

BeFo



STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING  
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

# UNDERHÅLLSKOSTNADER FÖR BERGTUNNLAR I ETT LIVSLÄNGDSPERSPEKTIV

Ulf Lindblom

# **UNDERHÅLLSKOSTNADER FÖR BERGTUNNLAR I ETT LIVSLÄNGDSPERSPEKTIV**

Rock tunnels – maintenance costs in a life-time  
perspective

Ulf Lindblom, Gecon

**BeFo Rapport 120**

Stockholm 2012

ISSN 1104 – 1773

ISRN BEFO-R—120—SE



## 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, Göteborgs Universitet). 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. Projektledare och huvudförfattare har varit Ulf Lindblom.

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 Engineering, Kent Lundin/TeliaSonera, Thomas Sträng/SL, Per Tengborg/BeFo, Kjell Windelhed/ÅF-Infrastructure, tidigare Trafikverket samt Pär Åhman/Sveriges Byggindustrier, FoU Väst. I tidigare etapper har Helen Andersson/deNeef Norge, Björn Albino/Tyréns och Mikael Hellsten/BeFo deltagit.

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

Stockholm i december 2012

Per Tengborg

## Sammanfattning

Underhållsfrågorna för tunnlar och berggrum 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 platspecifik 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 stelnade 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 cemeningjutningen 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 tunnlarerna 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.

Nyckelord: Bergtunnlar, berggrum, underhåll, kostnader, livscykel.

## Summary

The issue of maintenance of rock caverns and tunnels is difficult to address and appears to have a fairly low status among rock engineers and facility owners. Despite this, the present value cost for all forthcoming maintenance operations in the tunnel may be readily calculated by using modern IT facilities such as Excel. This present value cost number, commonly called the LCC number (standing for Life Cycle Costing) can be used to compare maintenance alternatives and to select the most favorable procedures in a life-time perspective. Planning based on LCC principles is however totally dependent on the quality of data inserted in the model. The most crucial of this data is, apart from the installation cost of rock support and water control measures, the cost of each maintenance operation and the frequency of the operation on site.

This project has focused on providing in-data to the LCC model by experiments and collection of experience on aging processes in rock support and water control systems in rock tunnels. By the end of the project, the model was run with established data to give some examples of its capacity for maintenance planning. It must be pointed out, however, that much of the data is still generic. When applied in a real maintenance case with well known costs and time intervals, the model will always provide reliable answers for cost optimization.

The experimental work in the project included work on aging of shotcrete and cement grouting. Both processes were found to be dependent on cross-flow of groundwater which can cause leaching of the portlandite in the materials. In the case of shotcrete, the relatively high maintenance demand appears to be high porosity caused by overdoses of accelerators during installation. This gives way for leaching. Cement groutings, on the other hand, were found to be generally stable over time due to the high alkalinity in the surrounding groundwater (pH>12).

The project also made experiments on the corrosion process of rock bolts of steel installed in drill holes in rock. Well grouted bolts were found to be very sustainable, whereas poorly grouted bolts have to be exchanged frequently.

For most tunnels used for transmission of traffic, the functional demands on water tightness are high. The project therefore studied drain systems and liners for water control in tunnels. Such installations stand for a considerable portion of the maintenance need of a tunnel. Stop of operation of a road or a rail tunnel due to works on hanged-in plastic lining system may become devastating. Therefore, more robust solutions like concrete liners were found to be favorable in a life-time perspective.

Inspection of a tunnel, made in order to judge the need for remedial actions, is also a part of the maintenance “package” and must be cost calculated and included in the LCC model.

The report is concluded with “test runs” on four well known Swedish road tunnels. Each tunnel was provided with spreadsheets based on four maintenance alternatives. The first of these is a “base” alternative describing how the tunnels is presently equipped and maintained. The three other alternatives represent variations of the present system: exchange of the present shotcrete with a more sustainable material, exchange of corroding rock bolts with stainless bolts and replacement of rock

drains with a tunnel liner. The LCC numbers of these alternatives were compared to check if the changes could be defended in a life-time perspective.



## Innehåll

Förord.....	i
Sammanfattning.....	ii
Summary .....	iv
1 Bakgrund .....	1
2 LCC-modellen – uppbyggnad, funktionssätt och begränsningar.....	2
2.1 Nuvärdesmetoden.....	2
2.2 Modellens möjligheter och begränsningar.....	3
2.3 Viktiga ingångsparametrar .....	3
3 Processer för nedbrytning av förstärkningar i bergtunnlar.....	4
3.1 Gjuten betong <sup>1</sup> .....	4
3.1.1 Allmänt .....	4
3.1.2 Karbonatisering .....	4
3.1.3 Frostangrepp .....	4
3.2 Sprutbetong <sup>1</sup> .....	5
3.2.1 Allmänt .....	5
3.2.3 Speciella egenskaper hos sprutbetong.....	7
3.2.4 Undersökningar i Etapp II .....	8
3.2.5 Undersökningar i denna etapp.....	9
3.2.6 Slutsats: Underhållsbehov av sprutbetong .....	12
3.3 Cementinjektering.....	13
3.3.1 Nedbrytning och omvandling av injekteringsbruk i bergsprickor .....	13
3.3.2 Huvudresultat från tidigare projektetapp .....	13
3.3.3 Undersökningar i Etapp III .....	14
3.3.4 Slutsats: beständighet och underhållsbehov av cementinjekteringar .....	19
3.4 Stål.....	20
3.4.1 Bakgrund.....	20
3.4.2 Fältundersökningarnas utförande.....	20

3.4.3	Resultat av labundersökningar .....	20
3.4.4	Diskussion .....	21
3.4.5	Stålkomponenters nedbrytning och omvandling i tunnelmiljö.....	22
3.4.6	Slutsats: Beständighet och underhållsbehov av bergbultar.....	22
3.5	Dräner och inklädnader <sup>6</sup> .....	22
3.5.1	Funktionskrav för tunnel .....	22
3.5.2	Dräner.....	24
3.5.3	Membraninklädnad .....	29
3.5.4	Vikten av inspekterbarhet – fallet Gravesforstunnlarna .....	34
3.5.5	Sammanfattning .....	35
4	Priser på arbeten samt underhållsfrekvenser i LCC-modellen .....	35
4.1	Underhållsarbeten.....	35
4.1.1	Inledning.....	35
4.1.2	Besiktningar .....	36
4.1.3	Fria bergytter .....	36
4.1.4	Sprutbetongytter .....	37
4.1.5	Gjuten betong.....	37
4.1.6	Bergbultar och bärande stålkomponenter.....	37
4.1.7	Dräner.....	38
4.1.8	Tak- och vägginklädnader.....	38
4.1.9	Cementinjekteringar.....	39
4.2	Experimentellt framtagna underhållsfrekvenser .....	39
4.2.1	Sprutbetong.....	39
4.2.2	Bergbultar.....	39
4.2.3	Cementinjekteringar.....	39
5	Användning av LCC-modellen i några jämförande kostnadsanalyser .....	40
5.1	Inledning.....	40
5.2	Studerade tunnlar .....	40
5.2	Kalkylkostnader .....	41
5.2.1	Inledning.....	41
5.2.2	Inspektionsarbeten.....	41

5.2.3 Arbeten på fria bergytor.....	41
5.2.4 Arbeten på sprutbetongytor .....	41
5.2.5 Arbeten på bultsystem .....	41
5.2.6 Arbeten på dränsystem .....	41
5.2.7 Inklädnader.....	42
5.2.8 Efterinjekteringar .....	42
5.3 Analysmetodik.....	42
5.4 LCC-analyser för Lundbytunneln .....	43
5.4.1 Underhållskostnader med baskonceptets förstärknings/tätningssystem ( $LCC_{bas}$ ).....	43
5.4.2 UH-kostnader med förbättrad sprutbetong.....	44
5.4.3 UH-kostnader med rostfria bultar.....	45
5.4.4 UH-kostnader med dräner utbytta mot inklädnad .....	45
5.4.5 UH-kostnader med lokal efterinjektering.....	46
5.5 LCC-analyser för övriga studerade tunnlar.....	46
5.6 Slutsatser .....	47
6 Jämförande analys av byggd tunnelkvalitet och framtida underhåll .....	48
7 Slutsatser och rekommendationer .....	48
Referenser .....	49
Bilagor.....	52-88

## 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 nivån 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 trafik tunnlar. 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 huvudavsikt 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 alternativ 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 funktionsätt 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 projekttiden 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 Gjuten betong<sup>1</sup>

#### 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 bergtrum 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 Sprutbetong<sup>1</sup>

### 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 cementshydratationen, men som momentant får cementpastan och betongen att tillstyvna. Olika typer av tillstyvnadsacceleratorer finns beskrivna i Lagerblad et al (2006).

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.

---

<sup>1</sup> Avsnitt 3.1 och 3.2 är författade av professor Björn Lagerblad, CBI



### ***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 förekommer. 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 kan medföra 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 tunnelarna 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 tunnlarna.

#### *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 en 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 SEM<sup>2</sup> 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.

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.

---

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscopy

### **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 odipergerade 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 tillstyvnadsacceleratoren 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 kristall<sup>3</sup>. 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 hydratation, 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.

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 tillstyvnadsacceleratorn ger ett förhöjt aluminatinnehåll. Den alkalifria tillstyvnadsacceleratorn är inte farlig då den från början innehåller sulfater och därför redan under tillstyvnadsprocessen har förbrukat aluminatet. Vattenglas innehåller ingen aluminat.

---

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

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 stelad<sup>4</sup>.

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 betongpåslagets 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.

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.

---

<sup>4</sup>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.

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 berggrum. 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 Ca<sup>2+</sup>-joner.
- Effekten av joner som Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> och Cl<sup>-</sup> på portlanditens lösligheten 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 III<sup>5</sup>

#### *Allmänt*

Kvaliteten på injekteringens utförande har främst följder 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 tunnlarnas 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 klargöras. 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 förutsägelseerna om brukets beständighet. Det är dock svårt att finna lämpliga platser där en provtagning kan lyckas.

<sup>5</sup> 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.

### *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.

### *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.

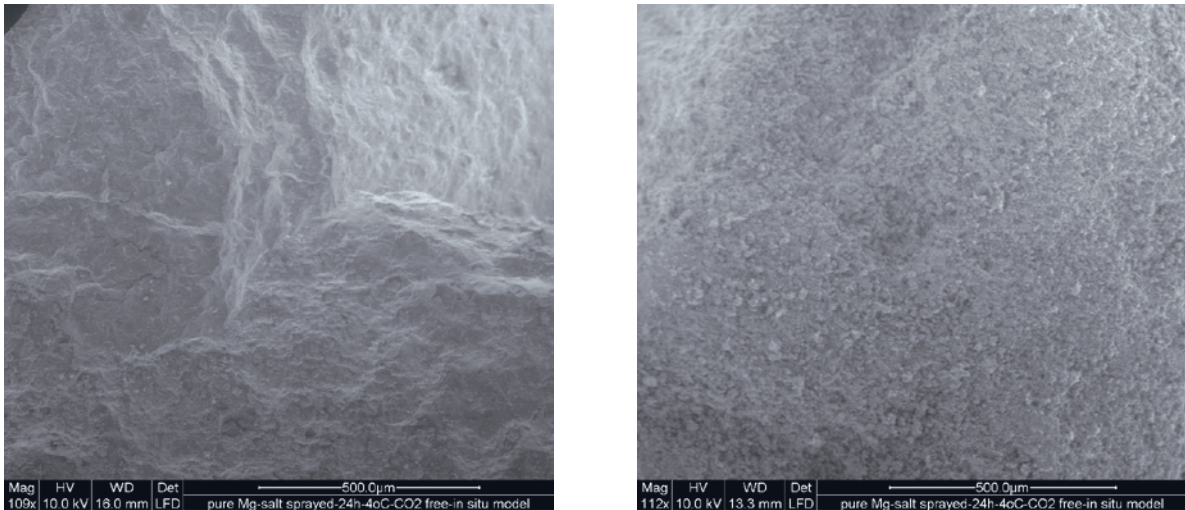
Klorid- och magnesiumkoncentrationerna var lägre i Lundbytunneln än i Teliatunneln. I Lundbytunneln är kvoten Na/Cl hög i kombination med höga alkalinitetsvärden och låga kalciumkoncentrationer. Detta indikerar en pågående process med gradvis ökande andel sött grundvatten i en akvefär tidigare dominerad 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.

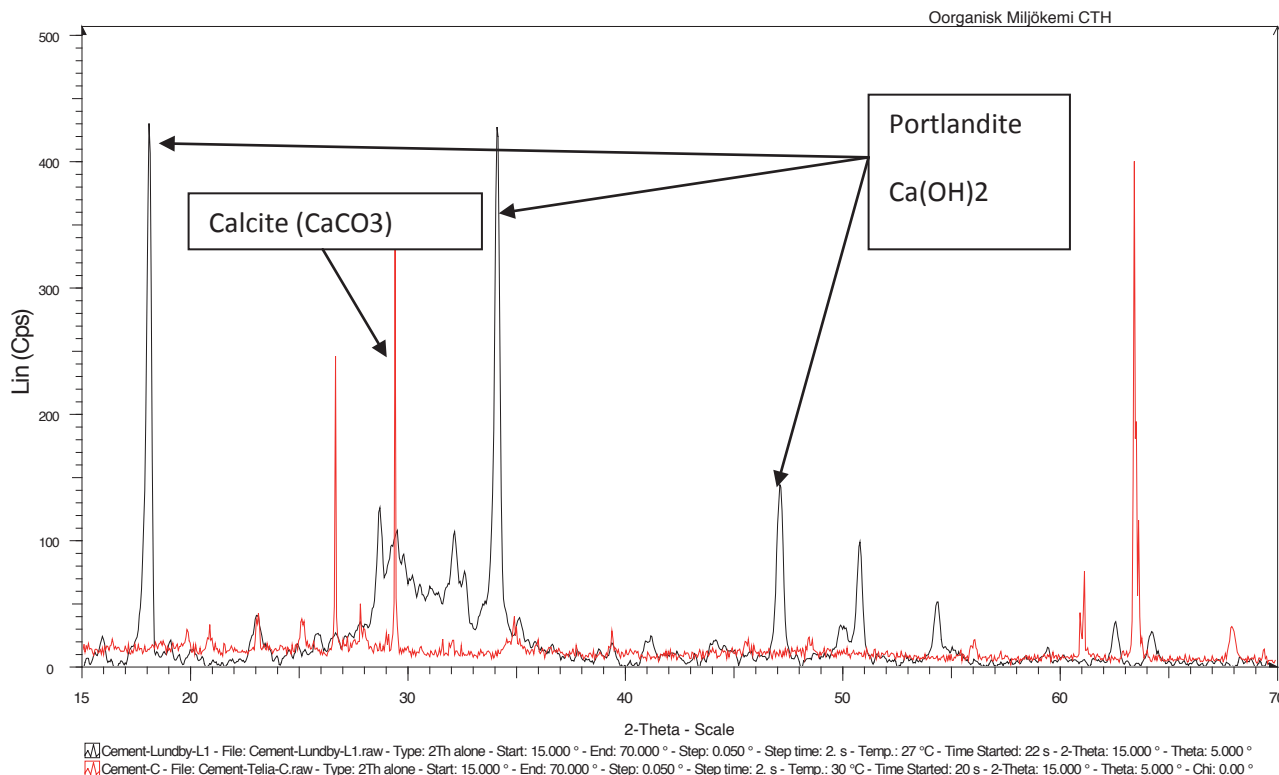
Proverna tagna från de två platserna uppvisar sammantaget på två olika kvaliteter på cementet, en sämre med hög porositet och utan portlandit och en intakt där portlandit kunde urskiljas.

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 (röntgendiffraction) 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 Lndbytunneln 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)<sub>2</sub>] helt saknas i matrisen. Närvaro av nya inslag av CaCO<sub>3</sub> indikerar utlakning av kalciumjoner samt pågående reaktion med CO<sub>2</sub>.

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<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SiO<sub>2</sub> (i vattenfas) och CaCO<sub>3</sub> (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 ovanstående uttryck är från vattenanalyserna för Telia- och Lundbytunnlarna.

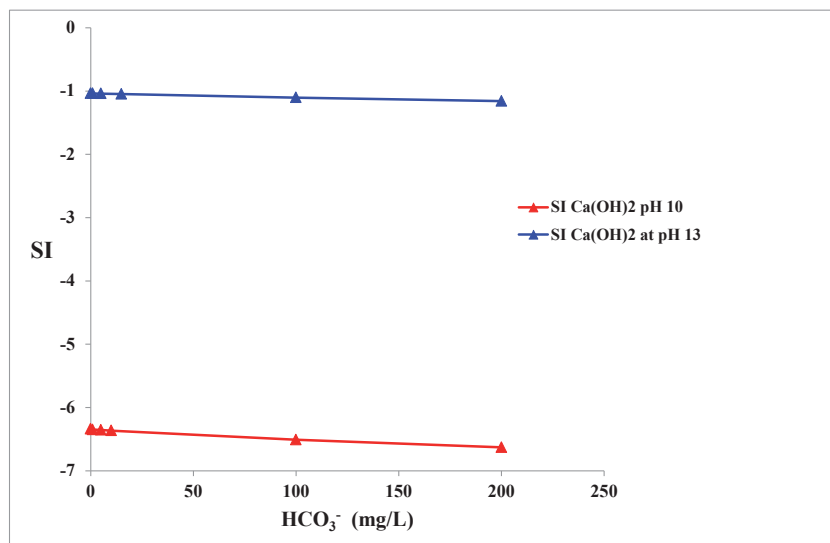
De kemiska analyserna av cement från tunnlar visar, att de mer åldrade proverna har en dominerande fas av kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ). Denna kommer från  $\text{Ca}^{2+}$  när kalciumhydroxiden ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) löses upp och reagerar med den diffunderade koldioxiden i luften.

