildning, bägge kan inte förekomma samtidigt. Men samtidigt kan *spricka* uppstå av andra orsaker, till exempel krympning.

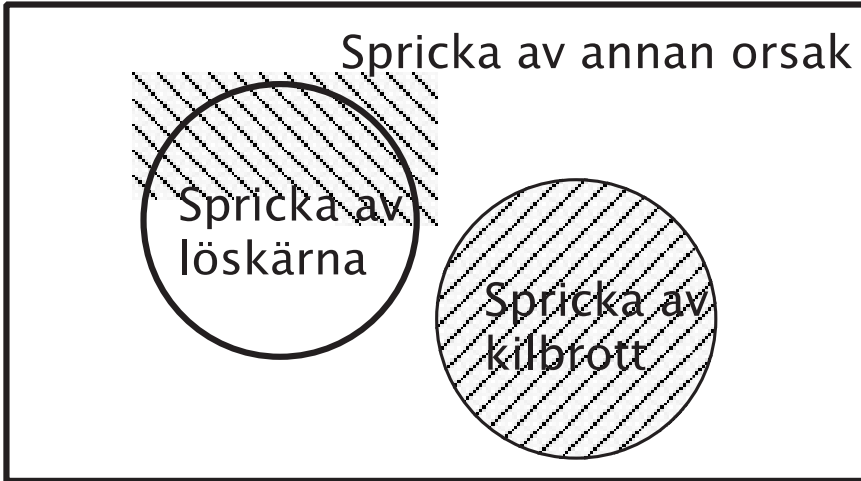
Man kan illustrera detta i ett så kallat Venn-diagram, se Figur 76.



Figur 76 Venn-diagram möjliga tillstånd i tunneln

I Venn-diagrammet visas att vi kan ha två brottillstånd som kan uppträda med eller utan indikatorn spricka, och ett tillstånd som trots att tunneln är säker så uppvisas indikatorn spricka. Slutligen finns det säkra tillståndet utan spricka.

Om vi vid en inspektion ser *spricka* kan man illustrera möjliga tillstånd i tunneln i ett annat Venn-diagram, se Figur 77



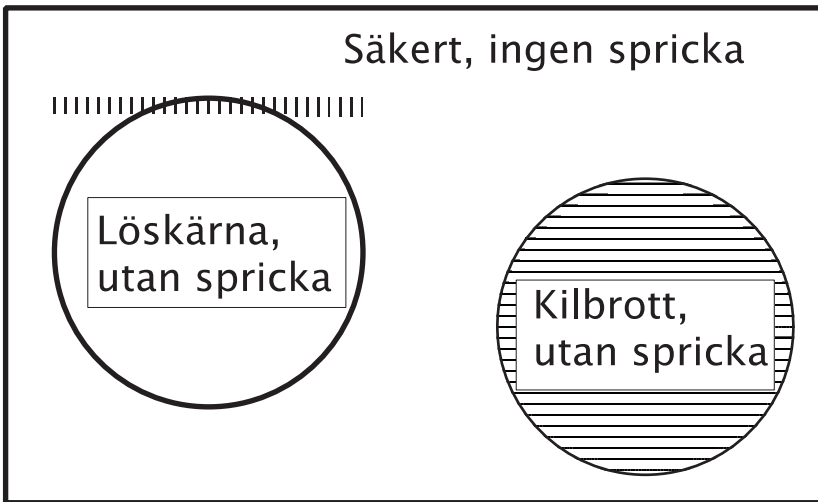
Figur 77 Venn-diagram möjliga tillstånd om vi sett spricka

När vi sett sprickan finns det några olika hypoteser:

- A. Det finns ett kilbrott
- B. Det finns inte ett kilbrott
- C. Det finns en löskärnebildning
- D. Det finns inte en löskärnebildning
- E. Det finns sprickor av annan orsak, men det finns inget brott

Vad vi är intresserade av är att kunna säga något om hur troliga de olika hypoteserna är, både före och efter en inspektion.

Om man inte ser någon spricka vid inspektionen får man Venn-diagrammet i Figur 78.



Figur 78 Venn diagram möjliga tillstånd om det inte finns en spricka

Bilaga 2.3.2

NÅGRA OLIKA BEGREPP KRING INDIKATORER.

I Tabell 20 ges data (uttryckta i antal fall) som kan användas för att beskriva en indikatorns statistiska egenskaper. Tabellen är den klassiska från medicinsk diagnostik. Där används positivt resultat för att testen visar på sjukdom och negativt resultat när den pekar på frånvaro av sjukdom. I vårt tunnelsammanhang pekar ett positivt utfall på instabilitet (skadehot; brott).

Eftersom det ofta är svårt att ange en absolut sanning om verkligheten används ofta "referensmetod" (golden standard) som ersättning. I vårt fall skulle den kunna vara noggrann handnära inspektion av erfaren inspektör.

Tabell 20 Data för beräkning av indikatorns egenskaper ur antalet observerade olika fall

Indikator	Referensmetod visar ("verkligheten")		Totalt
	Instabilt (brott)	Stabilt (ej brott)	
Spricka Pekar på instabilt	a	b	$a + b$
Ingen spricka Pekar på stabilt	c	d	$c + d$
<i>Totalt</i>	$a + c$	$b + d$	

Koppling till de frågor som ställdes

När man ställer frågan till experten:

”Det har inträffat ett brott orsakat av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem. Hur troligt är det att indikatorn förekommer vid brott?”

Så får man expertens uppskattning av troligheten, nu uttryckt som en sannolikhet L1, där $L1 = (a/(a+c))$, och på samma sätt ger frågan: ”Det har inte inträffat ett brott. Hur troligt är det att ändå se indikatorn?” expertens bedömning av troligheten uttryckt som en sannolikhet L2, där $L2 = (b/(b+d))$.

Kommentar:

Man skulle kunna ha ställt motsvarande frågor för att få fram c och d:

”Det har inträffat ett brott. Hur troligt är det att indikatorn inte förekommer?” ger värdet på **c**

”Det har inte inträffat ett brott. Hur troligt är det att indikatorn inte förekommer?” ger värdet på **d**.

Men eftersom a och b är betingade sannolikheter (sannolikheter givet brott respektive ej brott) så gäller $a + c = 1$ respektive $b + d = 1$. Man kan därför lätt beräkna c och d och sedan likelihoodkvoterna.

Indikator	Referensmetod visar ("verkligheten")	
	Instabilt (brott)	Stabilt (ej brott)
Spricka Pekar på instabilt	L1 <i>Sant positiv</i>	L2 <i>Falskt positiv</i>
Ingen spricka Pekar på stabilt	1 - L1 <i>Falskt negativ</i>	1 - L2 <i>Sant negativ</i>
<i>Totalt</i>	<i>1</i>	<i>1</i>

$LR^+ = L1/L2$ Positiva LR. Indikatorn finns

Ekvation 7

$LR^- = (1-L1) / (1-L2)$ Negativa LR. Indikatorn finns inte

Ekvation 8

Begrepp som används inom medicinen:

prevalens (verklig förekomst av instabilitet, d.v.s. bassannolikheten för brott): $(a+c)/(a+c+b+d)$

sensitivitet (förmåga att korrekt förutsäga instabila förhållanden): $a/(a+c)$

specificitet (förmåga att korrekt förutsäga stabila förhållanden): $b/(b+d)$

Vi arbetar med den så kallade *likelihoodkvoten*:

Positiv likelihoodkvot (styrker hypotesen om brott) är lika med sannolikheten för att se en indikator som pekar på brott, om berget är instabilt ($a/(a+c)$), dividerad med sannolikheten att se en indikator som pekar på brott om berget i verkligheten är stabilt $b/(b+d)$. Den visar hur mycket troligare det är att hitta indikatorn i en tunnel som inte är stabil än i en tunnel som är stabil.

Negativ likelihoodkvot är kopplad till frånvaron av en indikator. Den beskriver hur troligt det är att man inte ser indikatorn där man har brott (falskt negativ) dividerat med troligheten att man inte ser den där man inte har brott (sant negativ), dvs $P(\text{inte } i | \text{ brott}) / P(\text{inte } i | \text{ inte brott})$. Den är, namnet till trots, inte ett negativt tal, och vanligen i intervallet $0 - 1$.

Om man inte observerar indikatorn (ett negativt testutfall) och har en negativ likelihoodkvot minskar den uppdaterade brottsannolikheten, se Figur 6. I figuren visas hur mycket den ursprungliga sannolikheten ändras av den ”negativa” observationen ”Ser inte i” Linjerna i diagrammet anger ursprunglig brottsannolikhet.

En positiv likelihoodkvot används när man skall bedöma om det råder instabilitet när vi har en indikator som pekar på instabilt (positivt test inom medicinen)

En negativ likelihoodkvot används när man skall bedöma om det råder stabila förhållanden (utesluta instabilitet) när vi har en indikator som pekar på stabilt (negativt test inom medicinen)

Likelihoodkvotens urskiljande förmåga

Ett värde på likelihoodkvoten som är lika med 1 betyder att metoden inte har något som helst diagnostiskt värde.

Den positiva likelihoodkvoten bör ha ett värde över 1 och ju högre värdet är desto bättre är den diagnostiska förmågan.

Den negativa likelihoodkvoten bör ha värde under 1 och ju närmare 0 värdet är desto bättre är den diagnostiska förmågan.

Likelihoodkvotens urskilningsförmåga illustreras i Tabell 21 och Tabell 22, Se även Avsnitt 3.3.3.

Tabell 21 Styrka hos olika likelihoodkvoter efter SBU (2015)

Urskillningsförmåga (kvalitativt)	Positiv likelihoodkvot	Negativ Likelihoodkvot
Utmärkt	10	0,1
Mycket god	6	0,2
Rimlig	2	0,5
Oanvändbar	1	1

Efter SBU (2015)

Tabell 22 Qualitative scale for the degree of support provided by evidence

LR		Weight of Evidence
from	to	
1	10	Limited evidence to support
10	100	Moderate evidence to support
100	1000	Moderately strong evidence to support
1000	10 000	Strong evidence to support
10 000	∞	Very strong evidence to support

Man kan säga om de olika testerna ovan:

Sensitivitet, specificitet och likelihoodkvot svarar på frågan: *Hur bra är testet?*

Men de ger inget svar på frågan:

Hur mår patienten (i vårt fall tunneln)? Detta beror på att det inte ingår några uppgifter om själva tunneln i form av bassannolikhet (prevalens).

BILAGA 2.4 UTVÄRDERING BASERAD PÅ BAYESIANSK UPPDATERING

Den Bayesianska uppdateringen arbetar med sannolikheter och behandlar frågan: ”om jag har en uppfattning om sannolikheten för brott och sedan gör en viss observation, hur skall det ändra min uppfattning om sannolikheten?” För en genomgång med exempel på tillämpningar se t.ex. Baecher (2017).

Bilaga 2.4.1**GRUNDFUNKTIONEN: BAYES' TEOREM**

I det nedanstående använder vi följande beteckningar:

- $P(F)$ sannolikheten för den aktuella typen av skada (eng. failure)
 $P'(F)$ sannolikheten för skada innan vi fått mer data (åpriori-sannolikhet)
 $P''(F|z)$ sannolikheten för skada efter det att vi fått mer data z (åposteriori-sannolikhet)
 z nya data, i vårt fall observerade indikatorer. (Kan vara sammansatt av flera observerade indikatorer, alltså en vektor)
 $L(z|F)$ likelihood för F , givet observerade data. Kan ses som den (betingade) troligheten att observera z om F är sann. Likelihood uttrycks ofta som en sannolikhet, men man kan beskriva den med värden > 1 om man vill.

Uppdateringen när man fått nya data görs enligt formeln:

$$P''(F|z) \propto P'(F) L(z|F) \quad \text{Ekvation 9}$$

Formeln säger att den uppdaterade åposteriorisannolikheten är proportionell mot produkten av åpriorisannolikheten och likelihood. Den uppdaterade sannolikheten är betingad på observerade data.

Den fullständiga formeln lyder

$$P''(F|z) = P'(F)L(z|F)/(\sum P'(F_i)L(z|F_i)) \quad \text{Ekvation 10}$$

Bilaga 2.4.2**"NÄMNAREN"**

I den fullständiga formeln ovan är nämnaren en proportionalitetskonstant, som krävs för att normalisera $P''(F|z)$ så att den blir en sannolikhet. Denna proportionalitetskonstant kan ibland vara tämligen besvärlig att beräkna och kräva numeriska metoder eller simuleringsmetoder. Det kan dock vara möjligt att åsätta den direkt (subjektivt). Denna möjlighet kan vara avgörande för om man skall välja direkt uppdatering eller uppdatering med likelihoodkvot.

Matematiskt är nämnaren sammansatt av sannolikheten för förekomsten av de olika orsaker som kan ge upphov till observationen, var och en multiplicerad med sannolikheten att se z om orsaken finns (likelihood). Här skall man komma ihåg att det finns orsaker som inte innebär en brottmekanism.

Det är alltså så att nämnaren ger den totala sannolikheten för att man skall göra observationen z . Denna sannolikhet bör vara möjlig att uppskatta subjektivt med frågor av typen:

"Om man tittar längs hela tunneln: I hur stor andel av tunneln saknas indikatorn (i procent av arean)".

Med ett sådant angreppssätt, dvs subjektiv skattning av nämnaren kan man beräkna en ”uppdateringsfaktor”(= likelihood/ nämnaren) som direkt visar hur mycket en sannolikhet ökar om man observerar indikatorn. För att få den uppdaterade sannolikheten multiplicerar bara den rådande sannolikheten (före observerade indikatorer) med uppdateringsfaktorn. Man bör observera att en sådan faktor är ganska osäker på grund av dess subjektiva bas, om den inte bygger på ett större antal expertutsagor.

BILAGA 2.5 UTVÄRDERING BASERAD PÅ LIKELIHOODKVOT

Ett sätt att enkelt utvärdera observationer är genom den så kallade likelihoodkvoten. Likelihoodkvoten LR (eng. likelihood ratio) är likelihood för F givet observationen z_0 dividerad med likelihood för ”icke-F” givet samma observation.

$$LR = L(z_0|F) / L(z_0|\bar{F}) \qquad \text{Ekvation 11}$$

Formeln för uppdatering blir då:

$$\frac{P^*(F|z_0)}{P^*(\bar{F}|z_0)} = \frac{P^*(F)}{P^*(\bar{F})} \times LR \qquad \text{Ekvation 12}$$

Man slipper alltså beräkna normaliseringskonstanten (nämnaren) i Bayes’ teorem. Eftersom $P(F) + P(\bar{F}) = 1$ så kan uttrycket förenklas och man kan få en ytterligare förenkling om man är villig att arbeta med odds.

$$\text{Odds för } A = A/\bar{A} = A/(1-A) \qquad \text{Ekvation 13}$$

Om detta används vid uppdateringen så erhålls:

Odds efter observation = odds före observation x likelihoodkvoten.

Likelihoodkvoten är alltså ett direkt mått på hur mycket troligheten ändras om den uttrycks i odds.

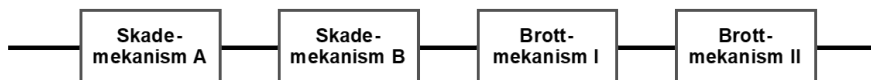
Uttryckt i sannolikheter:

$$P^{**}(F) / (1 - P^{**}(F)) = LR \times P^*(F) / (1 - P^*(F)) \qquad \text{Ekvation 14}$$

Beroende på vad man observerat (sett indikatorn eller inte) kan den likelihoodkvot som skall användas vara den positiva eller den negativa likelihoodkvoten.

BILAGA 2.6 BROTTSANNOLIKHET VID SYSTEM AV FLERA TÄNKBARA BROTTMEKANISMER

Om det finns flera tänkbara skademekanismer så har man ett seriesystem av olika brottmekanismer och skademekanismer, se Figur 79. Ett seriesystem slutar fungera när något element slutar fungera, det räcker alltså enligt denna modell med att en mekanism är aktiv för att systemet skall vara otillfredsställande.



Figur 79 Tunnelskada som seriesystem

Vi har en uppskattad sannolikhet för varje enskild mekanism med metoder enligt ovan och vill beräkna sannolikheten för att tunneln inte skall vara acceptabel med hänsyn till samtliga dessa mekanismer. Vi vill alltså beräkna sannolikheten för att minst en av dessa mekanismer är aktiv. Det kan vara förbundet med vissa svårigheter, för den händelse att det finns en korrelation mellan mekanismer, till exempel genom någon bakomliggande, gemensam faktor. Beräkningen kan hanteras antingen genom att man beräknar gränsvärden för systemsannolikheten, se nedan, eller genom att man använder Monte Carlo-simulering och då tar med korrelationer i simuleringen.

Enligt Ang & Tang (1984) kan man beräkna ett övre och ett nedre gränsvärde för systemets brottsannolikhet p_f ur sannolikheten p_i för de olika mekanismerna enligt

$$\max[p_i] \leq p_f \leq 1 - \prod_i (1 - p_i) \quad \text{Ekvation 15}$$

Ang & Tang (1984) påpekar att för små p_i så blir högra ledet i ekvationen approximativt lika med $\sum p_i$.

Om man har beräknat en uppdaterad sannolikhet för olika brottmekanismer, så kan man på detta sätt alltså beräkna en största sannolikhet för att tunneln inte skall vara tillfredsställande.

Om man gör en uppdatering av brottsannolikheten för de olika mekanismerna, inklusive ”annan mekanism” och utgående från de värdena beräknar ett övre gränsvärde, så behöver man sedan justera sannolikheterna, se Hill et al. (2003) och Margo (2009) så att deras summa blir övre gränsvärdet. Justeringen görs genom att man dividerar respektive värde med gränsvärdet.

		Bassann brott totalt			
		2,00%			
Mekanism Mk	P(i Mk)	Ford. Brottyp	P(Mk)	P(i Mk)*P(Mk)	P(brott)
M1	25,00%	29%	0,58%	0,15%	22,74%
M2	25,00%	38%	0,75%	0,19%	29,41%
M3	75,00%	14%	0,28%	0,21%	32,94%
M4	25,00%	19%	0,38%	0,10%	14,90%
Ej brott	0,001%		0,97%	0,00001%	0,00%
	Summor	100%	2%	0,64%	100%
Brottsannolikhet Upper bound			(Namnaren)		
Pf	68,88%		Justerade sannolikheter P(brott) justerad		
			M1	15,67%	
			M2	20,26%	
			M3	22,69%	
			M4	10,26%	
			ej brott	0,00%	
			Summa	68,88%	

Figur 80: Uppdatering av sannolikheter för olika brottmekanismer. Exempel

En sådan beräkning illustreras i Figur 80. I brist på bassannolikheter för de olika brottmekanismerna har den samlade bassannolikheten fördelats enligt expertskatningen av brottyper.

Den indikator som valts är av den typ som har stark förmåga att visa på brott. Det gör att man får en mycket stor ökning av brottsannolikheten.

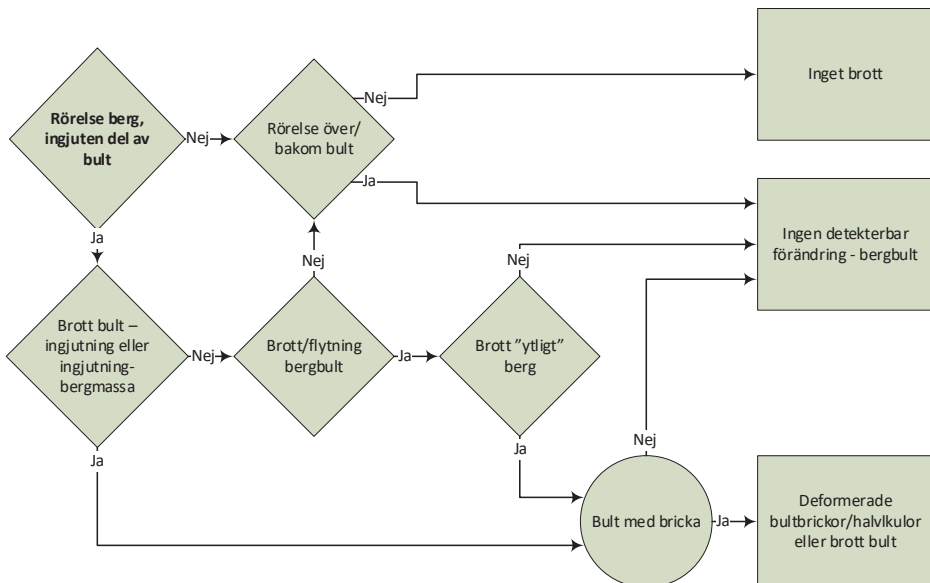
Bilaga 3. Brottmekanismer – detektion av respons i förstärkningssystemets komponenter

BILAGA 3.1 BERGBULT

Vid helt ingjuten slak bergbult kommer responsen i förstärkningen att dels bero på bergmassans hållfasthet eller ingjutningens kvalitet dvs. om det sker skjuvning längs bergbulten-bergmassan (lossdragning) eller dels på om bulten utsätts för rörelse så att den plastiserar.

I det första fallet kommer bergbulten att ta begränsat med last och berget mellan bultarna att gå till brott och i det andra fallet kommer brott att resultera i flytning av bulten (Figur 81).

Det finns ingen principiell skillnad om bulten utsätts för tension eller skjuv med avseende på synlig respons i bergbulten. Sker brott inne i berget och ingjutningen har tillräcklig hållfasthet kommer synliga delar av bulten att vara opåverkade. Om ingjutning eller berg har alltför låg hållfasthet eller om brott sker ytligt kommer den yttre delen av bulten att ta upp last. Detta kan resultera i såväl brott bult som deformation av brickor mm.



