

BeFo



STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

TIDSEFFEKTIVT UNDERHÅLL AV TRAFIKTUNNAR

Ulf Lindblom

TIDSEFFEKTIVT UNDERHÅLL AV TRAFIKTUNNLAR

Time management of maintenance in rock
tunnels for traffic

Ulf Lindblom, Gecon

Förord

Stabilitetsproblem och ras i tunnlar kan innebära stor fara, då nedfall från tunnelväggar eller tak riskerar att hamna på vägbana eller spår. Vid förstärknings- och renoveringsarbeten i en tunnel kan berg, betong eller annat material falla ner på tunnelgolvet. Sådana aktiviteter kräver därför oftast avstängning av hela tunneln, eller alternativt att hastigheten i intilliggande körbana eller spår reduceras kraftigt. Av säkerhetsskäl fortsätter avstängningen även vid tillfälliga avbrott av arbetena. Vid omfattande reparationsarbeten gäller att tunneln tas ur bruk under längre tid. God planering och framförhållning i underhållsarbetet är ett måste för att upprätthålla trafikantsäkerhet och tunnelfunktion, utan att störningen blir orimlig.

Föreliggande rapport redovisar hur man kan säkerställa att bergtunnlar som används för persontransporter kontinuerligt är trygga för trafikanterna, funktionsdugliga för sitt ändamål och kostnads-effektiva. Med begreppet "underhåll" i rapporten avses hela kedjan översiktlig inspektion, fördjupad inspektion och reparationsarbeten i tunneln. En central problematik för åtgärderna i tunneln är, att de i allmänhet måste ske på mycket kort tid.

Rapporten begränsar sig till att studera underhåll av själva berget och de förstärkande och tätande anordningar som byggs in i tunneln för att säkerställa dess avsedda funktion. Mot bakgrund av de potentiellt mycket stora konsekvenserna av nedfallande berg och berginstallationer i tunnlar där fordon med människor transporteras, ofta med hög hastighet, har det ansetts angeläget att granska den praxis som idag finns på området och föreslå förbättringar som kan göras för att öka trafikantsäkerheten och funktionen hos tunnelarna. Inspiration till dessa förslag har hämtats genom samtal med sakkunniga inom Trafikverket (TrV) och Storstockholms Lokaltrafik (SL), men också genom studier av den internationella litteraturen.

Finansiering av projektet har kommit genom Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) och Svenska Byggtreprenörers Utvecklingsfond (SBUF).

Arbetet har genomförts av en projektgrupp med Ulf Lindblom som projektledare och huvudförfattare, Lars-Olof Dahlström (avsnitt 2), Bengt Ludvig (avsnitt 3) och Tommy Ellison (avsnitt 4). Värdefulla synpunkter på manuskriptet har lämnats av Hans Hargelius och Per Thunstedt, Trafikverket Väst.

En referensgrupp för projektet har följt arbetet med att ta fram rapporten. I denna har ingått följande personer: Anna Andrén /Trafikverket, Peter Lund/Trafikverket, Lars-Olof Dahlström/NCC, Lars-Göran Dahlqvist/BESAB, Tommy Ellison/BESAB, Mikael Hellsten och Per Tengborg/BeFo, Bengt Ludvig/Petro Team Engineering, Thomas Sträng/SL Trafikförvaltningen, Kjell Windelhed/ÅF (tidigare Trafikverket) och Pär Åhman/Sveriges Byggindustrier. De slutsatser och åsikter som framförs i rapporten skall ses som forskningsresultat och inte som ett ställningstagande gjort av de företag som ovanstående personer representerar.

Stockholm i december 2012

Per Tengborg

Sammanfattning

På det svenska väg- och järnvägsnäten utförs ett omfattande transportarbete av gods och människor. Utvecklingen går mot en ständig ökning av dessa transporter. Antalet tunnlar är också ökande. Systematisk och fortlöpande kontroll av tunnlar måste ske, eftersom konsekvenserna av till exempel ett fallande bergblock framför ett tåg är så alarmerande stora. I utredningen studeras, om förbättringar kan göras i den organisation och av den utrustning som används vid inspektion och underhåll av trafiktunnlar i berg.

En internationell utblick visar, att Japan intar en framträdande position i tunnelunderhållstekniken i världen. Där utvecklas ”state-of-the-art”-utrustningar för framtidens inspektioner av trafiktunnlar. I övriga I-länder sker en betydligt blygsammare utveckling.

De konstruktionsdelar i en bergtunnel som skall säkerställa tunnelns mekaniska stabilitet och beständighet brukar benämnas det *bärande huvudsystemet*. Det är dessa tunneldelar som avgör trafikantsäkerheten och tunnelns goda funktion och som blir föremål för inspektion och underhållsinsatser.

Till svårigheterna med underhåll av trafiktunnlar i berg hör den begränsade tids- och utrymmesmässiga tillgängligheten till tunnlar, den ibland dåliga geologiska bakgrundsinformationen, bristen på relationshandlingar samt de trånga arbetsplatserna samt störningar som drabbar resenärerna.

Den tidsmässiga tillgängligheten av en tunnel är i mycket en planeringsfråga. Järnvägstrafiken i Sverige styrs av *Trafikverket:s Tågplan*, i vilken alla operatörers (SJ med flera) tidtabeller måste inordnas. Planeringen av underhållsarbete sker enligt två olika rutiner, beroende om de görs före eller efter Tågplanen är fastlagd.

För Trafikverket:s vägtunnlar ingår tunnelunderhållet som en del av det stora underhållspaket som innefattar en hel vägsträcka inklusive alla broar och tunnlar. Tidplaneringen för arbeten i tunneln blir här inte lika kritisk som vid en spårtunnel.

SL har utvecklat ett eget schemalagt system för underhåll av sina 90 km bergtunnlar. Praktiskt taget varje natt mot vardag pågår inspektions- och reparationsarbeten. Man utnyttjar då det fyratimmars uppehåll i trafiken som råder nattetid.

Översiktliga inspektioner (här kallade *Statusinspektioner*) och tillhörande småarbeten kan inplaneras långt i förväg och göras rutinmässigt och fort. Fördjupade inspektioner (här kallade *Åtgärdsinspektioner*) och tillhörande åtgärder i tunneln kräver mer disponibel tid, vilket kan leda till trafikstörningar. Större reparationsarbeten kräver normalt avstängning under viss tid med trafikomställningar som följd. Dessa kan bli kostsamma för samhället.

Huvudsyftet med de ”underhållskampanjer” som görs idag i trafiktunnlar verkar ligga på att okulärbesiktiga ett tunnelparti och att lokalisera eventuellt instabilt berg eller defekta bergförstärkningar. Sådana ”fel” kan utgöra en stor skaderisk för trafikanterna. Samtidigt försöker man utnyttja den tillgängliga tiden i tunneln till att utföra vissa, extremt snabba underhållsinsatser, då entreprenören är på plats med utrustning och materiel.

Några av de nya metoderna för tunnelinspektion kan bli svåra att tillämpa vid starkt tidsbegränsade förrättningar i trafiktunnlar. Flera metoder lär dock kunna anpassas för en sådan applikation. Ny mätutrustning och nya mätmetoder bör tas fram, såväl för översiktlig som för fördjupad inspektion av trafiktunnlar. Detta blir inspektörernas möjlighet att åstadkomma högre kvalitet och objektivitet i sina rapporter och kommer att minska risken för olyckor i tunnlar.

I rapporten beskrivs också hur arbetena i tunneln går till praktiskt. Det presenteras idéer och förslag till nya utrustningar och förbättringar av befintlig maskinpark.

De beskrivna lösningarna kräver tid för utveckling och produktion. Dessutom måste tunnelägare erbjuda entreprenörerna långa avtalsperioder med garanterade avrop för att finansiera investeringarna. I gengäld får kunden en större flexibilitet och snabbare insatser. En större andel funktionsupphandlingar än vad som idag

tillämpas kan vara en lämplig modell för detta.

Lösningar som ökar servicegraden som rapporten föreslår är ovanliga i anläggningsbranschen. När det gäller vägunderhåll finns dock exempel på lösningar som ger korta etableringstider och hög produktivitet, men då garanteras entreprenören en helt annan kontinuitet och en stor del av driften handlas upp som ramavtal; geografisk indelning kan ge stora volymer. SL har en förberedd utrustning för underhåll i spårtunnlarna. Den är dock inte moduluppbyggd, då den används dagligen för likartade uppgifter i ett sammanhängande spårssystem. Liknande lösningar används i viss omfattning av annan industri där snabba underhållsinsatser är väsentliga för att upprätthålla service för kunden. Exempel på sådan industri är energisektorn och telekombranschen¹. Det kan finnas behov av att byggindustrin lär av andra branscher både nationellt och internationellt.

Rubriken på detta forskningsprojekt antyder vad som bör åstadkommas. Ytterst gäller det att öka säkerheten och tillgängligheten för trafikanterna. Detta är naturligtvis oerhört viktigt för samhället i stort. Avbrott i infrastrukturen i storstadsområdena ger mycket stora förluster för näringslivet och påverkar landets BNP negativt. Det bör därför finnas ett incitament för de politiska beslutsfattarna att ta krafttag för att minska störningarna i väg- och järnvägsnäten.

Sist i rapporten lämnas förslag på vad som ytterligare behöver utredas inom fältet bergunderhåll i trafiktunnlar; hit hör utveckling av nya fältmetoder och instrument för berginspektion samt framtagning av effektiva maskiner och fordon för snabba underhållsinsatser.

Nyckelord: Tunnlar, berg, underhåll, besiktning

¹ Ett exempel är s.k. optokablar

Summary

A considerable and increasing transportation work is carried out on Swedish roads and tunnels. More and more rock tunnels are included in this network and the issue of safeguarding the tunnels against falling rock becomes increasingly important. This may be achieved by applying state-of-the-art technical equipment to survey the tunnel integrity. An international review reveals that only a few countries, including Japan and Switzerland, take a lead in this area. The report focuses on the necessary development of rock inspection and maintenance in Sweden to maintain safety for travelers in rock tunnels.

Difficulties with maintenance of rock tunnels include availability of the tunnel (in time and space), poor background information on geology and limited records of construction problems and of previous remedial actions in the tunnel. Since most traffic tunnels are heavily used, all inspection and maintenance activities must be carefully planned and performed efficiently with a minimum of disturbance to the traffic.

The report suggests a tunnel inspection scheme with the abovementioned purpose. With *Status Inspections* every second year, the general condition of the load-carrying rock structure and the rock support and water control systems can be readily checked. If no essential problems are detected, traffic may continue until the next status inspection.

In the case that suspicion arises about the integrity of a certain area of the tunnel, a more careful *Action Inspection* of that area is required by the inspector. Such inspections are made at longer intervals, to make room for physical testing of essential elements in the tunnel, such as adherence of shotcrete, condition of bolts and integrity of the liner support system. The information gathered forms the basis for remedial operation works in the tunnel. Such works must be carefully scheduled to cause minimum disturbance to the traffic.

Should immediate risks for rock instability be detected in any of the inspection procedures mentioned above, the tunnel must be closed immediately to allow repair works to be carried out. Needless to say, such acute actions cannot be planned beforehand and will always be very disturbing to travelers.

The role of the inspector is very significant. In order to make it possible for this person to produce a correct judgment of the tunnel condition, a number of prerequisites must prevail: He (she) must have access to a) a flexible platform in the tunnel, b) extremely good lightening, c) water-flushed surfaces, d) state-of-the-art geophysical instruments for instant checks and e) updated records of geology and previous actions in the tunnel. He (she) must also be well educated and experienced in rock engineering.

The report gives a broad review of the present situation for the inspector and also suggests how this can be improved. It also suggest areas for further development in this field.

Furthermore, the report summarizes the present technique for maintenance works in a tunnel and suggests where improvements can be made in building equipment and vehicles. It is also noted, that contractual changes should be to augment the interest of contractors and consultants to support such improvements.

Keywords: Rock, tunnels, maintenance, inspection

Innehåll

Förord.....	i
Sammanfattning.....	ii
Summary.....	iv
Innehåll.....	v
1 Inledning.....	1
2 Problemställning.....	1
2.1 Syfte med inspektion och bergunderhåll.....	2
2.1.1 Trafikantsäkerhet.....	2
2.1.3 Kostnadsoptimering.....	2
2.2 Utländska tillämpningar.....	3
2.2.1 Europa.....	3
2.2.2 USA.....	4
2.2.3 Japan.....	5
2.2.4 Övriga länder.....	6
2.2.5 Sammanfattning.....	7
2.3 Trafiktunnlar i Sverige.....	7
2.3.1 Vägtunnlar.....	7
2.3.2 Spårtunnlar.....	8
2.4 Konstruktionsdelar som kräver underhåll.....	8
2.5 Problem i samband med akut bergunderhåll.....	9
2.5.1 Kort tillgänglighet.....	9
2.5.2 Brist på bergkartering och övrig dokumentation.....	9
2.5.3 Entreprenörens kompetens, utrustning och säkerhet.....	9
2.5.4 Utrymme och risk vid arbete i trafiktunnlar.....	10
2.5.5 Störningar för operatör och resenärer.....	10
2.6 Dagens praxis för akut bergunderhåll.....	11
2.6.1 Regelverk.....	11
2.6.2 Trafikverket.....	11
2.6.3 SL.....	11
2.6.4 Övriga tunnlar.....	12
3 Tillgänglighet för inspektion och underhåll.....	12
3.1 Tidsmässig tillgänglighet - Planering.....	12
3.1.1 Trafikverkets vägtunnlar.....	13
3.1.2 Kommunala vägtunnlar.....	13
3.1.3 Trafikverkets spårtunnlar.....	13
3.1.4 SL:s spårtunnlar.....	14
3.1.5 Kommunala spårtunnlar.....	15
3.2 Utrymmesmässig tillgänglighet.....	15
3.3 Samhällelig tillgänglighet - Störningar och acceptans.....	15
3.4 Hur kan tillgängligheten förbättras?.....	15
4 Inspektion.....	16
4.1 Inledning.....	16
4.2 Tunnelinspektion idag.....	17
4.3 Idag tillämpad inspektionsteknik.....	18
4.3.1 Fordon och utrustning för tillträde och åtkomst.....	19
4.3.2 Manuella metoder.....	19
4.3.3 Indirekt inspektion.....	20
4.3.4 Laster och deformationer i bergförstärkningar.....	21
4.3.5 Geofysiska metoder.....	21

4.4 Inspektörens ansvar	22
4.4.1 BIM Byggnadsinformationsmodell	22
4.5 Brister och felkällor i besiktningsrapporter	23
4.6 Norska erfarenheter av ras i tunnlar	24
4.7 Utveckling av nya inspektionsmetoder	27
4.7.1 Skanning	28
4.7.2 Laser	28
4.7.3 Temperaturmätning	28
4.7.4 Ultraljud	29
4.7.5 Seismik	29
4.7.6 Mekaniserad Schmidthammare	29
4.7.7 Slutsatser	29
5 Underhållsteknik	29
5.1 Krav och faktorer som påverkar underhållet i tunnlar	29
5.1.1 Arbetarsäkerhet	30
5.1.2 Miljö	30
5.1.3 Omgivningspåverkan	31
5.1.4 Krav på konstruktioner	31
5.1.5 Beständighet	31
5.1.6 Ekonomi	32
5.1.7 Hinder för bergarbete	32
5.2 Teknisk beskrivning av akuta underhållsarbeten i bergtunnlar	33
5.2.1 Allmänna arbeten	33
5.2.2 Inverkan av byggmetod för tunneln	34
5.2.3 Bergskrotning av fria bergytor	36
5.2.4 Betongsprutning	36
5.2.5 Bultar	37
5.2.6 Liners och bergnät	37
5.2.7 Dräner	38
5.2.8 Injektering	38
5.3 Behov av nya metoder för oplanerat, akut bergunderhåll	39
6 Ny strategi för tidseffektivt underhåll av trafiktunnlar	39
6.1 Förslag till förbättringar av kontrakt	39
6.2 Förslag till nytt upplägg av inspektions- och underhållsarbetena	40
6.2.1 Statusinspektion	42
6.2.2 Åtgärdsinspektion	43
6.2.3 Underhållsarbeten och reparationer	44
6.3 Vinna-vinna fördelar	45
6.3.1 Beställaren	45
6.3.2 Entreprenören	45
7 Förslag till nya utvecklingsinsatser	45
7.1 Utveckling av nya utrustningar och mätmetoder för översiktliga besiktningar (statusinspektioner)	46
7.2 Utveckling av nya utrustningar och mätmetoder för noggranna besiktningar (åtgärdsinspektioner)	46
7.3 Utveckling av utrustningar för mindre underhållsåtgärder i samband med inspektion (ej akuta)	47
7.4 Utveckling av ny fordons- och maskinutrustning anpassad för underhållsarbeten	47
7.4.1 Vad skall maskinerna kunna åstadkomma?	47
7.4.2 Renspolning och vattenlagring	47
7.4.3 Belysning och elgenerering	47

7.4.4 Plattform för instrument och inspektör.....	47
7.4.5 Plattform för mindre entreprenadarbeten	48
7.4.6 Transport och etablering av maskinutrustningen.....	48
7.4.7 Landsvägstransport till tunnelpåslag	48
7.4.8 Transporter i tunneln.....	48
8 Förslag till fortsatt utredning.....	49
Referenser	49

1 Inledning

Underhåll av trafiktunnlar är alltid förknippat med stora störningar för trafikanter och resenärer och ger därmed omfattande kostnader för samhället. För vägtunnlar i storstäderna medför underhållsarbeten alltid långa köer i vägnätet som används för att leda om trafiken, ett vägnät som oftast redan är överbelastat utan denna störning. Möjligheten för den spårbundna trafiken att ledas förbi tunnlar som ska stängas för underhåll är mycket begränsad vilket medför stora förseningar. Trafikflödet påverkas i stor omfattning även om man i dubbelspårstunnlar kan hålla ett spår öppet.

Behovet av ett tidseffektivt underhåll av trafiktunnlar kommer att öka framöver dels beroende på att befintliga tunnlar är gamla och har byggts med äldre tekniska lösningar och dels för att de moderna tunnlar är mer komplicerade och är byggda för större trafikmängder där störningar från underhållsarbeten blir samhällsekonomiskt mycket stora.

Föreliggande rapport redovisar hur man kan säkerställa att bergtunnlar kontinuerligt är trygga för trafikanterna, funktionerliga för sitt ändamål och kostnadseffektiva. Med begreppet "underhåll" i rapporten avses hela kedjan översiktlig inspektion, fördjupad inspektion och reparationsarbeten i tunneln. En central problematik för åtgärderna i tunneln är, att de i allmänhet måste ske på mycket kort tid.

Rapporten begränsar sig till att studera underhåll av själva berget och de förstärkande och tätande system som byggts in i tunneln för att säkerställa dess avsedda funktion. Mot bakgrund av de potentiellt mycket stora konsekvenserna av nedfallande berg och andra föremål i tunnlar som trafikeras, ofta med hög hastighet, har det ansetts angeläget att granska den praxis som idag finns på området och föreslå förbättringar som kan göras för att öka trafikantsäkerheten och funktionen hos tunnlar. Inspiration till dessa förslag har hämtats genom samtal med sakkunniga inom Trafikverket (Trafikverket) och Storstockholms Lokaltrafik (SL), men också genom studier av den internationella litteraturen.

2 Problemställning

På det svenska väg- och järnvägsnäten utförs ett omfattande transportarbete av gods och människor. Utvecklingen går mot en ständig ökning av dessa transporter. Som påpekas ihärdigt i debatten om framtida infrastruktursatsningar, kommer ett väl fungerande underhåll av våra vägar och järnvägar vara en förutsättning för ett bra transportsystem.