När koldioxiden löses upp i vatten infinner sig en jämvikt mellan vätejoner ( $\text{H}^+$ ) och vätekarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) och pH kan minska. Vätekarbonaten kommer i en ytterligare jämvikt mellan vätejoner och karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). 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 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 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 ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

Lösligheten för kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) 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 försämrade 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 gummiexpandrarerna 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 borrhål 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 <sup>-</sup> , ppm	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , ppm	Syrakap, mol/m <sup>3</sup>	Ca <sup>2+</sup> , 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 vattnets kemiska sammansättning räknades teoretiska korrosionshastigheter fram. DIN 50 929 är ett exempel på en sådan norm som tillämpas för bedömning av vattenledningsvattens 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 Brudaremassen 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 inklädnader<sup>6</sup>

### 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 tunnlarna 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 fryscykler.

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.

<sup>6</sup> Avsnittet författat av Tekn. Dr Lars-Olof Dahlström

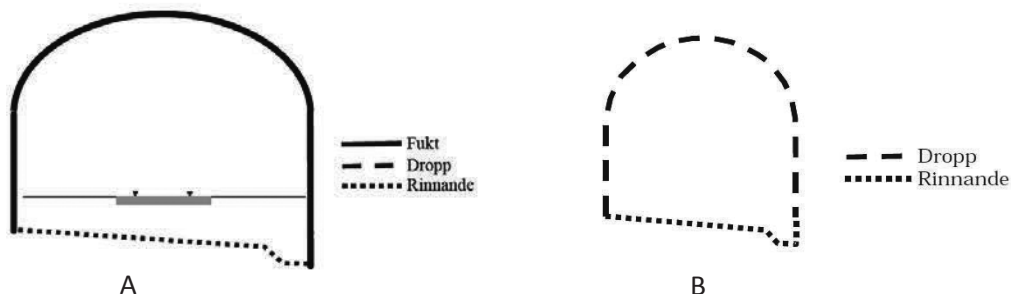
Det varierande klimatet (fryscykler) accelererar nedbrytningen och eftersom isen dessutom utgör en säkerhetsrisk, är underhållsbehovet av dräner betydligt större.

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.



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	$\geq 1$	$\geq 0,05 \cdot 10^{-3}$
	$\leq 150$	$\leq 7,5 \cdot 10^{-3}$
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.

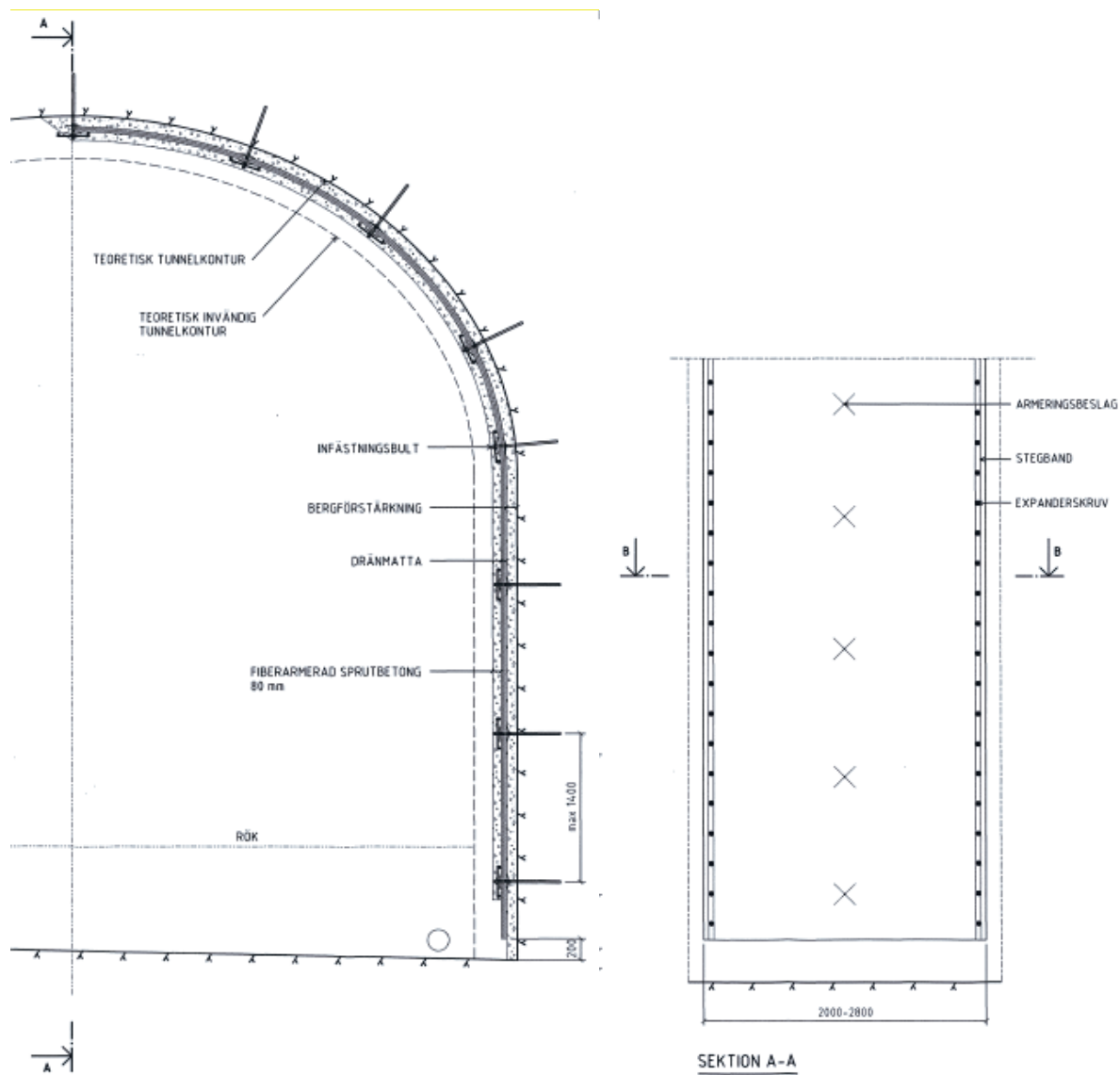
### 3.5.2 Dräner

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.

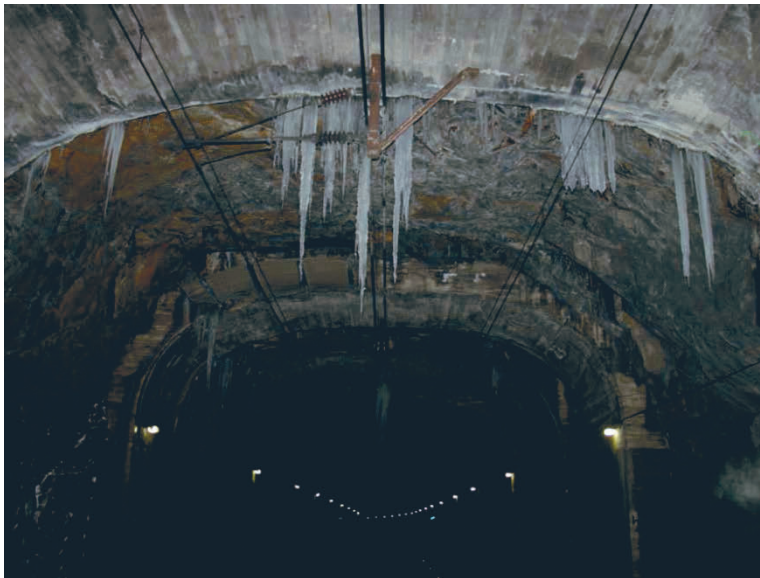
Miljörelaterade orsaker av kemisk- eller bakteriella processer och typisk fysikalisk orsak är isbildning som inte bara blockerar vattnet utan mekaniskt bryter sönder dem.

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 blockeras 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)*

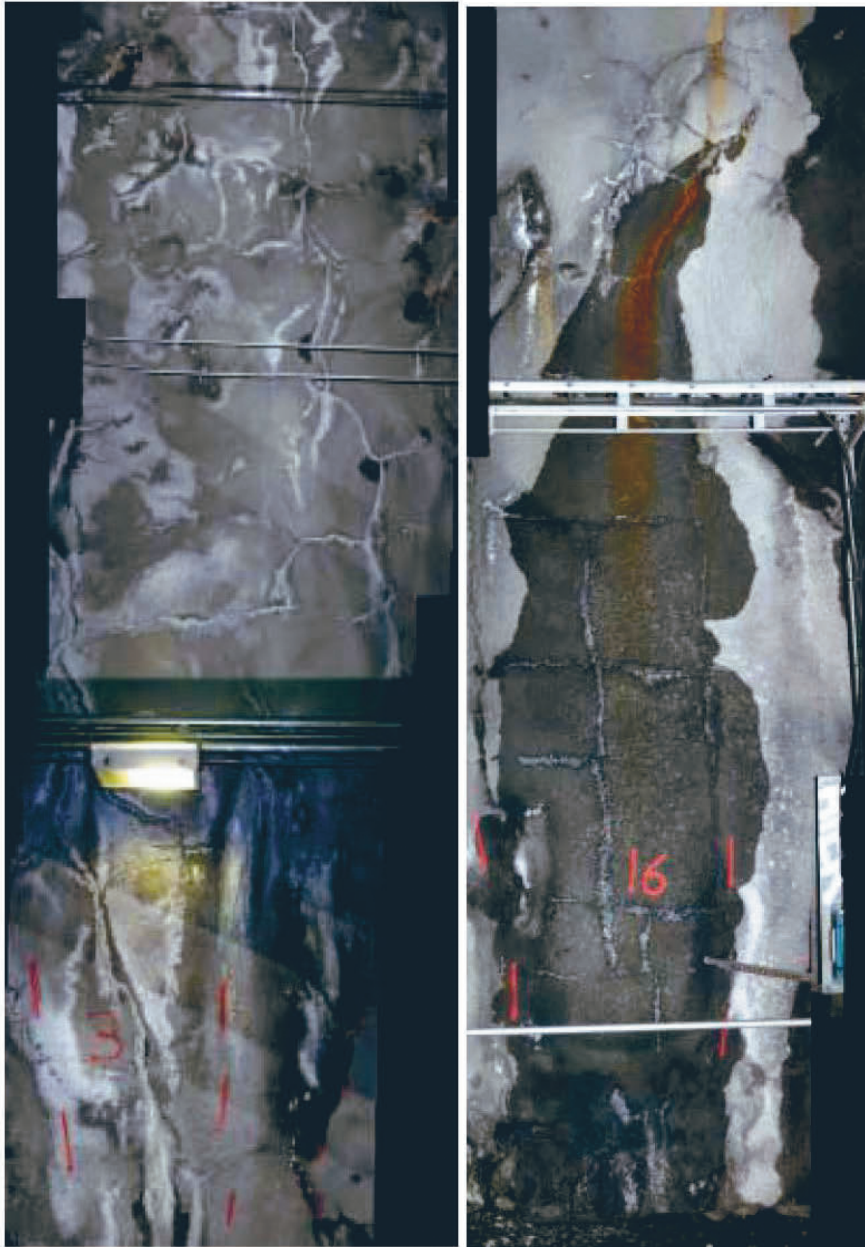


Figur 8. Läckage vid sidan av drän, isen belastar handledare som brutits sönder. (Foto: A. Andréén).

### **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.



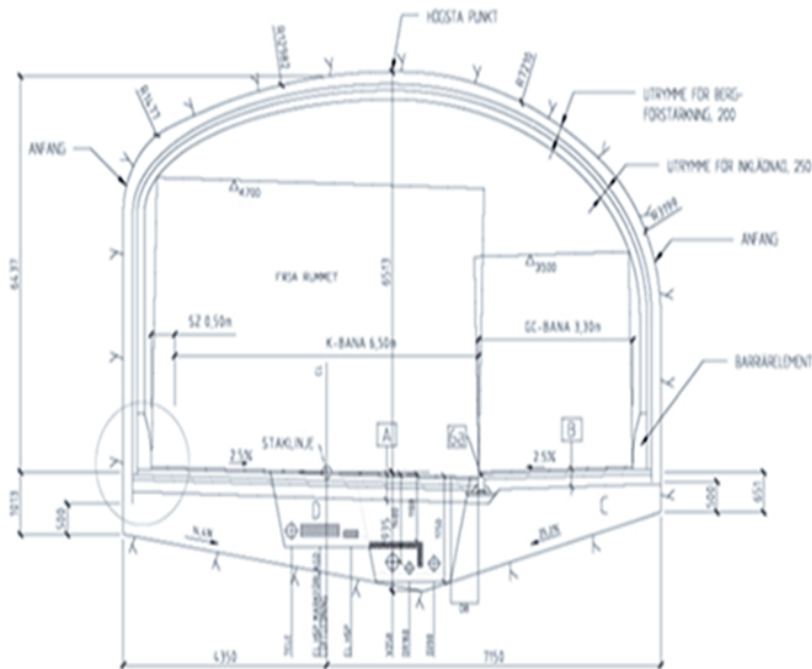
*Figur 9. Exempel på nedsatt funktion och nedbrytning av dräner i två sektioner på Grödingebanan. (Foto: R. Boman).*

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 Betonginklädning, "Lining"**

Skandinavien anses ibland vara mindre konservativt när det gäller tunnlar och tunneldesign än andra länder. Utomlands är det mycket ovanligt att i stora trafik-tunnlar basera det bärande huvudsystemet endast på berget, sprutbetong och bult. I stället baseras förstärkningen först på en temporär förstärkning av exempelvis bultar, stålågar 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 platsgjutne 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 bergväggen<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Takinklädnaden och rasmaterial 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 trafiktunnel 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 bokstavligen. 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 bergytter

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 skrotningensarbeten. 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 gjutas 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 miljölaster 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 bergytter 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 takytter 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 <sup>2</sup>	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-varianter 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 bergytor

Följande ungefärliga kostnader för arbetena antas gälla per ytenhet:

- Rengöring med högtryckstvätt 100 SEK/m<sup>2</sup>
- Bomknackning 75 SEK/m<sup>2</sup>
- Skrotning 150 SEK/m<sup>2</sup>
- Bergbult (ströbult 3 m) 3000 SEK/st

### 5.2.4 Arbeten på sprutbetongytor

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

- Stålfiberarmerad sprutbetong ( $t = 50 \text{ mm}$ ) 1500 SEK/m<sup>2</sup>

### 5.2.5 Arbeten på bultsystem

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

- Bergbult ( $L=3\text{m}$ , ingjuten utan förspänning) 3000 SEK/st
- Rostfri bergbult ( $L=3\text{m}$ , 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/m<sup>2</sup>

### 5.2.7 Inklädnader

Följande ungefärliga kostnader antas gälla för större arbeten (över 500 m<sup>2</sup>):

- *Betonglining, platsgjuten* 10000 SEK/m<sup>2</sup>
- *Betonglining, förtillverkade element* 8000 SEK/m<sup>2</sup>
- *Membran, typ Örsta<sup>1</sup>* 5000 SEK/m<sup>2</sup>
- *Membran, typ Rockdrain<sup>8</sup>* 3000 SEK/m<sup>2</sup>

### 5.2.8 Efterinjekteringar

Följande ungefärliga kostnad antas gälla:

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

## 5.3 Analysmetodik

Med hjälp av modellen beräknades LCC-tal för återstående UH-insatser i de studerade tunnlarna 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 tunnlarna 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<sub>bas</sub>**. Nya LCC-tal – som räknas fram efter förändringar i förstärkningssystemen – jämförs sedan med **LCC<sub>bas</sub>** för att avgöra om förändringarna är ekonomisk motiverade. Genom att låsa alla parametrar utom en, kan förändringar i **LCC<sub>bas</sub>** 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:

<sup>8</sup> 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 spolas 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 tunnelarna, Lundbytunneln, i det följande avsnittet 5.4. Liknande analyser har gjorts för de övriga tunnelarna, 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 tunnelarna 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 ha samma pris som den tidigare, 1500 SEK/m<sup>2</sup>. Den "dåliga" sprutbetongen, totalt 10000 m<sup>2</sup>, 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 <sup>2</sup>  NYTT LCC	D:O 3000 SEK/m <sup>2</sup>  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/m<sup>2</sup>, 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 m<sup>2</sup> av den bättre betongen inte mer än fördubblar dagens pris på 1500 SEK/m<sup>2</sup>.

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	LCC <sub>bas</sub>	UTBYTE TILL ROSTFRI BULT
		NUVÄRDE 2012		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 m<sup>2</sup>. 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 betongliner, kostar denna 10 000 SEK/ m<sup>2</sup>, 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 dränera. 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 dränera än mer lönsam. 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 underhållkostnaderna 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 m<sup>2</sup>. 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 <u>11500 m<sup>2</sup></u> KRAV PÅ LCC- MINSKNING	EFTERINJEKTERING 2 % av LÄNGDEN <u>4600 m<sup>2</sup></u> 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	Byggekostnad 2012 MSEK	LCC Alt. 1 <b>LCC<sub>bas</sub></b> 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 tunnelarna.

Variationer: 1) Basalternativet 2) All "dålig" sprutbetong ersätts med "god" à 1500 resp. 3000 SEK/m<sup>2</sup> 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 tunnelarna 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 "byggekostnad" 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 bergrum 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 renovering, 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, EXJOBB

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 19<sup>th</sup> 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

## **BILAGOR**

### **Bilaga A: LCC-modellen och manual för användning<sup>1</sup>**

### **Bilaga B: Fotobilaga CBI**

### **Bilaga C: Korrosionsdata KIMAB**

### **Bilaga D: Kemirapport GU**

### **Bilaga A: LCC-modellen och manual för användning<sup>2</sup>**

#### **A1. Allmänt**

Den här modellen beräknar livscykelkostnaden för en teoretisk tunnel med avseende på underhållskostnaden för de ingående bergförstärkningarna.

