

TIDSEFFEKTIVT UNDERHÅLL AV TRAFIKTUNNLAR I BERG

INSPEKTIONS- OCH ARBETSMETODER

Ulf Lindblom, projektledare

2015-12-14

Förord

I svenska trafiktunnlar passerar varje dag tiotusentals människor. Flertalet av tunnarna är byggda i berggrund av god kvalitet. Berget betraktas som ett bärande byggnadsmaterial som för sin funktion lokalt behöver förstärkas eller tätas. Denna förstärkningsfilosofi kräver att tunnarna måste inspekteras regelbundet för att säkerställa bergets och förstärkningarnas funktionalitet. För att undvika oförutsedda byggtekniska incidenter under tunnelns driftsfas måste inspektioner och underhållsarbete ske med en viss regelbundenhet. Sådana insatser upprätthåller tunnelns tekniska kvalitet och prestanda och skapar även förutsättningar för en god driftsekonomi.

En nyckelfråga för tunnelsäkerheten är hur man vid inspektioner kan upptäcka potentiella svagheter i tunneln innan ras, nedfall eller vatteninläckage träffar. En annan vital fråga är med vilken teknik "felen" i tunnelstrukturen kan åtgärdas på den begränsade tid som står till förfogande innan trafiken släpps på igen.

I en tidigare rapport i denna serie (FoU Väst Rapport 1301) behandlades inspektions- och underhållsteknik för trafiktunnlar relativt översiktligt. Där föreslogs en fortsatt utredning, där nya geofysiska instrument skulle granskas och presenteras närmare, liksom tillgängliga, tidseffektiva arbetsmetoder. En djupare litteraturgenomgång av det internationella kunskapsläget på dessa områden skulle också genomföras.

Föreliggande rapport sammanfattar resultatet av den nya utredningen. En viktig del av rapporten utgör beskrivningen av erfarenheterna från ett nyss genomfört praktikfall, underhållsarbetena i Aspen-tunneln öster om Göteborg.

Den huvudsakliga FoI-insatsen har utförts i två arbetsgrupper, AG 1: Inspektions- och mätmetoder och AG 2: Arbetsmetoder. De specialister som arbetat i grupperna är:

- AG 1: Bengt Ludvig (ordf.) och Petter Engvall, PetroTeam AB, Jaana Gustavsson och Claes Lenninger, Tyréns samt Lennart Gimring, ÅF
- AG 2: Tommy Ellison, Besab (ordf.), Hans Hargelius, TrV, Joakim Karlsson, Bergab, Thomas Cederhammar, Sika samt Johannes Hansson, Atlas Copco

Arbetsgruppernas delrapporter återfinns i Bilagorna 1-3.

Tommy Ellison har gjort en ingående analys av underhållsarbetena i Aspen-tunneln i Bilaga 4.

Litteraturstudien har genomförts av undertecknad och finns rapporterad i Bilaga 5.

Projektet har övervakats av en referensgrupp bestående av följande personer: Bo Blixt, LG Dahlqvist (Besab), Kjell Windelhed (ÅF), Pär Åhman (BI), Peter Lund (TrV), Bengt Ludvig (PetroTeam), Lars-Olof Dahlström (NCC), Kent Lundin (Telia-Sonera), Bo-Göran Johansson (Atlas Copco) och Thomas Sträng (SLL). Referensgruppen har sammanträtt två gånger under projektiden.

Projektet har genomförts med stöd från SBUF, Trafikverket, Göteborg Energi samt Telia Sonera.

Göteborg den 14 december 2015

Ulf Lindblom
Projektledare

Innehåll

1 Bakgrund	6
2 Projektets syfte och genomförande	8
3 Internationell utblick över trafiktunnlar och underhåll	9
3.1 Norden (utanför Sverige)	9
3.1.1 Finland	9
3.1.2 Norge	10
3.2 Europa utanför Norden	10
3.3 Övriga världen (utanför Europa)	11
3.3.1 USA	11
3.3.2 Japan	11
3.3.3 Övriga länder	11
3.4 Sammanfattning	12
4 Tunnelinspektion och mätmetoder	13
4.1 Bakgrund	13
4.2 Dagens praxis för tunnelinspektion	13
4.2.1 Sverige	13
4.2.2 Andra länder	14
4.3 Dokumentation och erfarenhetsöverföring	15
4.4 Instrument för inspektion av bergtunnlar	16
4.4.1 Översikt över icke-förstörande metoder	16
4.4.2 GPR – georadar	16
4.4.3 Termografi - värmekamera	17
4.4.4 Laser	18
4.4.5 Optiskt mätsystem – Mantis Vision	20
4.4.6 Schmidt-hammare (återstudshammare)	21
4.4.7 Akustiska metoder	21
4.4.8 Multisystem	22
4.4.9 Sammanställning av vad som kan inspekteras med NDT	23
4.5 Användbara instrument för tidseffektiv inspektion	23
4.5.1 Inledning	23
4.5.2 GPR - georadar	23
4.5.3 Termografi	24
4.5.4 Laser	24

4.5.5 Mantis Vision	25
4.5.6 Spacetec kombinationsinstrument	25
4.5.7 Schmidt-hammare	26
4.5.8 Slutsatser och rekommendationer	26
4.6 Behov av instrumentutveckling	27
4.7 Hantering av bakgrundsmaterial och mätdata	27
4.8 Utförande av inspektionen	28
5. Arbetsmetoder för tunnelunderhåll	29
5.1 Förutsättningar för arbetena	29
5.2 Projektets olika faser och dess förutsättningar	29
5.2.1 Projektering	30
5.2.2 Anbudsarbete	30
5.2.3 Upphandling	30
5.2.4 Produktionsplanering	30
5.2.5 Produktion	30
5.2.6 Störningar och svårigheter vid produktionen	31
5.3 Dagens praxis för underhållsarbeten i bergtunnlar	31
5.3.1 Bergschakt: Skrotning, strossning och masshantering	31
5.3.2 Rengöring	32
5.3.3 Injektering	33
5.3.4 Sprutbetongarbeten	33
5.3.5 Dränering	34
5.3.6 Utbyte av bultar	34
5.4 Förslag på förbättrade arbetsmetoder	35
5.4.1 Bergschakt: Skrotning, strossning och masshantering	35
5.4.2 Rengöring av tunnelväggar och tak	36
5.4.3 Injektering av omgivande berg	36
5.4.4 Sprutbetongarbeten	36
5.4.5 Uppgradering och rensning av dränering	36
5.4.6 Utbyte av bultar	36
5.5 Sammanfattning	36
6 Fallstudie Aspentunneln	37
6.1 Bakgrund	37
6.2 Ingående arbeten	37
6.3 Utförandetid	37

6.4 Produktionsplanering sprutbetong	37
6.5 Val av arbetsmetoder.....	37
6.5.1 Bergschakt	37
6.5.2 Renspolning av bergytor.....	38
6.5.3 Masshantering	38
6.5.4 Bergförankring.....	38
6.5.5 Betongsprutning	38
6.5.6 Dränering.....	38
6.6 Logistik	38
6.7 Speciella svårigheter	38
6.7.1 Skyddstäckning	38
6.7.2 Skyddsplank på arbetsvagnar	39
6.8 Externa störningar.....	39
6.8.1 Hastighetsnedsättning.....	39
6.8.2 Sidoentreprenader	39
6.8.3 Restriktioner med hänsyn till omgivningspåverkan.....	39
6.8.4 Väder	39
6.8.5 Oplanerade underhållsinsatser.....	39
6.9 Slutsatser och lärdomar av Aspentunneln	39
6.9.1 Trafikering under arbetstiden.....	39
6.9.2 Åtkomlighet	39
6.9.3 Arbetshandlingar	40
6.9.4 Upphandling	40
6.9.5 Tunnelutformning.....	40
6.9.6 Åtkomlighet	40
7 Sammanfattning och analys	41
8 Litteraturkällor och referenser	42
8.1 Inspektion	42
8.1.1 Manualer	42
8.1.2 Artiklar och rapporter.....	42
8.1.3 Datorlänkar, instrument	44
8.1.4 Datorlänkar, inspektionsregistrering	44
8.2 Arbetsmetoder.....	44
8.3 Tunnelsäkerhet	45
8.4 Management.....	46

8.5 Svenska regelverk	47
Bilaga 1. Delrapport Arbetsgrupp 1: Snabba tunnelinspektioner	48
Bilaga 2: Arbetsgrupp 1: Specialrapport Markradar	55
Bilaga 3. Rapport arbetsgrupp 2: Arbetsmetoder för tidseffektivt underhåll av tunnlar	60
Bilaga 4: Fallstudie Aspentunneln	83
Bilaga 5. Litteraturstudie: Underhåll av trafiktunnlar i ett internationellt perspektiv	88

1 Bakgrund

Svenska trafiktunnlar är oftast byggda i berggrund av god kvalitet. I normalfallet betraktas därför berget som ett självständigt byggnadsmaterial som endast ställvis behöver förstärkas efter lokala behov. Huvudtypen av förstärkning är bultar, sprutbetong eller betongingjutning. Som skydd mot inringning av vatten i tunneln används olika typer av membran och frostisoleringar. Denna förstärkningsfilosofi kräver att berget måste inspekteras regelbundet för att säkerställa förstärkningarnas funktion. För att undvika oförutsedda brott i förstärkningarna under tunnelns driftsfas – som i värsta fall kan bli ödesdigra – måste inspektionerna och underhållsarbetena ske med en viss regelbundenhet. Genom dessa insatser upprätthålls tunnelns tekniska kvalitet och prestanda.

Liknande förstärkningsfilosofi som i Sverige tillämpas i andra länder med god berggrund, såsom i Norge och Finland. I flera andra länder, som exempelvis i kontinentala Europa och i östasiatiska länder, har man sämre berg och en mer systematisk bergförstärkningsfilosofi. Det är där vanligt med helingjutna ("linade") tunnlar som inte kräver lika mycket kontroll och underhåll. Denna rapport behandlar inte denna typ av tunnlar.

Trots god tillsyn och väl utförd underhåll kan det inträffa en plötslig och oförutsedd skada i en tunnel som behöver åtgärdas omedelbart. Orsaken kan vara geologiskt betingad eller bero av olyckshändelse. För tunnelägaren är det då angeläget att kunna göra ett snabbt avrop till en entreprenör som är förberedd och har resurser att sätta in omedelbart. I detta fall är det alltså avropstiden och själva insatstiden som ska vara tidseffektiv. Problemen med underhållsinsatser enligt denna definition är i större utsträckning relaterad till upphandling än en teknisk fråga. Då en snabb insatstid är väsentlig måste byggherren ha planerat för sådana oönskade händelser. Detta måste då ske i form av upphandling av ramavtal, där entreprenören förbinder sig att ha en sådan beredskap. Byggherren måste i en sådan upphandling specificera vilka resurser som ska finnas tillgängliga och vara beredd att betala för denna beredskap även när den inte används. Graden av beredskap måste ställas i relation till omfattningen av de störningar som drabbar trafikanterna vid en tunnelavstängning, och de samhällskostnader som detta medför. I denna rapport berörs sådant akut underhåll endast översiktligt.

Planerat underhåll avser uppgradering av tunnelns funktioner så att en säker drift säkerställs under en viss tid fram till nästa planerade insats. Efter det att behovet av underhåll konstaterats genom inspektion, inleds projektering och planering för insatsen. När arbetet utförs är det väsentligt att det är rätt planerat, med tillräcklig hänsyn till de svårigheter som underhåll under korta dispositionstider innebär. Metoder och fordon för etablering/avveckling och andra icke värdehöjande aktiviteter ska vara effektiva för att skapa tid för själva utförandet. Arbetsmetoder och material ska vara anpassade till snabba insatser. Förstärkningselementen ska till exempel ha nått tillräcklig hållfasthet innan trafikpåsläpp kan göras. Det krävs alltså en helhetssyn för att underhållsarbetet ska bli tidseffektivt.

Det är framförallt planerade underhållsarbeten som behandlas i denna rapport. Fallstudien Aspentunneln är ett exempel på planerat underhåll som ges relativt stort utrymme i rapporten (avsnitt 6).

Rapporttiteln "Tidseffektivt underhåll" syftar på produktiviteten i utförandet av de åtgärder i tunneln som ger ett bestående, funktionsfrämjande värde. Dessa ingår i en process som även innehåller många icke värdehöjande hjälparbeten. Det är väsentligt att de senare utförs snabbt om hela processen ska vara tidseffektiv. Mobila och

ändamålsenliga utrustningar som medger snabba byten från ett arbetsmoment till ett annat, tillgång till resurser för skyddande åtgärder samt fungerande materialförsörjning är därför minst lika viktiga faktorer i underhållsprocessen som ett effektivt utförande av själva arbetsmomenten.

Den tillgängliga produktionstiden vid underhållsarbeten i trafiktunnlar är ibland mycket pressad. Inspektionen av tunneln måste ske snabbt och effektivt, utan risk att man "missar" svagheter och skador i tunneln eller dess förstärkningssystem. Själva underhållsarbetet måste utföras så att störningarna för trafikanterna blir så små som möjligt. Vid större åtgärder delas tiden upp i många korta tidsperioder. Ofta ges endast tillträde nattetid eller på helger då lågtrafik råder och då omledning eller begränsning i trafikflödet kan tillåtas. Det innebär att produktionen störs av dagliga på-/avetableringar, trafikanordningar, skyddsåtgärder, städning mm. Dessa arbeten är inte i vanlig mening "produktiva", men är nödvändiga för att kunna utföra övriga arbeten med hänsyn till trafikanternas behov och för att skapa en god säkerhet för de som utför underhållsåtgärderna. Det är också vanligt med partiell avstängning, d.v.s. att endast ett spår eller en del av vägen stängs av för trafik. Närhet till passerande trafik, befintliga högspänningsledningar m.m. kan då innebära att produktionen måste ske med nedsatt produktivitet.

Under driftförhållanden är tunnelägaren ansvarig för tunnelns funktion och därmed för att en tunnels förstärkningssystem är intakt. Under byggnadstiden har entreprenören detta ansvar. De stora ägarna av trafiktunnlar i Sverige är Trafikverket och Stockholms Lokaltrafik. Dessutom finns det flera trafiktunnlar som har en kommun som huvudman, såsom spårvägstunnelnarna i Göteborg och Norrköping samt lokala vägtunnlar runt om i landet.

Av de 190 tunnlar som Trafikverket förvaltar är 165 järnvägstunnlar och 25 vägtunnlar. Järnvägstunnelnarna är genomgående äldst, men flera har även byggts på senare tid, såsom Citytunneln i Malmö. Citybanan i Stockholm och Hallandsås-tunneln färdigställs för närvarande. En ambition är att säkerhetsinspektera alla järnvägstunnlar vartannat år samt att göra en mer genomgripande s.k. huvudinspektion vart sjätte år.

Trafikverkets vägtunnlar är yngre, de flesta byggda efter 1990. Bland de nyare återfinns Lundby- och Götatunnelnarna i Göteborg och Södra Länken och Norra Länken i Stockholm. Även dessa tunnlar genomgår regelbunden inspektion och förebyggande underhåll utförs.

Stockholms tunnelbana ansvarar för ca 25 % av kollektivtrafiken i hela Sverige. Banan har ca 63 km bergtunnlar. I dessa pågår ett löpande underhållsarbete som omfattar arbeten på det bärande bergsystemet (där ingår förstärkningarna) och systemet för vattenkontroll. Cirka 1 miljon m² tak och väggar i tunnelnarna undergår löpande besiktning och underhåll efter ett fastlagt schema. Dessa arbeten sker varje natt mot vardag under ca 3-4 timmar och utförs av 4 personer. I samband med besiktningarna utförs bergskrotning och mindre punktinsatser på förstärknings- och tätningssystemen. En specialbyggd, rälsbunden arbetsvagn används vid arbetena, som handlas upp av en bergentreprenör i ett treårigt ramavtal. Det händer sällan att större fel och underhållsbehov upptäcks vid dessa planerade underhållsbesiktningar [Skoglund,2012]. Större, akuta åtgärder kan kräva lokala driftstopp och brukar handlas upp separat som tilläggsarbeten.

Underhållsarbeten i trafikerade tunnlar försvåras av ett antal faktorer som:

- Av hänsyn till användarna (trafikanterna) är det svårt att få tillgång till tid i spår- respektive vägtrafikområde
- Störningar av underhållsarbeten kan bli betydande för användare och för samhället
- Genom hög trafikbelastning erbjuds ofta korta och osammanhängande dispositionstider på obekvämt arbetstid
- Tidiga trafikpåsläpp efter åtgärderna i tunneln kräver förstärkningsmetoder som snabbt ger tillräcklig säkerhet för användarna

En annan faktor som försvårar underhållet av trafiktunnlar är, att de inblandade organisationernas komplexitet ger långa interna beslutsvägar och ganska kort framförhållning vid avrop för arbeten i dessa miljöer. Detta ger kort planeringstid och leder ofta till svårigheter att använda utrustningar på ett optimalt sätt. Liten och osäker volym för bergunderhåll i trafiktunnlar ger inte heller specialistföretagen rimlig möjlighet att investera i utrustning för ett effektivare utförande av sina tjänster och arbeten i tunneln.

Inspektörens roll är central för hur tunneln bör underhållas. Målet är att upprätthålla trafikantsäkerheten och att ge förutsättningar för en ekonomiskt optimal tunnelförvaltning. I framtiden bör denna roll skärpas genom ökat ansvar för inspektören. Denne bör å andra sidan få bättre förutsättningar att göra ett kvalificerat besiktningsarbete i tunneln, vilket ofta måste ske under tidspress.

Vid akuta instabilitetsproblem eller ras i tunneln ställs delvis andra krav på utförandet än vid planerat underhåll och här blir inte inspektörens roll lika tydlig för arbetsupplägget. Här blir hans roll för efterkontroll av arbetena mer väsentlig. De ovan nämnda problemen är naturligtvis inte specifika för svenska trafiktunnlar utan är allmängiltiga för internationella operatörer av trafiktunnlar. För att dra lärdom av detta har en internationell litteraturstudie gjorts inom projektets ram.

2 Projektets syfte och genomförande

Vid formuleringen av projektmålen avsågs att fokusera dels på hur inspektionen av den tekniska statusen hos en trafiktunnel kan klarläggas snabbt och säkert, och dels på hur underhållsarbetena kan förbättras tekniskt och organisatoriskt. Det övergripande målet för projektet var höjd säkerhet och kvalitet vid inspektion och underhåll av trafiktunnlar.

Utredningen hade målsättningen att klarlägga kunskapsläget och aktuell tillämpning på området och att ange svagheter och behov av nya metoder. För detta ändamål gjordes FOI-insatser inom nedanstående områden, där de två första är prioriterade:

- Instrument och mätmetoder för inspektion vid kort tillgänglighet till tunneln
- Tidseffektiva arbetsmetoder för underhållsbehov som klarlagts vid inspektion (planerat underhåll)
- Tidseffektiva arbetsmetoder vid akuta (ej inplanerade) underhållsinsatser (endast översiktligt)

En genomsökning av aktuella databaser och andra källor avseende praxis för tidseffektivt underhåll av trafiktunnlar har genomförts som en del av projektet. Sökningen har till en del skett internationellt, men tonvikten har lagts på tunnlar vid liknande förhållanden som i Sverige. Ett fullständigt resultat av litteratursökningen återfinns som Bilaga 5 till rapporten. I avsnitt 3 nedan redovisas i sammandrag de viktigaste slutsatserna av sökningen.

FOI-arbetet har inom projektet bedrivits i två arbetsgrupper:

- Arbetsgrupp 1: INSPEKTIONSMETODER INKLUSIVE INSTRUMENT OCH MÄTTEKNIK
- Arbetsgrupp 2: ARBETSMETODER

Resultatet av FOI-insatserna i arbetsgrupperna redovisas i avsnitten 4 och 5. Exemplifiering av arbetsmetoder görs i avsnitt 6 mot ett aktuellt underhållsprojekt i Aspentunneln. Arbetsgrupperna fullständiga rapporter finns i Bilagorna 1-4.

Sammanfattning och analys av studien redovisas i avsnitt 7.

Använda litteraturreferenser och källor anges i avsnitt 8.

3 Internationell utblick över trafiktunnlar och underhåll

I en tidigare rapport i denna serie [Lindblom, 2012] redovisades resultaten av en enklare litteratursökning gällande internationella tillämpningar på underhåll av trafiktunnlar.

I detta avsnitt sammanfattas resultaten av en ny och fördjupad genomsökning av den internationella litteraturen på området, där nya sökmetoder använts. Hela litteraturstudien återfinns som Bilaga 5 i rapporten.

3.1 Norden (utanför Sverige)

De nordiska länderna har ett etablerat samarbete inom vägområdet, kallat NVF, Nordiskt vägtekniskt forum. Inom NVF finns det så kallade Tunnelutskottet som är organiserat i tre arbetsgrupper, varav en grupp som behandlar drift och underhåll av vägtunnlar. Vid arbetsgruppens möte i september 2014 presenterades 6 uppsatser på detta tema [NVF, 2014].

Inom järnvägsområdet är de nordiska länderna medlemmar i UIC, se avsnitt 3.2 nedan. Nedan följer korta presentationer av tunnelunderhållet i de nordiska länderna.

3.1.1 Finland

Järnvägstunnlar

I Finland finns totalt 42 järnvägstunnlar med en sammanlagd längd av 39 km [Cronvall, 2014]. Dessutom finns i Helsingfors tunnelbanelinjer i berg på totalt 35 km. Samtliga är utsprängda i hårt berg och är injekterade med cementbruk samt är förstärkta med bult och sprutbetong. 19 av järnvägstunnlarna är försedda med frostisolering med PE-skivor. Det finska banverket försöker hålla ett register över de inspektioner som gjorts i tunnlar, men det finns svårigheter att hålla registret konsistent och komplett. Man har ambitionen att sprida inspektionerna på flera personer. Det finns tre graderingar av tunnelinspektioner i Finland: 1) Normala "promenad"-inspektioner fyra gånger per år, 2) En årlig, mer noggrann besiktning av en berg-sakkunnig person som också utför bomknackning, samt 3) En detaljerad huvudinspektion vart 7:e år utförd av ett antal experter försedda med geofysiska instrument som GPR, AI (akustisk impaktteknik) och laser. Besiktningarna 1) och 2) ingår i underhållskontraktet. Själva underhållsarbetet innehåller vanligen momenten nedknackning och ersättning av lös sprutbetong, lokal reparation av tunnelinklädnad, isborttagning samt åtgärder för av vattenkontroll, inklusive spolning av dräner.

Finland är ett föregångsland när det gäller tillämpning av icke-förstörande geofysiska metoder för tunnelinspektion [SP2, 2104]. Man har utvecklat ett fordonsmonterat mätsystem för laserskanning och termografi samt har testat markradarsystem (GPR) i tunnlar, se vidare avsnitt 4.1.4 nedan.

Den finländska järnvägsmyndigheten publicerar en årlig rapport över tillståndet i tunnlar samt en rekommendation för nödvändigt underhåll. Under 2014 publicerades en manual för tunnelinspektion i Finland.

Vägtunnlar

Finland har ca 10 motorvägstunnlar och ett okänt antal andra vägtunnlar. Inget är publicerat (på svenska eller engelska) om underhållet av dessa tunnlar.

3.1.2 Norge

Järnvägstunnlar

I Norge finns drygt 700 järnvägstunnlar. Den längsta, Romeriksporten är 14,5 km lång. Omkring 50 av järnvägstunnlarna är mer än 1 km långa. I Oslo finns också 7 km tunnelbanetunnlar. Inget är publicerat om underhållsaktiviteter i dessa tunnlar. Norge är inte med i den europeiska järnvägsunionen UIC, se nedan.

Vägtunnlar

I Norge finns över 1000 vägtunnlar, av vilka ca hälften är mer än 500 m långa [NVF, 2014]. I många av dessa tunnlar är underhållet eftersatt. Det norska vägverket bedömer att det skulle kosta mellan 14 och 22 miljarder kronor att återställa tunnlar till fullgott skick.

På senare tid har ett antal incidenter inträffat i norska vägtunnlar. År 2003 inträffade ett ras i Dröbacktunneln under Oslofjorden, tre år efter det att tunneln stod klar. Lyckosamt nog skedde raset nattetid, när tunneln saknade trafik. Vid den efterföljande besiktningen av berget bakom inklädnaden upptäcktes flera partier där berg fallit ut och låg på inklädnadsvalvet. Efter åtgärder fick tunneln snart på nytt stängas för reparationsarbeten [Thoresen S, 2003, personlig kontakt].

Vid utbyggnaden av E18 i Vestfold inträffade 2006 ett ras i Hanekleivatunneln, då ca 25 m³ berg gick igenom inklädnaden och hamnade på vägbanan. Inte heller här var det trafik i tunneln vid tillfället. Ytterligare 8 omgivande tunnlar måste renoveras på grund av ras bakom inklädnaderna.

Dessa incidenter ledde till det norska vägverket tillsatte en utredning med uppgift att klarlägga orsakerna till rasen och hur man skulle förbättra säkerheten i tunnlar [Statens Vegvesen, m.fl.,2007].

3.2 Europa utanför Norden

I kontinentala Europa har man ofta sämre berg än i de nordiska länderna och därmed tillämpas en mer systematisk bergförstärkningsfilosofi. Det är där vanligt med helt betonginjutna ("linade") tunnlar som inte kräver lika mycket kontroll och underhåll som tunnlar där berget är bärande huvudsystem.

Järnvägsbolagen inom EU har ett samarbete om skötsel av järnvägsnäten, kallat UIC. Inom ramen för detta samarbete diskuteras även gemensamma frågor som rör tunnlar och tunnelunderhåll. Även om tunnlar i de europeiska länderna skiljer sig åt när det gäller utförande och ålder, har länderna en del gemensamt när det gäller inspektion och underhåll. Gemensamt är, att alla länder utför inspektioner som en bas för beslut om underhåll av tunnlar, även om metoderna och frekvensen skiljer sig åt. Det finns ett gemensamt intresse av att öka säkerheten i inspektioner av tunnlar, trots att den tillgängliga tiden ofta är kort, liksom av att snabbt reparera upptäckta fel. Det som framförallt skiljer de olika länderna åt, är hur felaktigheter i tunnlar – som sprickor i väggar och tak, områden med defekt sprutbetong eller lining, vatteninläckning och is - värderas och hur dessa defekter rapporteras och slutligen åtgärdas.

Förutom relativt frekventa översiktliga besiktningar, som sker genom att man vandrar igenom tunneln och visuellt granskar den, utför de europeiska järnvägsbolagen detaljerad inspektion av sina tunnlar vart 5-8:e år. Det har blivit alltmer vanligt att någon form av skanningsteknik utnyttjas vid de detaljerade besiktningarna. På de skanningsritningar som görs kan inspektören kontrollera kritiska områden i tunneln och där kan noteras de förändringar som sker över tid. På ritningarna kan även utförda förstärkningsåtgärder läggas in. Övriga sätt att kontrollera järnvägstunnlar skiljer sig mycket åt mellan länderna.

Det inte möjligt att här ge en helt uttömmande bild av hur tunnelunderhållet i medlemsländerna i UIC är organiserat, läsaren hänvisas till de källor som använts [UIC, 2012]. En något mer detaljerad redogörelse gavs ovan av situationen i två av våra grannländer, Finland och Norge, som har liknande geologiska förhållanden som Sverige.

Inom European Road Federation ERF har medlemsländerna ett gemensamt forum för vägfrågor. Underhåll av vägtunnlar verkar dock inte vara ett tema som tas upp i ERF.

3.3 Övriga världen (utanför Europa)

3.3.1 USA

I USA finns en federalt gällande manual för hur spår- och vägtunnlar skall inspekteras och underhållas [Federal Highway Administration, 2005]. Efterlevnaden av denna verkar variera i landet. Efter en svår olycka i Boston med ett nedfallande takelement som dödade en bilist, ställde delstaten Massachusetts krav på regelbunden inspektion av trafiktunnlar. Kravet har fått efterföljd i flera delstater. Ett exempel på ett ambitiöst inspektions- och underhållsprogram i en annan delstat beskrivs i [Jafari M et al, 2010].

I USA har nyligen genomförts en mycket ambitiös och omfattande studie [TRB, 2012] av icke-förstörande instrument som kan användas för att avgöra tunnlar tekniska status och för att bedöma risken för nedfall av berg och inklädnader, se vidare avsnitt 4.1

3.3.2 Japan

I Japan finns ett stort behov av kontroll och underhåll av landets trafiktunnlar då ett mycket stort antal trafikanter utnyttjar dessa tunnlar. För att kartlägga tunnelskador och inverkan på trafikantsäkerheten har flera vetenskapliga analyser av problemet genomförts i landet. Resultaten av dessa studier är veterligen inte publicerade internationellt.

Trots de mycket varierande bergförhållandena i landet, med bra och dåligt berg, är praktiskt taget alla japanska vägtunnlar inklädda med betongelement. Endast ett fåtal tunnlar är försedda med sprutbetong.

Det rapporteras, att skador förekommer i 90 % av alla tunnlar i Japan, vanligen betongskador (28 %) och sprickor eller fogskador i tunnelementen. Sprutbetong anges som en vanlig reparationsmetod. En annan, frekvent skadeform är problem orsakade av vattenläckage, vilket förekommer i 60 % av tunnarna. Bultsättning används primärt för att kontrollera berg- och jordtryck runt betongliningen, inte som del av det bärande huvudsystemet.

Järnvägstunnlar

I Japan finns över 4700 järnvägstunnlar med en sammanlagd längd av ca 3000 km och miljontals passagerare reser varje år genom dessa tunnlar. I landet inträffade på senare år ett antal olyckor med nedfallande betonginklädning, bland annat ett taknedfall mot höghastighetståget Shinkansen [Asakura et al, 2010]. Även om inga personskador inträffade vid denna incident, ledde detta till en svår förtroendekris för transportsystemets säkerhet och robusthet. Efterföljande analyser och tester påvisade att brottet kunder härledas till utmattningsfenomen orsakade av många tågpassager.

Vägtunnlar

I Japan fanns år 1990 fler än 6700 vägtunnlar. Av dessa var 70 % yngre än 30 år.

År 2012 inträffade en mycket svår olycka i Sasago-tunneln ca 10 mil väster om Tokyo. [Nexco, 2012]. På en sträcka av 130 m föll 90 mm tjocka paneler av betong ner från taket och krossade tre förbipasserande bilar, varvid 9 personer förolyckades. Tunneln hade då varit i drift i 34 år.

3.3.3 Övriga länder

Den internationella, engelskspråkiga litteraturen innehåller mycket få artiklar som berör underhåll av trafiktunnlar i berg i länder utanför USA och Japan. En artikel [Pandey et al, 2013] som beskriver underhåll av en järnvägstunnel i Indien skall återges här.

Indien

Indien har ett mycket stort och välfrekventerat järnvägssystem. På grund av störningskänsligheten och kostnaderna är underhållet generellt mycket eftersatt och förebyggande åtgärder utvecklas ständigt för att undvika akuta repa-

rationsbehov. Speciellt för tunnlar gäller, att krav ställs på att dessa inspekteras med bästa tillgängliga teknik, ibland med oförstörande metoder. Rengöring av tunnarna är prioriterad för att ge bra sikt och ventilation samt ge minskad brandrisk, samtidigt som livslängden för materialen i tunneln ökar. Rengöringen utförs vanligen manuellt från en hydraulisk plattform, men speciella rengöringsfordon med robotarm och högtryck har börjat utvecklas i Indien. Troligen har flertalet indiska tunnlar någon form av inklädnadssystem. Den vanligaste reparationsmetoden verkar vara att gjuta igen skadorna med bruk av polyesterbaserat bindemedel eller att göra påslag med snabbhärdande sprutbetong. För att kontrollera vatteninläckning till tunnarna injekteras omgivande bergsprickor med cementbruk.

3.4 Sammanfattning

Trots att förekomsten av trafiktunnlar är mycket omfattande runt om i världen, är den publicerade litteraturen om hur tunnlar underhålls relativt sparsam. Orsakerna till detta kan vara flera, några är:

- Det är inte brukligt, och kanske oacceptabelt, att externt publicera planeringsstrategier för nationella anläggningar
- Det finns inget akademiskt forskningsintresse i en publicering och det saknas en "arena" för debatt och erfarenhetsutbyte
- Rapporter skrivs på det lokala språket, översättning till engelska känns överflödigt; materialet förblir internt

Ett observandum är: Några länder med omfattande innehav av trafiktunnlar, som Taiwan, Korea och Indien och flera andra, redovisar inte material som skulle varit av intresse för denna rapport - av ovanstående anledningar. I andra länder, som europeiska och nordamerikanska, är erfarenhetsutbyte organiserat i nationella organisationer, där planering, organisation och utförande av tunnelhåll debatteras och rapporteras offentligt. Det är främst sådant material som litteraturstudien kunnat hitta och rapportera om.

Tyvärr kan vi därför inte hävda att rapporten fullt ut totalt speglar det internationella läget avseende underhåll av trafiktunnlar.

4 Tunnelinspektion och mätmetoder

4.1 Bakgrund

Behovet av att inspektera bergtunnlar och bergrum är i dag stort. I många trafiktunnlar, speciellt tågtunnlar, har kapacitetstaket redan nåtts, vilket gör tiden för förplanerade inspektioner i förebyggande syfte mycket knapp. Behovet av instrument för att snabba upp och underlätta vid inspektion är därför stort.

Periodisk kontroll av tunnlar tillstånd och de nedbrytningsmekanismer som pågår i en tunnel är den metod som finns för att skydda trafikanterna mot olyckor av nedfallande berg och tunnelinklädnad. Kontrollerna ger också ett viktigt underlag för planering av löpande underhållsinsatser i tunneln.

Den aggressiva miljö som en tunnel befinner sig i, samt det faktum att trafiken endast kan stoppas under mycket begränsade tidsintervall, gör besiktningen till en verklig utmaning.

Inspektion av tunnlar sker idag ofta med hjälp av bomknackning och okulär besiktning av de synliga delarna. Detta arbete är tidskrävande vilket ofta är problematiskt i tunnlar med trafik då hela eller delar av tunneln måste stängas av medan arbetet fortgår. För att ge bättre täckning i tunneln samt ökad hastighet vid inspektionen presenteras i rapporten ett antal tekniska instrument. De som anses ha störst potential vid tunnelinspektioner är instrument för avståndsmätning (laser, IR-ljus), termografiska instrument samt georadar.

Denna utredning avser inspektion och underhåll av bergtunnlar, antingen sådana där berget självt är bärande huvudsystem eller där berg och förstärkning tillsammans är bärande, och hur förbättringar kan göras i metoder och utrustning.

Detta avsnitt sammanfattar resultatet av FoU-arbetet i projektet. Inom området instrument och mätmetoder. Arbetsgruppens fullständiga rapporter redovisas i Bilagorna 1 och 2.

4.2 Dagens praxis för tunnelinspektion

4.2.1 Sverige

Trafikverket TRV och Stockholms lokaltrafik SLL är de stora tunnelägarna i Sverige och betjänar tiotusentals trafikanter varje dag. Dessa organisationers policy är att trafiktunnlar skall inspekteras regelbundet och systematiskt. Inspektionerna skall klargöra tunnelarnas fysiska och funktionella tillstånd och hur detta har utvecklats över tid. De framkomna uppgifterna om tunnelarnas tillstånd skall säkerställa trafikanternas krav på säkerhet och framkomlighet och samtidigt ge en bas för styrning och uppföljning av underhållsarbetena.

Inspektionerna utförs som regel av fristående besiktningsmän utsedda av TRV respektive SLL.

Deras kompetens och de inspektionsmetoder som används är godkända av tunnelägarna.

Inspektionstyper som i dag är praxis är: Fortlöpande inspektion, huvudinspektion samt särskild inspektion [Bergab, 2005].

Syftet med fortlöpande inspektion är att upptäcka akuta skador som kan påverka trafikantsäkerheten och tunnelns bestånd på kort sikt. Vid besiktningen, som sker från tunnelgolvet vid en "promenad" genom tunneln, kontrolleras berg- eller betongnedfall samt vatteninläckning och isbildning. Ofta är det underhållsentreprenören som utför dessa inspektioner som en del av sitt kontrakt med tunnelägaren.

Vid huvudinspektionen, som görs med maximalt 6 års intervall, är syftet att upptäcka och bedöma brister som kan påverka tunnelns funktion och trafikantsäkerheten inom en tioårsperiod. De konstruktions-element som inspekteras är, förutom berget, sprutbetong, bultar, dräner samt -i förekommande fall - betongvalv och bottenplatta. Skadetyper av intresse är utfall (av berg och/eller sprutbetong), dålig förstärkningsfunktion (bom sprutbetong), deformation/sprickbildning, igensättning av dräner samt kemisk förändring (i bruk/betong). På handnära avstånd granskas sprickförändringar i och vidhäftning av sprutbetong, korrosion på bultar och armering samt kemisk status (kloridhalt och karbonatisering) hos betong. Arbetet är kvalitativt krävande, och besiktningsmannen skall vara högskoleutbildad med minst 5 års erfarenhet av underjordsarbeten samt vara utbildad på de metoder och eventuella instrument som används vid besiktningen.

Vid särskild inspektion granskas status på tidigare dokumenterade skador på konstruktions-element i tunneln.

I Stockholms tunnelbanesystem pågår ett löpande underhållsarbete enligt ett fastlagt schema. Detta omfattar arbeten på det bärande bergsystemet (där ingår förstärkningarna) och systemet för vattenkontroll och utförs av 4 man varje natt mot vardag under ca 3-4 timmar. I samband med besiktningarna utförs viss bergskrotning och mindre punktinsatser på förstärknings- och tätningssystemen. En specialbyggd, rälsbunden arbetsvagn ("Foran") används vid arbetena [Skoglund, 2012].

4.2.2 Andra länder

I alla länder med bergtunnlar, där berget självt används som konstruktionsmaterial (bärande huvudsystem), har man utvecklat egna system för övervakning av status hos tunnlar och metoder för underhåll. Nedan används Norge som ett exempel.

I rapporten *Tunnelsikkerhet* [Statens Vegvesen, 2007] sägs inledningsvis, i paritet med den svenska situationen:

"En målsetting for drift og vedlikehold er å sørge for at det sikkerhetsnivået som er bygget in i tunnelen opprettholdes ved at forutsatt funksjonskrav oppfylles og at funksjonssikkerhet ivaretas"

I Norge avslutar man ett tunnelbyggnadsprojekt med en slutrapport, innehållande dokumentation om bergförhållandena längs tunneln (relationsritningar m.m.) och instruktioner för hur tunneln skall inspekteras och underhållas i driftsfasen. Tunnelägaren, oftast Statens Vegvesen, upprättar ett kontrakt för sådana arbeten med krav på hur dessa skall utföras. I rapporten *Tunnelsikkerhet* påpekas särskilt, att nödvändiga medel måste avsättas för dessa arbeten för att man skall kunna upprätthålla säkerheten.

