

UNDERHÅLLSKOSTNADER FÖR BERGTUNNOR I ETT LIVSLÄNGDSPERSPEKTIV

Förord

Byggande av tunnlar medför ett långsiktigt underhållsansvar. Det är därför nödvändigt att val av lösningar och teknisk utrustning görs mot bakgrund av underhållsplanering, där underhållskostnaderna beaktas i ett livslängdsperspektiv. En eftersläpning av underhåll och skötsel kan leda till nedsatt livslängd och sänkt säkerhetsnivå för tunneln eller bergrummet.

Detta projekt har haft som avsikt att analysera de processer som leder till behov av underhåll av komponenter som samverkar med berget i avsikt att stabilisera, täta eller dränera tunneln eller bergrummet: sprutbetong, betong, bultar, dräner, inklädnader och injekteringar. Projektet har drivits i tre etapper under åren 2003-2012. Denna rapport avser den avslutande Etapp III.

Genom experiment och observationer har målsättningen varit att bedöma den tekniska livslängden för de aktuella komponenterna och därmed underhållsfrekvensen. För undersökningarna har projektet anlitat forskningsinstitut (CBI, KIMAB) samt högskolor (CTH, GU). En beräkningsmodell för analyser av kostnader för byggande och underhåll av berganläggningar över anläggningens livslängd (LCC-analys) har tagits fram inom projektets ram och data från undersökningarna har använts som ingångsdata i modellen. LCC-beräkningar för olika underhållsscenarier i kända tunnlar har slutligen gjorts som en avslutning av projektet. Modellen, skriven i Excel-format, har sitt ursprung i ett examensarbete på CTH av Sebastian Almfeldt.

Projektet har drivits i samverkan med en referensgrupp som sammanträtt regelbundet under projektets gång. Referensgruppsmedlemmarna representerar de olika ekonomiska och tekniska intressen som finns i en tunnel eller annan underjordsanläggning: ägare, projektörer och entreprenörer. Gruppmedlemmarna är Anna Andrén (Trafikverket), Bo Blixt (Göteborg Energi), Lars-Göran Dahlqvist (Besab), Lars-Olof Dahlström (NCC), Tommy Ellison (Besab), Ulf Lindblom (Gecon), Bengt Ludvig (PetroTeam), Kent Lundin (TeliaSonera), Thomas Sträng (SL), Per Tengborg (BeFo), Kjell Windelhed (ÅF-Infrastructure, tidigare Trafikverket) samt Pär Åhman (BI, FoU Väst). I tidigare etapper har Helen Andersson (deNeef Norge), Björn Albino (Tyréns) och Mikael Hellsten (BeFo) deltagit.

Projektet har finansierats genom bidrag från Svenska byggnadsentreprenörers utvecklingsfond SBUF (genom FoU Väst), BeFo samt från Göteborg Energi och TeliaSonera.

Ulf Lindblom, projektledare

Innehåll

Förord	1
Sammanfattning.....	6
1 Bakgrund	8
2 LCC-modellen – uppbyggnad, funktionssätt och begränsningar.....	9
2.1 Nuvärdesmetoden	9
2.2 Modellens möjligheter och begränsningar.....	10
2.3 Viktiga ingångsparametrar	10
3 Processer för nedbrytning av förstärkningar i bergtunnlar.....	11
3.1 Gjuten betong ¹	11
3.1.1 Allmänt	11
3.1.2 Karbonatisering	11
3.1.3 Frostangrepp	12
3.2 Sprutbetong	12
3.2.1 Orientering	12
3.2.3 Speciella egenskaper hos sprutbetong.....	14
3.2.4 Undersökningar i Etapp II	15
3.2.5 Undersökningar i denna etapp.....	16
3.2.6 Slutsats: Underhållsbehov av sprutbetong	19
3.3 Cementinjekteringar	20
3.3.1 Nedbrytning och omvandling av injekteringsbruk i bergsprickor	20
3.3.2 Huvudresultat från tidigare projektetapp	21
3.3.3 Undersökningar i Etapp III	22
3.3.4 Slutsats: beständighet och underhållsbehov av cementinjekteringar	26
3.4 Stål.....	27
3.4.1 Bakgrund	27
3.4.2 Fältundersökningarnas utförande.....	27
3.4.3 Resultat av labundersökningar.....	28
3.4.4 Diskussion.....	29

3.4.5	Stålkomponenters nedbrytning och omvandling i tunnelmiljö.....	29
3.4.6	Slutsats: Beständighet och underhållsbehov av bergbultar	29
3.5	Dräner och inklädnader.....	30
3.5.1	Funktionskrav för tunnel	30
3.5.2	Dräner	31
3.5.2	Membraninklädnad	37
3.5.4	Vikten av inspekterbarhet – fallet Gravesforstunnlarna	42
3.5.5	Sammanfattning.....	43
4	Priser på arbeten samt underhållsfrekvenser i LCC-modellen	44
4.1	Underhållsarbeten	44
4.1.1	Inledning.....	44
4.1.2	Besiktningar.....	44
4.1.3	Fria bergytor.....	44
4.1.4	Sprutbetongytor.....	45
4.1.5	Gjuten betong	45
4.1.6	Bergbultar och bärande stålkomponenter.....	45
4.1.7	Väggdräner.....	46
4.1.8	Tak- och vägginklädnader	47
4.1.9	Cementinjekteringar	47
4.2	Experimentellt framtagna underhållsfrekvenser	47
4.2.1	Sprutbetong	47
4.2.2	Bergbultar	47
4.2.3	Cementinjekteringar	48
5	Användning av LCC-modellen i några jämförande kostnadsanalyser	49
5.1	Inledning	49
5.2	Studerade tunnlar	49
5.2	Kalkylkostnader	50
5.2.1	Inledning.....	50
5.2.2	Inspektionsarbeten	50
5.2.3	Arbeten på fria bergytor	50

5.2.4	Arbeten på sprutbetongytor	50
5.2.5	Arbeten på bultsystem	50
5.2.6	Arbeten på dränsystem	51
5.2.7	Inklädnader	51
5.2.8	Efterinjekteringar	51
5.3	Analysmetodik	51
5.4	LCC-analyser för Lundbytunneln	52
5.4.1	Underhållskostnader med baskonceptets förstärknings/tätningssystem (LCC _{bas})	52
5.4.2	UH-kostnader med förbättrad sprutbetong	53
5.4.3	UH-kostnader med rostfria bultar	54
5.4.4	UH-kostnader med dräner utbytta mot inklädnad	54
5.4.5	UH-kostnader med lokal efterinjektering	55
5.5	LCC-analyser för övriga studerade tunnlar	56
5.6	Slutsatser	57
6	Jämförande analys av byggd tunnelkvalitet och framtida underhåll	57
7	Slutsatser och rekommendationer	58
	Referenser	59
	BILAGOR	60
	Bilaga A: LCC-modellen och manual för användning	Fel! Bokmärket är inte definierat.
	Bilaga B: Fotobilaga CBI	Fel! Bokmärket är inte definierat.
	Bilaga C: Korrosionsdata KIMAB	Fel! Bokmärket är inte definierat.
	Bilaga D: Kemirapport GU	Fel! Bokmärket är inte definierat.
	Bilaga A: LCC-modellen och manual för användning	Fel! Bokmärket är inte definierat.
A1.	Allmänt	Fel! Bokmärket är inte definierat.
A2.	Beskrivning av modellens beståndsdelar	Fel! Bokmärket är inte definierat.
A3.	Alternativflikarna	Fel! Bokmärket är inte definierat.
A4.	Parameterhuvud för ett alternativ	Fel! Bokmärket är inte definierat.
A5.	Förstärknings- och underhållsdata	Fel! Bokmärket är inte definierat.
A6.	Sammanställningsfliken	Fel! Bokmärket är inte definierat.
	Bilaga B: Fotobilaga CBI	Fel! Bokmärket är inte definierat.

B.1	Bolmentunneln.....	Fel! Bokmärket är inte definierat.
B.2	Lundby tunneln	Fel! Bokmärket är inte definierat.
B.3	Shelltunneln	Fel! Bokmärket är inte definierat.
Bilaga C: Korrosionsdata KIMAB.....		Fel! Bokmärket är inte definierat.
Bilaga D: Kemirapport GU		Fel! Bokmärket är inte definierat.
D1.	Background	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D2.	Aims and purposes for the project	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D3.	Delimitations.....	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D4.	Method	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D5.	The Lundby tunnel	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D6.	Telia tunnel	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D7.	Sampling by core drilling.....	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D7.1.	Lundby tunnel	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D7.2.	Telia tunnel	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D8.	Groundwater analysis	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D9.	Chemical analysis of the samples	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D10.	Results	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D10.1.	Samples with cementitious origin.....	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D10.2	Telia tunnel	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D11.	Poor versus good quality of cement samples	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D12.	Discussion and conclusions.....	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D13.	Modeling.....	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D13.1.	Introduction	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D13.2.	Conclusion based on Modeling:.....	Fel! Bokmärket är inte definierat.
D14.	Discussion regarding performance of grouting	Fel! Bokmärket är inte definierat.
References		Fel! Bokmärket är inte definierat.

Sammanfattning

Underhållsfrågorna för tunnlar och bergrum är svåra att överblicka och prioriteras inte alltid som de borde av ägarorganisationerna. Den till nutid summerade kostnaden för alla kommande underhållsinsatser, LCC-talet, kan användas som ett jämförande mått på vilket underhållsalternativ som är fördelaktigast över livstiden. Genom att använda programmet Excel blir beräkningarna enkla att utföra och överskådliga. Det krävs dock att modellens indata är relevanta för att ett gott planeringsunderlag skall kunna skapas. De mest centrala av dessa indata är kostnaden för en enskild underhållsinsats och hur ofta insatsen görs. Projektet har fokuserat på att ta fram och analysera sådana indata genom experiment och insamling av erfarenheter. På grund av de stora variationer som finns i förutsättningar för olika tunnlar, fick ändå de modellkörningar som avslutningsvis gjordes till stor del baseras på uppskattningar av kostnader och frekvenser. För underhållsplanering för en särskild tunnel är det dock möjligt att justera ingångsparametrarna med platsspecifik och säkrare information, så att modellen ger adekvata svar.

Det experimentella arbetet med att beskriva nedbrytningsprocesserna för bergförstärkningarna som inleddes i Etapp II av projektet har fortsatt i denna etapp och undersökningarna på sprutbetong och injekteringar har slutförts.

Beständigheten hos sprutbetong befanns vara relaterad till vatten och vattens rörelse. Problem uppstår om man får vattengenomslag, då vatten rinner tvärs igenom sprutbetongpåslaget. Sådana fall är vanliga vid påsprutningar mot vattenförande zoner i berget. En anledning kan vara, att man överdoserat med accelerator i bruket när man mött blöta bergpartier. När man sprutat mot en fuktig yta kan detta i sig ha gett en svag, porös bindning närmast bergväggen. Detta kan vara en anledning till det relativt stora underhållsbehovet på sprutbetongytor i en tunnel. Slutsatsen av CBI:s studier var, att berget bör vara torrt, d.v.s. det måste förinjekteras bättre än vad som görs idag. Alternativt behöver en speciell metod för sprutbetong mot vått berg utvecklas.

Porvätskan i färskt injekteringsbruk har ett pH på cirka 12,8. Genom diffusion till omgivningen sjunker alkaliniteten i det stelade bruket med tiden. CTH/GU:s undersökningar visade, att så länge porvätskans pH inte blir lägre än 12, är injekteringen beständig. Nedbrytningsfronten med $\text{pH} < 12$ rör sig dock mycket sakta, ca 10 cm på 100 år, varför inget underhållsproblem uppstår. Inträngningen av injekteringsmedlet i bergsprickorna måste dock vara så god, att de vattenförande sprickorna mellan injekteringskärmens borrhål är fyllda med cement. Nya undersökningarna som genomförts på injekteringscement av olika ålder som påträffats i två tunnlar visar att koldioxid från luften diffunderat in i sprickor och bildat vätekarbonat. pH kan på detta sätt sänkas i bruket. I tunnlar med mycket "kalcitdroppar" kan detta vara ett tecken på att portlanditen löses upp och är på så vis en indikator på tillståndet hos cementet i sprickorna. Mer förståelse kring de kinetiska förloppen krävs dock för fasta slutsatser. Man behöver dock inte räkna med att rimligt lyckade förinjekteringar i tunnlar behöver underhållas.

Experiment med trådar av svartstål, monterade i bergborrhål, visar att korrosionshastigheten kan vara betydande. Slutsatsen blir, att den största risken för cementingjutna bultars driftssäkerhet är om utlakning sker av cementingjutningen så att grundvattenflöde träffar den blottlagda bultytan. Vid god ingjutningskvalitet blir dock bultens livslängd betydande och underhållsbehovet litet.

Inom projektets ram har även underhåll av dränsystem och inklädnader studerats. Funktionskraven för många tunnlar är rigorösa och kräver ofta kontrollerad avledning av inläckande vatten med dräner eller inklädnader. Dräner och dränsystem står för en mycket stor del av en tunnels underhållsbehov och tillhörande kostnader och driftstopp kan bli betungande. Montering av en tunnelduk eller en tät betongliner är relativt kostsam, men kan i ett livslängdsperspektiv visa sig bli betydligt billigare än att regelmässigt underhålla dräner. Inspekterbarhet är en viktig aspekt som inte beaktats i LCC-analyserna.

Den framtagna LCC-modellen kräver indata i form av underhållskostnader och –frekvenser. Det är först när indata är ”rimliga” som modellen levererar LCC-tal som går att lita på. Men man måste komma ihåg, att dessa endast är jämförelsetal för bedömning av olika alternativ för skötsel av en tunnel. De arbeten som skall kostnadsbedömas är besiktningar, arbeten på fria bergytor, sprutbetongytor och på systembultningar samt underhåll av dräner och inklädnader. Rapporten ger en lista på dessa arbeten, liksom på underhållsfrekvenser framtagna genom branschpraxis och egna experiment.

Rapporten avslutas med ”testkörningar” av modellen på fyra svenska vägtunnlar, Södra Länken, Törnskogstunneln, Gnistängstunneln och Lundbytunneln. Kalkylblad lades upp med utgångspunkt från dessa tunnlar geometriska data, ålder och förstärknings/tätningssystem. Kostnaderna för de olika underhållsmomenten är inte kända, utan i stället användes en ”prislista” med ”rimliga” värden, samma för alla tunnlar. Underhållsfrekvenserna ansattes med ”kvalificerade gissningar” med utgångspunkt från materialet i avsnitt 4.

Varje tunnel tilldelades ett kalkylblad med fyra alternativ, varav det första är ett basalternativ som ger LCC-värdet LCC_{bas} . De övriga tre alternativen innebär variationer i förstärkningssystemet: utbyte av dålig sprutbetong, byte av korroderande bult mot rostfri, samt ersättning av dräner med inklädnad. LCC-talen för dessa alternativ jämfördes därefter för att se om förändringen var ekonomiskt motiverad ur ett livslängdsperspektiv.

Resultaten kan exemplifieras med Lundbytunneln. I denna tunnel verkar en förbättring av kvaliteten på sprutbetongskyddet vara en lönsam åtgärd, men endast om utbyteskostnaden tas som en ”byggkostnad” och inte belastar underhållsbudgeten. Borttagning av dräner och installation av inklädnad över läckande partier verkar vara klart lönsam, även om installationskostnaden räknas in i underhållsbudgeten. Ersättning av rostande bultar med rostfri bult, liksom efterinjekteringsarbeten verkar ha tveksam ekonomi, sett över livslängden.

LCC-analyserna för de studerade tunnarna visar några exempel på vad modellen kan användas till. Variationerna är naturligtvis oändliga. Ofta diskuterade alternativ att söka förbilliga tunnelunderhållet kan med modellens hjälp kläs i ekonomiska siffror och klart lönsamma eller olönsamma alternativ kan identifieras.

1 Bakgrund

Under senare år har en stor mängd tunnlar för vägtrafik och järnvägstrafik byggts och flera stora projekt ligger i startgroparna. Detta bestånd kommer i framtiden att behöva underhållas löpande. Tunnelarnas funktion är av mycket stor betydelse för samhället. En eventuell kollaps eller någon annan oförutsedd händelse kan leda till allvarliga ekonomiska konsekvenser för både enskilda människor, samhällsfunktioner och för näringslivet. Kan underhållsarbetet ske planerat och med effektiva metoder kan stora samhällsekonomiska vinster göras.

Byggande av tunnlar medför ett långsiktigt underhållsansvar. Moderna tunnlar med över hundra års livslängd kommer att under användningstiden dra på sig stora kostnader för att bibehålla sin funktion och sitt tekniska värde. Olika utformningar av tunneln och dess installerade, bergtekniska system kan leda till olika resurskrav för underhållet. Av ekonomiska, funktionsmässiga säkerhetsskäl är det därför nödvändigt, att val av lösningar och teknisk utrustning görs mot bakgrund av livslängdsanalyser där de framtida drift- och underhållskostnaderna beaktas. Underhållsarbetet skall se till att den tekniska nivå som byggts in i tunneln upprätthålls under livslängden. Genom att planera underhållet långsiktigt kan stora ekonomiska fördelar uppnås.

Trots detta måste man konstatera, att underhållsfrågorna för tunnlar och bergrum inte alltid prioriteras som de borde av ägarorganisationerna. En av anledningarna till detta kan vara, att problemet att bedöma kostnader långt fram i tiden är komplext och innehåller många okända faktorer som åldringsprocesser samt teknik- och kostnadsutveckling. En metod för långtidsbedömning är att kapitalisera väntade kostnader till nutid genom användande av en kalkylränta. Metoden, så kallad Life Cycle Costing (LCC), är vanlig inom industrin. Den till nutid summerade kostnaden för alla underhållsinsatser, LCC-talet, används som ett jämförande mått på vilket alternativ som är fördelaktigast över livstiden. Liknande metoder borde tillämpas även vid val av underhåll i tunnlar.

Äldre tunnlar är traditionellt förstärkta med ingjutna bultar utan särskilt korrosionsskydd. Vid svaga partier kompletterades bultarna med sprutbetong som i allmänhet var oarmerad. Tätning mot vattenläckage gjordes ofta med primitiva metoder, endast sporadiskt med cementinjektering.

På senare år har kvaliteten på förstärkningarna gradvis förbättrats genom att materialkvaliteten har höjts, och kraven på utförandet har skärpts. Sulfatresistent cement är idag standard, sprutbetongen är oftast fiberarmerad och bultarna förses ibland med extra korrosionsskydd.