Figur 81 Förändring vid rörelse i berg över ingjuten längd av bergbult. Romb visar process/mekanism och rektangel indikatorer vid observation av enbart bergbult. Ring visar val.

BILAGA 3.2 SPRUTBETONG

Sprutbetongen kan generellt utsättas för fyra underliggande mekanismer - system för deformationer:

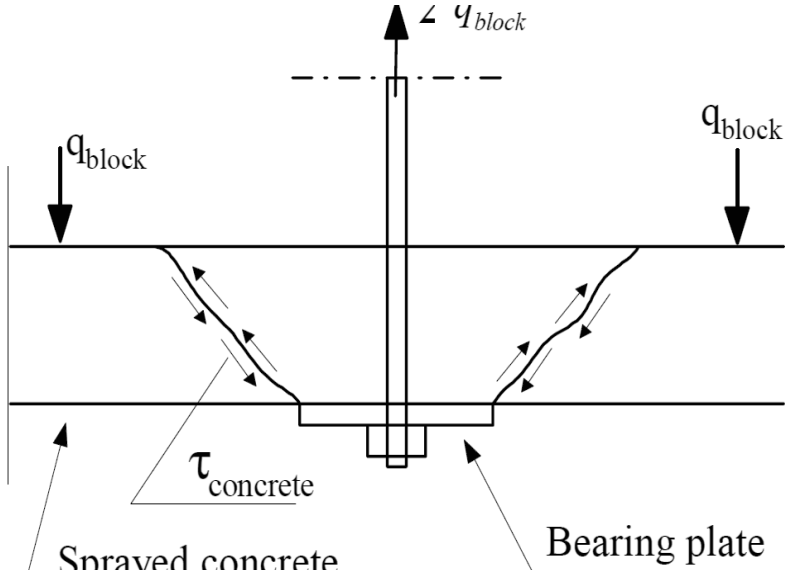
- a. Skjuvrörelser i bergmassan
- b. Tension sub-tangentiellt sprutbetongen
- c. Tryckbelastning sub-tangentiellt sprutbetongen
- d. Utbredd last

Sprutbetongens olika grundläggande brottmekanismer är:

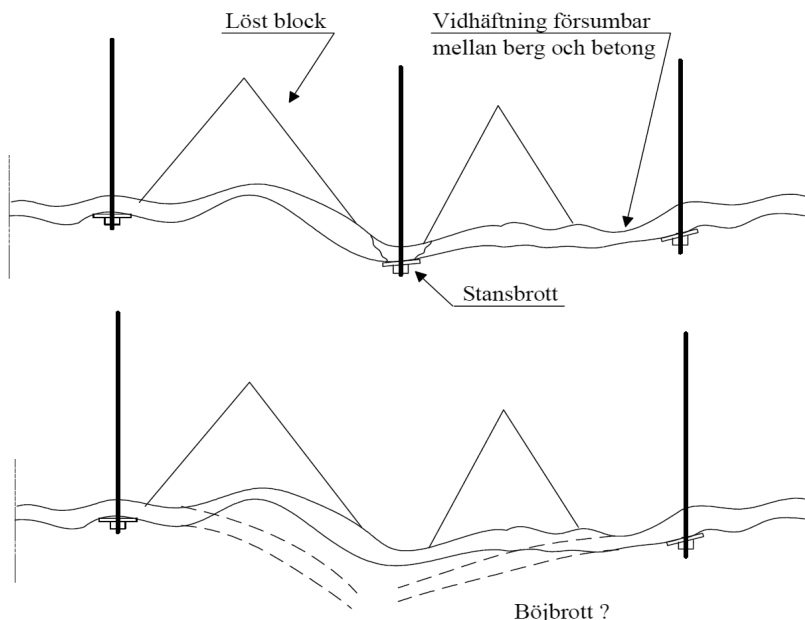
- I. Vidhäftningsbrott
- II. Skjuvbrott
- III. Dragbrott
- IV. Tryckbrott

De statiska mekanismerna i bergmassan a. till d. kan ge upphov till flera av brottmekanismerna I till IV i sprutbetongen. Detta finns åskådliggjort i Figur 11 där de uppdelas i vidhäftningsbrott, böjdragbrott, skjuvbrott, stansbrott, tryckbrott och dragbrott.

I fallet sprutbetongen är upphängd, som en platta, tillkommer även brottfallet med stansbrott runt infästningar samt även avskalning av betong (täcksikt) om insprutad upphängning plastiserar (Figur 82 och Figur 83).



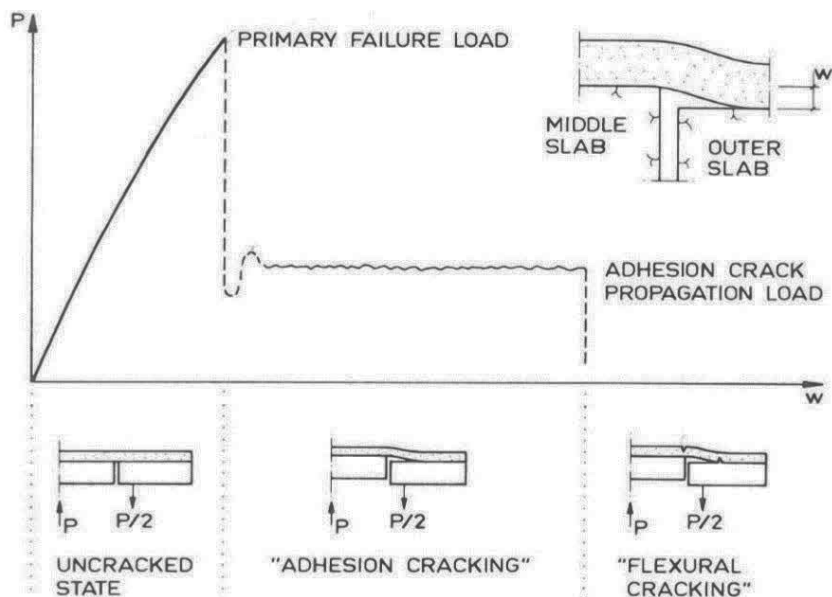
Figur 82 Stansbrott runt bultbricka (från Nilsson 2003)



Figur 83 Genomstansning av bultupphängd sprutbetong (från Nilsson 2003)

BILAGA 3.3 SKJUVBROTT BERGMASSA:

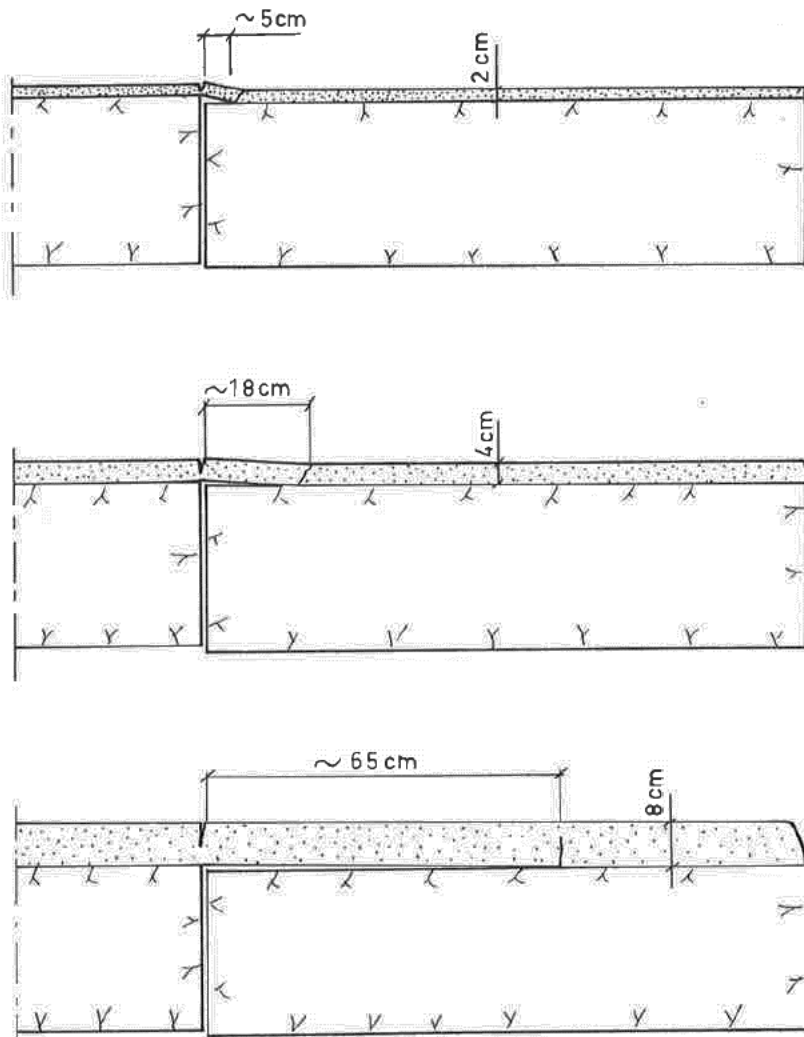
Skjuvrörelser i bergmassan kan t.ex. uppstå på grund av kilbrott eller En skjuvrörelse i bergmassan kan ge upphov till en serie typer av brottmekanismer i sprutbetongen. Om vidhäftningshållfastheten är tillräckligt hög i förhållande till sprutbetongens styvhet sker skjuvbrott medan det i annat fall sker vidhäftningsbrott enligt Figur 84 och Figur 85.



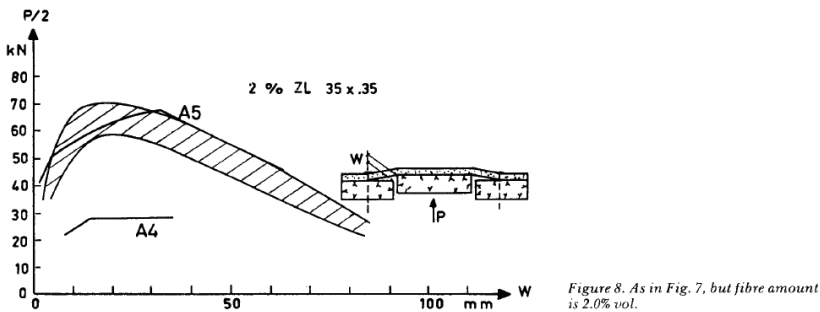
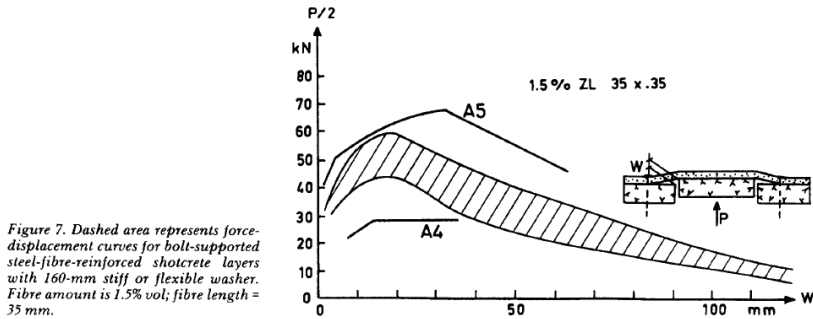
Figur 84 Last-deformationsdiagram för oarmerad sprutbetong (från Holmgren 1979)

Vidhäftningsbrott kan detekteras med vidrörande metoder, bomknackning. Det är tänkbart att det kan gå att detektera vidhäftningsbrott på annat sätt i framtiden.

Jonas Holmgren undersökte senare bärförmågan för sprutade betongpaneler med en tjocklek av 80 mm. Betongen var upphängd med bult och hade en vidhäftning om i medeltal ca 0.95 MPa. Olika mix design med 35 och 45 mm fibrer användes. Resultaten visar inte när uppsprickning av betongen börjar uppstå. Enligt Figur 86 uppnås maximal brottlast vid en skjuvrörelse om mellan 10 och 20 mm.



Figur 85 Nätarmerad sprutbetong, vidhäftningsbrott-böjdragbrott vid olika sprutbetongtjocklek (från Holmgren 1979)

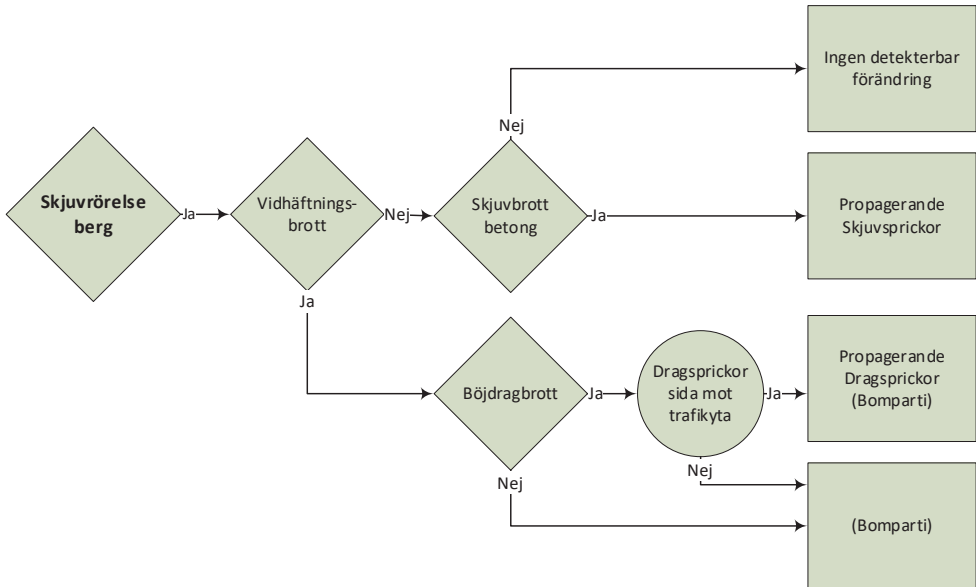


Figur 86 Last-deformationskurvor för fiberarmerad bultupphängd sprutbetong med 160 mm styva brick-or. Test A2 och A4 är jämförande test med nätarmerad betong (Holmgren 1987)

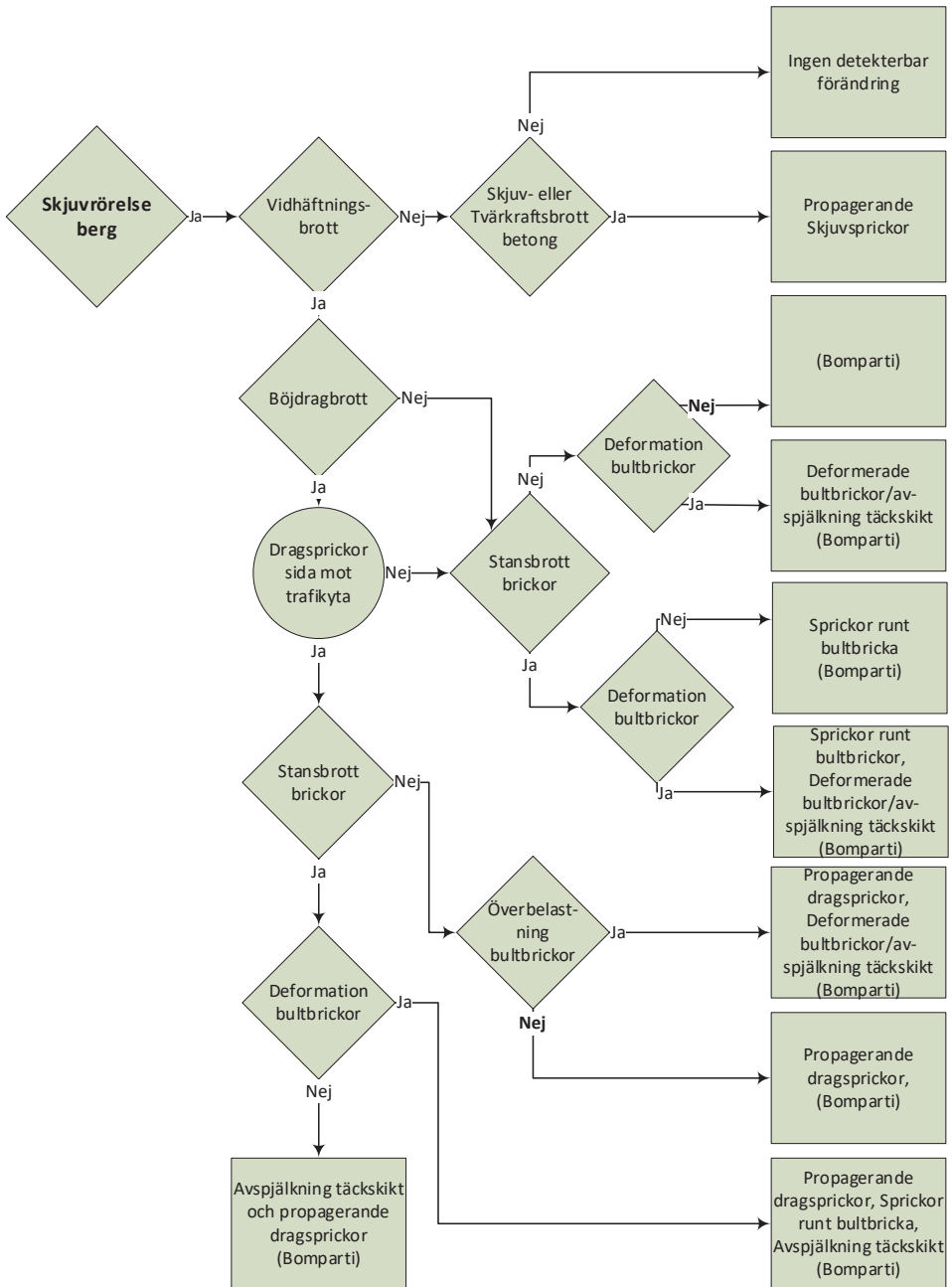
Skjuvrörelser kan uppstå exempelvis vid kilbrott eller större skjuvbrott i bergmassan. Vid finblockigt berg kan det vara en flytande övergång mellan a. "Skjuvbrott i bergmassan" och brottyp d. "Utbredd last" dvs. skjuvrörelsen sker inte i en distinkt zon.

Vid en uppsprucken sprutbetong, exempelvis vid krympsprickor, begränsas möjligheterna till detektering. Möjligheterna att detektera böjdragbrott begränsas till att kunna detektera sprickdilatation och möjligen att det slår upp nya sprickor i uppspruckna delar av betongen.

I Figur 87 är responsen i sprutbetongen kartlagd för oarmerad (vidhäftande) sprutbetong och i Figur 88 är den kartlagd för bultupphängd (armerad) sprutbetong.



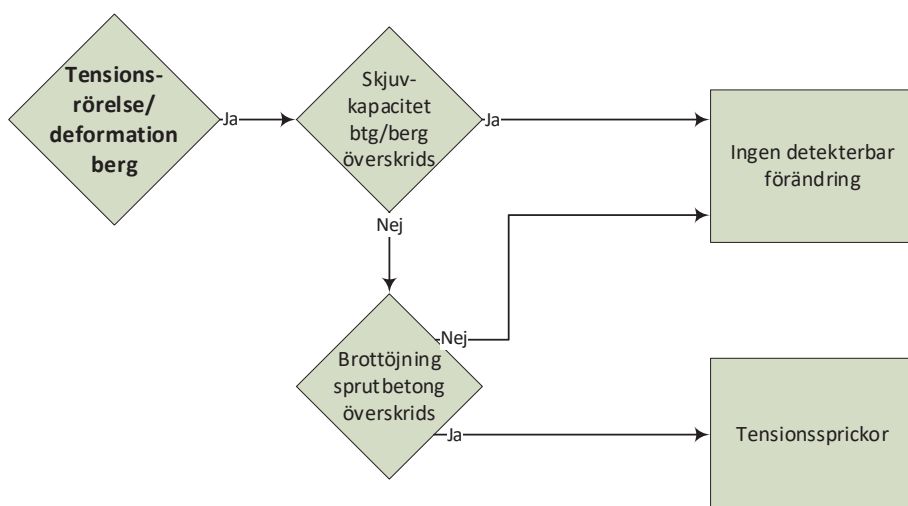
Figur 87 Skjuvrörelse i bergmassan - respons i form av uppsprickning oarmerad sprutbetong.



Figur 88 Skjuvrörelse i bergmassan - respons bultupphängd sprutbetong.

BILAGA 3.4 TENSION SUB-TANGENTIELLT SPRUTBETONGEN

Tension längs bergytan leder till tensionssprickor och sprickdilatation vinkelrät bergytan. Sprutbetongen kan förutsättas vara så vidhäftande och inspänd mot berget att sprickor uppstår i sprutbetongen när brottöjningen för betongen överskrids (Figur 89).