I Norge utvärderas tillståndet hos en tunnel på tre nivåer,

- Normal inspektion/besiktning (översiktlig visuell, först efter 1 år, sedan vart 3-5:e år)
- Särskild besiktning (beställs om den normala inspektionen visar "problem", görs av specialist)
- Huvudbesiktning (grundlig genomgång vart 5:e år, görs av specialist)

Samtliga inspektioner utgår från slutdokumenteringen i rapporten från tunnelbygget, kompletterad med tidigare inspektionsresultat. Statens Vegvesen arbetar på att ta fram ett standardiserat, systematiskt upplägg av erfarenhetsåterföringen från inspektionsresultat från trafiktunnlar.

Följande gäller för organisationen av tunnelinspektioner i Norge:

- Normala inspektioner och huvudbesiktningar görs som en del av funktionskontraktet eller som särskild beställning med fastställda intervall och tunnelavsnitt
- Särskilda besiktningar görs av oberoende personal med bergteknisk kompetens
- Kompetenskraven skall framgå av underhållsmanualen för tunneln

Det finns i Norge förslag på att utveckla system för elektronisk inspektion av tunnelkonstruktionens tillstånd. Ett annat föreslaget projekt är system för erfarenhetsöverföring från driftsfasen i tunnlar till kommande tunnelprojekt.

4.3 Dokumentation och erfarenhetsöverföring

Vid svenska tunnelinspektioner läggs ett mycket stort ansvar på den anlitate besiktningsmannen att göra rätt bedömningar och att han inte går förbi något "fel" i tunneln som längre fram kan visa sig bli förödande. Som en utgångspunkt måste han därför vara väl förtrogen med tunnelns historik, såväl från byggtiden som från tidigare besiktningar och med utförda underhållsåtgärder. En ny besiktning måste bygga på insamlad erfarenhet från byggtiden och från tidigare besiktningar. En jämförelse gör det möjligt att konstatera förändringar i tunnelns status som kan kräva underhållsinsatser.

En mängd instrument finns som kan nyttjas vid inspektioner av tunnlar. I denna rapport kommer dock endast ett fåtal av dessa instrument behandlas, huvudfokus ligger på instrument som skulle kunna nyttjas i förebyggande syfte för att i tid upptäcka var nedfall av block eller sprutbetong kan ske. De instrument som ingår är de som i dagsläget anses ha störst potential gällande snabba tunnelinspektioner (tillgänglighet, prisbild, hastighet).

Modern IT-teknik gör det möjligt att på ett överskådligt sätt visualisera ny data och göra jämförelser med tidigare data. En modell av tunneln uppbyggd på relationshandlingar kan exempelvis läggas upp i en fältdator och göras "bläddringsbar" mellan lagom långa sektioner. På sektionerna läggs, förutom längdmätning, plan, profil och tvärsektion, resultaten av geologiska kartering under byggtiden samt information om utförda förstärkningar och tätningar i tunneln. Relationsritningssektionerna bör även kompletteras med skisser på de underhålls- och reparationsarbeten som utförts under driftstiden i tunneln¹. Detta är tunnelns basdata, som inspektören utgår ifrån vid varje besiktning.

Som visas i följande avsnitt utvecklas ständigt nya metoder för snabb och icke-förstörande undersökning av en tunnelns status. Det är möjligt idag att med befintliga datormjukvaror lägga information från geofysiska mätningar från inspektioner som ett "lager" ovan på 2D-ritningarna med basdata. Man kan också jämföra en aktuell uppmätning med en tidigare och markera förändringar i resultaten. Med andra ord, inspektören har idag på ett helt annat sätt än tidigare möjlighet att upptäcka "fel" i tunneln och att föreslå noggrannare besiktning och eventuella underhållsåtgärder.

Äldre trafiktunnlar saknar dessvärre ofta relationsritningar med dokumentation från byggtiden. Om berget dessutom är dolt av sprutbetong blir inspektörens möjlighet att bedöma bergförhållandena begränsad. Någon form av geofysisk instrumentering, exempelvis GPR (se nedan) borde finnas till hands för inspektören i sådana fall. I annat fall är han hänvisad till att okulärt bedöma statusen på installerade konstruktionsdelar, vilket i värsta kan leda till fel slutsatser.

Sammanfattningsvis kan sägas att dagen praxis för tunnelinspektion lägger ett mycket stort ansvar på besiktningsmannen. Det är då viktigt att ge denne tillgång till de möjligheter att "läsa berget" som modern geofysisk mätteknik möjliggör. Med relativt enkla, handhållna fältutrustningar som "på plats" levererar resultat, skulle precisionen i bedömningen av tunnelns status och underhållsbehov kunna ökas väsentligt. Modern IT-teknik ger en unik möjlighet till överblick av en tunnels status och förenklar jämförelser med tidigare bedömningar.

¹ Även föreslagna, men ännu inte utförda åtgärder bör markeras på ritningarna, med angivande av inspektionstillfället då förslaget gjordes

I avsnitt 4.4 görs en genomgång av de instrument som idag används för trafiktunnlar. I avsnitt 4.5 följer en närmare beskrivning och utvärdering av de metoder som arbetsgruppen 1 ansåg vara mest aktuella för en svensk tillämpning vid snabb inspektion av trafiktunnlar.

4.4 Instrument för inspektion av bergtunnlar

4.4.1 Översikt över icke-förstörande metoder

Förutom bomknackningsaggregat finns en mängd så kallade icke-förstörande instrument (NDT-instrument) i dag på marknaden som kan nyttjas vid inspektioner av tunnlar. I denna rapport kommer dock endast ett fåtal av dessa instrument behandlas. Huvudfokus ligger på instrument som snabbt skulle kunna nyttjas i förebyggande syfte för att i tid upptäcka nedgradering av förstärkningar och var nedfall av block eller sprutbetong kan ske. De instrument som ingår i studien är sådana, som i dagsläget anses ha störst potential gällande snabba tunnelinspektioner (tillgänglighet, prisbild, hastighet).

En mycket noggrann utvärdering av NDT-instrument för kontroll av tunnlar utfördes nyligen i USA [TRB, 2012] och finns redovisad i litteraturgenomgången i Bilaga 5. Instrumenten ger i första hand information om inbäddade felaktigheter och vidhäftningsproblem i gjuten betonginklädnad som i sprutbetong men ger även data om bakomliggande berg. De mest användbara instrumenten konstaterades i den amerikanska utvärderingen vara:

- Luftkopplad GPR
- Termografi
- Laserskanning
- Markkopplad GPR
- Akustiska metoder

De tre första nämnda instrumenten används för en första översikt över var problemen kan finnas i tunneln och mäter inte djup till anomalierna eller dessas typ. De två nedersta instrumenten kan vid en efterföljande mätning kvantifiera djupläge och vilken typ av anomali det handlar om, såsom porer, fukt, materialskiktningar och vidhäftningsbrott.

4.4.2 GPR – georadar

Likt en vanlig radar som använder radiovågor vilka studsar mot föremål använder sig en georadar av elektromagnetiska vågor med olika frekvens vilka studsar mot lager med olika egenskaper i underlaget. Reflektionen registreras i en mottagarantenn och omvandlas till ett radargram, en bild som visar tiden mellan att signalen sändes ut och till dess den återkom. Med hjälp av detta kan ett avstånd mellan instrument och lager räknas fram. Träffar signalen på ett mycket ledande lager, exempelvis vatten eller armering, induceras signalen och reflektion uteblir, det är då inte möjligt att registrera någonting djupare än detta lager. Detta instrument används idag exempelvis för att finna ledningar under asfalterade ytor med mera.

Antennerna som används för att sända och ta emot signalen finns för olika frekvenser. En högfrekvent signal (vanligtvis 2 – 4 GHz) har låg genomträngningsförmåga men ger en hög upplösning. En lägre frekvens, ned till 10 MHz, når djupare men med sämre upplösning. Antennerna delas även in i två olika kategorier, luft-kopplad (air coupled) och mark-kopplad (ground coupled).

Mark-kopplade antenner måste vara i nära kontakt med underlaget för att ge ett gott resultat. Beroende av vilket djup som skall undersökas kan lämplig antenn väljas, för mark-kopplad GPR används relativt höga till mycket låga frekvenser. Antennerna ökar dock i omfång med lägre frekvens, en så hög frekvens som möjligt är därför önskvärt både på grund av upplösningen men även på grund av antenntorlek.

De luft-kopplade antennerna monteras ofta på ett fordon och kan nyttjas vid relativt hög hastighet. Avståndet mellan antenn och underlag kan variera. Maximalt avstånd ligger i dagsläget kring 0.9 m. Frekvensen som används är hög vilket ger en låg genomträngningsförmåga. Exakt djup till ett reflekterande lager fås inte med luft-kopplade antenner, metoden indikerar var mer djupgående undersökningar bör göras.

Länk:

(<http://www.malags.com/resources/white-papers>)

Figurerna nedan visar exempel på de två typerna av GPR-undersökningar.



System med luftkopplad antenn



System med markkopplad antenn

4.4.3 Termografi - värmekamera

Allmänt

Den infraröda strålningen är den lågfrekventa del av det elektromagnetiska spektrum som vi upplever som värme. Termografi, även kallad värmefotografering, är en metod där man omvandlar ett objekts infraröda (IR) strålning till en synlig värmebild. Man använder då en värmekamera som kan synliggöra infrarött ljus och mäta den infraröda strålning som objektet avger med hög precision, beröringsfritt. IR-ljus är inte synligt eftersom våglängden är för lång för att kunna upptäckas med det mänskliga ögat. Till skillnad från vanligt ljus avger allting som är varmare än absoluta nollpunkten värme i infrarött ljus. Ju högre objektets temperatur är, desto mer IR-strålning avges. Även mycket kalla objekt, som isbitar, avger infraröd energi.

Med hjälp av termografiska instrument kan en avläsning av infraröd utstrålning från ett objekt göras. Detta medför att objektets temperatur kan räknas fram utan att objektet behöver vidröras. Dessa instrument finns i olika utförande för olika ändamål. Ett enklare instrument, en så kallad "IR-termometer", läser av den infraröda strålningen i en punkt vilket är användbart exempelvis för att finna dåligt isolerade områden i ett hus eller dylikt. Mer avancerade instrument läser av strålningen i flera punkter samtidigt och kan presentera detta som en bild där olika temperaturer fått olika färger. Känsligheten hos dessa instrument ligger i dagsläget på mindre än $0,02^{\circ}$ C med en noggrannhet omkring $\pm 1^{\circ}$ C. Utvecklingen av dessa "värmekameror" går mot högre upplösning och större temperaturkänslighet.

Termografi har en mycket stor industriell användning. Ett exempel är bygginspektion där man vill få en bild över temperaturfördelningen inom huskroppar.

Termografi kan få en viktig tillämpning vid inspektion av tunnlar. En homogen bergmassa utan "störning" av en tunnel eller av cirkulerande vatten e.d. håller en konstant temperatur. Efter uttaget av en tunnel kan väggar och tak granskas med en värmekamera vid en inspektion och temperaturbilden kan jämföras med den från tidigare tillfällen. Noterade anomalier kan vara tecken på ökat vattenflöde i sprickor och andra underhållskrävande problem. Efter identifiering kan sådana ytor sedan undersökas med djupregistrerande instrument. I Finland har en multirigg med en kombination av värmekamera, laserscanner och luftkopplad GPR använts för inspektion av tunnlar med gott resultat [TRB, 2012].

Mycket lättanvända och pålitliga värmekameror finns idag att köpa på marknaden och bör kunna bli ett bra komplement till inspektörens utrustning. Nedan beskrivs ett par sådana närmare.

FLIR E6 termografisystem



Denna handhållna enhet har förutom värmekameran en inbyggd digitalkamera med hög upplösning. Noggrannheten i temperaturangivelse är <math><0,06\text{ C}</math>.

Värmekamera ansluten till mobiltelefon

Denna handhållna enhet ansluts till en vanlig mobiltelefon. Manövrering, registrering m.m. sker via en ap



4.4.4 Laser

Allmänt

Laserinstrument används idag för att skapa en digital, tredimensionell avbildning av allt ifrån byggnader, broar och tunnlar till små konstföremål, fossil etc. Beroende av vad det är som skall avbildas nyttjas olika instrument med olika noggrannhet. Gemensamt för dem är att de sänder ut en eller flera laserstrålar som med hjälp av omriktare, exempelvis speglar, skickas vidare mot sina mål. När strålen träffar en yta studsar den tillbaka till en mottagare på instrumentet som fångar upp signalen.

Många nya laserbaserade system för 3D-avkänning och registrering av komplexa topografier har lanserats på senare år. Som exempel kan nämnas att topografiska kartor av hela Sveriges landområde för närvarande framställs genom flygburen laserutrustning.

Topografien av en invändig yta i en tunnel är också komplex men i annan skala. Om man vid inspektioner kunde registrera denna yta och jämföra resultatet från tidigare inspektioner, skulle man få en möjlighet att konstatera om

rörelser och förändringar inträffat i tunnelväggen eller tunneltaket. Sådana rörelser kan vara förvarningar om pågående instabilitet hos tunneln.

Att kunna avgöra rörelser i väggarna av en tunnel kräver en mycket hög noggrannhet hos instrumentet, av storleksordningen 1 mm eller mindre. Eftersom avståndet mellan instrument och skannad bergyta är relativt litet i en tunnel, mellan 5-10 m, underlättas en hög noggrannhet. I dagsläget är inte noggrannheten hos befintliga lasersystem tillräckligt hög för att användas för inspektion av tunnelväggar.

Ett fast laserinstrument behöver riktmärken för att det skall vara möjligt att senare foga samman flera mätningar till en fullständig tredimensionell modell. Med "fast" menas i detta sammanhang ett instrument som inte rör sig under tiden datainsamlingen sker, men som därefter kan förflyttas för att göra nästa mätning. Dessa riktmärken ges koordinater och kan bestå av tavlor eller sfärer som placeras väl synligt.

Ett rörligt instrument samlar in data under tiden som instrumentet förflyttas. Dessa instrument kan monteras på bilar (eller andra fordon) som kan förflytta sig med hastigheter upp mot 40 Km/h och kan på så sätt skanna stora områden på kort tid. Noggrannheten vid avståndsbedömning hos dessa instrument är dock inte tillräcklig (i dagsläget cirka 5 cm) för att användas vid tunnelinspektioner i förebyggande syfte. En typ av rörligt instrument med en högre noggrannhet finns idag, se ZEB1 nedan. Detta instrument håller användaren i själv samtidigt som denne rör sig i gånghastighet. Utvecklingen går fort och hastigheten med vilken instrumentet kan förflyttas och noggrannheten i avståndsbedömningen ökar kontinuerligt. Det finns även handhållna mobila instrument som inte kräver ett fordon.

Två typer av laserteknologi för att beräkna avståndet mellan instrument och objekt, triangulering och tidmätning, beskrivs närmare i Bilaga 2. Ett handhållet instrument ZEB1 beskrivs nedan.

Zeb1

Detta ytskanningssystem är handhållet och används ofta för dokumentation av geologiska strukturer [James & Quinton, 2013]. Man vandrar med instrumentet i registreringsläge och riktat mot den yta som skall skannas längs en bestämd "stig" och återkommer sen till utgångspunkten. Via en speciell mjukvara omvandlas registrerade data till ett "moln" av punkter med angivna koordinater och sedan till en graf över den skannade ytan. Punktkoordinaterna från mätningen kan sedan jämföras med motsvarande data vid en tidigare inspektion. Eventuella avvikelser kan då upptäckas och visualiseras grafiskt.

Systemet består av en navigationsenhet och en ögonsäker laser (som klarar 43 200 mätningar per sekund) monterade på ett bärhandtag. Innan mätning kalibreras systemet och sedan startas skannern. Vid vandringen förs instrumentet fram och tillbaka över ytan för att alla delar av den skall fångas i 3D-rummet. När vandringen genomgått ett slutet omlopp, är mätningen klar. Då uppladdas data automatiskt till en extern server som processar data och returnerar en "punkt-moln"-modell. Denna analyseras och görs åskådlig med befintlig mjukvara i en fäldator. Igenom jämförelse med tidigare skanningbild har inspektören en möjlighet att konstatera om "något hänt" med tunneln sedan den föregående inspektionen.



Figur. ZEB1- handhållet ytskanningsystem

4.4.5 Optiskt mätsystem – Mantis Vision

En typ av optiskt mätinstrument som projicerar 50 000 infraröda laserpunkter på ytan av objektet som skall läsas in. Varje enskild punkt är unikt utformad vilket gör det möjligt att skilja ut varje punkt i efterhand. När en laserpunkt träffar en yta kommer dess form ändras beroende av ytans vinkel gentemot sändaren. I instrumentets mottagardel sitter en videokamera med infrarödkänsliga objektiv som registrerar punkterna. Dessa behandlas sedan i medföljande mjukvara där varje punkts enskilda deformation omtolkas till ett avstånd. Med denna information kan sedan en tredimensionell modell skapas. Noggrannheten hos instrumentet ligger på cirka 0,1 % av avståndet, dvs. cirka 1 mm vid avståndet 1 m. Instrumentet är lätthanterligt och kan användas kontinuerligt i 10-metersstapper. Det klarar att läsa av ytor under relativt hög hastighet med bibehållen noggrannhet, i dagsläget 1 m/s. Instrumentet klarar avståndsbedömning vid 0,5 – 4 m med ett optimalt inläsningsavstånd på 2 m. Inga förberedelser behöver göras innan skanning av en ny yta, mjukvaran läser in flera skanningar och kan lägga ihop dem förutsatt att det finns cirka 1 m överlapp. Instrumentet kräver dock dagsljus för att ge ett bra resultat.

Länk:

Roe Peled, <http://www.mv4d.com/>



Figur. Mantis Vision

4.4.6 Schmidt-hammare (återstudshammare)

En återstudshammare, eller "Schmidt-hammare" efter uppfinnaren Ernst Schmidt, mäter hur kraftig återstudsens blir när en hammare anbringas mot ett material med en förutbestämd kraft. Hammaren består av en cylinder med en rörlig del som skjuts in i en fjäder när hammaren pressas mot materialet. När fjädern når en viss belastning frigörs en tyngd fästad vid fjädern som slår ned mot materialet som skall undersökas. På detta sätt blir kraften i slaget lika stor vid varje mätning. När tyngden slår mot materialet studsar den tillbaka och hastigheten med vilken den studsar tillbaka mäts och ger upphov till återstudsvärdet, R. Med hjälp av återstudsvärdet kan vissa antaganden om materialet göras. Exempelvis ger en hård, kristallin bergart, exempelvis granit, en kraftig återstuds medan en mjukare bergart, exempelvis kalksten, ger en mindre kraftig återstuds. Detta beror på att en större del av kraften tas upp av den mjuka bergarten istället för att som i graniten skickas tillbaka genom hammaren. Schmidt-hammare används inom betongindustrin för att avgöra hårdheten hos betong. En Schmidt-hammare avsedd för hårt berg nyttjar en kraftigare fjäder. En korrelation mellan återstudsvärdet, R-värdet, och bergartens enaxiella tryckhållfasthet har observerats, dock beror värdet även av andra faktorer så som sprickighet och ojämnheter i ytan. Försök att finna lösa och bomma block med Schmidt-hammare har gett tvetydiga resultat. Tolkningen av R-värdet behöver korreleras mot tester på den aktuella bergarten för att ge bättre tolkningsmöjligheter. För att minimera problem med ytvittrat berg rekommenderas att en serie om minst 10 försök görs på samma undersökningspunkt.

(<http://www.proceq.com/nondestructivetestequipment/rock-testing/rockschmidt.html>)

4.4.7 Akustiska metoder

Ultraljudstomografi och Ultraljudseko

Dessa mätningar görs för att kartlägga skador i tunnelväggen av typen sprickor och hålrum samt bristande vidhäftning mellan betong och berg. Djupgåendet är max ca 0,5 m. Utrustningen (tomografen) har känslkroppar (transducers) som hålls mot tunnelväggen eller –taket. Dessa sänder ut och tar emot skjuvspänningsvågor i betongen och

berget. Efter signalanalys produceras en 3D-bild av spänningsvågornas hastighet i volymen närmast tomografin, där olika färger representerar hastigheten. I denna bild framgår sprickor och hålrum med avvikande färg (lägre reflektivitet). Ur 3D-bilden kan "skäras ut" 2D-tvärsnitt, exempelvis vinkelrätt och parallellt med tunneln, som tydligare visar läge och omfattning av anomalierna.

Ultraljudstomografi har tidigare endast haft industriell och medicinsk användning men har på senare tid uppmärksamats som en kraftfull NDT-metod för tunnelinspektion. Det finns flera kommersiella utrustningar på mark-



naden.

En variant på metoden kallas "Ultrasonic Echo". Den arbetar enligt samma principer som ultraljudstomografin och med liknande utrustning. Båda metoderna har visat jämförbara resultat vid mätning i tunnlar [SHRP-2, 2024].

Akustisk emission (AE) och impakteko (IE)

Principen för akustisk emission (AE) och impakteko (IE) påminner om GPR. En akustisk våg skapas mot bergytan i stället för en elektromagnetisk. Vågen med akustisk energi reflekteras mot företeelser i berget med avvikande mekaniska egenskaper. De reflekterande vågorna fångas upp i känsliga mikrofoner, så kallade geofoner, och analyseras avseende läget i berget. AE-metoder har dock inte ansetts vara optimala för inspektion av underhåll av trafik-tunnlar, då utrustningen är relativt omfattande och tidskrävande att använda.

Impact Echo Testing Using Olson's NDE360



4.4.8 Multisystem

Vid tidspressade inspektioner kan det vara smart att låta flera instrument arbeta samtidigt och göra registreringen parallellt.

I Japan konstruerades vid början av 2000-talet en robot med 24 akustiska sensorer och 6 videokameror monterade på en halvcirkelformad stålram. Utrustningen är placerad på ett fordon som rör sig långsamt längs tunneln (ca 1m/min) och registrerar deformationer i tunnelns betonginklädnad [Yao et al, 2003].

Ett robotbaserat, spanskt inspektionssystem för betonginklädda trafiktunnlar beskrivs i [Victores et al., 2010]. Instrumenten är fästa vid en robotarm som kan manövreras till önskat läge vid tunnelväggen. Robotarmen är monterad på ett fordon med plattform som kan röra sig längs tunneln. Inspektören fjärravläser instrumenten och manövrerar roboten.

Ett multisensorsystem för tunnelinspektion, utvecklat för tunnelbanan i Paris, beskrivs i [Maurice, 2004]. Instrumenteringen och datorer är uppriggade på ett rälsburet fordon som går längs tunneln med en jämn hastighet av 2-5 km/tim.

4.4.9 Sammanställning av vad som kan inspekteras med NDT

Att inspektera	Inspektionsmetod	Instrument	Anmärkning
Topografi/rörelse i tunnelvägg/tak samt sprickmönster	Bildskanning	Digitalkamera 3D-scanningsteodolit	Kräver bildmönsterpassning (mosaik-teknik, stiching)
Sprickdjup i sprutbetong resp. betongliner	AE (ultrasonic) Impakt-eko	AE-utrustning Impakt-eko utrustn.	
Bergkvalitet (fria bergytor resp. berg bakom inklädnad)	GPR Termografi	Markradarutrustning Infraröd termograf	
Vidhäftning berg/betong	GPR Termografi Bomknackning	Markradarutrustning Infraröd termograf Mekaniserad Schmidt-hammarutrustning	Inkl. akustiskt analysystem
Tjocklek sprutbetong resp. betongliner	GPR Impakt-eko Termografi	Markradarutrustning Impakteko-utrustning	

4.5 Användbara instrument för tidseffektiv inspektion

4.5.1 Inledning

Samtliga nämnda NDT-instrument bör kunna användas vid snabba tunnelinspektioner. De har dock olika tekniska för- och nackdelar vilket gör dem mer eller mindre användbara beroende av tunnelns utformning, förstärkning etc. Nedan redovisas instrumenten och deras användbarhet vid snabba inspektioner av tunnlar med råa bergväggar och tunnlar med sprutbetong.

4.5.2 GPR - georadar

Georadar används idag i en mängd undersökande infrastruktur-projekt. Ofta handlar det dock om att undersöka nedåt, exempelvis under asfalterade ytor, bakom betong eller liknande. För att använda instrumentet i taket av en tunnel krävs att instrumentet monteras på ett fordon. Båda typer av antenner, luft-kopplade och mark-kopplade, går att använda i relativt hög hastighet utan att försämra upplösningen. I en bergtunnel med råa väggar är ojämnheter ofta stora och en markkopplad antenn kan därför vara svårt att framföra utan att avståndet mellan antenn

och bergvägg blir för stort. I en tunnel med betonginklädnad är det lättare att hålla avståndet konstant eftersom det liknar situationen när en undersökning görs på plan mark. Används en luftkopplad antenn inverkar inte avstånden mellan antenn och bergvägg lika mycket, vilket gör det lättare att göra en undersökning med hög hastighet. Oavsett antenntyp kan flera undersökningsprofiler göras längs tunnelns väggar och tak och kombineras. Behovet av noggrannhet i undersökningen styr hur många undersökningsprofiler som behöver göras. Vid undersökningar som gjorts i USA fann man att det med luft-kopplade antenner var möjligt att finna områden med håligheter eller fuktinträngning men att det behövdes ytterligare metoder, exempelvis mark-kopplade GPR-antenner, för att exakt avgöra djupet [SHRP 2 Renewal Project R06G, 2012]. Georadar kan även användas till att kartlägga läget av vittrade zoner eller porer och bergsprickor, alltså företeelser som är av intresse att kartlägga för planering av tunnelunderhållet. Eftersom vatten och metallarmering slår ut signalen bör man i förhand ha undersökt vilken armering som används i tunneln. Är tunneln förstärkt med stålfiberarmerad sprutbetong bör metoden inte användas.

4.5.3 Termografi

Värmekameror har idag en mycket hög känslighet vilket gör dem användbara för att upptäcka områden med mycket små temperaturdifferenser. Noggrannheten är i detta fall av mindre betydelse, den exakta temperaturen skiftar exempelvis beroende av årstid, det är framför allt skillnader i temperatur som undersöks. Det skulle exempelvis kunna röra sig om områden där vatten finns bakom sprutbetongen eller i en krosszon i berget. När vattnet når tunnelväggen eller sprutbetongen och dunstar ger det upphov till en minimal men mätbar temperaturdifferens, området där vatten finns ser i den termografiska bilden ut att vara kallare än omgivande berg. Tester har utförts där olika defekter gjutits in i betongblock vilka sedan undersökts med termografiska instrument [Haack et al., 1995]. Bland annat undersöktes den termografiska signaturen som tomma kaviteter, vattenfyllda kaviteter och sprickighet gav upphov till. Resultaten visade att infraröd termografi var användbart för att lokalisera sprickor med vatten förutsatt att det fanns en temperaturdifferens om 2° C mellan området där vatten fanns och omgivande material. Torra sprickor kunde ej lokaliseras. De termografiska instrumenten är idag betydligt känsligare vilket gör det troligt att även sprickor med mycket litet vatten och mindre temperaturdifferens kan lokaliseras. Metoden är snabb och stora ytor kan undersökas löpande utan avbrott. Ett handhållet instrument har dock nackdelen att operatören själv måste se till att samtliga delar av tunneln undersöks och dokumenteras. Instrumentet medger en bedömning på plats i tunneln var mer ingående undersökningar behöver göras. Utvecklingen av mindre och lättare instrument, i storleksordningen en mobiltelefon, underlättar för inspektören att alltid ha instrumentet med sig.

Termografiska instrument finns i flera olika utföranden och modeller finns som klarar tunnelmiljö utan problem.

4.5.4 Laser

Det tidsmätande laserinstrumentet används idag för att skapa relationshandlingar. Det går snabbt att skapa ett punktmoln med tillräcklig noggrannhet och utan alltför stora förberedelser, instrumentet är tekniskt mycket enkelt att använda. Koordinatsatta referenspunkter måste sättas upp för att flera skanningar skall gå att sammanfoga, dock behöver dessa referenspunkter inte knytas till ett officiellt koordinatsystem, det räcker att programvaran vet vilken referenspunkt som är vilken i varje skanning.

Instrumentet skulle teoretiskt kunna nyttjas för att se partier och områden i tunneln där berget eller sprutbetongen rör på sig. För detta krävs först att en referensmodell av tunneln upprättats, mot vilken alla andra skanningar jämförs. En sådan modell kan skapas med mycket hög noggrannhet med hjälp av tidsmätande laserinstrument i kombination med triangulerande sådana. En inspektion av tunneln kan senare göras med hjälp av inskanning av tunneln med laserinstrument. Denna skanning jämförs med referensmodellen och områden som skiljer sig åt mellan skanningarna kan undersökas noggrannare. Dock är noggrannheten vid en snabb inskanning av tunneln inte lika hög. För att upptäcka områden där lösa block eller sprutbetongen rört på sig men ännu inte fallit ut bör noggrannheten i inskanningen vara bättre än 1 mm. I dagsläget gör detta att användbarheten sjunker för snabba tunnelinspektioner. Dock kan det krävas större rörelser i berget innan utfall sker, dessa rörelser kan troligtvis fångas upp genom upprepade laserskanningar och jämförelse mellan punktmolnen. Ett triangulerande handhållet laserinstrument klarar

högre noggrannhet men att använda ett sådant minskar hastigheten vid inspektionen då instrumenten inte klarar hög hastighet och fler skanningar måste göras från mycket nära avstånd.

Andra problem vid laserskanning är exempelvis att den ojämna bergytan i en sprängd tunnel ger upphov till många kanter. Om laserstrålen träffar en sådan kant kan en del av strålen reflekteras medan den andra delen fortsätter. Om den senare träffar en ny yta och reflekteras kommer instrumentet motta två reflektioner med olika tidsintervall vilket ger upphov till brus. Med hjälp av filtrerande mjukvara kan detta brus minskas genom att exempelvis endast använda tidsvärdet från den första reflekterade ljusstrålen. Dock kan allt sådant brus inte reduceras och filtreras bort.

Instrumenten lämpar sig väl för arbete i tunnlar då de inte är beroende av externt ljus. Förhållandena i tunnlar är dessutom ofta stabila och förutsägbara och väder och vind har sällan någon inverkan.

Det mobila instrumentet, ZEB1, är lätt att använda och hantera, det kräver inga fasta uppställningar eller punkter för att fungera och själva datainsamlingen är snabb. Tester visar dock att det ofta blir en del brus som minskar noggrannheten vid mätningar [James & Quinton, 2013]. Detta går att minimera genom att planera hur undersökningen skall gå till och genom att ofta komma tillbaka till utgångspunkten. Reducering av brus kan även ske i ett senare skede vid bearbetning av punktmolnet. Instrumentet har en maximal räckvidd om 30 m vilket gör att det kan nyttjas i både stora tåg- och vägtunnlar och i mindre tunnlar, exempelvis ledningstunnlar. I dagsläget är instrumentets noggrannhet inte tillräcklig för att nyttjas i syfte att upptäcka block eller sprutbetong som rört sig och riskerar att falla ner om rörelsen är mindre än 1 mm. Flexibiliteten hos instrumentet gör det dock mycket intressant för att dokumentera områden med propagerande skador, exempelvis mindre utfall som sker i anslutning till en dålig zon. Jämförelse mellan inskanningar från flera olika tillfällen ger då en bild av hur pass snabbt förloppet är Även en specifik skada eller område kan lätt följas upp med ett mobilt bärbart instrument och fotografier. Som för de andra instrumenten är utvecklingen snabb och noggrannheten kommer troligtvis att öka. Insamlad data från undersökningen måste dock överföras till en tjänsteleverantörsserver för efter-bearbetning innan ett användbart punktmoln fås fram.

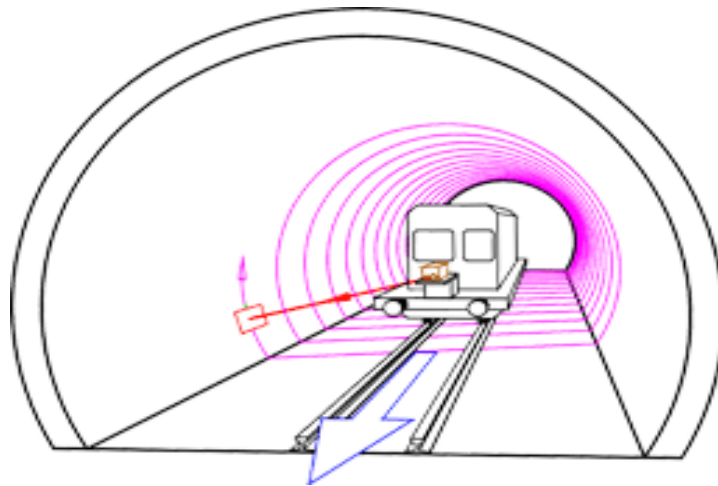
4.5.5 Mantis Vision

I kombination med tidsmätande laser skulle dessa instrument kunna vara ett alternativ till triangulerande laser. Noggrannheten är tillräcklig vid undersökning nära bergytan och hastigheten med vilken en skanning kan utföras är hög. Vid områden där tidigare inspektioner indikerat problem skulle detta instrument kunna nyttjas för detaljundersökningar. Nackdelarna är dock att det inte går att skanna stora ytor och att detta måste göras från nära avstånd.

Instrumenten är robusta och byggda för att kunna nyttjas i extrema miljöer och lämpar sig därför väl för tunnelbruk. De klarar i dagsläget en hög hastighet vid inskanning men noggrannheten behöver ökas.

4.5.6 Spacetec kombinationsinstrument

Spacetec GmbH har kombinerat tre olika instrument för att inspektera tunnlar. Deras instrument monteras på ett fordon som körs genom tunneln. Instrumentet sticker ut framför eller bakom fordonet. Det använder tre samtidiga datakanaler vilka ger en optisk bild (synligt ljus), en termografisk bild samt en tredimensionell modell av tunneln. Kanalerna kan visas var för sig eller sammanfogas till en bild av tunneln. En tidsmätande laser mäter av en linje, en sektion, vinkelrätt tunneln 300 gånger per sekund. När fordonet med instrumentet rör sig skapas på så sätt flera sektioner varje sekund som av mjukvaran bildar en tredimensionell modell av tunneln. Bilderna med synligt respektive infrarött ljus åskådliggörs tillsammans och gör det möjligt att särskilja mellan exempelvis vatten bakom sprutbetong och fukt från ett ventilationsrör eller liknande.



Instrumentet är byggt för montering på fordon, det är därmed inte bärbart och inspektören kan inte själv ha med sig instrumentet in i tunneln.

Länk:

<http://www.spacetec.de/e-spacetec-ts3.html>

4.5.7 Schmidt-hammare

Med hjälp av en Schmidt-hammare kan områden med bom sprutbetong eller dåligt berg lokaliseras genom att återstudsvärdet, R-värdet, är lågt där berget eller sprutbetongen är mjukare. Detta förutsätter dock att inspektören fysiskt har kontakt med de områden som skall studeras vilket betyder att inspektionen måste göras från nära avstånd. Inspektören måste även välja ut platser att testa. Metoden ter sig varken snabbare eller effektivare än inspektion med skrotspett och bomknackning - en erfaren inspektör kan snabbt avgöra huruvida sprutbetongen är bom eller ej utifrån ljudet. Schmidt-hammaren behöver även korreleras mot tester av samma bergart samt ett antal upprepade provningar för att ge ett medelvärde, detta betyder att undersökningen måste göras upprepade gånger på samma punkt vilket sänker hastigheten vid inspektionen.

4.5.8 Slutsatser och rekommendationer

Av de instrument som studerats är det framför allt laserinstrumenten och de termografiska instrumenten som för närvarande är mest intressanta vid tidspressade inspektioner av trafiktunnlar. Inget av instrumenten kan i dagsläget eliminera behovet av manuell bomknackning och okulär inspektion. Andra instrument, som GPR (luftantenn) och handhållen laser (typ Zeb 1) kan dock utgöra ett stöd för inspektören genom att ge indikationer på möjliga problemområden vid enklare, korta inspektioner. För de flesta instrumenten krävs endast en eller två personer. Detta gör det möjligt att utföra snabba inspektioner i tiden mellan huvudinspektioner som ändå ger en bra översyn av hela tunneln.

Utvecklingen av en Schmidt-hammare som kombinerar bomknackning med audio-analys verkar också lovande. Bomknackningsförfarandet sker med ett instrument där kraften är samma varje gång det anbringas och där ljudet som uppstår fångas upp och analyseras i realtid. En databas byggs upp med olika ljud som kan korreleras till olika typer av defekter, kaviteter och sprickfyllnader.

Samtliga av ovan nämnda instrument är användbara inom olika områden vid en tunnelinspektion. För en inspektion i en trafikunnel är dock tidsaspekten viktig. Instrument och metoder för snabba inspektioner bör således kunna samla in information om ytor, inte bara punkter i tunneln. Av de instrument som studerats är det framför allt laserinstrumenten, de termografiska instrumenten samt georadar som är de mest intressanta. Inget av instrumenten kan i dagsläget eliminera behovet av manuell bomknackning och okulär inspektion. Instrumenten kan dock utgöra

ett stöd för inspektören genom att ge indikationer på möjliga problemområden. Enklare, korta inspektioner kan även utföras oftare med hjälp av instrumenten. För de flesta instrumenten krävs endast en eller två personer. Detta gör det möjligt att utföra snabba inspektioner i tiden mellan huvudinspektioner som ändå ger en bra översyn av hela tunneln.

Slutsats

De instrument som anses ha störst potential vid snabba tunnelinspektioner är instrument för avståndsmätning (laser, IR-ljus), termografiska instrument samt georadar med luftkopplad antenn.

4.6 Behov av instrumentutveckling

För att den snabba laserskanningsmetoden skall kunna nyttjas fullt ut bör noggrannheten vid avståndsbedömningen vara bättre än 1 mm. För den triangulerande lasern gäller att avståndet med vilket man kan nyttja instrumentet ökas, för att vara riktigt användbart bör man kunna mäta in objekt på 8-10 m avstånd utan att förlora noggrannheten. Detsamma gäller Mantis Vision som i dagsläget klarar av en hög hastighet vid inskanning men där en högre noggrannhet behövs.

Georadar med antenner som inte behöver vara i direkt närhet av underlaget, så kallade luftkopplade antenner, är en metod med stor potential. Önskvärt vore utrustning som klarar ett större avstånd mellan antenn och vägg och som penetrerar djupare än dagens instrument. I tunnlar med lining ger instrument med markkopplade antenner bättre genomträngningsförmåga och högre upplösning.

De termografiska instrumentens noggrannhet är hög och de är relativt lätta att hantera. Önskvärt vore mindre och lättare instrument.

En önskvärd utveckling av Schmidt-hammaren är en variant som inte bara har elektronisk registrering av R-värdet, utan även har en funktion för att tolka ljudet när hammaren slår mot berget. Om en databas kan byggas upp med olika ljud skulle denna potentiellt kunna nyttjas för att avgöra om berget är bomt eller har hög sprickfrekvens.