En del av väg- och järnvägssystemen går i tunnlar och denna andel är i ökande. Nyligen öppnade tunnelförbindelser med persontrafik är Södra Länken i Stockholm, Götatunneln i Göteborg och Citytunneln i Malmö. Tillkommande tunnelprojekt är i Stockholm Norra länken, Förbifart Stockholm och Citybanan och i Göteborg Västlänken, för att nämna några exempel.

Gemensamt för dessa projekt är att tunnlar går i berg och att stora trafikantströmmar skall passera under mark. Tunnelbanan i Stockholm har till exempel fler än 100 000 resenärer per vardag. Ofta är fordonshastigheten hög. Förbifart Stockholm planeras för 90 km/tim maxhastighet. Svenska snabbtåg passerar vissa tunnelavsnitt med en hastighet överstigande 200 km/tim.

Bergkvaliteten i den svenska berggrunden är i allmänhet god och en färdigställd tunnel med

fungerande förstärknings- och tätningssystem är mycket säkert att färdas i. Vid några få tillfällen har berggras eller nedfallande objekt från tunneltak eller väggar inträffat i vårt land.

Ett ingenjörsmässigt säkerhetstänkande ger ändå vid handen, att systematisk och fortlöpande kontroll av tunnlar måste ske, eftersom konsekvenserna av till exempel ett fallande bergblock framför ett tåg är så alarmerande stora.

I Sverige tillämpas sedan länge inspektions- och underhållsprogram för såväl väg- som spårtunnlar. Det pågår för närvarande ett arbete inom Trafikverket med att koordinera dessa program. Avsikten med den studie som presenteras här är att se om förbättringar kan göras i dessa program, liksom i den organisation och av den utrustning som används.

Vid underhåll av trafikerade bergtunnlar ställs många krav som inte är aktuella eller mindre kritiska vid nybyggnad. Ibland beskrivs underhållsprojekt i bygghandlingar på ett sätt som liknar nyproduktion, utan särskilda restriktioner i form av tidsbegränsningar och trafikanthänsyn. I motsats till vad som är fallet för broar, är regelverket för tunnlar inte heller anpassat för bergunderhållsarbeten. Rapporten är avsedd att ligga till grund för en diskussion om de problem som behöver lösas, för att förbättra förutsättningarna att utföra tidseffektivt underhåll i trafikerade tunnlar.

I rapporten diskuteras tidseffektivt underhåll; till detta teknikområde anses höra såväl själva åtgärderna i tunneln som den inspektion som föregår arbetena.

2.1 Syfte med inspektion och bergunderhåll

2.1.1 Trafikantsäkerhet

Trafikanternas säkerhet måste alltid prioriteras högt. Vid val mellan olika underhållslösningar där ekonomi står mot säkerhet, bör trafikanternas säkerhet alltid gå först. Det är sant, att tunnlar i den svenska berggrunden sällan drabbas av plötsliga hållfasthetsproblem. Detta gör, att en falsk trygghetskänsla kan infinna sig. Ras och blockutfall förekommer trots allt, om än sällan. I dagens trafikmiljö kan sådana händelser bli katastrofala.

Det kan tyckas, att ständiga inspektioner av redan säkra trafiktunnlar innebär slöseri med tid och resurser. Men om man ser till det slutliga ändamålet, att spara liv, måste ett modernt land ha råd med detta. Modern teknik erbjuder metoder att göra arbetena snabba och effektiva, vilket denna utredning vill visa.

2.1.2 Bevarad funktion

Det bärande huvudsystemet i underjordsanläggningar för trafikändamål dimensioneras idag för en livslängd på minst 120 år. Byggda trafiktunnlar representerar ett mycket stort kapital och anläggningarna har ofta en hög komplexitet. Avbrott i trafikflödet är mycket kostsamma för samhället. Underlåtenhet att vidmakthålla funktionen i dessa tunnlar och bergtrum innebär en kapitalförstörelse som kan bli så stor, att den drabbar landets ekonomi.

2.1.3 Kostnadsoptimering

I planeringsskedet blir de kortsiktiga projekterings- och byggkostnaderna, som är styrande för

tunnelarnas utformning, en slags suboptimering. Beständighetsfrågor bör dock behandlas i ett livslängdsperspektiv snarare än i kortsiktiga ekonomiska termer och den totala kostnaden under anläggningens hela livslängd bör gälla vid investeringsbeslut. Av kostnadsskäl bör man vid underhåll i en gammal tunnel undvika att bygga in nya förstärkningar och konstruktioner som har väsentligt längre livslängd än tunnelns återstående livslängd. En sådan anpassning är dock svår att åstadkomma i praktiken.

Life Cycle Costing – LCC ger en helhetssyn på samhällskostnaden för en tunnel och kan vara ett sätt att optimera underhållet. Med LCC-tänkande skapas ett bättre beslutsunderlag, där man även tar hänsyn till kostnaderna för kommande generationer (Lindblom U, 2012).

2.2 Utländska tillämpningar

2.2.1 Europa

Allmänt

Inom de olika europeiska länderna planeras och utförs underhållet av trafiktunnlar på olika sätt beroende på geologiska förutsättningar och traditioner.

Ett samarbete om underhåll av järnvägstunnlar i Europa sker inom International Union of Railways (UIC). Inom detta organ sker ett utbyte av erfarenheter av planering och utförande av tunnelunderhållet. Målet är att skapa en europeisk ”standard” på området. Frågor som tas upp² är bland andra livslängd och LCC-analys, databehov för underhållsplanering, statusbedömning av spårtunnlar, teori för belastning på tunnelement samt teknik för utförande av underhållet.

Underhållet av europeiska vägtunnlar är ett relativt underordnat tema inom ERF – European Union Road Federation.

Underhållsfrågorna verkar stå något mer i fokus inom Nordiskt Vägforum, NVF. Vid NVF-mötet i Reykjavik juni 2012 diskuterades bland annat tunnelunderhåll i ett livslängdsperspektiv med utgångspunkt från verkliga nordiska tunneldata. Sammanfattningsvis kan man säga, att de nordiska länderna står ungefärligen på lika nivå när det gäller utveckling av inspektion och underhåll av trafiktunnlar.

Schweiz

Schweiz är ett land som har blivit ledande inom området digital mätteknik för tunnlar. Två områden berör kartering och skanning av tunnelytor, information som är vital för planeringen av underhållsarbetena.

Tunnelkartering utförs från ett inspektionsfordon med rörlig plattform (Ackermann & Amberg, 2004). Observationer och data förs av inspektören in på en digital karta i en fältdator. I denna har tidigare information ”tankats ner” från en databas före inspektionen, så att besiktningssmannen har tillgång till hela situationen vid inspektionstillfället. Utvecklingen av skadeområden kan på detta sätt följas.

² Se UIC leaflet 779.10

Skanningsystemet kan läsa av reflexionsförmågan hos ytan i hela tunneltvärsnittet. Genom de svartvita, kontrastrika bilder som produceras, framgår tydligt konturer liksom fel och brister i lining, i exponerad bergvägg eller i förstärkningssystem. Jämförelser med tidigare skanningsresultat görs med en mjukvara och avslöjar tydligt om nya problem (rörelser, sprickor, vattenutfällning, etc) uppstått i tunneln.

I Schweiz har man också praktiskt tagit sig an frågan om kalkutfällningar i tunneldränar och hur dessa kan bemästras, se Garmisch & Girmscheid (2003). Underhållskostnaderna för dessa system är ofta mycket stora och genom kontrollerad tillsats av syra i dränerna kan intervallerna mellan spolningarna, och därmed underhållskostnaderna, reduceras väsentligt.

2.2.2 USA

I USA finns ett av världens äldsta tunnelsystem, såväl för väg- som spårtrafik. Många av dessa är bergtunnlar. I en studie av spår-tunnlar gjord av the Federal Transit Administration (Delatte et al, 2003) konstateras, att investeringen i sådana tunnlar är extremt stor och att denna investering måste skyddas genom noggrant underhåll, särskilt om man betänker att många tunnlar är över 100 år gamla. I utredningen ingick att visa på inspektionsmetoder som kan användas utan att trafiken behöver stängas av, eftersom flera tunnelbanesystem trafikeras dygnet runt. Nästa uppgift var att utvärdera icke-förstörande mätmetoder i tunnlar, som kräver visst trafikuppehåll.

Kanske inte förvånande visade sig mätningar som utförs från rullande tåg i trafik kräva ytterligare utvecklingsarbete för att ge användbara resultat.

Till de icke-förstörande metoderna som utvärderades hörde:

- manuella akustiska metoder, vanligen med Schmidt-hammare
- impakt-eko, som även kan ge tjocklek på sprutbetong
- spektralanalys av ytvågor,
- magnetiska metoder för att upptäcka stålelement,
- GPR (ground penetrating radar)

GPR var den metod som utredningen menade hade störst framtid för tunnelinspektion och flera framgångsrika tester gjordes med metoden i en avstängd tunneldel.

The Federal Highway Administration publicerade 2005 en tämligen utförlig manual för inspektion, underhåll och reparationer av vägtunnlar³. I övrigt är litteraturen om amerikanskt tunnelunderhåll mycket begränsad.

³ Tunnel Inspection Manual och Tunnel Maintenance and Rehabilitation Manual (<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/maintman>)

2.2.3 Japan

Vägtunnlar

Japan är ett land med ett stort antal vägtunnlar, många av dem mycket långa. Med en ålder överstigande 50 år kräver många av dessa ett omfattande underhåll. Idag (2012) är ca 5000 vägtunnlar i drift, med en total längd på över 3500 km.

Berggrunden i Japan är mycket varierande, med en dominans av vulkaniter. Flera av dessa bergarter har relativt låg hållfasthet, vilket innebär att krypningsfenomen är vanliga. Som standard förses tunnlar med en inklädnad av betong. Som ett led i planeringen av underhållsarbetet, följs konvergensen hos tunnelväggarna liksom sprickutbildningen i inklädnadsbetongen genom regelbundna inspektioner.

Japans vägdepartement har tagit fram manualer för såväl inspektioner som underhållsarbeten i vägtunnlar (Mashimo & Ishimura, 2008). Målsättningen är att i tid upptäcka områden i tunneln som har risk för nedfall av inklädnadsbetong och/eller berg, att avgöra om och när reparationsarbeten bör igångsättas samt att ange lämplig teknik för dessa arbeten.

Som komplement till traditionella inspektioner, där spricksystemet i betongen karterades för hand och dokumenterades genom handskisser, har idag utvecklats fordon med avancerad teknik, såsom laser och CCD-kameror, vilka automatiskt (och objektivt) dokumenterar spricksystemet under minimal störning av trafiken i tunneln. Fordonen är ofta också utrustade med automatiskt bomknackningsaggregat, liksom med geofysiska instrument för ultraljud och termiska infraröda vågor, avsedda för studium av betongens tjocklek och dess vidhäftning mot berget. I de fall tolkningen av mätresultaten försvåras av armeringen i betongen och förekomst av mycket vatten bakom liningen används en borrhög monterad på ett fordon som snabbt kan producera klena inspektionshål genom betonginklädnaden.

Orsakerna till instabilitet hos tunnelinklädnader har konstaterats vara en eller flera av följande faktorer:

- Bergtrycket ökar på grund av plasticering av bergmassan
- Betongliningen åldras och bryts ner
- Inrinnande grundvatten påverkar konstruktionen, t.ex genom istryck

De vanligaste reparationsåtgärderna är kompletterande armering och kontaktinjektering bakom liningen samt installation av bergbult. Detta är krävande arbeten på grund av det begränsade utrymmet mellan betong och berg, varför utveckling av nya arbetsmetoder pågår. Ett annat problem som sysselsätter tunnelexperterna i Japan är hur stora de externa lasterna på den renoverade liningen blir och hur denna skall dimensioneras för dessa laster.

Med det stora antalet tunnlar med hög ålder, kommer underhållsbehovet för vägtunnlar att öka i Japan. Samtidigt sägs, att de tillgängliga resurserna är begränsade. Ett långsiktigt livscykel tänkande är därför nödvändigt. De riktlinjer som anges innehåller följande:

- Nya vägtunnlar skall projekteras och byggas med sådan kvalitet, att livscykelkostnaden för byggande, underhåll och reparationer minimeras

- Fortgående konvergens hos tunnelväggarna skall i möjligaste mån vara förhindrad, vilket kontrolleras genom mätningar under tunnelns livslängd
- Tunnelns status kontrolleras genom regelbundna inspektioner, från vilka alla data sparas
- Störningen på trafiken av ovanstående åtgärder skall ingå i optimeringen av underhållet
- Experter inom alla stadier av tunnelbyggande, från design till slutligt underhåll, bör utbildas

Den senaste utvecklingen när det gäller informationsinsamling som underlag för underhåll av vägtunnlar, är systemet USIMS – Underground Space Information Management System, se Onishi et al (2008). Detta system ger en 3D-bild av tunneln och omgivande bergmassa och är kopplad till en databas som innehåller all data som insamlats under projektering, byggande, inspektioner och underhållsarbeten i tunneln. Tillgängligheten till alla data, visualiserad på 3D-bilder, ger goda möjligheter att upptäcka förändringar i tunneln och planera underhållsarbetena.

Spårtunnlar

I Japan finns ett stort antal spårtunnlar, många av dem för höghastighetståg med topphastighet över 250 km/h. Flera tunnlar har stor längd. Liksom för vägtunnlarna utgör bergrörelser, som ger inåtgående konvergens av tak och väggar i spårtunnlarna, det största faromomentet. Om sådana deformationer leder till att betonginklädnader spricker och nedfall sker av betong och bergmaterial på spåret, kan konsekvenserna bli mycket allvarliga. Enligt Asakura & Kojima (2003) inträffade under 1999 en serie sådana incidenter i Japan, vilket skärpte kraven på att inspektionerna måste klara att detektera uppspruckna partier av liningen.

I Japan sker översiktlig inspektion av spårtunnlarna minst en gång vartannat år. Detaljerad inspektion sker med intervallet 10 – 20 år, beroende på geologiska förhållanden, trafikmängd i tunneln och tidigare historik. De tekniker som utvecklas är i stort sett desamma som för vägtunnlar. I spårtunnlar sker inspektionerna idag med specialfordon kompletterade med spårföljare och vilka är utrustade med automatiska registreringsinstrument.

Liksom för vägtunnlar, har japanska myndigheter tagit fram manualer för inspektion och underhåll av järnvägstunnlar och samma krav på livslängdstänkande för design/ bygge/ underhåll har ställts.

Det tidigare beskrivna USIMS-systemet är givetvis också möjligt att applicera på spårtunnlar.

2.2.4 Övriga länder

I Australien har den publicerade kunskapen om tunnelunderhåll varit koncentrerad till Sydney Harbour Tunnel, en knappt 1 km sänktunnel i betong som är ett av de största infrastrukturprojekten i landet. För bergtunnlar kan erfarenheten av denna tunnel ha visst intresse, eftersom underhållet till största delen avser korrosion i armeringsstål (Marosszky et al, 2003).

Från Korea och Taiwan, länder med många trafiktunnlar i berg, har endast ett fåtal artiklar publicerats. Inga av dessa visar på att dessa länder har världsledande positioner i ämnet. Möjligen är det så, att tekniken i grannlandet Japan dominerar kunskapsmässigt.

2.2.5 Sammanfattning

Genom sin topografi och befolkningstäthet är Japan ett land med stort behov av tunnlar för intern kommunikation. Hög teknologisk standard har gjort att de fordon som passerar i tunnelarna ofta har mycket hög hastighet. Samtidigt är många bergpartier i Japan av tämligen låg hållfasthet, vilket gör att det alltid finns en potentiell risk för överbelastning av tunnelarnas inklädnad. Behovet av noggrann inspektion och planerat underhåll av tunnelarna blir därför stort. Sett mot denna bakgrund är det inte underligt, att Japan intar en framträdande position i tunnelunderhållstekniken i världen. Där utvecklas ”state-of-the-art”-utrustningar för framtidens inspektioner av trafiktunnlar.

I övriga I-länder sker en betydligt blygsammare utveckling. Hur underhållet är organiserat är till stora delar okänt, eftersom publiceringen på området är sparsam. Intresset verkar främst vara knutet till förvaltning av det stora kapital som nedlagt i tunnelarna och att minimera kostnaderna för dessas bestånd.

En jämförelse mellan praxis i för tunnelunderhåll i andra länder med svenska förhållanden har inte gjorts i denna utredning, utan kommer att genomföras i en kommande, planerad etapp av projektet.

Frågan om resenärernas säkerhet vid genomfarter i tunneln har tvärvetenskaplig karaktär och har mycket sällan varit föremål för vetenskaplig publicering.

2.3 Trafiktunnlar i Sverige

Den generellt goda berggrunden i Sverige har möjliggjort att de flesta tunnlar kunnat byggas utan generella stabilitetsproblem.

Äldre trafiktunnlar utfördes i många fall med fristående innertak. Dessa var uppbyggda av prefabricerade betongelement eller av nätarmerad sprutbetong mot en innerform av eternit eller formplywood (FortF-valv). Innertakens bärförmåga brukade tillgodoräknas, varför berget ofta lämnades oförstärkt. Avståndet till bergytan varierar mellan någon dm till en meter eller mer. Oftast saknar innertak av denna typ inspektionsluckor, vilket omöjliggör kontroll och underhåll av bakomliggande berg.

I takt med att tekniken för bergbultning och betongsprutning utvecklades på 1960-talet och framåt, övergavs de fristående betongvalven i trafiktunnelarna. Underhållsinsatserna i dessa tunnlar baseras på en inspektion av den fria bergytans eller sprutbetongytans integritet, samt kontroll av bultar och dränsystem. De naturliga förutsättningarna att bedriva inspektions- och underhållsarbeten i tunnlar varierar på grund av geografiskt läge, tillgång till vägåtkomst samt naturligtvis på tunnelns och inredningens konstruktion.

2.3.1 Vägtunnlar

I Sverige finns för närvarande 41 st. vägtunnlar med en sammanlagd längd av knappt 25 km. Ungefär hälften av anläggningarna har två parallella tunnelrör. Den längsta vägtunneln i Sverige, Södra Länken i Stockholm, är ca 4 km lång. I jämförelse med länder som Japan och Norge är användningen av tunnlar i det svenska vägnätet mycket blygsam.

Det dröjde länge innan man började bygga vägtunnlar i vårt land, den första invigdes så sent som 1958 i Boxvik på Orust. Nya infrastrukturprojekt förutsätter dock ofta att nya vägar i tätort dras i tunnlar. De

flesta svenska vägtunnlarna är koncentrerade till större anläggningar i Stockholm och Göteborg, med några få tunnlar i övriga landet. Exempel på nya bergtunnlar i Stockholm är Södra Länken och Yttre Tvärleden, medan man i Göteborg på senare tid byggt Lundby- och Götatunnlarna.

Närliggande projekt i framtiden är Norra länken och Förbifart Stockholm och ytterligare tre vägtunnlar.

2.3.2 Spårtunnlar

Järnvägstunnlarna är mer geografiskt spridda över landet än vägtunnlarna, med koncentrationer till vissa bandelar som Botnia/Ådalsbanan, Grödingebanan, Västkustbanan med flera. Totalt finns 43 st. järnvägstunnlar med en total längd på drygt 74 km. Av dessa är 18 tunnlar enkelspåriga. Spårtunnlarna har en längre tradition än vägtunnlarna. Den första tunneln byggdes på Busbanan redan 1908, medan Stadsgårdstunneln i Stockholm togs i drift 1912. De längsta järnvägstunnlarna, Namntall på Botniabanan och Citytunneln i Malmö, har byggts nyligen och båda är 6 km långa.