Utöver förändringar av förstärkningssystemen har på senare år ofta installerats dränsystem för att förbättra den inre miljön i framförallt trafiktunnlar. Dessa system är ibland mycket underhållskrävande.

Underhållet för nya tunnlar bör planeras i ett tidigt skede, helst i samband med projekteringen, för att nå en god driftekonomi under den avsedda livslängden. Detta projekts huvudsikt har varit att föreslå en LCC-modell för tunnelunderhåll samt att ange lämpliga ingångsdata för modellen.

Etapp I av projektet fokuserade på att beskriva de faktorer som påverkar underhållsbehovet i en tunnel, skadetyper samt teknik och kostnader för bergunderhåll.

Under Etapp II gjordes fördjupade materialstudier på sprutbetong, stål och injekteringsbruk för att kartlägga nedbrytningsprocesserna. I denna etapp beskrevs också LCC-tekniken och dess matematik generellt.

I Etapp III som rapporteras här, redovisas ytterligare materialtester, men fokus är på analyser av underhållskostnader för berganläggningar i ett livslängdsperspektiv. Den modell för LCC-analys som tagits fram inom projektets ram presenteras i detalj och kommer här till användning i några ”provkörningar” på kända tunnlar. Förhoppningen är, att modellen skall kunna vara till gagn för tunnelägare i planeringen av tunnelunderhållet i framtiden.

2 LCC-modellen – uppbyggnad, funktionssätt och begränsningar

För att optimalt kunna planera för kommande reparationer och schemalagt underhåll i en tunnel, är det fördelaktigt att man kan uppskatta när och hur sådana åtgärder behöver genomföras under tunnelns livslängd. Genom att jämföra alternativa åtgärder för underhåll under olika förutsättningar, samt att sammanställa kostnaderna för alternativa underhållsinsatser, kan man komma fram till vilket alternativt som totalt sett under livslängden är det mest fördelaktiga. LCC-metoden (Life Cycle Costing) erbjuder ett sådant hjälpmedel.

2.1 Nuvärdesmetoden

Med denna metod försöker man återföra alla kommande underhållskostnader under en tunnels livslängd till värdet dessa kostnader har idag, det så kallade nuvärdet. Eftersom den byggda kvaliteten i tunneln påverkar underhållsbehovet, brukar byggkostnaden (med kapitalisering) läggas till nuvärdet av underhållskostnaderna. Nuvärdet av en framtida kostnad beräknas med hjälp av en uppskattning av den kommande inflationen av kronan och diskontering av beloppet mellan nutid och den kommande investeringen i tunneln. Annorlunda uttryckt är nuvärdet (P) lika med det belopp i kronor som skulle behöva ”sättas undan” idag för att med ränta på ränta (i) räcka till att betala underhållsarbetet (F) vid aktuell tidpunkt (efter n år):

$$P = F [1/ (1 + i)^n]$$

P summeras för samtliga underhållsinsatser i tunneln under livslängden till ett LCC-tal. Genom att göra liknande summeringar för olika byggkostnads- och underhållsalternativ, kan jämförelser göras, se vidare slutrapporten för Etapp II, avsnitt 2.

Genom att kapitalisera alternativens kostnader till ett bestämt jämförelseår (annuitetsberäkning) kan man avgöra vilket som är det ekonomiskt sett mest fördelaktiga alternativet totalt sett under livslängden. En LCC-modell för en sådan analys har utvecklats inom detta projekt och dess möjligheter demonstreras senare i rapporten. Jämförelseåret har i exemplen valts till innevarande år, 2012.

Den matematiska modellen och dess uppbyggnad och funktionssätt har beskrivits generellt i tidigare rapporter för Etapp I och II av detta projekt. I det följande skall modellens konstruktion, dess möjligheter och begränsningar beskrivas i detalj. Modellen utvecklades ursprungligen i ett arbete av Almfeldt (2011) och har under projektiden ytterligare anpassats för utredningen.

I Bilaga A sist i rapporten finns en manual som beskriver hur modell skall användas.

2.2 Modellens möjligheter och begränsningar

I avsnitt 5 appliceras modellen på några jämförande LCC-analyser för underhåll av ett antal svenska bergtunnlar. Den ekonomiska inverkan av tänkta variationer av förstärknings- och tätningstekniken i tunnlar har simulerats med hjälp av modellen. Detta görs genom att granska och jämföra de LCC-tal som modellen räknar fram för alternativen. Förenklat innebär ett lägre LCC-tal en bättre ekonomisk lösning, sett över livslängden.

Det skall noga poängteras, att precisionen i beräkningarna inte är sådan att modellens resultat kan användas direkt för ekonomisk planering och budgetarbete. Avsikten är att man med modellens hjälp skall kunna göra kvalitativa val av lämplig teknik för att minimera underhållskostnaderna för tunneln. De framtagna LCC-talen är då användbara för jämförelser mellan olika alternativ.

LCC-modellen är alltså en ren "räknemaskin" och har ingen förmåga att dra slutsatser eller "tänka själv". Däremot är den fullständigt flexibel när det gäller ingångsdata. Det är alltså upp till användaren att beskriva alla ingångsdata – i huvudsak kostnader och frekvenser för underhållsinsatser - så riktigt som möjligt. De framräknade LCC-talen blir aldrig bättre än dessa data. Men med bra ingångsdata ger modellen å andra sidan alltid adekvata svar.

2.3 Viktiga ingångsparametrar

De mest centrala ingångsvärden som modellen arbetar med – och som är helt avgörande för de beslutsunderlag som levereras – är kostnaden för en enskild underhållsinsats och hur ofta insatsen görs. Under det aktuella projektet har stora ansträngningar gjorts för att få svar på dessa frågor. Experimentella undersökningar har genomförts för att studera nedbrytningsprocesserna för förstärknings- och tätningssystemen i tunnlar.

I Etapp I av projektet gjordes en ansats att definiera kostnaderna för underhållsinsatser i tunnlar och det har pågått ansträngningar att verifiera och precisera dessa uppgifter under hela projektiden . Tyvärr måste man konstatera, att mycket arbete återstår för att helt beskriva kostnaderna.

I Etapp II genomfördes experimentella studier för att klarlägga underhållsbehovet på basis av förstärkningssystemens nedbrytning över tid i tunnlar. Sådana experiment fortsatte i Etapp III och rapporteras här. Det måste konstateras, att det är svårt att uppnå en hög precision när det gäller att beskriva frekvensen för erforderliga ersättnings- och underhållsarbeten.

De modellkörningar som genomförts har därför fått baseras på uppskattningar av kostnader och frekvenser för underhållsinsatser i tunnlar. Med modellen är det möjligt att justera ingångsparametrarna i takt med att ny och säkrare information kommer fram.

3 Processer för nedbrytning av förstärkningar i bergtunnlar

3.1 Gjutna betong¹

3.1.1 Allmänt

I en tunnel förekommer förstärkningar som utförs i armerad betong. Exempel på sådana förstärkningar är tunnelgolv, lokalt stöd av tak och väggar vid passage av svaghetszoner i berget samt olika former av betongpluggar.

En vanlig betong är homogen vid blandning och är gjord för att fylla en form. Med hjälp av vibrering får man en god fyllnad och betongen som är flytande under vibrationsfasen nivellerar av sig själv. I en del konstruktioner används självkompakterande betong men med avseende på nedbrytningsprocesser så gäller samma regler som för vanlig vibrerad betong. I grunden är det samma nedbrytningsmekanismer som för sprutbetong. Skillnaden mellan gjuten betong och sprutbetong är främst att den gjutna betongen är mera homogen och oftast innehåller armeringsjärn.

För gjutna betongkonstruktioner i en tunnel eller i ett bergrum domineras de underhållskrävande processerna av karbonatisering, kloridanrikning och armeringskorrosion. I en del fall måste man även beakta frost och lakning. Under de senaste 20 åren har de flesta betonger gjutits med anläggningscement men i en del äldre konstruktioner har man använt mera alkaliska cement vilka i fuktig miljö kan ge alkali-silika reaktioner (se kapitel 3.2.2). Speciellt alkali-silika reaktion i kombination med frost kan ge allvarliga skador.

3.1.2 Karbonatisering

Karbonatisering av betong sker i nästan alla miljöer men med varierande hastighet. Hastigheten beror av fuktbelastningen och betongkvaliteten. Normalt sker karbonatisering från betongytan i kontakt med luft. Karbonatiseringen blir långsammare med hög luftfuktighet och med mera tät betong (lågt vct). Karbonatiseringen i sig försvagar inte betongen men den medför risk för armeringskorrosion. Detsamma

gäller för klorider som i sig inte fördärvar betongen men kan medföra armeringskorrosion om kloridkoncentrationen är för hög vid armeringsjärnen. Normalt ger stålfiber mera begränsad korrosionskada än armeringsstänger. Karbonatiseringsprocessen står beskriven i Lagerblad (2005) och i Lagerblad (2007).

3.1.3 Frostangrepp

Ett problem är den fuktiga miljön i tunnlar. På golvnivå kan betongen bli vattenmättad, vilket vid frost kan ge inre frostsprängning. I övrigt gäller att luft skall vara tillsatt till betongen för att förhindra frostavskalning.

3.2 Sprutbetong¹

3.2.1 Allmänt

Sprutbetong är i grunden en vanlig betong men sättet den sätts samman på och hur den appliceras gör att den skiljer sig från vanlig betong. Vanlig betong är som ung flytande varefter den stelnar och hårdnar. Sprutbetong sprutas mot en yta och skall redan på denna yta vara så styv att den håller sig på plats. För att åstadkomma detta blandas betongen med en tillstyvnadsaccelerator i sprutmunstycket. Både sättet att applicera sprutbetongen och det faktum att det är styvt direkt på plats ger sprutbetongen andra egenskaper än vanlig betong. Detta diskuteras vidare i avsnitt 3.2.3.

Sprutbetong i tunnlar används i huvudsak för att stabilisera berg och förhindra ras, men även för att konstruktivt förstärka anläggningar och konstruktioner. I denna undersökning har sprutbetong i tunnlar undersökts avseende beständighet i tunnelmiljö.

Sprutbetong blandas antingen i sprutmunstycket (torrmetod) eller så är det en vanlig färdigblandad betong som i sprutmunstycket blandas med en tillstyvnadsaccelerator (våtmetod). Torrmetoden var vanligare förr. Idag görs små reparationarbeten med torrmetod medan större arbeten görs med våtmetod.

Torrmetoden går ut på att man i ett munstycke blandar cement och ballast med vatten. För att den skall stanna på plats så tillsätter man en tillstyvnadsaccelerator. Blandningen bildar en betong på vägen mot berget och tillstyvnadsacceleratorn gör att den stannar på plats

Vid våtmetoden blandas alla delmaterial, inklusive vatten och eventuella tillsatsmedel redan i en mixer innan den pumpas in i slangen. Blandningen pumpas genom ett munstycke där betongen blandas med en tillstyvnadsaccelerator.

Tillstyvnadsacceleratorer är kemikalier som samverkar med de kemiska reaktioner som bidrar till den vanliga cementhydratationen, men som momentant får cementpastan och betongen att tillstyvna. Olika typer av tillstyvnadsacceleratorer finns beskrivna i Lagerblad et al (2006).

¹ Avsnitt 3.1 och 3.2 är författade av professor Björn Lagerblad, CBI

Beständighet hos betong och även sprutbetong beror på samverkan mellan betong och miljö. Mera specifikt måste man se på mikromiljön och hur den samverkar med den specifika betongen. Sprutbetong kan i princip drabbas av samma nedbrytningsmekanismer som vanlig betong.

3.2.2 Betongs nedbrytnings- och omvandlingsreaktioner

När det gäller skademekanismer är sprutbetong i grunden en vanlig betong.

Det finns en rad olika typer av omvandlingar och nedbrytningsmekanismer som kan påverka betongens beständighet och funktion. En del har att göra med att materialkombinationen är olämplig i den specifika miljön medan andra är mera naturliga. Oftast är vatten på något sätt involverat i omvandlingen. Tunnlar utgör generellt en fuktig miljö.

Olämpliga kombinationer

Sulfatreaktion. Detta är en reaktion där aluminatkomponenter i cementhydraten reagerar med utifrån inträngande sulfater. Detta ger i *fuktig miljö* upphov till en expansion som skalar av och mjukar upp ytan eller - om sulfaterna kommer i riktning utifrån - ger upphov till en svällning som kan fördärva betongen. Reaktionen är direkt relaterad till mängden C_3A i cementet (Lagerblad, 1999). Sulfatangreppet motverkas genom att använda sulfatresistent cement som innehåller mindre än 3 vikt % C_3A (s.k. anläggningscement). Grundvattnet bör undersökas med avseende på sulfatinnehållet.

Alkalisilikareaktion (ASR). Detta är en reaktion där vattenlösningarna i betongens porer löser upp kiselkomponenter (silika) från ballasten som bildar en alkali-silika-gel. I *fuktig miljö* sker en expansion av gelen som kan spräcka betongen. Reaktionen motverkas genom att använda ett lågalkaliskt cement (exempelvis anläggningscement) eller genom att tillsätta någon puzzolan. Ballasten kan undersökas och testas för att se om den innehåller reaktiva komponenter. Reaktionen står beskriven i Lagerblad & Trägårdh (1992).

Olämplig ballast. Ballast kan innehålla expansiva leror som suger upp vatten, vilket ger upphov till svällning som kan vara skadlig. Det är speciellt vanligt vid ballast från kalkstens- och basiskt berg som måste kontrolleras speciellt. Ballasten kan ibland även innehålla magnetkis eller gips som ger inre sulfatangrepp. Olämplig ballast och hur man undersöker ballast står beskrivet i Lagerblad & Trägårdh (1995).

Kemiska angrepp. Olika typer av kemikalier kan påverka betongens stabilitet. Kemiska angrepp står beskrivet i Lagerblad (2000).

Frostangrepp. Då miljön oftast är fuktig, måste betongen vara lufttillsatt om frost förkommer. Man måste, när det gäller sprutbetong, beakta att vatten kan komma inifrån berget och penetrera betongen. Detta kan leda till anrikning av salt och inre frostangrepp. I detta avseende skiljer sig sprutbetong från vanlig betong där frostangreppet oftast sker från ytan och utåt.

Kristallsprängning. Detta är en reaktion som uppträder när vatten tränger igenom betong. När vatten avdunstar på ytan anrikas jonerna och saltkristaller fälls ut i betongen. Dessa kristaller kan växa och utöva ett tryck som kan spräcka betongen. Kristallsprängning kräver stora mängder salthaltigt vatten och avdunstning, vilket gör processen relativt ovanlig i de flesta tunnlar. I allmänhet resulterar den i en permeabilitetsnedsättning.

Naturliga omvandlingar

Lakning; Cementpastan innehåller vattenlösliga komponenter som kan lösas ut (lakas) av grundvattnet. Här måste man skilja mellan diffusionsstyrd lakning från ytan och penetrativ lakning genom betongen. Vatten som penetrerar betongen från berget ger inre lakning som löser ut komponenter vilket gör sprutbetongen svagare. Lakning och lakningsmekanismer finns beskrivna i Lagerblad (2001) och Lagerblad (2003).

Karbonatisering; Karbonatisering av betong sker i nästan alla miljöer men med varierande hastighet. Kolsyran i vatten ger karbonatisering. I normalfallet är det långsamt. Normalt sker karbonatisering från ytor i kontakt med luft. Karbonatiseringen blir långsammare med hög luftfuktighet och med mera tät betong (lågt vct). Karbonatiseringen i sig försvagar inte betongen men den medför risk för armeringskorrosion. Detsamma gäller för klorider som i sig inte fördärvar betongen men den medför armeringskorrosion. Normalt ger stålfiber mera begränsad korrosionskada än armeringsstänger. Karbonatiseringsprocessen står beskriven i Lagerblad (2005) och i Lagerblad (2007).

Erosion: Både vattenbegjutning och stänk på en sprutad tunnelyta kan ge erosion. Erosion skalar av ytan. Erosion i kombination med andra angrepp kan bli allvarlig då processen tar bort omvandlingsprodukten så att ny yta friläggs för ytterligare angrepp.

3.2.3 Speciella egenskaper hos sprutbetong

Redan applikationstekniken ger en annan struktur på sprutbetong än för normalt gjuten betong. Sprutbetongen blandas med tillstyvnadsaccelerator i munstycket vilket gör betongen styv momentant. Detta medför att man först har en struktur given av tillstyvnadsacceleratorn i vilken de normala cementreaktionerna sker. Undersökningar av Lagerblad et al (2006, 2010) visar att det kan ta flera dygn innan de normala cementreaktionerna ger en hård betong. Under denna period ligger tryckhållfastheten på ca 5 MPa. I en tunnel är ofta berget relativt kallt och det anläggningscement som vanligtvis används i Sverige är långsamt. Vid en bergtemperatur av 8 °C kan det ta upp till tre dygn innan sprutbetong tillverkad av anläggningscement får verklig styrka.

Ett annat fenomen är att cementreaktionerna sker i en fast struktur vilket gör att betongen inte kan flyta som i en normal betong under gjutperioden. Resultatet blir att både den kemiska krympningen och den tidiga uttorkningskrympningen blir större hos sprutbetong än vanlig betong, se Lagerblad et al. (2006). Med sprutbetong måste man tillföra vatten i början för att motverka den kemiska krympningen som i vanlig betong kompenseras med en sänkning av ytan hos den flytande betongen. Den öppna strukturen gör också att sprutbetong är känslig för uttorkning och medföljande uttorkningskrympning.

Homogeniteten hos sprutbetong är mycket beroende på utrustning och sprutoperatör. Normalt sveper en stråle av betongpasta fram och tillbaka mot berget tills en bestämd tjocklek byggts upp. Detta ger en varvig betong där man kan särskilja lager av porösare och mera tät betong. Detta medför att grundvattentransport mot tunneln lättare sker längs ytan än genom sprutbetongen.



Figur 1. Bilder som visar sprutbetongs (våtsprutad) inhomogenitet. Bilden till vänster visar delvis uttorkade prismor där de grå partierna visar mera porös och fuktig betong. Till höger på en polerad yta kan man se ojämna fördelning av ballast. De tunna lite mörkare lagren visar en övergång mellan två olika sprutsikt. Provet är från Shelltunneln.