De programvaror för inspektioner som finns idag har stor potential. Troligtvis är många av dem dock för komplexa för att kunna nyttjas fullt ut. För att de skall komma till användning vid planering, utförande och uppföljning av tunnelinspektioner måste de vara intuitiva och lättanvända. De bör även använda ett öppet system för databaser och dylikt samt vara tillgängliga för samtliga system på marknaden (Windows, Apple, Android). Önskvärt vore även ett modulbaserat system som kan byggas ut av användarna. På så sätt skulle systemet anpassas för olika typer av tunnlar (och andra inspektionsobjekt). Med hjälp av datainsamling från flera olika projekt och tunnlar skulle även en databas kunna byggas upp för att förenkla jämförelser mellan tunnlar och på så sätt statistiskt avgöra hur allvarlig en skada är. Detta i sin tur skulle ge ett bättre underlag för planering av framtida inspektioner.

4.7 Hantering av bakgrundsmaterial och mätdata

Eftersom det läggs ett mycket stort ansvar på den ansvarige inspektören att "hitta felen" och göra rätt bedömningar av en tunnels eventuella risker och av förstärkningsbehovet, bör denne vara väl förtrogen med tunnelns historik och ha tillgång till relationsritningar som visar bergförhållanden noterade under byggnadstiden samt de förstärkningar m.m. som då installerades. Den aktuella inspektionen kan då arbeta utifrån en sådan baskunskap om förhållandena på plats. Med dagens IT-teknik är det enkelt att skapa och bära med sig sådan information på en fältdator.

Vid varje inspektion eller besiktning som utförs samlas stora mängder av data in. Tidigare data kan finnas i olika format, exempelvis vara nedskrivna på papper eller finnas i digitala filer eller fotografier. Med digital insamling av all data kan hanteringen göras snabbare och kan tillhandahållas på ett bekvämt sätt inför nästa besiktning. Ett flertal programvaror och tjänster finns för detta, se de listade länkarna nedan. Med hjälp av dessa programvaror kan användaren ta del av tidigare inspektionsmaterial, foton, anteckningar, relationshandlingar, 3D-modeller etc för att

kunna skapa ett inspektionsprogram. Flera tunnlar kan samlas i en databas och programmen gör det enklare att förbereda arbetet genom att analysera behovet av inspektion och renovering. Statistik av typen antal besiktningar, skador, kritiska områden etcetera kan tas fram av inspektören, vilken då får en bättre överblick och kan bestämma rätt åtgärd och prioritetsordning i ett tidigt skede.

När inspektionen utförs kan information om tunneln visas på en bärbar enhet så att användaren kan jämföra tunnelns status med senaste besiktningen. Detta gör det enklare att upptäcka propagerande skador och avgöra renoveringsbehovet i tunneln.

De under inspektionen genererade fältloggarna, såsom skanningsresultat, GPR-bilder och värmekamerabilder, sparas ner som länkar till tunnelns relationshandling. Inför nästa inspektion blir det då möjligt för inspektören att uppdatera sig om tunneln tidigare status och avgöra inträffade förändringar.

Länkar:

Spacetecs "Tunnel-Inspector" (<http://www.spacetec.de/e-tunnel-inspector.html>), Bentley Systems "InspectTech" (<http://www.bentley.com/en-US/Products/InspectTech/>), Ambergs "TunnelMap" (<http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/tunnel-inspection/tunnelmap/>).

4.8 Utförande av inspektionen

Inspektören manövrerar en plattform som kan röra sig längs tunneln. God belysning krävs.

Följande åtgärder och ordningsföljd föreslås för arbetet:

1. Gör en inledande, okulär besiktning, eventuellt kombinerad med selektiv bomknackning.
2. Med en långsam rörelse längs tunneln (ungefär gånghastighet), registrera "misstänkta" partier av tunneltaket med GPR (luftantenn) och handhållen termografi. Instrumenten kan med fördel köras parallellt och vara monterade på samma ram².
3. På samma sätt, skanna dessa partier av taket med en handhållen laser, typ Zeb1.
4. Granska och jämför med tidigare inspektionsresultat. Om anomalier eller avvikelser från tidigare inspektioner upptäcks i tunnelinklädnad, sprutbetong eller bakomliggande berg, markera dessa platser.
5. Upptäcks mindre skador, kan dessa åtgärdas vid inspektionstillfället.

I mån av tillgänglig utrustning och tid mellan de löpande besiktningarna kan man granska de "misstänkta", tidigare markerade platserna med markkopplad GPR eller något akustiskt instrument, t.ex. ultraljudstomograf eller -ekoutrustning, för att avgöra skadans typ, djupläge och omfattning.

Vid större skador, bedöm risk för nedfall och rekommendera underhållsarbete.

² Anm. Värmekameran ger bäst indikationer om temperaturen i tunneln är ökande eller avtagande från stationärt värde.

5. Arbetsmetoder för tunnelunderhåll

I Bilaga 2 beskrivs relativt uttömmande de arbetsmetoder, maskiner och fordon som används vid underhåll i bergtunnlar. I texten, som är ett sammandrag av utredningen i arbetsgrupp 2, ges exempel på möjliga förbättringar av arbetsmetoderna.

För att exemplifiera med faktiska siffror har arbetsgruppen använt resultat från utvärderingen av underhållsarbetet i Aspentunneln, som närmare beskrivs i Bilaga 4.

5.1 Förutsättningar för arbetena

I det följande beskrivs de olika momenten i ett underhållsprojekt av en bergtunnel. Som nämnts tidigare, finns det en skillnad mellan planerat underhåll, som görs efter en förutbestämd tidplan och akut underhåll, som sätts in vid fara för ras och trafikstörning i en tunnel. Denna rapport beskriver i huvudsak planerat underhåll.

Planerat underhåll avser uppgradering av tunnelns funktioner så att driften säkerställs fram till nästa planerade insats. Efter att behovet av underhåll konstaterats genom inspektion, inleds projektering och planering för insatsen. När arbetet utförs är det väsentligt att det är rätt planerat, med tillräcklig hänsyn till de svårigheter som underhåll på korta dispositionstider innebär. Metoder och fordon för etablering/avveckling och andra icke värdehöjande aktiviteter ska vara effektiva för att skapa tid för själva utförandet. Arbetsmetoder och material ska vara anpassade till snabba insatser. Förstärkningselementen ska till exempel ha nått tillräcklig hållfasthet innan trafikpåsläpp kan göras. Det krävs alltså en helhetssyn för att underhållsarbetet ska bli tidseffektivt.

Den tillgängliga produktionstiden vid underhållsarbeten i trafiktunnlar är ibland mycket pressad. Arbetet måste utföras så att störningarna för trafikanterna blir så små som möjligt. Vid större åtgärder delas vanligen tiden upp på många korta tidsperioder. Mellan arbetspassen ska tunneln fungera för den normala användningen. Ofta ges endast tillträde nattetid eller på helger då lågtrafik råder och då omledning eller begränsning i trafikflödet kan tillåtas. Det innebär att produktionen störs av dagliga på-/avetableringar, trafikanordningar, skyddsåtgärder, städning mm. Dessa arbeten är inte produktiva, men är nödvändiga för att kunna utföra övriga arbeten med hänsyn till trafikanternas behov och för att skapa en god säkerhet för de som utför underhållsåtgärderna. Det är också vanligt med partiell avstängning, d.v.s. att endast ett spår eller en del av vägen stängs av för trafik. Närhet till trafik och/eller högspänning kan då innebära att produktionen av säkerhetsskäl måste ske med nedsatt produktivitet.

5.2 Projektets olika faser och dess förutsättningar

Ett byggprojekt oavsett vilken typ kan man dela upp ett antal olika faser. Ett underhållsprojekt kan förenklas till följande delmoment.

- Projektering
- Anbudsarbete
- Upphandling
- Produktionsplanering
- Produktion

Projektering omfattar bland annat inspektion och statusbestämning som behandlas i avsnitt 4.2 . I föreliggande avsnitt behandlas i huvudsak upphandling, produktionsplanering och produktion.

5.2.1 Projektering

Omfattningen av ett planerat underhållsprojekt beskrivs vanligen i så kallat förfrågningsunderlag, FU. I detta beskrivs de lokala förutsättningarna på platsen, den teknik som förväntas användas samt övriga krav beställaren har på arbetet. I FU har vanligen tiderna för utförandet lagts fast och planering av trafiken har gjorts mycket långt i förväg.

5.2.2 Anbudsarbete

Detta utförs av ett antal inbjudna entreprenörer och baseras på uppgifterna i FU och andra styrande dokument.

5.2.3 Upphandling

Denna sköts av tunnelägaren, som beställare. Om upphandlingen tar längre tid än beräknat, kan tiden för entreprenörens produktionsplanering bli mycket snäv. Detta kan medföra, att de mest effektiva resurserna inte hinner etableras på arbetsplatsen.

Vid akut underhåll är en snabb insatstid är väsentlig. För att detta ska vara möjligt måste tunnelägaren ha en incidentberedskap, exempelvis i form av ramavtal, där entreprenören förbinder sig att ha en sådan beredskap. Tunnelägaren måste i avtalet specificera vilka resurser som ska finnas tillgängliga och vara beredd att betala för denna beredskap även när den inte används. Graden av beredskap måste ställas i relation till omfattningen av de störningar som drabbar trafikanterna vid en tunnelavstängning, och de samhällskostnader som detta medför.

Vid planerat underhåll, när entreprenören har ett förfrågningsunderlag att räkna på, har vanligen tiderna för utförandet redan lagts fast och kan oftast inte ändras. Detta är särskilt tydligt i järnvägsprojekt eftersom planering av trafiken måste ske mycket långt i förväg. Det är då viktigt att byggherren har en god planering och framförhållning.

5.2.4 Produktionsplanering

Dessa arbeten börjar när kontrakt mellan byggherre och entreprenör har tecknats och är den kanske viktigaste fasen i komplexa underhållsprojekt. Exempel på uppgifter som ska genomarbetas i detta skede är organisation med ansvarsfördelning, resursallokering, arbetsplatsdisposition, detaljerad tidsplanering, kontrollplaner, riskanalyser, arbetsberedningar, samt inköp av material, underentreprenörer och hjälpmedel.

5.2.5 Produktion

Etablering/ avveckling

Det är en fördel att kunna etablera nära arbetsstället. När det gäller underhåll av vägtunnlar brukar det inte vara så svårt att ordna. Hjulburen utrustning är dessutom relativt lätt flyttbar.

Längs järnvägslinjer kan det vara svårt att komma till spåret med hjulburen utrustning. Mindre och akuta underhållsinsatser i järnvägstunnlar brukar därför utföras med utrustning och material lastad på järnvägsvagnar. Ingen fast etableringsplats krävs, endast ett stickspår med omlastningsmöjlighet i rimlig närhet till tunneln. I en akut situation är det väsentligt att det finns beredskap för en sådan insats, så att resurserna kan mobiliseras snabbt. Det är en stor fördel om det på platsen finns utrymme för omlastning av material och utrustning.

Skyddstäckning

För att inte skada anläggningsdelar som vägbana, elinstallationer, skyltar, räls och kontaktledningar måste ofta en omfattande skyddstäckning utföras. Om arbetet är uppdelat i många korta etapper med trafikpåsläpp mellan etapperna, måste skyddsanordningarna utföras så att de snabbt kan demonteras, förflyttas, och monteras på nytt.

I vägtunnelmiljö är det framförallt vägbeläggning och installationer i form av belysning, ventilationssystem, kablar samt skyltar för trafikinformation som måste skyddas.

I järnvägstunnlar är det särskilt viktigt, att nedfall från rivning och skrotning inte hamnar på spår, slippers, kabelrännor och andra tekniska anordningar i tunneln.

Materialhantering

Materialhanteringen vid underhåll av vägtunnlar är relativt okomplicerad och liknar förhållandena vid övriga anläggningsarbeten.

Lastning och uttransport av nedfallet material i järnvägstunnlar fordrar effektiv utrustning. Schaktaggregat som är fast monterade på spårgående arbetsfordon är ofta mer effektiva än konventionella grävmaskiner.

Intransport av material för inbyggnad i spårtunnlar måste också vara effektivt. Intransport av betong för platsgjutning eller betongsprutning är särskilt svårt att klara med konventionella transportfordon. Specialbyggda vagnar för betongtransport är dock ett kostsamt alternativ som kräver långa förberedelser

5.2.6 Störningar och svårigheter vid produktionen

En arbetsplats där tunnelunderhåll utförs innebär alltid en störning och medför ett antal svårigheter som måste hanteras:

- Insatserna måste ofta utföras på obekvämlig arbetstid
- På- och avetablering sker varje dygn
- Skydd av anläggningar och städning tar mycket tid
- När trafiken släpps på måste förstärkningar vara tillräckligt säkra
- Effektiv arbetstid blir ofta mycket kort

De nämnda svårigheterna ställer krav på:

- Bra planering
- Välutbildad personal
- Effektiva resurser för skyddstäckning och städning
- Effektivt utnyttjande av resurser under den effektiva arbetstiden
- Förstärkningar som går snabbt att installera
- Kort härdningstid för betong mm.

De arbetsmetoder som tillämpas vid underhåll och renovering av trafiktunnlar avser framförallt betong (sprutbetong eller betongliner), stål (bultar och andra stödkonstruktioner) samt olika dränsystem. Icke fungerande sprutbetong kan behöva bytas ut och rostade bultar kan behöva ersättas. Vidare kan det bli aktuellt att förstärka eller strossa i fria bergytter i oinklädda tunnlar. Igensatta dränsystem måste kunna spolas rena under dispositionstiden i tunneln och isbildningar avlägsnas.

5.3 Dagens praxis för underhållsarbeten i bergtunnlar

I detta avsnitt beskrivs kortfattat de arbetsmoment som ingår i en underhållsrenovering och hur dessa utförs enligt dagens praxis. En mer detaljerad beskrivning finns i Bilaga 3.

5.3.1 Bergschakt: Skrotning, strossning och masshantering

Skrotning

Mindre lösa bergblock i tak och väggar (max dm-storlek) som avslöjats vid inspektion avlägsnas försiktigt med handhållet skrotningsspett (ej hydraulspett). Större block fastbultas med bergbult och översprutas med sprutbetong.

Strossning

Ibland måste tunnelns tvärsnitt utvidgas av något skäl, t ex för att rymma ny förstärkning eller dräner. Förstoringen kallas ofta strossning och kan utföras på flera olika sätt. Ofta brukar man definiera strossningsarbeten som en underhållsåtgärd.

Borring och sprängning är en ganska våldsamt metod som måste användas med stor försiktighet i underhållssammanhang. Vid sprängning måste till exempel risken för skador på närliggande byggdelar och installationer beaktas. Montering och borttagning av skyddande anordningar liksom säkring av sprängda bergytor kan ta avsevärd tid i anspråk. Sprängning kan därför vara mycket svår att tillämpa när dispositionstiden är kort, t ex endast några timmar på nattsift, och om tunneln ska vara öppen för trafik mellan arbetsskiften.

Vid skrotning och strossning i en vägtunnel samlas nedfallet material upp med traktorgrävare och transporteras ut med konventionell lastbil eller dumper. Masshantering i vägtunnlar kan ske friare än vad som är fallet i järnvägstunnlar. Andra aktiviteter blir inte heller störda på samma sätt. Därför kan metodval och resursplanering skötas på ett mer konventionellt sätt vid underhåll av vägtunnlar.

Schaktmassor från en järnvägstunnel, som nedskrotat eller strossat berg, rivningsmaterial eller spill från betongsprutning lastas på järnvägsvagn. Genom att förse vagnen med utfällbara lämmar på sidorna förenklas uppsamlingen av massor. Upplastning från tunnelgolvet görs med grävmaskin eller traktorgrävare, alternativt med grävaggregat monterat på spårbundet arbetsfordon.

Uttransporten stör andra arbeten längs spåret. För att minska antalet transporter, bör man dimensionera lastkapaciteten för en lång tidsperiod. Mottagningen av massor utanför tunneln bör ske så nära tunnelmynningen som möjligt och vara så effektiv att uppehållstiden blir minimal.

5.3.2 Rengöring

Att få bergytorna inklusive tidigare sprutbetongförstärkta tak- och väggytor tillräckligt rena för att ny sprutbetongförstärkning ska få godtagbar vidhäftning kan vara en utmaning i en gammal trafikunnel. Nedsmutsning av många års exponering för damm, stoft, sot, kolrök, emissioner från fossila bränslen, algpåväxt, bakteriella substanser och annat under lång tid kan resultera i en beläggning som är mycket svår att avlägsna. På befintlig sprutbetong tränger smutsen in något i betongens yta, som dessutom åldras genom vittring mm. Vattenläckage kan innebära att lösta mineral och salter från berget bildar avlagringar. Detta i kombination med ljus från belysningsarmaturer kan ge organismer näring. I äldre tunnlar är ofta en stor del av bergytorna obehandlade; ju senare tunneln är byggd eller renoverad desto större andel av bergytorna är förstärkta med sprutbetong. Tunnlar byggda efter 1980 är ofta helsprutade åtminstone i tak.

Nedan presenteras några metoder som idag används för att rengöra bergytor/befintlig sprutbetong.

Vattenspolning eventuellt i kombination med tryckluft är en vanlig metod att rengöra bergytor innan betongsprutning utförs. Metoden ger oftast ett fullt godtagbart resultat på färsk bergytor som vid nyproduktion, men är nästan aldrig tillräcklig i underhållssammanhang. Kapaciteten påverkas förstås av nedsmutsningsgraden och av vald utrustning men är generellt hög.

Högtryckstvätt ger oftast bättre effekt än vattenspolning utan tryck. Det förutsätter dock att munstycket förs nära bergytan i ett långsamt tempo vilket är tidsödande. För att öka kapaciteten sveps ofta munstycket snabbare och längre från ytan, och då blir resultatet inte tillräckligt bra.

Hetvattentvätt kan ge bra effekt på feta beläggningar, men är ofta inte tillräcklig i en gammal tunnel som utsatts för trafik. Kapaciteten begränsas av effekten på uppvärmningsaggregatet men är i övrigt obetydligt lägre än högtryckstvätt med kallvatten.

Avfettning kan vara ett kraftfullt hjälpmedel att avlägsna beläggningar från trafik. Ofta behöver detta kombineras med t ex hetvattentvätt. Den miljöbelastning som avfettningsmedel innebär måste alltid vägas in vid val av metod. Behovet att utföra rengöringen i flera moment ger en relativt låg kapacitet.

Blästring med sand ger bra effekt på de flesta typer av nedsmutsning. Metoden används dock sällan på grund av dess arbetsmiljönackdelar som dammig miljö och högfrekvent ljud. Sandrester kan också vara ett stort problem.

Dessa måste samlas upp och bortforslas, något som kan vara svårt att utföra i en järnvägstunnel. Kapaciteten vid sandblästring är också begränsad.

Vattenblästring innebär tvättning med högt tryck och ganska lågt flöde; typiska prestanda 2000 bar och 30 liter/min. Denna metod visar sig ofta ge bra rengöringseffekt och är relativt produktiv. Inga tillsatser i form av miljöstörande rengöringsmedel som behöver samlas upp är också en fördel. Kapaciteten är relativt hög även om man ser till resultatet.

Det är viktigt att följa upp resultatet med ett vidhäftningsprov. Då smutsen från tunnelytorna hamnar i tunnelns dräneringssystem bör det finnas en beredskap att rena dränvattnet innan det släpps ut i recipient eller i kommunalt dagvattensystem.

5.3.3 Injektering

En del av underhållsarbetet kan vara att täta berget genom injektering. Injektering av berg utförs med hänsyn till flera faktorer, som skador på omgivningen, arbetsmiljö, pumpkostnader, möjlighet att förstärka berget med bergbultar och sprutbetong samt funktionen hos den färdiga anläggningen. Arbetena innebär att cementbruk pressas in i bergsprickorna från borrhål i berget. Utrustningen består av blandare för cementbruk, injekteringspump och en tätningsmanschett som förs in i borrhålet.

Injektering med cementbruk är relativt tidskrävande och kan inte utföras vid starkt tidsbegränsade underhållsarbeten.

Injektering med kemiska injekteringsmedel, främst polyuretan, kan vara ett alternativ vid lokala läckage. Metoden kan utföras med kompakt utrustning och arbetet går ganska snabbt att utföra. Resultatet blir en ytlig tätning som inte alltid är tillräcklig. Risken för kontaminering av grundvatten måste beaktas.

5.3.4 Sprutbetongarbeten

Metodval

Valet står mellan torrsprutning som oftast utförs manuellt, och våtsprutning, som vanligen utförs med robot. Vilken metod som väljs styrs i första hand av arbetets karaktär. Om det är stora volymer sprutbetong och dessutom med fiberarmering, väljs lämpligen våtsprutning med robot. Om mängderna är små och utspridda på många mindre ytor kan det fungera lika bra med torrsprutning. Tunnelns storlek och möjligheter till leverans av färdigblandad färsk betong kan också spela in vid metodvalet.

Vid torrsprutning är det väsentligt att maskinell utrustning och materialförsörjning medger snabba starter och stopp, samt att rengöring av maskinerna går enkelt. Maskiner med kontinuerlig drift är bättre än en sådana med ojämnt materialflöde. Det finns moderna torrsprutningsmaskiner med hög kapacitet som har kontinuerlig drift. Materialhanteringen är en viktig faktor som kan ge tidsbesparingar och förbättra arbetsmiljön. Bruk i bulkleverans eller storsäck som hanteras med maskinhjälp är att föredra. Fiberarmerad sprutbetong utförs normalt inte med torrsprutningsmetoden då det högre materialspillet gör detta oekonomiskt.

Våtsprutningsmetoden ger hög produktivitet, relativt litet materialspill och god arbetsmiljö. De flesta robotar kan användas, vilket totalt ger en låg totalkostnad. Med en andel av mer än 90 procent av all sprutbetong, är leverans- och maskinutrustning idag i hög grad inriktad på våtsprutning.

De två sprutbetongvarianterna beskrivs utförligare i Bilaga 3, liksom materialval och metoder för förprovning.

Materialval

En sprutbetongkonstruktions förstärkande förmåga avgörs av själva betongprodukten samt av den accelerator som får betongen att fästa på berget. Anbringningssättet, sprutbetongriggen och dess operatör, har också stor betydelse för slutresultatet. För att uppnå bästa möjliga kvalitet, säkerhet och produktivitet så måste alla dessa delar fungera ihop. Vid korta dispositionstider för underhåll av en tunnel är det särskilt viktigt.

Beställaren brukar ställa krav på konstruktionens stabilitet och beständighet. Dessa egenskaper beror på den miljö sprutbetongen exponeras för under tunnelns tekniska livslängd, faktorer som i sin tur styr valet av bindemedel (cementsort).

Vid sprutbetongarbeten med korta dispositionstider är det viktigt att man så fort som möjligt får upp hållfastheten för att det skall vara säkert att släppa på trafik i tunneln. Därför undviks om möjligt så kallad anläggningscement, som har en relativt långsam reaktion, till förmån för vanligt byggcement. Vid stora krav på sulfatresistens eller lång livslängd kan dock anläggningscement med en tillsats av SH-cement användas också vid snabba betongsprutningar. Reaktionshastigheten hos betong är starkt temperaturberoende. Betongtemperaturen bör inte vara lägre än 20 grader vid sprutning. Materialet skall då vara lätt att pumpa genom riggen, ge bra vidhäftning, jämna ytor och lite spill. Detta ställer krav på ballastmaterial, cement och tillsatsmedel. Vid långa transporter eller när betongen skall hållas arbetsbar under lång tid kan retarderande tillsatsmedel behövas. Tillgången till en tekniskt sett kompetent cementfabrik nära tunneln är med andra ord en viktig faktor.

Valet av sprutbetongaccelerator beror på cementsort och önskad hållfasthet. Vid underhåll av trafiktunnlar önskar man regelmässigt snabb hållfasthetstillväxt. För att minimera risken för krympsprickor skall sprutbetongytan besprutas med vatten (vattenhärddas) så tidigt som möjligt.

Förprovning

Sprutbetong kan inte proportioneras med vanliga metoder, och måste därför förprovas. Detta gör man för att finna ett lämpligt recept som fungerar produktionsmässigt, och för att säkerställa att föreskrivna krav på hårdnad betong uppfylls. Förprovingen tar 6-8 veckor att genomföra och innebär provsprutning, laborietester och analys. Förprovning är med andra ord endast aktuell vid planerat underhåll. Provsprutningen bör utföras på en yta som liknar den aktuella tunnelns väggar, med liknande miljö vad gäller fukt och temperatur. Betongen måste vara tillverkad i den betongstation som ska användas i projektet, och med de ballastmaterial som avses användas i projektet. Provingen kan förenklas om entreprenören har dokumenterad erfarenhet av sprutbetong utförd i närområdet. Mer detaljer återfinns i Bilaga 3.

5.3.5 Dränering

Vattenläckage från tak och väggar i trafiktunnlar är ett stort problem som ger höga driftskostnader på grund av nedbrytning av installationer och spår samt vatten och is på vägbanor. Dessutom bidrar vattnet till nedsatt funktion som drabbar trafikanterna. På nordiska breddgrader är problemet med frysning kanske större än inläckaget i sig, då det medför risk för halka och nedfallande istappar. De flesta system för vatten- och frostsäkring av tunnlar innehåller betydande mängder brännbart material. För att klara brandsäkerheten i tunneln måste dessa brandfarliga konstruktioner skyddas mot antändning.

Många äldre tunnlar (> 25 år) har bristfällig vatten- och frostsäkring eller konstruktioner med dåliga brandskyddsegenskaper. Det finns exempel på mycket omfattande inklädnader med brännbara system utan brandskydd. Dränkonstruktioner räknas som en installation och har en kortare livslängd än tunnelns bärande huvudsystem, ofta räknar man med en livslängd på 30-45 år. En tänkbar underhållsinsats kan i dessa fall innebära komplettering av äldre dränsystemet eller en radikal förnyelse av hela systemet.

I nyare tunnlar finns oftast omfattande installationer av dräner med extruderad polyeten, PE-skum, som aktiv vatten- och frostisolering och sprutbetong som brandskydd. Problemet i dessa tunnlar är att vattenläckagen flyttar sig med tiden och uppträder där det inte finns dräner monterade. Underhållsinsatser i dessa tunnlar består ofta i att komplettera med nya dräner.

5.3.6 Utbyte av bultar

Vid dåligt fungerande bultar, t.ex. på grund av bristande ingjutning eller stålkorrosion, sätts regelmässigt en ny bult invid den gamla.

Bultars beständighet säkerställs genom förprovning. Ingjutningsbrukets egenskaper är mycket viktiga för bultens funktion och beständighet. Bruket måste ha sådana egenskaper att det går att fylla borrhålet genom att pumpa

bruket genom en slang som når till hålets botten. Cementbruks höga pH-värde säkerställer att bultstålet inte korroderar och att bulten får en lång livslängd. Då arbetet utförs i tunnelns tak eller väggar är det nödvändigt att ha en bra och säker arbetsplattform eller lift. Arbetshöjden i vägtunnlar överstiger sällan sju meter över vägbanan, medan arbetshöjden i järnvägstunnlar kan vara upp till nio meter. I vägtunnlar är det ofta lämpligt att använda stadiga hjulburna arbetsplattformar som är lätt flyttbara. Lastbilsmonterade arbetsplattformar med stor arbetsyta och hög bärighet är att föredra. Dessa kan förutom personal även rymma en del material samt eventuellt blandare och pump för cementfyllning av borrhålen. Hjulburna liftar med en liten personkorg kan användas men materialhanteringen är då mera tidskrävande och produktiviteten blir lägre. Det är effektivt att kunna förflytta fordonet med manövrering från arbetskorgen, men det förutsätter naturligtvis att underlaget är tillräckligt jämnt. Små liftar med låg tillåten last och utan egen framdrivning bör användas endast för enstaka bultar, på grund av låg produktivitet. För längre bultar än cirka tre meter är dessa små liftar olämpliga ur säkerhetssynpunkt

I övriga hjälpmedel ingår blandare för blandning av cementpasta med lågt vct samt pump som medger en jämn fyllning av borrhålen. Dessa hjälpmedel ska ha de egenskaper som krävs för att uppfylla kraven i bygghandlingar och motsvara de maskiner som har använts vid förprovningen. Storleken på utrustningen behöver anpassas för att åstadkomma en god produktivitet. En utrustning med hög kapacitet kan vara omständlig och tidsödande att etablera och rengöra och används endast när många bultar ska monteras. Materialförsörjningen ska då anpassas så att den höga kapaciteten kan utnyttjas. Att föra in bultstången i borrhålet är ett tungt arbete som kan bli ett allvarligt arbetsmiljöproblem om stora mängder bult ska monteras. För att trycka in bulten i det cementfyllda borrhålet används vanligen handkraft. Ibland utnyttjas arbetsplattformen för att skjuta på bulten, vilket kan vara bra ur arbetsmiljösynpunkt i vissa fall. Dock måste riskerna med ett sådant förfarande beaktas. Det finns också exempel på verktyg som skjuter på bulten hydrauliskt. Det finns också speciella bultningsaggregat som utför både borrar, cementfyllning och montering av bultstång utan manuell hantering. Sådan utrustning är vanlig i gruvsammanhang, men är än så länge sparsamt använd i väg- och järnvägstunnlar. Vid stort bultantal kan denna metod övervägas för ökad produktivitet och av arbetsmiljöskäl.

Identifikation av vilka bultar som bör bytas ut är en tidskrävande process och ännu finns inga riktigt bra instrument till inspektörens hjälp. Under en besiktning av en trafiktunnel finns normalt inte tid att hitta "osäkra" bultar, utan denna kartläggning måste ha skett i förväg.

Det är bultstångens beständighet som måste säkerställas genom att förprova ingjutningens kvalitet. En metod som används är att gjuta in bultar i plexiglasrör med samma innerdiameter och längd som borrhålen. En ände på röret tätas varefter bultbruket fylls med den metod som är tänkt att användas i fält. Det transparenta röret möjliggör okulär besiktning av bultbrukets utfyllnadsgrad. Bultbrukets egenskaper dokumenteras för att göra denna process repeterbar i produktion. Då behöver endast bultbrukets egenskaper provas stickprovsvis under produktionen.

5.4 Förslag på förbättrade arbetsmetoder

5.4.1 Bergschakt: Skrotning, strossning och masshantering

Skrotning

Skrotningsspetten kan modifieras för lättare handhavande vid avlägsnande av mindre bergskivor och block.

Strossning

Hydraulisk spräckning är en skonsam metod att ta bort berg och är en användbar teknik i inredda tunnlar.

Snigeldynamit kan rekommenderas om det är små bergpartier som ska skalas bort.

Hydraulisk knackning kan vara effektiv om uttagsvolymen är begränsad och fördelad på många mindre områden. Metoden ger små vibrationer och ingen skadlig påverkan på närliggande tunneldelar.

Masshantering

Järnvägstunnlar

Upplastning sker lämpligen med grävmaskin/traktorgrävare med spårföljare, eller grävaggregat monterat på spårbundet arbetsfordon. Lastningen kan underlättas genom att förse järnvägsvagnarna med hydrauliskt manövrerade, fällbara lämmar som täcker så stor del av tunnelns bredd som möjligt.

Vägtrafiktunnlar

Metodval för masshantering i vägtunnlar är inte lika begränsad som i järnvägstunnlar. Andra aktiviteter blir inte heller störda på samma sätt. Därför kan val av utrustning och resursplanering skötas på ett mer konventionellt sätt.

5.4.2 Rengöring av tunnelväggar och tak

Vattenblästring innebär tvättning med högt tryck och ganska lågt flöde; typiska prestanda 2000 bar och 30 liter/min. Denna metod visar sig ofta ge bra rengöringseffekt och är relativt produktiv. Inga tillsatser i form av miljöstörande rengöringsmedel som behöver samlas upp är också en fördel. Kapaciteten är relativt hög även om man ser till resultatet.

5.4.3 Injektering av omgivande berg

Normalt sett en alltför tidskrävande process för att utföras vid snabbt tunnelunderhåll. Vid sedan länge planerat underhåll görs efterinjektering med normal produktionsutrustning. Injektering med kemiska injekteringsmedel kan övervägas vid lokala läckage.

5.4.4 Sprutbetongarbeten

Våtsprutningsmetoden ger hög produktivitet, relativt litet materialspill och god arbetsmiljö. De flesta robotar kan användas, vilket totalt ger en låg totalkostnad.

5.4.5 Uppgradering och rensning av dränering

Brandskyddande sprutbetong över dräner kan utföras med inblandning av syntetisk fiber av polypropylenplast (pp-plast). I blöta partier kan tunneln förses med heltäckande vatten- och frostskyddande inklädnadssystem. Detta är dock en process som är alltför tidskrävande att utför vid snabbt tunnelunderhåll.

Rockdrain är ett nytt dräneringssystem som kan visa sig produktivitetshöjande.

5.4.6 Utbyte av bultar

Vid dåligt fungerande bultar, t.ex. på grund av bristande ingjutning eller stålkorrosion, sätts regelmässigt en ny bult invid den gamla. Om det handlar om många bultar kan det vara tidseffektivt att använda mekaniserade bultsättningsaggregat.

5.5 Sammanfattning

De arbetsmetoder som tillämpas vid underhåll och renovering av trafik­tunnlar avser framförallt betong (sprutbetong eller betongliner), stål (bultar och andra stöd­konstruktioner) samt olika dränsystem. Icke fungerande sprutbetong kan behöva bytas ut och rostade bultar kan behöva ersättas. Vidare kan det bli aktuellt att förstärka eller strossa i fria bergytter i oinklädda tunnlar. Arbetena innebär också, att spola igensatta dränsystem och att avlägsna isbildningar. I avsnittet beskrivs sådana arbeten och förslag till förbättringar ges.

Mer tidskrävande insatser, som efterinjektering av berget och installation av inklädnadssystem kan normalt inte utföras inom ramen för underhållet utan måste planeras in som separata byggprojekt.

6 Fallstudie Aspentunneln

6.1 Bakgrund

En utförligare rapport över denna fallstudie finns i Bilaga 4.

Aspentunneln ligger på Västra Stambanan, sträckan Aspen-Jonsered, och är en 275 m lång dubbelspårstunnel med ca 10 m spännvidd och en höjd över rök på ca 7 m. Mynningarna är förstärkta med formgjutna betongvalv och berget är förstärkt med selektivbultning och oarmerad sprutbetong i liten omfattning. Stödjande betongkonstruktioner förekommer ställvis, och några mindre områden i taket är försedda med isnät eller provisoriska nät för att skydda spåren från bergnedfall. Vatten- och frostisolering förekommer på några platser i tunneln, dessa isoleringsmattor saknar brandskydd. För att säkerställa stabiliteten i tunneln utfördes 2012 planerade underhållsarbeten i tunneln innefattande ny förstärkning och nya dräner. Arbetena utfördes under stor tidspress med därav följande krav på hög effektivitet i arbetsmetoderna.

6.2 Ingående arbeten

Entreprenören Besab AB åtog sig att inom den givna tidsramen (107 nattskift) utföra:

- Vidgning av tunnelsektionen där så erfordrades för ny förstärkning och nya dräner
- Skrotning av alla bergytor samt bomknackning av betongytor
- Rengöring, blästring av bergytor som skulle betongsprutas
- Demontering av befintliga bergnät och dräner
- Systembultning, borrning, ingjutning, montering av bricka och mutter
- Installation av nya dräner inklusive sprutbetong/brandskyddsduk.
- Underhåll och injektering av betongportaler

6.3 Utförandetid

Alla arbeten skulle utföras under en fast tidsperiod på 850 timmar utan möjlighet till förlängning. Total kunde arbeten utföras under 86 nattskift mellan 22.00 – 06.00 med trafik (70 km/tim) på ett spår, samt under 21 nattskift mellan 22.15 – 06.00 vid dubbelspårsavstängning.

6.4 Produktionsplanering sprutbetong

Ett kritiskt moment vid snabbt tunnelunderhåll är kvaliteten på sprutbetongen som används. Hög tidig hållfasthet krävs för att möjliggöra betongsprutning under korta arbetsskift med tillräcklig säkerhet mot nedfall när tågtrafiken släpps på. En relativt omfattande provuppställning gjordes i detta projekt, men tidsbristen gjorde att endast några få provserier hanns med. Dessa visade dock, att den valda betongen uppfyllde ställda hållfasthetskrav för snabbt trafikpåsläpp.

6.5 Val av arbetsmetoder

Entreprenören använde följande arbetsmetoder och val av utrustning:

6.5.1 Bergschakt

Borrning utfördes med dieselhydrauliska borrarregat. Då konventionell sprängning ansågs vara ett alltför riskabelt alternativ med tanke på tågtrafiken, användes hydraulisk spräckning

för loss hållning av berget. Bergrensning av samtliga bergytor utfördes manuellt från arbets-
korg på arbetsvagn.

6.5.2 Renspolning av bergytor

Då tunneln är gammal (byggd 1912) har bergytorna under lång tid utsatts för nedsmutsning av
bland annat dieselavgaser. Effektiv rengöring av bergytorna var därför väsentlig för att efter-
följande betongsprutning skulle få bra vidhäftning. Vattenblästring med en kraftig högtrycks-
pump (tryck upp till 2000 bar) visade sig ge önskat resultat.

6.5.3 Masshantering

Efter skyddstäckning av ballastmakadamen samlades nedskrotat berg, rivningsmassor och
sprutbetongspill upp på järnvägsvagnar. Detta innebar en del tidsödande, manuellt arbete.
Om längre planeringstid funnits kunde vagnarna från början varit påbyggda med fällbara läm-
mar, hade mer material kunnat samlas upp direkt på vagnarna och värdefull tid kunde ha spa-
rats.

6.5.4 Bergförankring

Borrning för bultar utfördes med samma dieselhydrauliska utrustning som vid loss hållning av
berget. Montering av de ca 2000 bultarna skedde manuellt sedan borrhålen fyllts med ce-
mentpasta som pumpades in med skruppump.

6.5.5 Betongsprutning

En sprutrobot med linjär matare placerades på en lågbyggd järnvägsvagn försedd med fysiskt
skydd på ena långsidan. På så sätt kunde cirka sex meter av tunneln sprutas från samma upp-
ställning. Färsk betong lagrades i en roterande betongtrumma, placerad på en järnvägsvagn
och som kunde tömmas direkt i betongpumpen. Omlastning från betongbil till mellanlag-
ringstrumman skedde utanför tunneln. Detta moment utgjorde en allvarlig tidsmässig störning
på övriga arbeten.

6.5.6 Dränering

Befintliga tak- och väggdräneringar byttes ut mot konventionella dränmattor. Dessa förankra-
des i berg med bultar och brandsäkrades med brandskyddsmatta. För arbetet användes liftar,
dieselhydrauliska borraraggregat och handhållen borrarutrustning.