Figur 89 Tensionsrörelse i bergmassan - respons sprutbetong

BILAGA 3.5 TRYCKBELASTNING SUB-TANGENTIELLT SPRUTBETONGEN

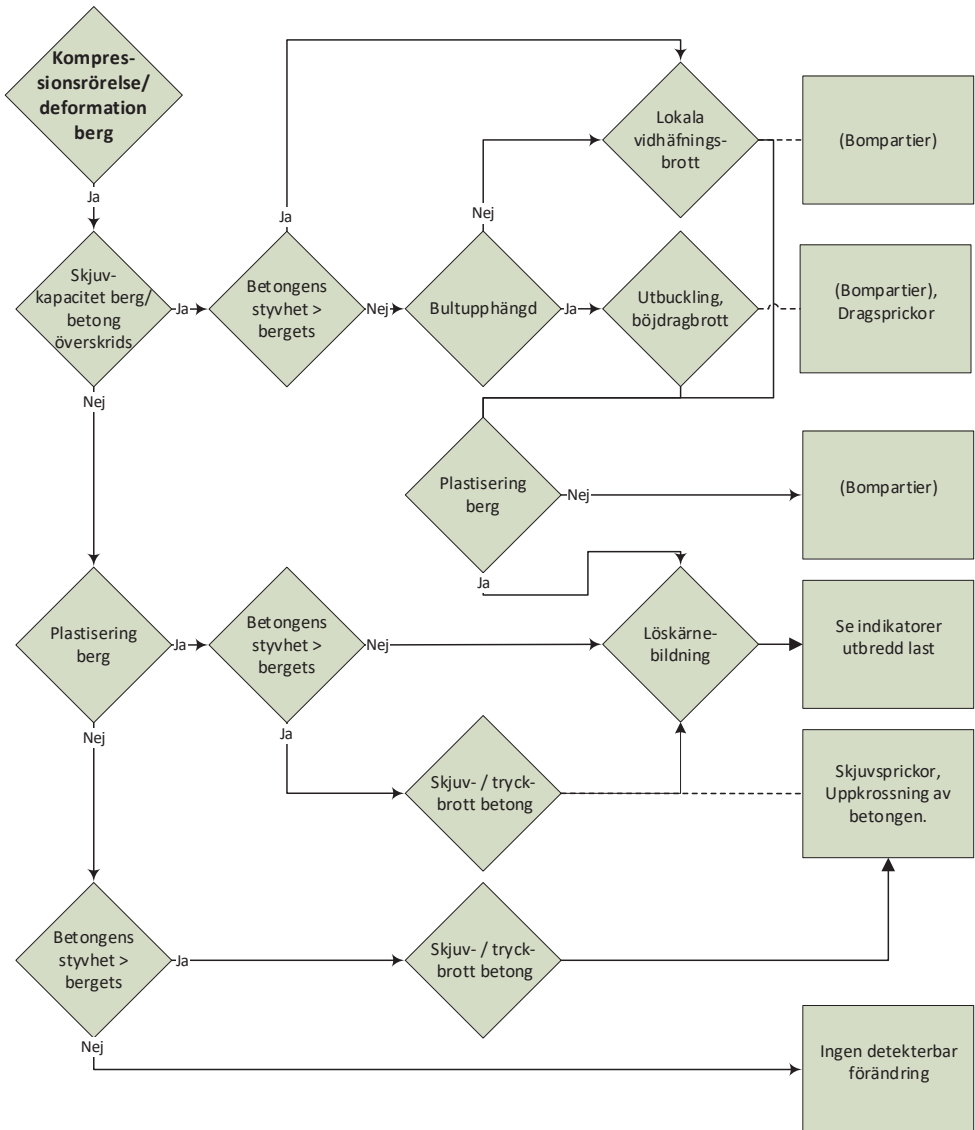
Höga tangentialspänningar subparallellt med sprutbetongen kan ge upphov till icke linjära deformationer, plasticering, av berget. Brottformerna i berget kan vara såväl spröda brott som spjälkning och skjuvbrott samt mer plastiska brottformer som t.ex. squeeze. Brottformerna är komplexa och kan ofta vara sammansatta av flera olika mekanismer. Responser i sprutbetongen styrs i första hand av brottmekanismerna i berget (Figur 90).

Vidhäftningshållfastheten samt skjuvkapaciteten för vidhäftningszonen samman med betongens styvhet styr till stor del hur brotten i sprutbetongen utvecklas. Överskrids skjuvkapaciteten lokalt eller t.ex. mellan bultupphängningar kan det leda till utbuckling (knäckning).

Samverkar betongen med berget kommer tryckbrott att utvecklas i såväl betong som berg. Brotten i berg kan övergå i rena skjuvbrott eller kombinationer spjälkning/skjuvbrott som ger upphov till löskärnebildning. Dessa mekanismer behandlas mer i detalj i andra avsnitt av texten. Sker lokala duktila brott (flytning i

bergmaterialet) eller skjuvrörelser i berget, kan utpressning (squeeze) uppstå, vilket även kan resultera i stora tvärkrafter.

Brottformerna är sammantaget komplexa. Olika typer spänningsstyrda brott är extremt sällsynta i ytliga tunnlar med låga spänningar.



Figur 90 Brott vid höga tryckspänningar i bergmassan - respons sprutbetong. Streckad linje visar indikator under fortgående brottprocess.

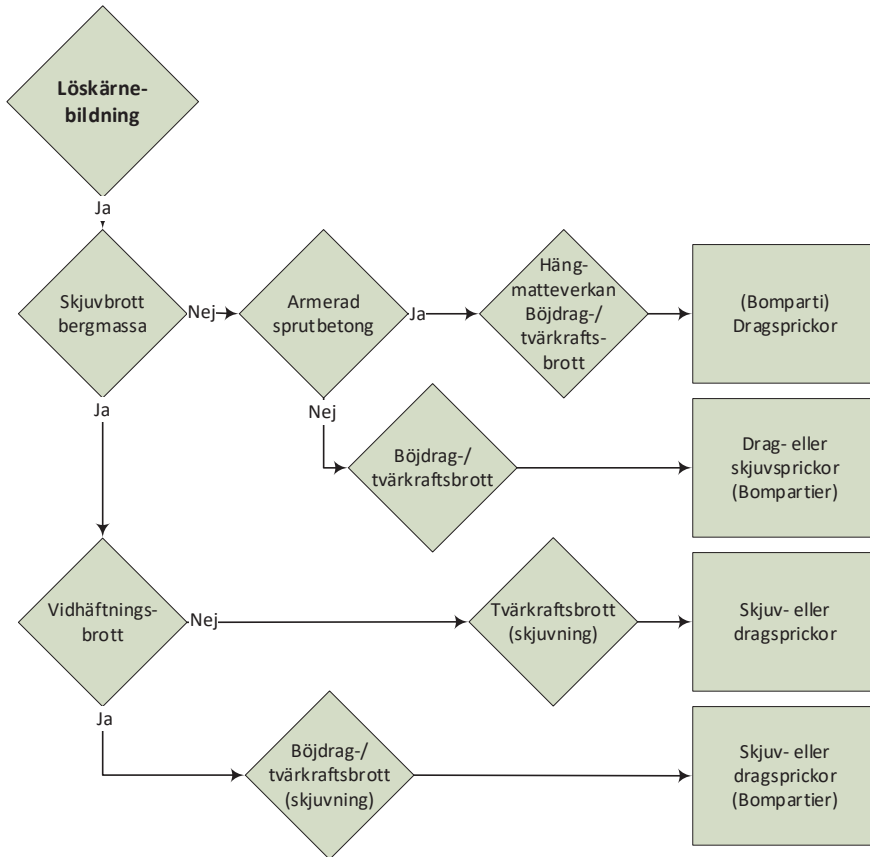
BILAGA 3.6 UTBREDD LAST

Lastfallet utbredd last är ett delfall av brottypen löskärnebildning. I det följande har löskärnebildning varit utgångspunkten för kartläggning av mekanismerna för skador på sprutbetong. Löskärnebildning kan orsakas av spänningar genom spjälkning och

skjuvbrott i bergmassan men också av en nedsättning av kohesionen i ett uppsprucket medium, antingen på grund av deformationer eller på grund av vittring, eller reduktion av normalspänningarna. Brotten i bergmassan kan leda till böjdragbrott (hängmatteverkan) i ytförstärkning, bultbrott och kan slutligt utmytna i skjuvbrott, antingen i anslutning till bultupphängningar eller exempelvis i anfang.

Det finns två huvudtyper av sprutbetongförstärkning som utretts, vidhäftande sprutbetong och bultupphängd. Vidhäftande sprutbetong finns redovisad i Figur 91.

Vidhäftningen har begränsad betydelse för fallet. Saknas vidhäftning och/eller skjuvkapacitet kommer ovanliggande bergmassa att utgöra en dödvikt medan vidhäftning/skjuvkapacitet kan ge viss samverkan med berget. I ett skivigt berg kan sprutbetongen ge visst bidrag till momentkapaciteten för bergskivorna. Brotten är sannolikt mindre renodlade böjdragbrott/tvärkraftsbrott och det är tänkbart att det blir en större ytmässig spridning av dragsprickorna.

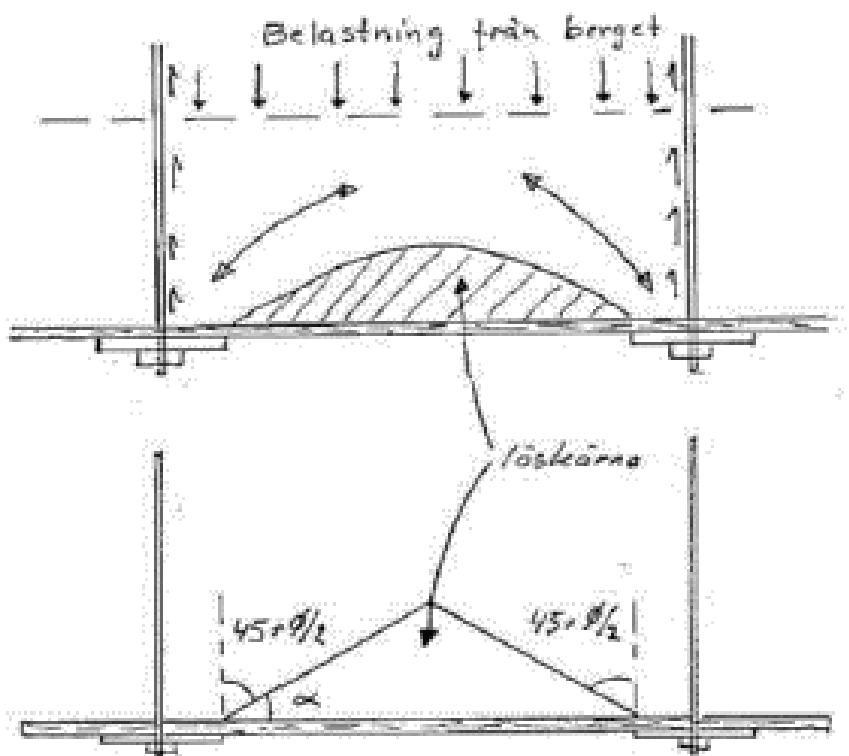


Figur 91 Brott vid löskärnebildning i bergmassan - respons vidhäftande sprutbetong

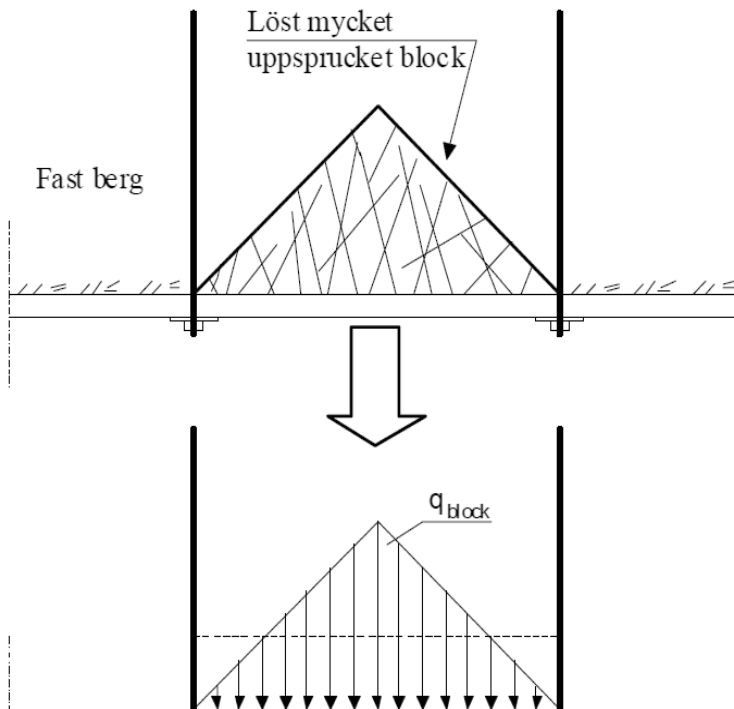
Löskärnebildning kan ge följande lastfall för bultupphängd sprutbetong:

- Uppsprucket berg ger upphov till löskärna som utbreder sig över flera bultar/bultrader.
Sprutbetongen bär last från berget mellan bultarna medan bultarna bär den totala lasten (se Figur 92)
- Uppsprucket block som genererar utbredd last på sprutbetongen (Figur 93)
- Löskärna sträcker sig ovanför bultarna som inte förankrar löskärnan.

Lastfallen kan generera skjuvbrott genom bergmassan som en följdmekanism.

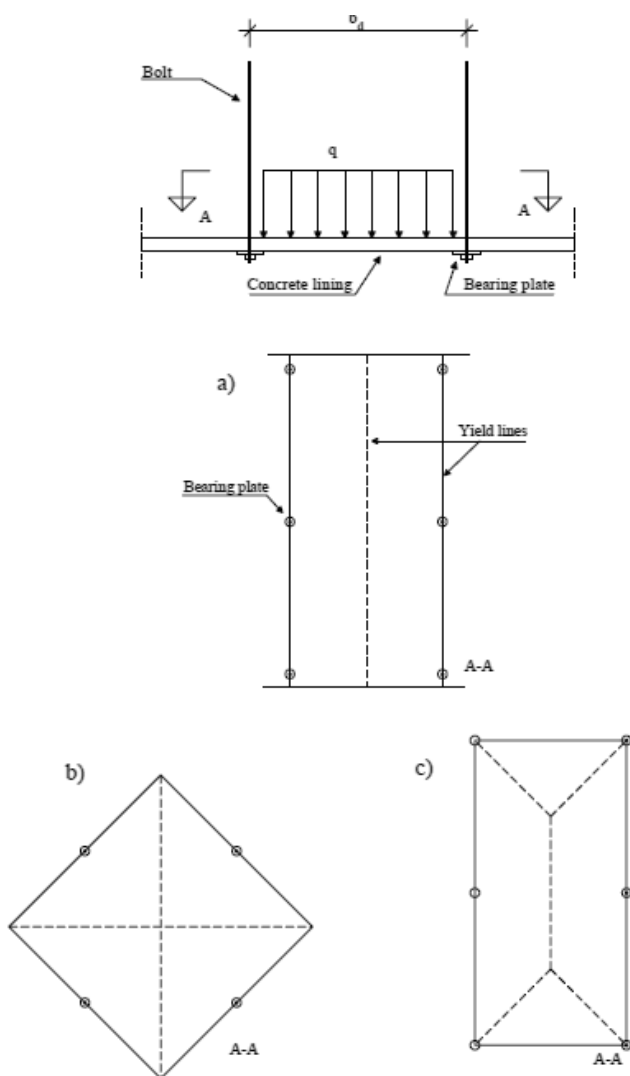


Figur 92 En löskärna som hållas uppe av sprutbetong och bergbultar (från Ansell 2009)



Figur 93 Ett mycket uppsprucket bergparti, block, som belastar sprutbetong och bultar (från Ansell 2009)

Teoretiskt kommer böjdragbrott i sprutbetongen att följa brottlinjer för platta. Figur 94 visar tänkbara teoretiska brottlinjer för plattor där olika bultkonfigurationer utgör upplag för plattan.

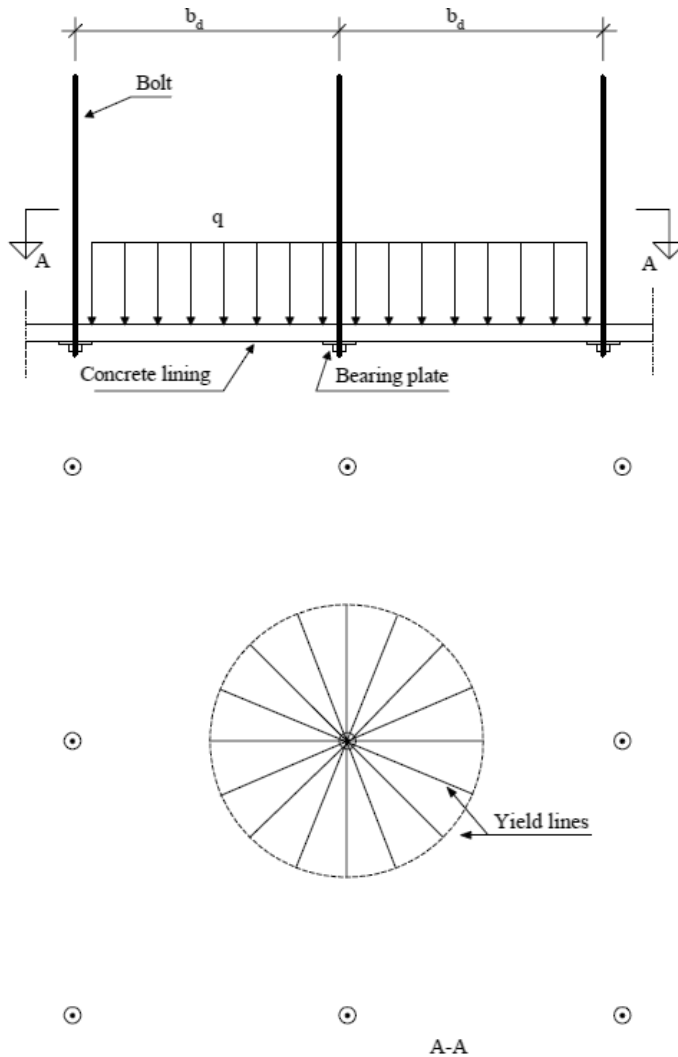


Figur 94 Förenklad lastfördelning av lös bergmassa med tillhörande antagna brottfigurer i förstärkningen (från Nilsson 2003).

Variationer i sprutbetongens egenskaper, tjocklek, krympsprickor, vidhäftning och geometri (som t.ex. kan ge kupolverkan, Nilsson 2003) kommer att påverka hur de verkliga brottlinjerna uppträder.

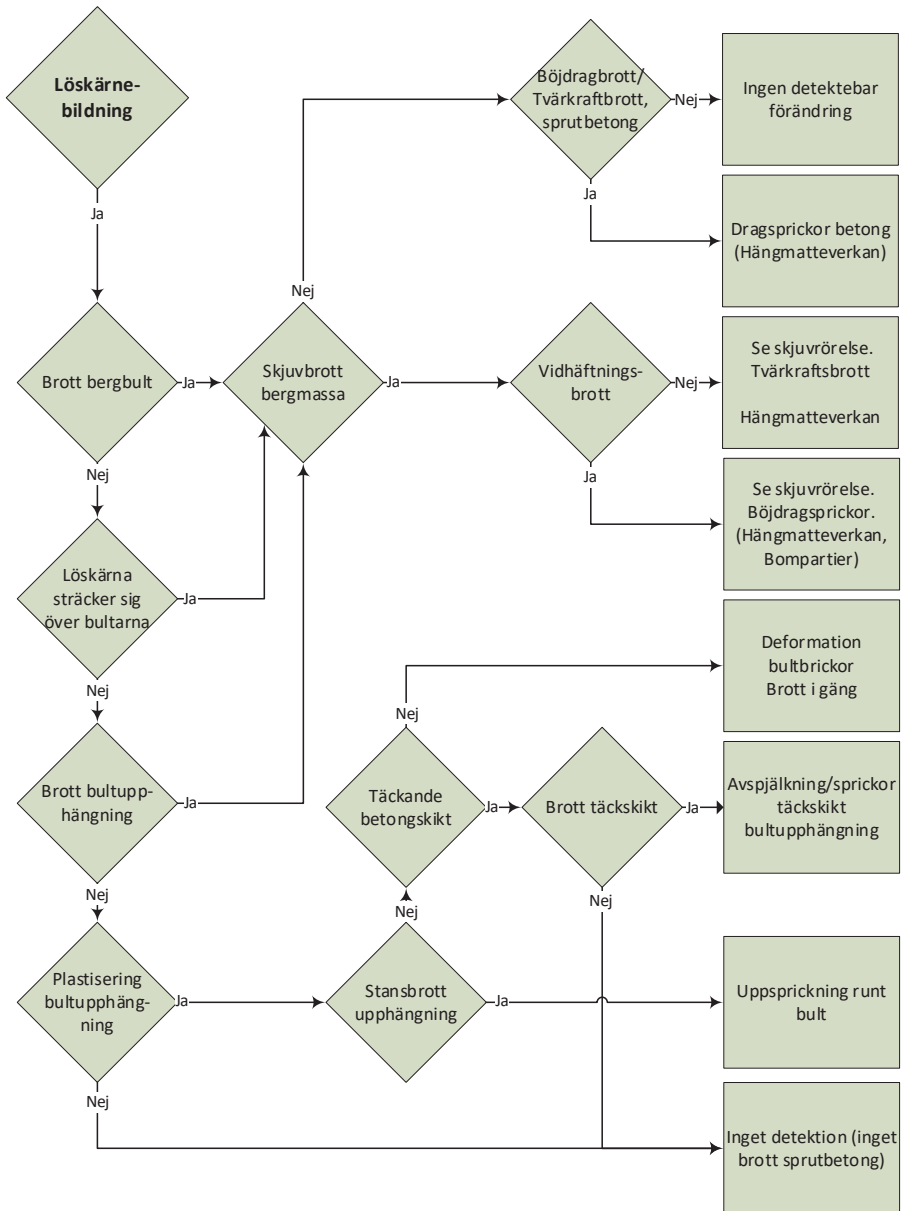
Nilsson (2003) visar att brott i bultupphängd sprutbetong ofta ger upphov till radialsprickor (Figur 95) och att det kan vara en mer vanligt förekommande brottform än stansbrott (Figur 82).

Brott i upphängningen kommer givet att påverka utvecklingen av brottlinjer enligt Figur 95.



Figur 95 Brott runt bricka vid lös bergmassa och bultupphängd sprutbetong (från Nilsson 2003)

Utveckling av brott för bultupphängd sprutbetong vid löskärnebildning finns redovisad i Figur 96.