I Stockholm finns den allra största koncentrationen av spårtunnlar i SL:s tunnelbanenät, som har en total längd bergtunnlar på ca 90 km. Göteborg har tre spårvägstunnlar i berg, den längsta drygt en km lång.

I landet byggs för närvarande två spårtunnelprojekt, Citybanan i Stockholm och Hallandsåstunneln. Det planeras för ytterligare ett antal järnvägstunnlar såsom Västlänken i Göteborg, samt för en utbyggnad av tunnelbanenätet i Stockholm. Om Götalandsbanan Göteborg – Borås – Jönköping – Stockholm blir verklighet, innebär detta att ett stort antal tunnlar kommer att byggas.

2.4 Konstruktionsdelar som kräver underhåll

Tunnlar utsätts kontinuerligt för en mer eller mindre aggressiv omgivning. Den samhälleliga investeringen i tunnlar är mycket stor, varför det krävs omfattande underhåll och styrning för att ”vårda” denna investering fram till livslängdens slut. För störningskänsliga trafiktunnlar krävs det inspektionsmetoder som snabbt och med acceptabel precision kan avgöra tunnelns status utan att mer än absolut nödvändigt störa tunnelns normala trafik. En internationell utblick visar, se avsnitt 1.2, att teknik för detta finns, men att den ännu inte är implementerad fullt ut.

Trots den förödande verkan som ett ras i en trafiktunnel kan få, verkar tunnelinspektioner hittills ha fått relativt liten uppmärksamhet som professionell verksamhet av tunnelägarna, bergbyggarkåren och myndigheterna. Verksamheten verkar spela en tämligen underordnad roll i de stora drift- och underhållsprogrammen för vägar och spår.

De konstruktionsdelar i en bergtunnel som skall säkerställa tunnelns mekaniska stabilitet och beständighet brukar benämnas det *bärande huvudsystemet*. Det är dessa tunneldelar som säkerställer trafikantsäkerheten och tunnelns goda funktion och som blir föremål för inspektion och underhållsinsatser. Vid inspektion och underhåll av bergtunnlar får man skilja mellan tunnlar där berget själv är bärande huvudsystem och tunnlar där bergförstärkningar i samverkan med berget är bärande huvudsystem.

I nybyggda tunnlar brukar man anta en livslängd på 120 år för det bärande huvudsystemet. Vid bergunderhåll i äldre tunnlar uppkommer frågeställningen om vilken livslängd som skall krävas på utbytta eller uppgraderade förstärknings- eller tätningselement. Eftersom regelverket för tunnlar endast talar om nybyggnation, kan resultatet bli att onödigt resistent (och dyra) installationer görs i gamla tunnlar.

Inklädnader är också underhållskrävande och miljöstörande element i en tunnel. En mot berget gjuten betonginklädning (liner) är (frånsett portaler) en del av det bärande huvudsystemet, medan ett vattentätande membran inte är det.

När berget självt är bärande huvudsystem används selektiv fastbultning av block för att säkerställa god valvverkan i tunneltak och väggar. Att säkerställa att dessa bultar är intakta är således av vitalt intresse för tunneln lastöverförande förmåga och för att förhindra blocknedfall från bergytan. Rutinmässigt används också sprutbetongspåslag för att säkra bergytan mot nedfall av block, så kallad ytförstärkning.

När det bärande huvudsystemet utgörs av berg och bergförstärkning i samverkan, sätts bultarna i ett rutnät som så kallad systembultning. Vanligen kombineras bultningen med ytförstärkning av sprutbetong. Denna utförs så, att den samverkar mekaniskt med bultarna genom sprutbetongbrickor. Förstärkningen utförs vanligen i tunneltaket, ibland också i tunnelväggarna.

2.5 Problem i samband med akut bergunderhåll

2.5.1 Kort tillgänglighet

Om trafikintensiteten i en vägtunnel är hög, måste ofta underhåll utföras på tider med låg trafikintensitet även om det finns flera körfält.

Vid spårtrafik innebär spårtunnlar med ett enda tunnelrör en mycket stor begränsning av möjligheter att utföra underhåll. Vid dubbelspår stoppas vanligen inte trafiken helt genom möjlighet till så kallad ”kanalkörning” med reducerad hastighet. Trafikintensiteten blir dock avgörande för hur och i vilken omfattning tunneln kan disponeras.

Se vidare avsnitt 2.1.

2.5.2 Brist på bergkartering och övrig dokumentation

Med beaktande av den mycket korta tid som vanligen står till förfogande för inspektion av en trafiktunnel, är det mycket viktigt att all information om platsens och tunnelns geologi finns tillgänglig, om möjligt i god tid innan förrättningen. Viktiga upplysningar är också data om skadeutvecklingen och utförda åtgärder. Det är inte alltid sådan information har sparats och relationsritningar saknas ofta.

Efter inspektionen bör befintlig information uppgraderas, så att den finns tillgänglig vid nästa tillfälle. Informationen bör dokumenteras digitalt, så att den kan finnas tillgänglig på inspektörens fältdator. Om möjligt bör den geologiska karteringen redovisas i 3D och i färg.

Vid mycket korta tillgängliga tidsintervaller kan det vara svårt att upprätthålla dessa kvalitetskrav.

2.5.3 Entreprenörens kompetens, utrustning och säkerhet

Normalt sett utförs drifts- och underhållsarbeten för vägar och järnvägar i så kallade "baskontrakt" som innehåller ett antal vägar eller bandelar. Sådana kontrakt läggs ut på ett antal entreprenader. Specialiserade arbeten, såsom bro, berg och geoteknik, ingår vanligen inte i baskontrakten, utan handlas upp separat i så kallade ”ramavtal” med specialistföretag. Bergunderhållsarbeten i tunnlar ingår i denna kategori. Trafikverket brukar sköta projektledningen genom sin egen organisation medan SL och kommuner upphandlar denna funktion.

Det har visat sig, att de relativt korta kontrakten för bergunderhållsarbeten gör det svårt för specialistföretagen att engagera och behålla expertis och att utveckla maskinell utrustning för inspektion och bergunderhåll. Detta blir ett hinder för genomförandet av den "upprustning" av praxis som föreslås i denna utredning, se avsnitt 6 sist i rapporten.

I många fall har det visat sig att entreprenörernas utbildning för säkerhet i tunnlarna också visat brister.

2.5.4 Utrymme och risk vid arbete i trafiktunnlar

Vägtunnlar

Vägtunnlar utförs ofta med spännvidder på 20 m eller i extremfall 30 m eller mer.

I normalfallet finns det möjlighet till etablering i anslutning till tunnelpåslagen via vägsystemet. I moderna tunnlar finns dessutom ofta kabelsystem för högspänd hjälpkraft som kan användas vid arbetena.

I vägtunnlar används konventionella, hjulburna fordon och utrustningar.

Risker som kan uppstå i vid inspektions- och underhållsarbeten i vägtunnlar är relaterade till arbets säkerhet vid avstängda körfält. I enstaka fall kan problem med nedfallande betong och rök i tunneln uppstå.

Spårtunnlar

Dessa kan ha spännvidder på ca 7 m vid enkelspår och ca 13 m vid dubbelspår.

I spårtunnlar måste hjulbundna fordon normalt kompletteras med spårföljare. Helt spårbundna etableringar kräver uppställningsspår utanför tunneln. Transporttiden mellan uppställningsspår och tunnel kan vara lång och måste planeras in noga för att inkräkta så lite som möjligt på inspektions- och underhållsarbetet. Vid dubbelspår är normalt ett spår i drift vid underhållsarbeten. Riskerna kan då vara påkörning, beröring av kontaktledning, nedfallande byggnadsmaterial och vatten på spår, växlar och järnvägstekniska system.

2.5.5 Störningar för operatör och resenärer

Vid trafikomläggningar orsakade av inspektions- och underhållsarbeten i trafiktunnlar uppkommer kostnader för trafikanternas ökade tid, risker för trafikolyckor, fordonsslitage samt miljöeffekter. Man brukar räkna med⁴, att tilläggstiden för varje person (med bil) kostar samhället 72 SEK per timme. Om en vägtunnel med trafikintensiteten (ÅMD) 25000 helt måste stängas en arbetsvecka för underhåll, och tilläggskörtiden blir 10 min, blir "samhällskostnaden": $25000 * 5 * 10 / 60 * 72 = 1,5 \text{ MSEK}$. För tågresenärer som måste byta till buss, kan samhällskostnaden i vissa fall bli ännu större.

Praxis vid underhåll av spårtunnlar är dock att inte räkna med någon samhällskostnad om arbetena är planerade och aviserade i mycket god tid.

⁴ SIKA (2005)

2.6 Dagens praxis för akut bergunderhåll

En beskrivning av den teknik som tillämpas vid inspektions- och underhållsarbeten i bergtunnlar finns i avsnitten 3 och 4. Hur dessa resurser tillämpas av de olika tunnelägarna redovisas kortfattat nedan.

2.6.1 Regelverk

Utöver interna föreskrifter tillämpas normalt följande allmänna regelverk för arbetena (Skoglund, 2012):

- *Trafikverket: TrafikverketR Tunnel 11
- *Trafikverket: TrafikverketK Tunnel 11
- * Trafikverket Trafikverket Bro 11
- *Arbetsmiljöverket: AFS 2010:01 Berg- och gruvarbeten⁵
- *Arbetsmiljöverket: AFS 1999:03 Byggnads- och anläggningsarbete
- * Boverket: BFS 2011:10 EKS 8: Europeiska konstruktionsstandarder
- * Svensk Byggtjänst: AnläggningsAMA 10
- * Svensk Byggtjänst: RA 98 – Anläggning

2.6.2 Trafikverket

Vägtunnlar

Trafikverket ansvarar för skötseln av det statliga vägnätet. Övriga vägar sköts av kommunala eller enskilda väghållare. Drifts- och underhållsarbeten för vägar och konstbyggnader i samband med vägar brukar läggas ut i så kallade "baskontrakt" innehållande ett antal entreprenader. Specialiserade arbeten, såsom bergunderhållsarbeten i tunnlar, ingår dock vanligen inte i baskontrakten, utan brukar handlas upp separat hos specialistföretag. För de statliga tunnelarna brukar Trafikverket till största delen sköta projektledningen genom sin egen organisation.

Spårtunnlar

Trafikverket ansvarar även för skötseln av det statliga järnvägsnätet (tidigare Banverkets roll). Organisationen för banunderhållet liknar den för vägarna. Tunnelunderhållet handlas även här upp av specialistföretag. Vid kortare arbeten (< 1 år) tillämpas vanligen ramavtal, längre och större entreprenader upphandlas separat i konkurrens.

2.6.3 SL

SL sluter normalt avtal på tre år med ett fåtal entreprenörer (för närvarande två stycken) genom offentlig upphandling. Besiktning av tunneln och mindre åtgärder sker efter upprättad verksamhetsplan, baserad på ställda besiktningintervaller.

Inspektionerna sköts av en sakkunnig person som utses av entreprenören och godkänns av beställaren. För att underlätta besiktningen tvättas tunnelarna regelbundet med ett särskilt spoltåg.

Finner inspektören att underhåll måste sättas in, planeras detta in som en aktivitet i arbetsprogrammet och en intern byggledare utses. Ju mer akut problemet är, desto längre fram i arbetsprogrammet hamnar arbetet. Vid större och mer komplicerade arbeten görs en projektering och arbetshandlingar tas

⁵ Enligt AFS 2010:01 gäller föreskrifterna inte "färdig tunnel"

fram av externt anlita konsult.

När arbetet slutförts, sker en ny besiktning som skall godkänna resultatet. Härefter bokförs underhållsarbetet i SL:s projektregister och i BaTMan-systemet (Skoglund, 2012).

2.6.4 Övriga tunnlar

Rutinerna för inspektion och underhåll av kommunala och enskilda tunnlar har inte undersökts i utredningen.

3 Tillgänglighet för inspektion och underhåll

3.1 Tidsmässig tillgänglighet - Planering

Planeringsmetodiken för inspektions- och underhållsarbeten beror av arbetenas art och på den tidshorisont som gäller. Trafikverket respektive SL och kommunala trafikföretag ansvarar för den samlade planeringen av väg- och spårtrafiken.

Avstängning av ett eller flera körfält i en vägtunnel kan ge möjlighet att utföra underhåll med bättre kontinuitet än på vägar med enkla körfält. Kapaciteten på trafikflödet förbi arbetsplatsen avgör om det är möjligt. Ett sådant arbetssätt kräver effektiv avskiljning mellan trafik och arbetsutrymme för att inte riskera skador på trafikanter och fordon och skapa en säker arbetsplats för entreprenören.

Vid spårtrafik innebär ett enkelt tunnelrör att det i praktiken inte finns några möjligheter att utföra underhåll utan att stänga av trafiken. Även dubbelspårtrafik i ett tunnelrör utgör ett hinder för effektivt underhåll. Bästa lösningen ur underhållssynpunkt är två parallella tunnelrör, där en tunnel kan stängas helt för trafik när underhåll utförs och den andra tunneln utnyttjas för trafik i båda riktningar. Tiderna som kan disponeras för underhållsarbeten varierar kraftigt beroende på vilken trafikmängd som tunneln har och vilka störningar som tillåts.

Trafikeringen i spår-tunnlar skiljer sig från bana till bana och kan även skilja mellan olika perioder på året. Det går därför inte att redovisa några mer generella uppgifter om tillgängliga tider i spår. För enkelspårssträckor är det inte ovanligt att tunnelarna trafikeras dygnet runt med "vita" tider på upp till några timmar mellan varje tåg, medan det för dubbelspårssträckor inte är ovanligt att s.k. kanalkörning tillämpas vilket innebär att ett spår i bästa fall kan frigöras för underhåll med upp till 4-5 timmar per natt. För vissa banor kan det finnas möjlighet till längre arbetspass under helger.

Vägtunnlar

Trafikmängden (fordon per årsmedeldygn, ÅDT) och möjligheten till alternativ färdväg är styrande för vilka inskränkningar som kan göras i trafikflödet på vägar. Om trafikintensiteten (ÅDT) är hög, måste ofta underhåll utföras på tider med låg trafikintensitet även om det finns flera körfält. Det senare arbetssättet innebär att etablering och avveckling i trafikutrymmet måste vara särskilt effektiv.

Tiderna som kan disponeras för underhållsarbeten i vägtunnlar varierar kraftigt beroende på vilken trafikmängd som tunneln har och vilka störningar som tillåts. Kapaciteten på trafikflödet förbi arbetsplatsen avgör om det är möjligt. Ett sådant arbetssätt kräver effektiva avskiljningar mellan trafik och arbetsutrymme för att inte riskera skador på trafikanter och fordon och för att skapa en säker arbetsplats för entreprenören.

Spårtunnlar

Stockholms tunnelbana kan endast upplåtas drygt fyra timmar per natt för färd till arbetsstället, uppställning, skydd, arbetsutförande, rengöring, avveckling och transport tillbaka till depå. Genom en väl förberedd utrustning, mycket väl inarbetad personal med effektiv ledningsfunktion är det ändå möjligt att utföra relativt avancerade uppgifter. Detta är endast möjligt om underhåll genomförs kontinuerligt enligt fastställd plan⁶.

Plats för utrustning i nischer eller liknande i eller utanför tunneln som gör att maskiner och material inte behöver transporteras bort efter varje arbetsskift höjer effektiviteten. Så kallade 2-vägsfordon ger möjlighet att komma upp på spåret från närliggande väg.

3.1.1 Trafikverkets vägtunnlar

De fyrtioen statliga vägtunnlar som är i drift i landet idag har en sammanlagd längd av knappt 25 km. Ungefär hälften av anläggningarna har två parallella tunnelrör. Den längsta vägtunneln i Sverige, Södra Länken i Stockholm, är ca 4 km lång.

Underhållet av tunnelarna sköts av specialistföretag medan arbetsledning administreras av Trafikverket:s personal.

3.1.2 Kommunala vägtunnlar

Kommunala tunnlar administreras ofta av trafikkontoren i respektive kommun. Eftersom de viktiga genomfartstunnlarna även i städer ingår i Trafikverkets organisation, är de kommunala ofta sådana med låg trafikmängd. De kommunala trafiktunnlarna i Stockholm är dock komplexa och har hög trafikmängd:

- Söderledstunneln: 1600 m längd, ÅDT >80 000
- Klaratunneln: 850 m, ÅDT 40 000
- Blekholmstunneln: 350 m, ÅDT 65 000
- HKBTunneln: 240 m, ÅDT 24 000
- Esbotunneln: 230 m, ÅDT 8000
- Tomtebodotunneln: 107 m, avstängd under Norra länken-arbetena
- Karlbergstunneln: 177 m, ÅDT 60 000

Eftersom dessa tunnlar är placerade centralt i staden, blir kringliggande bostäder ofta störda av underhållsarbeten i tunneln på natten. Underhållet i trafiktunnlarna i Stockholm sker i samband med de inplanerade driftsavstängningarna. Tunnelarna stängs då kl 22-05. Avstängning andra tider sker endast vid akuta insatser.

3.1.3 Trafikverkets spårtunnlar

Det nationella järnvägsnätet och dess tids- och kapacitetsmässiga begränsningar beskrivs av

⁶ Som jämförelse har tunnelbanan i New York inget trafikstillestånd på dygnet

Järnvägsnätsbeskrivningen (JNB). Där redovisas också större, inplanerade banarbeten.

Speciellt styrs järnvägstrafiken i Sverige av *Trafikverket:s Tågplan*. Alla operatörers (SJ med flera) tidtabeller måste inordnas i Trafikverket:s Tågplan. Det är inte möjligt att i denna boka upp tider som buffert. Kapacitetstilldelningen sker utifrån de planerade och finansierade, reella behov som föreligger. Trafikverket måste i god tid kunna redovisa det kapacitetsutnyttjande som alla banarbeten kräver.

Planeringen av underhållsarbetena sker enligt två olika rutiner, BAP respektive BUP, beroende om den görs före eller efter fastställd Tågplan. BAP står för *Banarbetsplan* och BUP för *Banutnyttjandeplan*.

De arbeten som är angivna i BAP är godkända och finansierade för genomförande. Det är lämpligt att översiktliga inspektions- och underhållsjobb förs till denna kategori. Dessa arbeten skall då planeras noggrant avseende berörda spårdelar och tidsåtgång.

Arbeten med fördjupad inspektion och underhåll planeras efter fastlagd Tågplan i BUP. Vid aktiva arbeten försöker man i första hand utnyttja restkapacitet ("vita tider")⁷.

Det ligger i sakens natur, att akuta reparations- och ersättningsarbeten inte kan planeras i förväg. Sådana arbeten måste läggas in "ad hoc", vilket innebär att annan planerad verksamhet får flyttas fram i tiden.

3.1.4 SL:s spårtunnlar

Tunnlarna varierar i standard, vilket har sin bakgrund att delar av tunnelsystemet har relativt hög ålder, ca 60 år. Under denna tid har skett stora framsteg inom drivnings- och förstärkningsmetoder, liksom inom materialområdet. SL uppger, att deras olika typer av tunnlar kräver varierande typ av underhåll eftersom förutsättningarna varierar. Exempelvis kräver tunnelutrymmen som inte trafikeras och där allmänheten inte vistas något enklare underhåll än spårtunnlar och stationsutrymmen (Skoglund, 2012).