6.6 Logistik

Då många arbetsmoment måste utföras samtidigt för att klara den pressade produktionstiden,
krävdes mycket utrustning i tunneln. Alla arbeten utfördes från järnvägsvagnar, och tunneln
var praktiskt taget fylld med vagnar under skiftet. Tillräckligt mycket material för ett helt skift
skulle läggas upp på dessa vagnar innan skiftet startade, vilket innebar en komplicerad logistik.

Tidigare har nämnts, att färsk betongmassa för sprutbetong måste hämtas från omlastnings-
plats utanför tunneln. Det kunde ibland betyda att flera andra arbetslag måste göra uppehåll i
arbetet och flytta sig ut ur tunneln vilket kunde ta cirka en halvtimme.

6.7 Speciella svårigheter

6.7.1 Skyddstäckning

Eftersom spår och installationer måste fungera under hela arbetstiden och makadam inte fick
smutsas ner, måste en omfattande skyddstäckning genomföras varje skift. Efter avslutat ar-
bete måste all skyddstäckning vara borttagen och arbetsplatsen vara avstädad.

6.7.2 Skyddsplank på arbetsvagnar

Närheten till trafik och spänningsförande kontaktledningar krävde omfattande fysiska skydd för att åstadkomma en säker arbetsmiljö. Dessa skydd utgjordes av plankväggar som monterades på arbetsvagnarna. Överst anordnades en lätt avskärmning som kunde skjutas upp mot bergtaket och förhindra stänk av vatten, sprutbetong och skrotningsmassor på passerande trafik och anläggning i drift.

Vid byte av sida som skulle åtgärdas i tunneln, måste också arbetsvagnarna byta körriktning. För detta krävdes transport till en bangård med möjlighet att vända vagnarna. Alternativt måste skyddsplanken flyttas från den ena sidan till den andra på vagnarna, vilket skedde på dagtid mellan två nattskift.

6.8 Externa störningar

Den tillgängliga arbetstiden reducerades ytterligare på grund av andra, icke produktionsrelaterade faktorer som diskuteras nedan.

6.8.1 Hastighetsnedsättning

För att möjliggöra arbete på ett spår med trafik på det andra spåret nedsattes den tillåtna hastigheten till 40 km/timme under arbetsskiftet. Då trafiken skulle gå med normal hastighet under övriga delar av dygnet, måste spårbyten och anordningar för hastighetsnedsättning aktiveras/avaktiveras en gång per dygn. Dessa arbeten utfördes under de "tågfria" tiderna och reducerade därför den effektiva arbetstiden

6.8.2 Sidoentreprenader

Här ingår sidoentreprenörer som utför externa arbeten som exempelvis signalarbeten, eller materialtransporter som passerar tunneln under arbetstiden till en annan bandel.

6.8.3 Restriktioner med hänsyn till omgivningspåverkan

Ett mindre antal villor i tunnelns omedelbara närhet riskerade att störas av stomljud från borring, knackning av berg eller annat buller. Någon sprängning utfördes inte under arbetsperioden. Endast ett fåtal klagomål från de boende framfördes under arbetet, varför denna störning var minimal i detta projekt.

6.8.4 Väder

Vid åska måste arbeten nära kontaktledning avbrytas av säkerhetsskäl. I det aktuella projektet inkräktade åska på arbetstiden vid ett par tillfällen.

6.8.5 Oplanerade underhållsinsatser

Vissa arbeten hade inte förutsetts och måste projekteras under arbetsperioden. Underhåll av betongportaler var ett sådant arbete. Åtgärden här bestod i injektering och montering av tillfälliga rassydd av nät.

6.9 Slutsatser och lärdomar av Aspentunneln

6.9.1 Trafikering under arbetstiden

Ju mindre trafik som passerar arbetsplatsen under arbetsskiftet desto bättre blir effektiviteten i arbetet och arbetsmiljön

6.9.2 Åtkomlighet

Befintliga tillfartsvägar och uppställningsplatser i tunnelns omedelbara närhet bör behållas tillgängliga.

6.9.3 Arbetshandlingar

I en utförandeentreprenad måste man ha kännedom om de åtgärder som ska utföras i god tid innan arbetet ska utföras. Projektören måste få tid att genomföra undersökning av förhållanden på plats för att producera bra arbetshandlingar.

6.9.4 Upphandling

För att undvika förseningar i upphandlingen är det viktigt att förfrågningsunderlaget är tydligt och inte ger utrymme för tveksamhet. Det ska kunna tydas korrekt även av icke järnvägsexperten.

6.9.5 Tunnelutformning

Ur underhållssynpunkt är två enkelspårstunnlar att föredra. De mycket tidskrävande och kostsamma skyddsåtgärder som krävs för att kunna arbeta nära järnvägstrafik och spänningsförande kontaktledning är då inte nödvändiga och arbetsmiljön blir avsevärt bättre än med dubbelspårstunnel.

Vid dubbelspårstunnel bör avståndet mellan spåren vara tillräckligt stort för att arbete ska kunna utföras till tunnelns mittlinje från ett spår, så att hela takytan kan behandlas utan att båda spåren stängs för trafik samtidigt.

6.9.6 Åtkomlighet

Närheten till stickspår med möjlighet till lastning och lossning av större maskiner på järnvägsagnar underlättar arbetet och ger ett tidseffektivt underhåll.

Tillgänglighet med hjulburna fordon intill båda spåren, liksom uppställningsytor underlättar ett effektivt underhåll, då material och utrustning enkelt kan lastas om till järnvägsagnar. Anläggningvägar i tunnelns närhet bör om möjligt bevaras.

Den nödvändiga anläggningen för behandling av processvatten byggs nära tunneln, helst utan att ta spår i anspråk vid byggandet.

7 Sammanfattning och analys

Svenska trafiktunnlar är i allmänhet byggda i bra berggrund. Normalt betraktas därför berget som ett självbärande byggnadsmaterial som bara lokalt behöver förstärkas. I syfte att bygga säkra anläggningar med hög tillgänglighet och god beständighet förses alla nybyggda tunnlar med en heltäckande förstärkning. Huvudtyperna av de mekaniska förstärkningarna är bultar, sprutbetong eller betongingjutning. Den svenska berggrunden är normalt tät, men har lokala läckzoner. Som skydd mot inringning av vatten i tunneln används olika typer av membran och frostisoleringsringar.

Den svenska förstärknings- och tätningsfilosofin för tunnlar kräver att berget måste inspekteras regelbundet för att säkerställa tunnlarernas funktion. För att undvika oförutsedda brott i förstärkningarna och vattenflöden under tunnelns driftsfas – som i värsta fall kan bli ödesdigra – måste inspektionerna och underhållsarbetena ske med en viss regelbundenhet. Genom dessa insatser upprätthålls tunnelns tekniska kvalitet och prestanda.

Trots att förekomsten av trafiktunnlar är mycket omfattande runt om i världen, är den internationella litteraturen om hur tunnlar underhålls relativt sparsam. Särskilt gäller detta länder i Sydostasien och i tredje världen. I andra länder, som europeiska och nordamerikanska, är erfarenhetsutbyte organiserat i nationella organisationer, där planering, organisation och utförande av tunnelhåll debatteras och rapporteras offentligt. Därifrån har en del litteratur hämtats, men tyvärr kan vi inte hävda att rapporten fullt ut speglar det internationella läget avseende underhåll av trafiktunnlar.

Det finns ett mycket stort antal geofysiska instrument som kan användas för att registrera kvaliteten hos en bergmassa. Många av dessa är användbara vid en tunnelinspektion. För en inspektion i en trafiktunnel är tidsaspekten viktig. Av de instrument som studerats är det framförallt instrument för avståndsmätning (laser, IR-ljus), termografiska instrument samt georadar med luftkopplad antenn som är mest intressanta för inspektion av trafiktunnlar. Inget av dessa instrument kan i dagsläget eliminera behovet av manuell bomknackning och okulär inspektion. Instrumenten kan dock utgöra ett stöd för inspektören genom att ge indikationer på möjliga problemområden.

De arbetsmetoder som tillämpas vid underhåll och renovering av trafiktunnlar avser framförallt betong (sprutbetong eller betongliner), stål (bultar och andra stödkonstruktioner) samt olika dränsystem. Icke fungerande sprutbetong kan behöva bytas ut och rostade bultar kan behöva ersättas. Vidare kan det bli aktuellt att öka tvärsnittet genom strossning och att förstärka bergytan i tidigare oinklädda tunnlar. Underhållsarbetena innefattar också att spola igensatta dränsystem och att avlägsna isbildningar.

En viktig slutsats i rapporten är att de kringliggande, icke produktiva insatserna i tunneln, såsom etablerings- och skyddsarbeten, kan vara väl så tids- och resurskrävande som själva förstärknings- och tätningsarbetena.

Det nyligen genomförda underhållsarbetet i järnvägstunneln Aspentunneln gav många lärdomar. Bland dem kan nämnas att det är fördelaktigt ur arbetsynpunkt med två enkelspårstunnlar, jämfört med en tunnel med dubbelspår, och att det underlättar med låg trafikintensitet. Det är också fördelaktigt att det finns stickspår i närheten av tunnelöppningarna, liksom tillfartsvägar för hjulburna fordon.

8 Litteraturkällor och referenser

8.1 Inspektion

8.1.1 Manualer

Federal Highway Administration, 2005, *Tunnel Inspection and Tunnel Maintenance Manual*, Washington, USA

International union of railways UIC, 2012, *Assessment of tunnels, Draft version December 2012*.

TRB, 2012, *MAPPING VOIDS, DEBONDING, DELAMINATIONS, MOISTURE, AND OTHER DEFECTS BEHIND OR WITHIN TUNNEL LININGS*. The Strategic Highway Research Program 2 Transportation Research Board of The National Academies, Washington, USA.

Tunnel Inspection Manual, 2006, US Department of transportation, Washington, USA.

8.1.2 Artiklar och rapporter

Baiden G, Bissiri Y, Luoma S & Henrich G, 2014, *Mapping utility infrastructure via underground GPS positioning with autonomous telerobotics*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 39, Elsevier.

Celestino T B, Aoki N, Silva R M, Gomes R A M P, Bortolucci A A & Ferreira D A, 2006, *Evaluation of tunnel support structure reliability*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 21. Elsevier.

Chung H-S, Chun B-S, Kim B-H & Lee Y J, 2006, *Measurement and analysis of long-term behavior of Seoul metro tunnels using the Automatic Tunnel Monitoring Systems*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 21 Vol 21, Elsevier.

Guo Y, Shi H & Yu Z, 20xx, 20xx, *Research on Tunnel Complete Profile Measurement Based on Digital Photogrammetric Technology*. IEEE publication 2011.

Kwon S W, Kim J Y, Yoo H S , Cho M Y, Kim K J, 2006, *Development of wireless vibration sensor using MEMS for tunnel construction and maintenance*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 21. Elsevier.

Lalagüe A & Hoff I, 2003, *Use of Ground Penetrating Radar in tunnel maintenance: detection of loose rocks on top of the concrete inner lining*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 14.

Lee C-H, Chiu Y-C, Wang T-T & Huang T-H, 2013, *Application and validation of simple image-mosaic technology for interpreting cracks on tunnel lining*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 34. Elsevier.

Lee C H, 2012, *Tunnel Inspection and Maintenance in Taiwan*. Technical Seminar, HKIE Geotechnical division, Hong Kong.

Lee C-H, Chiu Y-C, Wang T T & Huang T-H, 2013, *Application and validation of simple image-mosaic technology for interpreting cracks on tunnel lining*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 34. Elsevier.

Lin Y, Chang C, Kuo S F & Liou H C, 2003, *A simple device for detecting impact time in impact-echo testing of concrete*. NDT&E International, Vol 37. Elsevier.

Lindblom U, 2012, *Tidseffektivt underhåll av trafiktunnlar*, FoUVäst rapport 1301, Göteborg.

Ikuma M, 2005, *Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 20, Elsevier.

Feng Q & Jiang B, 2011, *The detection study on the section outline of tunnel*. Advanced Materials Research, Vol 250-253.

Kwon S W, Kim J Y, Yoo H S, Cho M Y & Kim K J, 2006, *Development of wireless vibration sensor using MEMS for tunnel construction and maintenance*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 21. Elsevier.

Mashim H, 2002, *State of the road tunnel safety technology in Japan*. 2002 ITA Open Session: Fire and Life Safety. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 14, Elsevier.

Puente I, Gonzales-Jorge H, Martinez-Sánchez & Adrias P, 2014, *Automatic detection of road tunnel luminaires using a mobile LiDAR system*. MEASUREMENT, Vol. 47, Jan 2014. Elsevier.

Sahranavard H & Aghanoori R, 2006, *Use of new technology in repair and renovation of Haji Abad tunnel*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol.20, Elsevier.

Sato T, Sutoh H, Nishi N & Arai H, 2011, *Identification of Correlation between Demand Performances to Damage of Lining Concrete for Tunnel Management*. Procedia Engineering vol. 14, Elsevier

Song K I & Cho G C, 20xx, *Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method*. NON DESTRUCTIVE TESTING & ENGINEERING JOURNAL. Elsevier.

Suda T, Tabata A, Kawakami J & Suzuki T, 2004, *Development of an impact sound diagnosis system for tunnel concrete lining*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 19, Elsevier.

Victores J G, Martínez S, Jardón A & Balaguer C, 2011, *Robot-aided tunnel inspection and maintenance system by vision and proximity sensor integration*. Automation in construction, Vol 20, Elsevier.

Wang T T, 2010, *Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes*. Eng. Geology, Vol 115. Elsevier.

WANG J, XIE X & HUANG H, 2012, *A Fuzzy Comprehensive Evaluation System of Mountain Tunnel Lining Based on the Fast Nondestructive Inspection*.

Yao F, Shao G, Takaue R & Tamaki A, 2012, *Automatic concrete tunnel inspection robot system*. Advanced robotics.

Yoon J-S, Sagong M, Lee J & Lee K S, 20xx, *Feature extraction of a concrete tunnel liner from 3D laser scanning data*. NDT&E International, Vol. 42, Elsevier.

Yun Y, Bai Y & Liu J, 2012, *Assessment service state of tunnel structure*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 127, Elsevier.

Zheng J V, Liu H J & Zou Z L, 2012, *Defects Inspection and Cause Analysis of Six Tunnels in Chongqing*. Advanced Materials Research, Vol. 261, Elsevier.

8.1.3 Datorlänkar, instrument

<http://www.faro.com/products/3d-surveying/laser-scanner-faro-focus-3d/overview>,

http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-ScanStation-P40-P30_106396.htm)

<http://proto3000.com/goscan3d.php#GoScan:Specifications>,

<http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/products/portable-3d-scanner/technical-specifications-handyscan-3d>)

Roe Peled, <http://www.mv4d.com/>.

<http://www.flir.se/instruments/content/?id=70502&collectionid=1346&col=70499>

<http://www.proceq.com/nondestructivetestequipment/rock-testing/rockschmidt.html>

<http://www.spacetec.de/e-spacetec-ts3.html>

<http://www.trimble.com/construction/DPI-8-Handheld-Scanner>

<http://www.malags.com/resources/white-papers>

Roe Peled, <http://www.mv4d.com/>

(<http://geoslam.com/products/zeb1.html>)

<http://proto3000.com/goscan3d.php#GoScan:Specifications>

<http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/products/portable-3d-scanner/technical-specifications-handyscan-3d>

8.1.4 Datorlänkar, inspektionsregistrering

Spacetecs "Tunnel-Inspector" (<http://www.spacetec.de/e-tunnel-inspector.html>)

Bentley Systems "InspectTech" (<http://www.bentley.com/en-US/Products/InspectTech/>)

Ambergs "TunnelMap" (<http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/tunnel-inspection/tunnelmap/>).

8.2 Arbetsmetoder

Pandey D & Piplewar S B, 2013, *Maintenance and repairs of traffic tunnels – a case study of Dereasa Gondia district, Maharashtra, India*. Int. J. Struct. & Civil Engg. Res.

Ansell A, 2004, *In situ testing of young shotcrete subjected to vibrations from blasting*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 19. Elsevier.

Ansell A, 2010, *Investigation of shrinkage cracking in shotcrete on tunnel drains*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 25. Elsevier.

Bernard E S, 2007, *Early-age load resistance of fibre reinforced shotcrete linings*. Journal of Technologies in structural engineering. Penrith, Australia.

Broch E, Grøv E & Davik K I, 2002, *The inner lining system in Norwegian traffic tunnels*. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 17. Elsevier.

Inokama A & Inano S, 1996, *Road tunnels in Japan: deterioration and countermeasures*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY Vol. 11. Elsevier.

Long G-C, XIE Y-j, DENG D-h & Li X-k, 2011, *Deterioration of concrete in railway tunnels suffering from sulfate attack*. J. Cent. South Univ. Technol., Vol. 18. Beijing, China.

Sato T, Sutoh A, Nishi H & Arai H, 2011, *Identification of Correlation between Demand Performances to Damage of Lining Concrete for Tunnel Management*. Procedia Engineering, Vol. 14. Elsevier.

8.3 Tunnelsäkerhet

Amundsen F H & Ranæs G, 2000, *Studies of accidents in Norwegian tunnels*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 16. Elsevier.

Caliendo C & De Guglielmo M L, 2012, *Accident Rates in Road Tunnels and Social Cost Evaluation*. Procedia, Vol. 53. Elsevier.

Haack A, 2002, *Current safety issues in traffic tunnels*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 17. Elsevier.

Kazaras K, Kirytopoulos K & Rentizelas A, 2012, *Introducing the STAMP method in road tunnel safety Assessment*. Safety Science, Vol. 50. Elsevier.

Nexco, 2012, *Accident at Sasago Tunnel on the Chuo Expressway*. Bulletin, Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport & Tourism.

Ramachandran G, Ciavattone E & Morto A, 2011, *Restoration Measurements on an IP/MPLS Backbone - The Effect of Fast Reroute on Link Failure*. IEEE Report.

Vuilleumier F, Weatherill A & Crausaz B, 2002, *Safety aspects of railway and road tunnel: example of the Lötschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel*. ITA Open Session: Fire and Life Safety. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 17. Elsevier.

Yeung J S & Wong Y D, 2013, *Road traffic accidents in Singapore expressway tunnels*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 38. Elsevier.

Yuan Y, Bai Y & Liu J, 2012, *Assessment service state of tunnel structure*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 27. Elsevier.

Zhuang-lin M, Chun-fu S & Sheng-rui Z, 2009, *Characteristics of traffic accidents in Chinese freeway tunnels*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 24. Elsevier.

8.4 Management

Alvear D, Abreu O, Cuesta A & Alonso V, 2003, *Decision support system for emergency management: Road tunnels*. Tunneling and Underground Space Technology 18 (2003), pp 161–169. Elsevier.

Asakura T & Kojima Y, 2003, *Tunnel maintenance in Japan*. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp 161–169. Elsevier.

Balaguer C, Montero R, Victores J G, Martínez S & Jardón A, 2014, *Towards Fully Automated Tunnel Inspection: A Survey and Future Trends*. 31st Int. Symp. On Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014).

Choi J S, Ryu H H & Cho G C, 2006, *Electrical resistivity-based rock mass classification for tunneling*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 21. Elsevier.

Eidsnes H, 2008, *Drift og vedlikehold av tunneler*.

Fekete S, Diederichs M & Lato M, 2010, *Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels*. TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, Vol. 25. Elsevier.

Jafari M et al, 2010, *Inspection and rehabilitation of Heroes Highway tunnel in Connecticut*, Proceedings North American Tunneling].

Jernbaneverket, 2013, *Handlingsprogram 2014-2023*, Oslo.

Loupos K, Amditis A, Stentoumis C, Chrobocinski P, Sas C, Victores J, Wietek M, Panetsos P, Roncaglia Camarinopoulos S & Kalidromitis V, 2012, *Robotic Intelligent*

Sandrone F, 2012, *UIC Project: Assessment of tunnels: SBB Tunnels*. SBB Swiss Federal Railways (Switzerland) report to UIC, International Union of Railways. Skoglund S, 2012, *Nyttan av LCC-analyser vid planering av underhållsarbete i SL:s spårtunnlar*, Examensarbete, KTH Arkitektur och samhällsbyggnad.

Skoglund S, 2012, *Nyttan av LCC-analyser vid planering av underhållsarbete i SL:s spårtunnlar*, Examensarbete, KTH Arkitektur och samhällsbyggnad.

Statens Vegvesen m.fl., 2007, *Rapport Tunnelsikkerhet*, Oslo.

Tsuno K, 2012, *Maintenance of railway tunnels with smart technology*. CSIC – JSPS International Symposium

Vision and Control for Tunnel Inspection and Evaluation. Report from the ROBINSPECT EC Project.

Watanabe, Hosomi M, Yuno K & Hashimoto C, 2000, *Quality evaluation of shotcrete by Acoustic Emission*. Construction and Building Materials, Vol. 24. Elsevier.

8.5 Svenska regelverk

TRVK Tunnel 11, Trafikverkets tekniska krav Tunnel. TRV Publikation 2011:087, Borlänge.

TRVR Tunnel 11 – Trafikverkets tekniska råd Tunnel. TRV Publikation 2011:088, Borlänge.

TRV, 2014, *Projektering av bergkonstruktion*. TRV Publikation 2014:144, Borlänge.

VV, 2007, *Förvaltning av tunnlar med hjälp av BaTman*. Borlänge.

VV, 2008, *BaTman – Tillämpning av mätmetoder för bergtunnlar*. Borlänge.

VV, 2007, *Koder för inspektion av byggnadsverk. Del 3: Konstruktionsdelar för tunnlar*. Vägverket Publikation 2007:57. Borlänge.

VV, 2004, *Inspektionshandbok för tunnlar*. Bergab, Göteborg.

Bilaga 1. Delrapport Arbetsgrupp 1: Snabba tunnelinspektioner

Petter Engvall*, Lennart Gimring***, Jaana Gustafsson**, Claes Lenninger** och Bengt Ludvig*

*PetroTeam **Tyréns ***ÅF Infrastruktur

Sammanfattning

Inspektion av tunnlar sker idag ofta med hjälp av bomknackning och okulär besiktning av de synliga delarna. Detta arbete är tidskrävande vilket ofta är problematiskt i tunnlar med trafik då hela eller delar av tunneln måste stängas av medan arbetet fortgår. För att ge bättre täckning i tunneln samt ökad hastighet vid inspektionen presenteras i rapporten ett antal tekniska instrument. De som anses ha störst potential vid tunnelinspektioner är instrument för avståndsmätning (laser, IR-ljus), termografiska instrument samt georadar

Inledning

Behovet av att inspektera bergtunnlar och bergrum är i dag stort. I många av våra trafiktunnlar, speciellt tåg-tunnlar, är kapacitetstaket redan nått vilket gör tiden för inspektioner i förebyggande syfte mycket knapp. Behovet av instrument för att hjälpa och underlätta vid inspektion är därför stort.

Behov

Beroende av tunnelns design och utformning är inspektionsbehovet olika. I tunnlar med råa bergytter måste inspektionen avgöra om det finns bomma block som riskerar att falla ned. I tunnlar med sprutbetong är det istället bom sprutbetong och vatten bakom sprutbetongen som är av intresse.

Instrument

En mängd instrument finns som kan nyttjas vid inspektioner av tunnlar. I denna rapport kommer dock endast ett fåtal av dessa instrument behandlas, huvudfokus ligger på instrument som skulle kunna nyttjas i förebyggande syfte för att i tid upptäcka var nedfall av block eller sprutbetong kan ske. De instrument som ingår är de som i dagsläget anses ha störst potential gällande snabba tunnelinspektioner (tillgänglighet, prisbild, hastighet).

Laser

Laserinstrument används idag för att skapa en digital, tredimensionell avbildning av allt ifrån byggnader, broar och tunnlar till små konstföremål, fossil etc. Beroende av vad det är som skall avbildas nyttjas olika instrument med olika noggrannhet. Gemensamt för dem är att de sänder ut en eller flera laserstrålar som med hjälp av omriktare, exempelvis speglar, skickas vidare mot sina mål. När strålen träffar en yta studsar den tillbaka till en mottagare på instrumentet som fångar upp signalen.

Ett fast laserinstrument behöver riktmärken för att det skall vara möjligt att senare foga samman flera mätningar till en fullständig tredimensionell modell. Med "fast" menas i detta sammanhang ett instrument som inte rör sig under tiden datainsamlingen sker, men som därefter kan förflyttas för att göra nästa mätning. Dessa riktmärken ges koordinater och kan bestå av tavlor eller sfärer som placeras väl synligt.

Ett rörligt instrument samlar in data under tiden som instrumentet förflyttas. Dessa instrument kan monteras på bilar (eller andra fordon) som kan förflytta sig med hastigheter upp mot 40 Km/h och kan på så sätt skanna stora områden på kort tid. Noggrannheten vid avståndsbedömning hos dessa instrument är dock inte tillräcklig (i dagsläget cirka 5 cm) för att användas vid tunnelinspektioner i förebyggande syfte. En typ av rörligt instrument med en högre noggrannhet finns idag, se ZEB1 nedan. Detta instrument håller användaren i själv samtidigt som denne rör sig i gånghastighet. Utvecklingen går fort och hastigheten med vilken instrumentet kan förflyttas och noggrannheten i avståndsbedömningen ökar kontinuerligt. Det finns även handhållna mobila instrument som inte kräver ett fordon.

Två typer av laserteknologi för att beräkna avståndet mellan instrument och objekt beskrivs nedan.

Tidmätande avståndsbedömande laser

Denna metod kallas även för "Time Of Flight". En kort ljuspuls skickas ut från instrumentet och reflekteras på en yta. Tiden det tar från det att laserstrålen skickats iväg till dess att den återkommer till instrumentet mäts och på så vis kan avståndet till objektet räknas fram eftersom ljushastigheten är en känd konstant. Denna typ av instrument kan avgöra avståndet till punkter på mycket stort avstånd. Noggrannheten i avståndsbedömningen beror av hur väl det går att mäta tiden mellan det att laserstrålen skickas iväg till dess att den registreras av mottagaren. I dagsläget ger osäkerheten i tidmätningen en avståndsosäkerhet som ligger kring 1,2 – 2 mm.

Länkar:

(<http://www.faro.com/products/3d-surveying/laser-scanner-faro-focus-3d/overview>, http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-ScanStation-P40-P30_106396.htm).

"Triangulerande" laser

Denna metod sänder ut laserstrålen från ett instrument där sändare och mottagare sitter med ett bestämt inbördes avstånd, 5 – 20 cm. Mottagaren består av en kamera där mottagarsensorn registrerar laserpunkten och kan avgöra vinkeln mellan laserstrålen från sändaren och den reflekterade laserstrålen mot mottagaren. I och med att avståndet mellan sändare och mottagare är känt kan avståndet mellan sändare och objekt räknas fram med hjälp av triangulering. Till skillnad från den tidsmätande metoden har den triangulerande metoden en kort räckvidd men en mycket hög noggrannhet. Det finns instrument som på ett avstånd av 1 m har en noggrannhet på 0,1 mm eller bättre. Noggrannheten minskar dock med ökat avstånd till målet. Instrumenten med bäst noggrannhet kan ofta inte användas på avstånd större än 0.5 m medan de med lägre noggrannhet kan användas på upp till 4 m avstånd, noggrannheten ligger då på cirka 0.5 mm. Antalet punkter dessa instrument läser in är mycket stort. Detta medför att de ofta inte kan förflyttas hastigt utan att förlora noggrannhet.

Länkar:

(<http://proto3000.com/goscan3d.php#GoScan:Specifications>, <http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/products/portable-3d-scanner/technical-specifications-handyscan-3d>)

ZEB1 handhållet instrument

En typ av tidsmätande laserinstrument som inte kräver fasta uppställningar. Instrumentet består av en handhållen enhet med en övre del som pendlar fram och tillbaka samtidigt som den sänder ut och tar emot laserpulserna. Enheten skickar ut och tar emot över 40,000 laserpulser varje sekund. Handenheten är kopplad till ett batteripack med dator som kan bäras i ryggsäck. När användaren rör sig ändras avståndet mellan enheten och objekten runt omkring. Instrumentet jämför olika objekt i dess närhet för orientering. Ju fler unika objekt, utstickande delar, som finns desto högre blir noggrannheten. För att detta skall fungera tillfredsställande och utan att propagerande fel i punktmolnet skall bli för stora måste användaren återkomma till utgångspunkten ofta. Instrumentet har en teoretisk noggrannhet på 1 mm på 1 m avstånd. Instrumentet har en maximal räckvidd om 30 m. Efter en undersökning skickas data till tillverkaren via mjukvaran för efter-bearbetning. När bearbetningen är färdig fås ett punktmoln i retur som kan nyttjas i valfri programvara.

(<http://geoslam.com/products/zeb1.html>)

Mantis Vision

En typ av optiskt mätinstrument som projicerar 50 000 infraröda laserpunkter på ytan av objektet som skall läsas in. Varje enskild punkt är unikt utformad vilket gör det möjligt att skilja ut varje punkt i efterhand. När en laserpunkt träffar en yta kommer dess form ändras beroende av ytans vinkel gentemot sändaren. I instrumentets mottagardel sitter en videokamera med infrarödkänsliga objektiv som registrerar punkterna. Dessa behandlas sedan i medföljande mjukvara där varje punkts enskilda deformation omtolkas till ett avstånd. Med

denna information kan sedan en tredimensionell modell skapas. Noggrannheten hos instrumentet ligger på cirka 0,1 % av avståndet, dvs. cirka 1 mm vid avståndet 1 m. Instrumentet är lätthanterligt och kan användas kontinuerligt i 10-metersstapper. Det klarar att läsa av ytor under hög hastighet med bibehållen noggrannhet, i dagsläget 1 m/s. Instrumentet klarar avståndsbedömning vid 0,5 – 4 m med ett optimalt inläsningsavstånd på 2 m. Inga förberedelser behöver göras innan skanning av en ny yta, mjukvaran läser in flera skanningar och kan lägga ihop dem förutsatt att det finns cirka 1 m överlapp. Instrumentet kräver dock dagsljus för att ge ett gott resultat.

Länk:

(Roe Peled, <http://www.mv4d.com/>).

Termografi

Med hjälp av termografiska instrument kan en avläsning av infraröd utstrålning från ett objekt göras. Detta medför att objektets temperatur kan räknas fram utan att objektet behöver vidröras. Dessa instrument finns i olika utförande för olika ändamål. Ett enklare instrument, en så kallad "IR-termometer", läser av den infraröda strålningen i en punkt vilket är användbart exempelvis för att finna dåligt isolerade områden i ett hus eller dylikt. Mer avancerade instrument läser av strålningen i flera punkter samtidigt och kan presentera detta som en bild där olika temperaturer fått olika färger. Känsligheten hos dessa instrument ligger i dagsläget på mindre än 0,02° C med en noggrannhet omkring $\pm 1^\circ$ C. Utvecklingen av dessa "värme-kameror" går mot högre upplösning och större temperaturkänslighet.

(<http://www.flir.se/instruments/content/?id=70502&collectionid=1346&col=70499>)

GPR (Ground Penetrating Radar)

Likt en vanlig radar som använder radiovågor vilka studsar mot föremål använder sig en georadar av elektromagnetiska vågor med olika frekvens vilka studsar mot lager med olika egenskaper i underlaget. Reflektionen registreras i en mottagarantenn och omvandlas till ett radargram, en bild som visar tiden mellan att signalen sändes ut och till dess den återkom. Med hjälp av detta kan ett avstånd mellan instrument och lager räknas fram. Träffar signalen på ett mycket ledande lager, exempelvis vatten eller armering, induceras signalen och reflektion uteblir, det är då inte möjligt att registrera någonting djupare än detta lager. Detta instrument används idag exempelvis för att finna ledningar under asfalterade ytor med mera.

Antennerna som används för att sända och ta emot signalen finns för olika frekvenser. En högfrekvent signal (vanligtvis 2 – 4 GHz) har låg genomträngningsförmåga men ger en hög upplösning. En lägre frekvens, ned till 10 MHz, når djupare men med sämre upplösning. Antennerna delas även in i två olika kategorier, luft-kopplad (air coupled) och mark-kopplad (ground coupled).

Mark-kopplade antenner måste vara i nära kontakt med underlaget för att ge ett gott resultat. Beroende av vilket djup som skall undersökas kan lämplig antenn väljas. För mark-kopplad GPR används relativt höga till mycket låga frekvenser. Antennerna ökar dock i omfång med lägre frekvens, en så hög frekvens som möjligt är därför önskvärd både på grund av upplösningen men även på grund av antenntorlek.

De luft-kopplade antennerna monteras ofta på ett fordon och kan nyttjas vid relativt hög hastighet. Avståndet mellan antenn och underlag kan variera. Maximalt avstånd ligger i dagsläget kring 0.9 m. Frekvensen som används är hög vilket ger en låg genomträngningsförmåga. Exakt djup till ett reflekterande lager fås inte med luft-kopplade antenner, metoden indikerar var mer djupgående undersökningar bör göras.

Länk:

(<http://www.malags.com/resources/white-papers>)

Schmidt-hammare (återstudshammare)

En återstudshammare, eller "Schmidt-hammare" efter uppfinnaren Ernst Schmidt, mäter hur kraftig återstudsen blir när en hammare anbringas mot ett material med en förutbestämd kraft. Hammaren består av en cylinder med en rörlig del som skjuts in i en fjäder när hammaren pressas mot materialet. När fjädern når en viss belastning frigörs en tyngd fäst vid fjädern som slår ned mot materialet som skall undersökas. På detta sätt blir kraften i slaget lika stor vid varje mätning. När tyngden slår mot materialet studsar den tillbaka och hastigheten med vilken den studsar tillbaka mäts och ger upphov till återstudsvärdet, R. Med hjälp av återstudsvärdet kan vissa antaganden om materialet göras. Exempelvis ger en hård, kristallin bergart, exempelvis granit, en kraftig återstud medan en mjukare bergart, exempelvis kalksten, ger en mindre kraftig återstud. Detta beror på att en större del av kraften tas upp av den mjuka bergarten istället för att som i graniten skickas tillbaka genom hammaren. Schmidt-hammare används inom betongindustrin för att avgöra hårdheten hos betong. En Schmidt-hammare avsedd för hårt berg nyttjar en kraftigare fjäder. En korrelation mellan återstudsvärdet, R-värdet, och bergartens enaxiella tryckhållfasthet har observerats, dock beror värdet även av andra faktorer så som sprickighet och ojämnheter i ytan. Försök att finna lösa och bomma block med Schmidt-hammare har gett tevetydiga resultat. Tolkningen av R-värdet behöver korreleras mot tester på den aktuella bergarten för att ge bättre tolkningsmöjligheter. För att minimera problem med ytvittrat berg rekommenderas att en serie om minst 10 försök görs på samma undersökningspunkt.

Länk:

(<http://www.proceq.com/nondestructivetestequipment/rock-testing/rockschmidt.html>)

Instrumentens användbarhet vid snabba tunnelinspektioner

Teoretiskt bör samtliga instrument kunna användas för att underlätta vid snabba tunnelinspektioner. De har dock olika tekniska för- och nackdelar vilka gör dem mer eller mindre användbara beroende av tunnelns utformning, förstärkning etc. Nedan redovisas instrumenten och deras användbarhet vid snabba inspektioner av tunnlar med råa bergväggar och tunnlar med sprutbetong.

Laser

Det tidsmätande laserinstrumentet används idag för att skapa relationshandlingar. Det går snabbt att skapa ett punktmoln med tillräcklig noggrannhet och utan alltför stora förberedelser, instrumentet är tekniskt mycket enkelt att använda. Koordinatsatta referenspunkter måste sättas upp för att flera skanningar skall gå att sammanfoga, dock behöver dessa referenspunkter inte knytas till ett officiellt koordinatsystem, det räcker att programvaran vet vilken referenspunkt som är vilken i varje skanning.

Instrumentet skulle teoretiskt kunna nyttjas för att se partier och områden i tunneln där berget eller sprutbetongen rör på sig. För detta krävs först att en referensmodell av tunneln upprättats, mot vilken alla andra skanningar jämförs. En sådan modell kan skapas med mycket hög noggrannhet med hjälp av tidsmätande laserinstrument i kombination med triangulerande laserinstrument. En inspektion av tunneln kan senare göras med hjälp av inskanning av tunneln med laserinstrument. Denna skanning jämförs med referensmodellen och områden som skiljer sig åt mellan skanningarna kan undersökas noggrannare. Dock är noggrannheten vid en snabb inskanning av tunneln inte lika hög. För att upptäcka områden där berget eller sprutbetongen rört på sig men ännu inte fallit ut bör noggrannheten i inskanningen vara bättre än 1 mm. I dagsläget gör detta att användbarheten sjunker för snabba tunnelinspektioner. Dock kan det krävas större rörelser innan utfall sker, dessa rörelser kan troligen genom upprepade laserskanningar och jämförelse mellan punktmolnen. Ett triangulerande handhållet laserinstrument klarar denna noggrannhet men att använda ett sådant minskar hastigheten vid inspektionen då instrumenten inte klarar hög hastighet och fler skanningar måste göras från mycket nära avstånd.

Andra problem vid laserskanning är exempelvis att den ojämna bergytan i en sprängd tunnel ger upphov till många kanter. Om laserstrålen träffar en sådan kant kan en del av strålen reflekteras medan den andra delen

fortsätter. Om den senare träffar en ny yta och reflekteras kommer instrumentet motta två reflektioner med olika tidsintervall vilket ger upphov till brus. Med hjälp av filtrerande mjukvara kan detta brus minskas genom att exempelvis endast använda tidsvärdet från den första reflekterade ljusstrålen. Dock kan allt sådant brus inte reduceras och filtreras bort.

Instrumenten lämpar sig väl för arbete i tunnlar då de inte är beroende av externt ljus. Förhållandena i tunnlar är dessutom ofta stabila och förutsägbara och väder och vind har sällan någon inverkan.

Det mobila instrumentet, ZEB1, är lätt att använda och hantera, det kräver inga fasta uppställningar eller punkter för att fungera och själva datainsamlingen är snabb. Tester visar dock att det ofta blir en del brus som minskar noggrannheten vid mätningar (James & Quinton, 2013). Detta går att minimera genom att planera hur undersökningen skall gå till och genom att ofta komma tillbaka till utgångspunkten. Reducering av brus kan även ske i ett senare skede vid bearbetning av punktmolnet. Instrumentet har en maximal räckvidd om 30 m vilket gör att det kan nyttjas i både stora tåg- och vägtunnlar och i mindre tunnlar, exempelvis ledningstunnlar. I dagsläget är instrumentets noggrannhet inte tillräcklig för att nyttjas i syfte att upptäcka block eller sprutbetong som rört sig och riskerar att falla ner om rörelsen är mindre än 1 mm. Flexibiliteten hos instrumentet gör det dock mycket intressant för att dokumentera områden med propagerande skador, exempelvis mindre utfall som sker i anslutning till en dålig zon. Jämförelse mellan inskanningar från flera olika tillfällen ger då en bild av hur pass snabbt förloppet är. Även en specifik skada eller område kan lätt följas upp med ett mobilt bärbart instrument och fotografier. Som för de andra instrumenten är utvecklingen snabb och noggrannheten kommer troligtvis att öka. Insamlad data från undersökningen måste dock överföras till en tjänsteleverantörsserver för efter-bearbetning innan ett användbart punktmoln fås fram.

