

UNDERHÅLL AV BERGANLÄGGNINGAR

ETAPP II

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. Även om man jämför med den mycket stora investering som en tunnel innebär, kan ofta det kapitaliserade värdet av det framtida underhållet vara än större. Detta kan i värsta fall leda till en eftersläpning i underhåll, nedsatt livslängd och sänkt säkerhetsnivå för tunneln eller bergrummet.

Detta projekt har haft som avsikt att analysera de processer som leder till behov av bergunderhåll. I bergunderhållet ingår komponenter som samverkar med berget i avsikt att stabilisera, täta eller dränera tunneln eller bergrummet: sprutbetong, betong, bultar, dräner och injekteringar.

Genom experiment och observationer har målsättningen varit att bedöma den tekniska livslängden för de aktuella komponenterna och därmed underhållsfrekvensen. För undersökningarna har anlitat forskningsinstitut (CBI, KIMAB) samt högskolor (CTH, GU). En målsättning har varit att data från undersökningarna skall kunna användas som ingångsdata i analyser av kostnader för byggande och underhåll av berganläggningar över anläggningens livslängd (LCC-analys).

Projektet har drivits i samverkan med en referensgrupp som sammanträtt regelbundet under projektets gång. Referensgruppsmedlemmarna representerar olika ekonomiska och tekniska intressen som finns i en tunnel eller annan underjordsanläggning: ägare, projektörer och entreprenörer. Gruppmedlemmarna är Björn Albino (Tyréns), Helen Andersson (deNeef), Anna Andrén (Banverket), Bo Blixt (GE), Lars-Göran Dahlqvist (Besab), Lars-Olof Dahlström (NCC), Tommy Ellison (Besab), Ulf Lindblom (Gecon), Bengt Ludvig (Petroteam), Kent Lundin (TeliaSonera), Kjell Windelhed (Vägverket) samt Pär Åhman (BI, FoU Väst).

Inom projektets ram har utförts ett examensarbete vid Göteborgs Universitet av Jim Ekliden rörande dräner, se Bilaga 5.

Projektet har finansierats genom bidrag från Svenska byggnadsentreprenörers utvecklingsfond SBUF (genom FoU Väst), Banverket, Göteborgs Energi AB, TeliaSonera AB samt från AB Besab.

Referenser återfinns i de uppdragsrapporter som ligger som underlag för denna Slutrapport. Dessa finns i Bilagorna 1-4 samt 6.

Göteborg i mars 2009

Ulf Lindblom

projektledare

INNEHÅLL

FÖRORD	2
1 INLEDNING.....	8
1.1 Underhållskrävande komponenter och processer i en berganläggning	9
1.2 Nedbrytningsprocesser och teknisk livslängd.....	10
1.3 Bergunderhållet i ett livslängdsperspektiv	10
1.4 Sammanfattning av arbetena i Etapp I.....	12
1.4.1 Målsättning	12
1.4.2 Förbättrad teknik för bergunderhåll.....	13
1.4.3 Statusbestämning och riskbeskrivning för förstärkningar.....	13
1.4.4 Metoder för restaurering av förstärkningssystem.....	14
1.4.5 systematisk underhållsplanering.....	14
1.5 Upplägg av och inriktning för arbetena i Etapp II.....	14
1.5.1 Syfte	14
1.5.2 Genomförande	15
2 LCC-MODELLEN OCH DESS INGÅENDE PARAMETRAR.....	17
2.1 Inledning	17
2.2 Underhållsarbeten.....	17
2.3 Stillestånd.....	18
2.4 Underhållsplanering.....	18
2.5 LCC-modellen.....	18
2.6 Indata till LCC-modellen	19
3 TÄNKBARA ORSAKER TILL UNDERHÅLLSBEHOVET	21
3.1 Inledning	21
3.1 Cementmaterial	21
3.1.1 Sprutbetong.....	21
3.1.2 Betongkonstruktioner	22
3.1.3 Injekteringar.....	22
3.2 Bultar	23
3.2.1 Slakbultar.....	23
3.2.2 Förspända bultar och stag.....	23

3.3	Dräner	23
3.4	Aktuella publikationer	24
4	NEDBRYTNING AV SPRUTBETONG I BERG - PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP	25
4.1	Inledning	25
4.2	Vad är en sprutbetong?	25
4.3	Cementsystemet i sprutbetong	26
4.3.1	Tillstyvnadsacceleratorer och betong	26
4.3.2	Tillstyvnadsacceleratorer	27
4.3.3	Vattenglas	27
4.3.4	Alkaliaccelerator	28
4.3.5	Alkalifri accelerator	28
4.4	Sprutbetongs beständighet	29
4.4.1	Miljö och randvillkor	30
4.4.2	Naturliga omvandlings och nedbrytningsprocesser	30
4.4.3	Grundvatten och dess effekt på betong	32
4.5	Materialanalyser på sprutbetong	32
4.5.1	Orientering	32
4.5.2	Analysteknik	32
4.5.3	observerade skademekanismer och omvandlingar	33
4.5.4	Exempel på resultat av materialanalyser	34
4.5.5	Slutsatser av materialtesterna	36
4.6	Sammanfattning	37
5	KORROSION HOS STÅL I BERG – PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP	38
5.1	Kunskapsläget	39
5.1.1	Korrosionsmiljöer	39
5.1.2	Korrosionsmekanismer	39
5.2	Rekommendationer för utförande av bultsättning	42
5.3	Kontroll av befintliga installationer	42
5.4	Fältförsök i tunnlar	43
5.4.1	Inledning	43
5.4.2	Provmethodik	43
5.4.3	Kemiska analyser	44
5.4.4	Resultat	44

5.4.5 Jämförelse med tyska normen DIN 50 929	47
5.4.7 Slutsatser	48
6 IGENSÄTTNING AV DRÄNER – PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP	49
6.1 Orsaker till igensättning av dräner.....	49
6.1.1 Kemisk utfällning	50
6.1.2 Biologisk utfällning	51
6.1.3 Suspenderat material.....	55
6.1.4 Utrasat berg- betongmaterial	55
6.1.5 Isbildning.....	56
6.2 Fältförsök	56
6.2.1 Undersökta tunnlar.....	56
6.2.2 Statusbedömning av dräner	58
6.2.3 Referenstunnlar.....	60
6.3 Diskussion och slutsatser	60
6.4 Referenser	61
7 NEDBRYTNING AV INJEKTERINGSCEMENT I BERGSPRICKOR – PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP.....	63
7.1 Bakgrund.....	63
7.2 Grundvattenkemi	63
7.2.1 Inledning.....	63
7.2.2 Processer i markzonen.....	63
7.2.3 Salt grundvatten.....	64
7.2.4 Påverkan på vattenkemin av vattenuttag och berganläggningar	64
7.2.5 Saltvattenuppträngning	65
7.2.6 Grundvattenbildningsförhållanden i stadsbebyggelse	65
7.2.7 Grundvattendata i SGU:s databas.....	66
7.2.8 Använda typvatten	68
7.2.9 Sammanfattning.....	69
7.3 Mekanisk erosion av cementbruket	69
7.4 Transportmekanismer för lakningsprodukter från injektering.....	69
7.4.1 Flödande vatten.....	69
7.4.2 Diffusion.....	71