Modellen tar hänsyn till ett flertal olika typer av bergförstärkingar/underhållsåtgärder, tunnelns dimensioner, livslängd och kalkylerad ränta. Resultatet av analysen åskådliggörs med hjälp av diagram som visar dels de ingående delarnas bidrag till totalkostnaden dels totalkostnadens utveckling över tiden. Även kvarvarande underhållskostnad redovisas.

Modellen kan användas för att jämföra olika förstärkningsalternativ och är ett stöd vid val av förstärkningsåtgärd om den totala livskostnaden för tunnelns underhåll är ett kriterium för valet.

---

<sup>1</sup> Avsnittet författat av Sebastian Almfeldt

<sup>2</sup> Avsnittet författat av Sebastian Almfeldt

## A2. Beskrivning av modellens beståndsdelar

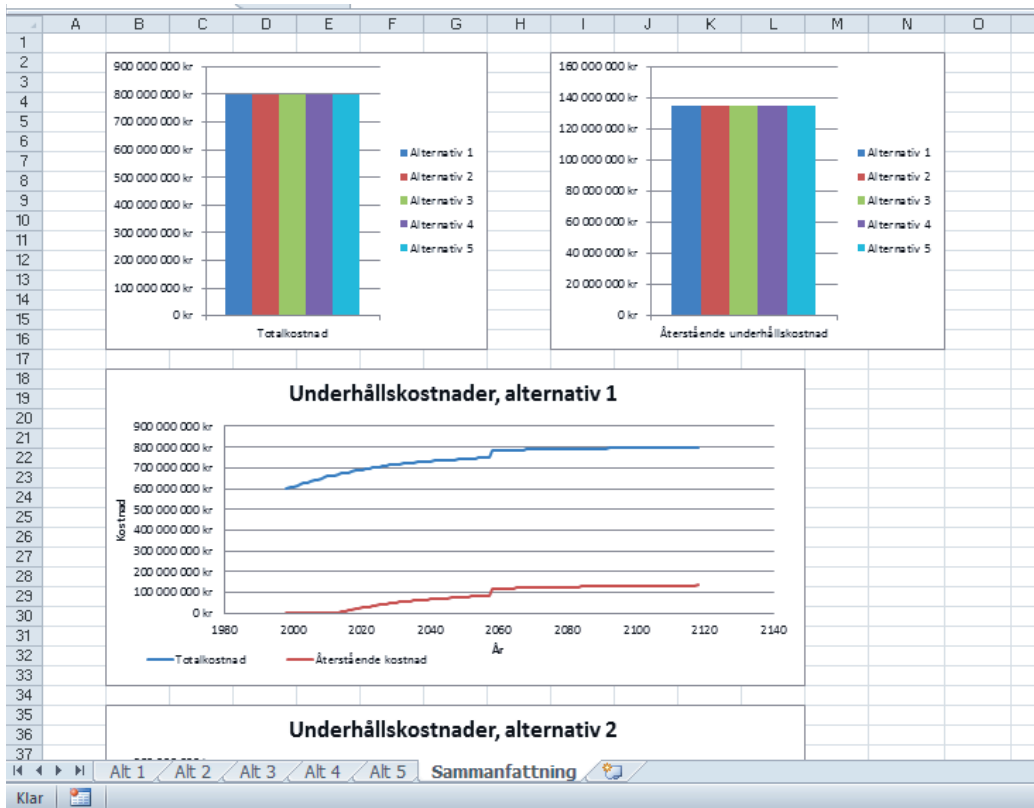
Excelarket som utgör modellen består av sex arbetsblad. I de första fem bladen anges de ingångsparametrar som modellen använder för att beräkna livscykelkostnaden för projektet, se *Figur 1*. Varje blad motsvarar en alternativ konstruktion där blad 1 är grundalternativet som de övriga fyra alternativen ställs emot vid jämförelsen.

Jämförelsen sker i den sista fliken, ”*Sammanställning*”, se *Figur 2*. Sammanställningsfliken innehåller jämförelsedata mellan de fem alternativen och presenterar kostnaden för varje enskild förstärknings- och underhållsåtgärd samt dess återstående kostnad.

O43												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
<b>Alternativ 1</b>												
<b>Indata</b>												
1	Tunnellängd [m]	750		höjd [m]	10	Kollår		15				
2	Tvårsnitt [m <sup>2</sup> ]	36		bredd [m]	8	Byggår		1984				
3	Omkrets [m]	40		livslängd [år]	120	Byggekostnad		- kr				
4						Ränta		7,00%				
5												
6												
7												
8												
9	<b>Insats</b>	<b>Kvalitet</b>	<b>% av stråc</b>	<b>Åtgärd</b>	<b>Frekvens</b>	<b>Enhet</b>	<b>Kostnad per insats</b>	<b>Etableringskostnad</b>	<b>UH-kostnad</b>	<b>ack. Nuvärde</b>	<b>ack. Nuvärde</b>	
10					vert x:e år		per enhet	per åtgärd	per insats	vid visst år	vid visst år	
11	<b>Byggekostnad</b>											
12	<b>Inspektion</b>	Översiktlig	100%	Okulär	2	m	20 kr	0	- kr	0 kr	0 kr	0 kr
13		Grundlig	100%	D.o + mätn	5	m	50 kr	0	15 000 kr	118 489 kr	78 379 kr	78 379 kr
14		Detaljerad	100%	D.o	10	m	100 kr	0	37 500 kr	130 628 kr	96 892 kr	96 892 kr
15									75 000 kr	152 524 kr	113 126 kr	113 126 kr
16	<b>UH-arbeten</b>											
17	Fria bergytor		60%									
18		torrt	50%	skrotning	10	m <sup>2</sup>	100 kr	25000	1 375 000 kr	2 796 278 kr	2 079 980 kr	2 079 980 kr
19		vått	10%	skrotning	5	m <sup>2</sup>	100 kr	25000	295 000 kr	1 027 607 kr	762 216 kr	762 216 kr
20												
21	Sprutbetong		25%									
22		god	10%	ersättning	5%	25	m <sup>2</sup>	500 kr	50000	117 500 kr	144 008 kr	117 500 kr
23		medel	10%	ersättning	10%	15	m <sup>2</sup>	500 kr	50000	185 000 kr	290 140 kr	252 053 kr
24		dålig	5%	ersättning	25%	5	m <sup>2</sup>	500 kr	50000	218 750 kr	761 997 kr	565 202 kr
25												
26	Systembult 2*2 m	2	15%									
27	(vått berg)	bra ingj.	10%	ersättning	5%	25	st	2 400 kr	50000	410 000 kr	502 498 kr	410 000 kr
28		dålig ingj.	5%	ersättning	20%	10	st	2 400 kr	50000	770 000 kr	1 565 915 kr	1 161 429 kr
29												
30	Dräner c/c 5 m	5	0%									
31		aktivt gw	0%	spolning	0,33	st	8 000 kr	0	- kr	0 kr	0 kr	0 kr
32		(bio/kem)	0%	ersättning	50%	10	st	30 000 kr	0	- kr	0 kr	0 kr
33			100%									

*Figur 1: En av alternativflikarna.*





Figur 2: Sammanställning som visar resultatet av livscykelkostnadsanalysen.

### A3. Alternativflikarna

I alternativfliken anges de data som behövs för att göra analysen. För varje alternativ anges tunnelns geometriska egenskaper tillsammans med livslängd, ränta och eventuell byggkostnad, se **Figur 3**. Det är viktigt att varje alternativ som används får rätt indata för just den tunneln. T.ex. kan de geometriska egenskaperna vara samma för alla alternativ, men byggkostnaden kan skilja sig åt.

Byggkostnaden kan uteslutas om enbart underhållskostnaden ska beräknas.

### A4. Parameterhuvud för ett alternativ

I parameterhuvudet anges tunnelns geometriska egenskaper, livslängd, ränta och eventuell byggkostnad. Tunnellängd, tvärsnittsarea, omkrets, volym, höjd och bredd används för att beräkna kostnaden för de förstärkningar som anges i "Förstärknings- och underhållsdata".

Livslängden är tunnelns livslängd och det är efter så många år som totalkostanden beräknas.

Byggår kan anges som ett faktiskt årtal för att enklare kunna relatera den ackumulerade underhållskostanden till ett visst år.

Kollår ger möjlighet att hur stor del av underhållskostnaden som kvarstår från det angivna året.

Räntan är den kalkylerade räntan (och inflation) som anses gälla under hela tunnelns livslängd.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>Alternativ 1</b>								
2	<b>Indata</b>								
3	Tunnellängd [m]	750			höjd [m]	10		Kollår	15
4	Tvärsnitt [m <sup>2</sup> ]	36			bredd [m]	8		Byggår	1984
5	Omkrets [m]	40			livslängd [år]	120		Byggkostnad	- kr
6								Ränta	7,00%
7									

Figur 3: Parameterhuvud för projektet

### A5. Förstärknings- och underhållsdata

Under parameterhuvudet finns för varje alternativ ett område där aktuella förstärkningstyper och dess underhållsåtgärder specificeras. I princip anges för varje förstärkningstyp hur mycket av bergytan/massan den täcker, vad den kostar att underhålla per enhet (t.ex. kr/m<sup>2</sup> sprutbetong), underhållsintervall samt eventuell kostnad för att etablera arbetet. I etableringskostnaden får alla initiala fasta kostnader plats som krävs för att påbörja och utföra aktuellt underhålls- eller inspektionsarbete.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
7													
8													
9	<b>Insats</b>	<b>Kvalitet</b>	<b>% av sträckan</b>	<b>Åtgärd</b>	<b>Frekvens</b>	<b>Enhet</b>	<b>Kostnad per in-</b>	<b>Etableringskostn</b>	<b>UH-kostnad</b>	<b>ack. Nuvärde</b>	<b>ack. Nuvärde</b>		
10					<b>vart x:e år</b>		<b>per enhet</b>	<b>per åtgärd</b>	<b>per insats</b>	<b>per år</b>	<b>per år</b>		
11	<b>Byggekostnad</b>												
12	<b>Inspektion</b>	Översiktlig	100.0%	Okulär		2	m	20 kr	0	39 375 000 kr	39 375 000 kr	1314 kr	1314 kr
13		Grundlig	100.0%	D.o + mätn		5	m	50 kr	0	100 kr	250 kr	1393 kr	1393 kr
14		Detaljerad	100.0%	D.o		10	m	100 kr	0	500 kr	1532 kr	1532 kr	1532 kr
15													
16	<b>UH-arbeten</b>												
17	Fria bergytor		50.0%										
18		torrt	40.0%	skrotning		10	m2	100 kr	25000	40 000 kr	122 538 kr	122 538 kr	122 538 kr
19		vått	10.0%	skrotning		5	m2	100 kr	25000	28 750 kr	160 252 kr	160 252 kr	160 252 kr
20													
21	Sprutbetong		30.0%										
22		god	10.0%	ersättning	5%	25	m2	500 kr	50000	50 938 kr	80 910 kr	80 910 kr	80 910 kr
23		medel	10.0%	ersättning	10%	15	m2	500 kr	50000	51 875 kr	116 057 kr	116 057 kr	116 057 kr
24		dålig	10.0%	ersättning	25%	5	m2	500 kr	50000	54 688 kr	304 826 kr	304 826 kr	304 826 kr
25													
26	Systembult 2" 2 m	2	15.0%										
27	(vått berg)	bra ingj.	10.0%	ersättning	5%	25	st	2 400 kr	50000	52 760 kr	83 805 kr	83 805 kr	83 805 kr
28		dålig ingj.	5.0%	ersättning	20%	10	st	2 400 kr	50000	55 520 kr	170 083 kr	170 083 kr	170 083 kr
29													
30	Dräner c/o 5 m	5	5.0%										
31		aktivt gw	5.0%	spolning		0.33	st	8 000 kr	5000	5 400 kr	416 148 kr	416 148 kr	416 148 kr
32		(biol/ker)	5.0%	ersättning	25%	10	st	30 000 kr	25000	25 375 kr	77 735 kr	77 735 kr	77 735 kr
33			100.0%										
34													
35	Förinjektering							- kr		- kr	0 kr	0 kr	0 kr
36	Betongkonstruktion							2 600 000 kr		2 600 000 kr	2 600 000 kr	2 600 000 kr	2 600 000 kr
37	(beräkna kostnader												
38	manuellt)												
39													
40													
41													
42								2064	2064	Totalt:	43 511 534 kr	43 511 534 kr	
43								85%	85%				
44													

Figur A4: Förstärknings- och underhållsdata för ett alternativ.

## A6. Sammanställningsfliken

I denna flik visas alla olika alternativ mot varandra. Bland annat visas totalkostnadens utveckling i linjediagramform, samt även återstående underhållskostnad från angivet år.

Totalkostnaden (samt återstående underhållskostnad) för varje enskild komponent visas i procentform ställd mot totala underhållskostnaden.

Här finns även en linjegrav som visar den totala livstidskostandsutvecklingen över tid för alla alternativ var för sig.

## Bilaga B: Fotobilaga CBI

### B.1 Bolmentunneln

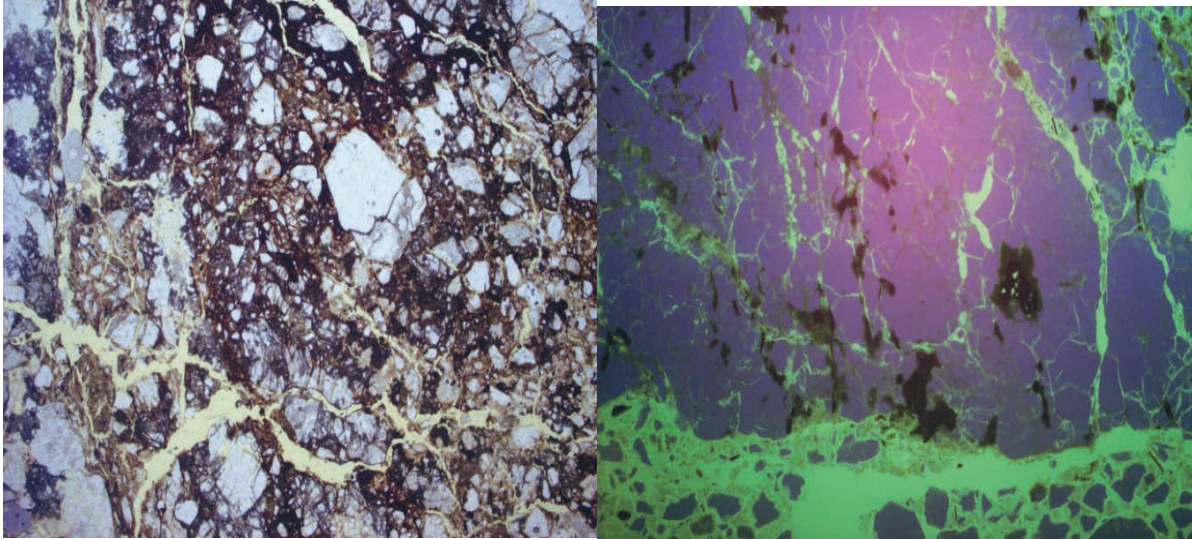
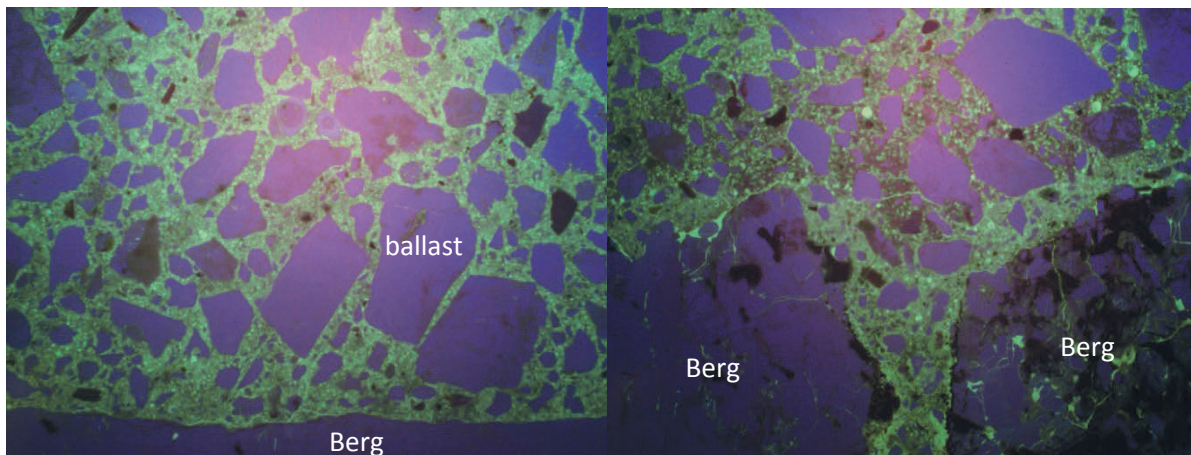


Fig. 2 Tunnslipbilder av sprucket berg.

Bild till vänster. Parallellt ljus. Bild 9 mm. Tektoniskt krossat och fragmenterat berg. Den mörkare massan är ytterst finkornig. Det gula utgör epoxi med fluorescensmedel och markerar sprickor i berget.