3.2.4 Undersökningar i Etapp II

För detaljer hänvisas till projektrapporten för Etapp II. Här analyserades sex olika sprutbetonger, tre från Stockholm och tre från Göteborg. Från tunnarna i Stockholm (betecknade Björns Trädgård, Östberga och Agnesgatan) valdes tre partier ut från ytor med bra respektive dålig sprutbetong. Från Göteborg valdes tre sprutbetonger från tunnlar betecknade Guldhedstunneln, Brudaremossen och Shelltunneln. På de flesta provställena togs borrkärnor från ytan av sprutbetongen in i berget. Betongerna är antagligen torrsprutade, utom betongen från Shelltunneln som är våtsprutad.

I de tunnlar som besiktigats visuellt i Stockholm kan man fläckvis och i vissa avsnitt observera vattengenomslag, synliga som missfärgningar eller droppformationer. Den dåliga betongen ligger i allmänhet i anslutning till vattenförande zoner i bakomliggande berg. I en del fall har det lett till att sjök av sprutbetong fallit ner.

Det var uppenbart att betongen som sprutats på de våta delarna av tunnelväggen var sämre. Anrikningar av aluminat tyder på att sprutaren vid dessa zoner ökade mängden tillstyvnadsaccelerator för att få en snabbare bindning vilket i sin tur gjorde betongen mera porös och skiktad. Speciellt var övergångszonen mellan berg och sprutbetong dålig. Man kunde finna stråk med karbonatiserad betong innanför okarbonatiserad betong. Detta tyder på transportzoner med hög porositet.

Ett annat typiskt fenomen som konstaterades i undersökningen var kristallbildning och omkristallisation i zoner. Vanligast är detta i porösa zoner närmast bergytan. Det växer kristaller i porer och andra hålrum. Kristaller kan endast växa i vatten vilket tyder på en hög fuktanrikning. Ofta syns kristallbildningen tydligt på brottytor mellan sprutbetong och berg vilket tyder på ett gap eller ett poröst parti som efterhand fyllts med nybildade kristaller.

3.2.5 Undersökningar i denna etapp

För undersökningen utvaldes prover från tre tunnlar; Bolmentunneln, Lundbytunneln och Shelltunneln, de två senare belägna i Göteborg. Tre 100 mm provkroppar från varje tunnel borrades genom sprutbetongen och in i berget. Provkropparna skickades till CBI:s laboratorium utan visuell besiktning i tunnlar.

Bolmentunneln

Detta är en vattentunnel från sjön Bolmen i Småland till södra Skåne, vilken nyligen renoverats med sprutbetong inom ett begränsat område. Bergarten är granitisk, uppbyggd av kvarts, fältspat, biotit, muskovit och klorit. I en del partier är mineralen mycket finkorniga och berget kan här betecknas som mylonit. Denna bergart är alkalireaktiv. Vid tillverkningen av betongen användes anläggningscement med inblandning av silika. Med ett högalkaliskt cement skulle detta kunna leda till en alkalisilika -reaktion med berget med svällning som följd, vilket skulle kunna ge skada.

Bilder från tunnslip och SEM² tagna från provkropparna finns i Bilaga B..

Bergartstexturen tyder på en kraftig deformation och uppkrossning. Sprickor i flera riktningar är rikligt förekommande. Leromvandlad bergmassa förekommer.

Sprutbetongen är stålfiberarmerad och ballasten är granitiskt naturgrus (d_{\max} runt 10 mm). Odispergerad silika kan observeras i cementpastan av anläggningscement.

Typisk nog är cementpastan och betongstrukturen inhomogen speciellt in mot berget. I Fotobilagan (Figur 2) visas en större spricka och porös betong in mot berget. Generellt är betongen sämre och mera porös mot sprucket berg än mot fast berg. Detta är ett typiskt mönster som kan observeras både i tunnslip och på brottyta och på planslip i SEM. I övergångszonen, speciellt i sämre och porös betong, kan man observera kristaller av både portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) och ettringit. Kristaller kan endast växa i vattenfyllda utrymmen. Kristalltillväxt kan ha skett både under själva cementshydratationen och efter att cementet hydratiserat. Antagligen har vatten rört sig i övergångszonen efter det att betongen stelnat. Utfällningen av kristaller har gett en materialhomogenisering. Om vattnet rört sig långsamt kommer med tiden den porösa cementpastan förtätas. Detta kallas i vanlig betong självläkning. Vid för starkt vattenflöde kommer emellertid cementpasta att lakas ut vilket kan medföra ett brott i övergångszonen.

² Scanning Electron Microscopy

Sammanfattningsvis har sprutningen antagligen skett mot delvis fuktigt berg. När berget varit uppsprucket, har trycket från sprutningen antagligen pressat ut vatten och gett en sämre betong. Mera vatten ger ett högre vct och därmed en porösare betong. Även vanligt fritt vatten skulle ge ett högre vct. Tillväxten av kristaller tyder på materialomflyttning vilket endast kan ske i fuktig miljö. Delvis kan kristalltillväxten ha skett under det tidiga stadiet av hydratationen, men omfattningen av kristalltillväxt indikerar även vattenrörelse i den hårdnade betongen.

Lundbytunneln

Sprutbetongen innehåller granitisk naturballast och stålfiber. Sprutningen har skett mot relativt bra granitiskt berg där delar har jämnats ut med bruk innan sprutningen. Cementpastan innehåller rikligt med odispergerad silika. Generellt är sprutbetongen inhomogen och ganska dåligt kompakterad. Det finns även ganska rikligt med sprickor. Av de tre undersökta sprutbetongerna är provet från Lundbytunneln det mest inhomogena.

Man kan observera alkalisilikagel i en del hålrum. Generellt innehåller betongen kristallbildning i kompakteringsporer och andra hålrum. Detta tyder på en hög fuktbelastning. I ett parti kan man finna utfällningar av manganoxid. Cementet innehåller inte nämnvärda kvantiteter av mangan varför detta måste komma från grundvatten vilket i sin tur tyder på penetration av grundvatten.

Övergångszonen mot berg är inhomogen och porös. En del av porositeten är fylld med sekundära mineral av portlandit och ettringit. Detta ger upphov till självläkning och ett förtätande men indikerar samtidigt vattentransport vilket skulle kunna ge utlakning och skador med tiden. Alkalisilika gel kan observeras en del hålrum. Alkalisilikareaktionen (ASR) kan ge upphov till en svällning. Man kan dock inte observera någon generell uppsprickning relaterad till ASR. Förmodligen kommer gelen från den odispergerade silikan. Effekt av odispergerade silikagranulat studerades av Lagerblad & Utkin (1995) och resultaten visar att odispergerad silika kan ge allvarliga problem under vissa förutsättningar. I normalfallet sker inget men om betongen tillförs alkalisalter från omgivande vatten kan kombinationen ge upphov till allvarlig svällning.

Shelltunneln

Sprutbetongen innehåller granitisk naturballast och stålfiber. Odispergerad silika, men inte lika mycket som i betongen från Lundbytunneln, kan observeras. Sprutningen har skett mot relativt bra granitiskt berg. I delar av de undersökta proven är betongen relativt homogen och tät ända in mot berget. Det finns emellertid partier där betongen är mera inhomogen speciellt mot berg. I själva övergångszonen kan man finna linser av utfälld portlandit. I SEM kan man lokalt observera att ganska stora kvantiteter utfälld portlandit i porösa partier vilket gett självläkning.

3.4.5 Diskussion: sprutbetongs struktur och beständighet

Sprutbetong har inte samma egenskaper som vanlig betong. Den är mera inhomogen och har en större benägenhet att krympa. Produkterna från tillstyvsnadsacceleratorn verkar vara inkorporerade i cementmatrisen.

Sprutbetongen bildar en skarp gräns mot berget. Det finns ingen reaktion eller kemisk bindning mellan sprutbetong och berg. Den vidhäftningshållfasthet som kan mätas måste därför beror på i huvudsak en fysikalisk bindning och sprutbetongens styvhet. Ytkrafter som van der Waalsbindningar kan även medverka. Detta medför att bergytans råhet och struktur blir viktig. Sprutning mot en plan yta gör övergångszonen svagare. Resultaten från Bolmentunneln indikerar även att "elastiskt" berg kan ge problem med övergångszonen.

Vid sprutningen blir zonen närmast berget relativt porös. Detta beror antagligen på studs och packning. Det är ett känt fenomen att partiklar packar sig sämre mot en vägg. Man kan även förmoda att det sker en viss studs av större sten vid bergväggen vid själva sprutningen. Mot väggen finns i huvudsak finare partiklar som cement och mera vatten. Detta är även fallet med sten i vanlig betong, se Lagerblad & Kjellsen (1999). Om bergytan är blöt och kan avge vatten kommer detta att medföra mera vatten i övergångszonen. Mera vatten och mindre cement ger en högre porositet vilket klart kan observeras hos proverna från Bolmen.

De tre nu undersökta och även de sex proverna från den tidigare undersökningen indikerar vattenmättnad. Orsaken kan vara allmänt hög fuktbelastning men den omfattande omkristallisationen tyder på fuktrörelse. Manganutfällningen i Lundbytunneln tyder på grundvatten från berget.

Cementpasta innehåller vattenlösliga komponenter. Den mest vattenlösliga är portlandit, kalciumhydroxid. Vid penetration av vatten kommer portlanditen att lösas ut vilket ökar permeabiliteten. Kalciumhydroxiden fälls ut som kalciumkarbonat i kontakt med luft. Det är detta som syns vid sprickor och vid vattengenomslag i sprutbetong.

Ett annat fenomen som kan observeras är kristallomvandling eller rekristallisation. I proverna är kalciumhydroxid vanlig, speciellt i övergångszonen. I cementpastan bildar cementshydraten en tät struktur. Ytenergin i många små kristaller är större än i en stor kristall³. Detta medför att små kristaller i cementpastan återbildas i vattenfyllda hålrum som större kristaller. Fenomenen med portlanditbildning kan också relateras till cementshydratation. Speciellt gäller detta den senare delen av hydratationen, där porlösningar transporterar joner till håligheter där kristaller fälls ut. Alla dessa fenomen ger en förtätning och homogenisering av strukturen. Porositeten i övergångszonen minskar. Detta är en typ av självläkning som gör betongen tätare och bättre över tid.

Vad som sagts ovan medför att beständigheten är relaterad till vatten och vattens rörelse. Vid stagnant vatten eller liten vattenrörelse blir betongen bättre men om vattenrörelsen är för stor sker lakning och försvagning av cementpastan. Denna lakning, som beror på vattentryck från bergsidan, kommer att tillta med tiden. Man kan observera den skadliga lakningen som utfällningar av kalciumkarbonat på ytan. Det är kalcium som lakats från cementpastan och som fällts ut som kalciumkarbonat i kontakt med luft.

³ Ett liknade exempel är att många små bubblor slår ihop sig till en stor bubbla.

Grundvatten kan innehålla olika komponenter och salter. Sulfater kan utgöra ett problem. Om betongen och cementpastan tillförs sulfater från berget och grundvattnet, kan detta resultera i bildning av ettringit som ger en svällning som trycker ut och spräcker betongen. Ettringit är ett vattenrikt mineral som är sammansatt av kalcium, sulfat och aluminat. Det är därför viktigt att aluminathalten i cementet är lågt om grundvattnet innehåller sulfat. Anläggningscement har låg halt aluminat och anses sulfatresistent. Ett sulfatangrepp från ytan ger endast en försvagning av ytan och produkten eroderas lätt bort. Den tidigare använda alkaliska tillstyvnadsacceleratoren ger ett förhöjt aluminatinnehåll. Den alkalifria tillstyvnadsacceleratoren är inte farlig då den från början innehåller sulfater och därför redan under tillstyvnadsprocessen har förbrukat aluminatet. Vattenglas innehåller ingen aluminat.

Alkalisilikareaktionen (ASR) kan ge en expansion som bryter ner betongen. I de undersökta betongerna innehåller ballasten komponenter som kan ge ASR i den fuktiga tunnelmiljön. Problemet är antagligen mindre i sprutbetong än vanlig betong då sprutbetongen oftast innehåller rikligt med porer som gelen kan tränga in i. Ett problem är dock att silikastoftet som verkar vara vanligt i sprutbetong inte är bra dispergerad. Som granulat bildar denna silika en gel. Denna gel är dock färdigbildad innan betongen är fullt stelad⁴.

Förutom sulfater innehåller grundvatten sällan några komponenter som ger problem med beständighet. Om en grundvattenanalys visar att vattnet innehåller karbonatjoner, kommer dessa endast att leda till bildning av kalciumkarbonat som i sig inte försämrar betongen. Om vattnet är surt, ökar detta lösligheten men först vid pH värden under 4 ger surheten någon påtaglig effekt på betongkvaliteten. De flesta organiska syror har liten påverkan, de kan möjligen ge en svagare cementpasta.

Det väsentligaste är att utreda hur vatten penetrerar betongen. Generellt sker detta i den mest porösa zonen, speciellt i sprickor. De porösa zonerna i ett sprutbetongpåslag ligger i allmänhet parallellt med bergytan, vilket ger en lång transportväg för vattnet och hindrar penetrationen.

3.2.6 Slutsats: Underhållsbehov av sprutbetong

Sprutbetongs beständighet beror på tunnelmiljön i kombination med betongpåslaget styrka, täthet och homogenitet. Liksom för vanlig betong gäller det att sätta samman betongen så att ASR (alkalisilikareaktion) och sulfatangrepp undviks. Silika, som är vanligt förekommande i sprutbetong, kan ge problem om silikagranulaten inte är dispergerade.

⁴ Undersökningar av Lagerblad och Utkin (1995) visar dock att om salthalterna i porlösningarna ändras så kan de ge upphov till en besvärlig expansiv reaktion ske. Denna förändring kan ske genom grundvatten. Därför bör det kontrolleras att silikan är dispergerad eller att något annat används för att ge betongen rätt reologiska egenskaper. Ett förslag är att ersätta silikan med ultrafinmald kalksten.

En viktig aspekt är att vattenhärda betongen tills den uppnått erforderlig styrka. Det räcker inte med att membranhärda sprutbetong eftersom den har större krympning. För att inte krympa måste den unga sprutbetongen tillföras vatten. Problem med uttorkning och krympning/sprickbildning efter det att betongen hårdnat, uppträder normalt inte, eftersom miljön i tunnlar generellt är relativt fuktig. Det förekommer dock uttorkning av dräner i vissa tunnlar. I torr miljö måste man beakta att sprutbetong har en större uttorkningskrympning än vanlig betong.

Sprutbetongen är inhomogen och innehåller ofta rikligt med kompakteringsporer. Inhomogeniteten har mycket att göra med själva sprutningen, som ger lager på lager av sprutbetong på bergytan. Mera porösa lager återfinns parallellt bergväggen, särskilt närmast bergväggen. Detta gör att transportvägarna ligger längs sprutbetongens yta och inte går rakt genom sprutbetongen. Hållfastheten hos betongen blir av denna anledning större tvärs sprutbetongytan än längsmed densamma.

Hur inhomogen betongen blir beror också på bergets karaktär och sprutarens skicklighet.

Beständigheten beror i mycket på vatten och vattentransport. Riktningen på de porösa lagren gör transportavståndet större vilket medför att beständigheten ökar. I de flesta fall rinner vattnet antagligen långsamt vilket gör att betongen rekristalliserar vilket gör den mera homogen. Problem uppstår om man får vattengenomslag, vilket indikerar att vatten rinner tvärs igenom betongen. Sådana fall har noterats vid påsprutningar mot vattenförande zoner i berget. En anledning kan vara, att man överdoserat med tillstyvnadsacceleratorer när man mött det blöta bergpartiet. När man sprutat mot en fuktig yta kan detta i sig ha gett en svag, porös bindning.

Slutsatsen blir, att berget bör vara torrt vilket kan medföra att det måste injekteras. Alternativt behöver en speciell metod för sprutbetong mot vått berg utvecklas.

3.3 Cementinjektering

3.3.1 Nedbrytning och omvandling av injekteringsbruk i bergsprickor

De tidigare genomförda kemiska och mineralogiska analyserna har visat, att det inte blir några effekter på cementens mineralogi så länge pH i porvätskan är högre än 12. Detta bekräftas även av den kemiska modelleringen som utfördes i Etapp II. Man kan därför hävda att så länge inte diffusion av alkali till omgivningen sker, så är porvätskans pH stabilt över 12. Detta leder till att injekteringen är beständig.

Porvätskan i färsk cement har ett pH på cirka 12,8. För att komma ned till pH 12 måste därför koncentrationen av OH-joner sänkas med $1-1/10^{0,8} = 84 \%$. Om initieringen av nedbrytningen kan beskrivas som en diffusionsprocess, blir beständighetsproblemet ett fysikaliskt problem. Resultaten i Etapp II visade, att diffusionen efter 100 år motsvarar en inträngning av nedbrytningsfronten av endast ca 10 cm och därmed är utan betydelse för underhållet av en tunnel eller ett bergrum. Inträngningen av injekteringsmedlet i bergsprickorna måste dock vara så stor, att de vattenförande sprickorna mellan injekteringskärmens borrhål är fyllda med cement. För att uppnå detta måste man använda

injekteringsmedel med god inträngningsförmåga och som inte separerar och man måste undvika erosion i bergsprickorna.

Vid väl utförd injektering är utbredningen av cementinjekteringen mycket större än diffusionslängderna. Vid dåligt utförd injektering skapas kanaler i injekteringen och förbipasserande grundvatten kan transportera bort alkali, vilket kan leda till karbonatisering och utlakning av cement.

3.3.2 Huvudresultat från tidigare projektetapp

De geologiska/kemiska studier som projektet i föregående etapp (II) genomförde vid Chalmers och Göteborgs Universitet visade, att cementinjektering har mycket god beständighet i urbergsmiljö. Bland slutsatserna som då drogs av arbetet kan nämnas:

- Den viktigaste faktorn som bestämmer upplösningen av mineralfaser från cement är lösningens pH-värde.
- Portlandit (kalciumhydroxid) är den dominerande kristallina fasen i hydratiserad cement.
- Så länge som lösningens pH > 12 ändras cementets mineralogi mycket lite.
- När pH når < 9 ökar upplösningen av portlandit vilket leder till ökad halt av Ca²⁺-joner.
- Effekten av joner som Na⁺, K⁺, Mg²⁺ och Cl⁻ på portlanditens löslighet är försumbar.