Mantis Vision

I kombination med tidsmätande laser skulle detta instrument kunna vara ett alternativ till triangulerande laser. Noggrannheten är tillräcklig vid undersökning nära bergytan och hastigheten med vilken en skanning kan utföras är relativt hög. Vid områden där tidigare inspektioner indikerat problem skulle detta instrument kunna nyttjas för detaljundersökningar. Nackdelarna är dock att det inte går att skanna stora ytor i en omgång, och att ytorna måste undersökas från nära avstånd för att noggrannheten skall bli tillräckligt hög. Instrumentet är robust byggt för att kunna nyttjas i extrema miljöer och lämpar sig därför väl för tunnelbruk. Det krävs dock bra ljusförhållanden för att ge ett gott resultat, detta är inte alltid lätt att åstadkomma i en tunnel.

Termografi

Värmekameror har idag en mycket hög känslighet vilket gör dem användbara för att upptäcka områden med mycket små temperaturdifferenser. Noggrannheten är i detta fall av mindre betydelse, den exakta temperaturen skiftar exempelvis beroende av årstid, det är framför allt skillnader i temperatur som undersöks. Det skulle exempelvis kunna röra sig om områden där vatten finns bakom sprutbetongen eller i en krosszon i berget. När vattnet når tunnelväggen eller sprutbetongen och dunstar ger det upphov till en minimal men mätbar temperaturdifferens, området där vatten finns ser i den termografiska bilden ut att vara kallare än omgivande berg. Tester har utförts där olika defekter gjutits in i betongblock vilka sedan undersökts med termografiska instrument (Haack et al., 1995). Bland annat undersöktes den termografiska signaturen som tomma kaviteter, vattenfyllda kaviteter och sprickighet gav upphov till. Resultaten visade att infraröd termografi var användbart för att lokalisera sprickor med vatten förutsatt att det fanns en temperaturdifferens om 2° C mellan området där vatten fanns och omgivande material. Torra sprickor kunde ej lokaliseras. De termografiska instrumenten är idag betydligt känsligare vilket gör det troligt att även sprickor med mycket litet vatten och mindre temperaturdifferens kan lokaliseras. Metoden är snabb och stora ytor kan undersökas löpande utan avbrott. Ett handhållet instrument har dock nackdelen att operatören själv måste se till att samtliga delar av tunneln undersöks och dokumenteras. Instrumentet medger en bedömning på plats i tunneln var mer ingående undersökningar behöver göras. Utvecklingen av mindre och lättare instrument, i storleksordningen en mobiltelefon, underlättar för inspektören att alltid ha instrumentet med sig.

Termografiska instrument finns i flera olika utföranden och modeller finns som klarar tunnelmiljö utan problem.

GPR (Ground Penetrating Radar)

Georadar används idag i en mängd undersökande infrastruktur-projekt. Ofta handlar det dock om att undersöka nedåt, exempelvis under asfalterade ytor, bakom betong eller liknande. För att använda instrumentet i taket av en tunnel krävs att instrumentet monteras på ett fordon. Båda typer av antenner, luft-kopplade och mark-kopplade, går att använda i relativt hög hastighet utan att försämra upplösningen. I en bergtunnel med råa väggar är ojämnheter ofta stora och en markkopplad antenn kan därför vara svårt att framföra utan att avståndet mellan antenn och bergvägg blir för stort. I en tunnel med lining är det lättare att hålla avståndet konstant eftersom det liknar samma situation som när en undersökning görs på plan mark. Används en luft-kopplad antenn inverkar inte avstånden mellan antenn och bergvägg lika mycket vilket gör det lättare att göra en undersökning med hög hastighet. Oavsett antenn-typ kan flera undersökningsprofiler göras längs tunnelns väggar och tak och kombineras. Behovet av noggrannhet i undersökningen styr hur många undersökningsprofiler som behöver göras. Vid undersökningar som gjorts i USA fann man att det med luft-kopplade antenner var möjligt att finna områden med håligheter eller fuktinträngning men att det behövdes ytterligare metoder, exempelvis mark-kopplade GPR-antenn, för att exakt avgöra djupet (SHRP 2 Renewal Project R06G, 2012). Georadar kan även användas till att kartlägga läget av vittrade zoner. Eftersom vatten och metallarmering slår ut signalen bör man i förhand ha undersökt vilken armering som används i tunneln. Är tunneln förstärkt med stålfiberarmerad sprutbetong bör metoden inte användas.

Schmidt-hammare

Med hjälp av en Schmidt-hammare kan områden med bom sprutbetong eller dåligt berg lokaliseras genom att återstudsvärdet, R-värdet, är lågt där berget eller sprutbetongen är mjukare. Detta förutsätter dock att inspektören fysiskt har kontakt med de områden som skall studeras vilket betyder att inspektionen måste göras från nära avstånd. Inspektören måste även välja ut platser att testa. Metoden ter sig varken snabbare eller effektivare än inspektion med skrotspett och bomknackning, en erfaren inspektör kan snabbt avgöra huruvida sprutbetongen är bom eller ej utifrån ljudet. Schmidt-hammaren behöver även ett antal tester av samma bergart samt ett antal upprepade provningar för att ge ett medelvärde. Detta betyder att undersökningen måste göras upprepade gånger på samma punkt, vilket sänker hastigheten vid inspektionen.

Spacetec kombinationsinstrument

Spacetec har kombinerat tre olika instrument för att inspektera tunnlar. Deras instrument monteras på ett fordon som körs genom tunneln. Instrumentet sticker ut framför eller bakom fordonet. Det använder tre samtidiga datakanaler vilka ger en optisk bild (synligt ljus), en termografisk bild samt en tredimensionell modell av tunneln. Kanalerna kan visas var för sig eller sammanfogas till en bild av tunneln. En tidsmätande laser mäter av en linje, en sektion, vinkelrätt tunneln 300 gånger per sekund. När fordonet med instrumentet rör sig skapas på så sätt flera sektioner varje sekund som av mjukvaran bildar en tredimensionell modell av tunneln. Bilderna med synligt respektive infrarött ljus åskådliggörs tillsammans och gör det möjligt att särskilja mellan exempelvis vatten bakom sprutbetong och fukt från ett ventilationsrör eller liknande.

Instrumentet är byggt för montering på fordon, det är därmed inte mobilt och inspektören kan inte själv ha med sig instrumentet in i tunneln.

Länk:

(<http://www.spacetec.de/e-spacetec-ts3.html>)

Programvara för att tillhandahålla information

Vid varje inspektion eller besiktning som utförs samlas stora mängder med data in, denna data kan bestå av olika format, exempelvis nedskrivna på papper samt digitala fotografier. Med digital insamling av all data kan

hanteringen göras snabbare och även tillhandahållas på ett bekvämt sätt inför nästa besiktning. Ett flertal programvaror och tjänster finns för detta, exempelvis Spacetecs "Tunnel-Inspector" (<http://www.spacetec.de/e-tunnel-inspector.html>), Bentley Systems "InspectTech" (<http://www.bentley.com/en-US/Products/InspectTech/>) eller Ambergs "TunnelMap" (<http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/tunnel-inspection/tunnelmap/>). Med hjälp av dessa programvaror kan användaren ta del av tidigare inspektionsmaterial, foton, anteckningar, relationshandlingar, 3D-modeller etc för att kunna skapa ett inspektionsprogram. Flera tunnlar kan samlas i en databas och programmen gör det enklare att förbereda arbetet genom att analysera behovet av inspektion och renovering. Statistik så som antal besiktningar, skador, kritiska områden etc kan tas fram åt användaren vilken då får en bättre överblick och kan bestämma rätt åtgärd och prioritetsordning i ett tidigt skede.

När inspektionen utförs kan information om tunneln visas på en bärbar enhet så att användaren kan jämföra tunnelns status med senaste besiktningen. Detta gör det enklare att upptäcka propagerande skador och avgöra renoveringsbehovet i tunneln.

Slutsatser och rekommendationer

Samtliga av ovan nämnda instrument är användbara inom olika områden vid en tunnelinspektion. För en inspektion i en trafiktunnel är dock tidsaspekten viktig. Instrument och metoder för snabba inspektioner bör således kunna samla in information om ytor, inte bara punkter i tunneln. Av de instrument som studerats är det framför allt laserinstrumenten, de termografiska instrumenten samt georadar som är de mest intressanta. Inget av instrumenten kan i dagsläget eliminera behovet av manuell bomknackning och okulär inspektion. Instrumenten kan dock utgöra ett stöd för inspektören genom att ge indikationer på möjliga problemområden. Enklare, korta inspektioner kan även utföras oftare med hjälp av instrumenten. För de flesta instrumenten krävs endast en eller två personer. Detta gör det möjligt att utföra snabba inspektioner i tiden mellan huvudinspektioner som ändå ger en bra översyn av hela tunneln.

Behov av utveckling

För att den snabba laserskanningsmetoden skall kunna nyttjas fullt ut bör noggrannheten vid avståndsbedömningen vara bättre än 1 mm. För den triangulerande lasern gäller att avståndet med vilket man kan nyttja instrumentet ökas, för att vara riktigt användbart bör man kunna mäta in objekt på 8-10 m avstånd utan att förlora noggrannheten. Detsamma gäller Mantis Vision som i dagsläget klarar av en hög hastighet vid inskanning men där en högre noggrannhet behövs.

Georadar med antenner som inte behöver vara i direkt närhet av underlaget, så kallade luft-kopplade antenner, är en metod med stor potential. Önskvärt vore utrustning som klarar ett större avstånd mellan antenn och vägg och som penetrerar djupare än dagens instrument. I tunnlar med lining ger instrument med mark-kopplade antenner bättre genomträngningsförmåga och högre upplösning.

De termografiska instrumentens noggrannhet är hög och de är relativt lätta att hantera. Önskvärt vore mindre och lättare instrument.

En utveckling av Schmidt-hammaren med inte bara elektronisk registrering av R-värdet, utan även en funktion för att tolka ljudet när hammaren slår mot berget. Om en databas kan byggas upp med olika ljud skulle denna potentiellt kunna nyttjas för att avgöra om berget är bomt eller har hög sprickfrekvens.

De programvaror för inspektioner som finns idag har stor potential. Troligtvis är de dock för komplexa för att nyttjas fullt ut. För att de skall komma till användning vid planering, utförande och uppföljning av tunnelinspektioner måste de vara intuitiva och lättanvända. De bör även använda ett öppet system för databaser och dylikt samt vara tillgängligt till samtliga system på marknaden (Windows, Apple, Android). Önskvärt vore även ett modulbaserat system som kan byggas ut av användarna. På så sätt skulle systemet anpassas för olika typer av tunnlar (och andra inspektionsobjekt). Med hjälp av datainsamlingen från flera olika projekt och tunnlar kan

även en databas byggs upp för att lättare göra jämförelser mellan tunnlar och på så sätt statistiskt avgöra hur pass allvarlig en skada är. Detta i sin tur ger ett bättre underlag vid planering av framtida inspektioner.

Bilaga 2: Arbetsgrupp 1: Specialrapport Markradar

Jaana Gustafsson, Tyréns AB

2014-09-23

Inledning

SBUF-projektet Snabba inspektioner syftar till att finna och ge tillgång till metoder för att snabbt, enkelt och pålitligt ge information om tunnlar beskaffenhet gällande deformationer, sprickor etc. Denna genomgång skall kort belysa en möjlig metod för detta; markradar (även kallat georadar eller GPR).

Kort markradarteori

Markradar är en icke-förstörande geofysisk metod som arbetar med elektromagnetiska vågor i olika frekvenser. Man kan enkelt jämföra det med ett ekolod fast för mark och byggnader. En sändarantenn skickar ut elektromagnetiska vågor som studsar på lager, objekt i marken. Denna återreflektion samlas in med mottagarantenn. Högfrekventa markradarantennerna ser små detaljer men inte så djupt och används därför oftast för olika typer av konstruktioner. Lågfrekventa antenner ser större strukturer och djupt vilket gör att de är mer lämpliga att använda för geologisk kartläggning. Vilken antennfrekvens (vanligen mellan 4GHz till 20MHz) man vill använda blir alltså avhängigt syftet med undersökningen och av önskat mätdjup och önskad upplösning (resolution).

Markradarmetoden ger inga klara svar om jordartsfördelning, kornstorlekar, material-sammansättning, halter eller exakta storlekar, men däremot ser man skillnader i struktur, lagergränser och läge för olika typer av objekt. Med markradar undersöker man både mark och konstruktioner och i både 2D och 3D. Mätningarna görs som enstaka långa profiler, som många parallella mätlinjer eller fritt anpassat till undersökningsområdet

Det finns två typer av radarantennerna:

- **AC (Air –coupled)** Luftkopplade antenner, kan användas i hög hastighet. Högfrekventa antenner. Vanligen användas för tunnlar, väg- och brounderökningar.
- **GC (Grond-coupled)** Markkopplade antenner, bättre djuppenetration, i relativt höga till mycket låga frekvenser. Vanligen användas för geologisk, arkeologisk undersökning men även för tunnlar och vägar.

Båda antenntyperna är tillräckligt snabba för att mäta i lugnt trafiktempo (20-50 km/h) och samla på sig tillräcklig mängd mätpunkter.



Luftkopplad antenn



Markkopplad antenn

Kort litteraturgenomgång

Det finns en stor mängd av referenser om markradar för olika typer av undersökningar i tunnlar. Referenserna använder sig oftast av en hel verktygslåda med icke-förstörande metoder, och inte bara en. En kombination av olika undersökta fysikaliska egenskaper ger oftast ett bättre slutresultat och en mer fullständig bild. De flesta tunnarna i referenserna är linade, men referenser finns även för ren bergsinspektion med markradar. Syftet är oftast att:

För linade tunnlar:

- Kartlägga djup till berg.
- Identifiera och lokalisera armringsnät och armeringsjärn/ förstärkningsåtgärder av olika slag.
- Undersöka konditionen av lining (tjocklek, sprickighet, delaminering o.s.v.).
- Lokalisera försämrade betong och håligheter (och honeycombs).
- Undersöka injekteringsbruket mellan lining och berg.
- Lokalisera lösa stenar/block ovanpå lining.

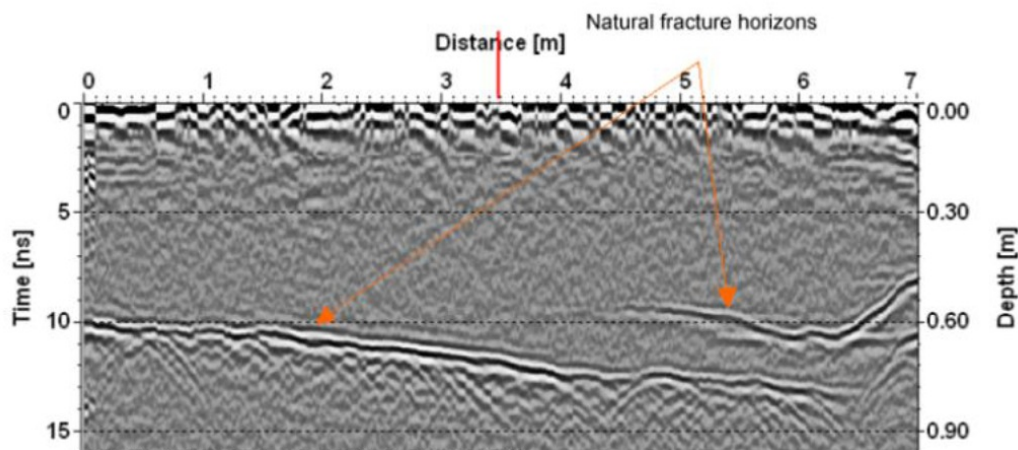
För berg:

- Lokalisera sprickor.
- Lokalisera bankningsplan.
- Lokalisera homogena bergvolymmer.
- Kartlägga EDZ (Excavation Damaged Zone).

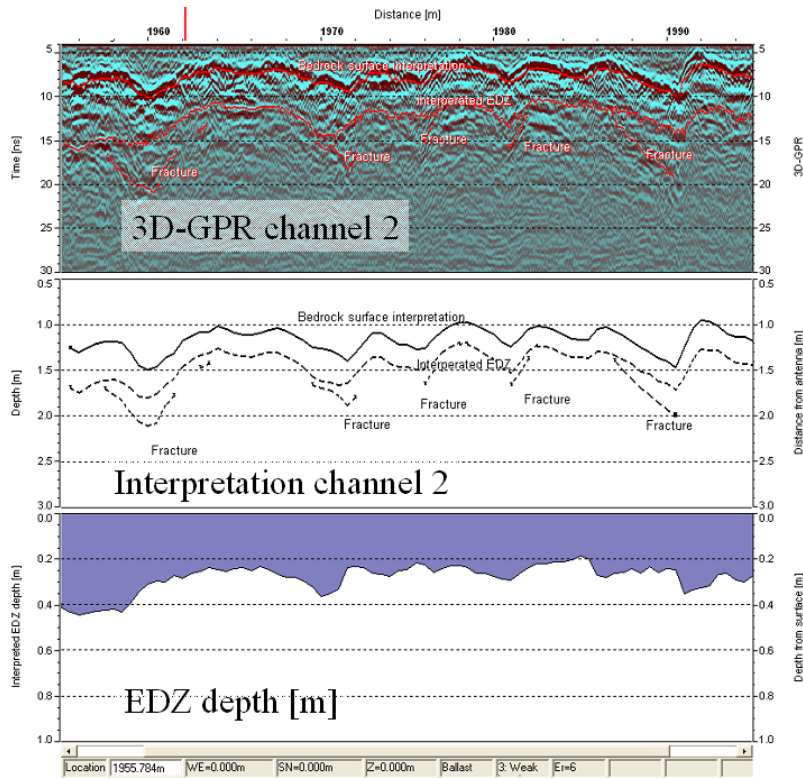
Notera, att mängden referenser för långtidsövervakning (mätning i tidserier) är mycket begränsad. Exempel finns på mätningar före och efter sprängning, där tydliga skillnader kan ses i resulterande radarbild.

Hur mätningarna genomförts praktiskt skiljer sig från mätning till mätning, beroende på bl.a. undersökningsområdets storlek och syfte. Ibland har man endast gjort ett par radarlinjer i tak och väggar och ibland mycket detaljerade 3D studier. Egen anpassning av mätmetodik (hur antennen skall föras fram) får göras i de allra flesta fall.

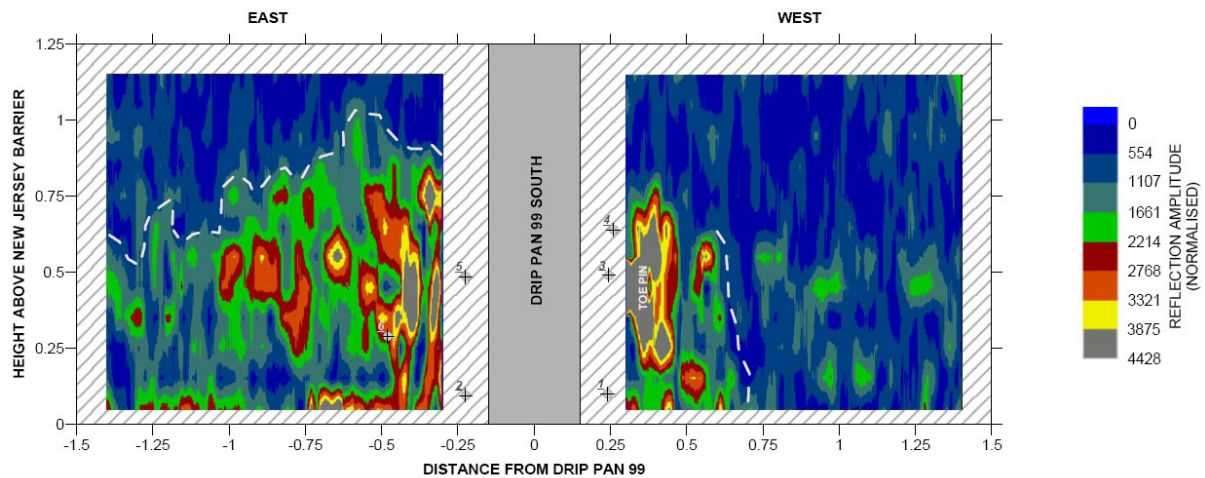
Nedan visas ett några exempel på hur radardata kan se ut från olika typer av berg- och tunnelundersökningar.



Figur. Radargram med tydliga bankningsplan på olika djup.



Figur. Kartläggning av EDZ (zon påverkad av sprängning). Överst visas radardata (i ett s.k. radargram) och under detta tolkningen.



Figur. 3D mätning på yta (1.25x1.25 m) där de röd-gula områdena visar på delamination och de blå områdena på en bra konstruktion.

Under 2012 utgavs i USA en mycket omfattande rapport om inspektionsmetoder för tunnel lining (MAPPING VOIDS, DEBONDING, DELAMINATIONS, MOISTURE, AND OTHER DEFECTS BEHIND OR WITHIN TUNNEL LININGS, The Strategic Highway Research Program 2 Transportation Research Board of The National Academies, 2012). I denna tas en mängd olika mätmetoder upp och nedan syns de sammanfattande resultaten för markradarmetoden.

Table. Summary of NDT Devices.

Device	Accuracy	Detection Depth	Deterioration Mechanisms Detected	Tunnel Lining Types	Other information
Air-coupled ground-penetrating radar (GPR)	Locates defects within 1 foot of its actual location	Does not measure depth, but indicates areas of high moisture or low density (high air voids). Such areas may represent problems within or behind the tunnel lining	Tile debonding, delaminations, air filled voids, water filled voids, moisture intrusion	Concrete, Tile-lined Concrete, and Shotcrete	This is a scanning tool that can indicate where to conduct testing with in depth devices
Ground-coupled GPR	Can determine defect depth within 10% of the actual depth without reference cores, 5% if cores are available	The device can possibly detect defects at any depth within or immediately behind tunnel linings. However, specimen testing indicates it cannot locate 1 square foot voids in steel plates behind tunnel linings	Delaminations, air filled voids, water filled voids, moisture intrusion	Concrete, Tile-lined Concrete, and Shotcrete	Experienced personnel are needed to interpret defect locations and depths from the GPR scans. Specimen testing indicates it cannot locate 1 square foot voids in steel plates behind tunnel linings

Och enligt samma undersökning är AC GPR bra för information om generell nominell lining tjocklek och intern lagring. AC ger även info som kan relateras till debonding (och vidare undersökas med GC GPR). Man får även information om skillnader i dielektricitet vilket kan relateras till fukt i lining eller områden med håligheter. GC GPR ger en klar bild över armeringen och anomlierna upptäckta med AC GPR (vilket inte är möjligt med akustiska metoder).

Sammanfattning

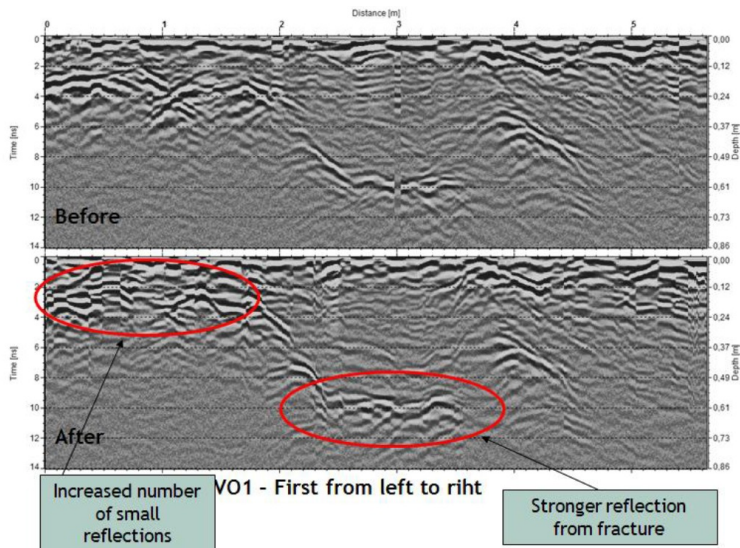
Inom undersökningarna för slutförvar för uttjänt kärnbränsle (både i Sverige och Finland) har en mängd radarundersökningar genomförts för att titta på sprickighet i berg. Mätningarna har dels gjorts på avbanat berg, i befintliga tunnlar och i kapselhål. Nedan sammanfattas en del av erfarenheterna från dessa mätningar (gjorda av Strålskyddsmyndigheten):

Geofysiska metoder har länge hållit löftet om att kartlägga större volymer av berg för att detektera större sprickor som annars skulle förbli icke-synliga bakom gränserna för en utgrävning eller ett borrhål. Fördelarna inkluderar icke-förstörande metod och möjligheten till att utvärdera en stor volym snabbt. Men metoderna har även begränsningar. För sprickkartläggning gäller: i) sprickorna måste vara lämpligt orienterade med avseende på sändare och mottagarantennerna (annars kan dessa förbli "osedda"); ii) kartläggningsdjup och upplösning är oftast i motsatsrelation (med andra ord en högre frekvens ger en högre upplösning men en begränsad djuppenetration); iii) kartläggning av sprickor hänger ihop med graden anisotropi (en torr spricka är mindre "synlig" än vätskefyllda sprickor, som även täta/stängda sprickor är jämfört med öppna); och iv) kartläggningen av sprickor måste tolkas,

vilket medför en subjektivitet både i processeringen av rådata och i identifieringen och begränsning av reflektorer (sprickorna).

Att fundera vidare på

Då vatteninnehållet i den undersökta volymen påverkar mätresultatet bör man ha kontroll på årstidsvariationer för att bestämma det bästa mättillfället för långtids övervakning. Nedan visas ett exempel på hur samma radargram ser ut före och efter vattentillförsel.



Det samma gäller kvalitén på vattnet. Är vattnet i sprickorna salthaltigt påverkar detta radarmätningarna negativt, då konduktiva förhållanden leder till att radarvågans energi dämpas effektivt och ingen information fås från djupet. Även geologin påverkar radarresultatet, där ledande mineral som t.ex. grafit och pyrrit ger en negativ effekt.

Positioneringen av radarlinjerna är även den kritisk om man vill genomföra långtidsövervakning. Mätlinjen bör göras i samma position för att få bästa möjliga referensmaterial. Det har visat sig att vissa anomalier är bäst att markera direkt under mätning för att positioneringen inte alltid håller noggrannheten man behövde. Och däremed inte hittade tillbaka till rätt plats för annan undersökning eller provtagning. Lösningar på detta kan ske t.ex. med olika anpassade fasta installationer i varje aktuell tunnel eller med tydliga referenspunkter som skall passeras vid varje mättillfälle.

Val av antennfrekvens måste göras utifrån syfte med undersökning och rådande geologi och tunnlekonstruktion. Vad är det för sprickbild i aktuell tunnel? Stora, små, ytlig eller djupa sprickor? Vad är det för typ av lining? Täthet på armering? O.s.v.

Troligen behöver man inte använda samma radarutrustning från fall till fall vid långtidsövervakning (då denna typ av utrustning vanligen ej kalibreras). Radarfrekvensen bestämmer signalens utseende och nytillkomna sprickor syns även om antennen bytts ut.

Sammanfattningsvis tror jag radarmetoden är en av flera framkomliga vägar för att komma ett steg närmare snabba inspektioner av olika typer av tunnlar. Med markradar, som för alla annan geofysisk underökning, gäller att resultaten bör/skall kompletteras med annan mätmetod/provtagning för en så säker och stabil tolkning som möjligt.

Bilaga 3. Rapport arbetsgrupp 2: Arbetsmetoder för tidseffektivt underhåll av tunnlar

Thomas Cederhammar (Sika), Tommy Ellison (Besab), Johannes Hansson (Atlas Copco), Hans Hargelius (TrV) och Joakim Karlsson (Bergab)

Inledning

Denna delrapport behandlar den fysiska delen av underhållsprocessen. Här redovisas de arbetsmoment som förekommer när underhållsarbeten i bergtunnlar utförs. Prioritering av aktiviteter grundas i första hand på relativ tidsåtgång, och tanken med detta synsätt är att de processer som är mest tidskrävande har störst förbättringspotential. Rapporten är en nulägesbeskrivning av "best practice". I texten ges några exempel på möjliga förbättringar, men det ska inte uppfattas som att dessa förslag har bevisad effekt eller att andra lösningar är sämre.

För att exemplifiera med erfarenheter från ett verkligt projekt har resultat från utvärderingen av underhållsarbetet i Aspentunneln använts, se Bilaga 4. *Dessa textdelar har skrivits i kursivt typsnitt i framställningen nedan.*

Det ska framhållas att fallstudien avser endast ett projekt med de begränsningar som detta medför i statistisk validitet. Trots detta så kan vissa slutsatser dras av Aspentunneln. Det beror framförallt på att projektet utfördes under en lång tid, 107 skift, och ett antal processer har upprepats många gånger. Dessutom finns nästan alla arbetsmoment som förekommer i underhåll av bergtunnlar representerade i detta projekt. Det enda moment som saknades var injektering. Den viktigaste orsaken till att denna studie kan tillmätas betydelse är dock att det finns en mycket utförlig redovisning av projektet som underlag för en uppföljning, vilket är ovanligt. Exemplet Aspentunneln är en järnvägstunnel, och tyvärr finns inte motsvarande underlag för en vägtunnel. Arbete i järnvägstunnlar ställer stora krav på logistik och planering och kan betraktas som "worst case", medan underhåll i vägtunnlar kan vara något mindre styrt.

Definition av underhåll

Uttrycket underhåll har i svenskan något varierande betydelser. Vanligtvis tolkas ordet som åtgärder för att hålla anläggningens tekniska kvalitet och prestanda på ursprunglig nivå. Det norska uttrycket "vedlikehold" beskriver tydligare vad det handlar om.

När man talar om underhåll kan det ibland ha helt olika betydelse för olika personer eller i olika situationer. Typ av underhållsinsats har stor betydelse för utförande, resurser mm. Det kan vara lämpligt att reda ut begreppen.

Akut avhjälpande underhåll

Trots god tillsyn och väl utfört underhåll kan det inträffa en plötslig och oförutsedd skada i en tunnel som behöver åtgärdas omedelbart. Orsaken kan vara geologiskt betingad eller bero av olyckshändelse. För tunnelägaren är det då angeläget att kunna göra ett snabbt avrop till en entreprenör som är förberedd och har resurser att sätta in omedelbart. I detta fall är det alltså avropstiden och själva insatstiden som ska vara tidseffektiv.

Problemen med underhållsinsatser enligt denna definition är i större utsträckning relaterad till upphandling än en teknisk fråga. I denna rapport berörs detta endast översiktligt.

Planerat underhåll

Planerat underhåll avser uppgradering av tunnelns funktioner så att en säker drift säkerställs under en viss tid fram till nästa planerade insats eller tunnelns återstående livslängd. Efter att behovet av underhåll konstaterats genom inspektion, inleds projektering och planering för insatsen. När arbetet utförs är det väsentligt att det är rätt planerat, med tillräcklig hänsyn till de svårigheter som underhåll på korta dispositionstider innebär. Metoder och fordon för etablering/avveckling och andra icke värdehöjande aktiviteter ska vara effektiva för att skapa tid för själva utförandet. Arbetsmetoder och material ska vara anpassade till snabba insatser. Förstärk-

ningselementen ska till exempel ha nått tillräcklig hållfasthet innan trafikpåsläpp kan göras. Det krävs alltså en helhetssyn för att underhållsarbetet ska bli tidseffektivt.

Det är framförallt den här definitionen av underhållsarbeten som har legat till grund för denna rapport. Fallstudien Aspentunneln är ett exempel på planerat underhåll.

Utförandet

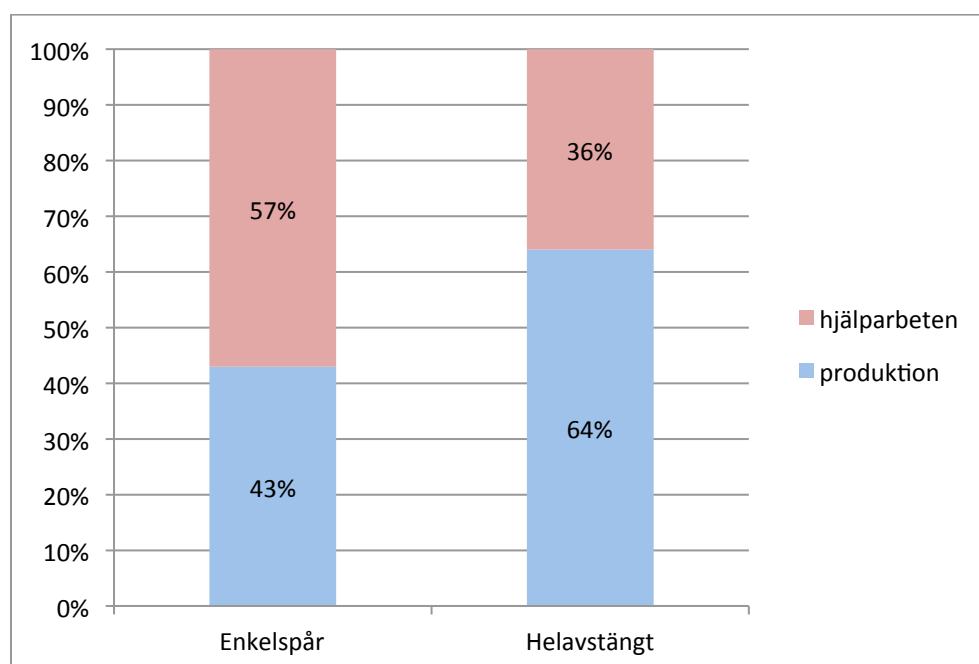
Det som vi oftast tänker på när det talas om tidseffektivt underhåll är själva produktiviteten i utförandet av de åtgärderna som ger ett bestående värde. Värdehöjande aktiviteter ingår i en process som innehåller många icke värdehöjande hjälparbeten, och det är väsentligt att de senare utförs utan att spilla för mycket tid om hela processen ska vara tidseffektiv. Mobila och ändamålsenliga utrustningar och att snabbt kunna byta från ett arbetsmoment till ett annat, resurser för skyddande åtgärder samt materialförsörjning är därför minst lika viktigt som ett effektivt utförande av arbetsmomenten.

Denna definition är inriktad på detaljer i utförandet och är en delmängd av rapporten.

Problembeskrivning

Den tillgängliga produktionstiden vid underhållsarbeten i trafiktunnlar är ibland mycket pressad. Arbetet måste utföras så att störningarna för trafikanterna blir så små som möjligt. Vid större åtgärder delas vanligen tiden upp på många korta tidsperioder. Mellan arbetspassen ska tunneln fungera för den normala användningen. Ofta ges endast tillträde nattetid eller på helger då lågtrafik råder och då omledningar eller begränsningar i trafikflödet kan tillåtas. Det innebär att produktionen störs av dagliga på- och avetableringar, trafikanordningar, skyddsåtgärder, städning mm. Dessa arbeten är inte produktiva, men är nödvändiga för att kunna utföra övriga arbeten med hänsyn till trafikanternas behov och för att skapa en god säkerhet för de som utför underhållsåtgärderna. Det är också vanligt med partiell avstängning, d.v.s. att endast ett spår eller en del av vägen stängs av för trafik. Närhet till trafik och/eller högspänning kan då innebära att produktionen av säkerhetsskäl måste ske med nedsatt produktivitet.

I praktikfallet Aspentunneln, se Bilaga 4, konstateras att när arbetet utfördes samtidigt som ett spår var öppet för trafik, var tidsåtgången för värdeskapande aktiviteter omkring 43 % av den totalt tillgängliga tiden. När båda spåren var avstängda ökade den värdeskapande andelen av tillgänglig tid till 64 %.



Figur 1.1 Aspentunneln ökade tiden för värdeskapande produktion från 43 % av total tillgänglig tid i spår när ett spår var trafikerat, till 64 % av tillgänglig tid med båda spåren avstängda.

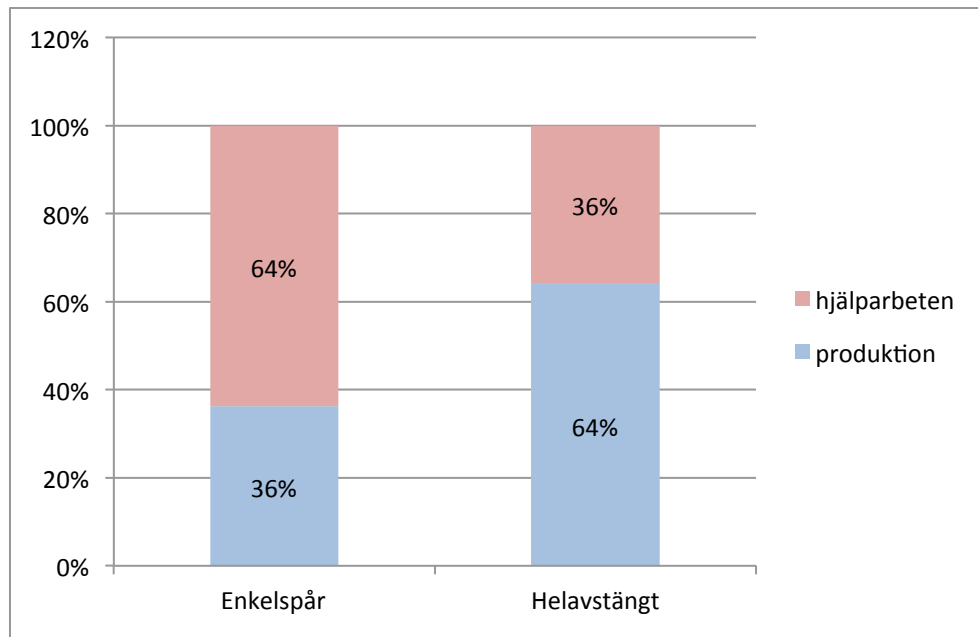
Ovanstående siffror är resultatet av en stor mängd data och är därför relativt säkerställda i detta projekt. Dessutom är det tydligt att produktiviteten är lägre när trafik pågår på ett spår, jämfört med produktiviteten vid helavstängd tunnel.

Med trafik på ett spår och med spänning på detta spårs kontaktledning, måste allt arbete utföras med stor försiktighet, vilket dessutom orsakade en avsevärd kapacitetsnedsättning. För att ta med effekten av lägre produktivitet i jämförelsen har sprutbetong valts ut som representativ för hela arbetet. Att just sprutbetong väljs att utvärdera produktivitet, beror på att det är lätt att bestämma kvantitet och tidsåtgång för detta arbetsmoment fördelat på olika tidsperioder.