7.4.3	Indikationer på urlakning av injektering i tunnlår	72
7.4.4	Sammanfattning	73
7.5	Nedbrytning av cementbruk i bergsprickor	74
7.5.1	Inledning	74
7.5.2	Åldringsmekanismer	74
7.5.3	Sammanfattning	76
7.6	Lakningsexperiment	76
7.6.2	Metodik – satsvisa lakningsförsök	77
7.6.3	Kemiska analyser av vätskefas och fast fas	78
7.6.4	Provpreparering	78
7.6.5	Lakningsförsök	78
7.6.6	Vattenanalyser	78
7.6.7	Fastfasanalyser	81
7.7	Modellering av cementlöslighet i olika vattenmiljöer	83
7.7.1	Inledning	84
7.7.2	Löslighetsmodellering	84
7.7.3	Effekt av pH och jonsammansättning på mineralfasers löslighet	87
7.7.6	Slutsatser av kemisk modellering	90
7.8	Konsekvenser för beständigheten hos cementmaterial i berg	91
8	ANVÄNDNING AV TESTDATA I LCC-MODELLEN	93
8.1	Inledning	93
8.2	Underhållsfrekvens	94
8.2.1	Berget	94
8.2.2	Sprutbetong	94
8.2.3	Betongkonstruktioner	95
8.2.3	Bultar	95
8.2.4	Dräner	95
8.2.5	Injekteringar	95
8.2.6	Kalkylblad	96
8.3	Underhållskostnader	96
8.4	Underhållsinspektioner	96
8.4.1	Intervaller	96
8.4.2	Kostnader	96

Underhåll av berganläggningar – Etapp II

SBUF Utvecklingsprojekt 11844. Slutrapport mars 2009

8.5 Stilleståndskostnader	96
8.6 Kalkylränta	97
9 FÖRSLAG TILL FORTSATTAR BETEN (ETAPP III)	97
9.1 Tidsförlopp för nedbrytning av sprutbetong	97
9.2 Tidsförlopp för korrosion av stål i bergförstärkningar	97
9.3 Processer och tidsförlopp för nedbrytning av dräner.....	97
9.4 Tidsförlopp för nedbrytning av injekteringsmaterial i bergsprickor	98
9.5 Utveckling av LCC-modellen	98
BILAGOR	99

1 INLEDNING

Byggande av tunnlar medför ett långsiktigt underhållsansvar. Av ekonomiska och säkerhetsmässiga skäl är det nödvändigt, att val av lösningar och teknisk utrustning görs mot bakgrund av livslängdsanalyser där även drift- och underhåll beaktas.

Underhållsarbetet skall se till att den säkerhetsnivå som byggts in i tunneln upprätthålls genom att funktionskrav uppfylls. Genom att planera underhållet långsiktigt kan stora ekonomiska fördelar uppnås.

Med början under 1950-talet startade en kraftig utbyggnad av städernas infrastruktur i form av distributionssystem för vatten, avlopp, elektricitet och teleföbindelser. I storstäderna, främst Stockholm och Göteborg valdes, av omsorg om miljö och i syfte att frigöra utrymme för andra verksamheter, i många fall förläggning till bergtunnlar. Även transformatorstationer, telefonväxlar och reningsverk blev av säkerhetsskäl ofta förlagda i undermarksanläggningar.

Användningen har efter hand utökats med bland annat ledningar för fjärrvärme och -kyla samt media för data. Funktionerna är av mycket stor betydelse för samhället. En eventuell kollaps eller annan oförutsedd händelse kan leda till allvarliga ekonomiska konsekvenser för både enskilda människor, samhällsfunktioner och näringslivet.

Under senare år har även 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. Kan arbetet ske planerat och med effektiva metoder kan stora samhällsekonomiska vinster göras.

Äldre tunnlar förstärktes traditionellt med ingjutna bultar utan speciellt korrosionsskydd, vid svaga partier kompletterad med sprutbetong som i allmänhet var oarmerad. Tätning mot vattenläckage gjordes 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 förstärkningssystemen har på senare år ofta installerats dränsystem för grundvatten i avsikt att förbättra miljön i framförallt trafiktunnlar. Dessa system är ibland mycket underhållskrävande.

Eftersom många tunnlar och berggrum i vårt land är mer än tjugo år gamla, är det av ovan angivna skäl mycket sannolikt att förstärkningarna inte håller samma klass som varit avsikten vid utförandet. För nya underjordsanläggningar bör underhållet planeras i ett tidigt skede för att nå en god driftekonomi, samt för att den avsedda livslängden skall uppnås.

Forskningen i detta projekt har som målsättning att belysa underhållsbehovet i berganläggningar och hur detta kan planeras i ett livslängdsperspektiv.

1.1 UNDERHÅLLSKRÄVANDE KOMPONENTER OCH PROCESSER I EN BERGANLÄGGNING

I många fall kan inredningen och installationer i en tunnel eller ett bergrum, såsom vägar och spår, belysnings- och signalsystem, ventilationsanläggningar, pumpar, rör och kablar dominera underhållsinsatserna såväl tids- som kostnadsmässigt. Sådant underhåll hör dock inte till det bergtekniska området. Till inredning kan räknas även olika typer av membran som installeras i en tunnel som skydd för inrinnande grundvatten.

I det aktuella projektet begränsas analysen till *de bärande bergsystemen* och *systemen för vattenkontroll*, nämligen

- Berget självt, d.v.s. dess bärande, oförstärkta struktur
- Bergförstärkningarna, sprutbetong, bultar och betongkonstruktioner
- Berginjekteringar
- Dräner

De ovan nämnda bergtekniska systemen påverkas under tunnelns livslängd av nedbrytningsprocesser och kräver löpande underhåll för att tunnelns stabilitet och funktion inte skall äventyras¹. Det sammanfattande namnet för dessa åtgärder kallas i rapporten för *Bergunderhållet*.

Driftstopp som orsakas av okontrollerade ras eller vattenproblem kan bli mycket problematiska och kostsamma och kan innebära personfara. En primär uppgift för bergunderhållet är att förebygga denna typ av dramatiska händelser. Å andra sidan leder underhållsprogram med överdrivet tät frekvens också oönskat till stora driftsstörningar i tunneln. Det gäller att finna ett optimum, där en god funktion av tunneln säkerställs under hela driftstiden till lägsta möjliga kostnad.

Detta projekt har som målsättning att analysera underhållsinsatserna på de nämnda tekniska systemen i ett livslängdsperspektiv och att ge rekommendationer på lämpliga underhållsprogram, kvalitetsnivåer och underhållsfrekvenser. För att nå detta mål krävs svar på bland andra följande frågeställningar:

- Hur ser nedbrytningsförloppen ut för de bergtekniska systemen?
- Hur ofta krävs åtgärder för att säkerställa systemens funktion?
- Vilken kvalitetsnivå krävs på systemen efter underhållsinsatserna?

¹ Kostnader för skötsel och drift av infiltrationsanläggningar och dränpumpar i tunneln har inte heller medtagits i analysen utan har ansetts ingå i de löpande driftskostnaderna, inte i underhållet.

- Vilken teknik, tid och kostnad kräver underhållsinsatserna per tillfälle?
- Vad blir tiden och kostnaden för stilleståndet vid underhållstillfällena?