Av slutsatserna från Etapp II kunde en arbetsmodell upprättas som går ut på, att den mest centrala parametern gällande cements stabilitet är pH och närvaron av portlandit är en god indikator på nedbrytningstillståndet för åldrad cement. Om en åldrad cement har närvaro av portlandit är det säkert att säga att cementet är stabilt. Tvärtom gäller också - om portlandit inte är närvarande – att det finns en risk att porvattnet blir mer surt. Detta kan så småningom leda till utlakning av andra mineraler och en mer porös struktur på cementet.

En sammanfattning av undersökningarna i Etapp II var, att en väl genomförd förinjektering i byggskedet kommer att reducera det kommande underhållsbehovet, att denna effekt kommer att vara beständig livslängden ut och att en LCC-analys får utvisa, hur stora efterinjekteringsinsatser i berganläggningen som är motiverade under driftstiden.

3.3.3 Undersökningar i Etapp III⁵

Allmänt

Kvaliteten på injekteringens utförande har främst följer för vilket reellt w/c tal injekteringen får in situ. Det så kallade "tjocka på" konceptet har visat sig ge injektering av låg kvalitet och man finner också att höga pH kan konstateras i tunnarnas dräneringsvatten strax efter att injektering utförts. Genom att undersöka beständigheten hos stelnat injekteringsbruk med olika w/c, samt genom att studera utspädningsmekanismerna vid injekteringsfronten, kan dessa fenomen klarläggas. Den process som medverkar till utspädningen brukar kallas Taylordispersion och innebär att vatten blandas in i cementbruket vid sprickväggarna vid ett Binghamflöde. Hur den fungerar vid de viskositetskontraster som är mellan ett injekteringsbruk och det undanträngda vattnet är dock inte känt. Man har konstaterat med undersökningar i mikroskop att det stelnade bruket ofta har en annan kvalitet närmast sprickväggen. Inverkan av processen kan förutsättas vara beroende av injekteringsfrontens hastighet samt viskositet och flytgräns hos bruket, alltså faktorer som man styr vid injekteringsprocessen.

En undersökning av injekteringsbruk som suttit ett antal år i berget är av stort intresse för att verifiera förutsägelse om brukets beständighet. Det är dock svårt att finna lämpliga platser där en provtagning kan lyckas.

Provtagningsplatser

I Teliatunneln i centrala Göteborg gjordes 2009 en studie som syftade till en reduktion av inläckaget med efterinjektering som en underhållsåtgärd. Här har några kärnborrhål utförts där man konstaterat att injekteringsbruk finns i sprickorna. En undersökning av bruket som påträffades i kärnorna utfördes inom projektets ram.

I Lundbytunneln i Göteborg, invigd 1998, utfördes omfattande injekteringsarbeten under byggtiden. I denna tunnel togs två bergkärnor ut om tillsammans ca 20m i ett område där förinjektering utförts. En undersökning av bruket som påträffades i kärnorna utfördes inom projektets ram.

På båda platserna togs prover på bruken. Proverna analyserades med SEM-EDX och IR. Målsättningen var att finna ett högkvalitativt bruk respektive ett bruk av sämre kvalitet, i avsikt att söka en kvalitetskoppling till brukens ålder.

SEM-bilderna gav i princip information om porstrukturen och EDX om brukssammansättningen. På båda platserna togs också vattenprov för analys. Dessa prover användes som referens för den kemiska modelleringen.

⁵ Här visas de viktigaste resultaten. Den fullständiga redovisningen kommer som CTH-rapport: Abbas, Z, Mossmark, F & Funehag, J, 2012. *Durability studies of natural cement grouted fractures - Chemical analyses and modelling of the solubility of cement minerals from two tunnels in Gothenburg*. Chalmers University of Technology. In progress June 2012.

Grundvattenanalys

De insamlade vattenproverna analyserades för de vanligaste an- och katjonerna, järn, mangan, näringsämnen, löst organiskt kol samt kisel. Samtliga prover var alkaliska och hade god buffertförmåga mot försurning (alkalinitet). Proverna från Lundbytunneln hade högre pH jämfört med proverna från Teliatunneln.

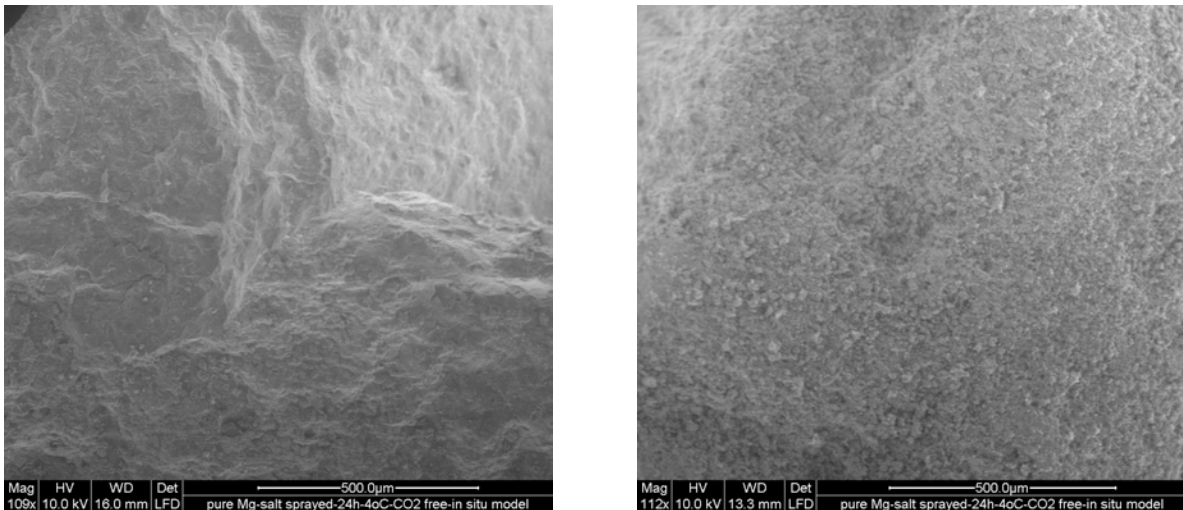
Klorid- och magnesiumkoncentrationerna var lägre i Lundbytunneln än i Teliatunneln. I Lundbytunneln är kvoten Na/Cl hög i kombination med höga alkalinitetsvärden och låga kalciumkoncentrationer. Detta indikerar en pågående process med gradvis ökande andel sött grundvatten i en akvefär tidigare dominerad av havsvatten. I Teliatunneln är kvoten Na/Cl lägre än i Lundbytunneln, men kan dock bedömas som förhöjd, vilket indikerar att en process där sötvatten sköljer ut salt grundvatten sker.

Röntgendiffraktion (XRD), IR Spektroskopi, samt Svep-elektronmikroskopi (SEM)

Från de borrhäror som analyserades, kunde ursprungligt injekteringscement konstateras i enbart fyra sprickor. Från Lundbytunneln användes ett prov från ett genomborrat injekteringshål där den inre kärnan var av bra cement medan den yttre delen visade på en mer porös struktur. Från Teliatunneln kunde enbart ett prov från en spricka hänföras till injekteringscement.

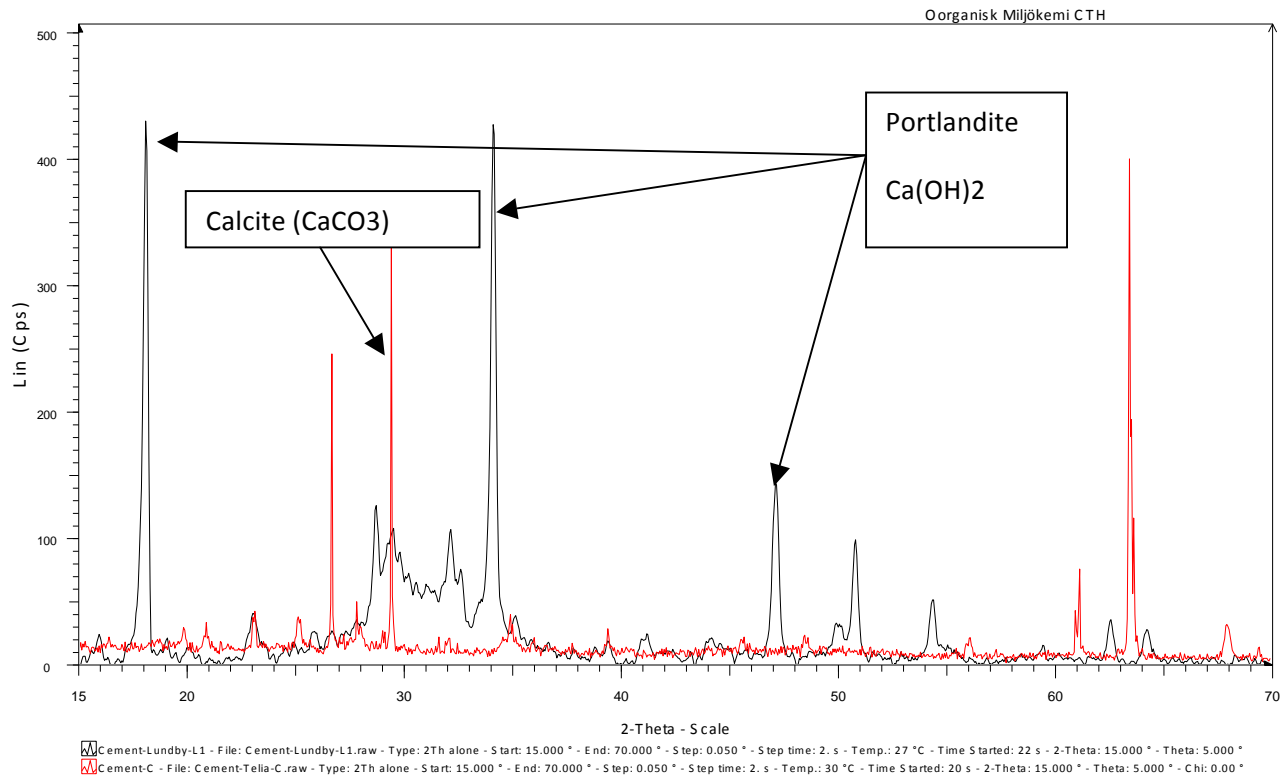
Proverna tagna från de två platserna uppvisar sammantaget på två olika kvaliteter på cementet, en sämre med hög porositet och utan portlandit och en intakt där portlandit kunde urskiljas.

Nedanstående bild är tagit med svepelektronmikroskop, SEM, över de två proverna från Lundbytunneln.



Figur 2. Två bilder på cementproverna från Lundbytunneln. Till vänster, en SEM bild tagit på den inre delen av cementpluggen. Till höger, bild på det mer porösa cementet som omger den rigida cementpluggen.

Bestämning av förekomst av portlandit gjordes med XRD (röntgendiffraktion) där olika mineral ger en viss signifikans i våglängd när provet bestrålas med röntgenstrålar. De erhållna signifikanserna jämförs med kända signifikanser och man kan på så vis urskilja innehållet i provet. Två prover jämförs i Figur 3. Det ena är det ovan beskrivna från Lundbytunneln med delen från den rigida borrhålspluggen och det andra är från Teliatunneln taget från en spricka.



Figur 3. Röntgendiffraktion på två prover i undersökningen. Den svarta linjen visar provet från Lundbytunneln där portlandit är starkt närvarande. Den röda linjen är från Teliatunneln där ingen portlandit visas utan däremot en stark signifikans av kalcit.

Den fullständiga redovisningen finns i Abbas et al. (2012). I denna konstateras att de utförda experimenten med XRD, IR och SEM var nödvändiga för att karaktärisera cementets mineralfaser och porositet. Exempelvis visade kombinerade observationer med dessa tekniker, att helt degraderad cement har en mycket porös struktur, samt att portlandit [Ca(OH)₂] helt saknas i matrisen. Närvaro av nya inslag av CaCO₃ indikerar utlakning av kalciumjoner samt pågående reaktion med CO₂.

Några av kemianalyserna på proverna från Teliatunneln visade att porstrukturen hos cementet kan se helt normal ut, trots den helt saknar buffertkapacitet genom avsaknad av portlandit. Sådan cement är i ett mellanstadium mellan frisk och degraderad.

Nedbrytningshastigheten

En modellering utfördes för att öka förståelsen för hur lösligheten av portlandit förändras vid förändring av pH, löst HCO_3^- , CO_3^{2-} , SiO_2 (i vattenfas) och CaCO_3 (kalcit). Modelleringen utgick från mättnadsindex, SI för olika mineral, enligt:

$$SI = \log Q - \log K$$

$$SI = \frac{Q}{K}$$

I uttrycket är Q produkten av jonaktiviteten och K är en jämviktskonstant. Ett omättat tillstånd av ett mineral ger ett negativt mättnadsindex, SI. När SI är noll, är mineralet i jämvikt med omgivningen.

Utgångspunkten för mängden lösta joner i ovannämnda uttryck är från vattenanalyserna för Telia- och Lundbytunnlarna.

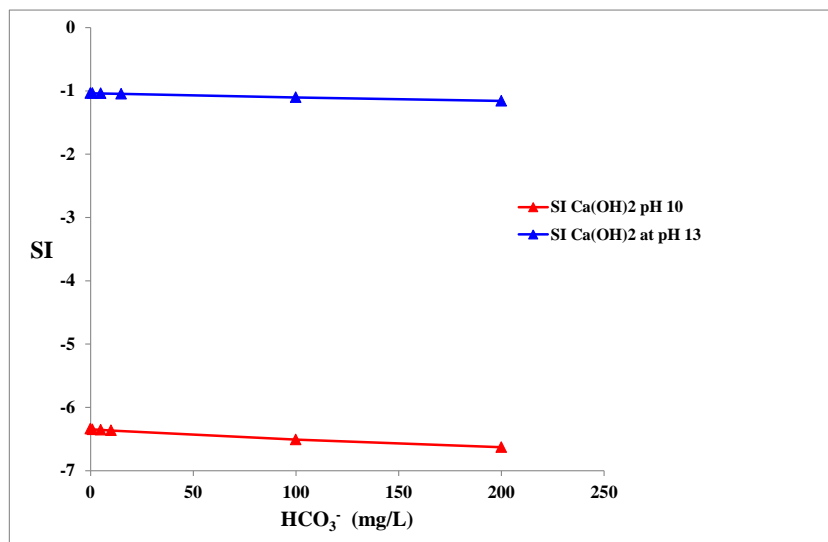
De kemiska analyserna av cement från tunnlar visar, att de mer åldrade proverna har en dominerande fas av kalcit (CaCO_3). Denna kommer från Ca^{2+} när kalciumhydroxiden (Ca(OH)_2) löses upp och reagerar med den diffunderade koldioxiden i luften.

När koldioxiden löses upp i vatten infinner sig en jämvikt mellan vätejoner (H^+) och vätekarbonat (HCO_3^-) och pH kan minska. Vätekarbonaten kommer i en ytterligare jämvikt mellan vätejoner och karbonat (CO_3^{2-}). Det är således mängden löst vätekarbonat som bestämmer lösligheten av kalcit och kalciumhydroxid.

För modelleringen simulerades två olika surhetsgrader, pH 10 och pH 13. pH 10 uppmättes i Lundbytunneln och pH 13 förväntas råda i porvattnet i en cementlösning.

Resultaten visar att för högre koncentrationer än 15 mg/l (5 för pH10 och 15 för pH 13) av löst vätekarbonat (HCO_3^-) blir mättnadsindex positivt för kalcit. Detta innebär att så fort den lösta portlanditen kommer i kontakt med koldioxid kommer kalcit att bildas. Kalcit kan ofta ses i tunnlar som hängande droppformationer i taket. Liknande resultat erhålls med exponering mot karbonat (CO_3^{2-}).

Lösligheten för kalciumhydroxid (Ca(OH)_2) skiljer sig från den ovan beskrivna. I Figur 4 visas mättnadsindex SI av kalciumhydroxid som funktion av på mängden löst vätekarbonat.



Figur 4. SI för $\text{Ca}(\text{OH})_2$ för två olika pH i en vattenlösning baserat på Lundbytunnelns vatten.

Figuren visar att portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kommer att vara löslig (SI är negativt) för både pH 10 och 13 och att lösligheten ökar vid lägre pH, vilket är förväntat.

Studier utfördes också av lösligheten av portlandit vid närvaro av kalciumkarbonat. Resultaten visar på att portlandit kommer att vara lösligt (SI är negativ) vid de två pH som studerats. Trots karbonatiseringen ser det alltså ut som att portlanditen kommer att lösas upp.

Denna hypotes måste dock kontrolleras mer noggrant med löslighetskinetik. Strukturförändringar kan ske i cementen, vilket påverkar såväl genomströmningshastigheten som möjligheten att andra mineral kan bildas.

Lösligheten av kvarts och amorf kisel i de båda tunnelvattnen visar att kvarts är i mättnadsfas och att amorf kisel är omättad.

Sammanfattningsvis kan sägas att i en starkt alkalisk miljö, genererad av upplöst portlandit, kan kalciumkarbonat bildas även vid små mängder löst koldioxid.

Lösligheten av portlandit beror inte på mängden kalciumkarbonat, utan primärt på lågt pH i grundvattnet.

3.3.4 Slutsats: beständighet och underhållsbehov av cementinjekteringar

Injekteringutförandet

Lundbytunnelns prov visar på att portlandit fortfarande finns kvar i injekteringscementet. Provet togs dock från ett injekterat borrhål där sannolikt enbart en liten vattengenomströmning fanns. Inget cement kunde hittas i sprickorna runt borrhålet. I området där kärnan togs hade stora mängder bruk pumpats in i berget. Trots dessa mängder injekterat bruk, läckte det kärnborrade borrhålet. Injekteringsförfarandet var att använda ett lättflytande bruk för att sedan göra det mer och mer styvt genom att minska vattenmängden. Att provet från injekteringshålet både uppvisade en tydlig rigid kärna (mörkgrå och

kompetent) och en mer porös yttre del(ljusgrå och spröd), kan tyda på tre förhållanden: 1) Området var inte tillräckligt tätt, vilket lett till att vatten under årens lopp har löst upp portlanditen och lämnar ett poröst skelett kvar. 2) Det kan också bero på hur borrhålet injekterades: först med ett högt vattencementtal (vct) avslutat med ett tjockare bruk. Den mer porösa delen borde då vara cementen med högt vatten cement tal. 3) En förklaring kan vara Taylordispersion: ytterkanten på den framrusande cementpluggen ger upphov till dispersion (och kanske till och med turbulent flöde) vilket ger en omblandning av vattnet i borrhålet.