Praktiskt taget varje natt mot vardag pågår inspektions- och reparationsarbeten i SL:s spårtunnlar. Man utnyttjar då det fyratimmars uppehåll i trafiken som råder nattetid. Eftersom det finns 90 km tunnel att inspektera och fyratimmarspassen per år är ca 250 st, skulle teoretiskt över 700 m tunnel eller 4000 m² tunnelyta behöva besiktigas per natt om hela systemet skulle "gå igenom" varje år. Detta är naturligtvis en orimlig arbetstakt som inte heller är motiverad med hänsyn till tunnelarnas överlag goda status. I stället går tunnlar igenom i planlagda intervaller under ett specificerat antal år enligt en upprättad *besiktningsplan*. Avvikelser från periodiciteten kan förekomma, baserat på erfarenheter av problem på vissa tunnelsträckor. Tillgång till arbetsplatsen regleras i en *spårdispositionsplan*. Protokollen från besiktningar och underhållsåtgärder sparas löpande för kommande behov.

En arbetslag på fyra man utför bomknackning, skrotningsarbete och mindre punktinsatser, såsom viss betongsprutning och byte av dropplåtar m.m. Härtill kommer två förare av det spårbundna "arbetståget" (kallat "Bergforan") som för med sig arbetsplattform och nödvändig utrustning (Skoglund, 2012) till arbetsplatsen. Förutom effektiv arbetstid och transporttid skall det finnas tid för etablering och avetablering och väntetid under nattsiftet (Sundquist, 2003).

Arbetena på SL:s spårtunnlar utförs av en utsedd entreprenör som själv utser en certifierad besiktningsman.

⁷ Problemet med dessa tider är att det kan komma "extra tåg" som har högre prioritet än pågående arbeten

3.1.5 Kommunala spårtunnlar

Det finns endast ett fåtal kommunala spårtunnlar i landet. Göteborgs Spårvägar driver den ca 1 km långa Chalmerstunneln samt ett par kortare spårvägstunnlar.

3.2 Utrymmesmässig tillgänglighet

Arbetsplatserna, där inspektion och underhåll skall utföras kännetecknas av små ytor.

Vägtunnlars bredd varierar normalt mellan 7-25 m, beroende på antalet körfält, i extremfall upp till 30 m. Vid större tunnlar med motriktade körfält kan man välja att stänga av ett körfält under arbetena och låta trafiken passera på det andra. Vid trånga enkeltunnlar måste trafiken stängas av i tunneln. Vid dubbeltunnlar kan man välja att helt stänga av ett av tunnelrören och leda trafiken i två riktningar i det andra röret. Dubbeltunnlar ökar flexibiliteten för planerade underhållsinsatser.

Spårtunnlar är normalt mindre, med spännvidder mellan 7-13 m för enkel- respektive dubbelspår. Enkelspårstunnlar måste alltid stängas av vid underhållsarbeten, eller så måste arbetena utföras när det är trafikfritt (vita tider). På grund av olyckrisken gäller detta normalt också vid dubbelriktad trafik i samma tunnelrör. Vid dubbeltunnlar har man möjlighet att växla trafikriktningarna i det öppna röret, medan arbeten på går i det andra röret.

3.3 Samhällelig tillgänglighet - Störningar och acceptans

En trafikunnel som är helt eller delvis avstängd innebär alltid en störning för trafikanterna och en belastning för samhället. Dessutom ökar risken för olyckor och miljöpåverkan blir större. Det finns en grundläggande förståelse hos allmänheten, att infrastrukturen måste underhållas för att driftsäkerheten skall kunna upprätthållas. Trafikanläggningar som underhålls dåligt och av denna anledning periodvis måste hållas stängda möter däremot svag förståelse⁸. Inspektions- och underhållsarbeten i trafiktunnlar bör därför göras akut och helst så ”osynligt” som möjligt. När trafiken släpps på igen, bör inga synliga spår av arbetena finnas kvar i tunneln. Detta är särskilt viktigt vid vägtunnlar, som har många ”observatörer” i form av bilister.

3.4 Hur kan tillgängligheten förbättras?

Med utgångspunkten att inspektions- och underhållsinsatserna genomförs på tre ”nivåer”, a) frekventa, övergripande, b) selektiva, fördjupade och c) akuta underhållsarbeten (reparationer), kan följande slutsatser dras:

- Översiktliga insatser kan inplaneras långt i förväg och kan göras rutinmässigt och fort. Tillgängligheten till tunneln kan göras god med dessa förutsättningar
- Fördjupade insatser kräver mer disponibel tid i tunneln vilket kan leda till trafikstörningar. Om problemen som skall studeras/åtgärdas inte är akuta finns tid att hitta slot-tider som kan tolereras
- Reparationsarbeten kräver normalt avstängning under viss tid med trafikomledning som följd. Beroende på hur akut problemet är, kan åtgärderna möjligen vänta till en tidsperiod där

⁸ Stillastående eller försenade tåg p.g.a. dåligt underhållna spår är välkända exempel

störningen kan hållas nere

- Samordning av olika underhållsarbeten

4 Inspektion

4.1 Inledning

Grunden för all planering av underhåll i tunnlar är att genom inspektion klarlägga tunnelns fysiska och funktionella tillstånd. I botten ligger trafikanternas krav på säkerhet och framkomlighet i tunneln, men även ekonomiska motiv.

Konditionen på installationer och det bärande huvudsystemet beror på ålder, belastningar såsom grundvattentryck temperaturvariationer, tryck- och sugkrafter. Förändringar kan även ske på grund av att användandet av tunneln har förändrats jämfört de förutsättningar som gällde då tunneln projekterades och byggdes. Följande inspektionstyper finns stipulerade av Trafikverket⁹

- Översiktlig inspektion
- Huvudinspektion
- Allmän inspektion
- Särskild inspektion

En granskning av innehållet i dessa inspektionstyper visar, att de har sin huvudsakliga tillämpning vid broinspektion och att de inte i alla delar är anpassade för berginspektion i tunnlar. För tunnelinspektion tillämpas i princip endast huvudinspektion och särskild inspektion¹⁰.

Huvudinspektionen syftar till att upptäcka och bedöma brister som kan påverka konstruktionens funktion och trafiksäkerhet och/eller öka förvaltningskostnaderna. Den omfattar alla konstruktionselement och utförs med tio års intervall och syftar till att upptäcka och bedöma skador som kan leda till instabilitet och minskad trafiksäkerhet. Besiktningen skall också följa upp utvecklingen av de skador som påtalades vid den senaste huvudinspektionen och som ännu inte åtgärdats.

Huvudinspektionen omfattar samtliga konstruktionselement och görs tidsmässigt ”efter behov”. Mätningar utförs i samband med inspektionen där så erfordras. Finns inte tid för dessa, utförs mätningarna i tunneln inom ramen för *Särskild inspektion* som utförs minst var sjätte år.

Speciellt för bergtunnlar ställs relativt höga krav på inspektörens kompetens: bergsingenjör alt.

⁹ Handbok för inspektion av byggnadsverk, Trafikverket 2012

¹⁰ Dessutom utförs så kallade ”säkerhetsbesiktningar” av järnvägstunnlar ett par gånger om året och liknande kontroller i vägtunnlar något mer sällan. Dessa besiktningar utförs av personal som inte är bergsakkunnig (driftentreprenör) och ger inget underlag för bergunderhåll. De behandlas därför inte vidare här

genomgången väg- och vatten eller geolinje på högskola, 5 års erfarenhet av underjordsarbete samt kännedom om de styrande dokument som reglerar tunnelbyggande.

Som nämnts tidigare är inspektionssystemet i princip utformat för brokonstruktioner. De metoder för berginspektion i trafiktunnlar som används idag har vissa begränsningar som bottnar i den ibland dåliga tids- och utrymmesmässiga tillgängligheten av tunneln. Framförallt gäller detta spår-tunnlar. Detta är inte acceptabelt med hänsyn till de svåra konsekvenser som ett ras i en tunnel kan få. Utredningen har inventerat de utvecklingsmöjligheter som finns för att möta de allt högre kraven på effektiva och tillförlitliga inspektioner. Som en följd föreslås i denna utredning att det ovan beskrivna inspektionssystemet förenklas genom att begränsning görs till två inspektionstyper plus åtgärder, samt att tekniken för besiktningarna förbättras.

För att fungera optimalt i bergtunnlar föreslås i avsnitt 5 (Figur 6) att huvudinspektionen istället kallas *Statusinspektion* och utförs översiktligt vartannat år och noggrannare vart 6:e år. Inspektionen föreslås utföras tidseffektivt och omfatta alla konstruktionsdelar i tunneln, det vill säga fria bergytter, sprutbetong, bultar, gjuten betong, dräner och inklädnader. Huvudsyftet med statusinspektionen är att hitta och undanröja akuta säkerhetsrisker i tunneln, i mindre grad att påverka förvaltningskostnaderna. Ny och effektiv instrumentutrustning föreslås bli ett krav vid dessa inspektioner.

Inspektionsformen ”särskild inspektion” bör för berginspektion i tunnlar sammanföras till en enda inspektionstyp vart 6-10 år, kallad *Åtgärdsinspektion*. Benämningen är logisk, då det är vid dessa inspektioner som icke akuta, stabiliserande åtgärder i tunneln skall kartläggas, planeras och slutkontrolleras.

Inspektioner av berg och bergkonstruktioner i färdiga tunnlar, såsom portaler och inklädnader, kräver tillgänglighet till trafikutrymmet. I motsats till tekniska installationer i tunnlar som normalt är synliga (vilket gör dem inspekterbara okulärt), är berget runt tunnelarna och bergförstärkningarna ofta skymda eller helt dolda. Detta gör okulära inspektioner av det bärande huvudsystemet i tunnelarna svåra. Det krävs därför mätutrustningar som kan ”se in i berget” för att avgöra om de konstruktionsdelar i en tunnel som skall säkerställa tunnelns mekaniska stabilitet och beständighet (*det bärande huvudsystemet*) är stabilt och funktionerligt eller om underhåll måste sättas in.

Den grundläggande förutsättningen för en ”felsökande” inspektion är att utrymmena är tillgängliga för personal och utrustning. Inspektionerna måste ske med en viss periodicitet, eftersom för lång tid mellan inspektionerna kan ge falsk trygghet rörande tunnelns status. Inspektioner som genomförs utan adekvat utrustning kan också ge falsk trygghet.

Rätt utförda inspektioner av trafik-tunnlar ger god trafikantsäkerhet och bra planeringsunderlag för val av underhållsåtgärder och prioriteringsordning för dessa. De bidrar också till bättre arbetsmiljö och höjd säkerhet vid arbetena i tunneln.

Målet med denna utredning är att diskutera de metoder för inspektion och efterföljande underhåll som används idag för trafik-tunnlar i berg och föreslå förbättringar. Utredningen har med denna målsättning inventerat de utvecklingsmöjligheter som finns för att möta de allt högre kraven på effektiva och tillförlitliga inspektioner.

4.2 Tunnelinspektion idag

Huvudsyftena med de “underhållskampanjer” som görs idag i trafik-tunnlar synes ligga på att

okulärbesiktiga ett tunnelparti och att lokalisera instabilt berg eller defekta bergförstärkningar. Sådana “fel” kan utgöra en stor skaderisk för trafikanterna. Samtidigt försöker man utnyttja den tillgängliga tiden i tunneln till att utföra vissa, extremt snabba underhållsinsatser, då entreprenören är på plats med utrustning och materiel. Ofta går det lång tid emellan underhållstillfällena.

Ett vanligt konstaterande vid felsökning i tunnlar är, att det är fysiskt omöjligt att kontrollera alla tunnelväggar och tak och alla förstärkningar med hög noggrannhet, eftersom detta skulle kräva alltför lång tid att genomföra. Vid frekventa, översiktliga inspektioner har man hittills ofta varit hänvisad till att göra kontrollen relativt generell och koncentrera sig på områden där man vet att man tidigare haft problem, exempelvis med fuktgenomslag och sprutbetong med vidhäftningsfel (bompartier). Med tillgång till moderna geofysiska skanning-utrustningar på plats i tunneln är det dock möjligt att relativt snabbt genomsöka det bärande huvudsystemet i tunneln utan att missa skador som skulle kunna innebära risk för instabilitet, se vidare avsnitt 3.6.1 nedan.

En mer frekvent och heltäckande analys av tunnlarnas status verkar ligga utanför ramen för de underhållsprogram som tillämpas idag. Detta kan i värsta fall leda till att man “missar” fel och brister i tunnlarna som kan utgöra potentiella risker för trafiken. En annan nackdel är, att man minskar möjligheten att se behovet av och att utföra förebyggande underhåll i tunneln, åtgärder som säkert är ekonomiskt lönsamma i ett livslängdsperspektiv (LCC principen).

I många fall verkar kraven på renspolning och belysning i tunnlarna vara relativt nedprioriterade faktorer, vilket gör inspektionsresultaten tveksamma i vissa fall, se vidare nedan. Entreprenadföretaget Svevia har konstruerat en mobil utrustning för renspolning av främst vägtunnlar, se Figur 1 nedan.



Figur 1. Mobil utrustning för tunneltvätt (foto R. Pettersson, Svevia)

4.3 Idag tillämpad inspektionsteknik

Nedan följer en kort sammanfattning av den teknik som idag tillämpas vid inspektion av svenska trafiktunnlar.

4.3.1 Fordon och utrustning för tillträde och åtkomst

Dagens maskinpark för tunnelunderhåll domineras av konventionella lastbilar och traktorer. Plattformar för inspektören brukar ordnas på lastbilsflak, alternativt på höj- och sänkbar traktorskopa eller hjulburen saxlift.

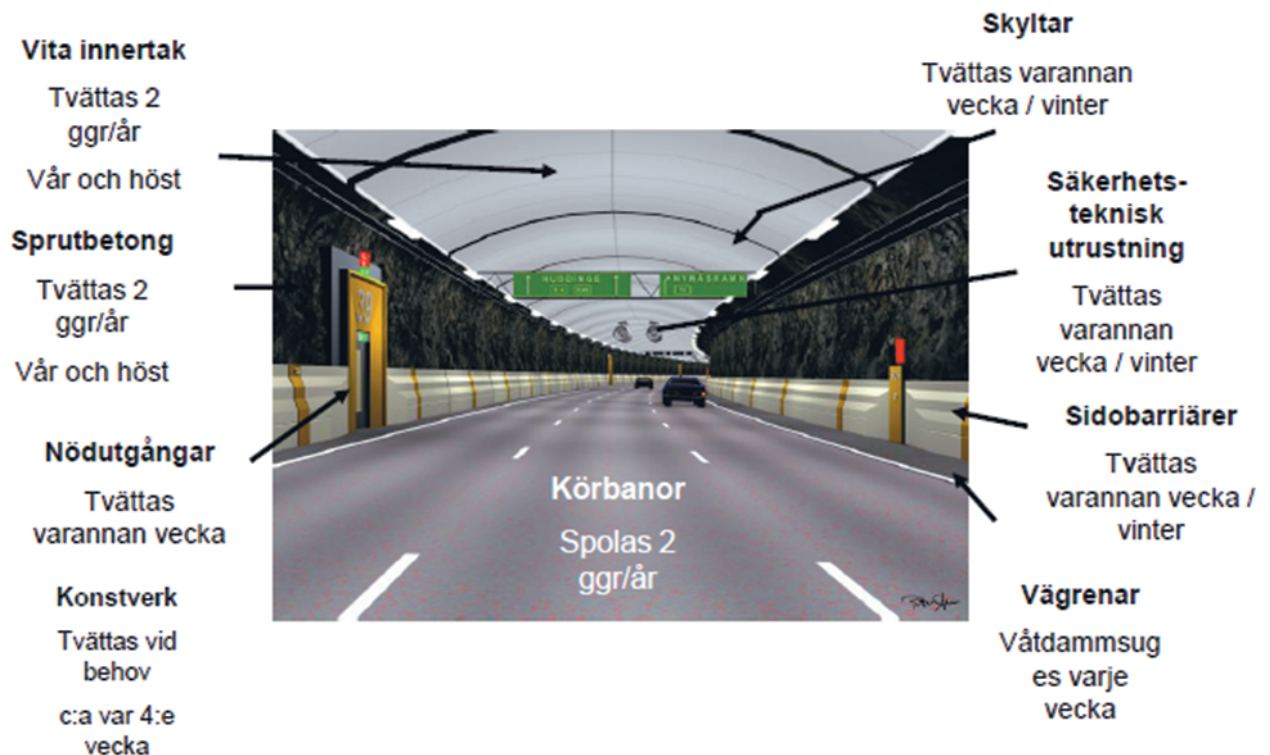
Inga speciellt utvecklade spårbundna fordon för inspektion av spårtunnlar är i bruk idag. Ett undantag är SL:s ”bergföra”, ett avancerat fordon för såväl inspektion som lättare underhållsarbete.

4.3.2 Manuella metoder

Alla inspektioner av färdiga trafik tunnlar bygger på att de bergmekaniska förhållandena, drivningsmetod, förstärkning och tätning finns korrekt dokumenterade.

Den enklaste inspektionsmetoden är *okulärbesiktning*, utförd av en bergsakkunnig person. Metoden kan ha viss tillförlitlighet för bedömning av ytnära material och konstruktioner. Metoden är dock starkt beroende av besiktningsmannens erfarenhet och förhållandena vid inspektionen. Dåliga ljusförhållanden, smutsiga tunnelytor och en kall och fuktig miljö kan göra att inspektionen inte blir tillräckligt noggrann. För inspektion av trafik tunnlar krävs tillgång till lift för att möjliggöra besiktning av tunneltaken.

Innan besiktningen bör tunnlar tvättas för att alla defekter och skador skall synas. I vissa vägtunnlar tvättas tunnlar regelbundet för att skapa god trafikmiljö se Figur 2.



Figur 2. Exempel på tvättintervall i en trafik tunnel. (bild R. Pettersson, Svevia).

Besiktningar bör göras omedelbart efter tvättningarna utförts, ett förhållande som dock sällan är uppfyllt i praktiken. Ett annat problem är den relativt svaga belysningen av de ytor som skall inspekteras.

Vid okulärbesiktningen granskar besiktningsmannen fria bergytor, betong- och sprutbetongytor, bultändar och dräner. Han slår på ytorna med en mindre slägga för att konstatera "klingfastheten" hos underlaget. Denna så kallade *Bomknackning* är en mycket mödosam och tidsödande process. Ljudet analyseras enbart genom örat.

Bultar och dräner granskas översiktligt för korrosionsangrepp och igensättning. En snabb kontroll av vattenflödet i dränerna brukar också ingå i inspektionen.

Manuella inspektioner är en del av *Observationsmetoden*, som tillämpas vid projektering, design och under drivning och förstärkning av komplicerade geokonstruktioner, vilket trafiktunnlar normalt anses vara¹¹. 3.3.3 Instrument och utrustning

I dagens praxis använder besiktningsmannen endast ett fåtal registrerande instrument vid inspektion av en tunnel. *Kameradokumentation* är vanlig. *Skanning* av väggar och tak med laser har börjat få tillämpning. Tekniken är idag mycket effektiv och resultaten kan läggas in i 3D modeller för vidare bearbetning, se ATS 2011.

Sprutbetong som är belastad över sin hållfasthet "krackelerar" i sprickor som är lätta att detektera vid besiktning. Gips kan även användas för att se rörelser i sprickorna vid upprepade inspektioner.

Penetrant har används för att detektera sprängskador i oinklätt berg.