Figur 96 Brott vid löskärnebildning i bergmassan - respons bultupphängd sprutbetong

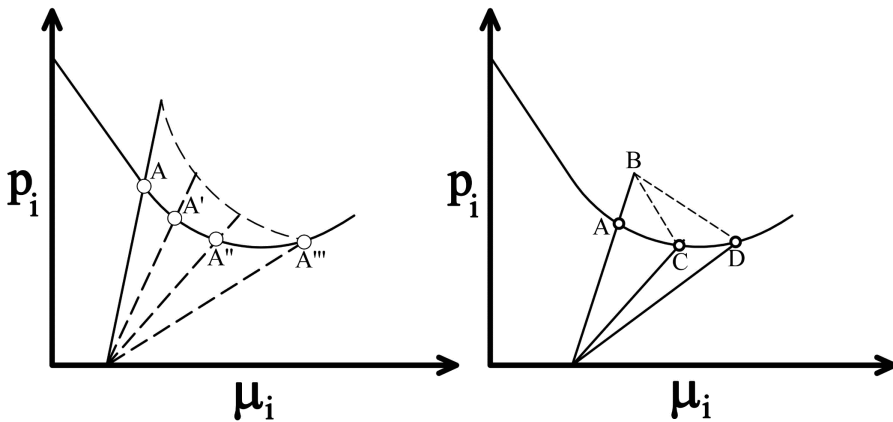
Bilaga 4. Påverkan av nedbrytning på förstärkningssystem

I ett system med en fortgående nedbrytning av bergförstärkningen kommer en reduktion av förstärkningens styvhet eller bergmassans egenskaper att påverka deformationsförloppen vid plasticering eller brott.

Vid nedbrytningen som ger upphov till försprödning av förstärkningen sker ingen förändring av styvheten. Hållfastheten kommer att successivt reduceras tills bärförmågan underskrider jämvikt. Brott kommer inte att föregås av deformation och kan sannolikt enbart förutsägas genom observation av nedbrytningen. I enkla system som där bergförstärkningen verkar upphängande är det troligt att brotten kan bli hastiga utan föregående deformationer.

I ett system där nedbrytningen påverkar såväl förstärkningen styvhet som bärförmåga induceras deformationer i systemet, se Figur 97 a. Exempel på sådana system är valvbildning, balkverkan eller system med förstärkning av låsblock. Varje förstärkningskurva till A och B representerar ett tidssteg i Figur 97 a. Deformationen i ett sådant system kommer att följa kurvan A-A'' medan förstärkningens bärförmåga kommer att följa kurvan B-B''' där systemet i exemplet går till brott vid B''.

Deformationerna i förstärkningen kan i vissa fall även ge upphov till exempelvis ökad last på grund av löskärnebildning som kan innebära ökad last på förstärkningen som illustreras i skärningen mellan tunnelns last-deformationskurva och linjen B-D i Figur 97 b

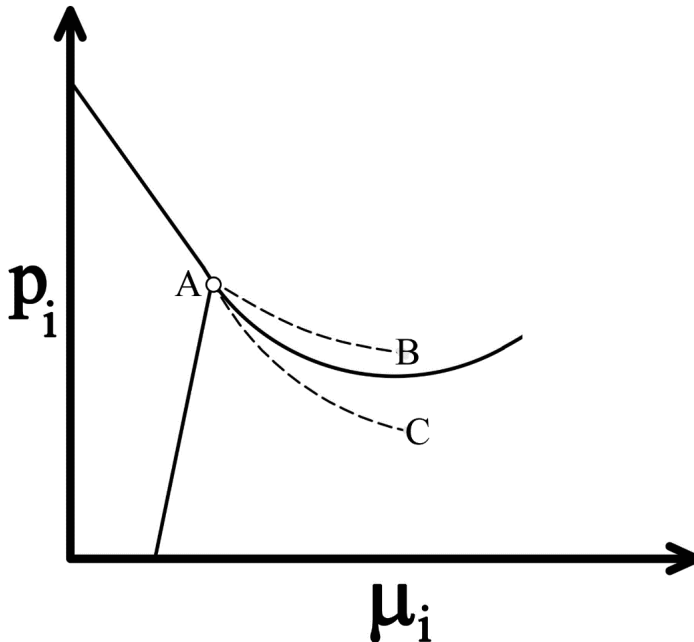


Figur 97 a och b: Ground reaction curve vid nedbrytning.

Enkla exempel där nedbrytning genererar en styvhetsminskning kan vara jämn korrosion på bergbultar, nedsättning av styvhet på stödjande konstruktioner samt bultupphängd sprutbetong samt vidhäftningsbrott som successivt propagerar i takt med att vidhäftningshållfastheten nedsätts. I komplexa förstärkningssystem kan komponenter gå

till brott utan att nödvändigtvis tunnelns stabilitet äventyras på kort sikt. En eller flera komponenter kan utnyttja residualhållfastheten efter brott.

I en situation där stabiliteten på berget enbart kan indikeras genom uppsprickning av sprutbetongen så har sprutbetongen kommer systemet att åtminstone delvis ha gått till brott och stabiliteten upprätthålls enbart genom residualhållfastheten. Detta kan illustreras med kurvan i Figur 98 där linjen A-B är tänkt att representera en arbetskurva där energiupptagningsförmågan överskrider inducerad last och kurva A-C en arbetskurva där residualhållfastheten underskrider last-deformationskurvan och systemet går till brott.

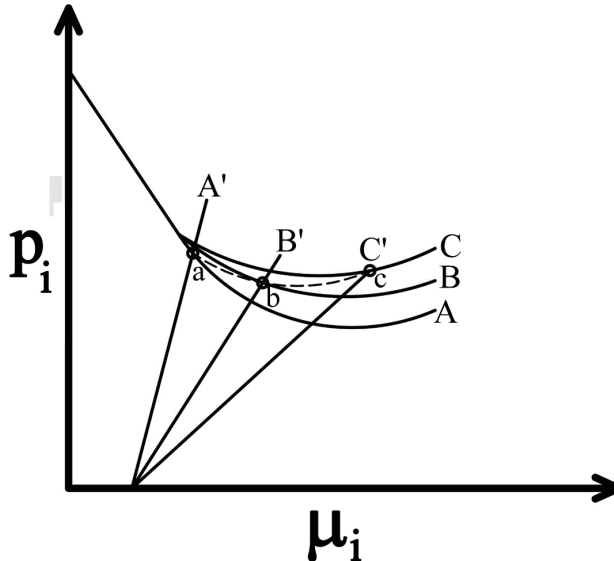


Figur 98: Ground reaction curve vid efterbrott

Vid exempelvis fiberkorrosion kommer förstärkningens arbetskurva att med tiden successivt flytta sig nedåt tills jämvikt underskrids. Vid ett sådant förlopp är sannolikt de tillkommande deformationerna efter det att sprutbetongen överskridit böjdraghållfastheten och spruckit upp mycket små vilket innebär risk för spröda brott.

I system där såväl förstärkning bryts ned som bergmassans mekaniska egenskaper reduceras kommer systemet att bli mer komplicerat. Den tidsberoende nedbrytningen av berget kan illustreras av kurvorna A, B och C för tunneln och A', B' och C' för förstärkningen, se Figur 99. Kurvorna A respektive A' representerar nybyggnadsskedet medan B och C representerar tidpunkter under tunnelns livslängd. Flera scenarior kan uppstå men ett tänkbart scenario är att nedbrytningen av berget är fördröjd jämfört med nedbrytningen av förstärkningen. Den ökade lasten på förstärkningen under B ligger

fortfarande inom förstärkningens arbetskurva till brott B' medan nedbrytningskurvan för förstärkningen C' skär lastkurvan C. Ett sådant scenario innebär att tunneln går till brott vid C' och att deformationerna följer kurvan a, b till c.



Figur 99: Ground reaction curve vid nedbrytning av berg och förstärkning

Rörelser och deformationer för ett enskilt block eller en tunnel är en produkt av förändringarna i egenskaper hos såväl bergmassan som förstärkningen. Systemet bergmassa-bergförstärkning kan vara mycket komplext med många okända faktorer. Förstärkningssystemen i moderna tunnlar har ofta en stor redundans och bortfall av funktion hos enstaka förstärkningselement behöver därför inte påverka tunnelns stabilitet.

Sammanfattningsvis är totalt sett kunskapen kring olika former av nedbrytningsmekanismer av bergmassan och tidsberoende påverkan på förstärkningen ofullständigt känd.

Vi bedömer att det i dagsläget saknas underlag för att kvantitativt kunna fastställa relationen mellan nedbrytning och reduktion av bärförmåga dvs. vilka konsekvenser som nedbrytning får för brottsannolikheten.

Bilaga 5. Analys av data i Batman

BILAGA 5.1 SYFTE OCH MÅLSÄTTNING MED STUDIEN.

Det har inom projektet gjorts en analys av skadefrekvensen i de svenska järnvägstunnlarna. Syftet är att göra en bedömning av den årliga brotts sannolikheten alternativt sannolikheten för att det ska uppstå en allvarlig skada som föranleder åtgärd antingen i form av fördjupad utredning eller förstärkning.

Ett underordnat syfte är också att kartlägga skadebilden för tunnlar.

Analysen har begränsats till fysiska skador på bärande huvudsystem orsakat av antingen nedbrytning eller brott. Skador på dräner/inklädning och läckage/isbildning har inte analyserats.

Analysen baseras på skador som konstaterats vid varje inspektionstillfälle. Skadorna har ofta utretts eller åtgärdats. Hänsyn till detta har inte tagits och följaktligen har utvecklingen av enskilda skador har inte analyserats.

Denna studie har gjorts mycket översiktligt. Det har inom ramen för detta projekt inte funnits möjlighet att gå igenom underlagsmaterialet till inspektionerna vilket innebär att kartläggningen av skadetyper är mycket översiktligt och sannolikt behäftad med många felkällor.

Det har inte gått att bestämma hur stor andel av de inspekterade tunnlar som har förstärkning med sprutbetong eller där det är "naket berg".

Det finns detaljerade kartunderlag som möjliggör en fullständig analys av skadorna som registrerats i BaTMan. En sådan fördjupad analys skulle vara av stort värde.

BILAGA 5.2 ANALYSMETODIK

När analysen genomfördes fanns det i BaTMan registrerat inspektioner från 114 tunnlar med en sammanlagd längd om 67,5 km där det bärande huvudsystemet består av bergtunnel med förstärkning som består av bultning eller kombination av bultning och sprutbetong.

Det finns inte underlag till att relatera skadefrekvensen bergmassa dvs. naket berg respektive sprutbetong till andelen tunnlar med respektive förstärkningsklass. Därför har skadefrekvensen relaterats till hela tunnelbeståndet. Generellt är dock tunnlar som är byggda från den senare delen av 1980 talet fram till nu, dvs. yngre än 30 år vid inspektionstillfället, förstärkta med sprutbetong. Tunnlar äldre än 30 år är till övervägande del förstärkta med selektiv bultning och enbart i enstaka fall förstärkta med sprutbetong. I dessa tunnlar finns ofta platsgjutna stödjande konstruktioner.

För att göra en översiktlig analys av skador i BaTMan har det gjorts en sammanställning av alla skador i TK2 och TK3 som registrerats i BaTMan:s databas. I sammanställningen

framgår hur inspektören karakteriserat skadorna i fälten ”Skadat material”, ”Skadetyper”, ”Skadeorsak” och ”Anmärkning”. Under anmärkning finns i många fall angivet en mer precis skadeorsak som t.ex. ”vittrat bomt berg”, ”bomt berg”, ”bom sprutbetong”, ”lös sprutbetong”, ”instabilt bergblock”, ”löst block” eller ”öppna sprickor”. I många fall finns enbart förslag till åtgärd beskriven eller anmärkning är lämnad blank.

I Tabell 23 och Tabell 24 visas för ”brott i bärande huvudsystem” hur de olika kombinationerna av ”Skadetyper”, ”Skadeorsak” som finns fördefinierade i BaTMan använts av inspektörerna vid registrering av skador i systemet. I Tabell 23 redovisas skador på berg, bult mm och i Tabell 24 skador på sprutbetong.

Tabell 23 Kombinationer av fördefinierat ”skadetyp” och ”skadeorsak” som finns registrerade i BaTMan för enskilda skador på berg, bergbult nät mm.

Skadetyp	Skadeorsak - Skadat material	Berg/Bergmassa	Sten	Stål	Övrigt
Avflagnig	Belastning	1			
Avvikelse från standard	Byggfel			2	
Bristande beständighet	Miljöpåverkan	7			
Brott	Belastning	8			
Deformation	Belastning	1			
	Funktionspåverkan			1	
Lös	Belastning	304	1		
	Belastning	47			
	spänningsomlagring				
	Biologiskt angrepp	1			
	Byggfel	1			
	Frostsprängning	7			
	Funktionspåverkan	46			
	Fysikaliskt angrepp	1			
	Miljöpåverkan	3			
	Saltkristallisation	1			
	Vatten	2			
Övrigt	6				
Saknas	Byggfel			1	
Spricka	Belastning	20			
	Belastning	13			
	spänningsomlagring				
	Vatten	1			
Utfall	Belastning	1			
	spänningsomlagring				
Vittring	Belastning			1	
	Erosion	4			
	Frostsprängning	2			
	Fysikaliskt angrepp	2			
	Miljöpåverkan	2			
Övrigt	Belastning	113			
	Kemiskt angrepp	1			
	Övrigt	74			1

Tabell 24 Kombinationer av fördefinierat ”skadetyper” och ”skadeorsaker” som finns registrerade i BaTMan för enskilda skador på sprutbetong.

Skadetyper	Skadat material Skadeorsaker	Fiberarm erad betong	Fiberarm erad sprutbeto ng	Oarmera d betong	Oarmera d sprutbeto ng	Stångarm erad sprutbeto ng
Avflagnin g	Belastning		2			
Brott	Belastning		5		5	
Böjskjuvs pricka	Belastning		1			
Dragspric ka	Belastning		4		1	7
	Funktionspåverkan		1		4	
Lös	Belastning	1	15		13	
	Belastning spänningsomlagrin g	5	5	1	3	
	Belastning trafik		1			
	Byggfel		19			
	Funktionspåverkan		19		3	
	Miljöpåverkan		2		7	
	Produktion hantering		31			
	Vatten	1	11			
Övrigt		10				
Saknas	Övrigt		4		2	
Spjälknin g	Belastning				1	
	Miljöpåverkan					1
Spricka	Belastning		1		2	1
	Funktionspåverkan		1			
Sår	Funktionspåverkan				2	
Utfall	Belastning				1	1
	Belastning spänningsomlagrin g		2			
Övrigt	Belastning				2	
	Byggfel				2	
	Övrigt		1			16

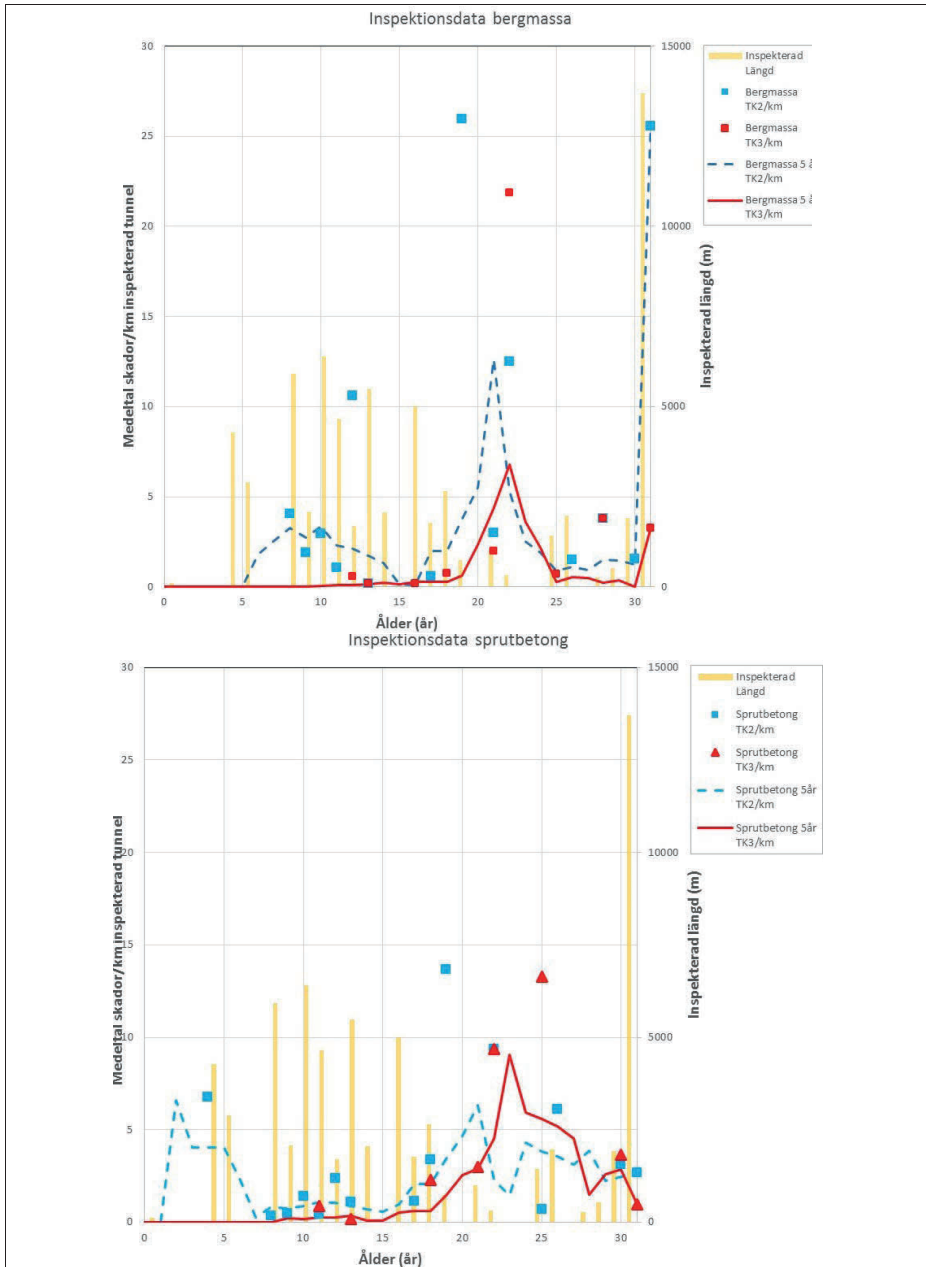
Den stora spridningen i hur inspektörerna valt att registrera skadorna är en följd av att koderna i BaTMan för skadat material, skadetyper och skadeorsaker inte uppdaterats så att de stämmer överens med såväl material som skadebilderna i det stora tunnelbeståndet. Det går ej heller att fastställa andelarna av de olika förstärkningssystemen i tunnelarna.

För att kunna göra en statistisk bearbetning av materialet har det gjorts en tolkning av underlagen avseende såväl skadat material som skadetyper/ skadeorsaker i ett fåtal klasser. Arbetet har utförts på kort tid vilket medfört att tolkningen har brister eftersom det inte funnits tid att gå igenom grundmaterial och inspektions PM.

Analysen har inriktats på bärande huvudsystem och skadorna har klassificerats som ”brott i bärande huvudsystem” och ”nedbrytning av bärande huvudsystem”. I många fall är det omöjligt att särskilja om grundorsaken till ett brott (TK3) är nedbrytning eller att belastning. I dessa fall har skadan registrerats under såväl ”brott” som ”nedbrytning”. Det måste också noteras att grundorsaken till att det uppstått ett bomparti inte går att utläsa ur statistiken.

BILAGA 5.3 ANALYS AV BROTT PÅ BÄRANDE HUVUDSYSTEM

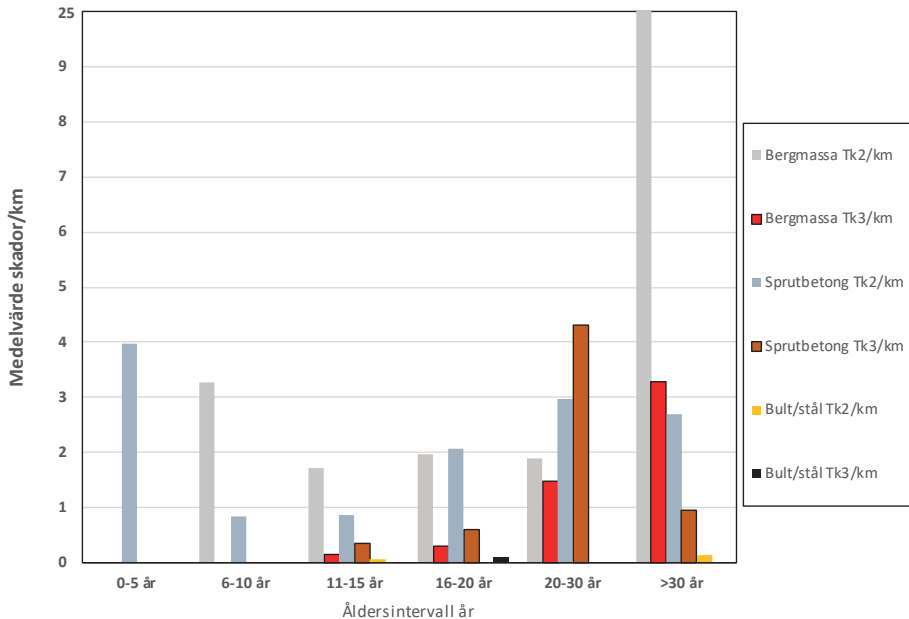
I Figur 100 redovisas frekvensen av skador i bergmassan respektive sprutbetong per km relativt åldern på tunneln. För tunnlar äldre än 30 år är beståndet litet och de är till stor del förstärkta med ströbult och stödjande betongkonstruktioner. Sprutbetong förekommer mer sällan. Vi har inte funnit några säkra trender och resultaten år för år är starkt individberoende och beroende på hur skadorna redovisats, en och en eller sammanfattade i partier av tunnelarna. Ett exempel på detta är vid 20 år där enbart en tunnel inspekterats som har många skador. I diagrammet finns även redovisat glidande medelvärde över 5 år.