För Teliatunnelns del kunde enbart ett prov säkerställas att härröra till injekteringscement. Det nu 40 år gamla cementet saknar portlandit men uppvisar ingen porös struktur. Andra mineral kan ha bildats som ger en fortsatt tät struktur. Stabiliteten av cementet är försämrad och en snabbare nedbrytningshastighet kan förväntas av cementet.

Att koldioxid från luften diffunderar in i sprickor är välkänt. Detta ger upphov till att pH kan sänkas i och med bildandet av vätekarbonat. I tunnlar med mycket "kalcitdroppar" tyder fenomenet på att portlanditen löses upp. Förändringen av mängden "kalcitdroppar" kan bli en indikator på tillståndet av cementen i sprickorna. Mer förståelse kring de kinetiska förloppen krävs dock för fasta slutsatser.

Några av kemianalyserna på proverna från Teliatunneln visade att porstrukturen hos cementet kan se helt normal ut, trots att den helt saknar buffertkapacitet genom avsaknad av portlandit. Sådan cement är i ett mellanstadium mellan frisk och degraderad.

3.4 Stål

3.4.1 Bakgrund

Den största risken för cementingjutna bultars driftsäkerhet, ur korrosionssynpunkt, torde vara om det existerar vattenförande sprickor i berget kring bulten och grundvattnet där lokalt lakar ut bruket och kommer i kontakt med bultstålet. För att få kvantitativa mått på denna risk genomfördes exponeringar i borrhål i ett antal utvalda bergmiljöer i Göteborg och Stockholm. Provingen påbörjades i januari 2008 och avslutades i juni 2010.

På följande platser sattes prover ut:

- Vägtunnel i Södra Länken vid Sickla (Stockholm).
- Tunnel under Brudaremossen (Göteborg).
- Tunnel tillhörande Göteborgs Energi under Göta älv

3.4.2 Fältundersökningarnas utförande

För att efterlikna de förhållanden som uppstår då en del av bulten inte längre skyddas av cementbruk utan i stället dess korrosionsstatus bestäms av bergvattnets kemiska sammansättning installerades

ståltrådar i borrhål som förslöts med gummiexpandrar. Ytterändan av gummiexpandrar försågs även med en aluminiumfolie som extra diffusionsskydd gentemot tunnelatmosfären.

I respektive tunnel valdes en plats ut där vattenföringen bedömdes vara stor. 15 hål borrades med lutning snett uppåt, diameter 25 mm och längd 1 m. Hålen sköljdes med vatten och blåstes rena från borrhax innan provtrådar installerades.

Provmaterialet som användes var avfettade, vägda ståltrådar, diameter 2 mm, längd 0,7 m.

Vid monteringen av provtrådarna spolades borrhålet med kvävgas innan förslutning med gummiexpander.

Proverna monterades således utan injekteringsbruk som skyddande och alkaliserande skikt. Denna provmetod simulerar därmed "värsta tänkbara" förhållande: avsaknad av kringliggande bruk genom dålig ingjutning eller bortspolning.

Efter ca 10 månader demonterades 9-10 av trådarna på varje provplats i tunnarna. Det andra provuttaget utfördes efter ca 2,5 år då resterande trådar avlägsnades på grund av ett beklagligt missförstånd. Därmed omintetgjordes ytterligare tidsmässig utökning av testen.

3.4.3 Resultat av labundersökningar

Efter det att proverna tagits ut, utvärderades korrosionsangreppen med avseende på allmän korrosion (upprepad betning i Clarkes lösning och vägning) och lokal korrosion (mikroskop) på laboratorium.

Vattenanalyser

Även om det var svårt att få tillräckliga volymer med vatten då trådarna demonterades (rann utmed bergväggen) genomfördes ett stort antal vattenanalyser. Sammanfattningsvis kan vi karakterisera de olika miljöerna enligt nedan:

Plats	Cl ⁻ , ppm	SO ₄ ²⁻ , ppm	Syrakap, mol/m ³	Ca ²⁺ , ppm	pH	Vattenförekomst
Södra Länken	20	500	1-2	150	7,0	Fuktigt-flödande
Brudaremass	2800	200	<1	600	7,5	Torrt-fuktigt
Göta älv	31000	3500	<1	1500	5,0	Torrt-flödande

Korrosionshastigheter

Utgående från vattnens kemiska sammansättning räknades teoretiska korrosionshastigheter fram. DIN 50 929 är ett exempel på en sådan norm som tillämpas för bedömning av vattenledningssystemens korrosivitet. Även om spridningen i uppmätta korrosionshastigheter efter 10 månader var stor (10-55 µm/år) så konstaterades en relativt bra korrelation med DIN-normen, med en predikterad korrosionshastighet på 20-50 µm/år.

Borrhålen i Brudaremossen var torrare än borrhålen på de andra platserna. Uppmätta korrosionshastigheter var här mycket lägre än vad som indikeras av DIN-normen.

I Shelltunneln under Göta älv stabiliserades korrosionshastigheten på en högre nivå, ca. 60 µm/år. Här var både flödet högt och vattnet mer korrosivt. DIN-normen gav dock för höga värden.

Någon gång efter det första provuttaget hade korrosionen upphört, troligen på grund av brist på syre i borrhålen. Detta kunde fastställas genom att korrosionsprodukterna var svarta (magnetit) och att korrosionshastigheterna, beräknade över hela exponeringstiden, blev mycket låga, 0-10 µm/år.

En detaljerad redovisning av försöksresultaten finns i slutrapporten för Etapp II av detta projekt, se avsnitt 5. Centrala testdata redovisas också i Bilaga C längst bak i denna rapport.

3.4.4 Diskussion

För en delvis ingjuten bergbult är flödande grundvatten vatten mest korrosivt, eftersom stillastående vatten alkaliserar av kringliggande bruk.

Resultaten visade tydligt, att "torra" borrhål ger mycket låg korrosion.

Lokala frätgropar kan uppkomma på bergbultar men dessa blir sällan kritiska. Med tiden växer de ihop och det blir den allmänna korrosionen som avgör bultens livslängd.

För en bult vill man undvika midjebildning på en icke kringgjuten del av bulten. Detta är mer att betrakta som allmän korrosion på en begränsad del av bultens yta än som gropfrätning.

Den använda modellen för korrosionshastigheter tar inte hänsyn till vattnets syrehalt. Testerna gjordes i borrhål utan närliggande alkaliskt bruk. Man kan därför betrakta de beräknade korrosionshastigheterna som konservativa.

3.4.5 Stålkomponenters nedbrytning och omvandling i tunnelmiljö

Den uppmätta medelkorrosionshastigheten i tunneln under Brudaremossen i Göteborg befanns vara ca 3 µm/år, medan de två andra provplatserna, Södra Länken och den så kallade Shelltunneln under Göta Älv, uppvisade en tiopotens högre korrosionshastighet, 27 µm/år respektive 32 µm/år. Orsaken står troligen att finna i vattenkemin och mängden vatten. Vattenprovet från Brudaremossen visade sig innehålla lägre halter av både klorit och sulfat än vattnet från de två andra platserna. Vattenflödet var också mycket lägre här än på de andra platserna.

Förutom allmän korrosion visade prover från samtliga platser många fall av kraftig lokal gropfrätning. Korrosionsdjupet befanns lokalt vara betydande, upp till 250 µm.

3.4.6 Slutsats: Beständighet och underhållsbehov av bergbultar

Väl ingjutna bultar, som inte utsätts för kontakt med flödande grundvatten, får en mycket hög beständighet och behöver i princip inte underhållas eller bytas ut.

Den andra extremen är dåligt ingjutna bultar som har kontinuerlig kontakt med grundvattenflöde. Särskilt bultdelarna närmast bergytan kan på relativt kort tid skadas av korrosion. Bultar satta i läckande krosszoner kan av denna anledning behöva bytas ut kanske vart 10:e år. Ett alternativ är att installera rostfria bultar i sådana partier.

3.5 Dräner och inklädnader⁶

3.5.1 Funktionskrav för tunnel

Dräner och inklädnader har som syfte att förhindra vatten att rinna eller droppa ner på installationer och vägbanor. I framförallt trafiktunnlar är syftet också, att förhindra utveckling av istappar och svallis under vinterhalvåret som kan skada människor, installationer och fordon.

Underhållsbehovet varierar beroende på tunnelns funktion och klimatförutsättningar. I tunnlar avsedda för kommunikation och kommunala förnödenheter, såsom telekommunikation, energi (fjärrvärme) och spillvatten, är tunnelarna normalt inte utsatta för frysning utan har i stort sett ett jämnt klimat året runt. I sådana tunnlar sker nedbrytningen av det bärande huvudsystemet och dränerna långsamt i jämförelse med trafiktunnlar där temperaturen under året varierar kraftigt och blir utsatt för flera fryscyklar.

Inläckningskrav varierar beroende på tunnelns funktion. I exempelvis TeliaSoneras och Göteborgs Energis tunnlar behöver dåligt fungerande dräner inte nödvändigtvis bytas ut, om inte det inrinnande vattnet riskerar att skada ledningar och installationer.

I trafiktunnlar är emellertid funktionskravet betydligt mer rigoröst och inläckande vatten kan svårigen accepteras över huvud taget. Under vinterhalvåret orsakar icke fungerande dräner is på vägbanan, istappar och svallis som gör intrång på det fria rummet, extrema belastningar på installationer, fallande is etc. Det varierande klimatet (fryscyklar) accelererar nedbrytningen och eftersom isen dessutom utgör en säkerhetsrisk, är underhållsbehovet av dräner betydligt större.

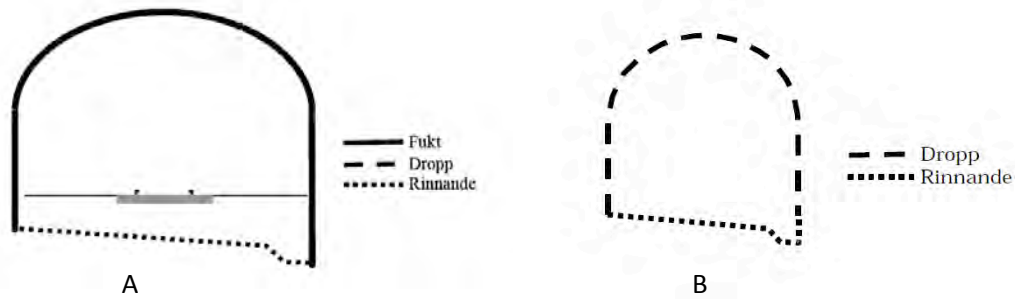
En renovering eller ersättning med nya dräner kräver ofta i dessa tunnlar avstängning av väg- eller tågtrafik och arbetena måste ofta ske under tidspress och som nattarbeten. Dräner är en av de mest resurskrävande delarna när det gäller underhåll av våra trafiktunnlar.

De senast uppdaterade funktionskraven för trafiktunnlar avseende vatteninläckning beskrivs i TRVK Tunnel 11 och sammanfattas nedan:

- Flödet från ett inläckningsställe i vägg eller tak i ett trafikutrymme (vägbana eller räls) får inte vara större än eller lika med 3 ml/h.
- I övriga utrymmen får flödet från ett inläckageställe i vägg eller tak inte vara större än 450 ml/h.
- Uppsamlat vatten ska ledas bort på ett frostsäkert sätt.
- I en bergtunnel får inläckning av detta slag åtgärdas genom installation av vatten- och frostsäkring.

Tidigare i Trafikverkets (Banverkets) standard BVS 585.40 från 2005 illustrerades funktionskravet enligt Figur 5. I Tabell 1 redovisas vad som i standarden avses med fukt, dropp och rinnande vatten.

⁶ Avsnittet författat av tekn.dr Lars_Olof Dahlström



Figur 5. Tillåten inläckning i trafikutrymme med hänsyn till funktion och säkerhet (A) och tillåten inläckning i övrigt utrymme (B) med hänsyn till funktion och säkerhet.

Begrepp	Antal droppar/minut	Liter/minut
Fukt	<1	$<0,05 \cdot 10^{-3}$
Dropp	≥ 1	$\geq 0,05 \cdot 10^{-3}$
	≤ 150	$\leq 7,5 \cdot 10^{-3}$
Rinnande	>150	$>7,5 \cdot 10^{-3}$

Tabell 1. Definition av begreppet fukt, dropp och rinnande vatten för enskilt läckageläge.

En jämförelse visar att inga förändringar skett i standarden, $0,05 \times 10^{-3}$ och $7,5 \times 10^{-3}$ liter/minut motsvarar 3 respektive 450 ml/tim.

Allteftersom funktionskraven blivit hårdare har också mängden installerade dräner och inklädnader ökat avsevärt i våra trafiktunnlar, detta trots en utvecklad injekteringsteknik och allt mer intensiva injekteringsinsatser.

Injekteringen har två syften; dels att se till att miljökravet avseende inläckage innehålls, dvs. förhindra att en oacceptabel mängd vatten kommer in i tunneln som kan påverka grundvattensituationen i området; och dels att uppfylla funktionskravet på att praktiskt taget inget dropp får förekomma från väggar eller tak. Miljökravet uppfylls idag normalt med modern injekteringsteknik, medan funktionskravet sällan uppfylls. Man är då tvingad att installera dräner, inklädnader eller "lining" i tunnlar.

3.5.2 Dräner

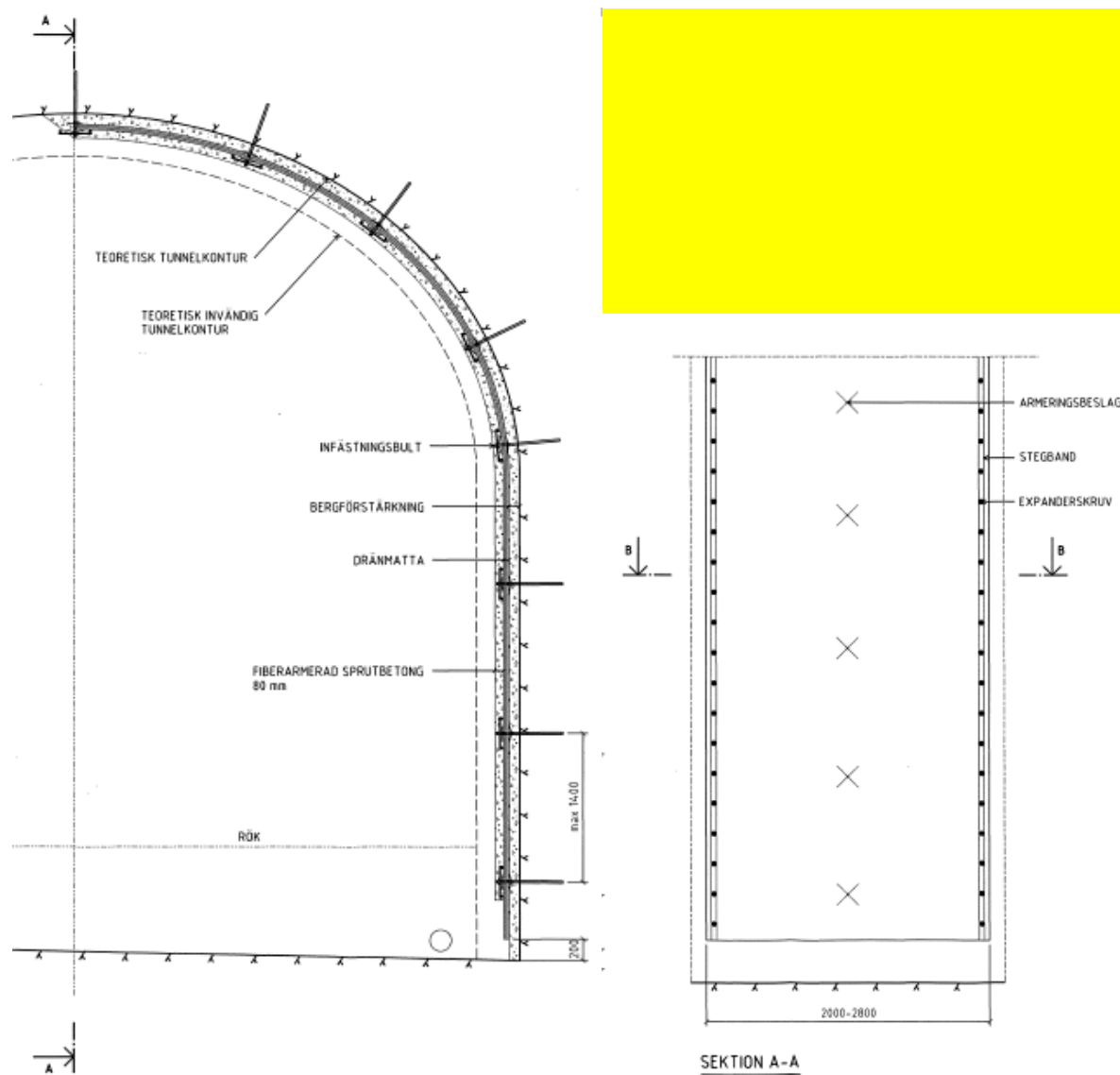
Dräner består vanligen av en isolerande vattentät matta som fästs mot berget med bult. Utanpå mattan installeras ett armeringsnät som sedan sprutas in med sprutbetong. De senaste ca 10 åren har armeringsnätet ofta ersatts med stålfiberarmerad sprutbetong. Alternativt fästs mattan med stegband.

En typisk dränutformning framgår av Figur 6. Dränen samlar in och leder vattnet från väggar och tak och för det ner i ballasten i tunnelsulan och därifrån till tunnelns dränsystem .

Det bärande huvudsystemet i tunnlar dimensioneras idag för 120 års livslängd, medan installationer såsom dräner dimensioneras för 40 år. Det har emellertid visat sig att dräner ofta måste underhållas i stor omfattning under sin dimensionerande livslängd.

Det är inte ovanligt att inläckaget sker över en längre sträcka, exempel i en sprick- eller krosszons utbredning i tunneln. Dräner kopplas ihop till en längre uthållig drän, upp till tiotals meter.

Dräner är inte en del av det bärande huvudsystemet men betraktas likväl ofta som en del av tunnelkonstruktionen. Dräner installeras för att uppfylla de funktionskrav avseende vatteninträngning som ställs av exempelvis Trafikverket, se nedan.