4.3.3 Indirekt inspektion

I de fall berget döljs av sprutbetong eller annan inklädnad kan en inspektion på ytan kompletteras med djupkännande metoder, till exempel radar eller akustiska metoder. Än så länge praktiseras inte detta i svenska trafiktunnlar. Att mäta tvärs genom olika medier, tex sprutbetong-luft-berg är mycket svårt. I Projekt Hallandsås har bakomfyllningens kvalitet undersökts med *seismik*, med blandat resultat.

Vatten- och frostisolering döljer eventuella förändringar i bergmassan. Inspektion bakom inklädnader är normalt inte möjlig. Om luckor i inklädnaden finns, och om det är förberett för detta, kan inspektioner göras med *sido-seende TV kamera*. Detta praktiseras dock inte idag i Sverige. Den inklädnad som byggts på Norra länken med ett tunt oisolerat valv monterat på bultar fästade berget är bara delvis inspekterbart. Valvet är monterat efter teoretisk kontur, vilket innebär att avståndet mellan valv och berg varierar mellan 0.2-1 m Figur 3 nedan. I praktiken uppstår aldrig en så lättillgänglig spalt mellan valv och tunnelvägg som figuren antyder. Genom oregelbundenheter i bergytan kan utrymmet lokalt bli mycket begränsat.

¹¹ Observationsmetoden har behandlats i flera rapporter och artiklar, se exempelvis Peck (1969), Kadefors & Bröchner (2008), Holmberg & Stille (2009) och Stille et al (2010)



Figur 3. Tunnelvalv monterat på Norra länken i Stockholm. (Efter Veidekke AB).

4.3.4 Laster och deformationer i bergförstärkningar

Det finns olika metoder att bedöma funktionen hos installerade bergbultar. Med en så kallad *Boltometer* kan man med ledning av analys av stötvågor i bulten avgöra bultens samverkan med berget och dess lastupptagning. Metoden har använts i Sverige sedan 70-talet. Instrumentet har dock blivit ifrågasatt bland annat med tanke osäkerheten i mätningar på bultar längre än 1.5 m.

Mätutrustningen *Granit* (*Ground Anchor Nondestructive Integrity Testing*) kan användas för mätning av lasten i ändförankrade bergbultar som utvecklats vid Universitetet i Aberdeen Förändringar av frekvensen i bultarna utnyttjas för att bestämma lasterna och lastförändringar.

Genom att limma *trådtöjningsgivare* eller *elektroniska lägesmätare (LVDT)* på bultar eller betongytor i tunneln kan pågående rörelser i förstärkningarna registreras. Deformationsmätning med svängande tråd ger säkra resultat under lång mätperiod.

Cavimeter är en ny metod för att kontrollera ingjutningskvaliteten hos betongen runt ingjutna bultar. Metoden bygger på principen att detektera mängden hålrum kring bultarna genom att tillämpa gaslagen, (Gustavsson 2012). Utveckling pågår att även kunna utföra upprepade mätningar för att se om bulten belastats så att ingjutningen deformerats.

Rörelser på ytan av tunnelvärsnitts kan kontrolleras genom konvergensmätning eller med *extensometrar* monterade i borrhål. Extensometern ger alltså information om deformationer och rörelser inne i bergmassan.

Genomgående för de beskrivna metoderna är att de är tekniskt komplicerade, tar lång tid att utföra och därför knappast lämpar sig vid inspektion av trafiktunnlar, som måste ske under tidspress.

4.3.5 Geofysiska metoder

Seismiska metoder kan användas för att "se in i berget" bakom lining och detektera eventuell

söndersprickning av bergmassan.

Impakt-eko har vid bygget av den blivande spårtunneln i Hallandsåsen använts för att kontrollera bakfyllningen mellan inklädnad och berg. Här har också seimiska mätningar gjorts av kaviteter i in situ inklädnaden i de sprängda delarna av tunneln.

De beskrivna metoderna är tekniskt komplicerade, tar lång tid att utföra och har idag ingen applikation för inspektion av trafiktunnlar.

4.4 Inspektörens ansvar

Det åvilar en besiktningsman för trafiktunnlar ett mycket stort ansvar, eftersom en felaktig bedömning kan få förödande konsekvenser för trafikanterna. Vederligen finns det trots detta i dag ingen bindande manual som definierar detta ansvar. Den praxis som verkar ha etablerats innehåller följande huvudpunkter:

- Studera bakgrundsunderlag (innan inspektionen)
- Inspektera tunneln på plats
- Sammanställ och rapportera tunnelns status
- Föreslå underhållsgärder och prioritetsordning för dessa

Det ställs idag relativt höga krav på inspektörens kompetens: bergsingenjör alt. genomgången geolinje på högskola, 5 års erfarenhet av underjordsarbete samt kännedom om de styrande dokument som reglerar inspektionen. Detta efterlevs inte alltid, varför bättre tillsyn av kompetensen krävs i framtiden, se vidare avsnitt 5.

All information och data om tunnlar bör samlas i databaser som kan hantera och presentera informationen i färg i 3D. När inspektionen görs kan all information om ett tunnelavsnitt göras tillgängligt på en läsplatta eller fäldator för besiktningsmannen.

Vi föreslår som tidigare nämnts i denna utredning att besiktningsmannen får ett mer preciserat och utökat ansvar och att omfattningen och kvaliteten på besiktningsprocessen höjs. All information, data om tunnlar bör samlas i databaser som kan hantera och presentera information i 3D. Åtgärder i tunneln bör presenteras och sparas på relationsritningar. När inspektionen görs kan all information om ett tunnelavsnitt göras tillgängligt på en handdator för besiktningsmannen. Han bör även lägga in ny information i databasen efter varje besiktning.

4.4.1 BIM Byggnadsinformationsmodell

BIM (Building Information Model eller Byggnadsinformationsmodell) är ett vedertaget begrepp för objektorienterad 3D-CAD-projektering. Förutom själva 3D-CAD modellen innehåller en BIM en mängd digitala dokument så som arbetsbeskrivningar kopplade till 3D-modellen.

Företaget NCC har under 2011 arbetat med ett av SBUF delfinansierat projekt om BIM i förvaltningsskedet för små och medelstora projekt. Slutsatsen var att det både tekniskt och ekonomiskt var möjligt att använda BIM i förvaltningsskedet (NCC, 2012).

Med BIM vid inspektion av underjordsanläggningar är information om dolda konstruktionselement tillgängliga. För underjordsanläggningar finns information om vilken förstärkning som är utförd på en specifik plats, till exempel bultlängd, placering av bultarna, tjocklek på sprutbetong och utformning av dräner. Vidare finns information om deformationsmätningars resultat och läge, karteringar utförda under drivningen samt MWD-data från borrningar. Tekniken tillämpades i en tunneldel i Norra länken, NL11.

Genom att skanna konturen i tunneln efter sprängning kan man i modellen se var det skett utfall av block. En förutsättning för att BIM vid inspektion skall fungera är att de relationshandlingar som tas fram under entreprenaden är kompatibla med modellen och således att det tidigt i projekteringen bestäms att relationshandlingar skall levereras i BIM-format och att detta framgår av förfrågningshandlingarna. Eftersom byggherren äger ansvaret för BIM under förvaltningsskedet bör val av entreprenadform beaktas. Det är troligen till fördel om byggherren äger ansvaret för BIM under alla skeden från projektering, utförande till drift och underhåll.

Praktiskt innebär detta att endast den som utför inspektionen behöver ha med sig en läsplatta eller en fältdator för att kunna använda modellen under inspektionen. All information i BIM-modellen är av stort värde vid inspektion.

4.5 Brister och felkällor i besiktningsrapporter

Att upptäcka förändringar, fel och brister i en bergtunnel med förstärkningssystem är en grannliga uppgift som kräver stor yrkesskicklighet. Även om de praktiska förutsättningarna vid besiktningen är optimala, med renspolade tunnelväggar, perfekt belysning och rörlighet för besiktningsmannen inne i tunneln, kan det inte uteslutas att man "missar" något "fel" i berget vid inspektionen. Det är andemeningen med denna rapport att, med tanke på konsekvenserna av ett ras i en trafiktunnel, sådana "missar" inte skall kunna ske. För att så långt det är möjligt minimera ovanstående problem, föreslår vi i denna utredning att besiktningsmannen får ett mer preciserat och utökat ansvar och att omfattningen och kvaliteten på besiktningsprocessen höjs. Se vidare Avsnitt 3.6 och 5.

Det finns ett antal anledningar till "missar" vid en inspektion:

- Sikten är förhindrad av dålig rengöring
- Belysningen är för svag
- Plattformens räckvidd är otillräcklig
- Inspektörens sinnesintryck (syn, hörsel) kan vara nedsatta (t.ex. pga trötthet)
- Tillgång saknas till skanning-utrustning som "ser in i berget", se avsnitt 3.3.5
- Kritiska röster saknas vid inspektionen
- Falsk trygghet skapas av att tidigare inträffade ras i tunnlar är få
- Bergutfall rapporteras inte alltid

- Dokumentation av tunneln (relationsritningar m.m.) saknas eller är begränsad
- Det är minusgrader, vilket gör att berg och konstruktioner ”kärvar”
- Berget är dolt av inklädnader

I Sverige accepteras inte att tunnlar kläds in med dräner eller vatten- och frostisolering i sådan omfattning, att det inte kan utföras inspektion av tunnelns bärande huvudelement. I sprutbetongförstärkta tunnlar kan dock överbelastning av sprutbetong observeras inifrån tunneln.

4.6 Norska erfarenheter av ras i tunnlar

I Norge bygger man in vatten- och frostisolering i alla trafiktunnlar trots att de till största delen är injekterade. Flera ras har där inträffat bakom inklädnader, vilka inte observerades i tunneln innan belastningen på inklädnaden överskred dess bärighet. På Figur 4 visas raset i Dröbacktunneln under Oslofjorden, som skedde 3 år efter att tunneln tagits i bruk.

Vid den efterföljande besiktningen av berget bakom inklädnaden i hela tunneln upptäcktes flera partier där berg fallit ut och låg på inklädnadsvalvet. Hade inte dessa åtgärdats hade flera ras sannolikt skett i trafikutrymmet.

Hur förklaras en sådan en sådan dålig kvalitet och kontroll? Under drivningen av tunneln, som är en enkelrörs tunnel med dubbelriktad trafik fick man ett genombrott till bergytan i lågpunkten. Vid borrningen av sonderingshål och injekteringshål gick borren ut i de kvartära avlagringarna. Vattentrycket var 130 m vattenpelare (13 bar). För att komma genom svaghetszonen borrades frysrör runt hela tunnelperiferin och berg och jord frystes (Berggren, 1999). För att kunna fortsätta drivningen under tiden borrning av frysrör, frysning och drivning i den frysta zonen pågick, valde man att bygga en ”bypass” vid sidan av trafiktunneln på en lägre nivå. Tunnel drivningen fortsatte därefter på andra sidan av lågpunkten.

Det oplanerade tillbudet gav både tidsförlängning och ökade kostnader för projektet. Projektet forcerades för att minimera de ekonomiska skadorna. Helt uppenbart är, att dokumentationen av bergförhållandena och dimensioneringen av förstärkningen inte hade fokus på långtidsstabiliteten.



Figur 4. Ras i berget bakom inklädnad med PE-skum och sprutbetong, så kallad Vatten- och Frostisolering. Raset inträffade 2003, 3 år efter att tunneln var klar. 2004 gjordes inspektion bakom inklädnaden då flera mindre ras påträffades. Tunneln fick återigen stängas för reparationsarbeten.

Under projekteringen av Götatunneln gjorde projektledningen flera besök under den kritiska perioden vid byggandet av Dröback-tunneln. Stora likheter i de geologiska och bergtekniska förhållandena gjorde att riskanalyser gjordes med norska erfarenheter, bland annat utvärderades behovet av katastrofslussar för ett potentiellt vattengenombrott.

Vid utbyggnaden av E18 i Vestfold byggdes många tunnlar för den nya motorvägen. Det första raset som påverkade trafikutrymmet var i Hanekleiva tunneln 2006, Figur 5.



Figur 5. Raset i en sprickzon i taket på Hanekleiva tunneln.

Rasen i norska tunnlar har föranlett vissa organisatoriska förändringar; bland annat ges numera beställaren alltid möjlighet att kartera berget. Detta sker med hjälp från entreprenören, vars arbete med detta är en prissatt post i mängdförteckningen. En avgörande skillnad mot tunneldrivning i Sverige är fler beslut tas ”på stuff” av drivningspersonalen. Detta kan eventuellt betyda, att alla designkriterier inte alltid beaktas, såsom exempelvis bergtäckningen, närheten till andra anläggningar, bergmassans egenskaper och anläggningens långtidsbeständighet.

Raset inträffade 9 år efter tunnelns färdigställande. Cirka 25 m³ berg rasade ner i tunneln och täckte hela sulan med material som nådde upp till 2.5 m höjd. Motorvägen stängdes och ytterligare åtta tunnlar måste renoveras på grund av ras bakom inklädnaderna

Orsaken till att det stora raset inträffade så långt efter färdigställandet beror mycket sannolikt på att sprickzonen var vittrad och innehöll svällande lermineral. Ingen kritik framfördes mot

förundersökningen. Dokumentationen var bristfällig delvis beroende på att tillräcklig ingenjörsgelogisk kompetens saknades på arbetsplatsen. Sprickzonen blev registrerad av entreprenören bland annat på grund av att sprutbetongen sprack och det förekom stenedfall i tunneln när vatten- och frostsäkringarna monterades. Kompletterande förstärkning utfördes men totalt sett blev förstärkningen underdimensionerad.

4.7 Utveckling av nya inspektionsmetoder

Det finns flera skäl att utveckla automatiska och semiautomatiska metoder för inspektion och dokumentation av tunnlar och deras ingående konstruktionsdelar. Utvecklingen i Japan, med landets stora mängd trafiktunnlar, se avsnitt 1.2, visar på detta.

Huvudanledningen är att potentiella rasområden inte skall kunna ”missas”. Några övriga skäl anges här:

- Inspektörens arbetsmiljö, manuell bomknackning kan exempelvis minimeras
- Objektivitet, flera personer kan inspektera med samma resultat
- Snabbare inspektioner, mindre tid i trafikutrymmet ger mindre ”stress”
- Upprepade inspektioner med samma metodik ger möjlighet att se förändringar
- Mindre beroende av yttre förhållanden vid inspektionstillfället
- Dokumentation underlättas då instrumenten ger signaler som kan lagras

Några metoder som kan komma till användning vid automatisk tunnelinspektion listas nedan. Flertalet metoder har funnit tillämpning i utländska tunnlar som beskrevs i avsnitt 1.2:

- Skanning med foto
- Skanning med radar
- Laser skanning
- Röntgenradar
- Temperaturmätning på ytor (för detektion av lösa block och vatten)
- Ultraljud
- Seismik
- Automatiserad Schmidt hammare

Sammanfattningsvis kan sägas, att några av de nämnda metoderna kan bli svåra att tillämpa vid starkt tidsbegränsade inspektioner av trafiktunnlar. Flera metoder lär dock kunna anpassas för en sådan applikation.

Den nya strategi som föreslås i Avsnitt 5 i rapporten bygger på att ny mätutrustning och nya

mätmetoder tas fram, såväl för översiktlig som för fördjupad inspektion av trafiktunnlar. Denna nya strategi kan bli inspektörernas möjlighet att åstadkomma högre kvalitet och objektivitet i sina rapporter och kan komma att minska risken för ödesdigra olyckor i tunnelarna.

4.7.1 Skanning

Skanning används idag regelbundet vid utsprängning av tunnlar för kontroll av om överberg förekommer. Normalt kontrolleras varje meter av tunneln. Skanning används också för att mäta applicerad tjocklek av sprutbetong.

4.7.2 Laser

Laser används för att mäta in tunnlar och berggrum. En 3D bild skapas där avstånd kan mätas. Upprepade mätningar gör att förändringar kan identifieras. Tekniken tillämpas idag både under och ovan jord. Utvecklingsarbete pågår i flera länder, se Figur 5. Utvecklingsarbete pågår i flera länder.



Figur 5. Laserutrustning användbar i tunnlar

4.7.3 Temperaturmätning

Mätning av temperaturen på bergytor för bestämning av lösa block och sprutbetong med dålig vidhäftning har provats på Luleå Tekniska Universitet. Försöken visade att metoden inte var bättre än det obeväpnade ögat. Idag finns större möjligheter för insamling av temperaturdata på ett avsevärt mer effektivt sätt på en längre sträcka med större insamlingshastighet. Den största potentialen för mätning av temperatur torde vara möjligheten att se grundvattenflöden bakom sprutbetongen i den sprängskadade zonen.

4.7.4 Ultraljud

Metoden har utvecklats för att hitta defekter inne i strukturer, bland annat i betong. Metoden har tidigare kallats för *Sonic-Echo* och *Seismic Echo*. Metoden har använts för att mäta sprängskador i kvarstående berg. I Projekt Hallandsås har metoden används för att bestämma kvaliteten på fyllningen mellan betongliningen och omgivande berg, (Rydén, N et al, 2011).

4.7.5 Seismik

Seismiska mätningar kräver kontakt mellan geofoner och berg/sprutbetong. Detta gör att vid mätningar måste mätuppställningen vara stilla. En mätuppställning kan bestå av 10 geofoner med 2.5 m avstånd och en hammare fäst på en ledstång som kan föras längs mätsektionen och flyttas till bergväggen att kunna slå mot bergväggen på förvalda sektioner innanför och utanför riggen med geofoner. Metoden lämpar sig inte för snabba inspektioner, som för trafiktunnlar.

4.7.6 Mekaniserad Schmidthammare

Schmidthammaren är ursprungligen framtagen för bestämning av tryckhållfastheten hos betong. Metoden har även använts för bestämning av hållfastheten på berg. Vid mätning på berg och sprutbetong fås lägre respons om ytberget är söndersprucket eller om sprutbetongen har dålig vidhäftning. Genom att montera en Schmidthammare på en bärarm vinkelrät tunneln, där hammaren kan föras ut till bergytan och generera lämpligt antal slag, kan slagens respons detekteras automatisk. Mätresultaten kan lagras tillsammans med mätpunktens läge i en 3D-bild.

4.7.7 Slutsatser

Sammanfattningsvis kan sägas, att några av de i detta avsnitt beskrivna metoderna för tunnelinspektion kan bli svåra att tillämpa vid starkt tidsbegränsade förrättningar i trafiktunnlar. Flera metoder lär dock kunna anpassas för en sådan applikation. Den nya strategi som föreslås i Avsnitt 5 i rapporten bygger på att ny mätutrustning och nya mätmetoder tas fram, såväl för översiktlig som för fördjupad inspektion av trafiktunnlar. Detta blir inspektörernas möjlighet att åstadkomma högre kvalitet och objektivitet i sina rapporter och kommer att minska risken för olyckor i tunnlar.

5 Underhållsteknik

5.1 Krav och faktorer som påverkar underhållet i tunnlar

Utförande av underhållsarbeten i trafiktunnlar sker under krav av många olika aktörer:

- Trafikanter
- Arbetstagare
- Byggherre
- Omkringboende
- Myndigheter
- Skattebetalare

Den samlade kravbilden är styrande för vilka arbetsmetoder som kan användas. I en trafikunnel måste

villkoren för tillgänglighet för trafikanterna uppfyllas samtidigt som övriga krav ska tillgodoses. Det leder ibland till mycket svåra avvägningar.