Sprutbetongarbete		
	Enkelspår	Helavstängt
arbetstid	771 tim	168 tim
mängd	336 m ³	87 m ³
enhetstid	2,29 tim/m ³	1,94 tim/m ³

Figur 2. Betongsprutning i Aspentunneln kunde utföras mer effektivt när tunneln var helavstängd. Siffrorna avser tillgänglig tid i spår och inkluderar nödvändiga hjälparbeten.

Om man anser att denna produktivitetsskillnad är densamma för övriga arbetsmoment i projektet och lägger till denna effekt till tidsfördelningen i Figur 1, erhålls följande justerade tidsfördelning.



Figur 3 Diagrammet visar andelen värdeskapande produktion i Aspentunneln vid enkelspårdrift respektive helavstängning. Skillnaden ökar om man även tar hänsyn till att produktiviteten blir högre vid helavstängd tunnel.

Fokus riktas oftast mot effektiviseringar i de faktiska produktionsmetoderna. Maskinutveckling och utbildningsinsatser koncentreras på att åstadkomma förbättrad produktivitet i t ex borring, bultsättning och betongsprutning. Det finns med ovan visade tidsfördelning, figur 1 och figur 3, anledning att tro att man kan finna minst lika stor förbättringspotential i de icke värdeskapande processerna. Dessa aktiviteter benämns i fortsättningen hjälparbeten.

Projektets olika faser

Ett byggprojekt oavsett vilken typ kan man dela upp ett antal olika faser. Ett underhållsprojekt kan förenklas till följande delmoment.

- Projektering
- Anbudsarbete
- Upphandling
- Produktionsplanering
- Produktion

Projektering omfattar bland annat inspektion och statusbestämning som behandlas i ett annat kapitel. För entreprenören inleds arbetet med anbudsräkning. Upphandling är en beställarfråga och omnämns bara helt kort nedan. Detta kapitel ägnas i huvudsak åt de två sista punkterna ovan.

Upphandling

Upphandling av underhållsprojekt ingår inte i denna forskningsrapport, och forskningsgruppen har inte den kompetens som krävs för att genomlysna dessa frågor. Det är dock svårt att helt bortse från upphandlingens betydelse för projektets genomförande. Här ges några reflektioner som kan vara till hjälp för upphandlande enheter eller ligga till grund för forskning på området.

Akut underhåll

En snabb insatstid är väsentlig. För att detta ska vara möjligt måste byggherren ha planerat för sådana oönskade händelser. Detta måste då ske i form av upphandling av ramavtal, där entreprenören förbinder sig att ha en sådan beredskap. Byggherren måste i en sådan upphandling specificera vilka resurser som ska finnas tillgängliga och vara beredd att betala för denna beredskap även när den inte används. Graden av beredskap måste ställas i relation till omfattningen av de störningar som drabbar trafikanterna vid en tunnelavstängning, och de samhällskostnader som detta medför.

Planerat underhåll

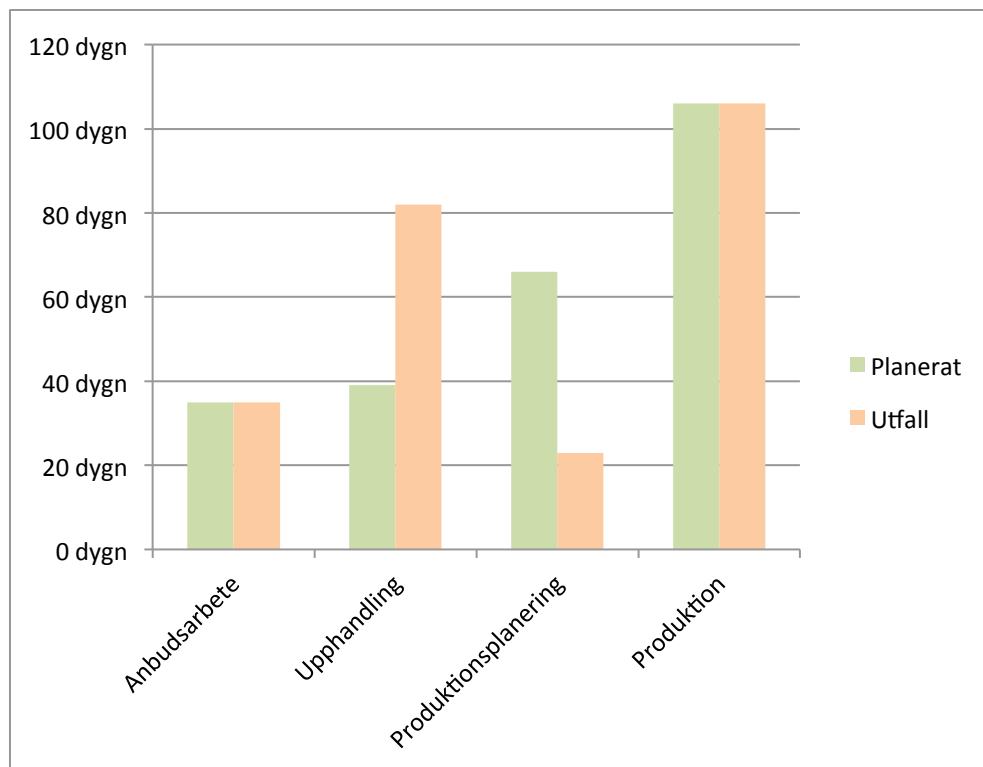
När entreprenören får ett förfrågningsunderlag att räkna på, har vanligen tiderna för utförandet redan lagts fast och kan oftast inte ändras. Detta är särskilt tydligt i järnvägsprojekt eftersom planering av trafiken måste ske mycket långt i förväg. Det är då viktigt att byggherren har en god planering och framförhållning för sådant planerat underhåll.

Om upphandlingen tar längre tid än beräknat av någon anledning, t ex överprövning av tilldelningsbeslut, så kan tiden för produktionsplanering bli mycket snäv. Då gäller det att ha en effektiv process för detta viktiga förarbete. Alltför kort tid för produktionsplanering medför att entreprenören kanske inte kan allokera de mest effektiva resurserna, vilket kan påverka effektiviteten i utförandet negativt.

I Aspentunneln hade tidsperioden för utförande och BUP-tider beslutats nästan två år i förväg. Enligt uppgift från projektledningen är detta normalt för ett så omfattande underhållsarbete som detta. Den höga trafikintensiteten på den aktuella banan bidrog naturligtvis också till detta. Beslutet kan inte ändras i ett senare skede så att tiden förlängs eller förskjuts.

Förfrågningsunderlaget annonserades drygt fyra månader innan arbetet i tunneln skulle inledas. Tiden för anbudsräkning var ungefär fem veckor inklusive jul- och nyårshelger.

Det kan konstateras att den tidplan för upphandling som hade planerats i förfrågningsunderlaget blev avsevärt förlängd på grund av överprövning av tilldelningsbeslut. Tid för produktionsplanering minskade därigenom från cirka tio veckor till ungefär tre veckor. Därmed var det kritiskt nära den gräns då entreprenören hade tvingats tacka nej till uppdraget. Det är svårt att i efterhand bedöma om mer tid för upphandling skulle ha gjort processen mer effektiv, men den snäva tiden innebar en stress som inte gagnar ett välplanerat genomförande. Man kan konstatera att upphandlingen borde gjorts annorlunda för att undvika denna situation.



I Aspentunneln var start- och sluttid för anbudsarbete och produktion låsta. När upphandlingen tog längre tid än planerat minskades därför den tillgängliga tiden för produktionsplanering i motsvarande grad.

Produktionsförberedande arbeten

Detaljplanering

När kontrakt mellan byggherre och entreprenör har tecknats, börjar produktionsplaneringen. Denna fas är kanske den allra viktigaste i projektet, särskilt om det är hög komplexitet som ofta är fallet i underhållsprojekt. Exempel på uppgifter som ska genomarbetas i detta skede är organisation med ansvarsfördelning, resursallokering, arbetsplatsdisposition, detaljerad tidsplanering, kontrollplaner, riskanalyser, arbetsberedningar, samt inköp av material, underentreprenörer och hjälpmedel.

I Aspentunneln kortades den tillgängliga planeringstiden från cirka tio veckor till ungefär tre veckor. Det innebar en hög arbetsbelastning på organisationen innan arbetet i tunneln startade. Med en stor övertidsinsats lyckades planeringen väl, men med något mer tid skulle resultatet blivit ännu bättre. Som exempel kan nämnas att en av underentreprenörerna hade under upphandlingstiden fått ett annat uppdrag för en viktig utrustning samt tillhörande personal. En liknande resurs kunde knytas upp, men en omfattande ombyggnad krävdes för att anpassa denna utrustning till det arbete som skulle utföras. Även uppsamlingsanordningar för spillmaterial och skrotsten kunde eventuellt gjorts annorlunda och mer ändamålsenliga om mer tid hade funnits till förfogande.

Ett annat problem var att betong inte kunde produceras i den tänkta betongstationen, då en serie omfattande gjutningar hade planerats in under den aktuella tiden. Då Aspentunneln krävde nattlig produktion av betong var det också nödvändigt för betongtillverkaren att hastigt ställa om personalplaneringen och även tillgodose semesterkörning. Allt detta kunde dock ordnas med kort varsel i detta fall.

Förprovning av sprutbetong

Sprutbetong kan inte proportioneras med vanliga metoder, och måste därför förprovas för att finna ett lämpligt recept som fungerar produktionsmässigt, och för att säkerställa att föreskrivna krav på hårdnad betong uppfylls. Denna process måste planeras noggrant för att vara utslagsgivande. Helst bör provsprutningen utföras

i en liknande situation som i den aktuella tunneln. Detta är ofta väldigt svårt att genomföra då det saknas berg-
ytter med samma struktur och nedsmutsning. Som alternativ får man då spruta på ett underlag som kan likna
tunnelns väggar så mycket som möjligt, och i en liknande miljö vad gäller fukt och temperatur. Betongen måste
tillverkas i den betongstation som ska användas i projektet, och med de ballastmaterial som avses användas i
projektet. Det senare kan innebära långa och tidskrävande transporter om arbetsplatsen är belägen långt bort.

En förprovning består av ett antal moment;

- Planering
- Provuppställning
- Provsprutning
- Härdningstid
- Laboratieprovning
- Dokumentation och utvärdering

Hela processen tar normalt minst 6 - 8 veckor. Om frostprovning i exponeringsklass XF3 ingår kan det ta mellan
13 - 20 veckor beroende på betongens sammansättning. Förprovningen kan underlättas om entreprenören har
utfört sprutbetong med liknande kravbild i samma område och med samma betongleverantör. Dessa resultat
måste då vara väl dokumenterade och inte vara för gamla, eftersom det sker förändringar i ballastkvalitet och
blandarprestanda.

Generell information:

En sprutbetongkonstruktions utförande påverkas av materialet betong, en accelerator som får betongen att
fästa på berget samt en sprutbetongrigg och dess operatör. För att uppnå bästa möjliga resultat så måste alla
dessa delar fungera ihop. Man kan generellt säga att dessa ingående delar påverkar slutresultatet med 1/3
vardera. När det gäller sprutbetongarbeten vid korta dispositionstider är det ännu viktigare att dessa delar
fungerar för att säkerställa både kvalitet, säkerhet och produktivitet.

Krav från beställaren:

Beställaren ställer krav på betongens hållfasthet utifrån konstruktiva krav och beständighet grundat på den
miljö som betongen exponeras för. Ofta ställs kraven utifrån de krav man har på liknande konstruktioner i ny-
byggnation med livslängdsklassning på 100 - 120 år. När det gäller renovering av befintliga tunnlar så kanske
den tekniska livslängden på betongen kan vara kortare då andra omständigheter kan vara styrande, som att
övrig utrustning i tunneln kanske bara skall hålla i 30-50 år till. Ett annat krav som beställaren också bör an-
vända vid t ex korta dispositionstider är vilken hållfasthet betongen ska ha uppnått för att det skall vara säkert
att släppa på trafik d.v.s. att sprutbetongen inte släpper från berget och falla ner samt orsaka skador på utrust-
ning och personer.

Bindemedel:

Valet av bindemedel d.v.s. cement styrs av den exponeringsklass som betongen anses utsättas för samt före-
skriven livslängd på konstruktionen. Inom nybyggnation av tunnlar så används nästan uteslutande lågalkaliskt-
och sulfatresistent cement som ger förutsättningar för mycket bra beständighet men som har en långsammare
reaktion (Anläggningscement). Vid sprutbetongarbeten med korta dispositionstider är det viktigt att man så
fort som möjligt bygger hållfasthet, därför bör man överväga att använda mer normala cement
(Bygg/Bascement), speciellt där man inte har stora krav på sulfatresistens eller längre livslängd. Det kan även
vara möjligt att uppfylla kraven som ställs på ett Anläggningscement med en viss andel av SH cement i sprutbe-
tongen. Beräkningar baserade på de krav som ställs på cementet i standarden och vad de verkligen innehåller
så kan man teoretiskt blanda in upp till 15-20 % SH utan att man går över gränsvärdet på standarden. Detta får
en mycket positiv inverkan på hållfasthetstillväxten i tidigt skede på sprutbetongen.

Temperaturer:

Reaktionshastigheten hos betong är starkt temperaturberoende. För att ha en bra förutsättning bör inte betongtemperaturen vara lägre än 20 grader vid sprutning och temperaturen på acceleratoren bör vara minst densamma

Arbetsbarhet sprutbetong:

Sprutbetongens sammansättning påverkar starkt slutresultatet av sprutbetongkonstruktionen. För att slutresultatet skall bli så bra som möjligt måste sprutbetongen vara lätt att pumpa genom riggen, ge bra vidhäftning, jämna ytor och litet spill. Detta förutsätter bra ballastmaterial/sammansättning samt rätt typ av tillsatsmedel i kombination med bindemedel. Vid långa transporter eller när betongen skall hållas arbetsbar under lång tid kan retarderande tillsatsmedel eller flyttillsatsmedel med lång öppethållandetid behövas. Viktigt att retarderande tillsatsmedel är anpassat till sprutbetong och den typ av accelerator som används. Konventionella retarders avsedda för vanlig betong skall inte användas.

Acceleratorer:

Valet av sprutbetongaccelerator beror på bindemedelsmatris (cement + ev. puzzolan) och på den egenskap man önskar i tidig hållfasthetsutveckling. Vissa sprutbetongacceleratorer ger bara snabb tillväxt upp till 1 MPa medan andra kan vara långsammare i början och ger en bättre hög hållfasthet. Det är därför viktigt att veta vilka krav som skall uppfyllas för att en säker och effektiv sprutbetongproduktion skall kunna ske vid korta dispositionstider. Kravet skall definieras som en viss uppnådd hållfasthet med en angiven provningsmetod vid en viss tidpunkt. T ex 2,5 MPa vid 4 timmar efter sprutning mätt med spikmetoden Hilti-460.

Efterhärdning:

All betong skall efterhärdas för att minimera tidig uttorkning som försämrar betongens beständighet och ökar risken för krympsprickor. För sprutbetong är detta särskilt viktigt då man accelererar härdningen och riskerna ökar. Ytan skall börja vattenhärdas så tidigt som möjligt. Vid låga temperaturer eller där det kan vara svårt att hantera vatten kan membranhärdning användas på ytor som ej skall efterbehandlas. Detta bör dock kollas med beställaren innan.

Provningsmetoder:

Det finns olika metoder för att bestämma sprutbetongens hållfasthet. Normalt sett så sågas provkroppar ur sprutade plattor och provas men när det gäller tidig hållfasthet så används två metoder:

1. Mecmesin, penetrationsmätning med spik och newtonmeter, för tryckhållfasthet upp till 1 MPa
2. Hilti-460 spikutstick är en förenklad metod där man använder definierade laddningar på skotten. Vita skott mellan 1,5 - 5 MPa och gröna skott mellan 2,5 - 20 MPa. Man skjuter ca 10 spik på den yta som skall provas sedan mäter man medelutsticket på spiken av dessa. Detta värde jämförs sedan med en förkalibrerad kurva med aktuell skott.

Tillverkning

Inte minst viktigt är att ha tillgång till en betongfabrik utrustad för att kunna hantera de olika materialen och en effektiv blandare som förmår att aktivera betongmassan på ett bra sätt. En engagerad personal är nyckeln till ett bra resultat. Transportavståndet eller kostnaden per kubikmeter bör därför inte vara de enda kriterierna vid val av betongtillverkare, speciellt inte om en problemfri sprutning är väsentlig. Ett vanligt problem för mindre anläggningar är att sprutbetongleveranser lågprioriteras i konkurrens med större gjutningar. Problem med större stenar från blandare eller bilar samt extra blandningsvatten från rengöring av desamma kan då störa sprutbetongarbetet.

I Aspentunneln var kraven på sprutbetongen delvis nya och relativt oprövade. Därför kunde inte äldre förprovningar användas för att verifiera produkten. På grund av förseningen i upphandlingen var tidsrymden mellan kontraktsskrivning fram till arbetets start alltför kort för att kunna göra förprovingen på det sätt som var

önskvärt. En lämplig bergyta med förväntade egenskaper fanns inte att tillgå. Däremot kunde man lyckligtvis finna en lämplig plats för provsprutning i närområdet, där vi kunde montera betongelement som sprutunderlag. Det var en omfattande och platskrävande försöksuppställning som utfördes på kort tid. För att efterlikna de temperaturförhållanden som råder i tunneln, förbereddes också användning av kylanläggning. Tack vare att nätterna fortfarande vara kalla och genom att placera provytan i skugga, kunde dock provningarna genomföras utan att kylning behövde tillgripas. En mycket hastig planering av provserien och provsprutning utfördes. Provning av tidig hållfasthet utfördes timmarna efter utförandet med två olika metoder, som beskrivs nedan.

Tidig hållfasthet provades med en förenklad metod som tagits fram och kalibrerats av Svenska Sika. Metoden benämns Sika Hilti 460 och bygger på samma princip som Hiltimetoden, men endast inträngningsdjup mäts. Med vit ammunition kan tryckhållfasthet på 1,0 – 10 MPa mätas, och vid skjutning med grön ammunition kan hållfasthet mellan 2,5 – 13 MPa registreras. I mycket tidigt skede kan en modifierad Proctornål användas vilket möjliggör mätning av värden under 1,0 MPa.

I Aspentunnelprojektet var dispositionstiderna mycket begränsade. För att klara att utföra den relativt omfattande betongsprutningen föreslog såväl projektör som entreprenör avsteg från användning av sulfatresistent cement. Med Trafikverkets tillåtelse användes därför Byggcement i detta projekt. Betongens sammansättning i övrigt var noggrant proportionerad men relativt konventionell. Accelerator som användes var anpassad för Byggcement.

Resultaten uppfyllde inte helt de krav som ställts i förfrågningsunderlaget. Med längre tid till förfogande kunde fler materialkombinationer provats, och eventuellt kunde resultaten då blivit närmare målsättningen. Detta fick till följd att tidsmarginalen mellan avslutad sprutning till trafikpåsläpp fick göras något längre än planerat. Tillgänglig tid för betongsprutning reducerades med ungefär en timme per natt, inklusive en tidsmarginal för störningar vid avveckling som alltid behövs när trafikintensiteten är stor och konsekvenserna av ett försenat trafikpåsläpp är nästan katastrofala. En intensifierad provtagning under produktion gjordes dessutom inledningsvis för att säkerställa att tillräcklig hållfasthet uppnåtts vid trafikpåsläpp. Resultaten av provning på hårdnad betong var inte färdiga innan produktionsstart, men betongsprutning påbörjades inte förrän tre veckor efter denna tidpunkt, så tidsfristen klarade sig med knapp marginal.

Förprovning av bultar

Bultstångens beständighet måste säkerställas genom förprovning. Injuteringsbrukets egenskaper är mycket viktiga för bultens funktion och beständighet. Bruket måste ha sådana egenskaper att det går att fylla borrhålet genom att pumpa bruket genom en slang till hålets botten. Det höga pH-värdet säkerställer att bergbulten inte korroderar och får en lång livslängd. En metod som används är att gjuta in bultar i plexiglasrör med samma innerdiameter och längd som borrhålen. En ände på röret tätas varefter bultbruket fylls med den metod som är tänkt att användas i fält. Det transparenta röret möjliggör okulär besiktning av bultbrukets utfyllnadsgrad. Bultbrukets egenskaper dokumenteras för att göra denna process repeterbar i produktion. Då behöver endast bultbrukets egenskaper provas fortlöpande under produktionen. Om trafik ska passera under nysatta bultar måste även en metod att säkra bulten mot utglidning vara förprovad.

I Aspentunneln utfördes ingen förprovning. Istället gjordes en fördjupad kontroll när bultsättning i tunneln startade.

Förprovning av injekteringsbruk

Injektering måste ofta förprovas för att säkerställa att föreskrivna egenskaper på injekteringsbrukets kan uppfyllas med de material och den utrustning som avses användas i arbetet. Det är dock relativt vanligt att förprovning utförs helt i laboratoriemiljö, då det främst är fråga om att testa fram en lämplig sammansättning av cement och tillsatsmedel eller eventuellt andra injekteringsbruk som kolloidal silika eller polyuretan. Det är då huvudsakligen fråga om materialprovning. Blandning av injekteringsbruket i laboratorium utförs oftast med en s.k. labblandare, d.v.s. en högvarvig blandare med liten kapacitet. För att visa produktionsutrustningens förmåga att blanda tillräckligt effektivt, genomförs ofta en utökad provning i projektets inledning. Ibland måste då

justeringar på utrustning eller materialsammansättning göras för att uppnå ett godtagbart resultat. Detta kan till en början inverka produktiviteten negativt. I ett underhållsprojekt med mycket begränsade dispositionstider är det därför lämpligt att utföra en fältprovning innan arbetet i tunneln ska påbörjas.

Vid injektering av fina bergsprickor används finkorniga cementsorter som är speciellt anpassade till berginjektering. Det vanligaste cementet i svenska projekt är Injektering 30 – I30 som baseras på klinker från Degerhamn. För att förbättra flytegenskaperna används alltid flyttillsats, t ex iFlow som har utvecklats för att passa till I30. Accelererande tillsats används för att snabba upp härdningen efter att bruket har injekterats. En vanlig produkt är iAcc som också är anpassad till I30 med dess ganska långsamma tillstyvnad. Några egenskaper som provas på det färska och styvnande bruket samt exempel på vanliga provningsmetoder:

- Densitet med Mud balance
- Flytgräns med Yield stick
- Viskositet med Marschkon
- Tillstyvnad med Muggprov
- Hällfasthetstillväxt med Fallkon
- Vattenseparation med mätglas

Förprovningen brukar utgå från en preliminär blandning som sedan finjusteras tills godtagbara resultat uppnås. Förprovning brukar oftast göras i laboratorium i samband med förprovning.

I Aspentunneln utfördes ingen injektering.

Hjälparbeten

Etablering/avveckling

Det är naturligtvis en fördel att kunna etablera faciliteter för personal med omklädning mm samt verkstadsutrymmen nära arbetsstället. Viktigare är dock att maskinuppställning och materialupplag inte ligger för långt bort så att transporttiden tar för mycket tid i anspråk. När det gäller underhåll av vägtunnlar brukar det inte vara så svårt att ordna. Hjulburen utrustning är dessutom relativt lätt flyttbar.

Längs järnvägslinjer kan det vara svårt att komma till spåret med hjulburen utrustning där underhållsinsatsen ska ske. Mindre och akuta underhållsinsatser i järnvägstunnlar måste därför vanligen utföras med all utrustning och material lastade på ett tågset. En sådan insats kräver alltså ingen fast etableringsplats. I en akut situation är det då väsentligt att beredskapen för en sådan insats är god så att resurserna kan mobiliseras snabbt.

För mera omfattande underhållsinsatser är ett stickspår med omlastningsmöjligheter i en rimlig närhet en bra lösning. Om det inte finns något stickspår tillgängligt i närområdet finns två alternativ. Antingen anordna så att därtill anpassade maskiner kan beträda spåret utan stickspår eller mer tidskrävande transport på spår. I enstaka fall kan det vara fördelaktigt att göra en uppfyllning av banvallen så att hjulburna maskiner kan användas. En materialskiljande geotextil bör då installeras mellan järnvägsmakadam och vägfyllning. Man får ändå räkna med en omfattande återställning efter utfört arbete. I en mer omfattande järnvägsentreprenad förläggs ofta en huvudetablering till ett nära beläget stickspår. Det är en stor fördel om det finns utrymme i tunnelns omedelbara närhet som tillåter viss omlastning av material och utrustning under pågående arbetspass.

I projekt Aspentunneln etablerades personalutrymmen, kontor och förråd till Lerums station ungefär tre kilometer från tunneln där det finns en större plan intill spårområdet. Här fanns även stickspår för lastning och lossning av material och utrustning samt plats för parkering av arbetståg när de inte används. Lastning av större utrustningar på järnvägsagnar kunde dock inte utföras här eftersom ramp saknades och kontaktledning utgjorde också ett hinder i vissa fall. Dessa manövrer fick utföras i Göteborg eller Mölndal och innebar en förflyttning på 20-30 kilometer. Vändning av vagnar krävde också förflyttning till Göteborg, en sträcka på cirka tjugo

kilometer. Förflyttningar utanför de fastlagda BUP-tiderna kräver planering från trafikledningens sida och kan ofta inte ordnas med kort varsel.

Omlastningsmöjligheter vid tunneln var starkt begränsade. Det fanns en liten tillfartsväg och en liten plan intill nedspår, men ingen möjlighet att komma intill uppspår. En omlastningsplats utan möjlighet till vagnuppställning utanför arbetstiden finns vid en hållplats någon kilometer söder om tunneln.

Trafikanordningar

För att åstadkomma säkra trafikförhållanden och säker arbetsmiljö under tiden som underhåll pågår krävs en noggrann planering. Trafiklösningen ska godkännas av väg- eller banhållare och vald lösning ska vara säker och helst någorlunda snabb att installera särskilt om arbetet utförs under korta dispositionstider och vägen/banan ska vara öppen för trafik på dagtid eller annat intervall. För att vinna tid och möjliggöra en bredare konkurrens förekommer att väg/banhållaren planerar och låter utföra de åtgärder som krävs för att klara trafiken under arbetstiden.

Vägtunnlar

I vägtunnlar, särskilt om trafikintensiteten är hög, utgör trafikanordningar ofta en stor del av underhållsarbetet både när det gäller tid och kostnader. Omlodning av trafiken till annan väg är att föredra ur arbetsmiljösynpunkt. En sådan lösning är naturligtvis också en högre produktivitet och en kortare utförandetid. Avstängning av körfält kräver omfattande och tunga avskärmningar. Luftkvaliteten i tunneln måste också beaktas, särskilt med tanke på arbetsmiljön för de som arbetar i tunneln men också för trafikanternas välbefinnande.

Järnvägstunnlar

För att få beträda järnvägsspår och orsaka inskränkningar i trafiken krävs omfattande planering i samarbete med trafikledning och trafikoperatörer, vilket kan ta lång tid att genomföra. Banarbetsplan – BAP upprättas av Trafikverket och är en översikt av de banarbeten som planeras under en tidsperiod. En nationell BAP upprättas vanligen för ett år. Banupplåtelseplan – BUP beskriver i detalj vilka tider som upplåts för banarbete på ett visst banavsnitt. För att hinna få ett BUP-beslut måste planeringen påbörjas i god tid, upp till två år, innan tänkt arbetsperiod.

Totalavstängning är att föredra ur produktivitetssynpunkt och ger den kortaste utförandetiden samt en bättre arbetsmiljö och en säkrare arbetsplats. Banhållaren Trafikverket har dessutom att planera för trafiken så att minsta möjliga inskränkningar och samhällskostnader blir följden. Åtgärder kan vara omlodning till annan bandel, inställd trafik med ersättningsbussar för persontrafik, enkelspårdrift med arbete på andra spåret, hastighetsbegränsning eller stängning av hållplats. Dessa åtgärder kan leda till höga kostnader i form av ersättning till trafikföretagen, industrin och trafikanter samt kostnader för ersättningsbussar.

I Aspentunneln var hastigheten nedsatt till 40 km/tim under arbetstiden vid enkelspårdrift. Nödvändiga tillstånd samt information till trafikledning och berörda trafikföretag hade förberetts av beställaren. Entreprenören hade ansvaret för genomförandet av trafikanordningarna. Underhållsarbetet utfördes alltså nattetid, medan trafiken gick med normal hastighet under övriga dygnet. Åtgärderna på banan bestod av skyltning, ljussignaler och spårvakter. För att säkerställa rätt hastighet monterades s.k. balliser som påverkar tågens hastighet automatiskt. Hastighetssänkningen måste alltså aktiveras och avaktiveras varje dygn. Detta genomfördes med hjälp av plåtar som skärmade av balliserna under dagtid, men som plockades bort för att aktivera hastighetsnedsättningen nattetid.

Tidsåtgången för aktivering/avaktivering varierade mellan 1:08 till 2:59 timmar per skift vid arbete på enkel-spår. I genomsnitt tog åtgärderna 1:48 timmar per skift. Motsvarande siffror vid arbete med båda spåren avstängda varierade mellan 0:23 till 1:10 timmar per skift, i genomsnitt 0:40 timmar per skift. Skillnaden gav alltså mer än en timma längre arbetstid när båda spåren var stängda.

Skyddsarbeten

I alla väg- och spårtunnlar är det av största vikt att eliminera risker som orsakas av trafik. Den bästa lösningen ur arbetsmiljösynpunkt är att stänga trafiken helt under arbetet. Det är dock ofta inte möjligt. Då gäller det att anordna skydd så att ingen skada uppstår.

I järnvägstunnel med partiell avstängning förekommer tågrörelser nära arbetsplatsen och dessutom har man oftast en spänningsförande ledning i närheten. Dessa riskfaktorer kräver mycket effektiva skyddsanordningar och ett disciplinerat uppträdande hos berörd personal.

Utöver trafik finns ofta andra risker som arbete på hög höjd m fl, men som inte är specifika för underhåll med korta dispositionstider. Dessa risker måste förstås tas på stort allvar men behandlas inte i detta arbete.

Arbetet i Aspentunneln genomfördes med trafik på ett spår och nedsatt hastighet under den största delen av projekttiden som tidigare redovisats. På vagnar monterades fysiska skydd mot utsvängande maskiner och för att undvika spridning av spill till trafikerat spår. Barriären utgjorde också en visuell avgränsning mot det trafikerade spåret, men i många fall utfördes arbeten med mindre spårgående fordon som inte var försedda med barriär. Gångtrafik mellan olika arbetsplatser i tunneln förekommer också. Arbetssättet ställer krav på mycket god information till all personal, ständig vaksamhet och god disciplin. Detta lyckades väl genom utbildning, daglig information och ständigt fokus på säkerheten. Detta är särskilt viktigt i ett projekt som Aspentunneln med hög belastning på personalen under en begränsad men ganska lång tidsperiod. Varje timme är väsentlig och inga tidstillägg accepteras. Kraven på den enskilde medarbetaren blir stora att producera och göra rätt hela tiden. Misstanke om att reglerna åsidosattes av någon individ resulterade i omedelbar förflyttning av personen till annan arbetsuppgift.

Även en så låg hastighet som 40 km/tim upplevdes som hög av de som arbetade i tunneln, då arbetet pågick mycket nära passerande trafik. Buller från arbetsmaskiner gjorde att ljud från tågpassager knappast kunde uppfattas. En viss lufttrycksförändring var det enda som märktes. Trots rigorös information till alla på arbetsplatsen var det en ständig oro, särskilt för arbetsledningen, då man vet att ett litet misstag kan leda till katastrofala konsekvenser.

Skyddstäckning

För att inte skada anläggningsdelar som vägbana, elinstallationer, skyltar, räls och kontaktledningar måste ofta en omfattande skyddstäckning utföras. Om arbetet är uppdelat i många korta etapper med trafikpåsläpp mellan etapperna, måste skyddsanordningarna utföras så att de snabbt kan monteras, demonteras och förflyttas.

I vägtunnelmiljö är det framförallt vägbeläggning och installationer i form av belysning, ventilationssystem, kablar samt trafikinformation (vägskyltar) som måste skyddas från åverkan. Om det passerar trafik i samma tunnelrör under arbetet, ställs höga krav på avskiljande skyddstäckning i samband med arbeten som medför risk för stensprut, splitter eller damm. Vattenbilning/blästring eller högtrycksspolning innebär en risk för nedsatt sikt av vattendimma och måste begränsas.

I järnvägstunnlar är det mycket väsentligt att nedfall från rivning och skrotning inte ramlar direkt på spår, slippers, kabelrännor, balliser och andra tekniska anordningar. Det bästa är att samla upp nedfallande föremål innan de träffar botten så slipper man att samla upp det efteråt. Det finns möjlighet att bygga på vagnar med uppsamlingsanordningar som täcker en bit utanför vagnens ordinarie bredd, men det går inte att samla upp allt. Visst skydd på tunnelbotten måste alltid utföras. Dessutom måste spårbädden skyddas från nedsmutsning med t ex sprutbetongspill.

I Aspentunneln kunde en stor mängd rivningsmassor och sprutbetongspill samlas upp direkt på järnvägsvagnar. Dessutom utfördes konventionell skyddstäckning med presenningar, fiberduk som skydd mot finmaterial, samt sprängmattor och trälämmar för tyngre nedfall. Upplastning av material som fallit ner på spårbädden gjordes varje skift med hjälp av lastaggregat monterade på arbetsvagn eller spårgående hjullastare. Komplettering och efterkontroll utfördes manuellt varje skift. En noggrann slutstädning utfördes också.

Materialhantering

Lastning och uttransport av rivet eller strossat material i järnvägstunnlar fordrar effektiv utrustning och god planering. En stor lastvolym är ofta fördelaktig då det behövs färre tågrörelser för att göra sig av med uppschaktat material. En konventionell grävmaskin kan inte användas effektivt på grund av begränsade möjligheter att svänga runt. Schaktaggregat som är fast monterade på spårgående arbetsfordon är ofta mer effektiva och säkra.

Intransport av material för inbyggnad i spårtunnlar måste också vara effektivt. Intransport av betong för platsgjutning eller betongsprutning är särskilt svårt att klara med konventionella transportfordon. I ett komplicerat projekt är det ett önskemål att ha material till ett helt, eller åtminstone ett halvt, skifts produktion för att inte störa övriga tunnelarbeten med tågrörelser. Färsk betong kan retarderas så att den kan användas under flera timmar efter blandning. Svårigheten är istället att kunna lasta en tillräckligt stor volym, och att se till att betongen kan förflyttas till betongpump eller betongspruta på ett effektivt sätt. Dessutom behöver den färska betongen röras om något under tiden som den väntar på att användas. Specialbyggda vagnar för betongtransport är ett kostsamt alternativ som kräver långa förberedelser.

I Aspentunneln anordnades betongtransporter till tunneln genom att montera en rotertrumma, avsedd för lastbilsmonter, på en öppen järnvägsvagn. Volymen var omkring sex kubikmeter så det krävdes ett antal påfyllningar under skiftet för att möjliggöra "kontinuerlig" produktion. Under en stor del av tiden när enkelspårdrift rådde, kunde inte påfyllning tillåtas under skiftet eftersom det hade stört övriga arbeten i hög grad. Följden blev att betongsprutning fick begränsas till den volym som kunde lastas innan skiftets början. Under den korta tiden med helavstängning, och då betongsprutningen kunde disponera ett spår, utfördes den största delen av arbetet med avsevärt högre produktionstakt. Då kunde också arbete utföras under hela den tillgängliga arbetstiden.

Vision

En 2-axlig öppen godsvagn som ska framföras i låg hastighet (högst 90 km/tim) har en tillåten lastvikt på 32,5 ton. Om man räknar bort vikt av trumma och betongpump kan man lasta cirka 12 m³ betong på vagnen. En specialbyggd rotertrumma blir knappt sex meter lång och får plats tillsammans med betongpump och lite övrig utrustning. Två sådana vagnar borde gå att seriekoppla och ha med sig in i tunneln vid skiftets början. På detta sätt kan betongsprutning göras mycket mer effektiv när möjligheter till omlastning under skiftet är begränsade. Kostnaden för att iordningställa ett sådant ekipage är inte avskräckande om man ser till nyttovärdet, men investeringen måste dock ge säker avkastning i form av ersättning från Trafikverket och/eller annan kund. Det behövs alltså en vilja från kunden att ha tillgång till en sådan lösning, och en betalningsmodell som ska beskrivas i en upphandling och omsättas i ett kontrakt.

Det finns fordon med både gummihjul och spårföljare som själv kan gå på och av järnvägen relativt enkelt, exempelvis traktorgrävare och mindre lastbilar. Detta koncept är givetvis utvecklingsbart för många ändamål i samband med tunnelunderhåll. Man kan placera olika maskinutrustningar och arbetsplattformar på sådana här "semichassier". Det finns kanske en del specialmaskiner som är byggda på detta sätt avsedda för allmänna banarbeten, men dessa är oftast inplanerade för sådana arbeten och sällan möjliga att disponera vid bergunderhållsarbeten. Metoden kan ge tidsvinster där avståndet till lämpliga stickspår som kan användas för arbetståg är stort. Även här är det främst affärsmässiga bedömningar och kontraktuella frågor som är det största hindret för utvecklingen.

Städning

I vägtunnlar kan effektiva sopmaskiner användas för att snabbt städa av körbanan efter smutsande arbete, kompletterat med manuell sopning av ytor som är svåra att komma åt med maskin. Sugbil kan användas för rensning av bilningsrester och sprutbetongspill. Mindre handdragna dammsugare är ett effektivt sätt att finstäda svåråtkomliga ytor. Vattenspolning av både tak/vägg och körbana kompletterar men förutsätter att hu-

vuddelen av finkorniga sediment har avlägsnats på annat sätt, då dagvattensystemen annars kan sätta igen. En avslutande slamsugning i brunnar krävs vanligen efter mer omfattande underhållsarbeten.

I järnvägstunnlar är det mycket väsentligt att inte försämra underbyggnadens kapillärbrytande egenskaper genom nedsmutsning med finkorniga sediment. Om skyddstäckning av spårbädden har utförts med t ex fiberduk så kan den lämpligen lyftas bort i stora sjok inklusive uppsamlat sediment. Dammsugning med kraftiga dammsugare kan orsaka att makadam eroderas bort och måste ersättas. Även vattenspolning är svårt att använda i järnvägstunnlar då det för med sig finkornigt sediment ner i spårbädden.

Aspentunneln städades dagligen med en massiv insats av alla som arbetade i tunneln och med hjälp av maskiner och fordon som kunde utnyttjas det aktuella skiftet. Av den icke värdeskapande tiden som utgjorde mellan 30-57 % av tillgänglig tid i projektets olika faser, är omkring ¼ relaterat till städning. Det innebär alltså att 8-15 % av all tillgänglig tid ägnades åt städning i någon form. Siffrorna är inte säkerställda utan bara en uppskattning.

Arbetsmetoder

Rivning

Avser framförallt rivning av sprutbetong, dräner och ibland betongkonstruktioner eller strukturer som ska rivas helt eller delvis. Utöver detta rivs ofta bergförankringar med eller utan vidhängande installationer.