1.2 NEDBRYTNINGSPROCESSER OCH TEKNISK LIVSLÄNGD

Nedbrytningsprocesserna för de studerade bergtekniska systemen är i stora drag följande:

- Sprutbetong och betong: *kemisk nedbrytning* som ger förlust av vidhäftning mot berg och bärförmåga
- Bultar: *korrosion* som ger förlust av drag- och skjuvhållfasthet i stålet
- Dräner: *igensättning* som ger förlust av dränagesförmåga
- Injektering: *kemisk nedbrytning* som ger förlust av tätningseffekt i bergsprickor

Som noterats tidigt i projektet är dessa processer i huvudsak drivna av den pågående grundvattenströmningen mot anläggningen. *En välgrundad hypotes blir därför, att en långt driven injekteringsprocess under byggtiden blir lönsam i ett livslängdsperspektiv även om den skulle vara mycket dyr att utföra.*

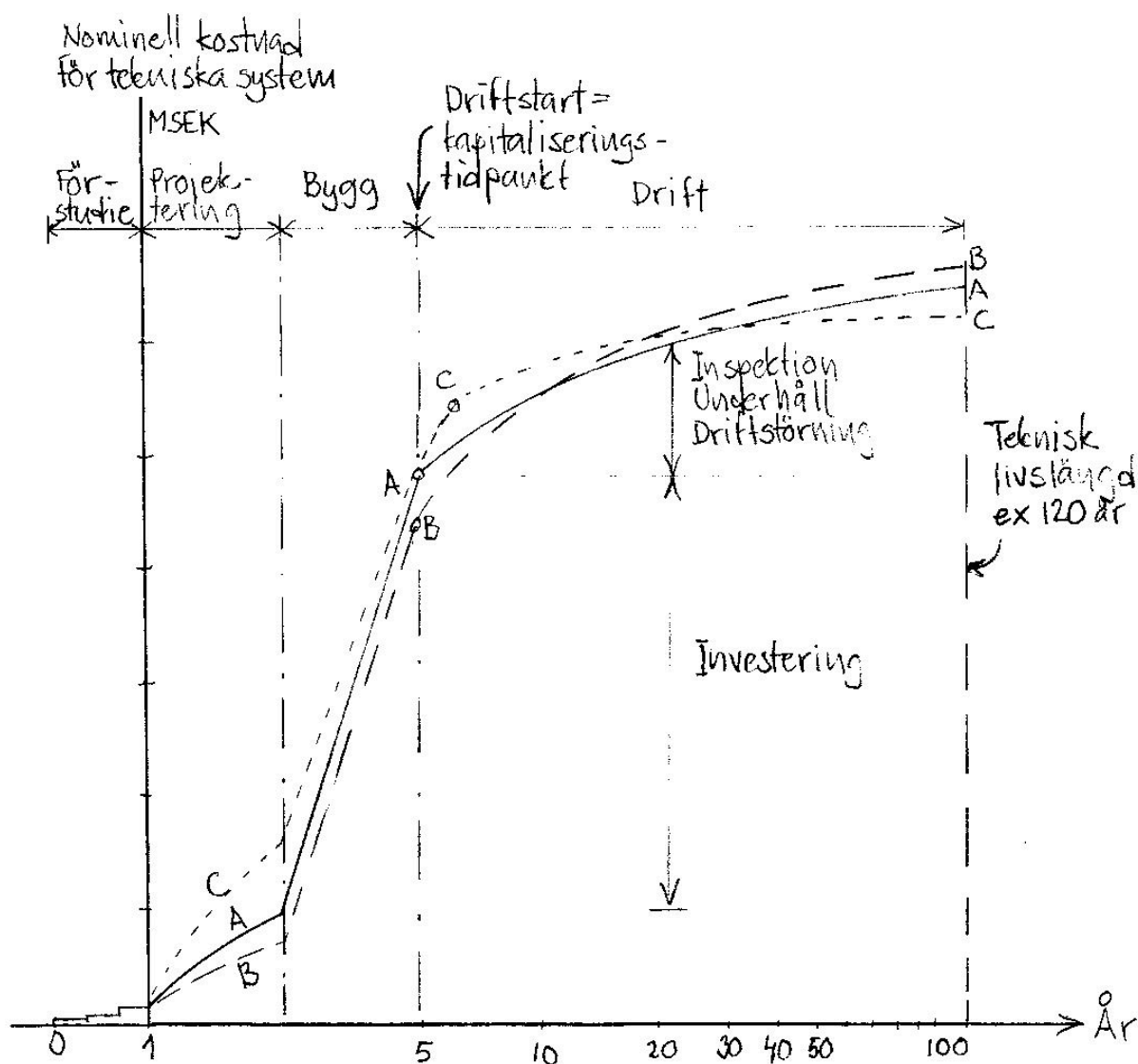
Efter viss tid innebär nedbrytningsprocesserna att systemen måste repareras eller bytas ut. Felen upptäcks vid inspektionerna och rättas till vid underhållstillfällena. Frekvensen för underhållsinsatserna bestäms av den tekniska livslängden för de bergtekniska systemen samt av den kvalitetsnivå på förstärkningar och tätningssystem som erfordras efter underhållet.

Inom projektets ram har de nedbrytningsprocesser som nämnts ovan studerats genom provtagningar och laborietester. Resultaten framgår av avsnitten 3 – 7 i denna rapport. Användningen av resultaten som ingångsparametrar i LCC-modellen diskuteras i avsnitt 8.

1.3 BERGUNDERHÅLLET I ETT LIVSLÄNGDSPERSPEKTIV

Figur 1 visar det principiella utseendet av de ackumulerade kostnader som en ägare av en berganläggning drabbas av från projekttid till avslutad användning av anläggningen. För en trafikunnel kan tidsspannet röra sig om 100 år eller mer. Tidsaxeln är för överskådliggighets skull angiven i logaritmisk skala.

Kostnadsnivåerna i figuren är fiktiva och varierar från projekt till projekt. Observera att figuren enbart redovisar ackumulerade kostnader för bergunderhållet, det vill säga de bärande och vattenkontrollerande bergsystemen. Det är dessa kostnader som skall optimeras under tunnelns driftstid. Diagrammet tar inte hänsyn till kapitaliserade nuvärden av insatserna. Detta görs vid tillämpningen av själva LCC-modellen.



Figur 1.1. Nominella kostnader för de studerade tekniska systemen i olika projektfaser

Bergprojekt börjar vanligen med en *förstudie* som kan ta något eller några år i anspråk. Kostnaden för denna studie är i allmänhet blygsam.

Efter projektbeslut vidtar *projekteringsfasen* som kan vara relativt omfattande och pågå i flera år. Kostnaden för detta arbete ligger vanligen under 10 % av hela investeringen i tunneln eller bergrummet.

Härefter kommer *byggfasen* som kan ta ungefär samma tid i anspråk som projekteringen, men som vid stora projekt kan pågå betydligt längre. Investeringen under byggfasen är mångdubbelt

större än projekteringskostnaden. Figuren visar kostnader för de underhållskrävande, bergtekniska systemen. Inventarier i tunneln, som vägar, spår, el- och signalsystem, rör m.fl., är som nämnts tidigare undantagna.

Efter idrifttagning utförs regelbundna inspektions- och underhållsarbeten på de tekniska systemen, fram till den tidpunkt, då anläggningen läggs ner. Kostnader under driftsfasen summeras endast i figuren.

Den heldragna kurvan A i Figur 1.1 antas visa ett standarutförande av en berganläggning. Genom att förenkla proceduren med en enklare design av de bärande och vattenkontrollerande systemen, kan man uppnå lägre projekterings- och byggkostnader, den streckade kurvan B i figuren. Resultatet kan bli, att den lägre kvaliteten ger högre underhållskostnader och leder till högre livscykelkostnad för projektet.

Å andra sidan kan en högre kvalitet med högre produktionskostnad ge minst underhållsbehov och den lägsta livscykelkostnaden, kurva C i figuren.

1.4 SAMMANFATTNING AV ARBETENA I ETAPP I

1.4.1 MÅLSÄTTNING

Det är av stor vikt att entreprenadbranschen får tillgång till effektiva hjälpmedel för att bestämma status och ange lämpliga livstidsförlängande åtgärder för förstärkningar och tätning. Detta för att upprätthålla en tillfredsställande säkerhet mot ras eller annan skada. På detta sätt kan bergentreprenörer bistå huvudmännen att hålla samhällsviktiga berganläggningar i långvarig drift.

Om osäkerheten är stor när det gäller förstärkningarnas status, kan det leda till antingen underdimensionerat underhåll vilket kan ge upphov till kollaps, eller till att underhållet överdimensioneras. I båda fallen blir kostnaderna större än vid ett optimalt underhåll.