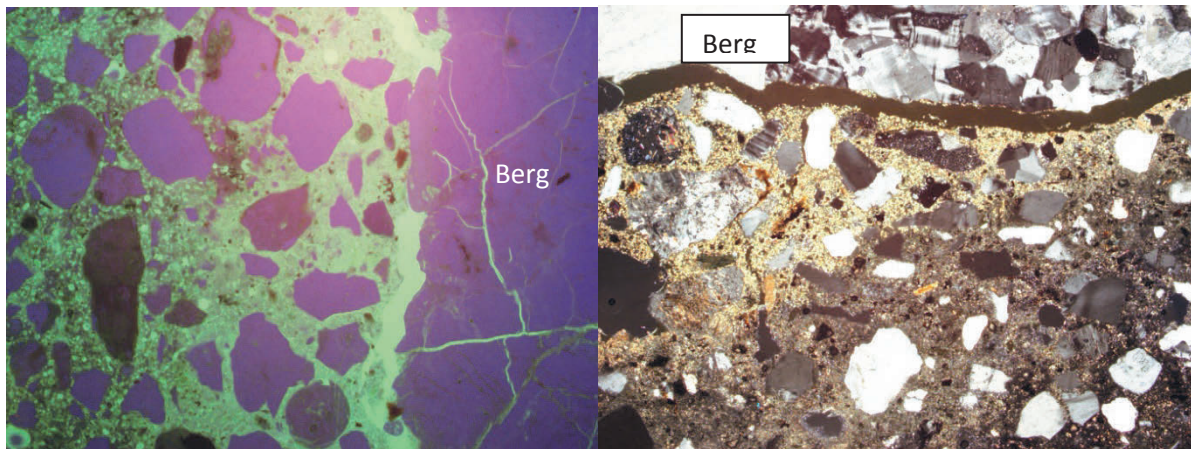
B; Fluorescensljus. Bild 9 mm. Ljus gulgrön färg är poröst eller sprickor. Bilden visar kraftigt fragmenterat berg överst och porös betong/cementpasta med spricka underst.



Figur 3 Tunnslipsbilder i UV-ljus.

Bilden till vänster visar bra och relativt homogen pasta in mot bra berg. 9 mm

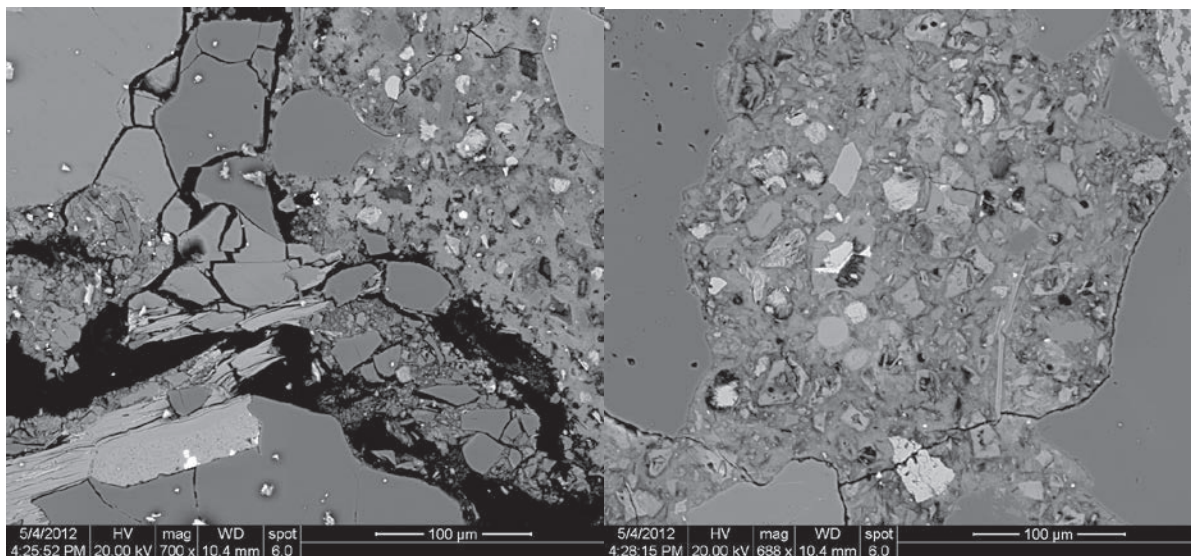
Bilden till höger ser man sprutbetong som trängt in i en större spricka. Det är alltid mindre ballastkorn in mot berget p.g.a. väggeffekten. 4,5 mm



Figur 4.

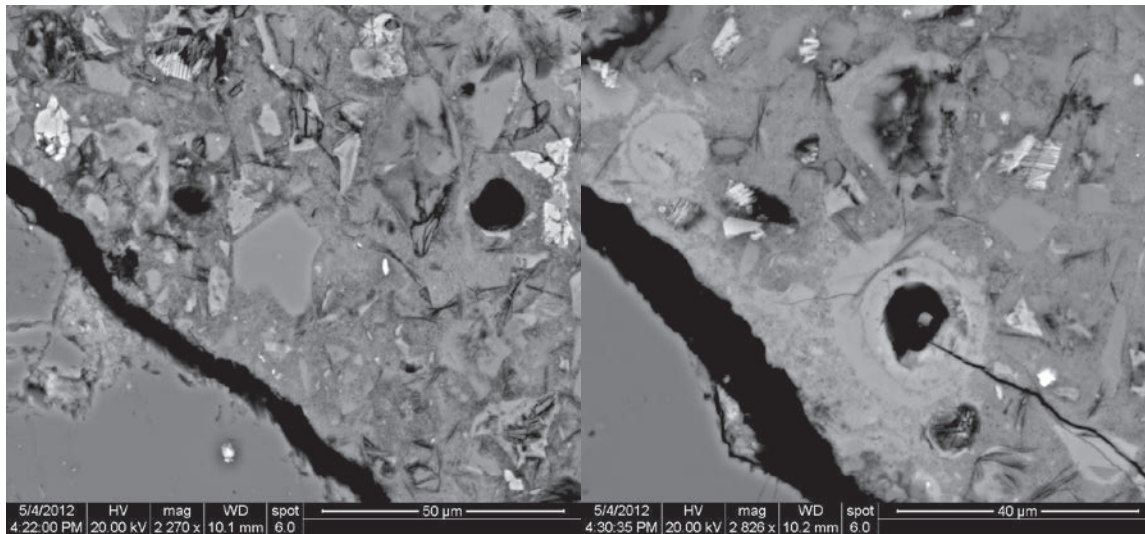
Bilden till vänster i UV-ljus visar inhomogen pasta in mot sprucket berg.

Bilden till höger med korsade polarisatorer visar mikroskopbild med korsade polarisatorer. Den ljusa färgen in mot berg beror på riklig förekomst av portlandit.



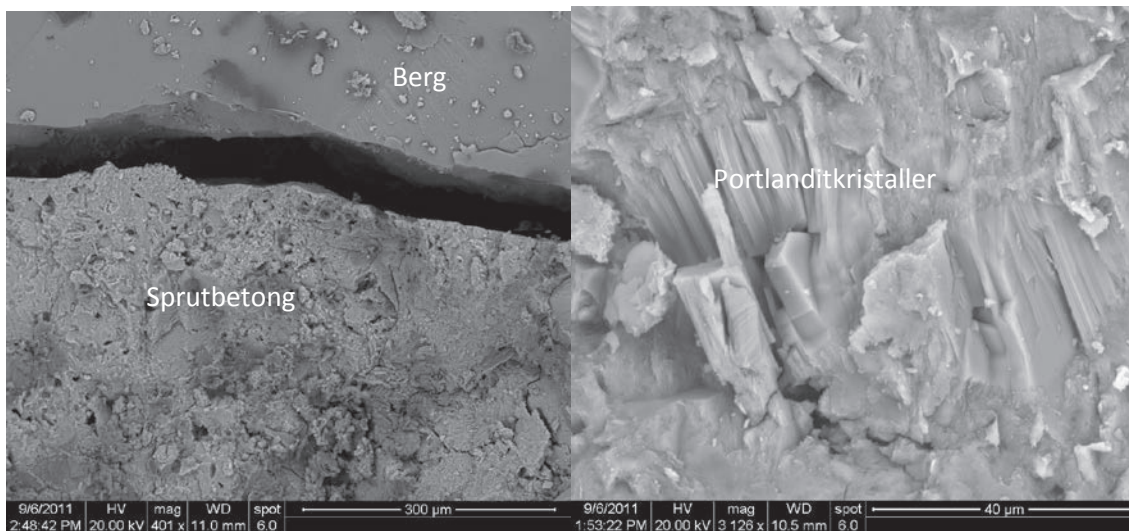
Figur 5. SEM planslip.

Bilden till vänster; Sprutbetong mot sprucket berg. Bilden till höger; sprutbetong 1 cm från bergytan.



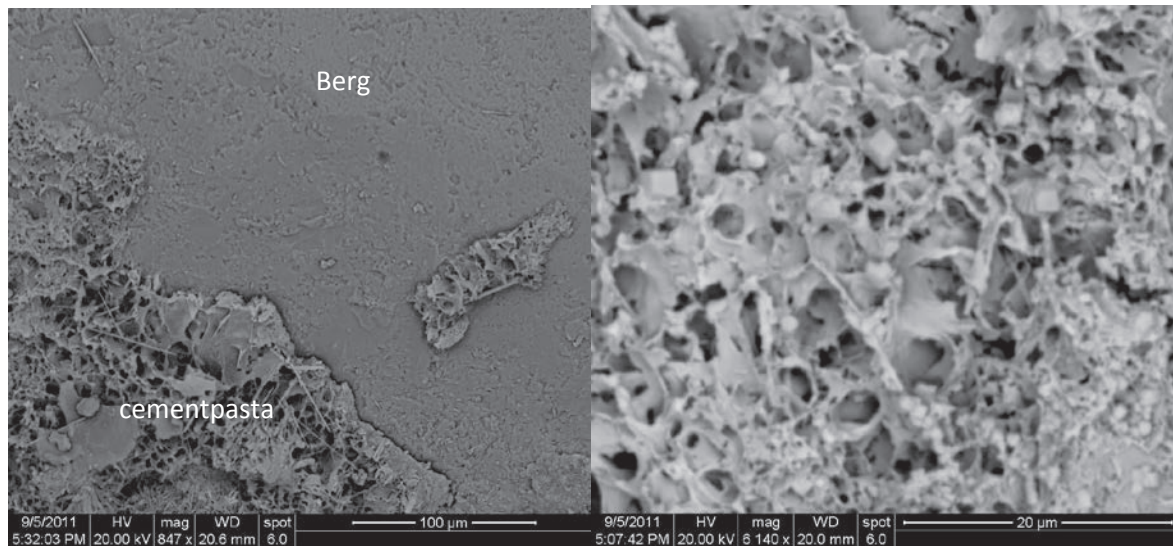
Figur 6. SEM planslip.

Bilden till vänster. Relativt homogen pasta in mot berg. Bilden till höger. Rikligt med portlandit både i hålrum och vid gränsövergången.



Figur 7. SEM brottyta.

Till vänster; något porös cementpasta in mot berg. Till höger; Portlanditkristaller vid gränsövergång.

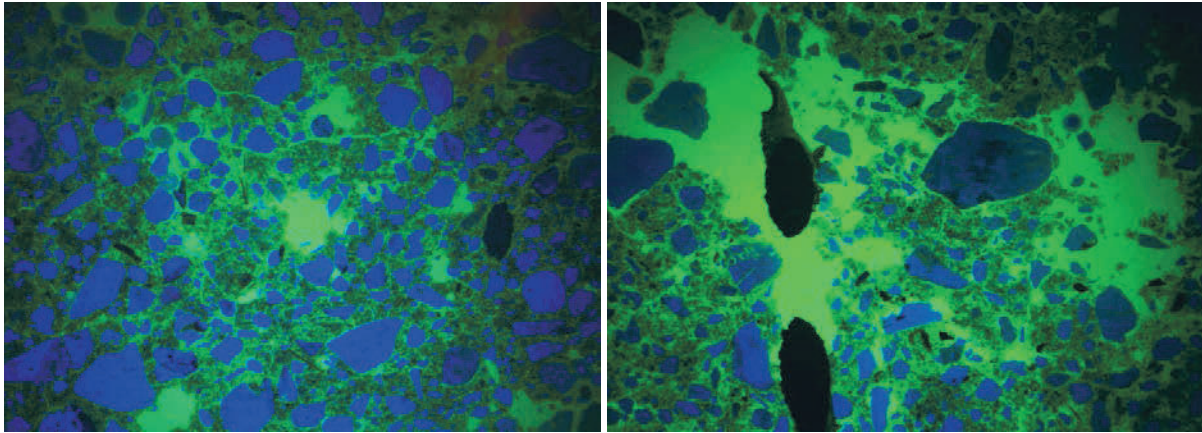


Figur 8.

SEM brottyta.

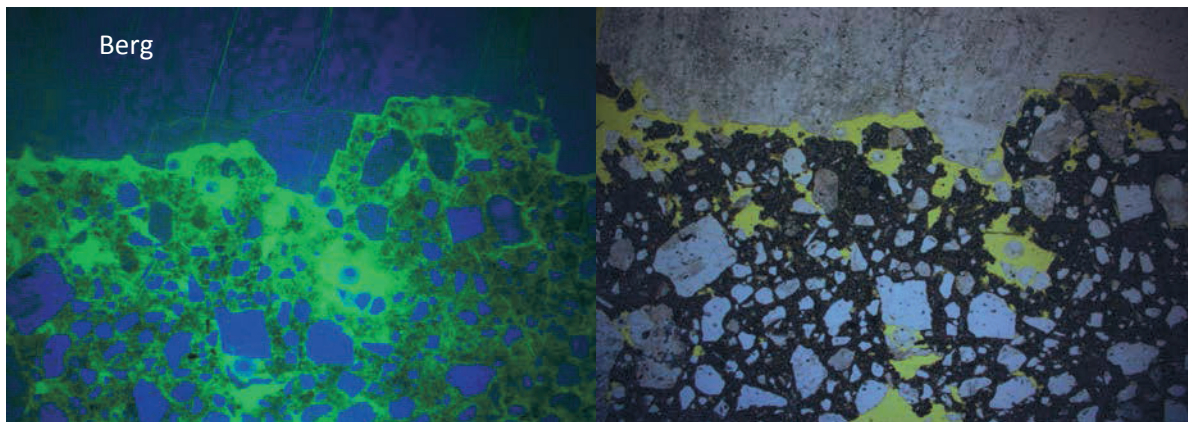
Till vänster; Cementpasta mot berg. Cementpasta är porös och innehåller rikligt med ettringit och portlandit. Till höger; samma i större förstoring.

## B.2 Lundby tunneln



Figur 9. Tunnslip fluorescensljus.

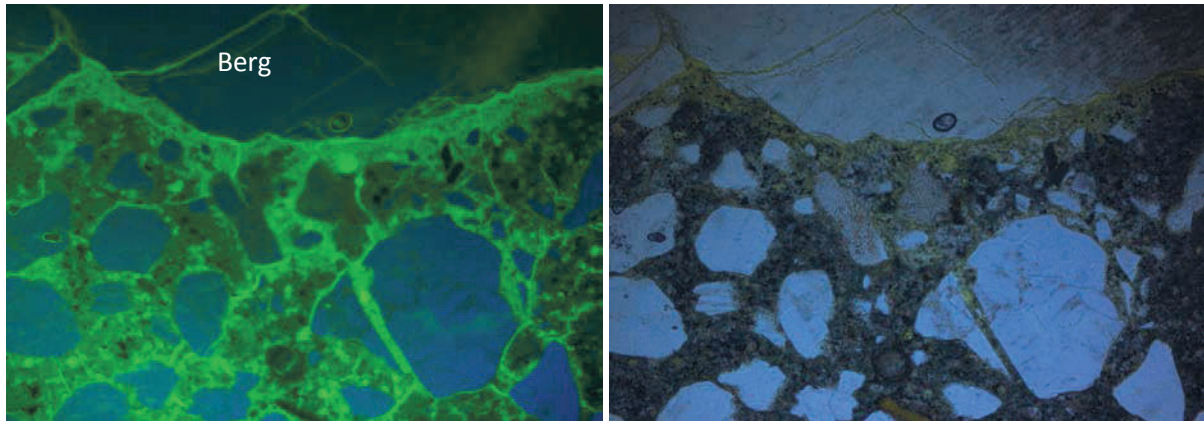
Till vänster inhomogen sprutbetong. Till höger; Hålrum i sprutbetong. Detta visar en inhomogen sprutning. Bilder 9 mm.



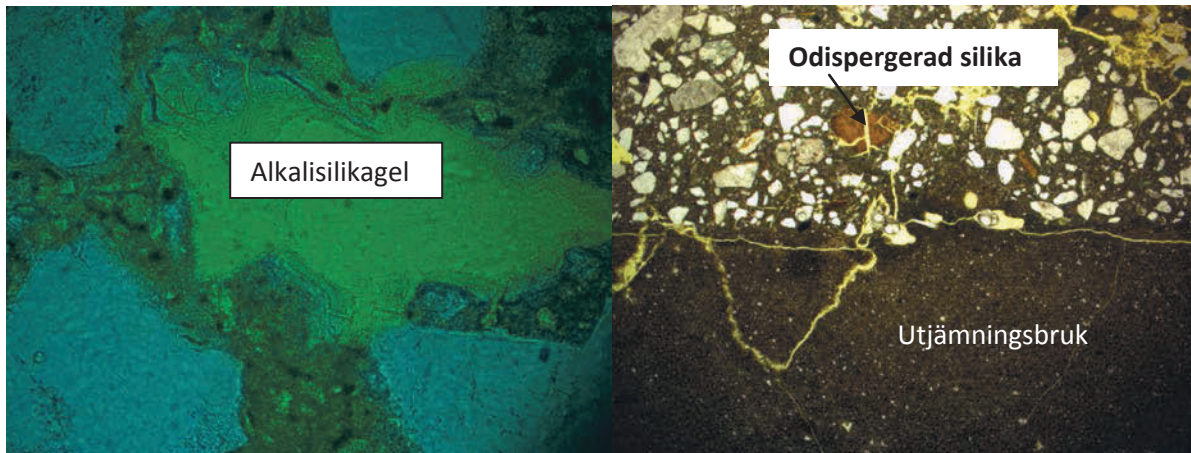
Figur 10. Tunnslip med fluorescensljus och parallellt ljus.

Inhomogenitet och porös övergångszon mellan berg och sprutbetong. Bilder 9 mm.