Den vanligaste metoden att riva betong är mekanisk bilning med hydraulisk hammare. Vattenbilning av sprutbetong på tak och väggar i tunnlar har visat sig vara en effektiv metod som kan rekommenderas. Resultatet blir en väl rengjord yta som lämpar sig för förstärkning med ny sprutbetong. Bultar och andra förankringar skärs oftast av med kaprondelell nära bergytan.

I Aspentunneln revs små mängder befintliga dräner och bergnät. Denna rivning utfördes manuellt från arbetsborg i bomlift med hjälp av handverktyg. En del bom sprutbetong revs också men omfattningen var liten. Metoden för detta var knackning med hydraulisk hammare och efterföljande manuell rensning.

Bergrensning

Bergrensning, oftast benämnt skrotning, innebär att löst berg tas ner med lämplig metod för att göra bergytan säker att vistas under. Arbetsmomentet avslutas vanligen med vattenspolning, beroende på Bergrensningsklass enligt nedan, för att preparera underlaget för förstärkning. Produktionsskrotning utförs efter sprängning i samband med nyproduktion av tunnlar och bergum. Då är det möjligt och lämpligt att använda relativt kraftfulla metoder. I samband med underhåll av förstärkta och i bruk tagna tunnlar innehållande installationer måste skonsammare metoder användas. Arbetet benämns då ofta kontrollskrotning och bomknackning. Det är den senare typen av skrotning som behandlas i detta avsnitt.

Bergrensning regleras av anvisningar i AMA 13 Anläggning Tabell CBC/4, och indelas i olika Bergrensningsklasser. Bergrensning kan utföras manuellt eller maskinellt.

Kontrollskrotning/bomknackning utförs nästan alltid manuellt. Det är då viktigt att det finns ställningar/arbetsplattformar som är tillräckligt bärkraftiga och stabila för två man med samtidigt verkande skrotspett. I samband med nyproduktion ska plattformen vara försedd med skyddstak enligt Arbetsmiljöverkets anvisning Berg- och gruvarbete AFS 2010:1 18§. När det gäller kontrollskrotning av i bruk tagna anläggningar som är säkrade mot stenfall råder det alltså inget krav på skyddstak.

Mekaniserad skrotning som underhållsåtgärd kan vara lämplig i vissa fall om tunnelns förstärkning ska förnyas i sin helhet. Om det finns större ytor med sprutbetong som saknar vidhäftning, kan det också vara motiverat att använda sig av maskinell skrotning med rivande arbetsmetod. Nedtagning av bom sprutbetong kan då betraktas som en rivningsåtgärd, se ovan.

I Aspentunneln utfördes all skrotning manuellt från bomliftar utan vikbom monterade på järnvägsvagnar. Personkorgar var dimensionerade för en maximal last på 200 kg och saknade skyddstak. Lyfthöjden var endast cirka tre meter över vagnens nivå och stabiliteten upplevdes som god.

Bergschakt

Ibland måste tunnelns tvärsnitt utvidgas av något skäl, t ex för att rymma ny förstärkning eller dräner. Förstoringen kallas ofta strossning och kan utföras på flera olika sätt.

Borring och sprängning är en ganska våldsamt metod som måste användas med stor försiktighet i underhållssammanhang. Vid sprängning måste till exempel risken för skador på närliggande byggdelar och installationer beaktas. Montering och borttagning av skyddande anordningar liksom säkring av sprängda bergytor kan ta avsevärd tid i anspråk. Sprängning kan därför vara mycket svår att tillämpa när dispositionstiden är kort, t ex endast några timmar på nattsift, och om tunneln ska vara öppen för trafik mellan arbetsskiften.

Hydraulisk spräckning är en skonsam metod att ta bort berg och är användbart i inredda tunnlar. Arbetet inleds med att borra hål i bergmassan som ska schaktas. I hålen förs in en hydraulisk slang eller liknande som expanderar och spräcker loss berget. Metoden ger alltså ingen stötvåg eller gasutveckling. Det finns lite olika utföranden bland annat under varumärken som Darda eller Emstone. Med den senare metoden kan flera hål spräckas samtidigt genom seriekoppling.

Snigeldynamit som appliceras i borrarade hål kräver mycket borrning för att ge rätt resultat. Namnet antyder att metoden inte är så snabb, men vinsten ligger i att man undviker kast, splitter, luftstötvåg och vibrationer som blir resultatet vid sprängning. Metoden kan därför rekommenderas om det är små ytor som ska skalas bort.

Hydraulisk knackning innebär oftast borrning av korta borrhål för att markera berguttagets begränsningsyta.. Därefter mejslas den överskjutande bergvolymen bort med hjälp av hydraulisk bilningsutrustning monterad på lämplig grävmaskin eller liknande. Metoden är effektiv i de flesta fall om uttagsvolymen är begränsad och fördelad på många mindre områden. Knackning ger små vibrationer och nästan ingen annan skadlig påverkan på närliggande byggdelar.

Där en omfattande sektionsförstoring längs en lång tunnelsträcka ska utföras, finns exempel på specialanpassade utrustningar som medger kontinuerligt arbete med samtidig trafik under utrustningen genom arbetsområdet. Detta specialfall är närmast att betrakta som nyproduktion och behandlas inte närmare i denna rapport.

Rengöring av bergytor

Att få bergytorna inklusive tidigare sprutbetongförstärkta tak- och väggytor tillräckligt rena för att ny sprutbetongförstärkning ska få godtagbar vidhäftning kan vara en utmaning i en gammal trafiktunnel. Nedsmutsning av många års exponering för damm, stoft, sot, kolrök, emissioner från fossila bränslen, algpåväxt, bakteriella substanser och annat under lång tid kan resultera i en beläggning som är mycket svår att avlägsna. På befintlig sprutbetong tränger smutsen in något i betongens yta, som dessutom åldras genom vittring mm. Vattenläckage kan innebära att lösta mineral och salter från berget bildar avlagringar. Detta i kombination med ljus från belysningsarmaturer kan ge organismer näring. I äldre tunnlar är ofta en stor del av bergytorna osprutade, och ju senare tunneln är byggd eller renoverad desto större andel av bergytorna är förstärkta med sprutbetong. Tunnlar byggda efter 1980 är ofta helsprutade åtminstone i tak.

Det är alltså en stor skillnad på att rengöra nedsmutsade bergytor och nedsmutsad befintlig sprutbetong. För befintlig sprutbetong gäller också att vidhäftningshållfastheten inte kan bli bättre än den vidhäftning som råder mellan befintlig sprutbetong och berg. Ett enkelt sätt att testa olika rengöringsmetoder är att torka av ytan efter rengöring med en vit trasa, eventuellt fuktad med något lösningsmedel. Eftersom målet med rengöringen är att skapa förutsättningar för en god vidhäftning, bör testerna också följas av vidhäftningsprovning på ny förstärkning. För att finna den effektivaste metoden behöver man ofta göra prov med olika metoder samt utvärdering av dessa.

En effektiv rengöring innebär att smutsen på bergytorna förs ner på tunnelbotten och oftast leds det bort i tunnelns dräneringssystem. Det bör därför alltid finnas en beredskap att rena dränvattnet innan det släpps ut i recipient eller i kommunalt dagvattensystem särskilt i tunnlar som utsatts för avgaser från förbränningsmotorer och/eller om avfettningsmedel används.

Nedan diskuteras några förekommande metoder att rengöra bergytor/befintlig sprutbetong.

Vattenspolning eventuellt i kombination med tryckluft är en vanlig metod att rengöra bergytor innan betongsprutning utförs. Metoden ger oftast ett fullt godtagbart resultat på färsk bergytor som vid nyproduktion, men är nästan aldrig tillräcklig i underhållssammanhang. Kapaciteten påverkas förstås av nedsmutsningsgraden och av vald utrustning men är generellt hög.

Högtryckstvätt ger oftast bättre effekt än vattenspolning utan tryck. Det förutsätter dock att munstycket förs nära bergytan i ett långsamt tempo vilket är tidsödande. För att öka kapaciteten sveps ofta munstycket snabbare och längre från ytan, och då blir resultatet inte tillräckligt bra.

Hetvattentvätt kan ge bra effekt på feta beläggningar, men är ofta inte tillräcklig i en gammal tunnel som utsatts för trafik. Kapaciteten begränsas av effekten på uppvärmningsaggregatet men är i övrigt obetydligt lägre än högtryckstvätt med kallvatten.

Avfettning kan vara ett kraftfullt hjälpmedel att avlägsna beläggningar från trafik. Ofta behöver detta kombineras med t ex hetvattentvätt. Den miljöbelastning som avfettningsmedel innebär måste alltid vägas in vid val av metod. Behovet att utföra rengöringen i flera moment ger en relativt låg kapacitet.

Blästring med sand ger bra effekt på de flesta typer av nedsmutsning. Metoden används dock sällan på grund av dess arbetsmiljönackdelar som dammig miljö och högfrekvent ljud. Sandrester kan också vara ett stort problem. Dessa måste samlas upp och bortforslas, något som kan vara svårt att utföra i en järnvägstunnel. Kapaciteten vid sandblästring är också begränsad.

Vattenblästring innebär tvättning med högt tryck och ganska lågt flöde; typiska prestanda 2000 bar och 30 liter/min. Denna metod visar sig ofta ge bra rengöringseffekt och är relativt produktiv. Inga tillsatser i form av miljöstörande rengöringsmedel som behöver samlas upp är också en fördel. Kapaciteten är generellt hög.

Vattenbilning är ett alternativ om befintlig sprutbetong har dålig vidhäftning till underlaget. Bilningen bör då utföras med robot som monteras på lämplig bärare för att kunna användas på tunnelns tak och väggar. Vattenbilning utförs med lägre tryck och högre vattenflöde än vattenblästring. Typiska prestanda hos högtryckspumpen är 500 bar och 150 liter/min. Metoden har använts med framgång i några fall, exempelvis i samband med renovering av Muskötunneln åren 2011-2013. Jämfört med andra metoder som ger samma goda resultat är kapaciteten god.

Aspentunneln var innan underhållsarbetet 2013 partiellt förstärkt med sprutbetong. Tunneln hade då utsatts för nedsmutsning av ånglok och diesellok under 50-100 år. Bergytorna och befintliga sprutbetongytor var kraftigt nedsmutsade. Ingen provning/utvärdering med olika rengörings-metoder hade utförts innan produktionsstart. Det fanns en uppfattning att det krävdes en ganska kraftig rengöring för att åstadkomma förutsättningar för god vidhäftning. På grund av osäkerhet hade projekterats att utföra all sprutbetong som bergförankrad med injutna bultar.

När arbetet i tunneln startade inleddes tester med vattenblästring. Till en början blev resultatet inte så bra som önskat, men efter ett byte av högtryckspump blev resultatet bra. Senare vidhäftningsprov på utförd sprutbetong bekräftade detta.

Masshantering

Järnvägstunnlar

Schaktmassor från tunneln måste på något sätt lastas på spårburen utrustning som järnvägsvagnar. Problemet är själva uttransporten som stör andra förekommande arbeten på spåret. För att minska störningar genom

färre transporter, är det önskvärt att dimensionera kapaciteten så att det får plats massor som kan alstras under en tillräckligt lång tidsperiod. Mottagningen av massor utanför tunneln bör ske så nära tunnelmynningen som möjligt och i övrigt vara effektiv så att uppehållstiden minimeras.

När det gäller nedskrotat eller strossat berg, rivningsmaterial samt spill från betongsprutning, som kommer från tak och väggar, så är det en stor fördel att samla upp detta på järnvägsvagn. Detta kan åstadkommas genom att förbereda specialbyggda fällbara lämmar som täcker så stor del av tunnelns bredd som möjligt. Lämmarna kan utföras med sofistikerad hydraulik mm. Ju bättre förberedelser ju mer tid kan sparas in på detta sätt.

Upplastning sker lämpligen med grävmaskin/traktorgrävare med spårföljare, eller grävaggregat monterat på spårbundet arbetsfordon som är speciellt anpassat att användas i spårmiljö.

Vägtrafiktunnlar

Metodval för masshantering i vägtunnlar är inte lika begränsad som i järnvägstunnlar. Andra aktiviteter blir inte heller störda på samma sätt. Därför kan val av utrustning och resursplanering skötas på ett mer konventionellt sätt.

Borrning

Moderna hydrauliska borraragregat är mycket effektiva. Val av maskintyp baseras primärt på tillgängligt utrymme, behovet av snabb förflyttning, möjlighet till kraftförsörjning och den förväntade mängden borrning som ska utföras. Riktning och läge på borrhålen spelar också in vid val av maskin. Om det gäller en omfattande strossning kan ett traditionellt tunnelaggregat användas, men om det huvudsakligen rör sig om bultborrning kan det vara bättre att välja en maskin som är avsedd för borrning vinkelrätt mot tunnelaxeln. Borrning av injekteringshål för efterinjektering utförs också ofta i tvärriktningen vilket kan innebära en kortare matare för att rymmas.

I en vägtunnel går det ofta att använda ett stort borraragregat. Hålens riktning är då avgörande för vilken typ av maskin som bör väljas.

I järnvägstunnlar är man ofta hänvisad till att ställa utrustningen på en järnvägsvagn för att klara förflyttningar. Det innebär förstås att önskad räckvidd blir motsvarande mindre. Vid uppdrag med normal bultförankring brukar ofta mindre enbomsaggregat vara tillräckliga.

I Aspentunneln användes borraragregat för borrning av korta strosshål och till bulthål L=3 m, totalt 7-8000 m borrning. Till detta användes borrar typ Sandvik Commando 300 och Atlas Copco T15, båda med dieselhydraulisk drift. En del problem med anpassning av en nyanskaffad borrar till det aktuella håldjupet störde produktionen, som i övrigt var väl anpassade till uppgiften. En del av dessa problem har sin förklaring i den korta planeringstiden. Delar av den tänkta maskinparken var vid kontraktskrivning redan upptagen i andra uppdrag.

Bergförankring

Följande text avser i första hand montering av den vanligaste typen av bergförankring nämligen bergbult ingjuten i cementpasta utan förspänning. En del av innehållet gäller dock även för andra typer av bergförankring.

Ställningar

Arbetet utförs i tak eller på väggar. Det är nödvändigt att ha en bra och säker arbetsplattform eller lift för att kunna utföra arbetet effektivt. Arbetshöjden i vägtunnlar överstiger sällan sju meter över vägbanan.

Vid underhållsarbete i vägtunnlar är det ofta lämpligt att använda stadiga hjulburna arbetsplattformar som är lätt flyttbara. Lastbilmonterade arbetsplattformar med stor arbetsyta och hög bärighet är att föredra. Dessa kan förutom personal även rymma en del material samt eventuellt blandare och pump för cementfyllning av borrhålen. Hjulburna liftar med liten personkorg kan användas men materialhanteringen är då mera tidskrävande och produktiviteten blir lägre. Det är effektivt att kunna förflytta fordonet med manövrering från arbetskorgen, men det förutsätter naturligtvis att underlaget är tillräckligt jämnt. Små liftar med låg tillåten last och

utan egen framdrivning bör användas endast för enstaka bultar, på grund av låg produktivitet. För längre bultar än cirka tre meter är dessa små liftar olämpliga ur säkerhetssynpunkt.

Arbetshöjden i järnvägstunnlar kan vara upp till nio meter från tunnelbotten eller sju meter över rök. I underhållsarbete som utförs från järnvägsvagnar krävs dock sällan räckvidd överstigande 5-6 m räknat från vagnnivå

Övriga hjälpmedel

Blandare för blandning av cementpasta med lågt vct samt pump som medger en jämn fyllning av borrhålen. Dessa hjälpmedel ska ha de egenskaper som krävs för att uppfylla kraven i bygghandlingar och motsvara de maskiner som har använts vid förprovningen. Det är endast storlek på utrustningen som behöver anpassa för att åstadkomma en god produktivitet. En utrustning med hög kapacitet kan vara omständlig och tidsödande att etablera och rengöra. Den bör alltså användas när många bultar ska monteras. Materialförsörjning ska då anpassas så att den höga kapaciteten kan utnyttjas. Om det är ett fåtal bultar som ska monteras kan en mindre utrustning användas.

Att föra in bultstången i borrhålet är ett tungt arbete som kan bli ett allvarligt arbetsmiljöproblem om stora mängder bult ska monteras. För att trycka in bulten i det cementfyllda borrhålet används vanligen handkraft. Ibland utnyttjas arbetsplattformen för att skjuta på bulten, vilket kan vara bra ur arbetsmiljösynpunkt i vissa fall. Dock måste riskerna med ett sådant förfarande beaktas. Det finns också exempel på verktyg som skjuter på bulten hydrauliskt. En sådan anordning måste förstås vara godkänd för denna användning och försedd med CE-märkning.

Det finns också speciella bultningsaggregat som utför både borring, cementfyllning och montering av bultstäng utan manuell hantering. Sådan utrustning är vanlig i grusksammanhang, men är än så länge sparsamt använd i tunneldrivning för väg och järnväg. När det gäller underhåll har denna metod knappast använts. Om det är fråga om stort bultantal så bör denna metod övervägas av arbetsmiljöskäl. Det är dock osäkert om metoden ger ökad produktivitet eller kvalitet.

Det vanligaste materialvalet är att blanda Anläggningscement med vatten till ett bruk med vattencementtal vct = 0,28 - 0,30. För att bultsättningen ska kunna utföras med hög produktivitet måste bruket aktiveras väl så att pumpningen går lätt. Det finns tillsatsmedel som kan förenkla och snabba upp bultsättningen. Funktionen hos dessa är vattenreducerande och konsistensförbättrande. Det finns också färdigblandade cementbruk i form av torrbruk med finkornig ballast som är lämplig för fastgjutning av bergbultar. Dessa innehåller tillsatser som bruket lättarbetat.

En alternativ ingjutningsmetod

Det finns en metod under utveckling som kan bli ett möjligt alternativ till cementingjutning. Systemet benämns RIS är i första hand avsedd för mekaniserad bultning i gruvor. Ingjutningen består av en 2-komponent tixotrop plastmassa (harts) som även fungerar i uppåtriktade borrhål. Denna teknik ger fördelar i form av snabbare bultningscykel och är därför även intressant för användning vid korta dispositionstider. Metoden ökar också förutsättningarna för god kringgjutning av bergbulten, speciellt i applikationer med dålig bergkvalitet, och ger därför ett bättre korrosionsmotstånd. En förutsättning är att Trafikverket godkänner tekniken.

I Aspentunneln, där omkring 2000 bultar monterades, användes samma typ av bomlifhtar till bultmontage som användes för bergrensning. Skrupump med satsblandare samt materialupplag etablerades på järnvägsvagnen enligt ovan. Detta system fungerade bra och gav tillräcklig kapacitet i detta projekt.

Injektering

Injektering är ofta ett tidsödande arbete som inte kan forceras utan att resultatet påverkas negativt. En noga planerad insats är nog det bästa sättet att spara tid i utförandet. Kapacitet att behandla flera hål samtidigt kan vara ett sätt att minska tidsåtgången i lite större åtaganden. En liten men väsentlig detalj är valet av manschetter/packers. Genom att använda engångspackers kan man lämna dessa i borrhålet utan att orsaka störningar efter trafikpåsläpp.

För att verifiera att de förprovade bruksegenskaperna kan uppnås görs några tester i fält. Då är det viktigast att göra de kontroller som verkligen visar vilken utförandekvalitet som uppnås med den aktuella utrustningen och det i förväg valda materialet. Densitet visar genom en baklängesräkning om blandningsförhållandet vatten/cement är rätt, d.v.s. om uppvägningstekniken fungerar. Flytgräns och viskositet ger ett mått på hur väl blandaren dispergerar bruket. Tillstyvnad visar att bruket härdar. Övriga provningar behöver inte utföras i fält eftersom de avser rena materialegenskaper som inte kan påverkas på arbetsplatsen. Enkla och snabba provningar som säkerställer produktionskvalitet bör användas. Onödiga provningar tar värdefull produktions- och ska undvikas i projekt där tiden är värdefull.

Betongsprutning

Valet står mellan torrsprutning som oftast utförs manuellt, och våtsprutning, som vanligen utförs med robot. Vilken metod som väljs styrs i första hand av arbetets karaktär. Om det är stora volymer sprutbetong och dessutom med fiberarmering, väljs lämpligen våtsprutning med robot. Om mängderna är små och utspridda på många mindre ytor samt utan fiberarmering, kan det fungera lika bra med torrsprutning. Tunnelns storlek och möjligheter till leverans av färdigblandad färsk betong kan också ha betydelse för metodvalet.

Torrsprutning

Torrsprutning kan med god planering anordnas så att en optimal kapacitet nås. Metoden lämpar sig väl när det är fråga om relativt små mängder på många platser. Det är då väsentligt att maskinell utrustning och materialförsörjning anordnas på ett sätt som medger snabb start och stopp, samt underlättar rengöring av maskiner mm. En fast maskinuppställning med en praktisk och arbetsbesparande layout bör eftersträvas. En torrspruta med kontinuerlig drift är bättre än en slussmaskin med intermittent materialflöde. Oftast är det s.k. rotorsprutor som används. Denna maskintyp medför vissa nackdelar i utförandet och arbetsmiljöproblem i form av dammig miljö. Tryckkammersprutor i traditionellt utförande medför arbetsmiljöproblem med damm och tungt arbete, men det finns moderna torrsprutningsmaskiner som medger kontinuerlig drift i ett slutet system utan manuell slussning och med hög kapacitet. Materialhanteringen är en viktig faktor som kan ge tidsbesparingar och förbättra arbetsmiljön. Torrbruk i småsäck bör undvikas. En materialficka som fylls på med torrbruk i form av bulkleverans eller storsäck som hanteras med maskinhjälp är att föredra. Dammfilter som reducerar oönskad partikelspridning vid fyllning av materialfickan bör användas.

Det är möjligt att utföra robotsprutning med torrsprutningsmetoden, men det är ingen vanlig kombination. Orsaken är framförallt arbetsmiljöproblemen med torrsprutning, men även låg produktivitet och högt materialspill. Vid torrsprutning måste operatören ha en okulär kontroll på sprutytan för att kunna justera vattentillsatsen. Detta kan vara svårt när operatörens position är längre från bergytan, vilket talar mot torrsprutning med robot.

Fiberarmerad sprutbetong utförs normalt inte med torrsprutningsmetoden då det är svårt att utföra betongen med tillräckligt hög fiberhalt. Det högre materialsillet gör också torrsprutad fiberbetong oekonomisk.

Våtsprutning

Huvuddelen av all sprutbetong i nyproduktion utförs med våtsprutningsmetoden. Anledningarna till detta är flera; hög produktivitet, relativt litet materialspill, god arbetsmiljö är några av dem. Totalt ger detta en lägre totalkostnad. Eftersom nyproduktion utgör >90 % av all sprutbetong är tillgängliga resurser i hög grad inriktade på våtsprutning.

De flesta robotar kan användas för bergförstärkning i samband med underhållsarbete. Det gäller att välja en robot som har lämplig storlek och räckvidd i den aktuella tunneln.

Efterbehandling av nysprutad betong

Allbetong behöver efterbehandlas med vattenbegjutning för att hållfasthet och beständighet ska bli så bra som möjligt. Detta är svårare när det gäller sprutbetong än för konventionellt gjuten betong. Särskilt svårt är det att vattenbegjuta den nysprutade betongen i underhållsprojekt med korta dispositionstider. Det enda åtgärd som kan göras blir ofta att vattenbegjuta under arbetsperioderna, och att inte utföra någon efterbehandling under

tider då tunnelarna trafikeras. Detta är ingen bra lösning men accepteras då det inte finns någon enkel lösning på problemet.

I Aspentunneln förstärktes samtliga tak- och väggytor i tunneln med våtsprutad stålfiberarmerad sprutbetong applicerad med sprutrobot. Arbetet utfördes, liksom alla andra arbetsmoment, under nattavstängning. Utöver själva betongsprutningen måste även etablering, skyddstäckning av spårbädd, skydd mot trafikerat spår, städning, borttagning av skyddstäckning och avveckling hinnas med under den tillgängliga tiden. Dessutom måste sprutbetongen ha uppnått tillräcklig hållfasthet för trafikering av spår innan trafiken släpps på. Den effektiva arbetstiden för betongsprutning blev på grund av detta och trafikåtgärder, begränsad till 2-4 timmar per nattskift.

För att klara arbetet inom den förutbestämda tidsramen gjordes några väsentliga teknikval enligt följande:

- En omfattande förprovning utfördes för att finna en materialkombination som gav god sprutbarhet, litet materialspill och tillräckligt snabb hållfasthetsutveckling.*
- En robot med lång räckvidd längs tunneln ställdes på en järnvägsvagn.*
- All försörjning med el-kraft och tryckluft hade installerats på tågsättet som därmed blev självförsörjande. Detta sparade tid vid etablering och avveckling.*
- Två ytterligare vagnar kopplades till och försågs med ett fast skydd mot trafikerat spår, samt rörliga skydd som kunde passas mot bergtaket.*
- En rotertrumma för färsk betong med volym på cirka 7 m³, ställdes upp på vagnen för att kunna tömma direkt i betongpumpen.*
- Den färska betongmassan retarderades cirka sex timmar för att inte börja härda i utrustningen vid ett avbrott. Detta var nödvändigt då materialförsörjning kunde fördröjas på grund av övrig verksamhet eller i händelse av haveri. Åtgärden gjordes också för att inte behöva göra rent maskinerna i tunneln efter skiftet.*
- Extra resurser sattes in för att städa och samla upp skyddstäckning i tunneln efter avslutat arbete.*
- All rengöring och städning av maskiner och vagnar gjordes när hela tågsättet hade återvänt till etableringsplatsen.*

Trots dessa åtgärder kunde vi konstatera att produktiviteten under skiften med enkelspårdrift var ganska låg. Detta berodde framförallt på att arbetet fick utföras med stor försiktighet med spänningsförande kontaktledning och trafik alldeles intill, men också på begränsade arbetsytor samt svårigheter att fylla på material med hänsyn till andra pågående aktiviteter. När båda spåren var avstängda blev den effektiva arbetstiden längre genom mindre störningar från intilliggande spår och kontaktledning, större tillgängliga ytor och då materialförsörjningen blev enklare.

Dränering

Konventionella system

Vattenläckage från tak och väggar i trafiktunnlar är ett stort problem som ger stora driftkostnader för tunnelägare på grund av nedbrytning av installationer, spår och vägbanor. Dessutom bidrar vattnet till nedsatt funktion som drabbar trafikanterna. På nordiska breddgrader är problemet med frysning kanske större än inläckaget i sig, då det medför risk för halka och nedfallande istappar. De flesta system för vatten- och frostsäkring av tunnlar innehåller betydande mängder brännbart material. För att klara brandsäkerheten i tunneln måste dessa brandfarliga konstruktioner skyddas mot antändning.

Många äldre tunnlar (> 25 år) har bristfällig vatten- och frostsäkring eller konstruktioner med dåliga brandskyddande egenskaper. Det finns exempel på mycket omfattande inklädnader med brännbara system utan brandskydd. Dränkonstruktioner räknas som en installation och har en kortare livslängd än tunnelns bärande huvudsystem, ofta räknar man med en livslängd på 30-45 år. En tänkbar underhållsinsats kan i dessa fall innebära komplettering av äldre dränsystemet eller en radikal förnyelse av hela systemet.

I nyare tunnlar finns oftast omfattande installationer av dräner med extruderad polyeten, PE-skum, som aktiv vatten- och frostsäkring och sprutbetong som brandskydd. Problemet i dessa tunnlar är att vattenläckagen flyttar sig med tiden och uppträder där det inte finns dräner monterade. Underhållsinsatser i dessa tunnlar består ofta i att komplettera med nya dräner.

De senaste 5-10 åren har den brandskyddande sprutbetongen utförts med inblandning av syntetisk fiber av polypropylenplast, pp-fiber, som ger förbättrat brandskydd. Trenden är också att i större utsträckning förse hela tunneln med vatten- och frostsäkring, s.k. inklädnadssystem.

Rockdrain

Ett nyutvecklat system för vatten- och frostsäkring av tunnlar är Rockdrain. Det består av ett kanalnät som monteras mot den förstärkta bergytan på tunnelns väggar och tak. Nätet täcks med ett tunt lager konventionell sprutbetong. Konstruktionen kompletteras med ett lager specialdesignad sprutbetong som är tätare än vanlig betong, värmeisolerande och brandtålig. Läckande vatten tvingas in i kanalsystemet och leds ner till tunnelns huvuddränering. Systemet har fördelar som kan göra det lämpligt att använda i underhållssammanhang.

- Flexibelt – lätt att anpassa till en ojämn bergyta
- Utrymmessnålt – mindre platskrävande än konventionella dräner
- Vidhäftande – bärs inte av bultar

Rockdrain är än så länge relativt oprövat i Sverige. Fältprovning har gjorts på ett par ställen, varav ett ganska omfattande. Trots vissa felaktigheter i utförandet verkar tekniken fungera mycket bra. Vilket kan tolkas som att systemet är robust.

Att tänka på i framtiden

Allmänt

Befintliga vägtunnlar

Underhållsarbete i vägtunnlar underlättas avsevärt om trafiken kan begränsas eller helt ledas om till andra vägar. Minskad trafik ger kortare projekttid, säkrare arbetsplats och lägre underhållskostnad.

Om det krävs av trafikskäl kan en partiell avstängning anordnas genom att montera skyddande presenningar eller fast vägg mellan arbetsområdet och trafiken. Alla sådana åtgärder som ger ökad tillgänglighet för underhåll är fördelaktig för produktiviteten i underhållsprojektet.

Den sämsta lösningen ur underhållssynpunkt är korta avstängningar med reducerat trafikutrymme.

Vilken lösning som väljs bestäms slutligt av samhällsekonomiska kalkyler.

Nya vägtunnlar

Generellt gäller att ur underhållssynpunkt är det olyckligt att bygga för en trafiksituation som inte ger möjlighet och tid till nödvändigt underhåll. Ett effektivt underhåll förutsätter att det finns tid att utföra ett säkert och kvalitetsmässigt bra arbete. Goda omledningsmöjligheter bör därför vara en prioriterad punkt när nya biltunnlar planeras.

Befintliga järnvägstunnlar

Inför kommande underhållsprojekt i existerande tunnlar kan det vara lämpligt att tänka på följande:

Trafikering under arbetstiden

Ju mindre trafik som passerar arbetsplatsen under arbetskillen desto bättre blir effektiviteten i arbetet. Det är naturligtvis svårt att leda om trafik till annan sträckning på en högtrafikerad bandel, men om det finns möjlighet så är det en mycket stor fördel för produktionen och arbetsmiljön.

Åtkomlighet

Befintliga tillfartsvägar och uppställningsplatser i tunnelns omedelbara närhet bör behållas tillgängliga för underhållsprojekt som detta.

Projektering

Det är en stor fördel att i en utförandeentreprenad ha kännedom om de åtgärder som ska utföras i god tid innan arbetet ska utföras. Att ge projektören tid att genomföra undersökning av förhållanden på plats är en förutsättning för detta.

Upphandling

För att undvika förseningar i upphandlingen är det ytterst viktigt att förfrågningsunderlaget är tydligt och inte ger utrymme för tveksamhet. Det ska kunna tydas korrekt även av icke järnvägsexperter.

Tunnelutformning

Tunnlar byggda som två enkelspårstunnlar förenklar underhållsarbeten i hög grad. De mycket tidskrävande och kostsamma skyddsåtgärder som krävs för att kunna arbeta nära järnvägstrafik och spänningsförande kontaktledning kan undvikas. Arbetsmiljön blir avsevärt bättre med två enkelspårstunnlar. Kvaliteten på underhållsarbeten förbättras, och kostnaderna för underhåll minskar.

Om dubbelspårstunnlar ändå väljs så bör avståndet mellan spåren vara tillräckligt stort för att arbete ska kunna utföras till tunnelns mittlinje från ett spår, så att hela takytan kan behandlas utan att båda spåren stängs för trafik samtidigt. Avståndet från centrum till centrum blir då omkring sex meter.

Åtkomlighet

Närheten till stickspår med möjlighet till lastning och lossning av större maskiner på järnvägsvagnar underlättar arbetet.

Tillgänglighet med hjulburna fordon intill båda spåren, i tunnelns omedelbara närhet, underlättar ett effektivt underhåll. Material och utrustning kan då enklare lastas om till järnvägsvagnar utan dyra transporter på banan. Bevara därför anläggningsvägar i tunnelns närhet om möjligt.

Uppställningsytor för maskiner och material nära tunnelmynningar är också en stor fördel i en underhållsentreprenad som denna. Anläggning för behandling av processvatten måste till exempel av naturliga skäl placeras nära tunneln, och helst utan att behöva ta spår i anspråk vid byggande av anläggningen.

I längre tunnlar är det dessutom fördelaktigt att erbjuda utrymmen för placering av hjälpmedel inne i tunneln, helst med separat transportväg via t ex räddningstunnlar/servicetunnlar.

Vid planering av nya tunnlar kan dessa råd medverka till ett mera rationellt och mindre riskfyllt underhåll och sannolikt en lägre LCC-kostnad.

Speciella svårigheter

Det finns ett antal svårigheter som är specifika för underhållsprojekt. Det har att göra med utförandet som ofta sker intermittent under korta arbetsskift eller i konflikt med trafik. Några exempel på aktiviteter som kräver särskilt mycket planering och arbetsberedning för att resultatet ska bli bra.

Efterbehandling av nygjuten sprutbetong

All betong behöver en god efterbehandling för att uppnå en god kvalitet, liten krympning och bra beständighet. Det vanliga och bästa sättet att efterbehandla betong är att vattenbegjuta den med början så snart som möjligt efter gjutning. Vattenhärdningen ska pågå tills hållfastheten har uppnått 45 % av sluthållfastheten enligt rekommendationer i Betonghandbok. Det tar omkring 2-3 dygn för betong med Anläggningscement, men är starkt temperaturberoende. För att ytterligare förbättra härdningsbetingelserna kan betongens yta täckas med plast eller liknande som förhindrar uttorkning. Alternativt kan vattenhärdning ersättas av membranhärdning

med vax eller liknande, men cementreaktionen förbrukar vatten varför denna metod ger sämre resultat och rekommenderas normalt inte.

Sprutbetong har en sammansättning som gör att kravet på efterbehandling bör vara högre eller åtminstone lika högt ställt som för en gjuten betong. Ofta är uttorkningen stark på grund av ventilation och ogynnsam luftfuktighet. När det gäller sprutbetong i tak och på väggar i en tunnel, är det inte lika enkelt att vattenbegjuta den nysprutade betongen. Oftast blir det i form av intermitterent sprutning av vatten på betongens yta. Täckning av sprutbetongytan med plast är mycket svårt att utföra. Membranhårdning är inget bra alternativ, särskilt inte om sprutbetongen läggs på i flera olika lager, eftersom vaxprodukter kan påverka vidhäftningen mellan skikten negativt.

I ett underhållsprojekt med korta dispositionstider är det ofta inte lämpligt eller ens möjligt att utföra vattenbegjutning när tunneln är trafikerad. I en järnvägstunnel med kontaktledning är det förenat med livsfara att spruta vatten med spänning på kontaktledningen. Av säkerhetsskäl kan alltså vattenbegjutning inte utföras under sådana förhållanden.

Det behövs en lösning på detta problem för att sprutbetong som produceras under dessa förhållanden ska få en godtagbar kvalitet. Lösningen är troligen en modifierad sammansättning av den färska betongen som gör den mindre känslig för uttorkning. Det finns produkter på marknaden som är avsedda att blandas in i betongen och därigenom minska vattenavgången. Avsikten med sådana tillsatser är god, men tester som har utförts med dessa produkter visar dock ingen eller obetydlig effekt. Här behövs en teknikutveckling, och vid bra resultat kan denna teknik med fördel även användas i nyproduktion av tunnlar.

I Aspentunneln testades vaxbaserad membranhårdare för efterbehandling i samband med förprovning. Det visade sig dock att vidhäftningen försämrades väsentligt på ytor där flera påslag utfördes med mellanliggande vaxbehandling. Därför efterbehandlades sprutbetongen med intermitterent vattenbegjutning under arbetsskiftet. På övrig tid, när banan trafikerades, kunde ingen vattenbegjutning göras. Ingen allvarlig sprickbildning kunde trots detta konstateras i tunneln efter avslutat arbete.

Logistik i järnvägstunnel

Svårigheter att arbeta i en järnvägstunnel är oftast beroende av att alla maskiner och transportfordon är rälsbundna. Inbördes ordning är ofta omöjlig att ändra under pågående arbetsskift, eller orsakar avbrott i arbetet och minskad produktivitet. Om avståndet till stickspår är långt. Tillgänglighet för maskiner och behov av materialförsörjning innebär en mycket stor planeringsinsats varje dag.

I Aspentunneln utfördes arbetet till stor del med trafik på sidospåret. Närmsta stickspår fanns cirka tre kilometer från tunneln. All förflyttning fick ske på ett spår och materialförsörjning var komplicerad. En god planering var den till synes bästa lösningen för att klara av uppgiften på den tillgängliga tiden. Arbetsledningen använde sig bland annat av fysiska leksaksmodeller av järnvägsvagnar för att göra planeringen visuellt och tydligare. Den metoden fungerade bra men det borde finnas andra möjligheter att flytta om vagnar och underlätta transporter.

Skyddsbarriär mot trafik på sidospår i järnvägstunnel

Trafik nära arbetsstället medför risker och orsakar hög stress hos personalen, vilket medför sänkt produktivitet och förlängd utförandetid. En effektiv barriär som förhindrar ofrivilliga intrång i den trafikerade delen av tunneln är en absolut nödvändighet. En sådan skyddslösning blir ofta klumpig och hantering är tidsödande. Det finns alltså behov av bättre lösningar som kan manövreras på ett snabbt och säkert sätt. En sådan lösning kan bli lönsam genom höjd produktivitet.

I Aspentunneln användes stabila stolpar på öppna järnvägsvagnar som stöd. En plankvägg restes, och en tätning upp mot bergtak manövrerades manuellt. Lösningen fungerade relativt väl, men kunde ha utförts med hydraulisk manövrering och ännu lite säkrare om tid funnits i planeringsskedet.

Bilaga 4: Fallstudie Aspentunneln

Tommy Ellison, Besab

Inledning

Ett underhållsarbete genomfördes under sommaren 2010 i Aspentunneln, se nedan. Arbetet, som genomfördes som en utförandeentreprenad, innehöll många svårigheter som måste bemästras i såväl kalkylskede, produktionsplanering och under produktion. Projektet kan ses som ett illustrativt exempel på ett underhållsarbete i en järnvägstunnel med de utmaningar som kan uppstå. I texten beskrivs projektets svårigheter ur entreprenörens synvinkel. Tunneln är relevant som praktikexempel då det är en av flera liknande tunnlar i det svenska bannätet som måste underhållas och uppgraderas för att medge fortsatt säker trafik. I slutet listas några erfarenheter och tips som kan underlätta framtida underhåll i järnvägstunnlar.