Figur 6. Typisk utformning av isolerande drän, installerad för att leda bort vatten ner i dränsystemet i ballasten i sulan på en tunnel.

Igensättning

Vid underhållsinspektioner konstateras ofta att dräner är igensatta eller skadade och inte längre fyller sin funktion. Vatten rinner vid sidan om en igensatt drän och skapar dropp. På vintern kan bildas istappar och eventuellt svallis som kräver regelbunden nedknackning för att trafiken skall kunna upprätthållas och skador på installationer undvikas.

Att dräner sätter igen kan bero på flera orsaker och som diskuterades i avsnitt 6 i slutrapporten för Etapp II, *Igensättning av dräner – Processer och tidsförlopp*. Igensättningen kan antingen vara bygg-, miljö- eller

fysikaliskt relaterad. Byggrelaterade orsaker kan typiskt vara sådana som kopplings- eller montagefel. Miljörelaterade orsakas av kemisk- eller bakteriella processer och typisk fysikalisk orsak är isbildning som inte bara blockerar vattnet utan mekaniskt bryter sönder dem.

Dräner installeras så, att förutsättningar för igensättning med vittringsprodukter av berg eller betong undviks. I samband med undersökning och projektering bör man identifiera förutsättning för kemisk och bakteriell igensättning. I områden med risk för sådan igensättning bör dräner konstrueras som spolbara för att man skall kunna avlägsna igensättningar av kemisk eller bakteriell utfällning. De skall spolas så ofta, att utfällningar inte börjat täckas av en förhårdnat skikt eller börjat stelna, vilket normalt innebär 2 à 3 gånger per år.

Om flödesvägen i en drän blockerats finner vattnet nya vägar och tränger ut i tak och väggar. På vintern bildas isformationer som inte bara kan bryta ner dränen i sig utan även andra installationer som exempelvis kontakt- och återföringsledningar, handräcken och kabelstegar.

Istappar kan skada fordon, vilket kan orsaka stora förseningar av person- och godståg. Isen utgör också en skaderisk för underhållspersonal. Ibland bildas så mycket is att det finns risk för urspårning. Motsvarande problem förekommer i vägtunnlar.

Problem med istappar illustreras i Figur 7. Figur 8 visar konsekvensen en av läckande drän.



*Figur 7. Istappar som gör intrång på det fria rummet och som måste tas ner innan ett tåg kan passera.
(Foto A. Andrén)*

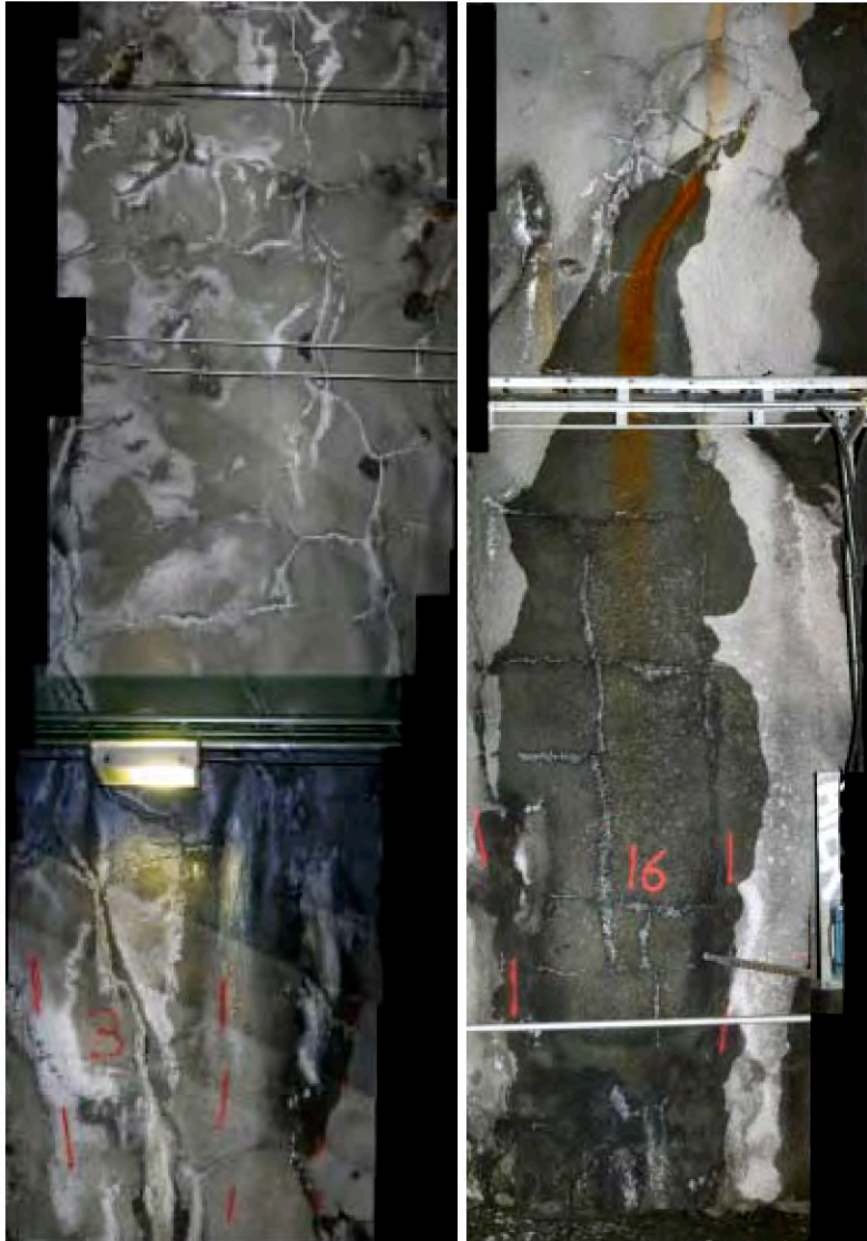


Figur 8. Läckage vid sidan av drän, isen belastar handledare som brutits sönder. (Foto: A. André).

Underhållsbehov

Användandet av dräner har ökat kraftigt sedan 80-talet och tunnelägare står nu inför stora problem. Allt eftersom många dräner tappat sin funktion, måste de renoveras eller ersättas.

Figur 9, visar som exempel statusen av några dränpartier som installerats i spårtunnlarna vid Grödingebanan. På en drygt 4 km lång tunnelsträcka har över 400 dräner installerats. Tunnlarna byggdes i början på 90-talet och dränernas funktion har i stor omfattning blivit nedsatt. Många dräner har spruckit och deras ursprungliga hållfasthet är definitivt nedsatt. Att renovera eller byta dräner är mycket tids- och resurskrävande, ett arbete som kan utföras under några få timmar under natten, då banan eller vägen inte trafikeras. Att ersätta en gammal drän kan vara tiofalt dyrare än att installera den under byggperioden.



Figur 9. Exempel på nedsatt funktion och nedbrytning av dräner i två sektioner på Grödingebanan. (Foto: R. Boman).

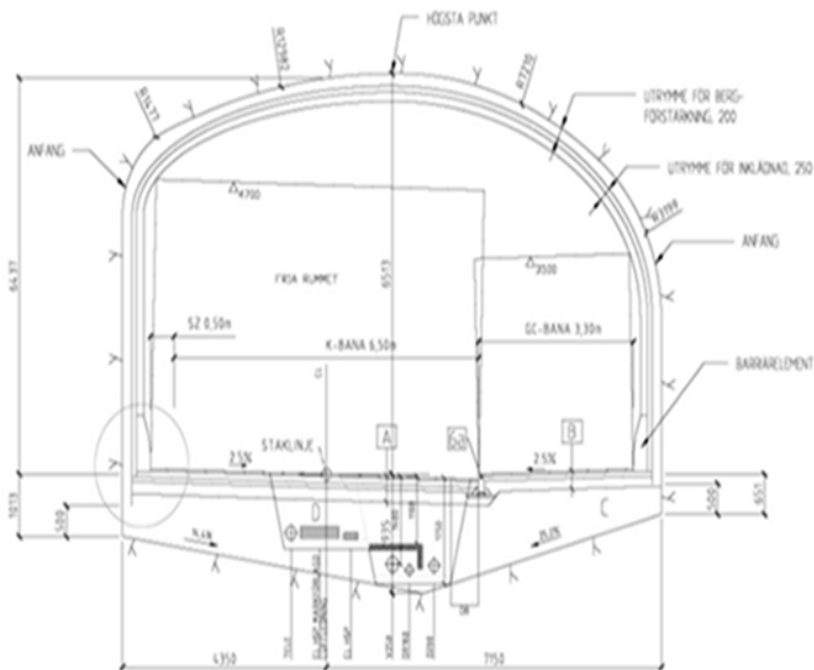
Där man vet att man med ett dränsystem skulle få återkommande underhållsproblem, kan man använda membran- eller betonginklädnad (s.k. "lining") i hela eller delar av tunneln där speciellt besvärliga förhållanden råder. Alternativt kan man utforma ett mer flexibelt system där man lätt kan plocka ner och

sätta upp dränerna igen efter kontroll och underhåll. Målet är minskat underhållsbehov och ökad tillgänglighet i tunneln. Dessa system beskrivs nedan.

3.5.3 Membraninklädnad

De hårda funktionskraven för trafiktunnlar har medfört att allt fler partier behöver kläs in med dräner. Ofta blir dränerna kontinuerliga och täcker längre sträckor. Detta har banat väg för ett system där man klär in hela tunneln med ett tätmembran som monteras på en stålkonstruktion, infäst med bultar i bergväggen, se Figurerna 10-12. Ett exempel är membraninklädnaden i Norra Länken, se Figur 10. Efter montage av membranet täcks det med ett lager av 100 mm fiberarmerad sprutbetong.

Dessvärre leder funktionslösningen med tätmembran att man ibland har behövt frångå vissa krav på tunnelns bärande konstruktion (det bärande huvudsystemet), då möjlighet och utrymme för regelbunden inspektion och eventuellt underhåll av det bärande huvudsystemet saknas. För att installera membranet har man därför i vissa fall begärt avsteg från krav på inspekterbarhet och möjlighet till underhåll enligt Trafikverkets regelverk. I en aktuell tunnel, Norra Länken, medgavs avsteg från kravet på inspekterbarhet med hänvisning till de laster som inklädnaden dimensionerats för. Vikten av inspekterbarhet illustreras i Figur 13 och i avsnitt 3.5.4.



Figur 10. Exempel på uppbyggnad av ett inklädnadssystem med tätmembran.



Figur 11. Montering av membraninklädnad, typ tunnelduk.



Figur 12. Inklädnad i Norra Länken. Membranet täcks senare med 100 mm fiberarmerad sprutbetong.

I Norge har man provat inklädnader under många år och vid några tillfällen har bergmassor eller block fallit ner och raserat inklädnaden, se Figur 13. Detta har orsakat viss skepsis till alternativet. Trots stora problem med inspektion har man nu krävt att det bärande huvudsystemet skall kunna inspekteras enligt vedertagna rutiner och man diskuterar att i trafiktäta tunnlar istället övergå till "betonglining".

Underhållsbehov

Materialval och åldringsbenägenhet hos tunneldukarna gör, att inklädnaden normalt behöver bytas ut efter ca 40 år, även om det finns membrantyper med betydligt större livslängd. Under drifttiden krävs normalt mycket lite funktionsuppehållande underhåll av membranet. Visst utbyte av det täckande sprutbetongskiktet kan dock behöva göras under drifttiden.

Dessvärre uteblir det normala underhållet av det bärande huvudsystemet bakom inklädnaden, eftersom detta inte låter sig göras med mindre än att membranet monteras ner.



Figur 13. Ras vid Hanekleivtunneln, Norge

3.5.3 Betonginklädnad, "Lining"

Skandinavien anses ibland vara mindre konservativt när det gäller tunnlar och tunneldesign än andra länder. Utomlands är det mycket ovanligt att i stora trafiktunnlar basera det bärande huvudsystemet endast på berget, sprutbetong och bult. I stället baseras förstärkningen först på en temporär förstärkning av exempelvis bultar, stålbågar och armerad sprutbetong som stabiliserar tunneln och säkerställer framdrift. Senare installeras en permanent förstärkning, vanligen en stödjande betongkonstruktion, som gjuts mot berget och täcker tunneln runt om, så kallad "lining". Denna kan också vara en prefabricerad betongkonstruktion som omges av naturligt lagrad jord eller berg.

Platsgjuten (övre bilden) respektive prefabricerad betonglining (undre bilden) visas i Figur 14.

Självklart spelar de geologiska bergförhållandena stor roll när det gäller att utnyttja berget som bärande huvudsystem. Den skandinaviska berggrunden har här goda förutsättningar.



Figur 14 Den övre bilden visar en platsgjuten lining i en sprängd tunnel och den undre en lining uppbyggd av prefabricerade element monterade i en TBM – borrarad tunnel.

Syftet med betonginklädnad i skandinaviska tunnlar blir huvudsakligen att uppfylla funktionskravet att hålla undan vatten; att liningen blir en del av det bärande huvudsystemet "får man på köpet". I Europa

utanför Skandinavien betonginkläds i princip alla trafiktunnlar oavsett bergkvalitet och vattenförhållande.

Beräkningar med den i detta projekt framtagna LCC-modellen, se avsnitt 5, motiverar ur ett livslängdsperspektiv ofta lokal robusta lösningar som "betonglining" i tunnelavsnitt med dåligt berg och vatten. I sådana områden, med i Skandinavien traditionella förstärkningslösningar och dränlösningar, krävs frekventa underhålls- och driftstopp.

Underhållsbehov

Till skillnad mot dränkonstruktioner och inklädnadssystem med membran kan en betonginklädnad dimensioneras för tunnelns hela livslängd. Underhållsbehovet kommer därmed att minska och risken för driftstopp blir liten och kontrollerbar.

3.5.4 Vikten av inspekterbarhet – fallet Gravesforstunnlarna

I Gravesforstunnlarna utanför Norrköping installerades på 1960-talet ett innertak av eternitskivor formade som en båge med stor radie. Under tillverkningen hängdes skivorna i taket med stöd mot anfanget. Skivorna täcktes med sprutbetong, 10 cm, armerad med två lager armeringsnät.

Berget har inte inspekterats sedan tunneln byggdes. När man för några år sedan valde att såga hål i taket för att inspektera, upptäcktes blocknedfall och vittrat bergmaterial på många ställen längs tunneln, se Figur 15. Det förekom block med en tyngd som vida översteg inklädnadens hållfasthet, men tursamt nog belastade blocken inklädnaden endast måttligt, då delar av lasten togs upp av bergväggen⁷.

⁷ Takinklädnaden och rasmaterialiet har nu tagits ner. Arbetet har skett vid sommartid under flera år under femveckorsperioder då tunnarna varit helt avstängda för trafik.



Figur 15. Ras vid Gravesforstunnarna.

3.5.5 Sammanfattning

Funktionskraven för många tunnlar är rigorösa och kräver ofta kontrollerad avledning av inläckande vatten med dräner eller inklädnader. Dräner och dränsystem står för en mycket stor del av en tunnels underhållsbehov och tillhörande kostnader och driftstopp kan bli betungande.

Montering av en tunnelduk innebär ett kontinuerligt underhåll och dimensioneras normalt för en betydligt kortare livslängd än det bärande huvudsystemet, 40 respektive 120 år. Det betyder att det kan komma att behöva bytas ut två gånger under tunnelns planerade drifttid. Två längre perioder då en trafikunnel kommer ha mycket begränsad framkomlighet. Inspektion och underhåll av det bärande huvudsystemet kvarstår. Underhåll kan förväntas ske mer sällan, på grund av sämre möjlighet till och därmed glesare inspektioner. Men när underhåll väl utförs bedöms det komma att behöva ske i större omfattning.

Robusta lösningar som en tät betongliner är relativt kostsamma, men kan i ett livslängdsperspektiv visa sig bli betydligt billigare än att regelmässigt underhålla dräner, vilket ofta praktiseras i Skandinavien.

4 Priser på arbeten samt underhållsfrekvenser i LCC-modellen

4.1 Underhållsarbeten

4.1.1 Inledning

Som beskrevs i slutrapporten för Etapp II, avsnitt 2, är LCC-talet en nuvärdesberäknad summa av alla underhållsarbeten på tunneln och dess förstärknings/tätningssystem under livslängden. För att denna summering skall få relevans, krävs att arbetskostnaderna beskrivs med så korrekta priser som möjligt och med så rimliga tidsförlopp mellan varje insats som det går att bedöma.

Det är med andra ord först när indata är ”riktiga” som modellen levererar LCC-tal som går att lita på.

Termen ”riktiga indata” skall dock inte tolkas bokstavligt. De LCC-tal som räknas fram är och förblir jämförelsetal, att användas vid bedömningar av olika alternativ för skötsel av en tunnel. I det hypotetiska fallet, att man gör en helt korrekt à-prissättning på alla ingående arbeten och räknar precis rätt på frekvensen för dessa arbeten, liksom på den verkliga kalkylräntan, skulle man visserligen få fram ett LCC-tal som ger det korrekta nuvärdet i MSEK för underhållet. Men denna situation kommer aldrig att inträffa – och det är inte heller avsikten! Återigen, LCC-talet är ett jämförelsetal och inget annat.

För att modellen skall vara användbar är det å andra sidan viktigt, att indata anges så nära sanningen som möjligt, annars kan även jämförelser med modellens hjälp bli vanskliga. Nedan följer en beskrivning av de indata som skall användas.

4.1.2 Besiktningar

Alla underhållsarbeten planeras och utförs som ett resultat av besiktningar av tunneln eller bergutrymmet. Översiktliga besiktningar utförs ofta, i trafiktunnlar kanske med ett par års intervall, i tekniska tunnlar mer sällan. Med ungefär 5 års intervall görs mer omfattande besiktningar, då även smärre underhållsarbeten kan utföras i tunneln. Detaljerade besiktningar genomförs som underlag för mer omfattande underhålls- och reparationsarbeten i tunneln, kanske vart tionde år eller med längre tidsintervall.

Besiktningensarbeten skall prissättas och frekvensen för genomförande av inspektionerna bestämmas, som indata i modellen.

4.1.3 Fria bergytor

I dessa tunneldelar är själva berget i tunnelns tak och väggar de bärande konstruktionsdelarna. För att säkerställa den bärande funktionen, måste successivt lösa delar av väggytan skrotas ner så att bergspänningarna kan överföras i friskt berg. Vid torra förhållanden i tunneln görs dessa arbeten ungefär vart 10:e år. Vid fuktigt berg kan frekvensen behöva fördubblas.