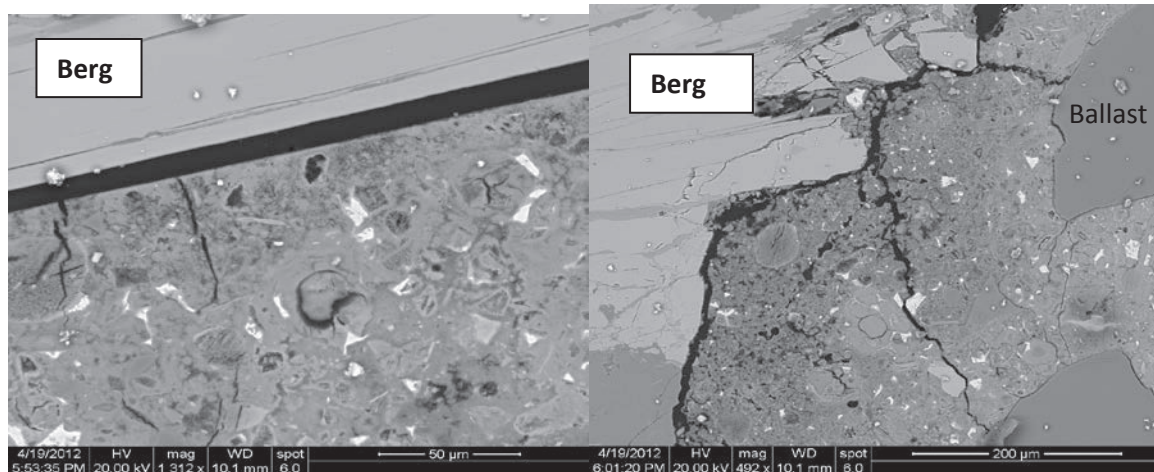




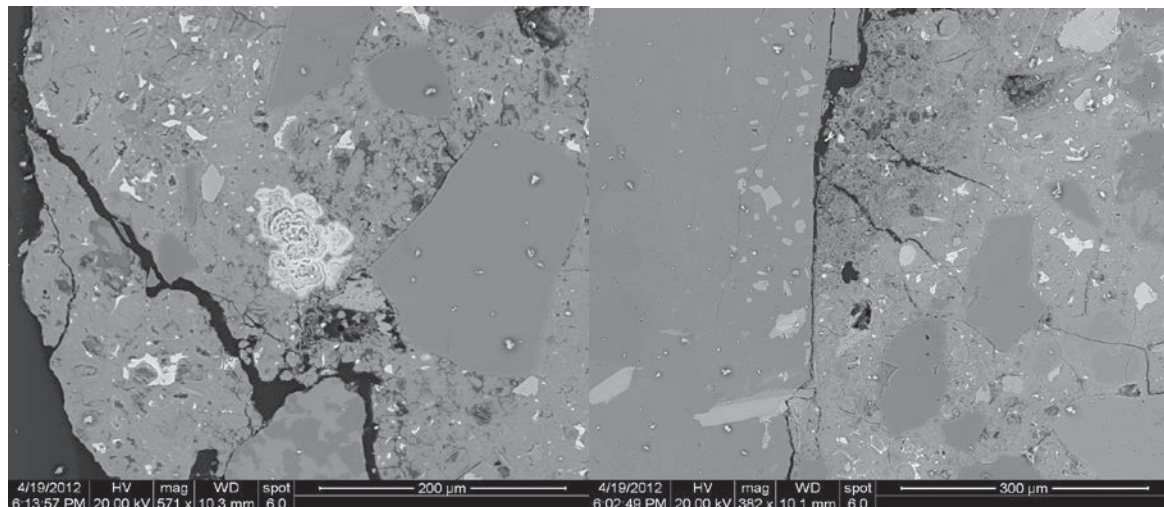
Figur 11. Tunnslip med fluorescensljus och parallellt ljus. Övergångszonen i större förstoring. Bilder 4,5 mm.



Figur 12. Tunnslipsbilder. Till vänster hålrum med alkalisilikagel. Till höger odispergerad silika. Den bruna massan är någon slags utjämningsbruk som man sprutat mot. Bild till vänster 2,2 mm och till höger 4,5 mm.

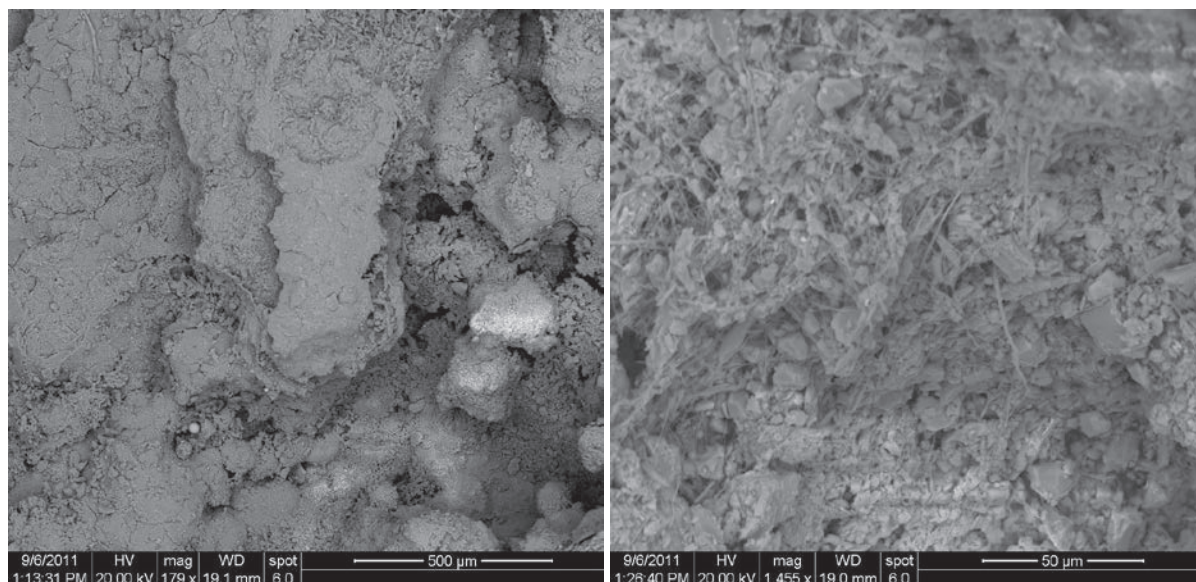


Figur 13. SEM polerprov.  
Porös övergångszon mot berg.



Figur 14. SEM polerprov.

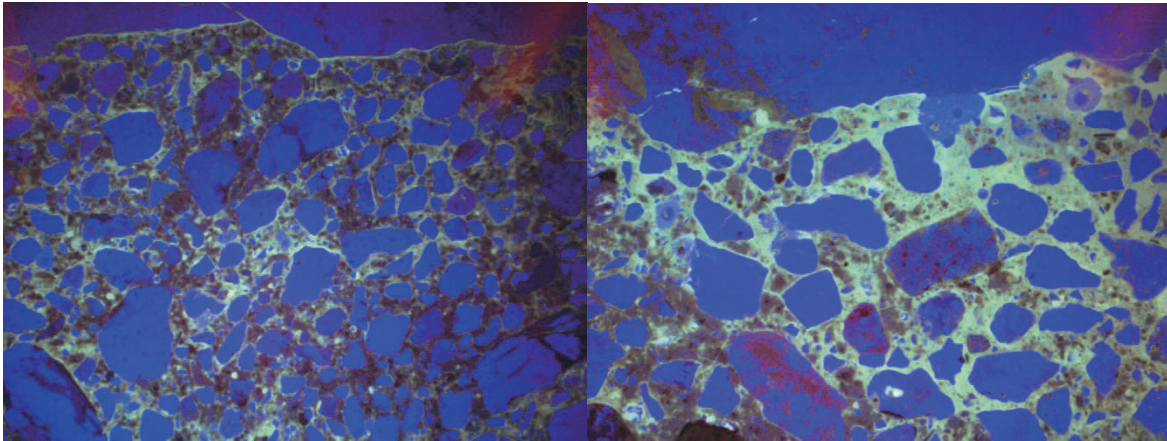
Till vänster; Nära övergångszon. Utfällning av manganoxid. Detta indikerar vattentransport från berg. Till höger variation i porositet vid övergångszon.



Figur 15. SEM brottyta mot berg.

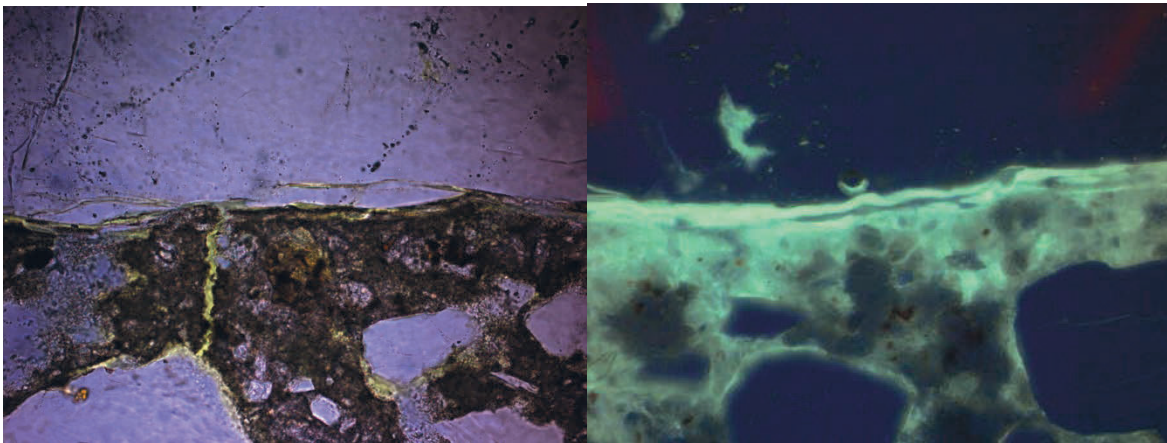
Porös zon med kristaller av portlandit och ettringit.

### B.3 Shelltunneln



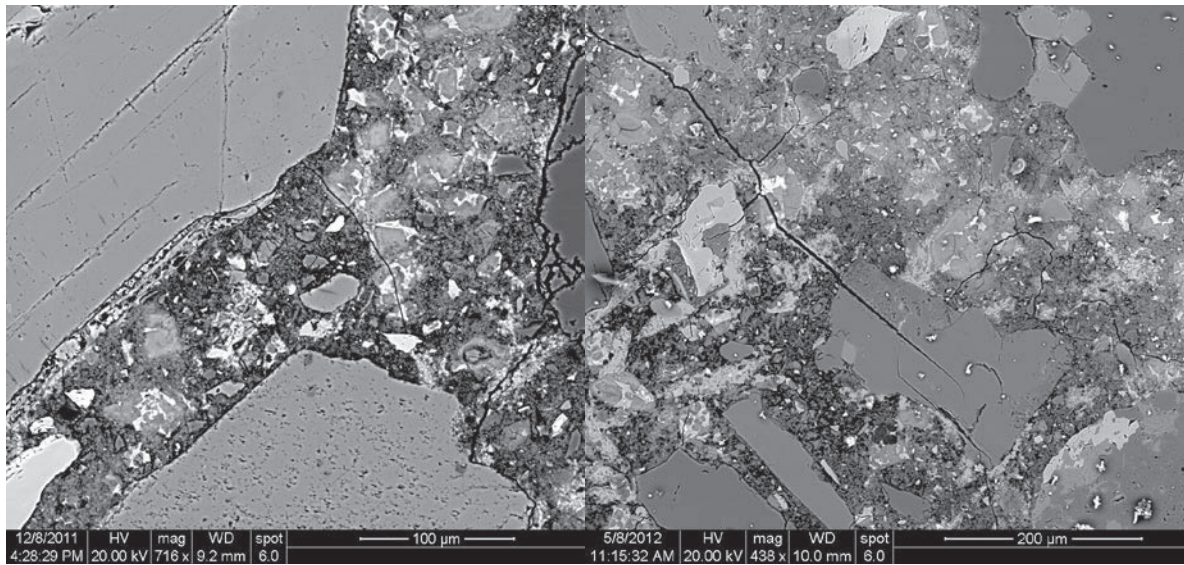
Figur 16. Tunnslipsbilder. UV-ljus.

Till vänster. Relativt homogen betong. Bild 9 mm. Till höger visas mera porös betong. Bild 4,5 mm



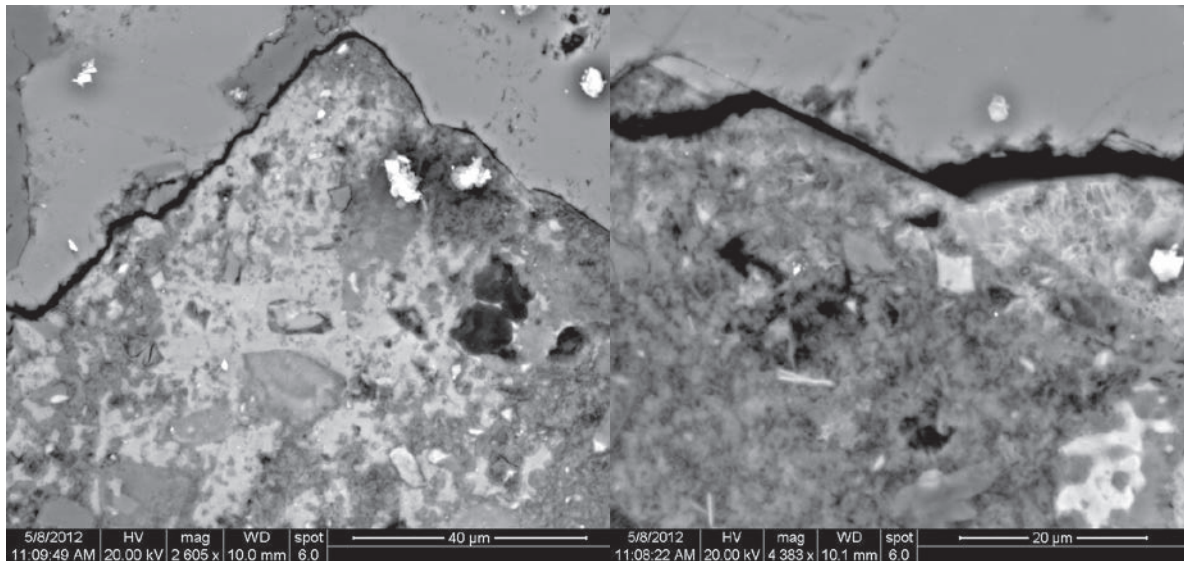
Figur 17. Tunnslipsbilder.

Parallellt ljus och UV-ljus. Bild 1,1 mm



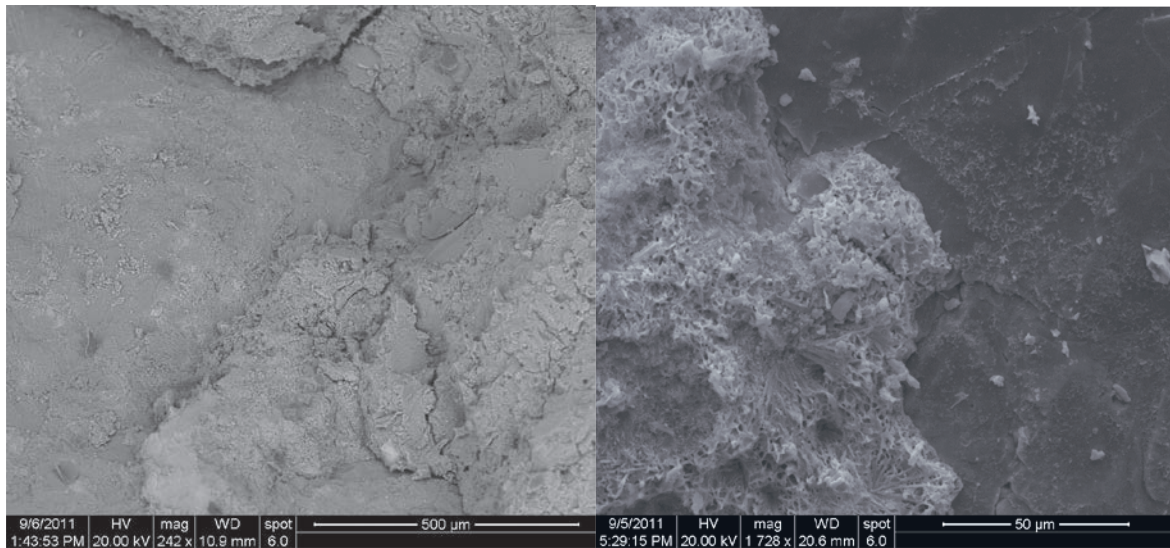
Figur 18. SEM polerad yta.

Till vänster kan man se utfällning av portlandit i övergångszonen. Till höger inne i betongen kan man observera inhomogenitet i cementpastan.