Figur 100 Skador, TK2 och TK3, per km som redovisats i BaTMan för bergmassa och sprutbetong.

Resultaten har sammanfattats i Figur 101 där skadorna redovisas per 5 års period. Notabelt är att skador i sprutbetong som klassats som TK2 förekommer med relativt hög skadefrekvens från det tunnarna är driftsatta. En tänkbar förklaring är att det finns en relativt hög frekvens av bompartier i tunnarna och möjligen även att krympsprickor detekterats. Motsvarande bild finns för skador i bergmassan efter 5 år.

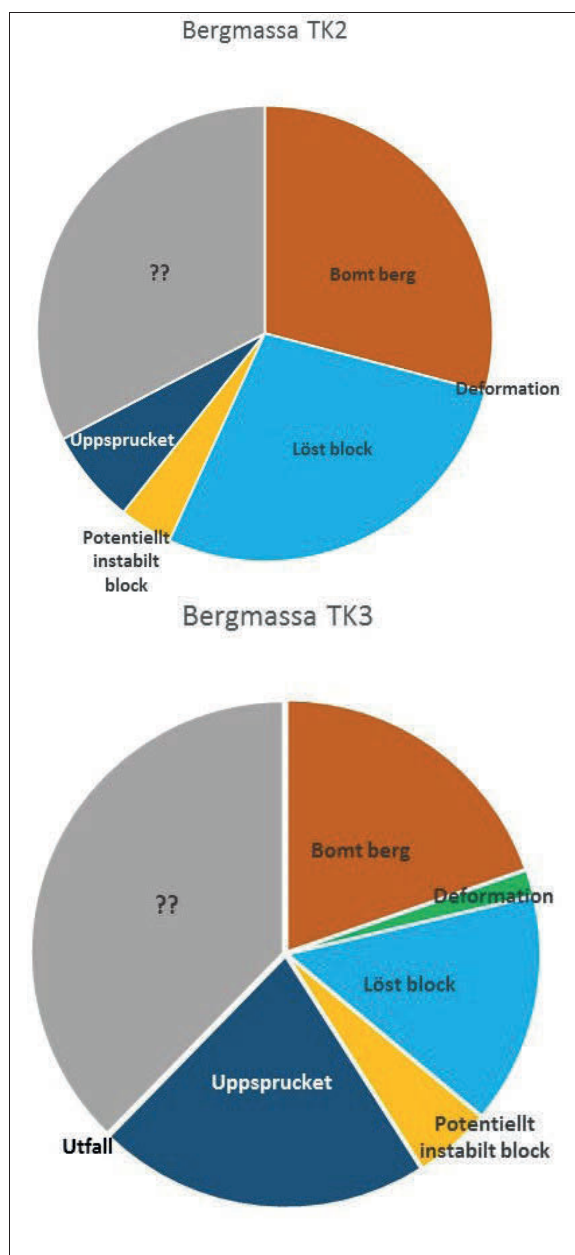
Skador som klassats som TK3 förkommer först när tunnarna är 10 år eller äldre. Skadefrekvensen ökar därefter med ålder. För sprutbetong så är skadefrekvensen lägre vid tunnlar äldre än 30 år vilket kan förklaras med att andelen sprutbetong är liten.



Figur 101 Skadefrekvens, brott, TK2 och TK3 per km fördelat på 5 års spann

Sammantaget är den totala skadefrekvensen TK2 ca 5 skador per km och skadefrekvensen TK3 ca 5-6 skador per km efter 20-30 år.

Vi har även analyserat skadeorsaken. Baserat på angiven skadeorsak, skadat material och fritext har skadeorsaken delats in i egna klasser. När det inte går att säkert avgöra skadeorsak har skadan klassificerats med ett frågetecken. Indelningen för skador på bergmassan framgår av Figur 102.



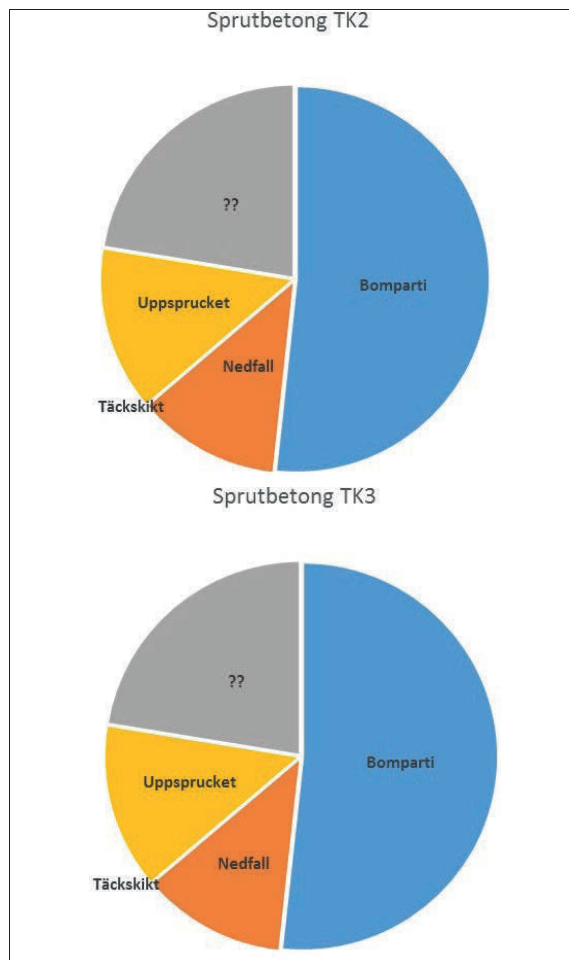
Figur 102 Skador i bergmassan vid brott, TK2 och TK3 fördelade på skadeorsak.

Av Figur 102 framgår att de huvudsakliga skadeorsakerna är bomt berg, löst eller potentiellt instabilt block samt uppsprucket berg. Det framgår inte hur löst block

identifierats men det är sannolikt bomt berg och kombinationer bomt berg och strukturer i berget som kan ge utfall. Klassning som potentiellt instabilt berg är i många fall sannolikt givet av strukturer i berget som kan ge upphov till kilbrott.

Motsvarande uppföljning har gjorts för sprutbetong, Figur 103 Den helt dominerande skadeorsaken är bomparti som omfattar mer än 50 % av skadorna. Nedfall och uppsprickning motsvarar i storleksordningen 15 % vardera.

Det framgår inte tydligt av databasen i BaTMan om det finns andra indikatorer som kan kopplas till bompartier och i sådana fall i vilken utsträckning. I vissa fall har inspektören angivit som fritext att det finns bompartier kombinerat med nedfall av sprutbetong eller uppsprickning.

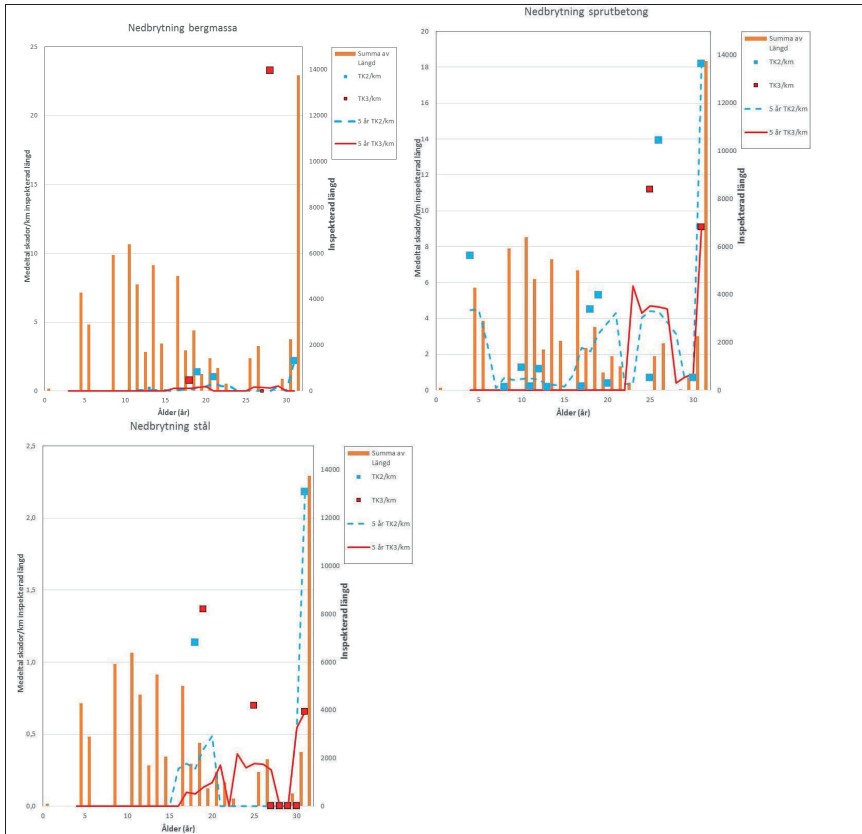


Figur 103 Skador i sprutbetong vid brott, TK2 och TK3 fördelade på skadeorsak.

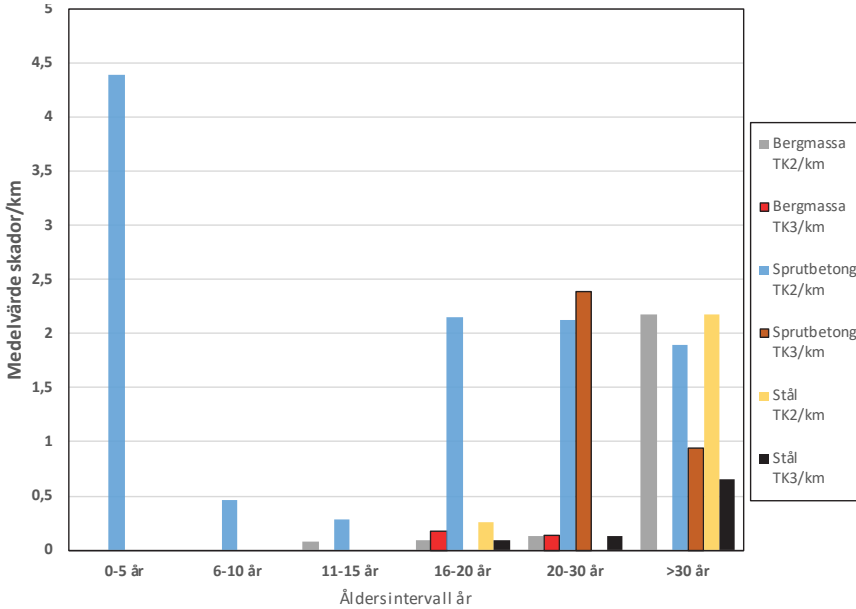
BILAGA 5.4 ANALYS MED INRIKTNING MOT NEDBRYTNING

Skador på bergmassa, sprutbetong och stål (bergbult, armering och infästningsmaterial) har analyserats i databasen. Liksom för brott så kan man se en hög skadefrekvens för vissa år där den inspekterade längden är liten och motsvarar en enstaka tunnel Figur 104.

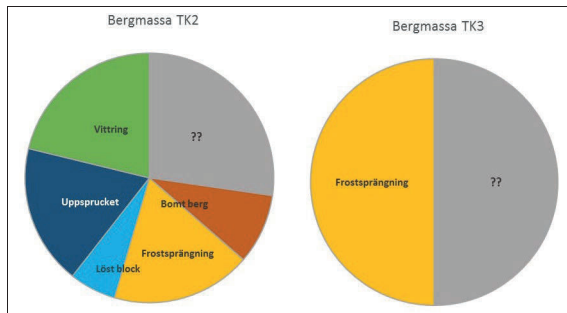
Generellt är skadefrekvensen för berg mycket låg och motsvarar i storleksordningen 0.1-0.2 skador, TK3 per km inspekterad tunnel (Figur 105). Skadeorsaken framgår av Figur 106. Notabelt är att det finns ett flertal angivna skadeorsaker för TK2 medan skadeorsaken för TK3 antingen är okänd eller frostsprängning.



Figur 104 Skadefrekvens för bergmassa, sprutbetong och stål samman med inspekterad längd.



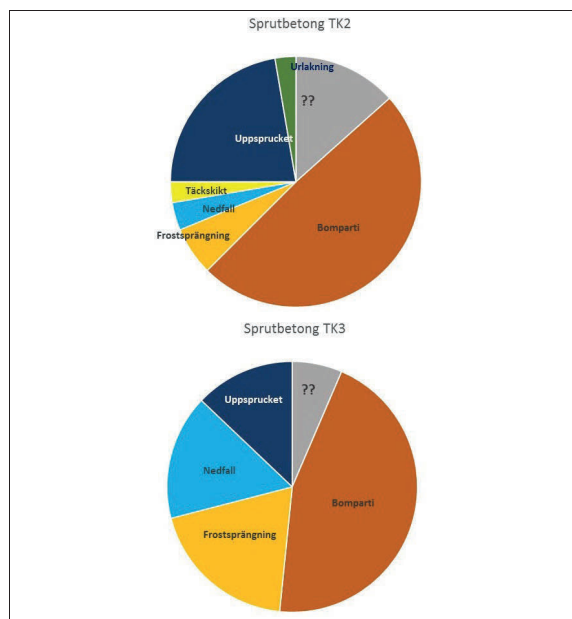
Figur 105 Skadefrekvens, nedbrytning, TK2 och TK3 per km fördelat på 5 års spann



Figur 106 Skador vid nedbrytning bergmassa, TK2 och TK3, fördelat på skadeorsak.

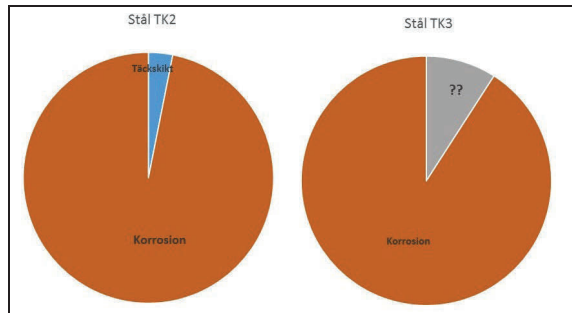
För sprutbetong kan man observera att det är en relativt hög skadefrekvens, 4 skador TK2 per km för nya tunnlar yngre än 5 år. Orsaken är inte analyserad men det är troligt att det finns mindre bompartier och öppna sprickor som orsakats av utförande och inte detekterats förrän inspektion utförts (Figur 107). Skador TK2 ökar efter 15 år till att ligga på en nivå motsvarande ca 2 skador per km. Skador som klassats som TK3 har uppstått först efter mer än 20 år. Skadefrekvensen är ca 1-2 TK3 per km inspekterad tunnel (Figur 105). Kvalitativt kan man också se att andelen skador TK2 ökar efter 30 år medan skador

TK3 saknas. En trend som kan iakttagas i Figur 107 är att andelen bompartier och uppsprickning minskar för TK3 medan andelen frostsprängning och nedfall ökar.

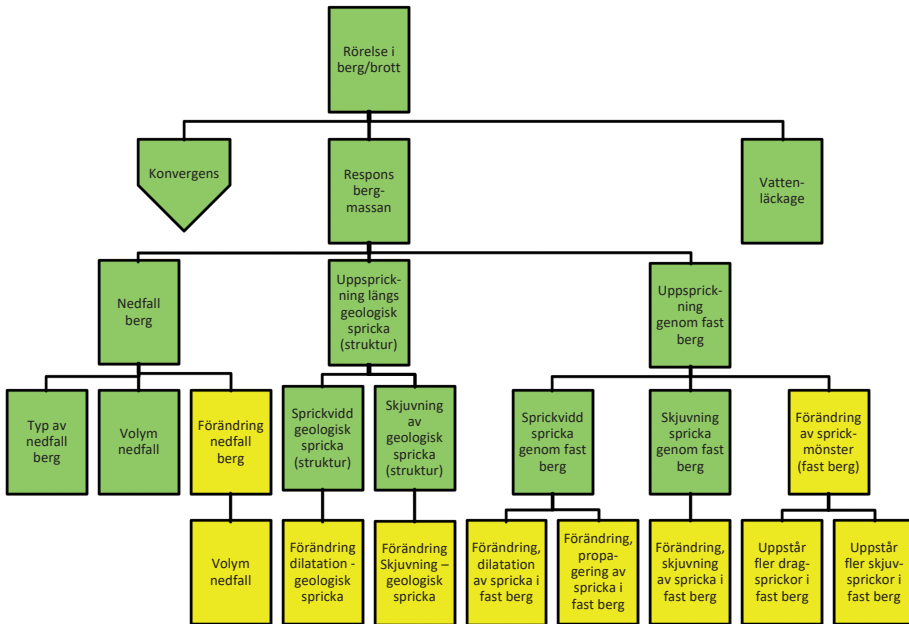


Figur 107 Skador vid nedbrytning sprutbetong, TK2 och TK3, fördelat på skadeorsak

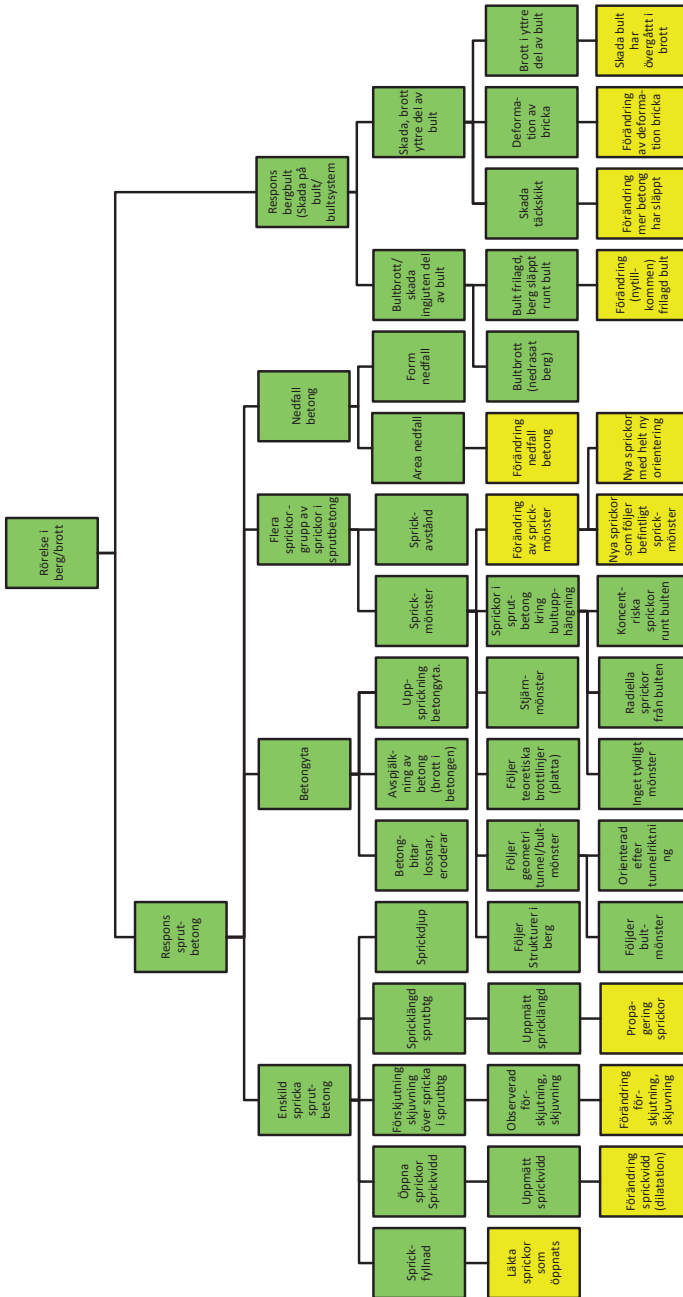
Skadorna på stål avser luftexponerade delar av bergbult eller infästningsmaterial. I några fall förekommer även armeringskorrosion som skadeorsak, Figur 108. Bortfall av täckskikt har även lagts som skada på stål. Orsaken till bortfall av täckskikt är oklar, den kan vara såväl korrosion som nedbrytning av sprutbetongen. Korrosionsskador förekommer först efter 15 år. Skadefrekvensen TK3 är låg, sammantaget i storleksordningen 0.1 skador per km upp till 30 år. I tunnlar äldre än 30 år ökar skadefrekvensen till ca 0.6 skador per km, Figur 105.