Dessutom får inte block bli instabila och falla in i tunneln. Detta görs med selektiv bult och eventuellt något påslag med sprutbetong för att lokalt ”fixera” berget ungefär vart 10:e år.

I samband med inspektioner ca vart 5:e år utförs så kallad ”bomknackning”, vanligen manuellt med en hammare. Då avgörs vilka partier som behöver skrotas ner med skrotspett eller hydraulhammare.

Underhållsarbetena inleds sedan med rengöring av de oförstärkta bergytorna med högtryckstvätt, följt av bomknackning och skrotningsarbeten. Om block med tveksam samverkan med övriga berget påträffas, förankras detta med bergbult (ströbult).

Följande arbeten skall prissättas och användas som indata:

- *Rengöring av bergytor*
- *Bomknackning*
- *Skrotning av oförstärkt berg*
- *Bergbult (ströbult 3 m)*

4.1.4 Sprutbetongytor

Sprutbetongens stabiliserande funktion avgörs av dess vidhäftning mot bakomliggande bergyta samt av själva betongens kvalitet. Den senare bryts ner genom inverkan av genomströmmande grundvatten. God sprutbetongkvalitet kännetecknas av att betongytan avger ett ”klingande” ljud vid slag med en hammare. Bomknackningen på sprutbetongytor, liksom på fria bergytor, utförs i samband med inspektioner ca vart 5:e år. Den dåliga sprutbetong - ofta installerad på fuktiga ytor - som då upptäcks brukar skrotas ned och bytas ut under efterföljande underhållsarbeten i tunneln.

Bra, torr sprutbetong brukar ersättas eller kompletteringsprutas ungefär vart 25:e år.

Följande arbeten skall prissättas som indata:

- Nedknackning (eller bilning) av bom sprutbetong
- Påsprutning med ny sprutbetong

4.1.5 Gjuten betong

Gjuten betong får regelmässigt en högre kvalitet och beständighet än sprutbetong genom den kontrollerade gjutningsprocessen. Betongen kan gjas inom form på plats i tunneln eller förtillverkas på fabrik. Elementen monteras sedan i tunneln.

4.1.6 Bergbultar och bärande stålkomponenter

Erfarenheten visar, att väl ingjuten bult har hög beständighet, minst 25 år, kanske det dubbla.

Bultar som satts i partier med rinnande grundvatten kan få skador på ingjutningen som kan leda till korrosion av bultstålet. Erfarenhetsmässigt leder sådana förhållanden till att utsatta bultar kan få bytas ut ca vart 10:e år. Det vanligast är då, att man helt enkelt sätter en ny bult bredvid den gamla.

Vid korrosionsmässigt mycket svåra förhållanden kan man ersätta vanliga bultar i svartstål med rostfri bult. Dessa bultar kan räknas som underhållsfria. Materialkostnaden, 100 SEK/kg, är ca 7 gånger högre än för vanligt stål.

Följande arbeten med systembultning skall prissättas som indata i modellen:

- *Bergbult (L=3m, ingjuten utan förspänning)*
- *Rostfri bergbult (L=3m, ingjuten utan förspänning)*

4.1.7 Dräner

Dränsystemet byggs upp så att det klarar dräneringsbehovet vid naturligt inläckage samt vid tvätt av tunneln. Brunnarna slamsugs efter utförd tvätt.

Dränsystemet kan bli igensatt av utfällningar från berget, som även påverkar pumpar och pumpledningar. Sprickor i täckande sprutbetong kan förekomma, med korrosionsrisk som följd. Speciellt gäller detta i "breda dräner" utan rörelsefogar som förekommer i många tunnlar. Frostskador på grund av otillräcklig värmeisolering är ett annat problem som förekommer, särskilt i äldre tunnlar med mineralull som värmeisolerande material.

Spolning av dräner är en del av tunnelunderhållet. Spolningen bör göras regelbundet för att avlagringar av fasta partiklar samt kemiska som järn, mangan och kalcit skall kunna avlägsnas. Vid grundvatten benäget för igensättning är lämplig frekvens att spola dränen ett par gånger per år.

Vid biologiskt aktiv grundvattenmiljö synes ungefär var tionde drän vara utsatt för biologisk igensättning, som kräver utbyte av dränen vart 10:e år.

Nedknackning av istappar invid dåligt fungerade dräner räknas också som en del av bergunderhållet. Vintertid kan sådana arbeten krävas dagligen i en tunnel. Det krävs 2 man, sky-lift och ett TMA-fordon under minst fyra timmar för att klara isrensning i en 200-300 m lång tunnel.

Följande arbetsmoment skall prissättas som indata i modellen:

- *Vattenspolning (högtrycksspolning, per drän)*
- *Nedknackning av is (manuellt från sky-lift, per 8 tim-skift)*
- *Rivning och ersättning av drän (bilning,montering,sprutning)*

4.1.8 Tak- och vägginklädnader

I tunnlar försedda med inklädnader har taket och eventuellt väggarna skyddats mot inläckande vatten och frysning. Betonginklädnader, så kallad "lining", kan vara platsgjutna eller bestå av förtillverkade element som monteras på plats i tunneln. Man brukar anse att en betonglining i princip är underhållsfri under tunnelns livslängd, ca 120 år, och då inte behöver renoveras eller bytas ut.

Isolerande och tätande tunnelmembran täcks vanligen med fibersprutbetong. Förutom att inklädnadsmaterialet skall uppfylla givna krav på vattentäthet och frostisolering, måste det också uppfylla gällande brandtekniska krav. Materialet måste vidare ha tillräcklig beständighet mot de miljölaste det utsätts för, exempelvis korrosion vid sprickbildning i sprutbetongen. En livslängd på 40 år brukar anses normalt för de flesta membrantyper.

Inklädnader som skall prissättas som indata i modellen är:

- *Betonglining, platsgjuten*
- *Betonglining, förtillverkade element*
- *Membran, typ tunnelduk*

4.1.9 Cementinjekteringar

En väl utförd förinjektering klarar sin tätningsfunktion under tunnelns livslängd, se avsnitt 4.2.3 nedan.

Efterinjekteringar kan göras vid behov för att skydda anläggning mot nedbrytande krafter och minska underhållsbehovet, ingen frekvens för dessa insatser kan anges. Ett kvadratmeterpris skall också anges som indata i modellen.

4.2 Experimentellt framtagna underhållsfrekvenser

4.2.1 Sprutbetong

De av CBI utförda undersökningarna, se avsnitt 3.5 ovan, visar att särskilt påsprutningar över vattenförande bergtyper kan resultera i partier med betong av dålig kvalitet. CBI:s experiment verifierar den UH-praxis som tillämpas i tunnlar idag, se avsnitt 4.1.2 ovan. Med utveckling av förbättrad sprutteknik och kanske med nya cementmaterial skulle hållbarheten kunna förbättras i framtiden. En förhöjd täthet på tunneln skulle kunna ge samma resultat.

Vid LCC-simuleringarna kan långtidseffekten av förbättrad sprutbetongkvalitet illustreras genom att i ingångsparametrarna ändra kostnad och underhållsfrekvens för vägg- och taktyper med sprutbetongpåslag.

4.2.2 Bergbultar

KIMAB:s experiment med trådar av svartstål i bergborrhål med grundvatten men utan cementpasta visade på relativt höga korrosionshastigheter. Dock saknades alkalisk miljö i borrhålen. Detta bekräftar

iakttagelsen, att utsatta (och dåligt ingjutna) bultar kan behöva ersättas tämligen ofta, i svåra fall kanske vart 10:e år. Vanligen är det bultdelen närmast tunnelväggen som tar mest skada. Det skall nämnas, att enligt Trafikverkets regelverk bultar inte får monteras i vattenförande borrhål.

Användning av rostfria bultar antas kunna eliminera problemet.

Om bergbulten är väl ingjuten med cementpasta elimineras förutsättningarna för korrosion i stålet. Detta indikerar mycket låga underhållsfrekvenser, 25 år eller mer.

4.2.3 Cementinjekteringar

CTH/GU:s undersökningar av nedbrytning av cementbruk i bergsprickor visar klart att portlanditen är stabil vid normala förhållanden i berget. Slutsatsen blir, att förinjekteringar med cementbruk inte behöver underhållas. Om förinjekteringen inte gett avsett resultat, kan kompletterande efterinjektering behöva utföras. Sådana åtgärder får också lång varaktighet och behöver inte särskilt underhåll.

5 Användning av LCC-modellen i några jämförande kostnadsanalyser

5.1 Inledning

Den utvecklade LCC-modellen har beskrivits tidigare i avsnitt 2. En manual finns i Bilaga A, längst bak i rapporten. Modellen skall i detta avsnitt användas för några jämförande kostnadsanalyser. De jämförande kostnadsanalyserna utgår från befintliga tunnlar och deras fördelning av installerade förstärkningar/tätningar. Kostnader för underhållsarbeten på dessa system, liksom frekvensen på dessa arbeten, har hämtats från erfarenhetsvärden i branschen. Med dessa basdata som referens har körts olika scenarior för tänkta, kommande UH-insatser, mellan nutid (2012) och tills tunnelns livslängd är uppnådd.

Med kännedom om de nedlagda underhållskostnaderna sedan byggtiden skulle i princip modellen kunna köras "bakåt i tiden" och man skulle, åtminstone teoretiskt, på så vis kunna "kalibrera" den. Emellertid behöver man då veta fördelningen av kostnader som lagts ner på de olika förstärkningskategorierna. Sådan information visade sig vara svår att få fram. Det var med andra ord inte möjligt att göra en sådan kalibrering inom detta projektets ram.

5.2 Studerade tunnlar

Av de tunnlar som beskrivs i tabellen nedan studerades Lundbytunneln med LCC-analys. Kapitalisering gjordes till år 2012. Med hjälp av entreprenadindex kapitaliserades även den ursprungliga byggkostnaden till 2012 års SEK.

Tunnel	Bygg- år	Kostnad vid utför- ande MSEK	Tvär snitt B *H	Längd	Area tak + vägg 1000 m ²	Fri berg -yta % av area	Sprut -btg % av area	System -bult % av area	Drä- ner % av area	Inkläd -nad % av area	Injekte- ring % av area
Törn- skog	2008	600	13 *8	4100	100'	0	100	30	35	10	100
Södra Länken	2004	6000	14 *8	1700 0	400'	0	100	10	25	35	100
Lundby	1998	600	12 * 8	4120	115'	30	70	20	10	30	100
Gnist- äng	1978	28	20 * 10	712	2,85'	50	50	0	10	0	0

Tabell 1. Tunnlar som användes som bas för studier av LCC-variationer i förstärkningar och underhåll.

5.2 Kalkylkostnader

5.2.1 Inledning

I detta avsnitt anges de kostnader som ansatts i modellen för underhållsarbeten i en tunnel. Det är oerhört svårt att med någon precision ange sådana kostnader, efter som de beror på en mängd lokala förhållanden och på den marknadsmässiga situationen. Uppgifterna kan därför ses som exempel på kostnader, snarare än gällande marknadspriser.

Varje användare av modellen skall använda aktuella kostnadsuppgifter.

5.2.2 Inspektionsarbeten

Arbeten med inspektion av en tunnel är en viktig del av underhållet. Modellen förutsätter att inspektion sker vartannat, vart femte och vart tionde år, med följande antagna kostnad per m tunnel:

- Översiktlig 20 kr/m
- Noggrann 50 kr/m
- Detaljerad 100 kr/m

5.2.3 Arbeten på fria bergytter

Följande ungefärliga kostnader för arbetena antas gälla per ytenhet:

- Rengöring med högtryckstvätt 100 SEK/m²
- Bomknackning 75 SEK/m²
- Skrotning 150 SEK/m²
- Bergbult (ströbult 3 m) 3000 SEK/st

5.2.4 Arbeten på sprutbetongytter

Kostnaden för omsprutning, inklusive nedknackning av bom sprutbetong, har antagits till:

- Stålfiberarmerad sprutbetong (t = 50 mm) 1500 SEK/m²

5.2.5 Arbeten på bultsystem

Följande ungefärliga kostnader gäller för att sätta en bult på plats:

- Bergbult (L=3m, ingjuten utan förspänning) 3000 SEK/st
- Rostfri bergbult (L=3m, ingjuten utan förspänning) 4000 SEK/st

5.2.6 Arbeten på dränsystem

Antalet dräner per längdmeter tunnel har uppskattats efter erfarenheter från Grödingebanan (Boman, 2005) till ca 1 st per 10 m tunnel. Dräntätheten kan dock variera mycket beroende på förutsättningarna.

Följande ungefärliga kostnader används:

- *Vattenspolning (högtrycksspolning, per drän)* 3000 SEK/st
- *Isknackning (manuellt från sky-lift, per 8 tim.-skift)* 24000 SEK/st
- *Rivning och ersättning av drän (bilning, montering, sprutning)* 10000 SEK/m²

5.2.7 Inklädnader

Följande ungefärliga kostnader antas gälla för större arbeten (över 500 m²):

- *Betonglining, platsgjuten* 10000 SEK/m²
- *Betonglining, förtillverkade element* 8000 SEK/m²
- *Membran, typ Örsta⁸* 5000 SEK/m²
- *Membran, typ Rockdrain⁷* 3000 SEK/m²

5.2.8 Efterinjekteringar

Följande ungefärliga kostnad antas gälla:

- *Systematisk efterinjektering (hål c/c 2m, minst 30 st)* 2500 SEK/m²

5.3 Analysmetodik

Med hjälp av modellen beräknades LCC-tal för återstående UH-insatser i de studerade tunnlar i Tabell 1. Här var utgångspunkten det grundalternativ för förstärknings/tätningssystemen i tunneln, som beskrivs av Excel-bladet i Manualen i Bilaga A. Planerade driftår samt nuvärdet 2012 av byggkostnaden för de studerade tunnlar anges i resultattabellerna nedan

Grundalternativet ger nuvärdet (år 2012) av alla kommande underhållsinsatser i tunneln fram till livslängdens slut. Nuvärdet anges för varje förstärkningskategori i kolumnen längst till höger i Excel-bladet och summeras ihop längst ner i kolumnen. Denna summa, det totala nuvärdet, kallas här **LCC_{bas}**. Nya LCC-tal – som räknas fram efter förändringar i förstärkningssystemen – jämförs sedan med **LCC_{bas}** för att avgöra om förändringarna är ekonomisk motiverade. Genom att låsa alla parametrar utom en, kan förändringar i **LCC_{bas}** av just den åtgärden simuleras.

Varje tunnel i Tabell 1 ovan tilldelas ett eget analysblad i modellen. De fem flikarna, benämnda Alt. 1 – Alt. 5, har följande innehåll, se vidare i avsnitt 5.4:

⁸ Kommersiell produkt. För teknisk beskrivning hänvisas till tillverkaren.

Flik	Förstärkningsalternativ	LCC-värde
Alt. 1	Basalternativet	LCC_{bas}
Alt. 2	Förbättrad sprutbetong	
Alt. 3	Rostfria bultar	
Alt. 4	Membran ersätter dräner	
Alt. 5	Efterinjektering	

Tabell 2. Variationer i förstärkningssystemen som studerats i LCC-modellen.

Några exempel på vad som kan varieras i förstärkningar och underhåll ges nedan. Exempelen kan naturligtvis flerfaldigas:

- dåligt vidhäftande sprutbetong skrotas ner och ersätts med högkvalitativ och väl applicerad sprutbetong, vilket minskar UH-frekvensen från vart 5:e år till vart 25:e år
- rostande systembultning i våta bergpartier ersätts med rostfri bult, varefter UH-behovet i detta parti upphör
- dräner som måste spolats rena ofta byts ut mot inklädnad som ersätts vart 40:e eller 60:e år
- efterinjektering eliminerar fuktproblem. Detta skulle kunna tänkas höja livslängden och minska UH-frekvensen för utsatta partier av sprutbetong och bultar

Några LCC-analyser för att illustrera den ekonomiska effekten av några åtgärder för att förändra förstärkningssystemen beskrivs i detalj i en av tunnarna, Lundbytunneln, i det följande avsnittet 5.4. Liknande analyser har gjorts för de övriga tunnarna, och resultaten ges i korthet i avsnitt 5.5.

Som tidigare nämnts, är LCC_{bas} är det framräknade nuvärdet år 2012 av alla framtida UH-insatser i tunneln som utförs på det från början installerade förstärkningssystemet (i MSEK). Enheten för alla LCC-tal i studien är MSEK i 2012 års penningvärde.

5.4 LCC-analyser för Lundbytunneln

5.4.1 Underhållskostnader med baskonceptets förstärknings/tätningssystem (LCC_{bas})

Baskonceptet utgår från de fördelningar av förstärkningsåtgärderna i tunnarna som anges i Tabell 1. För Lundbytunnelns del innebär beräkningen (i fliken Alt. 1 på Excel-bladet) nedanstående värden på driftår, byggkostnad kapitaliserad till år 2012 samt LCC_{bas} .

TUNNEL	DRIFTÅR	BYGGKOSTNAD NUVÄRDE 2012	FRAMTIDA UH ACKUMULERAT NUVÄRDE 2012 = LCC_{bas}
Lundby	1998 - 2118	737	76

Tabell 3. Nuvärdet 2012 av byggkostnaden samt LCC-tal för återstående UH-insatser under livslängden för Lundbytunneln med baskonceptets förstärknings/tätningssystem.

5.4.2 UH-kostnader med förbättrad sprutbetong

I det tänkta fallet tas den dåliga sprutbetongen bort. Endast "bra" sprutbetong kommer att finnas och är installerad på 70 % av tunnelsträckan, se Tabell 1.

I baskonceptet finns 6% sträckor med medelbra sprutbetong och 3% med dålig sprutbetong, vilka nu ersätts med bra betong. Härefter kommer 5% av all sprutbetong att knackas ner och ersättas vart 25:e år.

I den första analysen antas den nya, förbättrade sprutbetongen fortfarande har samma pris som den tidigare, 1500 SEK/m². Den "dåliga" sprutbetongen, totalt 10000 m², ersätts omgående (år 2012) med "bra" sprutbetong till en kostnad av 15 MSEK. Denna kostnad betraktas som en utökad byggkostnad; denna ökar från 737 till 752 MSEK (nuvärde 2012).

Efter att ha ersatt den "dåliga" sprutbetongen får vi ett LCC-tal för framtida underhåll på 71, att jämföra med $LCC_{bas} = 76$ (inga förändringar). Resultatet av utbyte av dålig sprutbetong blir alltså ett billigare underhåll, sett över kvarvarande livslängd.