En nuvärdesberäkning av kommande underhåll kan mycket väl visa att kostnaderna vida överstiger investeringskostnaden. För att en sådan analys skall vara meningsfull måste kunskapen ökas om hur berget och de installerade förstärkningssystemen bryts ner med tiden. Exempelvis behövs kunskap om korrosion i bergbultar, förlorad vidhäftning hos sprutbetong och minskad tätningseffekt för injekteringsmaterial.

Svårigheter att komma åt arbetsplatsen på grund av inbyggnader, installationer och användningssätt är styrande för de kostnader som uppstår i samband med underhåll. Tillgängligheten är ofta ett hinder för att kunna utföra underhållsarbetet på ett effektivt sätt. Det kan ofta vara lönsamt att under en kort period göra begränsningar i brukarens tillgänglighet för att kunna utföra underhållsarbetet på ett totalekonomiskt sätt.

Etapp I av projektet hade som målsättning att analysera befintlig praxis samt föreslå förbättringar och rationaliseringar som kan göras när det gäller underhåll av berganläggningar.

Projektet har omfattat bergunderhåll, varmed avses underhåll av installationer som samverkar med berget i avsikt att stabilisera, täta eller dränera tunneln eller bergrummet, det vill säga sprutbetong, bultar, betongkonstruktioner, dräner och injekteringar.

Huvudmålsättningen med den första projektetappen var att beskriva teknik för att identifiera status hos installerade förstärkningar, samt att ange åtgärder för att vidmakthålla dessas funktion i befintliga tunnlar och bergrum. Tanken var att projektresultaten skulle kunna användas som en bas för att utveckla kalkyl- och designmetoder för förstärkningar, som tar hänsyn till åldrande och framtida underhåll hos komponenterna (LCC-analys). För att konkretisera målsättningen enligt ovan gjordes inom projektets ram en kartläggning av underhållsbehovet i en äldre ledningstunnel i Göteborg (Citytunneln).

Av stor betydelse för etapp I av projektet var att ta del av den erfarenhet som finns av tunnelunderhåll i Norge.

1.4.2 FÖRBÄTTRAD TEKNIK FÖR BERGUNDERHÅLL

För att en berganläggning skall vara kostnadseffektiv, räknat på hela driftsperioden, måste förstärkningssystemen vara rimligt beständiga, samt utformade så att inspektion och underhåll kan utföras på ett enkelt och tillförlitligt sätt. Detta har hittills i många fall inte fått tillräcklig uppmärksamhet i designskedet. I slutrapporten för Etapp I av projektet listades följande förslag till teknikutveckling :

- Material och metoder med bättre beständighet kan användas i högre utsträckning. Olika konstruktionselement bör ha ungefär samma kvalitetsnivå. Därigenom kan inspektionsintervallerna samordnas och underhållet kan planeras.
- Konstruktionselement kan förberedas för återkommande inspektion. Eventuellt kan mätdon byggas in från början, och kanske med elektronisk ”skvallerfunktion”. Detta skulle leda till att inspektion kan utföras snabbare, och resultaten blir säkrare.
- Ersättning av uttjänta konstruktionselement kan förberedas, genom att utrymme reserveras eller genom utbytbarhet. Tid och kostnader för att ta bort gammal förstärkning, eller leta lämplig plats för nya förstärkningar kan då sparas.
- Installationer kan dessutom utföras så att åtkomligheten för inspektion och underhåll underlättas. Genom att utföra installationer som lätt kan demonteras eller flyttas kan tid och kostnader sparas
- Bergutrymmet kan förberedas för inspektion och underhåll.
- Framtida installationer kan förberedas. Nya installationer innebär ofta komplicerade och kostsamma förändringar och förstärkningar.

1.4.3 STATUSBESTÄMNING OCH RISKBESKRIVNING FÖR FÖRSTÄRKNINGAR

För att kunna göra en bedömning av säkerheten mot instabilitet, fastslogs i Etapp I att det krävdes utveckling av pålitliga metoder att bestämma statusen för enskilda förstärkningselement på ett rationellt sätt. Enbart okulär bedömning bedömdes ha stora

begränsningar när det gäller att avgöra status och underhållsbehov för exempelvis bergbultar och sprutbetong.

Statusen har ett starkt samband med den omgivande geologiska situationen. Den ansvarige besiktningsmannen i en tunnel har mycket svårt att bedöma såväl sannolikhet för som konsekvensen av kollaps i förstärkningarna utan kännedom om bergets egenskaper bakom förstärkningen, såsom krossningsgrad, bergtryck, vattenförande egenskaper, grundvattenkemi. m.m.

Projektetapp I gjorde ett försök att ge underlag till riskbedömningar i samband med inspektioner av berganläggningar för kartläggning och prioritering av underhållsbehovet.

1.4.4 METODER FÖR RESTAURERING AV FÖRSTÄRKNINGSSYSTEM

Det finns ett stort behov av utveckling av säkra och produktionsanpassade arbetsmetoder för restaurering av förstärkningar. De bör bygga på slumpvis provning av valda delar av förstärkningen, varur ett lämpligt program för tunnelns statusuppgradering skall kunna tas fram på statistisk grund.

Slutrapporten för Etapp I beskrev sådana metoder.

1.4.5 SYSTEMATISK UNDERHÅLLSPLANERING

I Etapp I av projektet konstaterades, att en systematisk underhållsplanering bör utföras för tunnelprojekt. Underhållsplanen bör leda till, att den säkerhetsnivå som byggts in i tunneln upprätthålls och att angivna funktionskrav uppfylls under driftstiden.

För att kunna uppnå detta, föreslog slutrapporten för Etapp I att:

- Underhållsvänliga konstruktions- och utrustningslösningar används i projekteringsfasen
- Behovsbaserad resursanvändning tillämpas, där underhållsinsatsen fortlöpande bedöms, korrigeras samt anpassas efter de faktiska behoven
- En enhetlig standard används för tunnlar med liknande trafikmängd när tunnlar ligger längs samma vägsträckning
- Erforderlig personell kompetensnivå säkerställs i olika led av organisationen (projektering, planering, byggnation, drift)
- Allt underhållsarbete dokumenteras, såväl vad gäller planlagda som akuta insatser. Dokumentationen skall kunna verifiera uppnådd standard och eventuella avvikelser

1.5 UPPLÄGG AV OCH INRIKTNING FÖR ARBETENA I ETAPP II

1.5.1 SYFTE

Huvudsyftet med projektets Etapp II var att söka åldringsförloppen för bergförstärkningarna (till vilka räknas åtgärder för vattenkontroll) i olika tunnelmiljöer. Dessa måste vara kända för att en realistisk bedömning av underhållskostnaderna över tid skall vara möjlig.

Tidsförloppen för åldrandet blir olika vid olika förhållanden i berganläggningen. Exempelvis kommer förstärkningssystemen i en helt torr tunnel förmodligen inte drabbas av någon nedbrytning alls under anläggningens livslängd, medan en våt tunnel med aggressivt grundvatten kan få svåra skador efter relativt kort tid. Väl utförd sprutbetong kan klara långa perioder utan degradering, medan en slarvigt utförd sprutning kan förlora vidhäftning och hållfasthet redan efter några år. Att klarlägga dylika tidsförlopp är därför centralt för bedömningen av såväl frekvens som omfattning av underhållet.

De åldringsförlopp i bergmiljö som studerades var:

- Nedbrytning av cementmaterial
- Korrosion hos stål
- Igensättning av dräner

Målet var att genom erfarenhetsåterföring och experiment inom projektets ram beskriva tidsförloppen och använda dessa som ingångsparametrar i LCC-analysen.