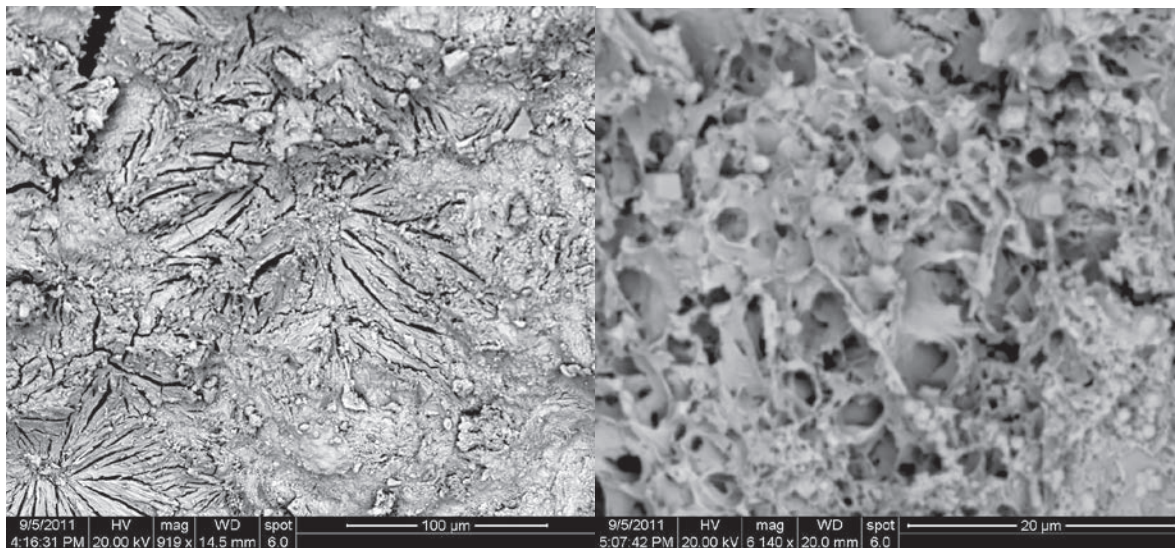
Figur 19. SEM poleryta

Till vänster massiv utfällning av portlandit. Till höger ett mera poröst parti



Figur 20. SEM på brottyta.

Cementpasta som en kaka på bergytan. In mot berget är strukturen relativt porös.



Figur 21. SEM på brottyta.

Till vänster syns sekundär utfällning av ettringit. Till höger syns en porös cementpastesstruktur.

## Bilaga C: Korrosionsdata KIMAB

Med en förändring av värde  $N_1$ , vattentyp, erhålls följande modifierade DIN-norm.

$$W_0 = N_1 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_3/N_4$$

Vad de olika faktorerna står för framgår av tabellen nedan.

Enhet		Värde
Vattentyp		$N_1$
Flödande		-3
Fuktigt		0
Torrt		+3
$c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})$	$\text{mol/m}^3$	$N_3$
<1		0
1-5		-2
5-25		-4
25-100		-6
100-300		-7
>300		-8
Syracapacitet till pH 4,3	$\text{mol/m}^3$	$N_4$
<1		+1
1-2		+2
2-4		+3
4-6		+4
>6		+5
$c(\text{Ca}^{2+})$	$\text{mol/m}^3$	$N_5$
<0,5	-1	
0,5-2		0
2-8		+1
>8		+2
pH-värde	$\text{mol/m}^3$	$N_6$
<5,5	-3	
5,5-6,5		-2
6,5-7,0		-1
7,0-7,5		0

&gt;7,5

+1

Utgående från beräknat värde på  $W_0$  kan förväntad korrosionshastighet utläsas ur nedanstående tabell, där de i ursprunglig DIN-norm angivna korrosionshastigheter halverats baserat på resultat från denna undersökning.

<b><math>W_0</math></b>	<b>Medelavfrätning, mm/år</b>
>0	0,005
-1 till -4	0,01
-5 till -8	0,025
<-8	0,05



## Bilaga D: Kemirapport GU

### D1. Background

Cement is most common material used in pre-grouting in Scandinavia. During the years of cement grouting the grain size distribution and the used water to cement ratios has been developed in consistency to cope with the demands set on the tunnel ingress of water. In general one can say that the grain size distribution has gone from larger ( $d_{95}=63 \mu\text{m}$ ) to smaller and smaller ( $d_{95}=16$  or even  $12 \mu\text{m}$ ) since the 1960 and 70's and in the same time using higher and higher water to cement ratios, giving more easy flowing grouts. Over the last decades much effort and resources have been put to understand the limitations of the penetrability of the cement routs due to the grains. To gain strength and rapid increase in the early strength the suspension should be easily mixed with a lot of different chemicals (superplasticers, accelerators, retarders etc) which have entered the market and frequently used in projects. A proper understanding of cement quality changes over the long term with all these different cements and water content together with chemicals is yet to be established. However, tunnels have been built since 1950 or earlier with pre-grouting as a method and the tunnels still meet the requirements but needs maintenance.

This report is part II of the study of durability of grouted cement. The first part was a literature and laboratory study of fabricated cement grout. The outcome was that if the pH of the pore water in the cement is above 12 it is stable. It was also shown that the pH is mainly governed by the leaching of portlandite and as long portlandite is present the pH is above 12 and hence stable. However is should be noted that the kinetics of cement paste is complex and a more thorough study of other components than portlandite is needed to fully understand the long term effects of cement paste. This report brings up tests of the real cement grout that was grouted in two tunnels, some 50 and 10 years ago. The study focuses on the presence of portlandite and the appearance of the cement grout when portlandite is absent or not.

### D2. Aims and purposes for the project

- Show the difference in quality of cement grout in natural fractures
- With chemical analysis show how the portlandite affects the cement quality
- To analyse the difference in quality when grouting with high versus low water to cement ratio.

### D3. Delimitations

The report will not answer for how long time a cement grout is durable. This requires a kinetic modeling based on experimentally determined time dependent dissolution of several components of different substances as well as how new substances are developed. This is very complex problem and need much longer and elaborative experimental and modeling studies.

One possible reason for giving a poor quality of the cement can probably be described with the Taylor dispersion. The Taylor dispersion is a local process that occurs close to the fracture surface when the grout is flowing in the fractures. This dispersion it thought to dilute the grout during for some

circumstances. This analysis has been able to be done besides a likely occasion of this process is found in one borehole.

#### D4. Method

The cement grout samples from two tunnels have been studied. The Telia tunnel, constructed in the early 1970 and the Lundby tunnel constructed in late 1990, both located in Gothenburg.

Samples were collected using core drilling in parts of the tunnel walls where knowledge of the grouting was known. The amount of core drilling was limited and only one core from each tunnel was able to retrieve traces of cement in the fractures.

#### D5. The Lundby tunnel

The rock is a gneissic/granitic crystalline rock with pegmatite and amphibolite slabs. The tunnel was built in 1998 and is double tube traffic tunnel, 2 km long with an area of 88 and 92 m<sup>2</sup> respectively. The permitted ingress of water is very low. Not more than 2.5 l/min and 100 m was the general target but for some places 0.5 l/min per 100 m where the rock was covered with clays and settle-sensitive buildings. Allot of effort was put in to the grouting, with around 61 boreholes yielding a c- distance at the tip of the borehole of only some 1,0 m for the most strict sealing class. The grouting started with cement with a water to cement ratio (WCR) of 3,0 (a very viscous suspension) for the first 20 m and after 30 minutes without reaching a pressure the WCR was lowered to 2,0, and again if the pressure has not increased within 30 minutes the WCR was lowered to 1,0. After grouting the boreholes, all boreholes were plugged with a WCR of 0,35 or lower. This concept is traditionally called "tjocka på". The cement type was "injekteringscement" which is not as finegrained as today more commonly used INJ30. It was sulphate resistant aluminate cement developed around 1985 by CEMENTA. Post grouting was also used frequently along the tunnel. The grout used was cement and TACCS (Polyurethane).

#### D6. Telia tunnel

The rock type is the same as Lundby tunnel with granites and gneiss. Some few pegmatite dykes and amphibolites are found. The construction started in 1970 and ended in 1972. It was pre-grouted with cement but type is unknown to the author but with additions of Intraplast-A, an organic compound that expands. However from some relation blue prints from the excavation shows extensive grouting in parts of the tunnel with boreholes spreading far out from the tunnel profile as well with a large overlap between the grouting fans. During the 80's large efforts of post-grouting was conducted, both with cement and polyurethanes. In the latest post-grouting, in 2008 was conducted with silica sol. It is also from this post-grouting project where one of the rock cores could be utilized for this durability study. For further information of the latest post grouting and background material see (Janson, et. al, 2010).

In two tunnels nearby, GRYAB sewage tunnel and Gothenburg energy was built in early 1970 and early 1980 respectively. The cement used was denoted as rapid hardening Limhamn cement with 1% Intraplast for the GRYAB tunnel and Portland cement denoted SH cement for the Gothenburg energy tunnel. Both cement types are according to today's knowledge denoted as SH cement which has a rapid hardening property but not sulphate resistant according to today's standard. The performance for both

of the tunnels was that the water cement ratio was changed due to the grouttake. For the GRYAB tunnel the grouting started with a ratio of 3 (easy flowing grout) to gradually thicker grout, down to a ratio 0.5. For the Gothenburg energy tunnel the grouting started with a ratio of 2.0 down to 0.33.

It is likely that in the Telia tunnel a similar approach of the concept of thickening the grout during grouting was performed. The cement grouting in the Telia tunnel was done with addition of Intraplast and then hence possibly the cement type was SH cement (Personal communication with Tommy Ellison, AB Besab). The SH cement is more of course grained type.

## D7. Sampling by core drilling

### D7.1. Lundby tunnel

Totally four cored drill hole was taken in section 2/179 to 2/159 in the tunnel wall. Two of the cores were shorter with the objective to study the contact between the rock and the shotcrete. These cores are used in another project. Two longer cores, eight to ten meters was drilled where in only one core traces of cement grout could be found, see appendix A for drilling diary.

Samples were taken from the cores. Each fracture surface was visually observed and if a cement-like filling was found on the surface, samples by scratching of a piece from the surface were done. One of the core drillings was done cutting an old cement grouted borehole as well a borehole used for bolting. This was not intended but sine the whole tunnel wall was covered with sprayed concrete it was "luck" that the drilling was cutting this boreholes giving a good opportunity to analyse samples that was not degraded by the ground water. In the table below the 5 samples for further analysis is found.

**Table 1. Samples taken from the Lundby tunnel.**

		Chainage along the core	
Sample no.	Taken from	Denoted	Working name
L1	KBH1, Box 1	1,2 m grout hole	L1 grout hole
L2	KBH1, Box 1	1,2 m grout hole, outer surface	L2 grout hole outer surface
L3	KBH1, Box 2	6,8 m, bolt hole in pegmatite	L3, bolt hole
L4	KBH4, Box 1	2,4 m, dry-fracturing, clay?	L4, fractured cement
L5	KBH2, Box 2	5,3 m, fracture	L5, grout hole

From the sampling the grouted holes gave cement for certain that could be analysed. The more interesting part of the grouted hole was that around the center of the hole a more porous cement, approximately 1-2 cm thick and more light in colour was found. However, all samples that cement was found was from boreholes and not from the fractures except for sample L4. Sample L4 could not be visually determined between a clay or cement, further analyses was undertaken.

### D7.2. Telia tunnel

One rock core drilled in section around 2/980 in the tunnel called "city tunneln" was used for sampling. The core length is 33 m and drilled along the direction of the old pre-grouting holes giving maximum possibility of hitting cement grouted fractures. In at least one fracture with cement grout was found during the actual drilling. The sampling method was the same as for the Lundby tunnel. In table 2 the samples are listed.

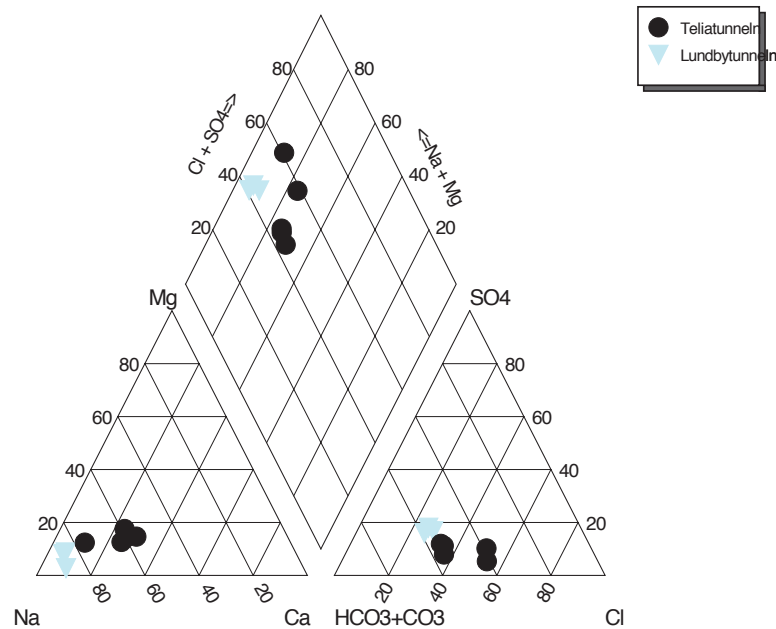
**Table 2. Samples taken from the Telia tunnel**

		Chainage along the core	
Sample no.	Taken from	Denoted	Working name
A	Left fracture surface	Telia_KBH1_10,96m	Cement certain 1
B	Right fracture surface	Telia_KBH1_11,515m	
C	Right fracture surface	Telia_KBH1_27,145m	Cement certain 2
D	Right fracture surface	Telia_KBH1_28,455m	
E	---	Telia_KBH1_29,53m	Filter cake

For the sample E which was not a cement. It has more of paper looking appearance some millimeters thick covering the whole surface plane and easily removed as one piece from the surface. A piece from this sample was taken for further analysis. Later, it was discovered that this must originate from a post-grouting done during 1980 where a mixture of bentonite and talc was tested.

## D8. Groundwater analysis

From the water dripping coming from cored boreholes water samples were collected for a ground water analysis. This was done in both as reference test to know the environment the cement been leaching in as well for further analysis to describe degradation of the cement. The report of the ground water chemistry is found Appendix B. The results of the water analysis are presented here since so far it seen as a description of the environment.

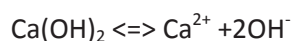


**Figure 1. Piper diagram showing the most common ions in the two type waters from Telia and Lundby tunnel.**

The Lundby tunnel water shows a higher concentration of sodium (Na). Both waters have a high buffer capacity with alkali. Both of them have a high content of dissolved organic carbon, DOC and indicate that the waters are in contact with the surface. The Telia tunnel shows a high concentration of silica oxide which can indicate dissolution of silica from the cementgrouting or from the grouting with silica sol, see appendix B for further explanations.

## D9. Chemical analysis of the samples

When dry cement material comes into contact with water the hydration of solid phases starts immediately. Since cement is composed of calcium silicates such as  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , sulphates ( $\text{CaSO}_4$ ) and aluminates ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) the resultant products of hydration reactions are portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), ettringite ( $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) minerals along with amorphous C-S-H phases. Portlandite is very soluble in water thus it dissolves quickly according to the following reaction:



The presence of OH<sup>-</sup> ions generates highly alkaline solution in cement matrix. Due to rapid dissolution of the portlandite the pore solution in cement matrix gets saturated with respect to OH<sup>-</sup> and Ca<sup>2+</sup> ions and system reach equilibrium and further dissolution of portlandite stops. Ettringite on the other hand is relatively less soluble in water than portlandite. Formation and stability of ettringite is linked to the presence of CaSO<sub>4</sub>. As long as CaSO<sub>4</sub> is in excess ettringite is stable but when CaSO<sub>4</sub> is consumed ettringite slowly converts to monosulphates. Thus this is the reason that in old concrete samples ettringite is seldom detected.

In our previous study we have hypothesized that an important indicator of concrete stability is the presence of portlandite. As long as portlandite is present which provides very high pH in the pore solutions, mineral phases containing silicates etc will be stable. It was shown in our previous report that indeed the pH of the solution played the vital role i.e., as long as pH was > 11 the portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) and other phases were stable. However, when pH was < 9.5 the portlandite dissolved. It was also found that concentration of ions such as Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and Cl<sup>-</sup> had negligible effect on the release of Ca<sup>2+</sup> ions and mineral stability.

Thus, based on previous studies we can safely state the following:

*The most important parameter for cement stability is the pH and the presence of portlandite is a good indicator of the degradation process occurring in aged concrete. If the aged concrete shows the presence of portlandite we can safely consider that cement as stable. On the other hand if portlandite is absent from the aged concrete there is risk that pore solution will become acidic which will eventually lead to the dissolution of the other minerals and will generate more open porous concrete structures.*

Following analysis were done on the samples

X-ray diffraction (XRD), XRD on all samples in order to find the crystalline cement minerals, such as portlandite and ettringite.

Infrared spectroscopy, IR with diffuse reflectance infrared fourier transformation on all samples with the same purposes including also absorption for detecting C-S-H phases.

Scanning electron microscopy (SEM), SEM analysis combined with EDX is done on selected samples to visually show a good and a poor quality of the cement. The structure of the cement will have influence on the sealing effect from the cement. Although this method only provides a “picture” of the surface it still gives indication of how it has been affected by leaching.