5.1.1 Arbetarsäkerhet

Vägtunnlar

Allt arbete i en vägtunnel medför risker för skada på arbetare och andra personer som måste vistas i arbetsområdet. Bäst är att stänga av och leda om trafiken under arbetsperioden. Detta är ofta inte möjligt utan istället måste framkomligheten begränsas på olika sätt; stängda körfält, begränsad hastighet, ljusreglering eller trafikvakter. Trafikanterna upplever arbeten som störningar och stressen ökar risken för att någon gör en felaktig manöver. Tunnelmiljön förstärker ofta den negativa upplevelsen vilket medför ännu högre risker. Det är därför av högsta vikt att göra en noggrann riskinventering och vidta lämpliga åtgärder för att minska risken för olyckor.

- En bra och tidig information ger trafikanterna möjlighet att planera sitt resande
- Bra belysning kan motverka känslan av instängdhet
- Anpassning av arbetstiderna till perioder med lågtrafik reducerar antalet drabbade trafikanter i tunneln

Spårtunnlar

I spårtunnlar är passerande tåg och spänningsförande ledningar de största riskerna. Bergunderhåll bör utföras i trafikfritt utrymme om möjligt. Vid arbeten i dubbelspårstunnlar med trafik på ett spår är alla tågpassager kritiska. Arbeten mellan tågpassager i enkelspårstunnlar är stressande för personalen genom låg produktivitet genom ofta korta arbetsperioder och långa arbetsuppehåll.

Trafikverket och andra spårtnnellägare har utarbetat detaljerade säkerhetsbestämmelser för arbete i spårtunnlar. I dessa finns föreskrifter om säkerhetspersonal och deras utbildning samt säkerhetsavstånd till trafik och ledningar. Ett ögonblicks ouppmärksamhet hos säkerhetspersonal, trafikledning, tågpersonal eller arbetare kan medföra att en olycka kan inträffa trots rigorösa bestämmelser.

För att minska den mänskliga faktorns inverkan på säkerheten, kan man ta hjälp av tekniska system som varnar eller på annat sätt påverkar beteendet hos såväl trafikoperatörer som trafikanter. En internationell inventering av sådan utrustning och implementering av den i Sverige kan ge värdefulla bidrag till säkerheten. Innovationer i säkerhetskänslig utrustning bör också premieras.

5.1.2 Miljö

All byggverksamhet förbrukar energi, material och vatten och regleras av miljölagstiftning och särskilda direktiv från myndigheter. Storstadskommunerna och Trafikverket ställer höga krav på att byggverksamheten ska vara så lite miljöstörande som möjligt. Beställare kan ibland ställa särskilda, objektsspecifika miljökrav som är hårdare än lagstiftningen. Företagens egen miljöpolicy kan medföra en ytterligare skärpning.

Produktionen ska vara resurssnål och användning av förnyelsebara och biologiskt nedbrytbara produkter ska prioriteras. Emissioner som orsakas av arbetsmaskiner måste hållas nere. Användning av miljöfarliga ämnen kan inte tillåtas utan att restprodukter och spill tas om hand på ett miljöriktigt sätt. Påverkan av giftiga eller på annat sätt miljöfarliga ämnen på grundvatten kan inte tillåtas.

Genom planering i god tid och samverkan med myndigheter kan goda miljöeffekter uppnås för underhållsarbetena.

5.1.3 Omgivningspåverkan

Rivning och förstärkning av bärande konstruktioner i bergtunnlar kan innebära en risk för omgivningspåverkan. Krav på störningsnivåer ställs ofta av kommunernas miljö- och hälsoskyddsförvaltningar. Människans kropp är ett mycket känsligt "mätinstrument", och personer som bor nära arbeten i tunnlar granskar kritiskt verksamheten. Störningar för boende är särskilt känsliga om arbetet måste utföras på obekväma arbetstider.

Exempel på störningar och källor som kan alstras av tunnelarbeten är:

- Vibrationer (sprängning, tung rivning)
- Stomljud (av t ex borrar i berg)
- Buller (maskiner, sprängning, transporter)
- Luftstötstågor (sprängning)
- Vatten (högtryck, vattendimma, utsläpp, avbördning i befintliga dagvattenledningar)
- Nedsmutsning (materialupplag, transporter)

För att minska "friktionerna" med omgivningen, måste en öppen dialog med informationsutbyte etableras mellan utförare och allmänhet. Många störningar kan elimineras genom bra information i god tid före arbetet.

5.1.4 Krav på konstruktioner

Konstruktioner ska uppfylla *Allmänna krav på byggnadsverk* enligt föreskrifter i Boverkets konstruktionsregler BKR, samt särskilda regelverk utfärdade av myndigheter som TrVK Tunnel och liknande. Dessutom gäller övergripande regler som utfärdas av EU i den så kallade Eurocodes.

Snabb förstärkningseffekt är önskvärd för att snabbt kunna släppa på trafik utan att äventyra säkerheten.

Utrymmet i en trafikunnel begränsas av det fria trafikutrymmet. Speciellt i anfang eller i sidorna av trafikutrymmets övre del är utrymmet ofta snävt. Finns det plats för en ny konstruktion utanpå den gamla är en vanlig frågeställning. Detta kräver en inmättningsinsats vid arbetets början. I många fall måste konstruktioner med liten eller ingen bygghöjd väljas eller så måste utrymmet utvidgas.

5.1.5 Beständighet

Beständigheten för en vald lösning måste avvägas med tanke på anläggningens ålder och återstående brukstid.

En fråga som kan ställas är, om kraven är annorlunda vid underhåll jämfört med vid nybyggnad, och om avsteg kan tillåtas för att möjliggöra tidseffektiva underhållslösningar.

Det finns oftast inte någon anledning till att den nya konstruktionens beständighet ska vara mycket

bättre än vad som gäller övriga delar av tunneln. Det bör också vara möjligt att kompromissa med beständigheten vid prioritering mellan olika krav. För ett tidseffektivt underhåll måste det finnas utrymme för att testa konstruktioner som är lätta att utföra och som samtidigt ger tillräckligt bra beständighet.

5.1.6 Ekonomi

En begränsande faktor för möjligheterna att utföra tidseffektivt underhåll är ofta de ekonomiska ramarna. En avvägning och optimering måste därför ske i varje enskilt projekt, mellan störning, beständighet och kostnad. Vid akuta skador som måste åtgärdas snabbt, ställs det krav på ledarskapet hos de ansvariga och förmåga att fatta snabba beslut. För att inte onödigtvis fördröja insatsen bör riktlinjer för en sådan avvägning vara förberedda.

Kostnaden för mer omfattande renoveringar och planerade underhåll bör också betraktas för en längre tidsperiod, så att den mest optimala lösningen väljs ur ett livscykelperspektiv. Akuta åtgärder kan ändå behöva utföras utan koppling till LCC.

De flesta trafiktunnlar ägs av stat eller kommun. Alla underhållsarbeten, utom akuta åtgärder, ska därför upphandlas i överensstämmelse med Lagen om offentlig upphandling, LOU. Denna lag ställer krav på fri konkurrens, vilket innebär att valda arbetsmetoder måste vara tillgängliga för de aktörer som vill delta i upphandlingen¹².

Vid val av metoder måste man också överväga vilket utbud som finns på marknaden. En mycket udda lösning kan vara vanskelig att handla upp till ett rimligt pris eftersom det här finns liten marknad och därmed låg lönsamhet för entreprenörerna. Det är främst ett byggherreansvar att skapa marknadsmässiga förutsättningar för arbetsmetoder eller maskinutrustningar som måste finnas tillhands för objektsspecifika behov, såsom underhållsarbeten.

5.1.7 Hinder för bergarbete

Belysning, vägs skyltar, avbärarräcken, kontaktledningar, kabelstegar, fläktar och andra installationer utgör hinder för arbetet. Vid större arbeten måste vissa installationer demonteras och återmonteras innan trafikpåsläpp. I samband med mindre arbeten behövs skydd mot åverkan och nedsmutsning före arbetet och avtäckning samt rengöring efter avslutat arbete. Allt detta tar tid och kostar pengar som drabbar den enskilda underhållsinsatsen.

Om det finns inkopplingspunkter för el och eventuellt vatten via brandpostsystemet, underlättas underhåll och tidsåtgången minskar. För stora effektbehov är det fördelaktigt om det finns möjlighet att placera en generator i någon förberedd nisch eller vid tunnelmynning. Förberedd kabeldragning underlättar givetvis också.

¹² Undantag kan i vissa fall medges om det är frågan om en patenterad metod

5.2 Teknisk beskrivning av akuta underhållsarbeten i bergtunnlar

5.2.1 Allmänna arbeten

Inledning

Även om det tekniska utförandet är likartat vid akut som vid planerat underhåll, är den många faktorer i förutsättningarna som är olika. Detta påverkar även det tekniska utförandet. Reservkapacitet måste i många fall utnyttjas. Om något går sönder och arbetet inte kan fortsätta utan att utrustningen byts eller repareras, påverkar detta utförandet. Förlorad spårtid och samhällskostnad för trafikförseningar är andra faktorer som är specifika för akuta underhållsarbeten.

Etablering

En stor del av arbetstiden går åt för att etablera utrustning, försörjning och skyddsanordningar, samt för att avveckla och ta bort spillmaterial efter arbetspasset. Tiden för själva arbetet reduceras med motsvarande tid. Arbetspass där man utnyttjar tider med liten trafikintensitet, som nätter och helger, kan vara mycket korta. Det är då viktigt att använda effektiva metoder för att nå målet.

Transporter

Hjulburna maskiner och smarta lösningar med hela maskinutrustningar, uppställda på lastväxlarflak är tidsbesparande och ofta totalekonomiska. För arbeten i spårtunnlar kan det vara lämpligt att förbereda hela arbetståg med maskinutrustning, material och eventuellt även personalutrymmen

Tillgång till transportkapacitet är avgörande när underhållsarbeten ska genomföras på korta dispositionstider. Bortforsling av schakt- och rivningsmassor till mellanlager nära arbetsplatsen, materialförsörjning ”just in time” från närliggande förråd är viktiga beståndsdelar i en sådan helhetslösning. Beställare kan underlätta detta genom att förbereda deponier och mark för upplag, vilket kan ge minskat transportbehov med ekonomiska och miljömässiga vinster.

Försörjning

Maskiner som är självförsörjande går snabbt att etablera och göra produktionsklara. Maskiner med dieselhydraulisk drift kan därför vara att föredra före elektriska om det krävs stora effekter och/eller långa kabeldragningar. För att klara arbetsmiljön bör syntetisk diesel användas som bränsle.

Av arbetsmiljöskäl måste vanligen ventilationen längs tunnelröret förstärkas med fläktar. Fläkttuber för ventilationsluft tar avsevärd tid att montera och demontera. Riktad ventilation med fristående fläktar kan vara en effektiv lösning i många fall. Dessa fläktar är vanligen av axialtyp och har hög kapacitet. Drivning kan ske elektriskt eller med förbränningsmotor.

Ställningar

Fasta ställningar kan sällan användas vid korta dispositionstider. Ställningar bör vara mobila med egen maskin och lätta att ställa upp på önskad plats. Vid smutsiga arbeten måste ställningarna vara förberedda med skyddstäckning eller vara översprutade med formolja eller liknande som underlättar rengöring.

Skyddstäckning och rengöring

En förberedd skyddstäckning med dukmaterial tillskuret i lagom bredd går snabbt att lägga ut och är

lätt att ta bort efter utfört arbete. Det är viktigt att täckningen inte brister när det är dags att lyfta bort spillmaterialet. Skydd för kantstenar, skyltar och annan inredning bör också vara ”konfektionerade” för snabb täckning. Tejp och andra monteringsätt som tar tid att ta bort bör undvikas.

I järnvägstunnlar kan det vara tidsbesparande att förse en järnvägsvagn med utfällbara lämmar eller liknande som fångar upp spillmaterial utan att det ramlar ner på spårbädden. Det kanske inte går att samla upp allt, men skyddstäckning av makadam kan göras med lätta material för att samla upp det begränsade material som hamnar utanför uppfångningsvagnen.

För effektiv och snabb rengöring av vägbanor används en sopmaskin med uppsamling av spillmaterialet. Dammsugare är fördelaktig att använda vid slutrengöring, och ibland kan det vara lämpligt att suga upp allt spill direkt från vägbanan eller spårområdet. En slutrengöring med högtrycksspolning är vanligen nödvändig för att få bort alla rester. Viss missfärgning kvarstår ofta trots detta.

Rengöring av maskiner måste kunna ske på ett miljömässigt riktigt sätt utan att det äventyrar maskinernas funktion. Det bör helst ske utanför tunneln på en förberedd plats, som förhindrar att spolvattnet sprids till omgivningen. Plats för underhåll av maskiner bör också finnas om arbetet sträcker sig över en längre tidsperiod.

Rivning

Om det inte finns plats för en kompletterande förstärkning måste kanske delar av befintlig förstärkning rivs eller berg tas bort. Lämpliga metoder är oftast mekanisk bearbetning med bilningsspett monterat på maskin, ibland i kombination med handhållen utrustning. Om större mängder material måste avverkas kan borrar och strossning vara ett alternativ. Om ytskikt ska tas bort är ofta vattenbilning (blästring) det mest effektiva arbetssättet. Vattenförsörjning av utrustningen samt omhändertagande av vatten och rivningsmassor måste lösas på ett lämpligt sätt i varje projekt. I vissa fall måste rent vatten transporteras i tankbil.

Ett problem som kan uppstå vid korta dispositionstider är att rivna ytor måste tas i drift tillfälligt mellan arbetsskiften, innan ny förstärkning har installerats. I vissa fall kan det därför behövas en temporär förstärkning av sådana ytor.

5.2.2 Inverkan av byggmetod för tunneln

Drivnings- och förstärkningsmetoderna som använts vid drivningen av en tunnel avgör vad som skall inspekteras och hur underhållet skall utföras.

Borrning- Sprängning

De flesta tunnlar i vårt land är utförda genom borrar och sprängning. Metoden ger mycket goda möjligheter att dokumentera bergmassans egenskaper i samband med drivningen. Den så kallade bergkarteringen under byggfasen är ett utmärkt planeringsinstrument för kommande underhåll och ska därför sparas i ett lättläst format för framtida behov. Planering och installation av övervakningssystem kan också utföras redan under byggtiden. Under drifttiden är bakgrundsinformation av skadeutvecklingen i tunneln och upplysningar om åtgärder för att stoppa skadorna av utomordentlig betydelse att dokumentera.

Sedan 70-talet har kraven på skonsam sprängning och största tillåtna skadezon i tunnelväggar och tak tillämpats. Detta, tillsammans med att mekaniserad bergrensning generellt använts, gör att dessa

tunnlars status är bättre än de ännu äldre tunnlarnas. Idag sker en utveckling mot användning av elektroniska tändare, vilket ytterligare kommer att minska skadorna i den kvarstående tunnelkonturen, det vill säga i det område där stabilitetsproblem och underhållsbehov kan uppträda.

Lite äldre tunnlar med endast bultförstärkning är relativt enkla att inspektera eftersom bergytan är synlig. Ytan måste dock vara väl rensad och belyst för att man vid inspektionen skall kunna se förändringar i sprickor och block. Normalt bomknackas bergytan i samband med inspektionen. Om det finns en kartering av bergmassan sedan drivningen är det viktigt att besiktningsmannen har tillgång till den inför och under besiktningen. För att kunna relativbestämma mängden vatten är det viktigt att besiktningsmannen har kunskap om bergtäckning och täthetskrav. Årstid är självklart viktigt att notera. En tunnel med liten bergtäckning har vanligen ett litet inläckage under perioden då jord och berg över tunneln är tjälade. Inläckande vattenmängder jämför med kraven i vattendom.

Om trafiktunnlarna ligger i urbana områden och alltså används torra, skall aktuellt inläckage och spår av tidigare inläckage dokumenteras. Inläckage kan avslöjas genom utfällning av järnoxid eller små stalaktiter med urlakad injekteringsbetong.

De flesta sprängda tunnlar är förstärkta med sprutbetong och bultar vilket gör att berget inte kan granskas. Om sprutbetongen är belastad till brott syns detta tydligt genom söndersprickning som ger tydliga sprickor i sprutbetongen. Om oarmerad sprutbetong använts sker uppsprickning vid låga belastningar. Det är dock mycket svårt att säkert avgöra den egentliga orsaken till sprickor i sprutbetong; det kan vara krympning, frostpåverkan och andra orsaker.

Vidhäftningsbrott kan upptäckas genom bomknackning även då sprutbetongen ännu inte spruckit. Bomknackning är dock ett mycket ansträngande arbete och automatisering av detta arbete bör prioriteras, se vidare utredningens förslag i avsnitt 5.

Tunnelborrningsmaskin (TBM)

I Sverige finns endast en trafiktunnel i bruk som drivits med TBM, Citytunneln i Malmö. Järnvägstunneln genom Hallandsåsen kommer att bestå av två åtta kilometer enkelspårstunnlar där cirka fem kilometer är borrade med TBM och förstärkta med betongelement och in-situ lining

Osköldade maskiner för drivning i hårt berg utan betonginklädnad ger likvärdiga förhållanden för inspektion av berget vid som drivning med borrning och sprängning. Erfarenheter från vägtunnlar i Norge har visat att TBM-tunnlar normalt ger mindre behov av underhåll än konventionella tunnlar. Troligen beror detta på avsaknaden av skadezon i bergväggen samt på den cirkulära konturen, som normalt ger tryckspänningar i berget.

Sköldade TBM-maskiner, där betonginklädnad monteras efter maskinen, ger begränsade möjligheter till inspektion av tunnelväggarna. Endast tunnelgaveln kan dokumenteras under drivningen. Viss information om bergmassan kan fås genom utvärdering av driftsdata från tunnelborrningsmaskinen och dessa kan utnyttjas tillsammans med bergdata från gavelinspektionerna.

Vid inspektion av inklädda TBM tunnlar är det främst förskjutningar mellan elementen och vatteninträngning som skall dokumenteras. I de oinklädda tunnlarna gäller det observationer av blockförskjutningar och om sprickor öppnats. Om tunnlarna ligger i urbana områden och används torra skall inläckage och spår av tidigare inläckage dokumenteras. Inläckage kan synas genom utfällning av järnoxid eller små stalaktiter från urlakat injekteringsbruk.

5.2.3 Bergskrotning av fria bergytor

Fallande sten eller lös sprutbetong utgör en oacceptabel risk i trafikerade tunnlar. Första åtgärden vid underhåll är därför regelmässigt skrotning av bergytorna. Löst sittande bergfragment och sprutbetong skrotas ner och kvarlämnar en fast och stabil bergyta för lastöverföring. Eventuellt kan delar av bergytan kräva förstärkning i form av kompletterande ströbultning eller ny ytförstärkning med sprutbetong.

Bergrensning (skrotning) i tunnlar regleras i Bygg AMA Anläggning (Tabell CBC.4), och indelas i fem klasser¹³. Vid underhåll av befintliga tunnlar kan skrotning ske maskinellt eller manuellt. Valet av bergrensningsklass görs med hänsyn till tunnelns användningsområde och planerad förstärkningsinsats.

Ett oförstärkt berg behöver skrotas regelbundet med ett intervall som beslutas av tunnelägare i samråd med besiktningsförrättaren (inspektören). En oförstärkt tunnel innebär oftast tätare underhållsintervaller än en förstärkt. Nya tunnlar utförs, bland annat av denna anledning, med heltäckande förstärkning åtminstone i tak.

Äldre tunnlar kan vara nästan oförstärkta med mycket underhåll som följd. I samband med underhåll bör dessa kompletteras med förstärkning i lämplig omfattning för att minska framtida underhållsbehov och öka tillgängligheten på anläggningen.