En tunnelägare som har dessa uppgifter tillgängliga, kan planera underhållsinsatserna på ett optimalt sätt. Vid nybyggnation kan utförandekvaliteten anpassas så, att underhållsinsatserna begränsas. Exempelvis kan stora insatser med efterinjektering under byggnadstiden visa sig vara en mycket lönsam investering, sett ur ett livslängdsperspektiv.

1.5.2 GENOMFÖRANDE

En hel del kunskap finns redan om de processer som skapar degradering av elementen som ingår i bergförstärkningar, såsom korrosion hos stål och nedbrytning av betong. Dock är kunskapen om *processernas tidsförlopp* under varierande externa förhållanden mycket mer begränsad. Det är sådan information som måste ingå i ingångsparametrarna för en adekvat LCC-analys och som söktes i detta projekt.

För *nedbrytning av cementmaterial i bergrumsmiljö* visade det sig att empiriska kunskaper saknades om tidsförloppen. Därför utfördes åldringsexperiment på cementmaterial inom projektets ram. Resultaten är i princip användbara för såväl sprutbetong, gjuten betong som cementinjektering. Med hänsyn till tidsramen var dessa experiment av typen "accelererade tester", enligt rutiner som utarbetats för studier av långtidsegenskaper av byggnadsmaterial. Beskrivning av åldringsförloppen har en tvärvetenskaplig karaktär, med kopplingar till olika kemiska discipliner (hydrogeologi, korrosionskemi, silikat kemi, hydrokemi). Projektet anlätade därför expertis på dessa områden vid CBI, CTH och GU, där också experiment genomfördes. Forskargruppen från projektet hade en aktiv medverkan vid planeringen och genomförandet av forskningen.

För klarläggande av *korrosionsförloppet för stål* i tunnelmiljö genomfördes fältförsök i borrhål i tunnlar i Stockholm och Göteborg under ledning av KIMAB. Även i detta fall hade forskargruppen från projektet en aktiv medverkan vid planeringen och genomförandet av experimenten.

Problemet *igensättning av dräner* studerades genom state-of-the-art-kontroll samt genom att projektet ledde ett examensarbete vid GU som kartlade processerna som leder till igensättning av dräner i tunnelväggar. Problemets komplexitet gör att man här mer måste förlita sig på erfarenhetsdata om åldringsförloppen än på experimentella data.

När det gäller livscykelanalys (LCC) inleddes ett samarbete med Avdelningen för drift och underhållsteknik vid LTU. Den LCC-modell som finns tillgänglig vid LTU är fullt användbar för livstidsbedömningar av tunnelunderhåll. Det som behöver utvecklas rör hantering av ingångsdata samt redovisningsprinciper som på ett enkelt och robust sätt kan klargöra underhållsbehov och kostnader vid olika alternativa underhållsplaner. Arbetet har igångsatts.

2 LCC-MODELLEN OCH DESS INGÅENDE PARAMETRAR

2.1 INLEDNING

Life Cycle Costing (LCC) skapar ett jämförelsetal för investeringars samlade ekonomiska konsekvenser under hela livslängden.² LCC-modellen kan göras som en relativt enkel matematisk algoritm som summerar underhålls- och stilleståndskostnaderna per tillfälle och kapitaliserar dessa kostnader till en vald tidpunkt, vanligen driftstart. Om LCC-modellen är gjord i Excel-format, kan olika utförandealternativ och underhållsplaner enkelt jämföras. LCC-modellens uppbyggnad beskrivs närmare nedan.

För vissa berganläggningar, exempelvis trafiktunnlar, kan driftstopp vara mycket kostsamma. I de fall sådana driftstopp är kopplade till underhållet av tunneln, skall kostnaderna inkluderas i LCC-analysen.

2.2 UNDERHÅLLSARBETEN

Tekniken för underhållsarbeten i tunnlar och bergrum beskrevs i rapporten för Etapp I av detta projekt. Information om kostnader för insatserna kan också hämtas där.

Underhållsfrekvensen, liksom inspektionsfrekvensen, varierar mycket för olika berganläggningar. Inte oväntat sker insatserna oftare i tunnlar där konsekvenserna av incidenter och driftstopp blir svåra, exempelvis i tågtunnlar. I de flesta tunnlar verkar riktigt omfattande åtgärder utföras med intervallet 20-25 år.

²I en tunnel finns mycket mekanisk och elektrisk utrustning, som kräver ett omfattande och planerat underhåll, men detta är undantaget i denna analys, liksom underhåll av tätningsmembran m.m.

Bergrum för lagring av olja och gas underhålls ofta inte alls, på grund av svårigheter med tillträde till rummen och andra faktorer. Det är osäkert hur klok en sådan driftstrategi är.

2.3 STILLESTÅND

Underhålls- och inspektionsarbeten i trafiktunnlar bör ske med trafiken avstängd med hänsyn till riskerna för personalen. Stilleståndet innebär en kostnad som tas med i LCC-kalkylen.

Genom lämplig utformning av tunneln kan arbetet underlättas och stilleståndstiden förkortas. Särskilda utrymmen och separata tillträdesvägar kan erfordras.

2.4 UNDERHÅLLSPLANERING

Eftersom det samlade värdet av underhållsinsatser i en tunnel eller ett bergrum är mycket stort och påverkas av utförandet av anläggningen, är det rimligt att en utförlig underhållsplan ingår i projekteringsarbetet. Genom att skapa ett sådant prognosinstrument, blir det möjligt att påverka det ekonomiska utfallet av projektet under drifttiden och styra det i önskad riktning vad avser samhällsnytta eller industriell vinst. Personer med kompetens och erfarenhet av underhållsarbeten måste knytas till den grupp som projekterar berganläggningen. Helst bör den framtida driftorganisationen medverka.

Inom tillverknings- och processindustri är det vanligt att man tar fram underhållsplaner för produktionen. Inom berganläggningsbranschen, däremot, förekommer detta sällan eller aldrig. En förhoppning är att detta projekt kan presentera en så pass enkel och robust planeringsmodell för bergunderhåll att den kan ligga till grund för underhållsplaneringen för nya tunnlar och bergrum i framtiden.

2.5 LCC-MODELLEN

Den generella formeln för nuvärdesbestämning (här lämpligen avseende värdet vid färdigt bygge) av byggekostnad och framtida kostnader är:

$$LCC = \sum_x^{t=0} I_x + \sum_x^{t=0-n} K_x + \sum_t S_t = I + \sum_x \sum_{t=0}^{t=n} k_{xt} * \beta_t + \sum_{t=0}^{t=n} s_t * \beta_t \quad (\text{ekv 2.1})$$

, där

LCC är den summerade livslängdskostnaden för de underhållskrävande tekniska systemen (komponenterna x). Dessa är: sprutbetong, bultar, dräner, injekteringar, samt berget självt (skrotning).

I_x är investeringskostnaden för komponent x vid bygget av anläggningen ($t=0$)

K_x är nuvärdet av de framtida underhållsinsatserna på komponent x från tiden $t=0$ (byggstillfället) till $t=n$ (livslängdens slut)

S_t är nuvärdet av de framtida driftstoppen på grund av inspektion, underhållsarbeten och incidenter (ras/översvämning etc.)