Figur 108 Skador vid nedbrytning Stål, TK2 och TK3, fördelat på skadeorsak



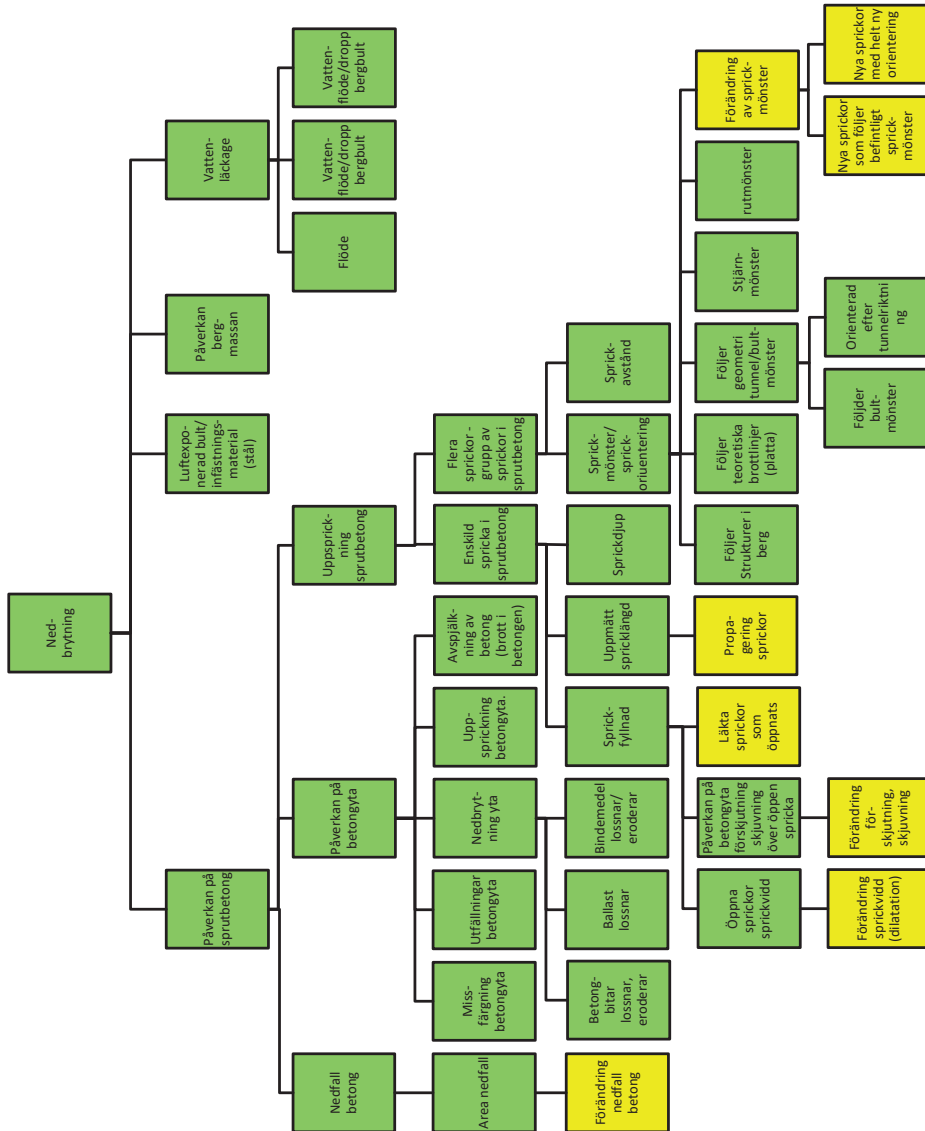
Figur 110: Bergmassan, indikatorer på rörelser i berg.



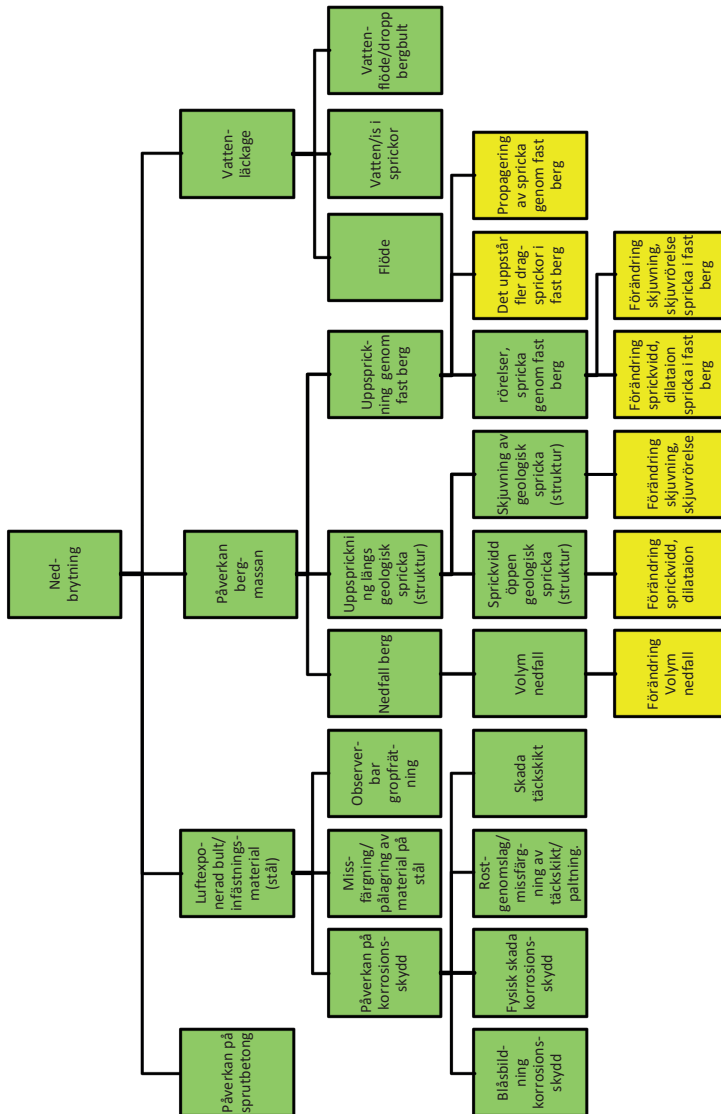
Figur 111: Bergförstärkning, indikatorer på rörelser i berg.

BILAGA 6.2 INDIKATORER SOM VISAR PÅ NEDBRYTNING

Indikatorer på nedbrytning finns redovisade i Figur 112 och Figur 113 . Ett flertal av indikatorerna avser främst brott i berg men kan även visa på nedbrytning.



Figur 112: Indikatorer på olika nedbrytningsprocesser betong



Figur 113: Indikationer på olika nedbrytningsprocesser bergbult samt bergmassan.

Bilaga 7. Likelihoodfrågor till experterna

Experterna fick dels ett följebrev som beskrev problemet, dels själva frågeformuläret.

BILAGA 7.1 FÖLJEBREVET

SÄTTA VIKT PÅ INDIKATORER VID FJÄRRINSPEKTION. BEFO-PROJEKT 357

Om projektet

I BeFo-projektet 357, Utveckling av metodik för inspektion av tunnlar med innertak, arbetar vi med att ta fram en metodik för att bestämma säkerheten hos tunnlar när innertak gör att man inte kommer åt berget för handnära besiktning.

Vi får då förlita oss på sådana tecken som kan ses med kamera. Vi kallar sådana tecken för indikatorer: *observerbara förhållanden som bedöms kunna tjäna som underlag till en bedömning av de icke observerbara förhållanden som avgör åtgärdsbehovet.*

Indikatorer är alltså tecken som är kopplade till tunnelns tillstånd.

Om det t.ex. är ett pågående brott så kan vi förvänta oss att se vissa tecken, t.ex. sprickor. Men samtidigt är det så, att tecknen kan förekomma ändå (t.ex. krympsprickor). De flesta indikatorerna är alltså inte 100-procentigt utslagsgivande utan det är så att det till varje indikator finns en viss trolighet att den orsakats av brott och en annan trolighet att det finns en annan mekanism. Denna trolighet brukar man kalla likelihood. Vad vi nu vill göra är att få en uppskattning om storleken på den likelihood som kopplas till en viss indikator och en viss brottmekanism.

Likelihood – hur tänka?

Ange likelihood i procent, så att 100% betyder att indikatorn alltid finns vid den aktuella (brott)mekanismen och 0% betyder att den aldrig finns.

Man skall tänka så här:

*Om det är brott, hur troligt är det då att se indikatorn?
Om det inte är brott hur troligt är det att se indikatorn
ändå?*

Man kan säga att hur ”bra” en indikator är som beslutsunderlag beror på fördelningen mellan likelihood vid brott och likelihood vid andra orsaker. Om kvoten mellan dem (likelihood-kvoten) är nära 1 så tillför inte indikatorn något, det kan ju lika gärna vara brott som något annat. Om däremot kvoten är stor så är indikatorn effektiv.

Vissa likelihood-värden kan vara mycket små, det kan vara extremt ovanligt att se indikatorn om det inte är brott. Exempel: likelihood när det inte är brott för indikatorn

”bultbrott gäng” är mycket, mycket liten. Men eftersom likelihood vid brott är ganska stor får man en stor likelihood-kvot och indikatorn är därför effektiv. Ni får göra ert bästa att skatta dessa små värden. Man kanske kan tänka: ”Hur många ”bultbrott gäng” skulle jag behöva titta på för att hitta något som inte orsakats av brott?” Om det är 10 000 så blir likelihood $1/10\ 000 = 0,01\%$.

Kom hela tiden ihåg, att vi inte funderar på hur troligt det är att brott inträffar, när vi värderar likelihood för en indikator: Vi förutsätter brott, respektive inte brott och bedömer hur troligt att då se indikatorn. Vi har dock en kontrollfråga: ”Givet att indikatorn finns; I hur stor andel av observationerna är orsaken att det inte är brott?” där man utgår från att man sett indikatorn.

BILAGA 7.2 FRÅGELISTAN OM INDIKATORER

Brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem
Det har inträffat ett brott orsakad av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem. <i>Hur troligt är det att indikatorn förekommer vid brott?</i>
Det har inte inträffat ett brott. <i>Hur troligt är det att ändå se indikatorn?</i>
<u>Givet att indikatorn finns; I hur stor andel av observationerna har indikatorn orsakats av annat än brott?</u>
Det är ett pågående (aktivt) brott. Hur troligt är det att indikatorn förekommer vid brott?
Det är inte ett pågående (aktivt) brott. <i>Hur troligt är det att ändå se indikatorn?</i>
<u>Givet att indikatorn finns; I hur stor andel av observationerna har indikatorn orsakats av annat än brott?</u>
Olika brottyper; inträffat brott
Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av kil/skjuvning pga rörelse av rigid kropp. <i>Hur troligt är det att det att indikatorn förekommer vid denna brottyp?</i>
Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av löskärnebildning blockigt berg eller zon/finblockigt berg mm. <i>Hur troligt är det att det att indikatorn förekommer vid denna brottyp?</i>
Överbelastning av bärande huvudsystem, orsakad av skjuvrörelse i löskärna/mycket dåligt berg. <i>Hur troligt är det att det att indikatorn förekommer vid denna brottyp?</i>
Överbelastning av bärande huvudsystem orsakad av rörelser i bergmassan på grund av annan mekanism än ovanstående. <i>Hur troligt är det att det att indikatorn förekommer vid denna brottyp?</i>
Total förekomst av indikator
Om man tittar längs hela tunneln. I hur stor andel av tunneln saknas indikatorn (i procent av arean).
Nedbrytning, krympning mm.
Om du har påverkan av krympning i sprutbetong (som alltså ej beror på rörelser i berg). <i>Hur troligt är det att indikatorn förekommer?</i>

Du har <u>inte</u> påverkan av krympning i sprutbetong. Hur troligt är det att indikatorn ändå förekommer?
Om du har påverkan av nedbrytning, exogena processer som t.ex. frostsprängning. Hur troligt är det att indikatorn förekommer?
Du har <u>inte</u> påverkan av nedbrytning, exogena processer. Hur troligt är det att indikatorn ändå förekommer?
Om du har påverkan av nedbrytning, kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion. Hur troligt är det att indikatorn förekommer?
Du har <u>inte</u> påverkan av nedbrytning, kemiska processer. Hur troligt är det att indikatorn ändå förekommer?
Om du har korrosion ingjutna delar av bult (utan korrosionsskydd) i berget, Hur troligt är det att indikatorn förekommer?
Du har <u>inte</u> korrosion ingjutna delar av bult i berget, Hur troligt är det att indikatorn ändå förekommer?

BILAGA 7.3 FRÅGELISTAN OM BROTTYPER RELATERAT TILL BERGTYP

Bergklasser (typberg)	Frivilligt angebedömt spannen Q-värde	Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av kil/skjuvning pga rörelse av rigid kropp	Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av löskärne bildning blockigt berg eller zon/finblockigt berg mm	Om du har överbelastning av bärande huvudsystem, hur sannolikt är det att den är orsakad av skjuvrörelse i löskärna eller mycket finblockigt/uppkrassat berg	Hur sannolikt är det att det att överbelastningen orsakats av annan brotttyp.	Summa
Alla tunnlar	N/A					100 %
Bergtyp 1: Storblockigt kompetent berg med 2-3 sprickgrupper. Normal förstärkning för denna bergtyp är vidhäftande sprutbetong och ströbultning.						
Bergtyp 2: Medelblockigt berg med 3-5 sprickgrupper. Normalt systembultas berget och block mellan sprutbetongen bärs upp av sprutbetongen.						

<p>Saknas vidhäftning används fiberarmerad vidhäftande sprutbetong.</p>						
<p>Bergtyp 3: Medelblockigt berg, 3-5 sprickgrupper, med förekomst av lerfyllda sprickytor där det finns potential för större skjuv/kilbrott. Normalt systembultas berget och block mellan sprutbetongen bärs upp av sprutbetongen. Saknas vidhäftning används fiberarmerad vidhäftande sprutbetong.</p>						
<p>Bergtyp 4: Medelblockigt berg, med flackt stående skivighet. Lerfyllda sprickytor och/eller förskiffringsplan förekommer. Normalt förstärks berget med systembultning och antingen</p>						

vidhäftande eller bultupphängd sprutbetong. Ströbultning och vidhäftande sprutbetong kan förekomma.						
Bergtyp 5: Finblockigt berg, krosszoner. Normalt förstärks berget med systembultning och bultupphängd fiberarmerad sprutbetong. Potentiellt instabila bergpartier mellan bultarna hängs upp med sprutbetong.						
Saknad bergtyp??: Tycker du att det är en för grov indelning och att någon bergtyp saknas så skriv in den						

Bilaga 8. Utvärdering av Indikatorer

Indikatorgrup p	Vattenläcka ge	Vattenläcka ge	Vattenläcka ge	Vattenläcka ge	Nedfall sprutbeton g
Indikator	Droppande vatten	Rinnande vatten	Vatten/is sprickor	Fuktande yta runt eller dropp från bergbulten	Nedfall sprutbeton g oavsett area

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	1	1	1,5	1,1	25,8
<i>Likelihoodkvot B</i>	1,3	2	6,7	1	63,3
<i>Likelihoodkvot C</i>	0,5	1,5	2,5	3,8	108,3
<i>Medel likelihoodkvot</i>	0,9	1,5	3,6	2	65,8
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	0,9	1,4	2,9	1,6	56,2
<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	12,3
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	24,4
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	666,7
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	234,5

<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	58,5
<i>Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
Medel inträffat och pågående brott A-C	0,9	1,5	3,6	2	150,1
Median inträffat och pågående brott A-C	1	1,5	2,5	1,1	36,5
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	0,9	1,4	2,9	1,6	25,8
Vald likelihoodkvot	1	1,5	2,5	1,5	50
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	0,5%	0,7%	1,2%	0,7%	20,1%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	2,5%	3,7%	6%	3,7%	56,2%

Nedbrytning

<i>Krympning</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	1	1	1	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	1	1	1	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	1	1	1	-	-

<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	1	1	1	-	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>	1	1	1		
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	0,5%	0,5%	0,5%	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	2,5%	2,5%	2,5%	-	-
<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängnin g.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	25	10	30	-	15
<i>Likelihoodkvot C</i>	2	1	2	-	2,9
<i>Medel likelihoodkvot</i>	13,5	5,5	16	-	9
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	7,1	3,2	7,7	-	6,5
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	7,5	5	15		6
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	3,6%	2,5%	7%	-	2,9%
Brottsannolikhet valt värde	16%	11%	28%	-	13,3%

(Bassannolikhet 2.5%)					
<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	2,5	6	20	9,2	4
Likelihoodkvot C	2	1	1	2	5,2
Medel likelihoodkvot	2,3	3,5	10,5	5,6	4,6
Geometriskt medel likelihoodkvot	2,2	2,4	4,5	3,8	4
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>	2,2	3,5	5	6	4
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	1,1%	1,7%	2,5%	2,9%	2%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	5,3%	8,2%	11%	13%	9%
<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
Likelihoodkvot A	2,3	2,3	2,3	2,3	-

<i>Likelihoodkvot B</i>	1	1,3	1	2,1	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	2	10	1	13	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	1,8	4,5	1,4	5,8	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	1,7	3	1,3	3,8	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>	2	4	1,5	6	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	1%	2%	0,7%	2,9%	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	4,9%	9,3%	3,7%	13%	-

Indikatorgrup p	Nedfall sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong
Indikator	Förändring av nedfall sprutbetong. Mer betong har lossnat	Spricka i sprutbetong, sprick-vidd < 1 mm	Spricka i sprutbetong, sprick-vidd > 5 mm	Spricka i sprutbetong, sprick-vidd 1-5 mm	Läkt spricka i sprutbetong har en sprickfyllnad som öppnat sig

Brott

Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A	-	0	80	4	-
Likelihoodkvot B	166,7	2,5	5000	40	30
Likelihoodkvot C	100	2	2,5	4	5,8
Medel likelihoodkvot	133,3	1,5	1694,2	16	17,9
Geometriskt medel likelihoodkvot	129,1	0,2	100	8,6	11,1

Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A	-	0	90	4	-
Likelihoodkvot B	50	1,7	500	20	10,8
Likelihoodkvot C	999	1,5	500	50000	20
Medel likelihoodkvot	524,5	1,1	363,3	16674,7	15,4
Geometriskt medel likelihoodkvot	223,5	0,2	282,3	158,7	13,9

Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i					
--	--	--	--	--	--

<i>bärande huvudsystem</i>					
Medel inträffat och pågående brott A-C	328,9	1,3	1028,8	8345,3	16,6
Median inträffat och pågående brott A-C	133,3	1,6	295	12	12,5
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	169,9	0,2	168	37	11,1

Vald likelihoodkvot	100	1,5	200	40	15
----------------------------	------------	-----	------------	-----------	-----------

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	33%	0,7%	50%	17%	7%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	72%	3,7%	84%	51%	28%

Nedbrytning

<i>Krympning</i>					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	-	7,5	0,1	0,3	0,2
Likelihoodkvot C	-	1	1	1	1
Medel likelihoodkvot	-	4,2	0,6	0,7	0,6
Geometriskt medel likelihoodkvot	-	2,7	0,3	0,6	0,5

<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>		4	1	1	2,5
--	--	---	---	---	-----

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)		2%	0,5%	0,5%	1,2%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)		9,3%	2,5%	2,5%	6%

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning-</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	25	3,3	6,7	5	10
<i>Likelihoodkvot C</i>	5	1,2	30	1,7	3,3
<i>Medel likelihoodkvot</i>	15	2,3	18,3	3,3	6,7
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	11,2	1,8	14,1	2,9	5,8
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	12,5	2	12,5	4	6

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	5,9%	1%	5,9%	2%	2,9%
Brottsannolikhet valt värde	24,3%	4,9%	24%	9%	13,3%

(Bassannolikhet 2.5%)					
<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	10	4,5	2,5	10	10
<i>Likelihoodkvot C</i>	2,5	1	1	1	1
<i>Medel likelihoodkvot</i>	6,3	2,7	1,8	5,5	5,5
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	5	2,1	1,6	3,2	3,2
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>	5	2,5	2,5	4	3,5
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	2%	1,2%	1,2%	2%	1,7%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	11%	6%	6%	9,3%	8,2%
<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskyd d) i berget</i>					

<i>Likelihoodkvot A</i>	-		-	-	
<i>Likelihoodkvot B</i>	-		-	-	
<i>Likelihoodkvot C</i>	-		-	-	
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	
<i>Korrosion bultskattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrupp	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong
Indikator	Förändring sprickvidd, dilatation <0.5 mm	Förändring sprickvidd, dilatation 0.5-1 mm	Förändring sprickvidd, dilatation > 1mm	Observerad förskjutning av betongytor över spricka < 1 mm	Observerad förskjutning av betongytor över spricka 1-5 mm

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
Likelihoodkvot A	0	4,9	50	-	-
Likelihoodkvot B	30	150	500	10	50
Likelihoodkvot C	0,5	4	5	1	50

Medel likelihoodkvot	10,2	53	185	5,5	50
Geometriskt medel likelihoodkvot	0,6	14,3	50	3,2	50

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
Likelihoodkvo t A	0	4,9	50	-	-
Likelihoodkvo t B	30	300	5000	7	15
Likelihoodkvo t C	2,5	15	750	250	250
Medel likelihoodkvot	10,8	106,6	1933,3	128,5	132,5
Geometriskt medel likelihoodkvot	0,9	28	572,4	41,8	61,2

<i>Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
Medel inträffat och pågående brott A-C	10,5	79,8	1059,2	67	91,3
Median inträffat och pågående brott A-C	1,5	10	275	8,5	50
Geometriskt medel	0,7	20	169,2	11,5	55,3

inträffat och pågående brott A-C					
---	--	--	--	--	--

Vald likelihoodkvot	4	25	100	7,5	50
--------------------------------	----------	-----------	------------	------------	-----------

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	2%	11%	33%	3,6%	20%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	9%	39%	72%	16%	56%

Nedbrytning

<i>Krympning</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	1	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	1	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	1	-	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>			10		

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	0,5%	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	2,5%	-	-

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	5	20	5	2	6
<i>Likelihoodkvot C</i>	1,7	2	1,7	1,7	2
<i>Medel likelihoodkvot</i>	3,3	11	3,3	1,8	4
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	2,9	6,3	2,9	1,8	3,5
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	2,5	4	7,5	2	4

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	1,2%	2%	3,6%	1%	2%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	6%	9,3%	16%	4,9%	9,3%

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	1	1	1	-	-

<i>Likelihoodkvot C</i>	1	1	1	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	1	1	1	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	1	1	1	-	-
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>	1	1	1		