5.2.4 Betongsprutning

Degradering av tunna sprutbetongskikt (< 50 mm) eller dålig bultkondition kan leda till successiv försämring av tunnelförstärkningen. Äldre tunnlar är ofta dimensionerade med lägre konstruktionskrav än de som gäller idag. Av omsorg om trafikanternas säkerhet kan detta leda till att hela tunnelavsnitt måste förstärkas.

I tidigare oförstärkta tunnlar kan mindre bergfragment lossna och utgöra fara för människor, trafik och installationer i tunneln. Många äldre tunnlar är förstärkta med en tunn oarmerad sprutbetong med en tjocklek på 4 cm eller mindre. Dessutom förekommer stora variationer i tjockleken relativt bergytan. Det har visat sig att sådan tunn sprutbetong inte är beständig, särskilt inte om den är utsatt för vatten och frost som är fallet i sparsamt injekterade, korta trafiktunnlar. Vidhäftningen degraderas i ökande takt och fragment av sprutbetong riskerar att lossna och falla ned.

Betongsprutning med eller utan fiberarmering är en effektiv förstärkningsmetod av ytor mellan bergbultar. Det krävs dock en relativt avancerad utrustning med stort energibehov samt en effektiv materialhantering. En mycket omfattande skyddstäckning krävs innan arbetet kan starta. Efter utfört arbete måste materialspill samlas in och transporteras bort. Betongen måste få en tillräcklig hållfasthet innan trafik kan släppas på; med moderna tillsatsmedel kan den tiden minskas till ett par timmar. För att få en förstärkande verkan behövs dock flera dygns härdning. Det sagda innebär att konventionell sprutbetong ibland är en mindre lämplig underhållsmetod om arbetet ska utföras på korta dispositionstider.

När betongsprutning ska utföras under korta dispositionstider i en tunnel, måste särskilda krav ställas så att betongnedfall inte riskeras när trafiken släpps på efter fullgjort arbetsskift. Risken för nedfall av ung betong, under påverkan av svängningar av belastningar från tåg eller tunga fordon, bestäms av den svängande massan av nysprutad betong och betongens hållfasthet. För att begränsa risken kan

¹³ Med tillägg A som avser Väggar/slänter och tak

särskilda krav ställas på:

- Maximal pålagd skiktjocklek i förhållande till tillgänglig härdningstid
- Hållfastheten hos betongen vid trafikpåsläpp
- Sänkt hastighet för passerande trafik
- Tid innan trafikpåsläpp då sprutning ska avslutas

Dessutom måste det finnas tillräcklig tid mellan upphandling och produktionsstart att utföra förprovning av betongens hållfasthetsegenskaper. För att genomföra planering, praktisk provning och laborietester behövs uppskattningsvis minst fyra veckor. Då får man också en indikation på sluthållfastheten genom 7-dygnsprov. Frostbeständighetsprov är dock inte möjligt att utföra på denna korta tid.

5.2.5 Bultar

Borring och injutning av bultar är en viktig beståndsdel i många tunnelförstärkningar. Ett effektivt borraggregat behövs för att minimera tidsåtgången för bultinstallationen. Normalt cementingjuten och ospänd bergbult behöver åtminstone några timmars brinntid innan trafikpåsläpp för att säkerställa att bulten inte kan glida ut ur borrhålet. Centeringsfjädrar motverkar också utglidning av bulten.

Injekterbar bult, försedd med expanderhylsa, kan användas. Expandern låser fast bulten och hindrar den att glida ut ur borrhålet i väntan på injektering som kan ske vid senare tillfälle. Exempel på injekterbar bult är den s.k. *CT-bulten* och *Thorbolt*. *CT-bulten* har expandern placerad vid borrhålets botten vilket ger en viss förstärkningseffekt, medan *Thorbolt* har sin expanderhylsa nära bergytan och ger inte någon förstärkningseffekt innan injekteringsbruket har härdat.

Plastingjuten bult, oftast i form av patronerad polyester, kan ge en snabb härdning och tidigt ökad säkerhet efter injutning. Olika fabrikat och typ härdar olika snabbt, och det är därför viktigt att kontrollera vilken hållfasthetsutveckling som kan förväntas.

Korrosionsskyddad bult med ytbehandling bestående av varmförzinkning och epoximålning medger att utstickande delar som brickor och muttrar inte behöver övertäckas med betong eller paltbruk, vilket innebär att tid kan sparas.

5.2.6 Liners och bergnät

Förankring med bergnät är en lämplig metod för att hindra bergflisor och sprutbetong att falla ned på vägbana eller spårområde. Nätet kan vara av stål eller plast. Antalet infästningar och dessas längd och dimension är avgörande för hur snabbt ett nät kan installeras. Det går dock att dela upp arbetet.

Sprutat membran av polyuretan används av vissa gruvföretag, speciellt i Kanada. Membranets tjocklek är mellan 1-3 mm. Det har en god vidhäftning mot en rengjord bergyta, och har en så hög dragstyrka att membranet kan förhindra nedfall av stenar och mindre block. Systemet har så vitt känt inte använts i väg- eller järnvägstunnlar, men kan ha en potential att lösa vissa problem på ett snabbt och ekonomiskt sätt. Systemets miljöpåverkan vid tillverkning och rivning, samt egenskaper ur arbetsmiljö- och beständighetssynpunkt, är dock inte tillräckligt kända i nuläget.

5.2.7 Dräner

Konventionella dräner av förankrad polyetencellplast som täcks med sprutbetong eller brandskyddsduk tar relativt lång tid att installera. Arbetet kan dock genomföras i ett antal etapper:

- borrning för bultar
- montering av bultar
- montering av bakbrickor
- montering av PE-skum, frambrickor och eventuella stegband

Denna lista på arbetsmoment kan utföras även med korta dispositionstider. Ett återstående moment är att, att täcka konstruktionen med brandskyddande sprutbetong. Detta moment, liksom skydd av installationer tar lång tid och är tidsmässigt problematiskt för underhåll av trafik tunnlar¹⁴. En relativt nyutvecklad dränmetod, *Rockdrain*, innebär att ett kanalnät av plast monteras mot den förstärkta bergytan och täcks med ett tunt lager av konventionell sprutbetong. Detta skikt verkar dränerande och leder läckande vatten in i kanalerna. Slutligen sprutas en tät, isolerande och brandskyddande specialbetong.

En extra säkerhet mot läckage ger *Rockdrain* om tätskiktet kompletteras med ett sprutat membran. Systemet går avsevärt snabbare att montera än konventionella dräner och kan därför vara ett bra alternativ för effektivt underhåll. *Rockdrain*-systemet utprovas nu i ett fullskaleprov som leds av SP, med en provinstallation i en järnvägstunnel i Kattleberg norr om Älvängen på Norge-Vänerbanan.

5.2.8 Injektering

Inläckande vatten från tak och väggar leder till accelererad nedbrytning av material med ökade underhållskostnader som följd, samt risk för isbildning och halka vintertid. Efterinjektering är ofta tidsödande och resultatet är osäkert. Metoden lämpar sig därför ofta mindre väl för underhåll särskilt när insatstiderna är begränsade som ofta är fallet i trafik tunnlar. Om tätheten ändå måste förbättras finns några olika alternativa lösningar.

Mindre lokala läckage, särskilt i tidigare oinjekterade tunnlar, kan med framgång injekteras med mikrocement eller/och polyuretan som reagerar med vatten och bildar gel. Det senare materialet är snabbare i sin reaktion och därför ett bättre val vid snabba insatser, men kan ha oönskad omgivningspåverkan vid spridning till grundvatten.

Fuktiga områden i tidigare förinjekterade tunnlar är svårare att angripa på ett effektivt sätt. Att efterinjektera lokalt leder ofta till att vattnet flyttas till ett annat läge och orsakar nya problem. Bättre effekt ger en *systematisk efterinjektering*, som dock kan bli ganska omfattande och kan ta lång tid.

Bästa effekten får man ofta om man använder ett injekteringsmedel med betydligt högre inträngningsförmåga än det som ursprungligen använts. En tunnel som tidigare injekterats med cement, kan med fördel efterinjekteras med exempelvis *silikasol* (amorf kvarts). Silikasol har också den fördelen att det går att anpassa geltiden och att man på så sätt kan få kontroll på utförandetiden.

¹⁴ Det finns dock en alternativ metod att brandskydda dräner med brandskyddsduk som inte kräver skydd av installationer

5.3 Behov av nya metoder för oplanerat, akut bergunderhåll

Tidigare i rapporten har klargjorts, att det krävs nya metoder för kontroll och upprätthållande av säkerheten och funktionaliteten i trafikerade bergtunnlar. Hand i hand med en sådan utveckling bör också gå en framtagning av nya metoder för själva arbetet med bergunderhållet.

I avsnitt 6 presenteras några förslag på hur dessa arbetsmetoder bör utformas.

6 Ny strategi för tidseffektivt underhåll av trafiktunnlar

6.1 Förslag till förbättringar av kontrakt

I driftsbudgetarna för väg och järnväg utgör underhållet av själva vägen och spåret den helt dominerande delen av kontrakten. Tunnlar (och broar) ingår normalt inte i driftbudgeten och kostnaden för underhållet av dessa arbeten är försvinnande liten, högst någon procent av driftsbudgeten totalt.

Eftersom volymen på bergunderhållet i tunnelarna är så liten, är det svårt för en entreprenör att hålla en bergunderhållsgrupp med arbete under hela året¹⁵. Problemet för väg- och spårhållarna är att de tilldelas medel för ett år i taget, vilket gör det svårt att garantera långsiktiga åtaganden för specialistföretag för bergunderhåll.

Denna utveckling är på sikt farlig för trafikantsäkerheten i tunnelarna och kan bli skadlig för tunnelarnas funktion. För att förhindra minskningen av kompetens inom teknikområdet bergunderhåll föreslås därför, att anslagssystemet ändras så, att tunnelägarna kan handla upp utökade delar av tunnelunderhållet i större områden och för längre tidsperioder, kanske upp till 10 år. På detta sätt skulle entreprenörerna få incitament att anställa och utbilda experter på området bergunderhåll samt att utveckla en effektiv och behovsanpassad maskinpark för ändamålet.

De nya bergunderhållskontrakten bör vara funktionsbaserade. I stället för att beskriva exakt vad som skall göras, bör kontrakten beskriva vilka egenskaper tunneln skall ha samt hur man kan säkerställa dessa egenskaper genom inspektion och efterföljande åtgärder. Entreprenören får i sitt kontrakt ansvar för att säkerställa säkerhet och att garantera funktionen av tunneln under kontraktstiden. Inspektionen bör utföras av en oberoende inspektör, vars verksamhet också organiseras av entreprenören men som även godkänns av tunnelägaren.

Genom att skapa långa underhållskontrakt, innehållande såväl inspektion, förebyggande bergunderhåll som reparations- och utbytesarbeten, bör såväl tunnelägaren som entreprenören kunna vinna på detta.

Sammantaget föreslås följande:

- Underhållsprojekten för trafiktunnlar avskiljs från underhållsentreprenaderna för vägar och järnvägar och blir en egen aktivitet i driftbudgeten
- Den utsedda specialistentreprenören erbjuds ett garanterat engagemang under flera år, vilket gör det möjligt att bygga upp en stab av kompetent personal och specialiserad utrustning

¹⁵ Motsvarande problem finns inom brounderhållet (Mattson, 2008)

- Entreprenören får möjligheten att bredda sin verksamhet och erbjuda sina tjänster även till andra beställare
- I entreprenörens ansvar ingår att utse en inspektör med dokumenterad kompetens, som skall besiktiga tunnlar och bedöma deras status, avgöra eventuellt underhållsbehov samt rekommendera hur snabbt åtgärderna bör utföras. Stegen i denna verksamhet fram går av flödesdiagrammet i Figur 6
- Rutinmässiga översiktliga inspektioner, här kallade *Statusinspektioner*, görs kontinuerligt efter en löpande tidplan. Beställaren får god på sig att anvisa möjliga tider för Statusinspektionerna
- Om inspektören vid statusinspektion påträffar områden i tunneln inom vilka den tekniska funktionen kan ifrågasättas skall han kräva fördjupad inspektion, här kallad *Åtgärdsinspektion*, av dessa områden
- Beställaren skall tillse att varje Åtgärdsinspektion kan ske utan dröjsmål i samråd med inspektören och entreprenören
- Inspektören genomför den fördjupade Åtgärdsinspektionen och avgör om förebyggande eller akuta underhållsarbeten krävs i tunneln och när dessa bör ske
- På basis av resultatet av den fördjupade besiktningen prioriterar beställaren det aktuella arbetet i sin underhållsplan
- Vid mer omfattande insatser gör beställaren en projektering av arbetet och arbetshandlingar tas fram
- Entreprenören, i samråd med beställaren, gör ett förslag till *Arbetsberedning* för det nödvändiga underhållsarbetet
- Beställaren förbereder för avstängning eller trafikreglering, så att entreprenören kan utföra arbetena i tunneln

6.2 Förslag till nytt upplägg av inspektions- och underhållsarbetena

En grafisk översikt av de föreslagna, ingående momenten i underhållsplanen framgår av flödesdiagrammet i Figur 6.

Enligt förslaget finns endast tre nivåer för underhållsarbetet, statusinspektion, åtgärdsinspektion inspektion och aktiva åtgärder i tunneln¹⁶. Denna förenkling av rådande rutiner tror vi kan underlätta säkerhetsarbetet. Genom att metodiskt tillämpa förfarandet i Figur 6, kan man förhoppningsvis uppnå en ökad trafikantsäkerhet och en god funktion av trafiktunnlarna enligt den filosofi som tidigare redovisats i rapporten.

Ett annat viktigt mål för upplägget är en minimering av driftskostnaderna över tunnelns livslängd (LCC principen)¹⁷.

Som framhållits i rapporten krävs en del utveckling för att önskemålen om ökad kvalitet inom inspektion och underhåll av trafiktunnlar i berg skall kunna uppnås. I fokus måste alltid stå trafikantsäkerheten.

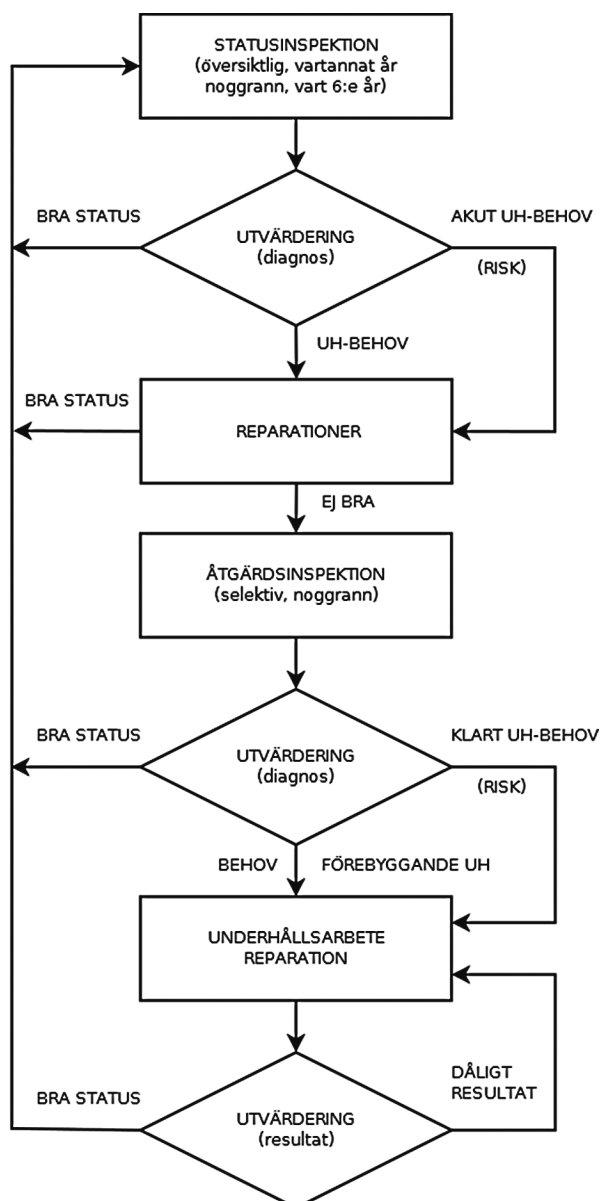
¹⁶ Den statusinspektion som är mer noggrann och utförs endast vart 6:e år, motsvarar vad som idag kallas huvudinspektion

¹⁷ Liknande tankegångar tillämpas i utländska trafiktunnlar, exempelvis i Japan (Akasura & Kojima, 2003).

Med förhoppningen att denna utveckling kan realiseras, ger förslaget följande fördelar i jämförelse med dagens praxis:

- Översiktliga inspektioner planeras in i god tid och görs regelbundet och rutinmässigt
- Man ”missar” ”fel” och risker i tunneln i samband med inspektionerna. Rengöring och ljus är ett måste, mobilitet likaså
- State-of-the-art utrustning för registrering av tunnels status (kameror, laser, radar, akustisk, mm) finns tillgänglig och kan hanteras av inspektör med medhjälpare
- All ingenjörsgelogisk och teknisk kunskap om tunnelavsnittet finns framme före och under inspektionen och är visualiserad med modern it-teknik
- Noggrannare inspektioner av "misstänkta" områden, så kallade Åtgärdsinspektioner, kan beordras av inspektören och ge underlag för arbetsberedningar för underhållsarbeten i tunneln
- Det finns beredskap (personell och maskinell) för akuta, oplanerade underhållsarbeten (reparationer)

De ingående momenten i det föreslagna, nya upplägget visas grafiskt i Figur 6. I det följande görs en mer detaljerad förklaring till förslagets innehåll, med hänvisning till figuren.



Figur 6. Förslag till nytt upplägg av underhåll av trafiktunnlar.

6.2.1 Statusinspektion

Det föreslås, att varje trafikerad tunnel genomgår en besiktning minst vartannat år. Vi har valt att kalla denna för *Statusinspektion*. Dessa inspektioner motsvarar vad som i Trafikverkets handbok *Inspektion av byggnadsverk* (Trafikverket, 2012) kallas ”översiktlig inspektion”. Vid vart tredje tillfälle (vart 6:e år) görs statusinspektionerna mer omfattande och kommer att motsvara ”huvudinspektion” enligt handboken. Ordet statusinspektion har valts eftersom det beskriver syftet med besiktningarna på ett bra sätt – att kontrollera tunnelns ”hälsa”.

För att statusinspektionerna skall bli meningsfulla och ”avslöjande” ställs stora krav på rengöring av tunnelytorna samt på belysning av dessa. Det ställs också stora krav på att inspektören har tillgång till bakgrundsinformation om berget, tidigare besiktningsresultat, skadehistoria, utfört underhåll med mera.

Statusinspektioner kan tidplaneras lång tid i förväg. För Trafikverket:s spårtunnlar kan de läggas in

som BAP-aktiviteter. I SL:s tunnelsystem praktiseras redan idag ett löpande inspektionssystem som kan liknas vid vad som här benämns statusinspektioner.

Statusinspektioner görs efter systematiska rutiner och måste alltid ske snabbt och effektivt. Följande moment kan ingå i en statusinspektion:

- Okulär granskning
- Bomknackning, automatiserad med akustisk avlyssning
- Lasermätning
- Kameraregistrering
- Mätning med infrarött ljus
- Vissa enklare åtgärder, som renspolning av dräner, uppfästning av nät o.d.

När inspektionen avslutats och tunneln utrymts, dokumenterar inspektören resultaten i en digital *Statuslogg*, som sparas som underlag för nästa inspektion.