I är investeringskostnaden för alla komponenterna vid bygget

k_{xt} är kostnaden för en underhållsinsats på komponent x efter t år från driftsstart

s_t är kostnaden för ett driftstopp t år efter driftsstart

β_t är en kapitaliseringsfaktor som ger nuvärdet vid en vald tidpunkt av en underhållskostnad som uppstår efter t år. Tidpunkten väljs av praktiska skäl lämpligen som året för driftstart. Byggkostnaderna behöver då inte kapitaliseras. Faktorn beror på ränta och inflation (kalkylräntan)

2.6 INDATA TILL LCC-MODELLEN

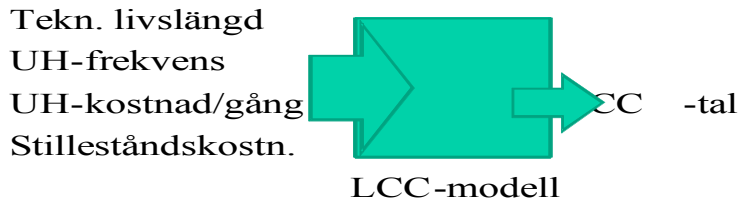
Som framgår av LCC-modellen är det kostnaderna för underhållsinsatser på sprutbetong, bultar, dräner/membran, injekteringar samt på själva berget (skrotning) under anläggningens driftstid som utgör underlag för analysen. För vissa berganläggningar, exempelvis trafiktunnlar, kan driftstopp vara mycket kostsamma. I de fall sådana driftstopp är kopplade till underhållet av tunneln, skall kostnaderna inkluderas i LCC-analysen.

Underhållsinsatserna på de tekniska systemen ovan är avhängiga dels av hur omfattande installationerna är (m^2 sprutbetong, antal bult, o.s.v.) dels hastigheten med vilken systemet degraderas .

Figur 1.2 visar överskådligt vilka data som måste matas in i LCC-modellen för att analysen skall vara möjlig. Teknisk livslängd och underhållsfrekvens följer av nedbrytningsmodellerna för de underhållskrävande systemen (komponenterna).

LCC-talet skall inte ses som en konkret kostnadsuppgift utan endast som ett jämförelsetal för värdering av alternativ.

Underhåll av berganläggningar Indata i en LCC -modell (per komponent)



Figur 1.2. In- och utdata för komponenterna i en LCC-modell

3 TÄNKBARA ORSAKER TILL UNDERHÅLLSBEHOVET

3.1 INLEDNING

Miljön i en tunnel eller ett bergrum utsätter de installerade materialen för angrepp som bryter ned dem över tid. I detta avsnitt listas några tänkbara orsaker till att det uppkommer behov att restaurera den insatta bergförstärkningen eller dräneringen i tunneln eller bergrummet.

Orsakerna som nämns skall betraktats som rena hypoteser som behöver bekräftas med utredning eller experiment. De bygger i hög grad på observationer vid inspektion av tunnlar och de antaganden som kan göras med stöd av dessa iakttagelser.

Utredningar och experiment redovisas i Avsnitt 4 – 7 i rapporten. Slutsatser dras i Avsnitt 9.

3.1 CEMENTMATERIAL

3.1.1 SPRUTBETONG

Vidhäftning

En mycket vanlig observation vid inspektion av sprutbetongen i en tunnel är, att påslaget är "bomt" vid knackning med hammare, vilket betyder att det saknar vidhäftning mot bakomliggande berg. En trolig orsak till detta är att sprutningen skett mot våt bergyta³. I gränsskiktet mot berget blev vattenöverskottet så stort att silikatbildningen blev svag eller helt förhindrades – vidhäftningen skadades eller uteblev. Överskott av tillstyvnadsaccelerator kan ha förvärrat situationen, se nedan. En annan vanlig orsak är alltför tunn sprutbetong som utsätts för frysning. Vatten i gränsskiktet mot berg kan då spjälka av sprutbetongen genom den volymökning som sker vid frysning.

Vid underhållsarbetena måste bompartier bilas ner och ersättas med ny sprutbetong. Sprutning får aldrig ske mot våt bergyta och mängden accelerator måste kontrolleras noga.

Urlakning

Vid torrsprutning mot våta bergytor tillsätts ofta tillstyvnadsaccelerator direkt i betongsprutan utan möjlighet för operatören att justera momentant. För att över huvud taget få sprutbetongen att bli kvar på väggen och bilda ett "skal", kan operatören frestas att använda ett överskott av

³ Detta är i och för sig logiskt, då våta tunnelpartier ofta sammanfaller med dåligt berg som behöver förstärkas

accelerator i det första påslaget. Detta kan leda till att härdningsprocessen påverkats så, att hela skiktet blivit poröst och/eller uppsprucket genom krympning.

En sprutbetong med sådana egenskaper blir vattengenomsläpplig och kan utsättas för urlakning (dekalCIFIERING). Förutom att den från början får en dålig hållfasthet, minskar styrkan då ytterligare med tiden. Sprutbetongytan blir fuktig med synliga genomslag av silikat. Speciellt har tunn sprutbetong, tjocklek <40 mm, visat sig ha en dålig beständighet mot urlakning. Detta har studerats i flera sammanhang och information finns bland annat i de aktuella publikationer som listas under 3.7.

Vid underhållsarbetena måste partier med dålig betong bilas ner och ersättas med ny sprutbetong. Sprutning får aldrig ske mot våt bergyta och mängden accelerator måste kontrolleras noga.

Stålkorrosion

Det finns inga kända observationer i tunnlar som tyder på att fiberarmerad sprutbetong skadats av att stålfibrer korroderar och spjälkar sönder cementmatrisen.

I äldre sprutbetong, som armerats "konventionellt" med stänger eller nät, kan man ibland finna frilagd, korroderad armering. Denna åtgärdas som beskrivs under 3.1.2..

3.1.2 BETONGKONSTRUKTIONER

En relativt vanlig observation i tunnlar och bergrum är, att armeringen i betongkonstruktioner är frilagd och rostig. En närliggande hypotes är, att kloridhaltigt eller på annat sätt aggressivt grundvatten fått möjlighet att perkolera genom betongen. Vid kontakt med stålet har vattnet brutit ner det skyddande alkaliska oxidskiktet och stålet har börjat korrodera. Eftersom korrosionsprodukterna upptar mycket större volym än stålet, har omgivande betong spjälkats av. Detta kan leda till en accelererande process.

En annan orsak kan vara att miljön i tunnlar, genom en hög och varierande relativ luftfuktighet, förorsakar en snabb karbonatisering av betongen så att pH sjunker. I äldre konstruktioner var ofta det täckande betongskiktet litet och stålet kan då lättare angripas av korrosion.

Vid underhållsarbetena måste angripna betong bilas bort och armeringen kan behöva kompletteras eller helt bytas ut. Därefter måste de skadade partierna gutas eller sprutas in. Vid behov skall cementet vara sulfatresistent.

3.1.3 INJEKTERINGAR

Det finns inga kända observationer som tyder på att cementinjekteringar med tiden bryts ner och att tätningseffekten minskar. Erfarenheten är snarare den motsatta, att inläckningen avtar, vilket skulle tyda på att det sker en avsättning av urlakat material i bergsprickorna över tid.

Trots detta konstaterande finns det sannolikt mycket goda skäl att som en del av underhållet utföra nya injekteringar. Så gott som samtliga nedbrytningsprocesser orsakas av att grundvatten tränger in i berganläggningen. Kan man minska eller helt stoppa vattenmängden har man en möjlighet att reducera det framtida underhållsbehovet. Ny injekteringsteknik, exempelvis med

partikelfria material typ Silicasol, gör det möjligt att åstadkomma betydligt bättre täthetsresultat än som var möjligt tidigare.

3.2 BULTAR

3.2.1 SLAKBULTAR

Slakbultar består normalt av kamjärn som sätts i borrhål i berget. Hålen fylls före bultmontage med tjockt cementbruk, vilket normalt leder till att stålet blir korrosionsskyddat. Huvudsyftet med bultarna är att "armera" bergmassan och att förhindra blockrörelser som kan äventyra bergets förmåga att "bära sig självt".