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	0,5%	0,5%	0,5%	-	-
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	2,5%	2,5%	2,5%	-	-

<i>Korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrupp	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong
Indikator	Observerad förskjutning av betongytan över spricka > 5 mm	Förändring av förskjutning av betongytan över spricka	Spricklängden för spricka i sprut-betong är < 2,5 m	Spricklängden för spricka i sprutbetong är 2,5 m till tunnelbredd	Spricklängden för spricka i sprutbetong > Tunnelbredd

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	1	0,175	6	30
<i>Likelihoodkvot B</i>	5000	6,7	1,2	50	5000
<i>Likelihoodkvot C</i>	100	25	202	300	200
<i>Medel likelihoodkvot</i>	2550	11	68	119	1743
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	707,1	5,5	3,5	45	311

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	1	0,89	6	30

Likelihoodkvot B	1000	5	1,1	10	1000
Likelihoodkvot C	250	10	5,6	500	250
Medel likelihoodkvot	625	5,3	2,3	172	427
Geometriskt medel likelihoodkvot	500	3,7	0,8	31	196

Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem			Tillför inget		
Medel inträffat och pågående brott A-C	1587,5	905,3	35	145	1085
Median inträffat och pågående brott A-C	625	50	1,1	30	225
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	594,6	64	0,9	37	247

Vald likelihoodkvot	250	50	2,5	50	250
----------------------------	------------	-----------	------------	-----------	------------

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	56%	20,1%	1,2%	20%	56%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	87%	56,2%	6%	56%	87%

Nedbrytning

Krympning					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	12,4	0	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	1	1	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	6,7	0,5	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	3,2	0,1	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>			5	10	

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)			2,5%	0,5%	
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)			11,4%	2,5%	

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	4	22,8	1,4	1	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	1,7	1,8	1	2	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	2,8	12,3	1,2	1,5	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	2,6	6	1,2	1,4	-
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	3	7,5	1	1	1

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	1,5%	3,6%	0,5%	0,5%	0,5%
---	------	------	------	------	------

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	7,1%	16,1%	2,5%	2,5%	2,5%
<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	1,4	1	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	1,1	1	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	1,2	1	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	1,2	1	-
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>			1	1	
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)			0,5%	0,5%	
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)			2,5%	2,5%	
<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-

<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrup p	Uppsprickni ng av sprutbetong	Uppsprickni avg sprutbetong	Uppsprickni avg sprutbetong	Uppsprickni avg sprutbetong	Uppsprickni avg sprutbetong
Indikator	Spricka i sprutbetong saknar sprickfyllna d	Sprickor i sprutbetonge n; sprickavstån d < 0,75 m	Sprickor i sprutbetonge n; sprickavstån d 0,75 - 2 m	Inget uttydbart sprickmönst er, slumpmässig t orienterade	Sprickorna följer strukturer i berget

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	1	90	1	0,1	2
<i>Likelihoodkvot B</i>	6,7	1,3	2,5	1,8	5,3
<i>Likelihoodkvot C</i>	25	2,5	4	1,3	20
<i>Medel likelihoodkvot</i>	11	31,3	2,5	1	9,1
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	5,5	6,6	2,2	0,6	6

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	1	90	1	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	5	1,3	2,1	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	10	25	8	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	5,3	39	3,7	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	3,7	14	2,6	-	-

<i>Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Medel inträffat och pågående brott A-C</i>	8,1	35	3,1	1	9,1
<i>Median inträffat och pågående brott A-C</i>	5,8	14	2,3	1,3	5,3
<i>Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C</i>	4,5	9,6	2,3	0,6	6

Vald likelihoodkvot	5	12,5	4	1	12,5
--------------------------------	---	------	---	---	------

Brottsannolikhet t valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	2,5%	5,9%	2%	0,5%	5,9%
Brottsannolikhet t valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	11,4%	24%	9,3%	2,5%	24%

Nedbrytning

Krympning					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	-	15	10	7,5	4
Likelihoodkvot C	-	0,9	2	1	1
Medel likelihoodkvot	-	8	6	4,3	2,5
Geometriskt medel likelihoodkvot	-	3,8	4,5	2,7	2
Krympning vald likelihoodkvot	-	7,50	50	3,50	2

Brottsannolikhet t valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	3,6%	2,5%	1,7%	1%
Brottsannolikhet t valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	16,1%	11,4%	8,2%	4,9%

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	1	6	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	2,5	9	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	1,8	7,5	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	1,6	7,3	-	-
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	-	2,5	7,5	-	-

<i>Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)</i>	-	1,2%	3,6%	-	-
<i>Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)</i>	-	6%	16%	-	-

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	1	6	-	-

<i>Likelihoodkvot C</i>		4	1,4	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>		2,5	3,7	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>		2	2,9	-	-
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>		4	4		

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)		2%	2%	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)		9,3%	9,3%	-	-

<i>Korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>		-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>		-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>		-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>		-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>		-	-	-	-

<i>Korrosion bultskattad likelihoodkvot</i>					
---	--	--	--	--	--

Indikatorgrupp	Nedfall sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong	Uppsprickning av sprutbetong
Indikator	Nedfall sprutbetong som följer strukturer	Sprickorna är orienterade efter bultmönster, längs tunneln eller rutmönster.	Sprickorna har ett sprickmönster med sprickor som är orienterade i ett stjärnmönster	Sprickor kring bultupphängning, koncentrisk, eller radiella utan entydig orientering.	Förändring av sprickmönster, Befintliga sprickor propagerar

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	99	10	1	10	20
<i>Likelihoodkvot B</i>	100	1,8	2,5	83	40
<i>Likelihoodkvot C</i>	150	19	50	11	2,5
<i>Medel likelihoodkvot</i>	116	10	18	35	21
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	114	5,1	5	21	13

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	1	1
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	83	40
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	11	20
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	32	20
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	9,7	9,3

<i>Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Medel inträffat och pågående brott A-C</i>	116	10	18	33,2	21
<i>Median inträffat och pågående brott A-C</i>	100	3	2,5	12,5	20
<i>Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C</i>	114	5,1	5	10,6	11

Vald likelihoodkvot	100	10	7,5	30	20
----------------------------	------------	-----------	------------	-----------	-----------

Brottsannolikhet valt värde	33%	4,8%	3,6%	13%	9,1%
------------------------------------	------------	-------------	-------------	------------	-------------

(Bassannolikhet 0.5%)					
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	72%	20%	16%	43%	34%

Nedbrytning

<i>Krympning</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	5
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	22,9	0,8	-	0,1
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	0,9	1	-	1
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	11,9	0,9	-	2
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	4	0,9	-	0,8
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>	-	7,5	1	-	1

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	3,6%	0,5%	-	0,5%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	16,1%	2,5%	-	2,5%

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	400
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	9,5
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	204,8

<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	61,6
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>					25

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	11%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	39%

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	100
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	1
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	50,5
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	10
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>					10

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	4,8%
--	---	---	---	---	------

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)					20%
--	--	--	--	--	-----

<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>					
<i>Likelihoodkvot B</i>					
<i>Likelihoodkvot C</i>					
<i>Medel likelihoodkvot</i>					
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>					
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrupp	Uppsprickning av sprutbetong	Skadad bult/bultsystem	Skadad bult/bultsystem	Skadad bult/bultsystem	Skadad bult/bultsystem
Indikator	Förändring av sprickmönster. Det uppstår nya sprickor.	Deformerad eller lossnad bricka, brott gäng., Skada yttre del av bult	Skada täcksikt, betong har släppt, uppsprickning	Bultbrott, nedrasat berg eller bult frilagd. Berg har släppt runt bult.	Ökad deformation bricka eller skada som övergått i brott gäng eller lossnad bricka.

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse</i>					
---	--	--	--	--	--

<i>i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	1	17,5	19	30	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	10	1000	5	1000	1000
<i>Likelihoodkvot C</i>	7,5	175	25	200	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	6,2	397,5	16,3	410	1000
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	4,2	145,2	13,3	181,7	1000

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	1	12,8	19	30	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	10	100	2	1000	1000
<i>Likelihoodkvot C</i>	75	382,5	20	262,5	875
<i>Medel likelihoodkvot</i>	29	165,1	13,7	430,8	937,5
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	9,1	78,7	9,1	199	935,4

<i>Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					

Medel inträffat och pågående brott A-C	21	281,3	15	420,4	958,3
Median inträffat och pågående brott A-C	10	100	19	200	1000
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	8,7	84,4	11	146	953,2

Vald likelihoodkvot	20	150	15	250	500
----------------------------	-----------	------------	-----------	------------	------------

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	9%	43%	7%	56%	72%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	34%	79%	28%	87%	93%

Nedbrytning

Krympning					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	0,1	-	-	-	-
Likelihoodkvot C	1	-	-	-	-
Medel likelihoodkvot	0,5	-	-	-	-
Geometriskt medel likelihoodkvot	0,2	-	-	-	-

Krympning vald likelihoodkvot	1				
--	---	--	--	--	--

Brottsannolikhet vald värde (Bassannolikhet 0.5%)	0,5%	-	-	-	-
Brottsannolikhet vald värde (Bassannolikhet 2.5%)	2,5%	-	-	-	-

Exogena processer som t.ex. frostsprängning.					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	25	-	4	-	-
Likelihoodkvot C	22,5	-	19	-	-
Medel likelihoodkvot	23,8	-	11,5	-	-
Geometriskt medel likelihoodkvot	18,8	-	8,7	-	-
Exogena processer skattad likelihoodkvot	20		7,5		

Brottsannolikhet vald värde (Bassannolikhet 0.5%)	9,1%	-	3,6%	-	-
Brottsannolikhet vald värde	34%	-	16%	-	-

(Bassannolikhet 2.5%)					
-----------------------	--	--	--	--	--

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	25	-	12	-	-
Likelihoodkvot C	1	-	18	-	-
Medel likelihoodkvot	13	-	15	-	-
Geometriskt medel likelihoodkvot	5	-	14,7	-	-
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>	5		15		

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	2,5%	-	7%	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	11%	-	28%	-	-

<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan</i>					
--	--	--	--	--	--

<i>korrosionsskydd i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bultskattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrupp	Skadad bult/bultsystem	Nedfall berg.	Nedfall berg.	Nedfall berg.	Nedfall berg.
Indikator	Förändring av skada täcksikt. Mer betong har släppt	Volym nedfall storlek block eller mer	Volym nedfall storlek med storlek mindre än block (grus/sand)	Förändring av nedfall. Mer berg har fallit ut. med storlek block eller mer	Förändring av nedfall. Mer berg har fallit ut med storlek mindre än block (grus/sand)

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	40	10	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	2	10	10	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	500	10	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	2	183,3	10	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	2	58,5	10	-	-

Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A	-	50	-	1,2	1,2
Likelihoodkvot B	1,3	5	1,7	200	50
Likelihoodkvot C	15	40	20	75	37,5
Medel likelihoodkvot	8,2	31,7	10,8	92,1	29,6
Geometriskt medel likelihoodkvot	4,5	21,5	5,8	26,6	13,3

Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem	Tillför inget				
Medel inträffat och pågående brott A-C	6,1	107,5	10,3	92,1	29,6
Median inträffat och pågående brott A-C	2	40	10	75	37,5
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	3,4	35,5	8	26,6	13,3

Vald likelihoodkvot	15	50	10	150	40
----------------------------	-----------	-----------	-----------	------------	-----------

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	7%	20%	4,8%	43%	17%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	28%	56%	20%	79%	51%

Nedbrytning

Krympning					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot C	-	-	-	-	-
Medel likelihoodkvot	-	-	-	-	-

<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>					

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	-

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>				Tillför inget	Tillför inget
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	5	10	5	10
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	15	7,5	15	7,5
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	10	8,8	10	8,8
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	8,7	8,7	8,7	8,7
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>		10	8	10	7,5

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	4,8%	3,9%	4,8%	3,9%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	20%	17%	20%	17%

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>				Tillför inget	Tillför inget
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	5	10	5	10

<i>Likelihoodkvot C</i>	-	1	1	1	1
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	3	5,5	3	5,5
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	2,2	3,2	2,2	3,2
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>		3	4	3	4

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	1,5%	2%	1,5%	2%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	7,1%	9,3%	7,1%	9%

<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrupp	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg
Indikator	Öppen geologisk spricka i öinsprutat berg Sprickvidd 1-5 mm	Öppen geologisk spricka i öinsprutat berg Sprickvidd > 5 mm	Skjuvrörelse i öinsprutat fast berg.	Dilatation av öppen geologisk spricka (struktur) < 1 mm	Dilatation av öppen geologisk spricka (struktur) > 1 mm

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	6	2	16	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	20	100	50	1000	2000
<i>Likelihoodkvot C</i>	2,5	5	5	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	9,5	35,7	23,7	1000	2000
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	6,7	10	15,9	1000	2000

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	200	2000
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	10	500
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	105	1250
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	44,7	1000

Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Medel inträffat och pågående brott A-C	9,5	35,7	23,7	403,3	1500
Median inträffat och pågående brott A-C	6	5	16	200	2000
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	6,7	10	15,9	126	1259,9

Vald likelihoodkvot	5	15	15	100	500
----------------------------	----------	-----------	-----------	------------	------------

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	2,5%	7%	7%	33%	72%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	11,4%	28%	28%	72%	93%

Nedbrytning

Krympning					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot C	-	-	-	-	-

<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>					

Brottsannolikhet vald värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	-
Brottsannolikhet vald värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	-

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	20	100	25	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	2	2,5	1	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	11	51,3	13	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	6,3	15,8	5	-	-
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	8	25	7,5		

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	3,9%	11%	3,6%	-	-
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	17%	39%	16,1%	-	-

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	10	50	1,5	-	-
Likelihoodkvot C	1	1	1	-	-
Medel likelihoodkvot	5,5	25,5	1,3	-	-
Geometriskt medel likelihoodkvot	3,2	7,1	1,2	-	-
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>	3,5	15	1		

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	2%	7%	1%	-	-
Brotts sannolikhet valt värde	8%	28%	3%	-	-

(Bassannolikhet 2.5%)					
-----------------------	--	--	--	--	--

<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrupp	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg	Uppsprickning berg
Indikator	Förändring, dilatation av spricka genom fast berg	Förändring av uppsprickning. Propagering av spricka genom fast berg	Förändring av uppsprickning. Det uppstår flera dragsprickor i fast berg	Förändring av uppsprickning. Förändring i skjuvning i berg	Skjuvrörelse i oinsprutat berg (nivåskillnad över geologisk sprickastruktur) < 1 mm

Brott

Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	01
Likelihoodkvot B	1000	1000	200	200	10
Likelihoodkvot C	-	-	-	-	2,5
Medel likelihoodkvot	1000	1000	200	200	4,2
Geometriskt medel likelihoodkvot	1000	1000	200	200	0,7

Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A	-	100	10	-	-
Likelihoodkvot B	1000	1000	200	200	-
Likelihoodkvot C	200	200	100	100	-
Medel likelihoodkvot	600	433,3	103,3	150	-
Geometriskt medel likelihoodkvot	447,2	271,4	58,5	141,4	-

Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Medel inträffat och pågående brott A-C	733,3	575	127,5	166,7	4,2
Median inträffat och pågående brott A-C	1000	600	150	200	2,5
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	584,8	376,1	79,5	158,7	0,7

Vald likelihoodkvot	250	250	100	150	2,5
----------------------------	------------	------------	------------	------------	------------

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	56%	56%	33%	43%	1,2%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	87%	87%	72%	79%	6%

Nedbrytning

Krympning					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot C	-	-	-	-	-

<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>					

Brottsannolikhet et valt värde (Bassannolikhet t 0.5%)	-	-	-	-	-
Brottsannolikhet et valt värde (Bassannolikhet t 2.5%)	-	-	-	-	-

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot t A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot t B</i>	-	-	-	-	500
<i>Likelihoodkvot t C</i>	-	-	-	-	1,3
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	250,6
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	25
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>					2,5

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	1%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	6%

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	1,5
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	1,5
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	1,5
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	1,5
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>					1,5

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	0,7%
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	3,7%

<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionssky dd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvo t A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvo t B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvo t C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrup p	Uppspricknin g berg	Uppspricknin g berg	Konverge ns	Konverge ns	Struktur/text ur betongyta
Indikator	Skjuvrörelse i oinsprutat berg (nivåskillnad över geologisk spricka- struktur) 1-5 mm	Skjuvrörelse i oinsprutat berg (nivåskillnad över geologisk spricka- struktur) >5 mm	Uppmätt konvergen s < 2 mm	Uppmätt konvergen s > 2 m	Uppsprucken betongyta (korta sprickor med hög sprickintensit et

Brott

Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A	1,2	50	-	-	30
Likelihoodkvot B	10	100	5	50	1,2
Likelihoodkvot C	5	20	-	-	5
Medel likelihoodkvot	5,4	56,7	5	50	12,1
Geometriskt medel likelihoodkvot	3,9	46,4	5	50	5,6

Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A	4	6	0	0,4	-
Likelihoodkvot B	350	1000	5	50	-
Likelihoodkvot C	500	250	5	500	-
Medel likelihoodkvot	284,7	418,7	3,3	183,5	-
Geometriskt medel likelihoodkvot	88,8	114,5	0,5	22,3	-

Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Medel inträffat och pågående brott A-C	145	237,7	3,8	150,1	12,1
Median inträffat och pågående brott A-C	7,5	75	5	50	5
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	18,7	72,9	0,9	27,3	5,6

Vald likelihoodkvot	7,5	75	5	50	7,5
----------------------------	-----	----	---	----	-----

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	3,6%	27%	2,5%	20%	3,6%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	16%	66%	11%	56%	16%

Nedbrytning

Krympning					
Likelihoodkvot A	-	-	-	-	-
Likelihoodkvot B	-	-	-	-	8
Likelihoodkvot C	-	-	-	-	4
Medel likelihoodkvot	-	-	-	-	6

<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	5,7
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>					40

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	2%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	9,3%

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängnin</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	50
<i>Likelihoodkvot B</i>	500	20	-	-	7
<i>Likelihoodkvot C</i>	1,5	10	-	-	3,3
<i>Medel likelihoodkvot</i>	250,8	15	-	-	20,1
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	27,4	14,1	-	-	10,5
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	20	15			10

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	9%	7%	-	-	4,8%
---	----	----	---	---	------

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	34%	28%	-	-	20%
--	-----	-----	---	---	-----

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion nå</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	2	1,5	-	-	8
<i>Likelihoodkvot C</i>	1	1	-	-	1,7
<i>Medel likelihoodkvot</i>	1,5	1,3	-	-	4,8
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	1,4	1,2	-	-	3,7
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>	1,5	1,5			5

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	0,7%	0,7%	-	-	2,5%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	3,7%	3,7%	-	-	11,4%

<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskyd d) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrup p	Struktur/text ur betongyta	Struktur/text ur betongyta	Struktur/textu r betongyta	Utfällning ar betongyta	Utfällning ar betongyta
Indikator	Avspjälkning betong (brott betong- betong) eller betongbitar lossnar, eroderar.	Ballast lossnar	Bindemedel lossnar/eroder ar	Yttäckand e utfällninga r	Brunaktig a utfällninga r

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
---	--	--	--	--	--

<i>Likelihoodkvot A</i>	2	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	1,5	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	10	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	4,5	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	3,1	-	-	-	-

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>		-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>		-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>		-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-

<i>Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Medel inträffat och pågående brott A-C</i>	4,5	-	-	-	-

Median inträffat och pågående brott A-C	2,5	-	-	-	-
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	2,9	-	-	-	-

Vald likelihoodkvot	2,5				
---------------------	-----	--	--	--	--

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	1,2%	-	-	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	6%	-	-	-	-

Nedbrytning

<i>Krympning</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	1	1	1	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	1	1	1	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	1	1	1	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	1	1	1	-	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>	1	1	1		

Brottsannolikhet valt värde	0,5%	0,5%	0,5%	-	-
-----------------------------	------	------	------	---	---

(Bassannolikhet 0.5%)					
Brottsannolikhet t valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	2,5%	2,5%	2,5%	-	-

Exogena					
<i>Likelihoodkvot A</i>	50	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	30	10	10	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	37,5	5	5	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	39,2	7,5	7,5	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	34,5	7,1	7,1	-	-
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	35	7,5	7,5		

Brottsannolikhet t valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	15%	3,6%	3,6%	-	-
Brottsannolikhet t valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	47,3%	16%	16%	-	-

<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
--	--	--	--	--	--

<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	30	10	10	5	20
<i>Likelihoodkvot C</i>	17,5	30	30	2	1,7
<i>Medel likelihoodkvot</i>	23,8	20	20	3,5	10,8
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	18,8	17,3	17,3	3,2	5,8
<i>Kemiska processer skattad likelihoodkvot</i>	20	17,5	17,5	3,5	7,5

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	9,1%	8,1%	8,1%	1,7%	3,6%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	34%	31%	31%	8,2%	16%

<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>		-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>		-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>		-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>		-	-	-	-

<i>Geometrisk medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>					

Indikatorgrupp	Utfällningar betongyta	Missfärgad betongyta	Missfärgad betongyta	Missfärgad betongyta	Påverkan på luftexponerad bult/infästningsmaterial (stål)
Indikator	Gula eller grönaktiga utfällningar	Missfärgning av stora delar av betongytan	Lokal missfärgning av betongytan	Brunaktig missfärgning följer armerings-/ bultmönster	Brun missfärgad stålyta

Brott

<i>Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometrisk medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometrisk medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Brott, på grund av överbelastning eller</i>					

<i>rörelse i bärande huvudsystem</i>					
Medel inträffat och pågående brott A-C	-	-	-	-	-
Median inträffat och pågående brott A-C	-	-	-	-	-
Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C	-	-	-	-	-
Vald likelihoodkvot					
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	-
Nedbrytning					
<i>Krympning</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Krympning vald likelihoodkvot</i>					
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	-
<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	1	1	1	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	100	5	1	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	1	1	1	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	34	2,3	1	-