Statusinspektioner kan ge anledning till en av följande diagnoser för en tunnel eller tunnelsträcka:

- Tunnelns status är bra: Trafiken kan släppas på till nästa inspektionstillfälle
- Tunneldelar kan (möjligen) ha brister: Noggrann inspektion (Åtgärdsinspektion) av dessa delar krävs vid senare tillfälle, se nedan
- Tunneldelar har observerad risk eller kritiskt underhållsbehov: Reparationsarbeten snabbplaneras och utförs omgående

Vid den sistnämnda diagnosen stoppas trafikering förbi det aktuella tunnelläget tills reparationen är utförd.

6.2.2 Åtgärdsinspektion

Om statusinspektionen gett indikationer på att vissa delar av tunneln skulle kunna ha brister, måste dessa delar genomgå en noggrannare besiktning, kallad *Åtgärdsinspektion*. Detta är ett led i ett säkerhetstänkande, som i princip går ut på att sannolikheten för ett nedfall på vägbana eller räls måste vara mycket nära noll i trafikerade tunnlar.

Den föreslagna åtgärdsinspektionen motsvarar ”särskild inspektion” som stipuleras i Trafikverkets handbok *Inspektion av byggnadsverk* (Trafikverket, 2012). Beroende på omfattning och grad av problem som förekommer, sker förrättningarna med ett intervall av 6 – 10 år, se vidare avsnitt 3.1. Benämning åtgärdsinspektion har valts, eftersom det beskriver syftet med förrättningen på ett bra sätt – att ge ett underlag för underhållsåtgärderna.

För spårtunnlar kan åtgärdsinspektioner vanligen inte ingå i BAP, eftersom de måste planeras in minst ett år innan Tågplanen läggs fast. I första hand försöker man då utnyttja restkapacitet på spåret (”vita tider”) för Åtgärdsinspektionerna¹⁸.

Åtgärdsinspektioner sker selektivt, alltså endast på de delar av tunneln där man misstänker skador. Sådana tunneldelar kan ha partier med misstänkt bomt berg eller sprutbetong med dålig vidhäftning,

¹⁸ Det är oklart, om de vid de vid de översiktliga inspektionerna upptäckta ”felen” i SL:s tunnelsystem senare blir föremål för en noggrannare besiktning. Men eftersom det sägs, att större underhållsarbeten föregås av projektering och framtagande av arbetshandlingar, får man förmoda att så är fallet.

där tendenser till avskalning av betong börjat märkas eller där man sett korrosionsangrepp på bergbultar. Dessa partier granskas nu noga och fler mätningar utförs, bland annat:

- Noggrann okulärbesiktning
- Tät bomknackning (automatiserad), inklusive akustisk analys
- Radarmätning av betongtjocklek
- Bulttester
- Ev. deformationsmätningar
- med mera

Beroende på tillgång av tid kan vissa reparationsåtgärder eventuellt utföras i tunneln under åtgärdsinspektionerna, såsom mindre bulstättningsarbeten och viss betongsprutning. Detta kräver i så fall mycket flexibla och lättarbetade utrustningar.

Åtgärdsinspektionen avslutas med att inspektören sammanfattar alla mätresultat och åtgärder i en *inspektionslogg* som blir underlag för arbetsbeskrivningar för åtgärder i tunneln. Loggen sparas digitalt som underlag för framtida inspektioner.

En åtgärdsinspektion kan ge anledning till en av följande diagnoser, se Figur 6:

- Inget angeläget underhållsbehov kan just nu noteras
- Förebyggande underhåll behövs och skall inplaneras för framtida utförande (ej akut)¹⁹
- Fel och brister har upptäckts i sådan grad eller omfattning, att säkerhetshöjande underhållsarbeten (reparationer) bör utföras snarast

6.2.3 Underhållsarbeten och reparationer

Dessa arbeten kan vara av typen förebyggande underhåll eller bestå av reparationsarbeten för att förebygga akut risk för ras eller vatteninträning. De metoder som används finns beskriva i avsnitt 4.2.

Att bygga bort risker för omedelbart ras och liknande i trafiktunnlar måste alltid ske akut. Arbetena innebär omedelbar avstängning av tunneln med åtföljande störningar för allmänheten. Att planera för sådana avstängningar är i allmänhet inte möjligt, åtgärderna måste ske omedelbart efter det att problemen avslöjats vid statusinspektionen, se Figur 6. Säkerheten för trafikanterna måste alltid gå före att hålla en tidtabell.

Vid konstaterade problem i en tunnel som inte bedöms innebära omedelbar instabilitet och risk för trafikanterna, görs en noggrannare utvärdering och planering av åtgärder vid en kommande, inplanerad åtgärdsbesiktning.

När arbetena slutförts, görs en analys av om de genomförda arbetena avhjälp problemerna och om de återställt tunnelns säkerhet och funktion. Konstateras det att så inte skett, måste arbetena göras om eller kompletteras.

¹⁹ Det förebyggande underhållet kan för Trafikverket:s spårtunnlar planeras framåt i tiden och läggs in före nästa års Tågplan som BAP-aktivitet

6.3 Vinna-vinna fördelar

Det är utredningens uppfattning, att genomförande av den föreslagna, nya strategin kommer att innebära förbättringar, inte bara för trafikantsäkerheten, utan också för tunnelägare och för de specialistföretag som behövs finnas på marknaden för att underhålla trafiktunnlarna. Några fördelar anges nedan.

6.3.1 Beställaren

- Bergunderhåll som egen aktivitet ökar kompetensen och kvaliteten på utförandet
- Tillgång till specialistföretag med god kompetens och utrustning ”på plats” vid incidenter säkerställs
- Mer tid kan allokeras för egen långsiktig planering av tunnelunderhåll (ex LCC-analys)
- Färre och bättre upphandlingar kan göras av samma åtgärd i flera tunnlar, vilket ger lägre kostnader genom ”serie-köp”
- Ökat intresse för långa kontrakt ger fler anbud med högre kvalitet
- Säkerheten för tredje man förbättras genom ett systematiskt underhåll

6.3.2 Entreprenören

- Garanterad omsättning under flera år ger en ekonomisk "bas"
- Bergunderhåll lyfts upp som en tekniskt intressant aktivitet som lockar nya medarbetare
- Det kända flödet av arbeten kan planeras in optimalt under året
- Basverksamhetens volym ger möjlighet att bygga upp en kompetent bergunderhållsgrupp
- Garanterad omsättning ger möjlighet till investering i specialmaskiner för tunnelinspektion och bergunderhåll
- Personal och maskinpark ger möjlighet att lämna anbud på bergunderhåll till andra kunder (ex kommuner)
- Incitament för innovationer i bättre metoder och utrustning ökar
- Möjligheter att utbilda personal för dessa arbetsuppgifter förbättras

7 Förslag till nya utvecklingsinsatser

En fortsatt utredning bör inventera och välja ut ett antal mätsystem som är lämpliga för inspektioner av svenska trafiktunnlar i berg. Avsikten är, att mätsystemen kan göras tillgängliga för den ansvarige inspektören. Denne, å sin sida, måste vara förtrolig med hur mätresultaten skall analyseras och tolkas. Den utvalde underhållsentreprenören kan förslagsvis ansvara för handhavande och skötsel av utrustningarna och garantera att dessa är i funktionsdugligt skick vid besiktningstillfällena. Var äganderätten för utrustningarna skall ligga bör en fortsatt utredning ge svar på. Det är här viktigt att komma ihåg, att entreprenörens vilja att investera styrs av kontraktslängd och upphandlingsform

En given förutsättning vid all inspektion bör vara, att tunneln är väl rensad, att fullvärdig belysning finns samt att inspektören är väl förberedd, har fysisk närhet till tunnelytorna och har full rörlighet via plattform i tunneln. Detta ställer särskilda krav på den maskinella utrusning som entreprenören förfogar över. Designunderlag för maskinutrustningen bör tas fram i den fortsatta utredningen.

I denna rapport föreslås, att loggar från tidigare inspektioner finns tillgängliga på plats i tunneln, helst på en fältdator och att loggar för den aktuella tunneln uppdateras efter besiktningen med de nya data som framkommit. Vad detta arbete skall innehålla och hur det skall organiseras bör en fortsatt utredning ge närmare svar på.

Det har rapporterats, att en viss beredskap idag ofta finns att snabbt kunna åtgärda mindre, ej akuta reparationer under inspektioner. Den mer angelägna uppgiften för inspektionen synes dock vara att hitta ”okända fel” i tunneln. Hur balansen mellan dessa uppgifter skall hanteras föreslås också bli en uppgift för en fortsatt utredning.

Nedan ges en mer detaljerad beskrivning av vad som bör utredas vidare.

7.1 Utveckling av nya utrustningar och mätmetoder för översiktliga besiktningar (statusinspektioner)

Många krav kan ställas på de nya mätmetoder som skall tillämpas vid inspektion av trafiktunnlar.

En huvudmålsättning är att de utrustningar som används skall ge en god säkerhet för att potentiella rasområden blir upptäckta i tid och åtgärdade. Utmaningen ligger i att uppnå detta mål under den ytterst begränsade tid som inspektionen får ta.

En internationell utblick har visat, se Avsnitt 1.2, att det på marknaden idag finns fungerande utrustningar som kan uppfylla kriterierna. Dessa och andra mätsystem är under utveckling och skulle kunna anpassas för svenska förhållanden.

Några mätmetoder som skulle kunna anpassas för översiktliga besiktningar (statusinspektioner) av svenska trafiktunnlar i berg och som bör studeras i den fortsatta utredningen är:

- Mekaniserad ”gles” bomknackning
- Fotodokumentation
- Laser-skanning

7.2 Utveckling av nya utrustningar och mätmetoder för noggranna besiktningar (åtgärdsinspektioner)

För att uppfylla målet att noggrant kunna avgöra eller indikera et problems svårighetsgrad och för att ange förslag på hur det skall åtgärdas, krävs att inspektören har tillgång till tillförlitlig utrustning för bakgrundsinformation. Sådan utrustning föreslås innehålla följande delar:

- Mekaniserad ”tät” bomknackning
- GPR-utrustning
- 3D-laservattenprovtagning
- Sprutbetongprovtagning
- test av bultar
- fiberoptik för inspektion/kontroll bakom dräner

7.3 Utveckling av utrustningar för mindre underhållsåtgärder i samband med inspektion (ej akuta)

Följande arbeten kan man hinna utföra under tiden för inspektion

- Uppgradering av skadad sprutbetong
- Spolning av dräner
- Justering av infästningar

För att detta skall vara möjligt krävs viss utveckling och anpassning av befintliga utrustningar för att arbetena skall kunna utföras snabbt och smidigt i tunneln.

7.4 Utveckling av ny fordons- och maskinutrustning anpassad för underhållsarbeten

7.4.1 Vad skall maskinerna kunna åstadkomma?

Maskinerna bör utvecklas så att alla vanligtvis förekommande underhållsåtgärder i trafiktunnlar kan utföras effektivt. Det är inte alltid fallet idag, och orsaken till detta kan vara kortsiktigt budgettänkande och suboptimering. De förslag som lämnas nedan är ämnade att effektivisera dessa arbetsuppgifter.

7.4.2 Renspolning och vattenlagring

För att kunna genomföra en effektiv inspektion av tunnlar måste bergytorna spolas rena. En ökad effektivitet i inspektionsarbetet kräver motsvarande effektivisering av spolningen. Särskilda mobila enheter med effektiva spolpumpar och spolmunstycken monterade på någon typ av gigg eller robotarmar bör vara lösningen. Det finns exempel på effektiva utrustningar, exempelvis de som används i Södra Länken och i några andra trafiktunnlar, se Figur 1. I de flesta andra tunnlar utförs arbetet med föråldrade och ineffektiva metoder.

I många tunnlar finns inget brandvattensystem installerat. Då måste vatten transporteras i tillräcklig mängd och kontinuitet. Detta kräver en noggrann planering av kapacitet och en anpassad vagnpark vilket är en transportteknisk problemställning. Snabb påfyllning och snabb omkoppling mellan vattenbehållare är viktig för att kunna arbeta kontinuerligt.

7.4.3 Belysning och elgenerering

Kraftförsörjning i tunnlar bör, av arbetsmiljöskäl, i största möjliga utsträckning tillgodoses med el. Ledningsdragning är tidsödande och opraktiskt vid mindre insatser. En framtida utveckling kan vara användning av batteripaket som förflyttas med fordon till arbetsstället och forslas ut ur tunneln för laddning. Vid kontinuerligt arbete kan då två eller flera batteripaket användas och bytas ut vid behov. Tekniken finns och används med framgång för transporter vid byggande av mindre tunnlar.

Användning av förbränningsmotorer kräver i allmänhet en kraftigare ventilation. I de fall då eldrift inte kan användas, måste maskiner med alternativa drivmedel utvecklas, som inte påverkar arbetsmiljön så negativt som dagens bränslen. För dieseldriven utrustning bör syntetisk diesel användas.

7.4.4 Plattform för instrument och inspektör

En anpassad mobil plattform är önskvärd för att underlätta inspektion. Plattformen bör förses med

följande funktioner och utrustning:

- Höj- och sänkbar
- Mycket bra belysning av tunnelns tak och väggar, monterad på ett sådant sätt, att inspektören inte störs av bländning
- Utrustning för positionsbestämning
- Uppvärmad hytt på plattform med plats för relationshandlingar, protokoll etc
- Utrustning för bomknackning (manuell eller mekanisk)
- Skyddstak att använda vid kontroll av särskilt osäkra partier
- Möjlighet till positionsbestämd fotografering eller scanning

Plattformen kan vara anpassad till vägtunnlar eller spårtunnlar, och utrustad med de säkerhetsanordningar som krävs. Möjligen kan plattformen byggas som en modul som kan placeras på olika bärare och därmed går att använda i både väg- och järnvägstunnlar.

7.4.5 Plattform för mindre entreprenadarbeten

För underhåll av bergtunnlar krävs vanligen resurser för skrotning, bultning, betongsprutning och eventuellt injektering eller dränering. Lyftanordningar måste finnas liksom även energiförsörjning och materialupplag. Moduler med dessa funktioner kan förberedas för snabba insatser. Modulerna kan sedan kombineras på det sätt som krävs i den aktuella situationen. Modulerna kan byggas så att de kan användas i både väg- och järnvägstunnlar.

Enkla, mobila skydd för anläggning och installationer vid underhållsarbeten i tunnlar bör utvecklas.

7.4.6 Transport och etablering av maskinutrustningen

Med den ovan beskrivna metoden går det snabbare att etablera en arbetsplats och att starta produktionen. Det blir också en smidigare avveckling.

7.4.7 Landsvägstransport till tunnelpåslag

Det är av stort värde att kunna transportera utrustning och material på vägnätet, ända fram till tunnelns närhet. För spårtunnlar kan då förberedelser göras utan att störa järnvägstrafiken. I många fall finns dock begränsade möjligheter till vägtransport till järnvägstunnlar. Under byggperioden fanns det oftast vägar för tunga transporter, men efter att tunneln färdigställts har underhållet av dessa upphört så att de växt igen med skog, eller så hindrar ägarförhållandena att vägen hålls efter. Det kan vara en god idé att söka hålla detta vägnät öppet där detta är möjligt.

7.4.8 Transporter i tunneln

I vägtunnlar är effektiva lastbilstransporter den bästa lösningen. God planering av godsflödet minskar antalet transporter och skonar miljön.

I järnvägstunnlar ställs än större krav på transportplanering än i vägtunnlar, eftersom godset måste

placeras i den ordning som det förbrukas redan innan det körs in i tunneln. Förberedd lastning av kassetter som lyfts på järnvägsvagnar sparar tid och minskar tid för omlastning.

I vissa situationer kan det vara lönsamt att anlägga väg på spårbädden som tillåter transporter med hjulburna fordon. Tid för anläggning och borttagning av vägen måste vägas mot fördelar i form av effektivare materialflöden.

Det bör skapas möjligheter av via servicetunnlar kunna komma in i spårtunnlar med 2-vägsfordon.

8 Förslag till fortsatt utredning

Den utredning som redovisas i rapporten har fokuserat på säkerhetshöjande metoder för inspektion och underhållsarbeten i trafiktunnlar. Ämnet är omfattande och många frågeställningar har inte kunnat beröras.

Det föreslås därför, att utredningen kan fortsätta med en ytterligare etapp, där följande frågeställningar behandlas och utvecklingsarbete föreslås inom områdena:

- Nya utrustningar och mätmetoder för översiktliga besiktningar (statusinspektioner)
- Nya utrustningar och mätmetoder för noggranna besiktningar (åtgärdsinspektioner)
- Nya utrustningar för mindre underhållsåtgärder i samband med inspektion
- Nya fordon och maskiner anpassade för skyndsamma underhållsarbeten

Innehållet i den föreslagna, fortsatta utredningen beskrivs i detalj i avsnitten 7.1, 7.2, 7.3 respektive 7.4.

Referenser

- Asakura T & Kojima Y, 2003, *Tunnel maintenance in Japan*. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, Pergamon Press, Oxford.
- Berggren, A-L, 1999. Frostkonstruksjonen i Oslofjordtunnelen, Norsk Bergmekanikkdag, Oslo.
- Barton, N., 2007, *Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy*.
- Delatte N et al, 2003, *Application of Nondestructive Evaluation to Subway Tunnel Systems*. Transportation Research Record, Paper No.03-3269. Washington D.C.
- Garmisch T & Girmscheid G, 2003, *Life-cycle maintenance management of traffic tunnels*. In: System-based Vision for Strategic and Creative Design, Swets&Zeitlinger, Lisse.
- Gjaering, G., 2008, *Underground Openings – Operations, Maintenance and Repair*. Publ. No 17, NTS.
- Holmberg M & Stille H, 2009, Observationsmetoden och deformationsmätningar vid tunnelbyggande.

- Kadefors A & Bröchner, 2008, Observationsmetoden I bergbyggande: Kontrakt och samverkan.
- Lindblom U, 2012, *Underhållskostnader för bergtunnlar i ett livlängdsperspektiv*. FoU Väst Rapport 1205, Göteborg.
- Mashimo H & Ishimura T, 2006, *State of the art and future prospect of maintenance and operation of road tunnel*. Proceedings ISARC 2006.
- Marosszeky M et al., 2003, *Sydney Harbour Tunnel – Technical Aspects of Asset Maintenance Strategies For Long Term Serviceability*. Proceedings 9th DBMC.
- Mattsson H-Å, 2008, *Integrated Bridge Maintenance*. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Onishi Y et al., 2008, *Extension of the Underground space Information Management System: Road tunnel maintenance*. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises. Taylor&Francis, UK.
- Rossell, K., Personlig kontakt.
- Rydén, N, 2012, *Impact Echo Q-factor Measurements Towards Non Destructive Quality Control of the Backfill in the Segmental Lined Tunnel*. Nondestructive Testing of Materials and Structures, RILEM. Istanbul.
- Trafikverket, 2012, *Inspektion av byggnadsverk – syfte, omfattning och krav*. Trafikverket handbok, Borlänge.
- Skoglund A, 2012, *Nyttan av LCC-analyser vid planering av underhållsarbete I SL:s spårtunnlar*. Examensarbete, KTH arkitektur och samhällsbyggnad, Stockholm.
- Thoresen Stig, 2003, personlig kontakt om inspektion i Dröback tunneln efter ras bakom inklädnad.
- Quanhong, F et al, 2008, *3D laser mätningsteknik för inmätning, dokumentation och visualisering*. BeFo Bergmekanikdag 2008, Stockholm.
- Pötsch M et al, 2008, *3D images in underground excavations and their use for rock engineering*, BeFo Bergmekanikdag 2008, Stockholm.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773