Felaktigheter i ingjutningen kan leda till att grundvatten får en möjlighet att komma i kontakt med stålet, som då kan börja korrodera. Ett vanligt fel är att bultar har monterats i borrhål med vattenföring. Det kan också vara ett cementbruk med för högt vattencementtal som använts för ingjutning, eller en bristfällig centrering av bulten i borrhålet. Erfarenheten från besiktningar är, att det är bultens ände mot tunneln (med eventuell bricka) som främst är utsatt för angrepp. Det är dock mycket ovanligt att bultens kondition inne i borrhålet kan besiktigas⁴.

Kartläggning av bultarnas status kan ske med icke-förstörande metoder, typ Boltometer och likande. Det kan dock vara svårt och omständligt att kartlägga status för bultningen i ett tunnelparti. Vid tveksamhet kan det vara enklast och billigast att sätta nya bultar under kontrollerade förhållanden.

3.2.2 FÖRSPÄNDA BULTAR OCH STAG

Det är ofta vitalt att dessa bultars bärförmåga upprätthålls, eftersom bultbrott kan leda till överbelastning av intilliggande bultar och en "dominoeffekt" av progressivt brott.

3.3 DRÄNER

Vid underhållsinspektioner konstateras ofta att dräner är igensatta och inte fyller sin funktion. Igensättningsprodukterna kan vara av vitt skilda ursprung, vilket gör underhållsplaneringen vanskelig.

Utvecklingen av spolningsbara dräner kan vara ett sätt att klara underhållet av dräner.

⁴ Vid areaökning av Vindötunneln i Bohuslän togs 1400 slakbultar ner och kunde besiktigas. Av dessa uppvisade 62 mätbara angrepp på den del som sträckte sig från bergväggen och 0,4 m in i berget.

En i Sverige nyutvecklad drän bygger på att läckande vatten avbördas genom ett kanalsystem som monteras direkt på den förstärkta bergytan. På kanalsystemet sprutas ett tunt skikt av konventionell sprutbetong, och ytterst sprutas en tät, värmeisolerande och brandtålig sprutbetong. fördelarna med denna konstruktion är flera:

- Dränen samverkar med det bärande huvudsystemet genom vidhäftning
- Spolning blir effektiv då arean på kanalerna är liten
- Längre livslängd
- Tar liten plats
- Brandskyddet kan anpassas genom variation av tjockleken på betongen
- Snabbare montage
- Lämplig för underhåll

Metoden har provats i liten skala med gott resultat, men några fullskaleprov har ännu inte utförts.

3.4 AKTUELLA PUBLIKATIONER

- [1] Sprøytebetong til fjellsikring, Publikasjon nr. 7, Norsk Betongforening, 1999.
- [2] Johansson, L; Sundbom, S. & Woltze, K. "Permeabilitet – provning och inverkan på betongs beständighet", CBI rapport, 2:89, 1989.
- [3] Malmberg, B. "Beständighet hos fibersprutbetong", Föredrag vid Bergmekanikdagen 1994, SveBeFo, Stockholm, 1994.
- [4] Beständighet av sprøytebetong i tunneler – resultat av norske undersøkelser, Kjell Inge Davik, Statens vegvesen Vegdirektoratet, Norge. Bergmekanikdag 1998, Stockholm.
- [5] Adhesion strength and shrinkage of shotcrete, L. Malmgren, E. Nordlund, S. Rolund, Tunnelling and Underground Space Technology, 20 2004.
- [6] BV-Tunnel remissutgåva 2004, Banverket 2004

4 NEDBRYTNING AV SPRUTBETONG I BERG - PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP⁵

4.1 INLEDNING

Medan omvandlings- och nedbrytningsprocesserna är relativt kända för vanlig gjuten betong, är detta inte fallet för sprutbetong. Eftersom sprutbetongen slungas mot bergväggen med stor hastighet samt att den även innehåller en tillstyvnadsaccelerator som gör att den momentant blir stel på väggen, har man förändrat cementfasens sammansättning och struktur. Man kan därför inte direkt applicera den befintliga kunskapen om betong när man skall bedöma sprutbetongens nedbrytning och livslängd.

4.2 VAD ÄR EN SPRUTBETONG?

En sprutbetong är i grunden en vanlig betong som sprutats på en yta där den skall sitta kvar och hårdna. Skillnaden ligger i appliceringstekniken och att man tillför en tillstyvnadsaccelerator så att sprutbetongen inte ramlar av. Detta ger förändringar i den tidiga hydratationen och en annorlunda struktur, som i sin tur kan påverka den stelnade betongens egenskaper. Både appliceringstekniken och tillstyvnadsacceleratorerna påverkar strukturen. 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.

En sprutbetong appliceras mot en bergvägg. Kompakteringen sker genom att partiklarna sprutas först mot väggen och senare mot tidigare sprutbetong. På väggen skall de klibbas fast mot varandra vilket ställer krav på hastighet och på själva betongen. Normalt innehåller sprutbetong finare partiklar och innehåller relativt mycket cement. Sprutprocessen ger upphov till kaviteter. Homogeniteten bestäms av pumptryck och hur väl betongen, och tillstyvnadsacceleratorn blandas. Vid torrsprutning gäller det också att vattnet tillförs jämnt så att vct blir samma i alla delar. När man analyserar sprutbetong finner man ofta en skiktning med större eller mindre mängd ballast. Vid närmare granskning finner man ofta att vissa lager har en struktur och kemi som tyder på att mängden tillstyvnadsaccelerator varit större när dessa skikt har bildats. Man får ibland ett svagt skikt mot bergytan beroende på att man fått mera tillstyvnadsaccelerator i detta skikt vilket givit en mer porös pasta, vilket i sin tur påverkar beständigheten. Man kan anta att tryckhållfastheten kommer att vara olika i olika riktningar i betongen. Ofta kontrollerar man

⁵ Detta avsnitt är ett sammandrag av två rapporter, författade av professor Björn Lagerblad vid CBI. De fullständiga rapporterna med referenser finns som Bilaga 1 och Bilaga 2.

hållfastheten vinkelrätt mot ytan/väggen vilket ger större hållfasthet än om man tog provet längs sprutbetongen. Mycket av detta är en konsekvens av utförandet. Det är svårt att kunna spruta så att man får ett homogent lager men man måste i en livstidsbedömning beakta att sprutning inte alltid är perfekt. Det är svårare att få en sprutbetong homogen än en vanlig betong.

Ett annat problem är tillstyvnaden och hårdnandet. En bergvägg i en tunnel är ofta relativt kall och sprutbetongen är tunn. Detta medför att själva hårdnandet tar lång tid. Med anläggningscement kan det ta flera dygn innan betongen är ordentligt hårdnad.

Sprutbetong kan antingen vara våt- eller torrsprutad.

Torrsprutad betong appliceras genom att en pulvermassa bestående av cement och ballast under tryck sprutas mot en vägg. I munstycket blandas den torra massan med vatten vilket gör att det bildas en betong på väggen. För att denna betong skall kunna sitta kvar blandas en tillstyvnadsaccelerator in.

Våtsprutad sprutbetong är i grunden vanlig handelsbetong men med något förhöjd cementhalt och mer finmalen. De stora skillnaderna är som nämnts anslagstrycket mot bergytan och inblandningen av tillstyvnadsaccelerator i sprutmunstycket.

4.3 CEMENTSYSTEMET I SPRUTBETONG

Tillstyvnadsacceleratorer är kemikalier som samverkar med de kemiska reaktioner som bidrar till den vanliga cementhydratationen, men som momentant får cementpastan och därmed betongen att styvna. Den blandas med betongen i munstycket på sprutan och reagerar med cementpastan redan på vägen mellan sprutan och underlaget. På plats mot berget måste betongen vara så styv att den inte ramlar ner.