TUNNEL	DRIFTÅR	NY BYGG- KOSTNAD NUVÄRDE 2012 MSEK	LCC_{bas}	FÖRBÄTTRAD SPRUTBETONG 1500 SEK/m ² NYTT LCC	D:O 3000 SEK/m ² NYTT LCC
Lundby	1998 - 2118	752	76	71	75

Tabell 4. Nuvärdet 2012 av byggkostnaden samt LCC-tal för återstående

UH-insatser under livslängden för Lundbytunneln med utbyte av

"dålig" sprutbetong.

Om den nya sprutbetongen skulle kosta det dubbla, 3000 SEK/m², ökar LCC till 75 enheter och ett utbyte av sprutbetong blir då nätt och jämnt lönsamt.

LCC-analysen för Lundbytunneln visar alltså, att en successiv ersättning av dålig sprutbetong i tunneln är ekonomiskt motiverad endast om kostnaden per installerad m² av den bättre betongen inte mer än fördubblar dagens pris på 1500 SEK/m².

Om utbytet av dålig sprutbetong inte räknas som en byggkostnad utan ses som en underhållskostnad, blir åtgärden inte lönsam i ett livslängdsperspektiv, LCC-talet ökar från 76 (ingen åtgärd) till 86 respektive 90. I det fallet blir det billigare att fortsätta att underhålla den dåliga sprutbetongen.

5.4.3 UH-kostnader med rostfria bultar

I det tänkta fallet ersätts bultar i Lundbytunneln som har dålig ingjutning och korrosionsproblem. Rostfria bultar installeras i stället. De nya bultarna förväntas inte ge något underhållsbehov under den återstående livslängden av tunneln.

Tabell 5 nedan visar effekten på LCC i Lundbytunneln, som har totalt drygt 15000 systembultar, varav ca 400 stycken antas ha dålig ingjutning och korrosionsproblem. Den underhållsfria, rostfria bulten kostar 4000 SEK/st, mot 3000 SEK/st för vanlig bult i svartstål. Kostnaden, 3MSEK, läggs på byggkostnaden.

TUNNEL	DRIFTÅR	NY BYGG- KOSTNAD NUVÄRDE 2012	LCC _{bas}	UTBYTE TILL ROSTFRI BULT 4000 SEK/st	
				NYTT	LCC
Lundby	1998 - 2118	740	76	80	

Tabell 5. Nuvärdet 2012 av byggkostnaden samt LCC-tal för återstående UH-insatser under livslängden för Lundbytunneln med utbyte av korroderande bult till rostfri bult.

Åtgärden visar sig vara olönsam, LCC-talet stiger från 76 till 80. Det skall observeras, att den utförda analysen för Lundbytunneln förutsätter att relativt få bultar byts ut. I en annan tunnel med mycket blöta förhållanden och med avsevärda problem med bultkorrosion, kan det bli lönsamt med ett byte till rostfri bult. Lundbytunneln tillhör dock inte denna kategori.

5.4.4 UH-kostnader med dräner utbyta mot inklädnad

I detta tänkta fall för Lundbytunneln rivs dränera ner och ersätts med någon form av inklädnad, betonglining eller membran. Drygt 400 dräner byts ut på en tunnelarea av ca 2600 m². Om insatserna görs omgående (2012) blir minskningen i LCC-tal 55 (MSEK) genom bortfallet av underhåll på alla dessa dräner.

Om det blöta området med dräner ersätts med en betonglinier, kostar denna 10 000 SEK/ m², totalt 26 MSEK. Nytt LCC-tal blir då 76 – 55 + 26 = 47.

Kostnaden för ett membran är ca hälften så stor, 13 MSEK. I motsats till en betongliner som håller livslängden ut, måste membranet bytas efter 40 år. Detta utbyte måste ses som en underhållsåtgärd. LCC-talet, d.v.s. nuvärdet (2012) blir då $13 + 13/1,04^{40} = 17$. Nytt LCC-tal blir $76 - 55 + 17 = 38$.

Ett utbyte av dräner mot inklädnad blir alltså alltid lönsamt i Lundbytunneln, oavsett om arbetet ses som en underhållsåtgärd eller som en försenad byggkostnad (uppgradering). Det blir med andra ord billigare med någon form av inklädnad än att behålla och underhålla dränerna. Mest lönsamt är det att installera en tunnelduk över det blöta partiet.

En reservation måste göras här: om det ställs krav på inspekterbarhet, kan kostnaden för inklädnadssystemet bli så hög att det ändå blir billigare med dräner. Modellen tar inte hänsyn till svårigheter med och kostnader för inspekterbarhet av membran.

TUNNEL	DRIFTÅR	NY BYGG- KOSTNAD NUVÄRDE 2012	LCC_{bas}	UTBYTE AV DRÄNER TILL LINING 2012 NYTT LCC	UTBYTE AV DRÄNER TILL MEMBRAN 2012 NYTT LCC
Lundby	1998 - 2118	847 (liner) 805 (duk)	76	47 -	- 38

Tabell 6. Nuvärdet 2012 av byggkostnaden samt LCC-tal för återstående UH-insatser under livslängden för Lundbytunneln om dräner byts ut till inklädnad.

En betonginklädnad ger fördelen att den kan ingå i det bärande huvudsystemet för tunneln. Den ekonomiska fördelen av detta kan inte bedömas.

Det finns billigare alternativ av tunneldukar är vad som räknats med ovan, vilket kan göra ett utbyte av dränerna än mer lönsamt. Eliminering av isknackning i Lundbytunneln kan också göra installation av en tunnelduk mer lönsam än vad ovanstående analys visar.

5.4.5 UH-kostnader med lokal efterinjektering

Med en efterinjektering kan man uppnå, att vattenflödet till tunneln kan reduceras. Därmed skulle säkert nedbrytningsprocesserna och de blivande underhållskostnaderna minska. Hur stor en sådan ”inbesparing” kan bli, är naturligtvis mycket svårt att bedöma. Modellen kan dock kontrollera kriterierna för en lönsam efterinjektering. Detta görs med utgångspunkt från basfallet (inga förändringar), Alt. 1 i modellen .

Hela tak- och väggarean i Lundbytunneln är 115 000 m². Om 5% av denna area efterinjekteras redan nu (år 2012), kostar detta 15 MSEK. Eftersom **LCC_{bas}** är 76, blir efterinjekteringen lönsam endast om arbetena leder till, att ca en femtedel av de återstående underhållskostnaderna inbesparas under resten av livslängden. Om 2 % av arean efterinjekteras krävs 12 % inbesparing på underhållet för att åtgärden skall vara lönsam, se Tabell 7.

TUNNEL	DRIFTÅR	NY BYGG- KOSTNAD NUVÄRDE 2012 MSEK	LCC _{bas}	EFTERINJEKTERING 5 % av LÄNGDEN 11500 m ² KRAV PÅ LCC- MINSKNING	EFTERINJEKTERING 2 % av LÄNGDEN 4600 m ² KRAV PÅ LCC- MINSKNING
Lundby	1998 - 2118	752 (5% INJ) 743 (2% INJ)	76	-15 -	- -9

Tabell 7. Nuvärdet 2012 av byggkostnaden samt krav på minskning av LCC-tal för återstående UH-insatser under livslängden för Lundbytunneln med efterinjektering.

5.5 LCC-analyser för övriga studerade tunnlar

Övriga tunnlar, som redovisas i Tabell 1, har analyserats med LCC-modellen enligt samma principer som Lundbytunneln, dock med de olika förstärkningssystem som gäller för de individuella tunnarna enligt tabellen. Resultaten visas i Tabell 8 nedan.

Tunnel	Driftår	Byggkostnad 2012 MSEK	LCC Alt. 1 LCC _{bas} 1)	LCC Alt. 2 2)	LCC Alt3 3)	LCC Alt. 4 4)	LCC Alt 5 5)
Törnskogs	2008 - 2128	759	75	63 resp. 69	77	32 resp. 36	-9 resp. -15
Södra Länken	2004 - 2124	8211	287	245 resp. 260	290	110 resp. 118	
Lundby	1998 - 2118	737	76	71 resp.75	80	33 resp. 42	-9 resp. -15
Gnistängs	1978 - 2078	106	7	7 resp. 7	Inga sys- tembult	10 resp. 11	

Tabell 8. Förändringar av LCC vid variation av förstärkningssystemen i de studerade tunnarna.

Variationer: 1) Basalternativet 2) All "dålig" sprutbetong ersätts med "god" à 1500 resp. 3000 SEK/m² 3) Rostfri bult ersätter "dåligt ingjuten" bult 4) Dräner ersätts av membran resp. betongliner 5) Krav på minskat LCC vid efterinjektering av 2 % resp. 5 % av tunnellängden

5.6 Slutsatser

LCC-analyserna för de studerade tunnarna visar några exempel på vad modellen kan användas till. Variationerna är naturligtvis oändliga. Ofta diskuterade alternativ att söka förbilliga tunnelunderhållet kan med modellens hjälp kläs i ekonomiska siffror och klart lönsamma eller olönsamma alternativ kan identifieras.

För Lundbytunnelns del verkar en förbättring av kvaliteten på sprutbetongskyddet vara en lönsam åtgärd, men endast om utbyteskostnaden tas som en ”byggkostnad” och inte belastar underhållsbudgeten. Borttagning av dräner och installation av inklädnad över läckande partier verkar vara klart lönsam, även om installationskostnaden räknas in i underhållsbudgeten. Kostnader för eventuell inspekterbarhet är dock inte medtagna. Ersättning av rostande bultar med rostfri bult, liksom efterinjekteringsarbeten verkar ha tveksam ekonomi, sett över livslängden. För övriga tunnlar har ingen detaljanalys gjorts, endast en framtagning av LCC-talen i Tabell 8.

6 Jämförande analys av byggd tunnelkvalitet och framtida underhåll

De samlade kostnaderna för underhåll av en tunnel eller ett berggrum under livslängden är betydande. Genom att höja kvaliteten på tunnelns byggda utförande skulle dessa kostnader kunnat reduceras. Eftersom de flesta nedbrytningsprocesser som drabbar berget och förstärkningssystemet är relaterade till grundvatten, är en väl utförd förinjektering den viktigaste kvalitetshöjande åtgärden under byggtiden. Att försöka minska underhållet genom att täta tunneln i efterhand genom efterinjektering kräver, att resultatet ger en god tätningseffekt för att åtgärden skall vara ekonomiskt motiverad. Data som verifierar att detta kan vara fallet saknas eller är i vart fall oklara.

Andra viktiga kvalitetshöjande åtgärder, som kan minska underhållsbehovet, är försiktig sprängning, som kan leda till att bergets förmåga att under livslängden bibehåller sin förmåga att vara bärande huvudsystem för berganläggningen. Andra åtgärder är väl kontrollerad betongsprutning och god bultingjutning.

Ett återkommande problem i tunnlar är dränsystemen för bortledning av inrinnande grundvatten i tak och väggar. Dessa system drabbas lätt av igensättning och kräver frekvent underhåll och reovering, vilket leder till mycket höga underhållskostnader. Bildande av istappar vintertid är ett annat underhållskrävande problem.

Genom att ersätta dränsystemen med någon form av tät inklädnad (betongliner eller tunnelduk) kan vattenflödet kontrolleras och underhållet begränsas. Om sådana system installeras under byggtiden, blir tunnelunderhållet betydligt mindre än i tunnlar med dränsystem.

Rivning och nyinstallation av dräner under driftstiden är en mycket dyr underhållsåtgärd. Ett utbyte till inklädnad under driftstiden är också mycket kostsamt och kan endast motiveras ekonomiskt som en underhållsåtgärd vid en noggrann LCC-analys. Den presenterade modellen ger denna kontrollmöjlighet.

En viktig fråga gäller vad som kan anses vara "fel" i tunnelns konstruktion och vad som handlar om normal nedslitning av densamma. I det första fallet kan man hävda, att kostnader för nödvändiga reparationer inte bör belasta en underhållsbudget utan bör ses som en "utökad byggkostnad". I det andra fallet skall kostnaderna för underhållet självklart bli en del av livscykelanalysen och värderas som ett av andra alternativ. Valet mellan dräner och inklädnad är en sådan fråga.

7 Slutsatser och rekommendationer

- Underhållsfrågorna för tunnlar och bergrum är svåra att överblicka och prioriteras inte alltid som de borde av ägarorganisationerna.
- Med LCC- metoden kan man få ett jämförande mått på vilket underhållsalternativ som är fördelaktigast över livstiden. Beräkningarna är enkla och snabba att utföra och resultaten blir överskådliga.
- För en specifik tunnel kan ingångsparametrarna vanligen preciseras så bra, att modellen ger svar som är fullt användbara vid underhållsplaneringen.
- Det största och mest frekventa underhållsarbetet i en bergtunnel görs på sprutbetong och dränsystem, medan bultar och injekteringar är mindre resurskrävande.
- En speciell metod för sprutbetong mot vått berg bör utvecklas.
- Robustare och mindre underhållskrävande dränsystem behöver också utvecklas.
- Montering av en tunnelduk eller en tät betongliner är relativt kostsam, men kan i ett livslängdsperspektiv visa sig bli betydligt billigare än att regelmässigt underhålla dräner.
- Utebliven inspekterbarhet för inklädnader kan vara problematisk, eftersom undantag från stipulerade krav måste göras.
- Skall kostnaden för de åtgärder som krävs för inspekterbarhet av en inklädnad belasta underhållsbudgeten för en tunnel eller skall den ses som en ren byggkostnad?
- De beskrivna "testkörningarna" av modellen på fyra svenska vägtunnlar, Södra Länken, Törnskogstunneln, Gnistängstunneln och Lundbytunneln bör fortsätta med verifierade underhållskostnader och -frekvenser.
- Genom att räkna "baklänges" till driftstart kan modellen förhoppningsvis "kalibreras" på detta sätt.

Slutligen: LCC-modellen som framtagits inom projektet är en ren "räknemaskin" och har ingen förmåga att dra slutsatser eller "tänka själv". Däremot är den fullständigt flexibel när det gäller ingångsdata. Det är alltså upp till användaren att beskriva alla ingångsdata – i huvudsak kostnader och frekvenser för

underhållsinsatser - så riktigt som möjligt. De framräknade LCC-talen blir aldrig bättre än dessa data. Men med bra ingångsdata ger modellen å andra sidan alltid adekvata svar.

Referenser

Abbas, Z, Mossmark, F & Funehag, J, 2012. *Durability studies of natural cement grouted fractures - Chemical analyses and modelling of the solubility of cement minerals from two tunnels in Gothenburg*. Chalmers University of Technology. In progress June 2012.

Almfeldt, S, 2010, *Modelling life time costs of maintenance in hard rock tunnels*. Master of Science Thesis in the Master's programme Geo and Water Engineering, Chalmers University of Technology, Gotehenburg 2010.

Boman, R, EXJOB

Lagerblad, B & Trägårdh, J, 1992, *Alkalisilikareaktioner i svensk betong*. CBI-rapport 4:92, Stockholm 1992.

Lagerblad, B & Utkin, P, 1993, *Silica granulates in concrete-dispersion and durability aspects*, 44 pp, CBI report 3:93, Stockholm 1993.

Lagerblad, B, & Utkin, P, 1995, *Undispersed Granulated Silica Fume in Concrete-Chemical System and Durability Problems*. In *Microstructure of Cement-Based Systems/Bonding and Interfaces in Cementitious Materials*. Materials Research Society (MRS), volume 370, 1995.

Lagerblad, B., & Trägårdh, J., 1995, *Ballast för Betong - egenskaper, karaktärisering, beständighet och provningsmetoder*. CBI-rapport 4:95, Stockholm 1995.

Lagerblad, B, Jacobsson, B., 1997, *Smectite clays and concrete durability*, Proceedings of the 19th International conference on cement microscopy, Cincinnati, Ohio USA, pp151-163, 1997.

Lagerblad, B, 1999, *Long term test of concrete resistance against sulphate attack*. In *Materials Science of concrete (special volume)*, published by The American Ceramic Society, Westerville OH, USA, 1999.

Lagerblad, B, Kjellsen, K-O, 1999, *Normal and high strength concrete*. In *Engineering and transport properties of the interfacial transition zone in cementitious composites*. (Ed Alexander et al), Rilem report 20, Rilem publications S.A.R.L, 1999.

Lagerblad, B, 2000, *Kemiska angrepp (Chemical Attack)*. *Betonghandbok-högpresterande betong*, kap. 15, Svensk Byggtjänst, Stockholm, 2000.

Lagerblad, B, 2001, *Leaching performance of concrete based on samples from old concrete constructions*, SKB TR-01-27, Report series of Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO, 2001

Lagerblad, B, 2003, *Leaching performance of Concrete based on Studies of Old Submerged Concrete*. Sixth CanMet/ACI International conference on durability of Concrete, Thessaloniki, Greece 2003. Supplementary papers , pp 195-211.

Lagerblad, B, 2005, *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle-State of the art*. CBI report 2:2005, Stockholm 2005.

Lagerblad, B, 2007, *Mechanism and mode of carbonation of cementitious materials*. International Conference on Sustainability in the Cement and Concrete Industry, Proceedings (Ed; Jacobsen, S., Jahren, P., Kjellsen, K.). Lillehammer, Norway, September 16-19, 2007. pp 178-193.

Lagerblad B., Holmgren, J., Fjällberg, L., Vogt, C., *Hydratation och krympning hos sprutbetong*. SveBeFo Rapport K24, Stockholm 2006.

Lagerblad, B., Fjällberg, L., Vogt, C., *Shrinkage and durability of shotcrete*. Proceedings of the third international conference on engineering developments in shotcrete, Queenstown, New Zealand, Mars 2010. (Also in Shotcrete Elements of a System, Ed Bernard, S., CRC PressTaylor & Francis group. 2010).

Lindblom, U (redaktör), 2005, *Underhåll av berganläggningar, Etapp I*. Slutrapport SBUF Utvecklingsprojekt 11220. FoU Väst Göteborg.

Lindblom, U (redaktör), 2009, *Underhåll av berganläggningar, Etapp II*. Slutrapport SBUF Utvecklingsprojekt 11884. FoU Väst Göteborg, mars 2009.

Trafikverket, 2011, *Trafikverket konstruktionsanvisningar TRVK 11*, Borlänge 2011.BILAGOR