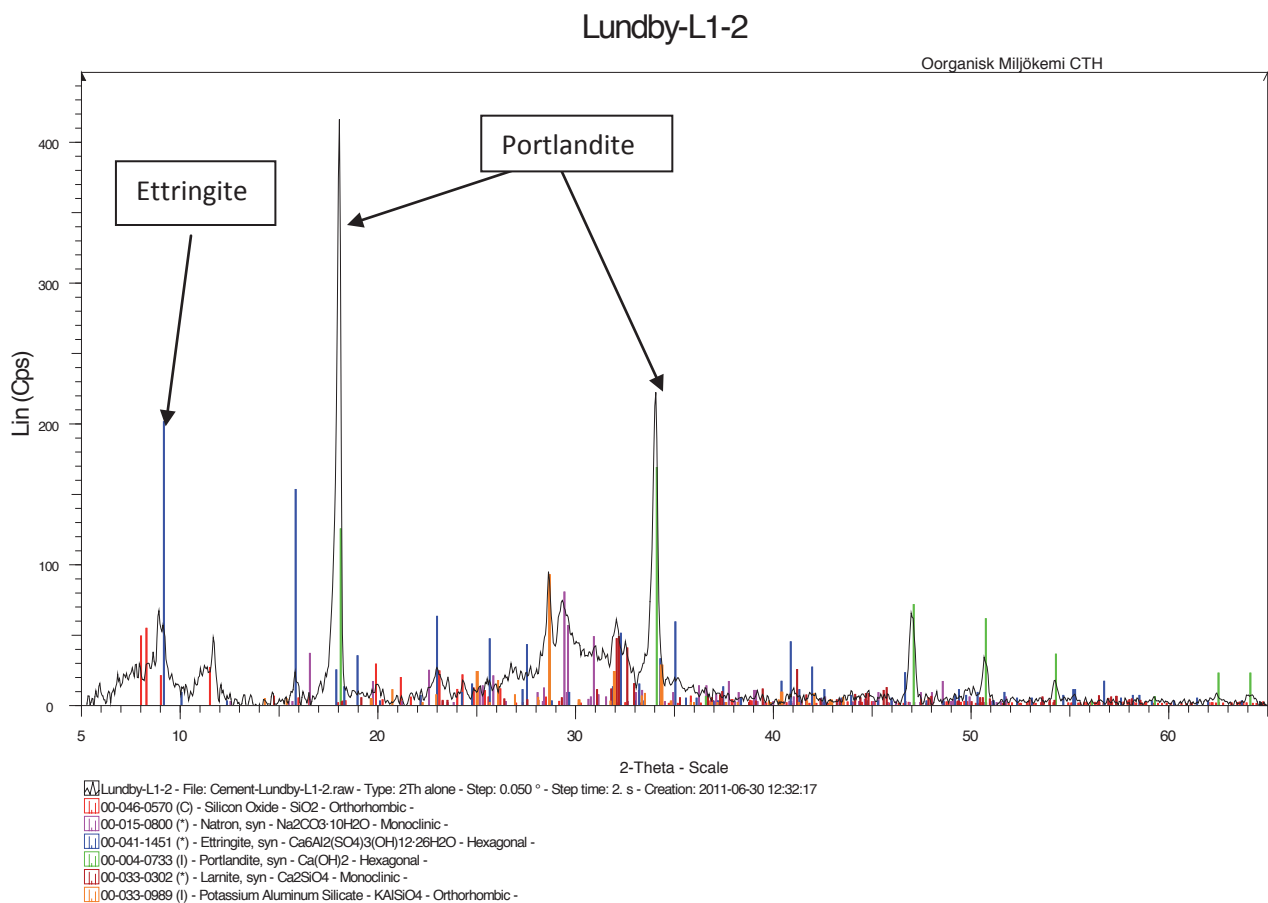
## **D10. Results**

All the results from the chemical analysis are shown in appendix C. Here, the most significant results are presented. The results are divided where the first priority is to show whether the sample originates from cement grout or not. When the cement samples are considered as cementitious origin the results are divided into good and poor quality of the cement.

## D10.1. Samples with cementitious origin

### Lundby tunnel

In Lundby tunnel samples L1, L3 and L5 are of cementitious origin i.e., having portlandite as dominant phase along with some ettringite and also alkali and alkaline aluminosilicates. On the other hand in sample L2 there was calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) along with significant amount of alkali and alkaline aluminosilicates. This sample was taken from the outer surface of the grouted borehole. The XRD analysis show no trace of portlandite but the sample in itself shows that it was cement from the beginning. The sample L4 was dominant by sand along with alkali aluminosilicates. No portlandite or  $\text{CaCO}_3$  were found. A typical diagram for sample L1 from the X-ray diffraction is shown in Figure 2 where the peaks shown are the minerals Ettringite and Portlandite.



**Figure 2: The X-ray diffractogram of Lundby L1. The portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) and ettringite mineral phases are marked with arrows.**

**Figure 3. Photo of the cored grouted borehole where sample L1 and L2 were taken from. It is evident that L2 originates from the grouted borehole.**

From the Lundby tunnel following samples originates from cement grout, Table 3.

**Table 3. Samples from the Lundby tunnel that originates from cement grout.**

Sample L1	Inner core of grouted boreholeplug	Portlandite is found
Sample L2	Outer surface of grouted borehole plug	Portlandite is NOT found instead the sampling indicates grout
Sample L3	Bolt hole, plug.	Portlandite is found. Probably another type of cement used for bolting than for grouting.
Sample L5	Grouted borehole	Portlandite is found

The grouting of the Lundby tunnel was done in 1997-1998, hence the grout around 14 years old and can still be found in the core from the core drilling.

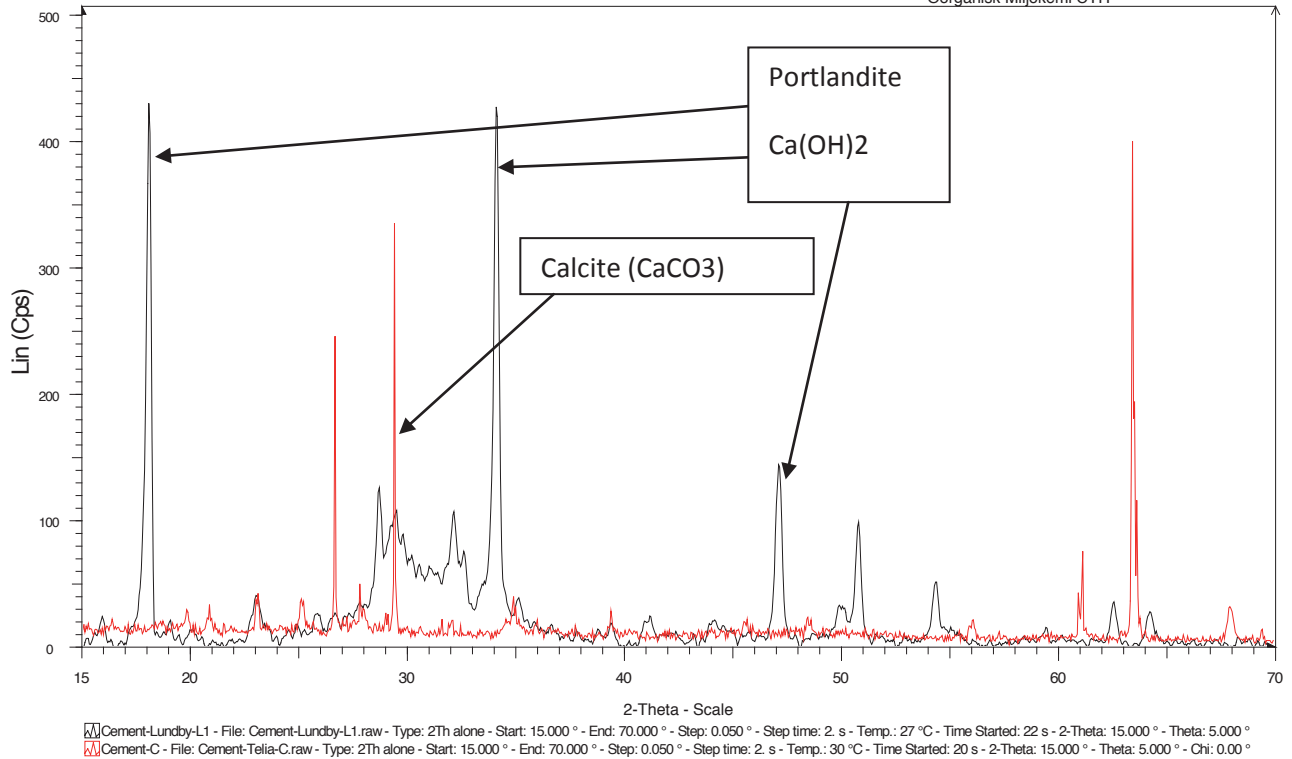
#### **D10.2 Telia tunnel**

It is clear from the XRD analysis showed that the samples from Telia tunnel do not contain portlandite nor ettringite. Instead  $\text{CaCO}_3$  is dominant mineral in samples B, C and D and also present to some extent in the sample A. The XRD of sample C from Telia tunnel is compared with the sample L1 of Lundby tunnel in Figure 4. It is evident from figure that the portlandite phase which is dominant phase in Lundby tunnel sample is absent from the Telia Tunnel sample C and on the other hand calcite phase is the dominant phase in sample C. This indicate that the Telia C sample which most probably was originally the grouted cement has lost portlandite phase due to dissolution and the presence of  $\text{CaCO}_3$  indicated that the leached solution has been in contact with air. The  $\text{CO}_2$  has been dissolved in the highly alkaline solution and  $\text{CaCO}_3$  phase is formed in considerable amount.



## Cement-Lundby-L1

Organisk Miljökemi CTH



**Figure 4.** The black color is X-ray diffractogram of Lundby L1 and red one is the x-ray diffractogram of Telia C. One can see that the portlandite is missing from the Telia sample.

From the Telia tunnel following samples originates from cement grout, Table 4.

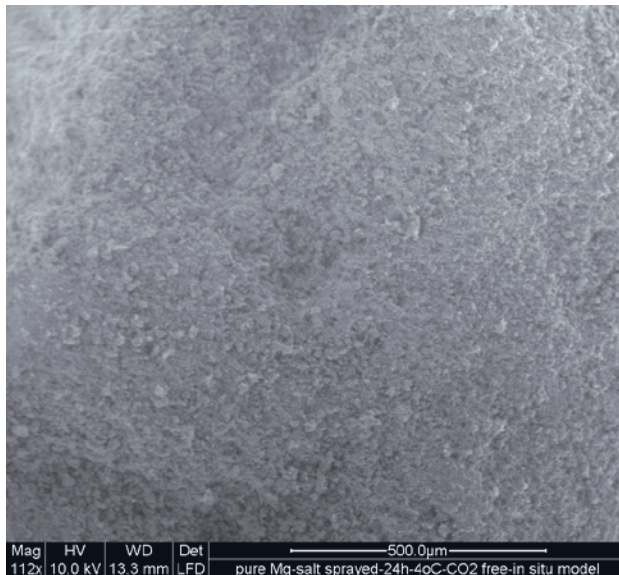
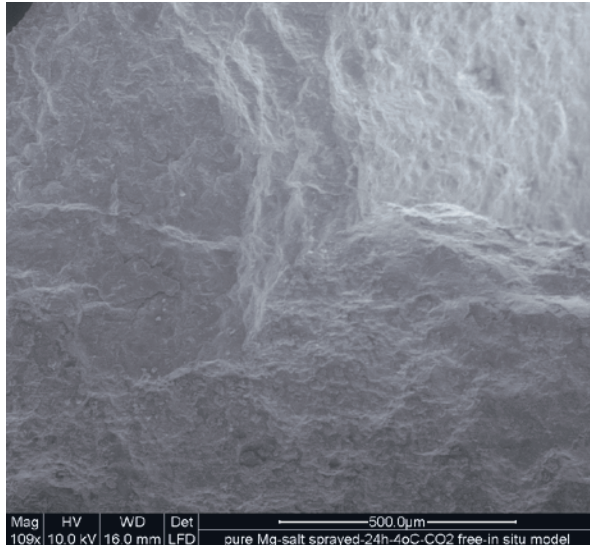
**Table 4.** Samples from the Telia tunnel that originates from cement grout.

Sample A	Fracture surface	Portlandite is NOT found nor Ettringite in the XRD analysis. In the IR analysis Ettringite is very close to the significance found in this sample. (see appendix C)
----------	------------------	---

The samples that were taken had a very small amount making the analysis difficult. It might also be that these samples have been contaminated from nearby fracture minerals during actual sampling.

### D11. Poor versus good quality of cement samples

In the Lundby tunnel all samples analysed that originated from cement showed that portlandite was present, except for sample L2, which was the outer surface of the grouted borehole plug. A SEM picture of the the samples are shown in Figure 5.



**Figure 5. Two SEM-pictures of, left sample L1 and right, sample L2 from the Lundby tunnel.**

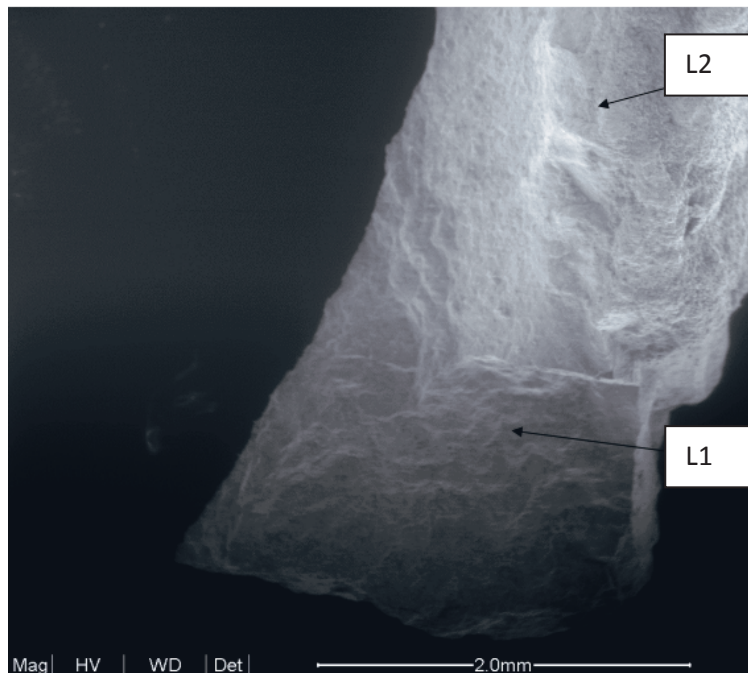
Sample L1 and L2 both originates from cement grout since they were taken from the borehole plug. In Figure 5 it seen that sample L1 shows rigid homogenous surface and for sample L2 is a more porous structure. L2 did not show any portlandite in the XRD and IR analysis.

## D12. Discussion and conclusions

With the question of how a fresh versus aged cement look like, three samples can be used; Samples L1 and L2 from the Lundby tunnel and sample C from the Telia tunnel.

In two of the samples from the Lundby tunnel portlandite was found as the dominant mineral phase. The SEM pictures showed a rigid surface. The samples were however from the grouted plug in the borehole and in this short time span of about 10 years the small leakages that may have occurred show no effect on the cement. However, the sample of the outer part of the grouted borehole showed a very porous surface with no portlandite. If this caused by dissolution of the cement through diffusion or occurred during the actual grouting is unclear. It is thought that a process called Taylor dispersion can occur and result in a local degradation of the cement. The sample can though be looked upon as a sample where the portlandite is absent resulting in poor quality cement and could even be the result of aging. The reasoning supports the hypothesis that the major mineral phase i.e., portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  which keeps the pH of concrete up to high values ( $>11$ ) has been dissolved from these samples.

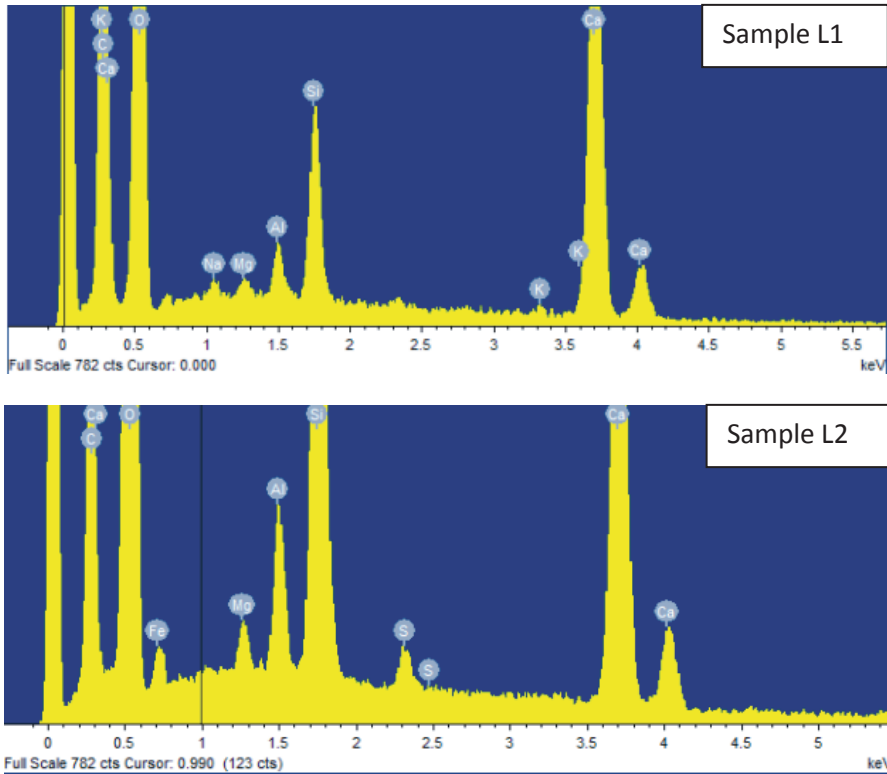
A SEM picture of a sample containing both the rigid surface in L1 together with more porous surface of L2 is found in Figure 6.



**Figure 6. One SEM picture of the grouted borehole plug in the Lundby tunnel containing both L1 and L2 sample.**

In the Figure 6 the transition from a rigid surface to a more porous one is evident. A SEM-EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) analysis is done as comparison which makes it possible to identify

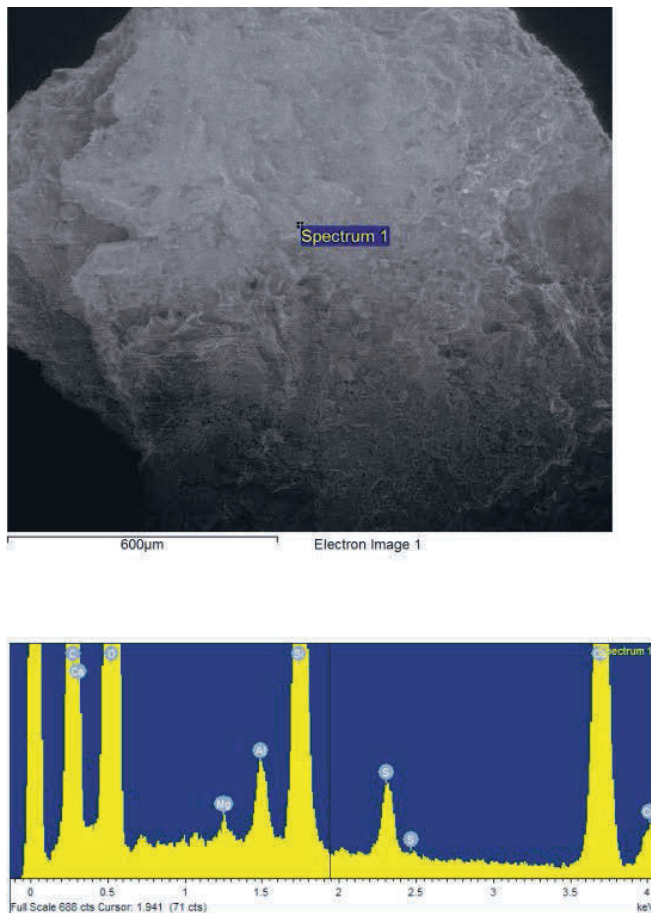
elements on the surface. However, we should keep in mind that for absolute values of the elements present in the surface layers requires very smooth and planar surfaces which these samples are not. EDX analysis of the L1 and L2 sample is shown in Figure 7 below.