<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	4,6	1,7	1	-
<i>Exogena processer skattad likelihoodkvot</i>	-	3,5	2	1	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	1,7%	1%	0,5%	-
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	8,2%	4,9%	2,5%	-
<i>kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	999	999	999	999	999
<i>Likelihoodkvot B</i>	150	100	5	2000	20
<i>Likelihoodkvot C</i>	1	1	5	5	1,7
<i>Medel likelihoodkvot</i>	383,3	366,7	336,3	1001,3	340,2
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	53,1	46,4	29,2	215,4	32,2
Kemiska processer skattad likelihoodkvot	15	20	5	100	10
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	7%	9,1%	2,5%	33%	4,8%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	28%	34%	11%	72%	20%
<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	999
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	5
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	5
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	336,3
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	29,2

Korrosion bult skattad likelihoodkvot					5
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	-	-	-	-	2,5%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	-	-	-	-	11%

Indikatorgrupp	Påverkan på luftexponerad bult/infästnings- material (stål)	Påverkan på luftexponerad bult/infästnings- material (stål)	Påverkan på luftexponerad bult/infästnings- material (stål)	Påverkan på luftexponerad bult/infästnings- material (stål)	Påverkan på luftexponerad bult/infästnings- material (stål)
Indikator	Tjocka pålagringar brunt material på stålyta	Blåsbildning korrosionssk ydd	Rostgenoms lag/ brun missfärgning av täcksikt eller paltning.	Observerbar gropfrätning (mätbar)	Skador på korrosionssk ydd

Brott

Inträffat brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem					
Likelihoodkvot A					
Likelihoodkvot B					
Likelihoodkvot C					
Medel likelihoodkvot					
Geometrisk medel					

likelihoodkvot					
-----------------------	--	--	--	--	--

<i>Pågående brott på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot B</i>	-	-	-	-	-
<i>Likelihoodkvot C</i>	-	-	-	-	-
<i>Medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	-	-	-	-	-

<i>Brott, på grund av överbelastning eller rörelse i bärande huvudsystem</i>					
<i>Medel inträffat och pågående brott A-C</i>	-	-	-	-	-
<i>Median inträffat och pågående brott A-C</i>	-	-	-	-	-
<i>Geometriskt medel inträffat och pågående brott A-C</i>	-	-	-	-	-

Vald likelihoodkvot					
----------------------------	--	--	--	--	--

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)					
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)					

Nedbrytning

<i>Krympning</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>					
<i>Likelihoodkvot B</i>					
<i>Likelihoodkvot C</i>					
<i>Medel likelihoodkvot</i>					
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>					
Krympning vald likelihoodkvot					

Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)					
Brotts sannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)					

<i>Exogena processer som t.ex. frostsprängning.</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>					
<i>Likelihoodkvot B</i>					
<i>Likelihoodkvot C</i>					
<i>Medel likelihoodkvot</i>					

Geometriskt medel likelihoodkvot	-	-	-	-	-
Exogena processer skattad likelihoodkvot					

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)					
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)					


kemiska processer som t.ex. urlakning betong eller korrosion på luftexponerade delar.					
Likelihoodkvot A	999	999	999	999	999
Likelihoodkvot B	10	2	80	1000	400
Likelihoodkvot C	4	1	2,5	10	1
Medel likelihoodkvot	337,7	334	360,5	669,7	466,7
Geometriskt medel likelihoodkvot	34,2	12,6	58,5	215,4	73,7
Kemiska processer skattad likelihoodkvot	10	4	40	100	75

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	4,8%	2%	17%	33%	27%
Brottsannolikhet valt värde	20%	9%	51%	72%	66%

(Bassannolikhet 2.5%)					
<i>korrosion ingjutna delar av bult (stål utan korrosionsskydd) i berget</i>					
<i>Likelihoodkvot A</i>	999	-	999	999	999
<i>Likelihoodkvot B</i>	150	-	60	50	50
<i>Likelihoodkvot C</i>	3	-	10	20	12,5
<i>Medel likelihoodkvot</i>	384	-	356,3	356,3	353,8
<i>Geometriskt medel likelihoodkvot</i>	76,6	-	84,3	100	85,5
<i>Korrosion bult skattad likelihoodkvot</i>	10	-	35	35	30

Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 0.5%)	4,8%	-	15%	15%	13%
Brottsannolikhet valt värde (Bassannolikhet 2.5%)	20%	-	47%	47%	43%

Bilaga 9. 3 GSM Rapport från modellering av nedfall

Report	
 <p>3GSM GmbH Plüddemanngasse 77 A-8010 Graz, Austria Tel. +43-316-464744 Fax: +43-316-464744-11 office@3gsm.at www.3gsm.at</p>	
PROJECT	
<h1>ShapeMetriX 3D</h1> <h2>Tunnel Roof Inspection Photographic Downfall</h2>	
CLIENT	
<p>GEOSTATISTIK Lars Olsson AB Box 116 147 22 Tumba Sweden</p>	
Project ID: 8561 File: 8561_rep-18-002.docx Date: September 2018 Author: Dr. M. Baumgartner	<i>Errors excepted</i>

CONTENTS

1	SETUP	1
2	IMAGING AND RECONSTRUCTION	2
3	RESULTS.....	4
4	OUTLINE AND COMMENTS.....	9

1 Setup

The trial setup for the *Photographic Downfall* and the corresponding imaging was built up and performed by Travikverket and Geostatistik Sweden.

Setup of the tunnel roof

Wood boards covered with corrugated paper were built up to simulate the tunnel roof. A "void" in the shape of a tetrahedron (30 cm side) was cut out in the middle of the roof and a pile of debris was positioned underneath. The floor was marked with crosses of white paper with a distance of 50 cm between them (15 markers). The boards that carry the roof show pen marks in a distance of 50 cm.

Setup of the car

The car was equipped with three GoPro cameras looking forward (GoPro3), sideward (GoPro3+), and upward (GoPro5). Battery-powered video lights were used for illumination.

Trial runs

Imaging of the pile of debris (forward and sideward simultaneously) was performed in two runs (Trial B and Trial C), whereas a change in the pile of debris was made between the individual runs. The roof was imaged in Trial B only (upward looking camera).

Calibration

Camera calibration was performed by 3GSM.

2 Imaging and Reconstruction

Sideward looking camera

Pictures were extracted from the video files GOPRO0041 (Trial B) and GOPRO0042 (Trial C) – extraction was performed by an image offset of 15%. Images from two running patterns were selected from each video file; i.e. running around the two piles from two distances.

Figure 1 and Figure 2 shows the images (camera positions) used for the generation of the 3D model.

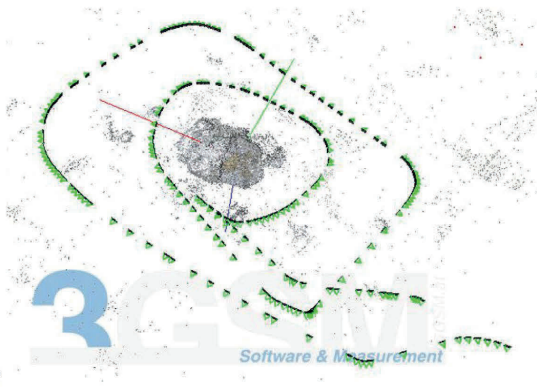


Figure 1: (Coarse) 3D point cloud with camera positions (green) of Trial B.

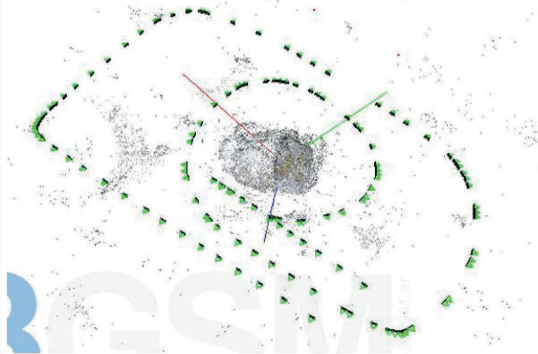


Figure 2: (Coarse) 3D point cloud with camera positions (green) of Trial C.

Forward looking camera:

Pictures were extracted from the video files GOPRO0086 (Trial B) and GOPRO088 (Trial C) – extraction was performed with a fixed frame step of 30. Images from 4 running patterns are selected from each video file; i.e. straight up to the pile from the front and the back (3 times) and perpendicular to the pile from both sides (1 time).

Upward looking camera:

Pictures were extracted from the video file GOPRO00414 (Trial B) – extraction was performed by an image offset of 15%. Figure 3 shows the image (camera positions) used for the generation of the 3D model.

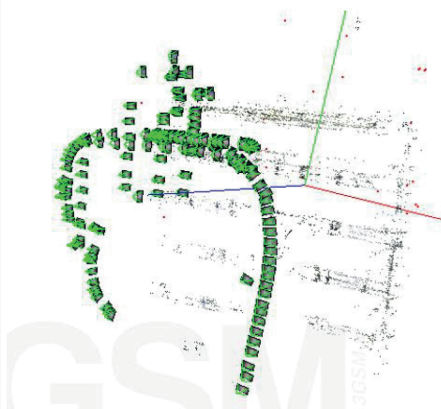


Figure 3: (Coarse) 3D point cloud with camera positions (green) of the upwards looking camera (Trial B).

3 Results

Overall reconstruction of the pile was only feasible with pictures taken from the sideward recording (for further details see Chapter 4). Therefore, following results refer to the **sideward looking camera setup only**.

Pile Reconstruction

The reconstructions of the pile reveal clearly a change in the pile of debris between Trial B and Trial C (see Figure 4 to Figure 6).

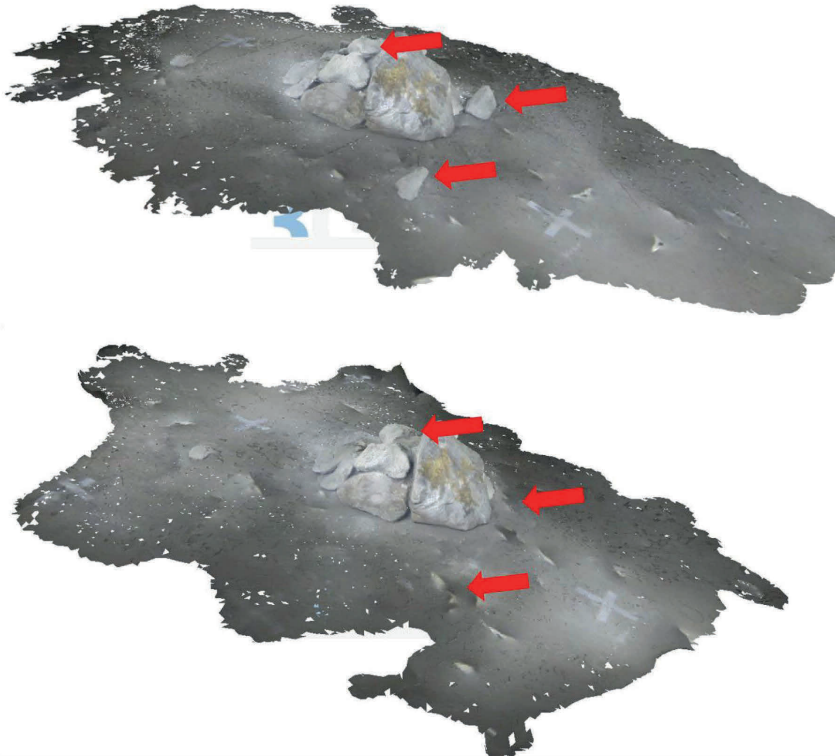


Figure 4: Top: Reconstruction of Trial B. Bottom: Reconstruction of Trial C. Changes are highlighted with red arrows.

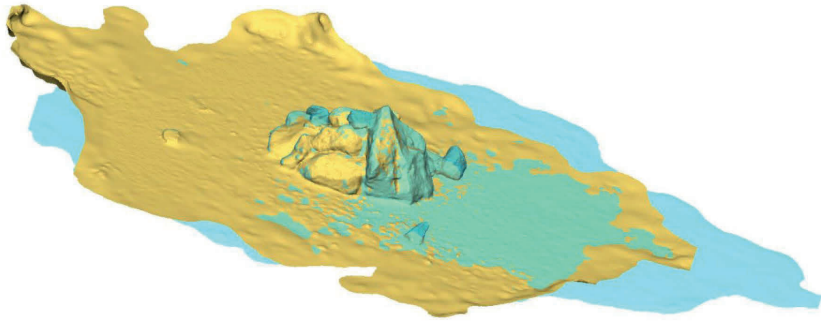


Figure 5: Overlay of the two reconstructed meshes, whereas the blue mesh correspond to Trial B and the yellow mesh to Trial C.

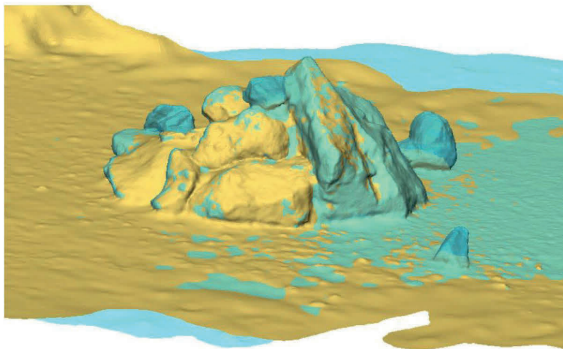


Figure 6: Detailed view of the reconstructed meshes, whereas the blue mesh correspond to Trial B and the yellow mesh to Trial C.

Volume

The difference in volume is clearly visualized by the use of a *Reference Plane* i.e. ground floor (see Figure 7).

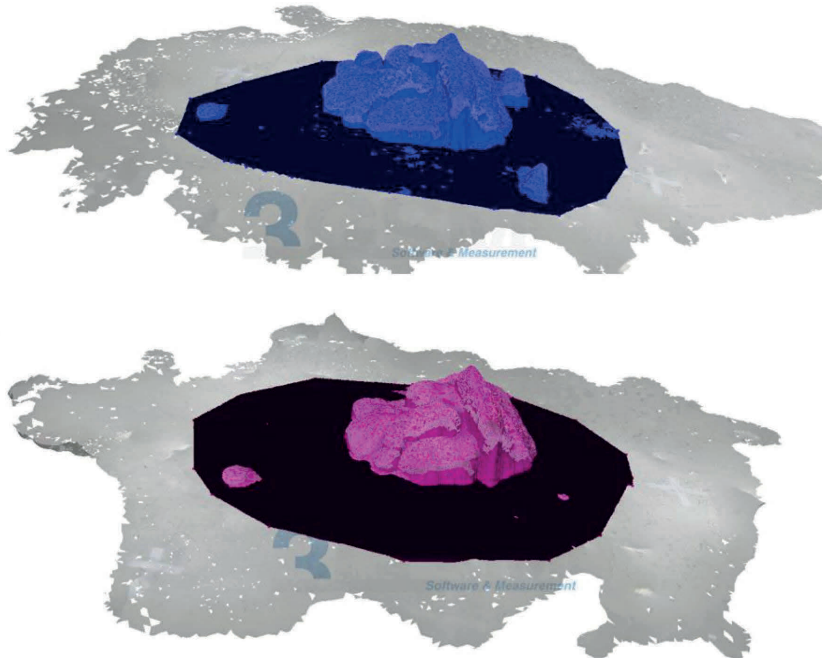


Figure 7: Top: Pile volume of Trial B (blue). Bottom: Pile Volume of Trial C (magenta). Dark shaded area correspond to the ground floor. Grey shaded area correspond to the mesh of the generated 3D model.

Volume calculations are performed with single rock fragments removed after Trial B.

Four rock fragments could be identified (see Figure 8); Note, that fragment 4 for consists of two single stones, which are not separable for volume calculations:

Fragment 1:	360 cm ³
Fragment 2:	71 cm ³
Fragment 3:	119 cm ³
Fragment 4:	175 cm ³

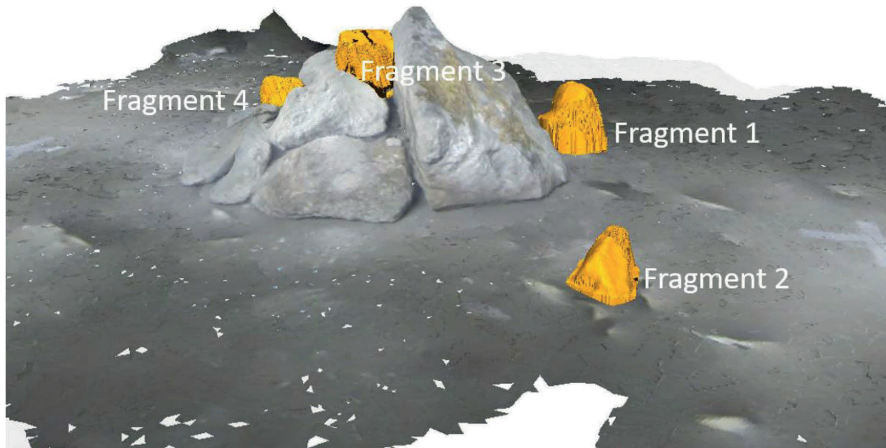


Figure 8: Removed rock fragments (yellow).

Roof reconstruction

The 3D model shows clearly the “void” in the centre of the roof (see Figure 9 and Figure 10).

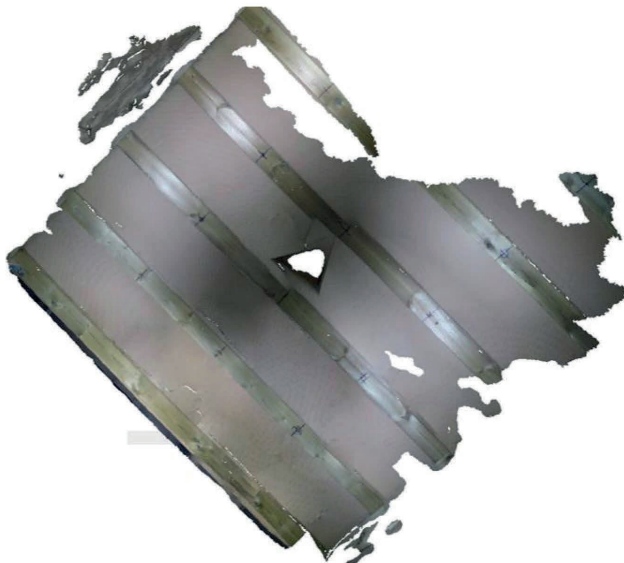


Figure 9: 3D model of the roof showing the “void” (upward camera setup).

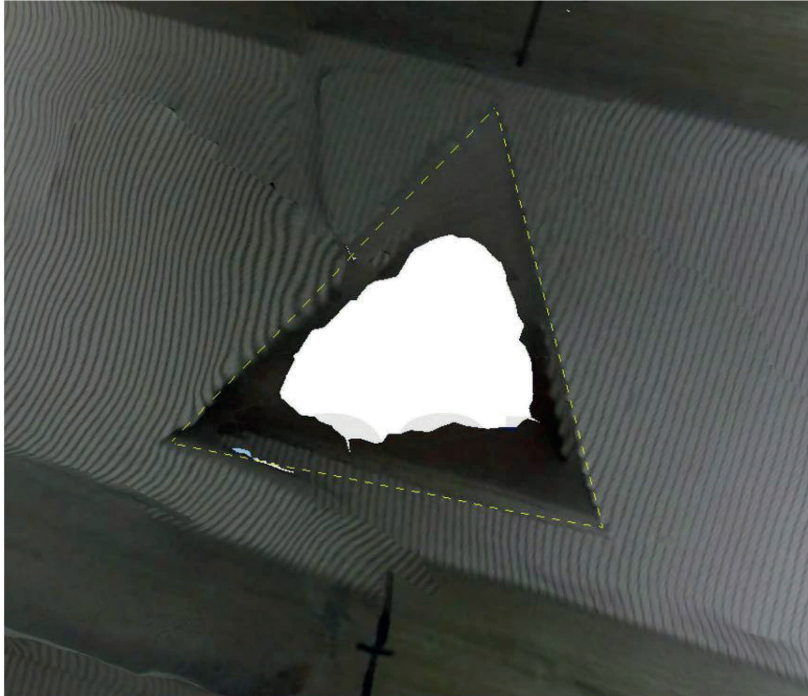


Figure 10: Detailed view of the "void" (upward camera setup).

4 Outline and Comments

Pile of debris

There is a noticeable difference in the quality between the two generated 3D models. It is recommended that imaging of the pile between different trials should be carried out almost in the same manner (i.e. similar imaging distances in respect to the pile, similar image capture speed etc.). Nevertheless, the results of the sideward camera setup show clearly the change in the pile of debris between Trial B and Trial C. A quantification of the volume was feasible by means of difference calculations between the generated 3D meshes.

Reconstruction of the overall pile is not feasible with the forward looking camera setup. The change in angular i.e. 90° is too great. Changes in the viewing direction of the camera should be smaller than 30° ; at least 45° . Therefore reconstruction of the pile is only possible for each single direction, i.e. 4 single reconstruction (front, back, left side, right side). A proper merge of single reconstructions is only feasible by means of a large effort and have not been carried out yet.

Imaging with the sideward camera is recommended for the *Photographic Downfall*. If the setup for the forward looking camera is of further interest, the change in the imaging angle should not exceed more than 45° .

Roof

The "void" in the centre of the roof could be generated within the 3D model. The overall reconstruction of the roof failed in some corners. The parallel ribbing of the corrugated paper used to simulate the roof is not ideal; an irregular texture is preferred for 3D model generation.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19, Stockholm

ISSN 1104-1773