Uppgifter om tunneln

Den aktuella tunneln ligger på stråk 1, Västra Stambanan, bandel 612, Alingsås-Partille. Banan har dubbelspår och är elektrifierad. Största tillåtna axellast, STAX, är 25 ton och största tillåtna vagnvikt är 8 ton/m. Högsta tillåtna hastighet är 200 km/h.

Aspentunneln ligger på sträckan Aspen-Jonsered mellan km 440+465 – 440+740 och är 275 m lång. Tunneln togs i drift 1914 och byggdes ursprungligen för enkelspår men har senare byggts ut till dubbelspårstunnel. Tunnelns botten har sänkts i samband med upprustning till STAX 25. Tunneln är byggd som bergtunnel med ca 10 m spännvidd och en höjd över rök på ca 7 m. Mynningarna är förstärkta med formgjutna betongvalv av okänd ålder. Berget är förstärkt med selektiv bultning och ett mindre parti, omkring km 440+620 och 440+732, är även förstärkt med sprutbetong. Stödjande betongkonstruktioner förekommer i tunnelväggen vid km 440+680 och km 440+703. Några mindre områden i taket är försedda med isnät eller provisoriska nät för att skydda spåren från bergnedfall. Vatten- och frostisolering förekommer på några platser i tunneln, dessa isoleringsmattor saknar brandskydd.

(TRV 2012/91688, Handling 9 Administrativa föreskrifter)

Planerade arbeten

Följande summariska beskrivning av omfattningen är hämtad ur förfrågningsunderlaget: - Vidgning av tunnelsektionen där så erfordras för ny förstärkning och nya dräner

- Skrotning av alla bergytor samt bomknackning av betongytor
- Rengöring, blästring av bergytor som ska betongsprutas
- Demontering av befintliga bergnät och dräner
- Systembultning, borrar, ingjutning, montering av bricka och mutter
- Nya dräner inklusive sprutbetong/brandskyddsduk.
- Underhåll och injektering av betongportaler

(TRV 2012/91688, Handling 9 Administrativa föreskrifter)

En mer exakt beskrivning av omfattningen lämnades i "Handling 10.1 Mängdförteckning med beskrivande text", ritningar och övriga handlingar.

Utförandetid

Alla arbeten skulle utföras under en fast tidsperiod utan möjlighet till förlängning. Byggstart var planerad till 2013-05-06 klockan 22.00. Alla arbeten i tunneln skulle vara färdigställda 2013-08-20 klockan 06.00. Total utförandetid var 86 nattskift mellan klockan 22.00 – 06.00, och 21 nattskift mellan 22.15 – 06.00 (dubbelspårsavstängning), totalt 850,75 timmar.

Under arbetet passerade trafiken, med sänkt hastighet till 70 km/timma, på ett spår förbi arbetsplatsen. Under 21 skift var båda spåren stängda för trafik. Detta var helt nödvändigt för att kunna utföra underhåll på samtliga bergytter med iakttagande av gällande säkerhetsavstånd till tåg och strömförande ledning.

Något om upphandlingen

Förfrågningsunderlaget blev tillgängligt strax innan julhelgen. Anbudstiden var relativt kort och sammanföll med helgerna kring årsskiftet. Anbud skulle lämnas in senast 2013-01-21.

Under anbudstiden fick anbudsgivarna besöka tunneln för att bilda sig en uppfattning om förhållanden på plats. Då kunde vi bilda oss en uppfattning om tillfartsvägar, uppställningsplatser och omkringliggande verksamheter och boende. Det var dock inte möjligt att beträda tunneln vid detta tillfälle.

Tilldelningsbeslut dröjde av olika skäl betydligt längre tid än som är vanligt. Orsaken var bland annat överprövning av tilldelningsbeslutet. Kontraktet mellan Trafikverket och Besab skrevs först i mitten av april månad.

Produktionsplanering

På grund av den långdragna upphandlingsprocessen blev tiden för planering mycket kort, endast cirka fyra veckor mot tio veckor som vi hade förutsatt i anbudet. Viss resursplanering hade möjligen kunnat bli bättre om det funnits mer tid att göra förberedelser, men med en intensiv arbetsinsats blev resultatet ändå tillfredsställande.

På grund av den knappa förberedelsetiden fick vi ta beslut om metoder väldigt snabbt. Ett exempel är förprovning av sprutbetong. Kraven i detta projekt var ställda på ett något annorlunda sätt än som är normalt, och förprovning blev därför en väsentlig del i planeringsarbetet. Det krävdes en relativt hög tidig hållfasthet för att möjliggöra betongsprutning under de korta arbetsskiften, och med tillräcklig säkerhet mot nedfall när tågtrafiken släpptes på efter avslutat skift. En relativt omfattande provuppställning gjordes, men tidsbristen gjorde att vi bara hann med några få provserier. Den valda betongen uppfyllde med rimlig säkerhet ställda hållfasthetskrav för snabbt trafikpåsläpp men med fler provserier kunde resultatet blivit ännu bättre.

Val av metoder

För dessa arbeten använde vi oss av följande tekniska utförande och val av utrustning.

Bergschakt

Borrning utfördes med dieselhydrauliska borraragregat typ Commando och motsvarande.

Sprängning ansåg vi var ett alltför riskabelt alternativ, och användning av expanderande cement s.k. "snigeldynamit" för långsamt och oberäkneligt, så vi valde mellan några andra metoder. Till en början gjordes försök att använda en relativt nyutvecklad spräckutrustning typ Emstone. Detta system består av hydrauliskt expanderbara slangar som förs in i enskilt borrhål eller i grupp av borrhål för momentan spräckning. Metoden känns lovande för användning i speciellt känslig miljö, men det visade sig dock att det blev mycket tungt och komplicerat att hantera utrustningen på den trånga arbetsplatsen. Risken för skador på utrustningen var också up-

penbar när lossbrutna bergmassor blandades med slangar, och upplastning av massorna måste gå snabbt. Därför ändrades metod till traditionell hydraulisk spräckning, med något större risk för störningar för närboende genom oönskade stomljudd enligt vår bedömning. Metoden fungerade dock utmärkt.

Bergrensning av samtliga bergytter utfördes manuellt från arbetsborg på arbetsvagn.

Renspolning av bergytter

Då tunneln är gammal och bergytterna har utsatts för nedsmutsning med bland annat dieselavgaser, var det ytterst viktigt att lyckas med rengöringen av bergytterna för att efterföljande betongsprutning skulle få så bra effekt som möjligt. Ingen provtvättning hade kunnat genomföras innan projektet startade så resultatet av rensningen var ett osäkerhetsmoment. Metoden som valdes var en kraftig högtryckspump som vanligen används vid vattenbilning med handlans eller vattenfräsning. Högt tryck (upp till cirka 2000 bar) och begränsad vattenmängd (<50 liter/min) gav så pass bra resultat att sprutbetongen klarade ställda vidhäftningskrav med råge.

Masshantering

Nedskrotat berg, rivningsmassor och sprutbetongspill samlades i första hand upp på järnvägsvagnar. Makadam skyddstäcktes vid smutsande arbeten och material som ändå föll ner på makadambädd lastades upp på vagnar med hjälp av lastanordning på arbetsfordon. Detta förfarande fungerade mycket bra. Med lite längre förberedelsestid kunde möjligen en större del av massorna, genom påbyggda fällbara lämmar, samlats upp på vagnarna. Därigenom kunde en del värdefull tid sparas.

Bergförankring

Borrning utfördes med samma utrustning som ovan, och montering skedde manuellt i borrhål vilka fylldes med cementpasta som pumpades in med skruvpump. Någon annan metod övervägdes inte trots att över 2000 bergbultar monterades. Bekymmer med en ny (!) borrarutrustning ställde till med problem, men i övrigt fungerade bultsättningen bra.

Betongsprutning

En sprutrobot med linjär matare placerades på en lågbyggd järnvägsvagn försedd med fysiskt skydd på ena långsidan. På så sätt kunde cirka sex meter av tunneln sprutas från en uppställning. Färsk betong lagrades i en roterande betongtrumma som placerades på en järnvägsvagn och kunde tömmas direkt i betongpumpen. Omlastning från betongbil till mellanlagringstrumma skedde utanför tunneln, och utgjorde en allvarlig störning på övriga arbeten.

Dränering

Befintliga tak- och väggdräneringar skulle bytas ut. De byttes mot relativt konventionella dränmattor som förankrades i berg med bultar och brandskyddades med brandskyddsmatta. För arbetet användes liftar, dieselhydrauliska borraraggregat och handhållen borrarutrustning.

Logistik

Då många arbetsmoment måste utföras samtidigt för att klara den pressade produktionstiden, krävdes väldigt mycket utrustning i tunneln. Alla arbeten utfördes från järnvägsvagnar, och tunneln var nästan full med vagnar under skiftet. Det blev därför en komplicerad uppgift att förse arbetslagen med material under pågående skift. För de flesta arbeten kunde tillräckligt mycket material för ett helt skift läggas upp på vagnar innan skiftet startade.

För transport av betong i tunneln hade en roterande s.k. mixer rymmande cirka fem kbm placerats på en järnvägsvagn. Vid påfyllning måste dock färsk betongmassa hämtas från omlastningsplats utanför tunneln. Det

kunde ibland betyda att flera andra arbetslag måste göra uppehåll i arbetet och flytta sig ut ur tunneln vilket kunde ta cirka en halvtimme.

Speciella svårigheter

Eftersom spår och installationer måste fungera under hela arbetstiden och makadam inte fick smutsas ner, måste en omfattande skyddstäckning genomföras varje skift. Efter avslutat arbete måste all skyddstäckning vara borttagen och arbetsplatsen vara avstädad.

Närheten till trafik och spänningsförande kontaktledningar krävde omfattande fysiska skydd för att åstadkomma en säker arbetsmiljö. Dessa skydd utgjordes av plankväggar som monterades på vagnar. Överst anordnades en lätt avskärmning som mekaniskt kunde skjutas upp mot bergtaket och förhindra stänk på passerande trafik och anläggning i drift. Stor försiktighet måste ändå iakttas vid användning av vattenspolning eller betongsprutning, eftersom det är svårt att åstadkomma en helt tät avskärmning. För säkerhets skull avbröts sådant arbete vid tågpassager. Vid byte av spår från uppspår till nedspår eller motsatt, måste också vagnarna byta körriktning. För detta krävdes transport till ett spårområde med möjlighet att ändra körriktning. Om detta inte var möjligt så behövde skyddsplanken flyttas från den ena sidan till den andra. Detta fick då ske på en dag mellan två nattskift.

Produktionsstörningar

Den tillgängliga arbetstiden reducerades ytterligare på grund av följande faktorer:

Hastighetsnedsättning

För att möjliggöra arbete på ett spår med trafik på det andra spåret nedsattes den tillåtna hastigheten till 40 km/timme under arbetsskiften. Då trafiken skulle gå med normal hastighet under övriga delar av dygnet, måste spårbyten och anordningar för hastighetsnedsättning aktiveras en gång och avaktiveras en gång per dygn. Dessa arbeten utfördes under de "tågfria" tiderna och reducerade därför den effektiva arbetstiden. Utläggning och upptagning av balliser och övriga åtgärder, tog i början upp till tre timmar per skift, men efterhand kortades tiden till omkring två timmar per skift.

Sidoentreprenader

Vid några tillfällen tvingades vi vänta på att en sidoentreprenör skulle utföra t ex signalarbeten, eller att en materialtransport skulle passera tunneln under arbetstiden till en annan bandel.

Väder (åska)

Vid några tillfällen var vädret sådant att arbetet måste avbrytas av säkerhetsskäl. Arbeten nära kontaktledning tillåts inte när det finns risk för åsknedslag.

Restriktioner med hänsyn till omgivningspåverkan

Ett mindre antal villor i tunnelns omedelbara närhet riskerade att störas av stomljud från borring, knackning av berg eller annat buller. Någon sprängning utfördes inte under arbetsperioden. Endast ett fåtal klagomål från de boende framfördes under arbetet. Det är möjligt att tågtrafik med normal hastighet är mer störande för de boende i fastigheterna än det buller som alstrades av arbetena i tunneln. Vi upplevde också att byggherren hade genomfört en bra riskanalys innan arbetet startade. Omgivningspåverkan var därför inte något stort problem i detta projekt.

Projektering

Ett bra underlag för arbetet hade tagits fram av byggherren. Vissa arbeten måste ändå projekteras under arbetsperioden. Detta innebar att dessa arbeten måste planeras ad-hoc och genomföras utan föregående planering. Åtgärder i betongportaler var ett sådant arbete. Åtgärden här bestod i injektering och montering av tillfälliga rasskydd av nät.

Något att lära av detta projekt

Under projektet har vi som entreprenörer gjort några iakttagelser som kan vara bra att känna till för att framtida underhållsprojekt ska erbjuda en tillfredställande arbetsmiljö, god effektivitet, ge små trafikstörningar och en låg LCC-kostnad.

Befintliga järnvägstunnlar

Inför kommande underhållsprojekt i existerande tunnlar kan det vara lämpligt att tänka på följande:

Trafikering under arbetstiden

Ju mindre trafik som passerar arbetsplatsen under arbetskiften desto bättre blir effektiviteten i arbetet. Det är naturligtvis svårt att leda om trafik till annan sträckning på en högtrafikerad bandel, men om det finns möjlighet så är det en mycket stor fördel för produktionen och arbetsmiljön.

Åtkomlighet

Befintliga tillfartsvägar och uppställningsplatser i tunnelns omedelbara närhet bör behållas tillgängliga för underhållsprojekt som detta.

Projektering

Det är en stor fördel att i en utförandeentreprenad ha kännedom om de åtgärder som ska utföras i god tid innan arbetet ska utföras. Att ge projektören tid att genomföra undersökning av förhållanden på plats är en förutsättning för detta.

Upphandling

För att undvika förseningar i upphandlingen är det ytterst viktigt att förfrågningsunderlaget är tydligt och inte ger utrymme för tveksamhet. Det ska kunna tydas korrekt även av icke järnvägsexperter.

Nya järnvägstunnlar

Vid planering av nya tunnlar kan dessa råd medverka till ett mera rationellt och mindre riskfyllt underhåll och sannolikt en lägre LCC-kostnad.

Tunnelutformning

Om tunneln hade varit byggd som två enkelspårstunnlar hade arbetet underlättats betydligt. De mycket tidskrävande och kostsamma skyddsåtgärder som krävdes för att kunna arbeta nära järnvägstrafik och spänningsförande kontaktledning hade då inte varit nödvändiga. Arbetsmiljön hade blivit avsevärt bättre med två enkelspårstunnlar.

Om dubbelspårstunnlar ändå väljs så bör avståndet mellan spåren vara tillräckligt stort för att arbete ska kunna utföras till tunnelns mittlinje från ett spår, så att hela takytan kan behandlas utan att båda spåren stängs för trafik samtidigt. För att detta skulle vara möjligt i Aspentunneln behöver avståndet mellan upp- och nerspår vara minst två meter större än som nu är fallet.

Åtkomlighet

Närheten till stickspår med möjlighet till lastning och lossning av större maskiner på järnvägsvagnar underlättar arbetet. I projekt Aspentunneln fanns visserligen ett stickspår och uppställningsplatser för vagnar bara 2-3 kilometer från tunneln. Det fanns dock inte möjlighet att lasta/lossa större maskiner eller vända vagnar. Vid dessa tillfällen måste vagnsätten transporteras till bangård i Mölndal cirka 20 kilometer från tunneln. För dessa

vagnrörelser, som passerade Göteborgs central, under dagtid krävdes trafikillstånd vilket är mycket svårt att få.

Tillgänglighet med hjulburna fordon intill båda spåren, i tunnelns omedelbara närhet, underlättar ett effektivt underhåll. Material och utrustning kan då enklare lastas om till järnvägsvagnar utan dyra transporter på banan. Bevara därför anläggningsvägar i tunnelns närhet om möjligt.

Uppställningsytor för maskiner och material nära tunnelmynningar är också en stor fördel i en underhållsentreprenad som denna. Anläggning för behandling av processvatten måste till exempel av naturliga skäl placeras nära tunneln, och helst utan att behöva ta spår i anspråk vid byggande av anläggningen.

I längre tunnlar är det dessutom fördelaktigt att erbjuda utrymmen för placering av hjälpmedel inne i tunneln, helst med separat transportväg via t ex räddningstunnlar/servicetunnlar.

För att undvika förseningar i upphandlingen är det ytterst viktigt att förfrågningsunderlaget är tydligt och inte ger utrymme för tveksamhet. Det ska kunna tydjas korrekt även av icke järnvägsexperter.

I längre tunnlar är det dessutom fördelaktigt att erbjuda utrymmen för placering av hjälpmedel inne i tunneln.

Bilaga 5. Litteraturstudie: Underhåll av trafiktunnlar i ett internationellt perspektiv

Ulf Lindblom, Gecon AB

Bakgrund och upplägg av studien

Avsikten med studien var att kartlägga det internationella kunskapsläget gällande underhåll av järnvägs- och trafiktunnlar, främst gällande inspektions- och arbetsmetoder.

De teknikområden som söktes var framförallt:

- Tillämpade inspektionsmetoder och dokumenteringssystem
 - "State-of-the-art" instrument och mätsystem, särskilt icke-förstörande (NDT)
 - Arbetsmetoder vid avhjälpande av fel och brister i tunneln samt vid förebyggande underhåll
-

Databaser hämtades från biblioteken vid KTH, CTH, LUTH och LUH och är de generellt mest accepterade internationella källorna på området inom forskarvärlden rörande bergmekanik, och inkluderar:

- CEDB-Civil Engineering Database
- SCOPUS
- Web of Science
- Engineering Village (Elsevier)
- US Federal Highway Administration Database
- Google Scholar

Internationellt har många länder långt fler tunnlar och större mängd persontransporter per dygn än vad som är fallet i Sverige. Ofta är tunnelarna byggda i dåligt berg. Det finns ingen anledning för svenska tunnelägare att fokusera på problem som kanske aldrig inträffar i en svensk tunnel i urberg. Därför har studien lagt tyngdpunkten på internationella erfarenheter av tunnlar med liknande förhållanden som i Sverige.

Svenska trafiktunnlar är normalt byggda i berggrund av god kvalitet. I normalfallet betraktas berget som ett självständigt byggnadsmaterial som endast ställvis behöver förstärkas efter lokala behov. Huvudtypen av förstärkning är bultar, sprutbetong eller betongingjutning. Som skydd mot inringning av vatten i tunneln och isbildning på vägbana och installationer används olika typer av membran och frostisoleringar. Denna förstärkningsfilosofi kräver att berget måste inspekteras regelbundet för att säkerställa förstärkningarnas funktionalitet.

I svenska trafiktunnlar transporteras varje dag en stor mängd människor genom tunnlar sprängda eller borrarade i hårt urberg. Incidenter som kan hänföras till bergets instabilitet händer ytterst sällan. Likafullt är det så, att en enstaka händelse, t.ex. ett nedfallande bergblock, kan få förödande konsekvenser på en hårt trafikerad linje. Det är av stort intresse att via litteraturen dra lärdomar av hur sådana incidenter inträffar och hur de kan förhindras.

En nyckelfråga för tunnelsäkerheten är hur potentiella svagheter i tunneltak och väggar kan upptäckas i tid, innan ett ras inträffar. Av denna anledning är det viktigt att följa utvecklingen av nya, geofysiska instrument för besiktning av berg och betonglinor. På den korta tid som en trafiktunnel är tillgänglig för inspektion måste instrumenten klara att avslöja de strukturella svagheterna i tunnelstrukturen. I litteratursökningen angavs "tunnel inspection" som huvudsökord.

En annan, vital fråga är hur "felen" i tunnelstrukturen kan åtgärdas på den begränsade tid som står till förfogande tills trafiken släpps på igen. Vid större brister blir det ogörligt att klara detta under ett kort inspektionspass. Tunneln måste då stängas av, helt eller delvis. Enklare underhållsåtgärder, som lokal bortknackning av bom sprutbetong och påsprutning av ny betong, byte av enstaka bultar, renspolning av dräner m.m. kan dock hinnas med under inspektionspasset. Här ställs i så fall höga krav på tidseffektiva och robusta arbetsmetoder och maskiner. Det är av intresse för underhållet av svenska trafiktunnlar att följa den internationella utvecklingen på detta område. Litteratursökningen utgick här från nyckelorden "tunnel maintenance".

Nedan följer en redogörelse för litteratursökningens resultat enligt ovanstående inriktning. Ett kort avsnitt om tunnelolyckor inleder redogörelsen.

I texten anges de källor som informationen hämtats ifrån. I texten hänvisas till en litteraturförteckning som återfinns i avsnitt 8.

Sökresultat

Olyckor i tunnlar

Ett antal utredningar om tunnelolyckor har genomförts i olika länder [Haak A, 2002], [Yeung J, et al, 2013], [Amundsen FH et al, 2000], [Caliendo C, 2012]. Enligt samstämmiga uppgifter i dessa utredningar, sker det inte fler fordonsolyckor i tunnlar än på väg eller på spår i det fria. Det flesta trafikolyckorna inträffar nära tunnelportaler. Följderna av olyckor i tunnlar verkar dock vara svårare än andra olyckor.

När det gäller olyckor orsakade av bristande tunnelstabilitet, såsom nedfallande inklädnad eller berg, är rapporterna i litteraturen mycket få, kanske av naturliga orsaker. Icke förty, sådana olyckor kan få förödande konsekvenser, vilket är utgångspunkten för det aktuella forskningsprojektet.

I Japan inträffade på senare år ett antal olyckor med nedfallande betonginklädnad, bland annat mot höghastighetståget Shinkansen [Asakura et al, 2010]. Även om inga personskador inträffade, ledde detta till en svår förtroendekris för transportsystemets säkerhet och robusthet. Detta var anledningen till en bred vetenskaplig undersökning av skador i trafiktunnlar och dessas inverkan på säkerheten.

I Japan finns över 4700 järnvägstunnlar, som regel med betonglining, med en sammanlagd längd av ca 3000 km och miljontals passagerare reser varje år genom dessa tunnlar. Efterföljande analyser och tester påvisade att brottet kunder härledas till utmattningsfenomen orsakade av många tågpassager.

I Japan finns vidare 6700 vägtunnlar, 70 % av dem byggda efter 1960. Nästan alla av dessa tunnlar har gjuten betonglining, men sprutbetonglining förekommer. Sprutbetong nämns också som en reparationsmetod för betongliners.

Skador finns i 90 % av tunnlar efter 30 år. De vanligaste skadorna är sprickor, betongskador, frostskaador och fogskador. Vattenläckage förekommer i 60 % av tunnlar

I USA inträffade 2005 en olycka med ett fallande betongelement i Bostons nya vägtunnelsystem "Big Dig" som dödade en bilist. Raset orsakades av avrostade upphängningsbultar. Olyckan fick stor publicitet.

I Norge inträffade 2003 ett ras i Dröbacktunneln under Oslofjorden, tre år efter det att tunneln stod klar. Lycko- samt nog skedde raset nattetid, när tunneln var tom på trafik. Vid den efterföljande besiktningen av berget bakom inklädnaden upptäcktes flera partier där berg fallit ut och hade fallit ner på inklädnadsvalvet. Efter åtgärder fick tunneln snart på nytt stängas för reparationsarbeten [Thoresen S, 2003, personlig kontakt]. Vid utbyggnaden av E18 i Vestfold inträffade 2006 ett ras i Hanekleivatunneln, då ca 25 m³ berg trängde igenom inklädnaden och hamnade på vägbanan. Inte heller här fanns trafik i tunneln vid tillfället. Ytterligare 8 omgivande tunnlar måste renoveras på grund av ras bakom inklädnaderna. Incidenterna ledde till en kritisk utredning av hur säkerheten i norska trafiktunnlar kan förbättras [Statens Vegvesen et al, 2007].

Reglering av inspektion och underhåll i olika länder, lagar och förordningar

I USA finns en federalt gällande manual för hur spår- och vägtunnlar skall inspekteras och underhållas [Federal Highway Administration, 2005]. Efterlevnaden av denna verkar variera i landet. Efter olyckan i Boston har dock krav ställts på obligatorisk, regelbunden inspektion av trafiktunnlar i delstaten Massachusetts. Kravet har fått efterföljd i flera delstater. Ett exempel på ett fall med ett ambitiöst inspektions- och underhållsprogram beskrivs i [Jafari et al, 2010].

Under 2012 utgav Transportation Research Board of The National Academies i USA en omfattande rapport om inspektionsmetoder för tunnel lining [TRB, 2012]. Ur denna rapport har hämtats metoder som anses ha relevans för inspektion och underhåll av svenska trafiktunnlar och sammanställts i tabellen nedan. Metoder som är tidsödande och som kräver specialistkompetens och omfattande och dyr utrustning har exkluderats.

<i>Instrument</i>	<i>Användning</i>	<i>Djup, registrering</i>	<i>Vad registreras</i>	<i>Annan info</i>
<i>Georadar (GPR)</i>	<i>Skadelokalisering</i>	<i>Mäter ej djup</i>		<i>Luftantennsystem</i>

<i>Termografi</i>	<i>Skadelokalisering</i>	<i>Mäter ej djup</i>		
<i>Laserskanning</i>	<i>Skadelokalise-ring</i>	<i>Mäter ej djup</i>		
<i>SPACTEC= Kombinations-instrument skanning + termografi</i>	<i>Skadelokalisering</i>	<i>Mäter ej djup</i>		<i>Kräver licensavtal med ägarföretag</i>
<i>Ultraljudstomografi, Ultraljudseko och Ultraljuds-Skjuvvåg (USW)</i>	<i>Mäta skadans läge och omfattning</i>	<i>Ner till ca 0,5 m</i>	<i>Porer, skiktning, vidhäftningsbrott betong/berg</i>	
<i>Impakteko (IE)</i>	<i>Mäta skadans Läge och omfattning</i>		<i>Porer, skiktning i betong, vidhäftningsbrott</i>	
<i>PSPA=Kombinations-instrument USW+IE</i>	<i>Se ovan</i>			

Tabell 1. NDT-instrument för tunnelinspektion enligt en amerikansk undersökning [TRB, 2012].

Instrument och mätmetoder

Inledning

De traditionella metoder som används för tunnelbesiktning är visuell inspektion och bomknackning. Dessa har nackdelen att de är subjektiva och tidskrävande. Specifikt för trafiktunnlar finns behov av ny utrustning så att inspektörens arbete kan bli snabbare och säkrare. Vid sidan av Japan verkar Taiwan vara ett land som ligger långt framme inom området tunnelinspektion [Lee, 2012].

En kontroll av litteraturen visar, att de nya inspektionstekniker som verkar mest lovande för tunnlar är georadar, termografi (infraröd), impakteko (akustisk emission) och laser- eller fotoskanning. Det utvecklas även robotar som kan utföra registreringen av tunnelstatus utan krav på fysisk närvaro av inspektören i tunneln. Ofta är flera instrument monterade på roboten, s.k. multisensorsystem. Roboten är vanligen installerad på ett fordon som kan röra sig längs tunneln.

I tabellen nedan visas de vanligaste, icke-förstörande inspektionsteknikerna som påträffats i litteraturen och som bedöms kunna få tillämpning i svenska trafiktunnlar.

Att inspektera	Inspektionsmetod	Instrument	Anmärkning
Topografi/rörelse i tunnelvägg/tak samt sprickmönster	Bildskanning	Digitalkamera 3D-scanningsteodolit (laser)	Kräver bildmönsterpassning (mosaik-teknik, stiching)
Sprickdjup i sprutbetong resp. betonglinier	AE (ultrasonic) Impakt-eko	AE-utrustning Impakt-eko utrustn.	
Bergkvalitet (fria bergytor resp. berg bakom inklädnad)	GPR Termografi	Markradarutrustning Infraröd termograf	Luftantenn
Vidhäftning berg/betong	GPR	Markradarutrustning	

	Termografi Bomknackning	Infraröd termograf Mekaniserad Schmidt-hammarutrustning	Inkl. akustiskt analysystem
Tjocklek sprutbetong resp. betongliner	GPR Impakt-eko Termografi	Markradarutrustning Impakt-eko utrustn.	
Skada i betong/berg (läge, omfattning)	GPR Termografi Ultraljudsmetoder	Markradarutrustning Infraröd termograf AE-utrustning, USW	Luftantenn
Korrosion		"Static Pulse" ³	

Tabell 2. *Icke-förstörande instrument som hittats i litteraturen och som bedöms kunna användas för inspektion av trafiktunnlar i Sverige.*

Nedan beskrivs inspektionsmetoderna som presenteras i den internationella litteraturen närmare.

Georadar (GPR)

GPR är en geofysisk mätmetod som utnyttjar elektromagnetiska radarpulser för att kartlägga geologiska media. Genom att skicka högfrekventa radiovågor in i materialet och studera de reflekterade vågorna, kan avvikelser som porer och sprickor i bergmaterial och betong upptäckas. Metoden bygger på att sådana avvikelser har annorlunda dielektrisk konstant än omgivningen, vilket uppfattas av mottagarantennen. För bästa resultat bör antennen vara i kontakt med mediet under mätningen. Metoden kan jämföras med principen för reflektionsseismik, med den skillnaden att den akustiska energin här är ersatt av elektromagnetisk energi. GPR-signaler kan tränga in åtskilliga meter i torrt berg, men inträngningen reduceras av vatten i materialet.

GPR kan vara mycket användbar för tunnelinspektion då metoden är snabb och inte skadar tunnelväggen. Med metoden kan man avgöra tjockleken hos en betongliner eller ett sprutbetongskikt och man kan upptäcka eventuella hålrum i kontakten med berget. Man kan också upptäcka instabila bergblock bakom inklädnader. Det är troligt att mätningar med GPR kommer att bli rutin vid tunnelbesiktningar i framtiden [Lalague & Hoff, 2012].

Skanningsmetoder

Gemensamt för skanningsmetoderna är att det framställs bilder av tunnelns insida med mycket hög upplösning och detaljrikedom. För detta kan en laserteodolit eller en digitalkamera användas.

Laser-skanning

Tredimensionell laser-scanning har utvecklats under 2000-talet för mätning, dokumentation, design och kartläggning i arkitektur och infrastruktur [Feng, 2012]. Med en 3D laser-scanner kan en tunnel snabbt digitaliseras i 3D med en upplösning av xyz-koordinaterna på mm-nivå. Även högupplösta bilder kan framställas och läggas in i ett koordinatsystem. Genom att jämföra mätresultaten från olika tillfällen kan eventuella rörelser i tunnel-

³ När det gäller kontroll av bultförstärkningars kondition och graden av stålkorrosion är upplysningarna i den internationella litteraturen mycket sparsamma. I Taiwan verkar man ha utvecklat en mätmetod man kallar "static pulse" [Lee, 2012], men inga detaljer är kända om denna metod.

väggarna avslöjas. Inspektören har därmed fått ett utmärkt kontrollinstrument till sitt förfogande. Ibland benämns systemet LiDAR eller helt enkelt lidarsystem.

De lidarsystem som kan användas för tunnelscanning kallas TLS (Terrestrial Laser Scanning). På marknaden idag finns ett tiotal olika TLS-system [Feng, 2012].

Av litteraturen framgår, att tredimensionell laser-scanning på senare år fått tillämpning vid tunnelbesiktning [Fekete et al, 2010]. Nya system har en hög skanningshastighet, vilket förkortar inspektionstiden. Kravet på datakraft är dock högt. Ur bilderna kan man även få fram information om sprutbetongtjocklek, bultplacering och inströmmande grundvatten. Med hjälp av numeriska bildanalysprogram kan bergmassors strukturer och svagheter identifieras på basis av de skannade bilderna.

Ett antal tillämpningar av 3D-laserskanning i tunnlar beskrivs i litteraturen: Sydkorea [Yoon et al, 2008], Tyskland/Schweiz [Sandrone&Wissler, 2012], Norge [Fekete et al, 2010], Kina [Guo et al, 2008], Kanada [Baiden et al, 2014]. I den senare referensen används ett GPS-system för att lokalisera uppställningen av lasern. En mycket aktuell tillämpning av en automatiserad, bilburen laserskanningutrustning i en spansk tunnel beskrivs i [Puente et al, 2014].

Foto-skanning

Denna skanningsteknik skiljer sig från laser-skanning i det att en vanlig kamera med hög upplösning (mer än 1 megapixel) används för bildframställningen. För att vara användbara krävs att bilderna "sys ihop" så att en sammanlagd yta skapas. För detta ändamål har man tagit fram en speciell "mosaikteknik", beskriven bl.a. i [Lee C-H, et al, 2012].

Metoden tillämpas i flera länder, t.ex. Japan [Ukai, 2007], [Sato et al, 2011], Taiwan [Lee C-H, et al, 2012].

Metoden kräver dock mycket bra sikt i tunneln, ett villkor som sällan kan uppfyllas vid snabba underhållsinsatser. Den är också relativt tidskrävande.

Multi-scanningssystem

Med detta avses att man kombinerar informationstyper som ett scanningssystem kan skapa, som dokumentation, rörelsedetektering, bildframställning m.m. I litteraturen redovisas många tillämpningar av multi-scanningsteknik i tunnlar, se exempelvis [Baiden et al, 2014] och Puente, et al, 2014].

Termiska metoder

Infraröd termografi

Termografi, även kallat värmekamerabesiktning, är en teknik som används för att mäta små temperaturskillnader och överskådligt illustrera dessa grafiskt eller i diagram. Termografering görs ofta för att fånga upp långvägig, infraröd strålning (IR, värmestrålning) från olika kroppar. Strålningen detekteras och kan omvandlas till en bild på en skärm. Vid tillämpning på berginspektion kommer exempelvis våta väggpartier att avvika från det torra berget och framträda på en sådan bild. Andra temperaturanomalier, exempelvis från bultar kommer också att framgå.

Akustiska metoder

Impakteko

Impakteko är en icke-förstörande metod att hitta sprickor och porer i betong och berg. Metoden bygger på att man analyserar skapade, elastiska ljudvågor i materialet och dessas reflexer. Ljudvågorna skapas av en stålsfär som slås mot betongytan. När vågen passerar en spricka, bromsas den upp och våglängden ökar. När vågen når

tillbaka till den yta där den initierades fångas den upp av känsliga mätinstrument (transducers). Efter analys kan sprickor och "fel" i materialet lokaliseras på basis av dessa signaler.

I tunnelsammanhang används metoden framförallt för att bestämma förekomst av och djupet på sprickor i en betongliner. Metoden tillämpas frekvent i Taiwan [Lin et al, 2004].

Metoden har i Sydkorea även tillämpats för att bestämma vidhäftningen mellan sprutbetong i i tunnlar [Song & Cho, 2009]. Man upptäckte att ljudvågans dämpning och resonansfrekvens påverkas av dålig vidhäftning vid övergång till berg och kunde ur denna kunskap bygga upp en inspektionsmetod.

I Japan har man utvecklat ett automatiserat impaktekosystem monterat på en truck [Suda et al, 2004]. Ljudenheten är fäst på en robotarm som manövreras av inspektören. Ljudimpulserna blir stabila och det manuella bomknackningsarbetet kan uteslutas.

Akustisk emission (AE)

Med akustisk emission (AE) avses de ljudvågor av elastisk natur som skapas i ett material när det belastas. Ljudvågorna uppstår på grund av deformationer som skapas av belastningen på materialet och av den plötsliga frigörelse av energi som sker genom dessa deformationer. Genom att kontrollerat belasta materialet och studera AE-responserna, kan materialets kvalitet kontrolleras.

Med akustisk emissionsteknik kan exempelvis vidhäftningen sprutbetong/berg kontrolleras, liksom kvaliteten på själva sprutbetongen. I Japan tillämpas tekniken frekvent [Watanabe et al, 2010].

Inspektionsrobotar

En relativt ny företeelse inom tunnelinspektion är att montera instrumenten på robotar som rör sig längs tunneln. Avsikten är att minska mänsklig närvaro i den farliga miljö som en trafikunnel utgör samt att effektivisera datainsamlingen.

Tidigare har nämnts, att man i Japan har utvecklat ett automatiserat impaktekosystem som kan ersätta manuell bomknackning. Robotarmen är monterad på en truck [Suda et al, 2004].

I Japan konstruerades vid början av 2000-talet en robot med 24 akustiska sensorer och 6 videokameror monterade på en halvcirkelformad stålram. Utrustningen var placerad på ett fordon som rörde sig med ca 1 m/min längs tunneln och kunde vid denna hastighet registrera nyuppkomna deformationer i tunnelns betonginkläddnad [Yao et al, 2003].

Ett robotbaserat, spanskt inspektionssystem för betonginklädda trafikunnelar beskrivs i [Victores et al., 2010]. Instrumenten är fästa vid en robotarm som kan manövreras till önskat läge vid tunnelväggen. Robotarmen i sin tur är monterad på ett fordon med plattform som kan röra sig längs tunneln. Inspektören fjärravläser instrumenten och manövrerar roboten.

Ett multisensorsystem för tunnelinspektion, utvecklat för tunnelbanan i Paris, beskrivs i [Maurice, 2004]. Instrumenteringen och datorer är uppriggade på ett fordon (på väg eller rälsburet) som går längs tunneln med jämn hastighet på mellan 2 och 5 km/tim.

Sammanfattning instrument och mätmetoder

Utvecklingen av icke-förstörande inspektionsmetoder och instrument för kvalitetskontroll av trafikunnelar verkar vara på frammarsch i de länder som har många tunnlar och höga resandesiffror.

3D-lasertekniken verkar mest lovande när det gäller att detektera topografi och rörelse i tunnelväggar. GPR-teknik ökar starkt för kvalitetsbestämning av berg och betong, liksom för vidhäftningskontroller av sprutbetong. För bestämning av sprickdjup i betongliner används framförallt impakteko och AE. Värmekamera verkar ha mest användning för att detektera inläckande vatten i tunnlar.

Tillämpligheten av dessa metoder för underhåll av svenska trafikunnelar diskuteras längre fram i rapporten.

Arbetsmetoder

Allmänt

De arbetsmetoder som blir aktuella vid underhåll av trafiktunnlar sammanfattas nedan:

- Skrotning
- Tvättning
- Injektering
- Förankring
- Dränering
- Betongsprutning
- Renovering av betonglinor

Vid litteraturgenomgången har det varit svårt att hitta internationella referenser som beskriver de fem första av de listade arbetsmetoderna, troligen beroende på att flertalet trafiktunnlar i utlandet är inklädda med betong.

Underhåll av betonginklädnader, däremot, är föremål för en del artiklar, se exempelvis [Broch et al, 2002], [Inokama & Inano, 1996], Long et al, 2011]. Ett intryck är, att den dominerande användningen av sprutbetong i utländska tunnlar, med undantag för de nordiska länderna, är som reparationsmetod för betonglinorn.

Referenser

Alla litteraturhänvisningar i litteraturstudien har samlats i referenslistan i avsnitt 8.