**Figure 7. EDX spectrum for sample L1 on top and sample L2 in the bottom.**

The EDX showed that elemental composition of two samples is very similar. They contain carbon (C), calcium (Ca), silicon (Si) and several metals like iron (Fe), aluminum (Al) and magnesium (Mg). All these elements are found in cement. The EDX analysis shows also that both samples originate from cement.

For sample C in the Telia tunnel, there would be an indication of a sample of aged cement in a natural fracture.



**Figure 8. Above; a SEM picture of sample C in the Telia tunnel. Bottom; the combined EDX analysis of the SEM picture above.**

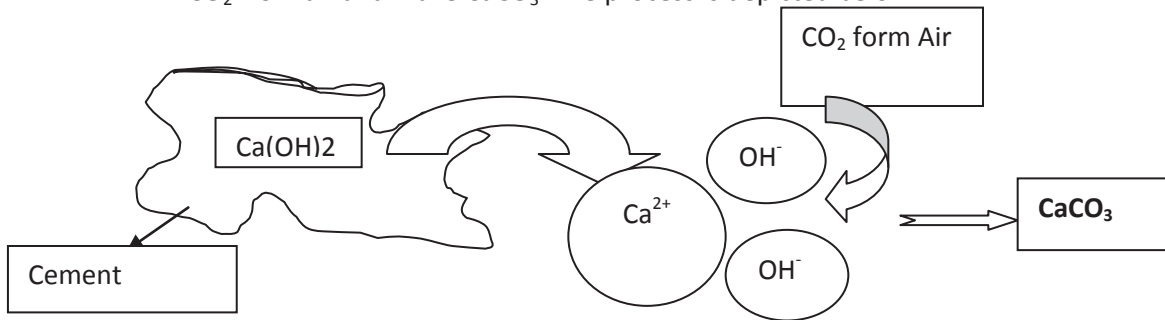
From the analysis of both the SEM picture and the EDX it is concluded that this sample is from cement grout. From the XRD and IR analysis it was shown that it lacks portlandite. The SEM pictures show a slightly porous surface but not as much as for sample L2 in the Lundby tunnel. This is then a sample of naturally aged cement where the only degradation is the flowing water surrounding it.

The chemical analysis of the samples collected from the Lundby tunnel and Telia tunnel conclude the following:

- 1) The samples from Lundby tunnel conclude that the samples L1, L3 and L5 are definitely like normal concrete as revealed by XRD, IR SEM analysis. The L2 sample has very porous structure and had no portlandite. The sample L2 is taken from outer edge of the hole which means that it might be the case that the release of solution containing  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{OH}^-$  might have reacted with the  $\text{CO}_2$  from air and generated  $\text{CaCO}_3$  which is dominant in this sample.
- 2) From the samples of the Telia tunnel the X-ray diffraction and IR show that the dominant phase of normal concrete i.e., portlandite is absent from all these samples. The dominant phase in the

samples A-D is  $\text{CaCO}_3$ . This means that the  $\text{Ca(OH)}_2$  has been dissolved from the concrete and material will most probably have  $\text{pH} < 11$  in the pore solutions. Consequently due to the further decrease in the pH of pore solution the aluminosilicate minerals and C-S-H amorphous phases will relatively easily be dissolved.

An observation is that in those samples where portlandite is absent there is  $\text{CaCO}_3$  present. One scenario is that due to dissolution of portlandite the  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{OH}^-$  ions are released to pore solution and solution acquires the high pH. This high pH will in turn facilitate the absorption of  $\text{CO}_2$  from air and make  $\text{CaCO}_3$ . The process is depicted below.



- 3) The main conclusion from SEM images of normal (L1, L5) cement compared with aged (L2) sample is the aged cement has very porous structure. SEM images support the XRD and IR analysis i.e., L1, L5 are close to normal concrete while L2 is mainly composed of Carbonates.
- 4) The Telia C has structure in between the normal and aged cement. Even though the portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) has dissolved from this cement as shown by XRD and IR it has relatively compact structure.
- 5) For quantitative estimation of chemical changes from EDX much more work is need.

## D13. Modeling

### D13.1. Introduction

The major objective of modeling is to understand how pH, amount of dissolved  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2$  (aqueous) and  $\text{CaCO}_3$  (calcite) may influence the solubility of the portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). In the modeling approach saturation indexes (SI) of different minerals are calculated according to the formula given below.

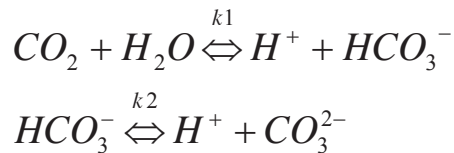
$$SI = \log Q - \log K$$

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

Here Q is the product of ion activities and K is the equilibrium constant. An unsaturated mineral will have positive SI and an oversaturated mineral will have positive SI. When SI has value 0 it means mineral is in equilibrium with the surrounding solution.

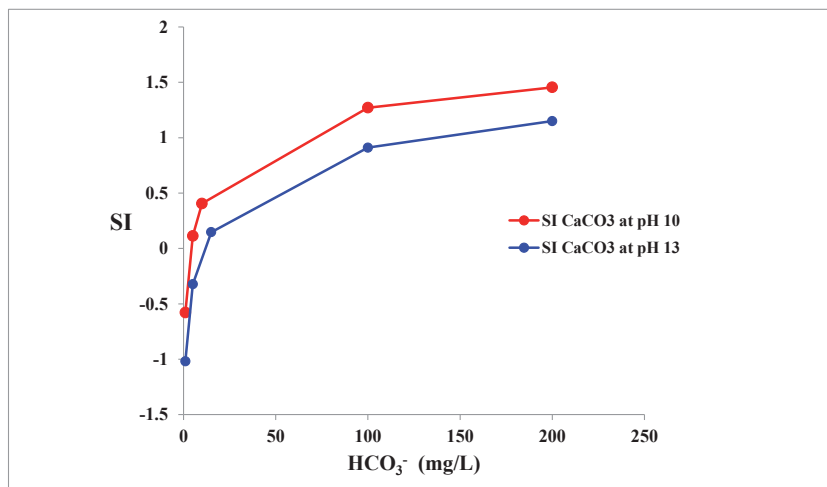
In order to mimic the real water interactions with the grouted material we have used the chemical composition of water samples from Lundby and Telia tunnels as shown in Appendix B.

The experimental results showed that in the aged samples the dominant phase was  $\text{CaCO}_3$  due to the release of  $\text{Ca}^{2+}$  from dissolution of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and further reaction with the  $\text{CO}_2$ . The solubility of  $\text{CO}_2$  in water can be described below:



By considering the above reaction for solubility of  $\text{CO}_2$  in water we have calculated the saturation index of Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) in the water samples of Lundby and Telia tunnels. We have considered two pH values i.e., pH 10 and 13. pH 10 is the pH which is measured for the water sample of Lundby tunnel. pH 13 is the expected pH in the pore solution of the grouted cement. Thus by calculating the SI indexes at pH 10 and 13 we shall mimic the effect of running water and pore water on the dissolution behavior of minerals.

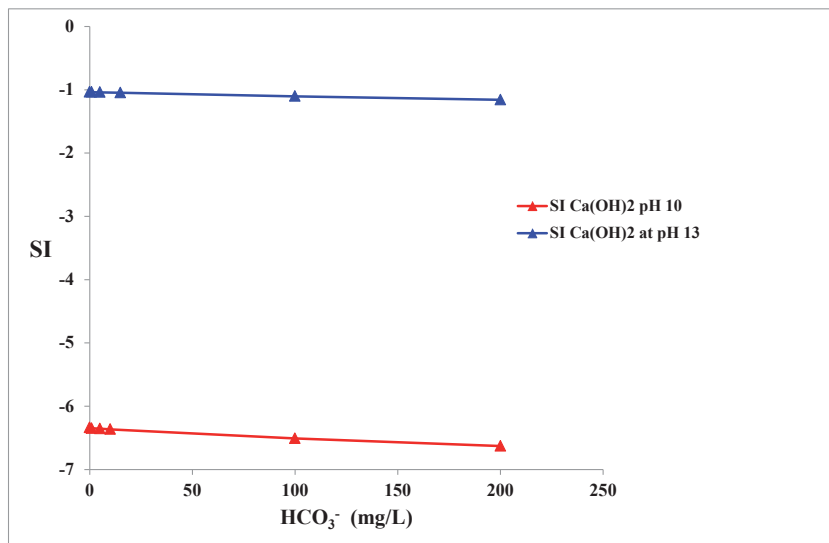
In the Figure 9 below the SI indexes of  $\text{CaCO}_3$  (calcite) at pH 10 and 13 are shown.



**Figure 9. Saturation indexes calculated by using the water composition of water sample taken from Lundby tunnel. The SI of  $\text{CaCO}_3$  is shown at increasing concentration of  $\text{HCO}_3^-$ .**

The figure shows that at 5 and 15 mg/L concentration of  $\text{HCO}_3^-$  in this solution the SI of  $\text{CaCO}_3$  becomes positive. This means that at very small amount of dissolved  $\text{CO}_2$  at pH 10 as well as at pH 13 the  $\text{CaCO}_3$  phase will be starting to form. This practically mean that as soon as the alkaline solution generated by the dissolution of portlandite will come into contact with  $\text{CO}_2$  the  $\text{CaCO}_3$  phase will be formed. Note that we have tested the same calculations by using  $\text{CO}_3^{2-}$  concentration and found similar results.

In the Figure 10 below the SI of  $\text{Ca(OH)}_2$  in the solution of Lundy tunnel is shown.



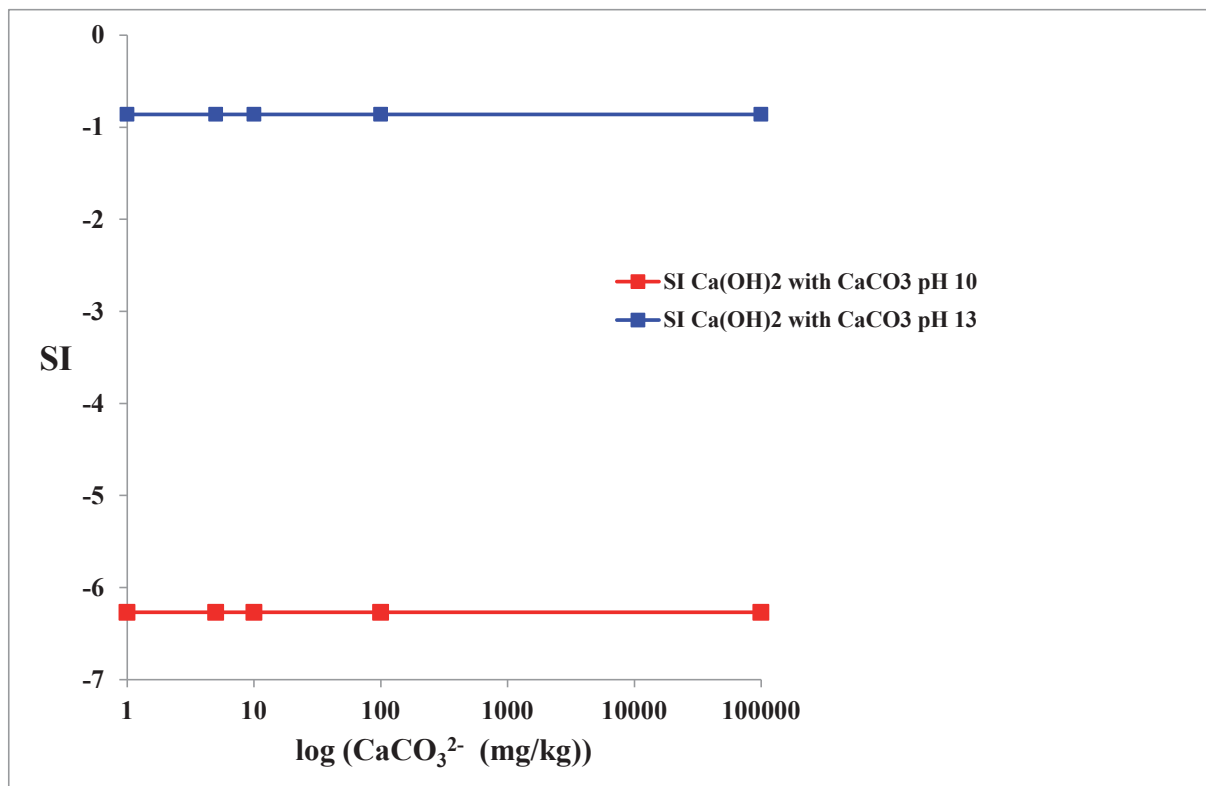
**Figure 10: Saturation indexes of  $\text{Ca(OH)}_2$  in the water solution of Lundy tunnel.**

The above figure illustrate that the portlandite will be soluble (SI negative) at pH10 and 13. The figure also illustrate the fact that solubility of  $\text{Ca(OH)}_2$  increases at lower pH values than higher pH values.

The next question explored was that how the solubility of portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) is affected by the formation of  $\text{CaCO}_3$ ?. This may illustrate the process of dissolution  $\text{Ca(OH)}_2$  in the presence of  $\text{CaCO}_3$ .

Saturation index of  $\text{Ca(OH)}_2$  in the presence of  $\text{CaCO}_3$  1 -100000 mg/kg were calculated. The results are shown in the figure below.





**Figure 11: SI index of  $\text{Ca(OH)}_2$  in the water sample of Lundby tunnel at varying concentration of  $\text{CaCO}_3$ .**

The results indicate that the portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) will be soluble in the presence of  $\text{CaCO}_3$ . This means that thermodynamically the portlandite from the grouted material will be dissolved no matter how much carbonation of the sample has happened. On the other hand formation of  $\text{CaCO}_3$  may affect the kinetics of dissolution process of  $\text{Ca(OH)}_2$  due to pore structural changes of the grouted material.

We have also performed similar calculations for Telia tunnel water samples. The results showed the same trends therefore are not shown in this report. Full results will be present in separate report.

The saturation indexes of quartz and amorphous silica for Lundby and Telia tunnels water samples are shown in Table 5 below.

Sample	Lundby Tunnel	Telia Tunnel
Quartz	0.075	0.433
Amorphous silica	-1.1123	-0.8520

The results showed that in Lundby tunnel sample pH 10 and dissolved amount of  $\text{SiO}_2$  (mg/L) the solution is saturated with respect to the Quartz and undersaturated with respect to the amorphous silica. The same trend is seen for Telia tunnel which had pH 8.3 and 17 mg/L dissolved  $\text{SiO}_2$ . There is slightly higher dissolution of silica at higher pH than at lower pH values.

### **D13.2. Conclusion based on Modeling:**

The main conclusions of modeling are following;

- i) In the highly alkaline solution generated by the dissolution of portlandite the  $\text{CaCO}_3$  phase will be formed at very low dissolved concentrations of  $\text{CO}_2$ .
- ii) The solubility of portlandite is not affected by the amount of  $\text{CaCO}_3$  but is highly dependent on the pH of the solution. If the pH of water is low there will be more dissolution of portlandite compared with the solution of high pH values.
- iii) Amorphous silica is more soluble than quartz in these water environments. A slight tendency of increase in solubility with increasing pH is also possible.

### **D14. Discussion regarding performance of grouting**

- The studied cement in Lundby are samples taken from the grouted borehole plug. With knowledge of how the grouting was done it means that the plug most certainly consist of a grout that was initially grouted with low water to cement ratio. This means that no grout samples from the actual fractures were found. Never the less it was by "luck" that we were able to find a poor cement in the grouted borehole and is probably due to "erosion" of the grout during actual grouting of the borehole
- If the plugging of the borehole was successful the fractures would also have to some extent been sealed. This means that it would have been possible to find some grout n the fractures but were not. More boreholes would have been appropriate but was not done.
- The cored borehole leaked some 0,2-0,5 l/min after the drilling was finished and this was also the water sampled for ground water analysis. The leakage indicate not sealed fractures even though that this part of the tunnel allot of grout was pumped. The borehole were after core drilling grouted with INJ30 with a WCR of 0,8 (2% setcontrol II).
- In the Telia tunnel, cement in one sample was found and in a natural fracture some 10 meters along the core. The cement had elements of portlandite and may be due to that it has been dissolved and the cement is not stable anymore.

## References

1. Gustafson G, Hagström, **Abbas Z** . FOU-Väst, Underhåll av berganläggningar, *Beständighet av cementinjektering*. Avd. f. geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, **2008**.
2. **Abbas, Z**. Injekterings Beständighet-Fortsatta Studier. Project Report 1. **2011-07-10**
3. **Abbas, Z**. Injekterings Beständighet-Fortsatta Studier. Project Report 2. **2012-02-22**

# BeFo



Box 5501  
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773