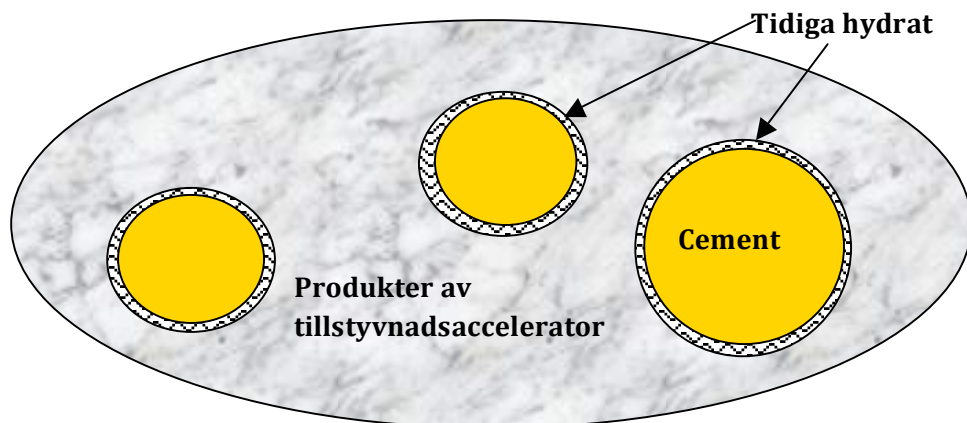
På marknaden idag finns tre principiellt olika typer av tillstyvnadsacceleratorer: vattenglas, alkalihaltiga och alkalifria acceleratorer. Dessa har olika verkningssätt, men för att förstå verkningssättet måste man känna till cements tidiga hydratation. En kort redogörelse av de för livslängdsbedömningen mest relevanta faktorerna följer nedan.

4.3.1 TILLSTYVNADSACCELERATORER OCH BETONG

I vanlig betong beror tillstyvnande och hårdnande på typ av cement, vattencement tal (vct) och temperatur. Tillstyvnadsacceleratorerna i sprutbetong påverkar strukturen och sammansättningen av porlösningarna varför man inte kan utgå från att hållfasthetstillväxt och struktur blir samma som i den rena betongen.

En tillstyvnadsaccelerator skall ge en betong som blir styv direkt efter blandning. För att åstadkomma detta måste man påverka vätskefasen mellan cementpartiklarna och ge denna en struktur som direkt stoppar rörligheten.

Medan det under härdningsprocessen i vanlig gjuten betong sker volymförändringar när betongen är flytande, tillstyrnar sprutbetong direkt efter applicering. Detta medför att volymförändringarna sker i en låst struktur, en struktur som den kommande cementreaktionen i sprutbetongen måste anpassa sig till. De tidigt bildade hydratföreningarna kommer att påverka den slutliga härdningsprocessen i sprutbetongen, se Figur 4.1.



Figur 1. I en sprutbetong fylls porvätskan under öppethållandeperioden med produkter från tillstyvnadsacceleratorn, vilket ger den struktur som håller betongen på plats. I denna struktur sker sedan accelerationen och det sena hårdnandet. Figur 4.1.

4.3.2 TILLSTYVNADSACCELERATORER

På marknaden finns tre principiellt skilda typer av tillstyvnadsacceleratorer:

- Vattenglas
- Alkaliaccelerator
- Alkalifri accelerator

Av dessa tre är den alkalifria acceleratoren vanligast idag. Vid torrsprutning av tunna lager användes tidigare ofta alkaliaccelerator.

4.3.3 VATTENGLAS

Vattenglas är den äldsta tillstyvnadsacceleratorn och består av alkalisilikat i vattenlösning. Vattenglas kan tillverkas genom att lösa kvarts i natronlut (NaOH).

Mekanismen för tillstyvnad bygger på att vid höga pH värden är kalciumsilikat i motsats till natriumsilikat stabilt och bildar en fast fas. Den färskaste cementpastan innehåller Ca joner som fäller silika och det bildas kalciumsilikathydrat (C-S-H), samma komponent som i cementgelen. Det är denna gel utfälld i porlösningarna som ger tillstyvnaden. Natriumhydroxiden ligger kvar och adderas på så sätt till porlösningen.



Ett problem med vattenglas är att det höjer alkalihalten och pH i porlösningarna så att risken för alkalisilikatreaktion ökar. I anläggningar används ofta anläggningscement, som är ett lågalkaliskt cement, för att förhindra alkalisilikareaktionen. Detta motverkas av vattenglaset.

4.3.4 ALKALIACCELERATOR

Den alkalihaltiga acceleratoren är en lösning vars huvudbeståndsdel är natrium- eller kaliumaluminat. Reaktionen är besläktad med sulfatreaktionen i färsk betong och vid sulfatangrepp. Vid kontakt med den unga cementporlösningen kommer alkalialuminaten att bilda *ettringit* med gipset från cementet.

Man kan anta att ettringit, monosulfat och kalciumaluminathydrat kommer att befinna sig i någon typ av jämvikt och att mängden av de olika faserna beror på tillgång till sulfat och aluminat (Ca-joner finns alltid i överskott). Sulfaten (gips) i cement finns tillgänglig från början, medan aluminat frigörs när cementet hydratiserar. Detta medför att man kommer att få fasomvandlingar i sprutbetongen som påverkar volymen.

Nedbrytning av ettringit frigör vatten och ger en kemisk krympning vid uttorkning. Vid tillgång på vatten och tillförsel av sulfat sker i stället bildning av ettringit och en svällning. Detta medför att en sprutbetong med alkaliaccelerator blir känslig för sulfatangrepp.

4. 3.5 ALKALIFRI ACCELERATOR

Det finns olika varianter av den alkalifria acceleratoren. Huvudbeståndsdelen är aluminiumsulfat.

- Amorf aluminiumhydroxid $\text{Al}(\text{OH})_3$
- Aluminiumsulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

I grunden bygger den alkalifria acceleratoren på kalcium-aluminat-sulfatreaktionerna liksom alkaliacceleratoren. Skillnaden från de alkaliska tillstyvnadsacceleratorerna är förutom avsaknaden av alkalier att de alkalifria innehåller sulfatjoner. Detta medför att man slipper en del av problemen med beständighet (se ovan). Problemet med den alkalifria acceleratoren har varit att kunna lösa tillräckligt aluminiumsulfat i vatten. I de olika varumärkena har man löst detta problem på olika sätt. Hur man löst det är en affärshemlighet men man vet att en del av dem innehåller organiska komponenter.

Ettringit som är en mycket vattenrik produkt bildas dels på ytan av cementkornen dels som en nätverkliknande struktur i vätskefasen. Denna reaktion som är snabb medför att betongen får mindre fritt vatten och att den förlorar sin rörlighet genom den struktur som byggs upp i vätskan mellan cementkornen. Styrkan är låg, endast några MPa, och beror på mängden tillsatt accelerator. Med tiden börjar accelerationsperioden, cementkornen börjar hydratisera på allvar och fylla ut utrymmet mellan ettringitnålarna. Mikroskopiundersökningar visar att ettringiten rekristalliserar och ändrar struktur från en finkornig massa till mera nålformade kristaller med tiden. Detta kommer att ge en större ordning, vilket påverkar styrkan, men det kommer även att påverka vattenbalansen.

Försök med sprutade pastor indikerar att sprutbetong med alkalifri accelerator ökar krympningen väsentligt i jämförelse med vanlig pasta samt att porerna är grövre. Detta tyder på att man får en annan struktur, vilket i sin tur påverkar beständigheten.

4.4 SPRUTBETONGS BESTÄNDIGHET

En livstidsanalys inkluderar både att projektera en betongkonstruktion så att den får en avsedd funktion under en förutbestämd brukstid och att kunna beräkna återstående funktionstid för en befintlig betongkonstruktion.

När det gäller att beräkna den återstående livslängden hos en sprutbetong måste man ta hänsyn till de omvandlings och nedbrytningsmekanismer som man kan identifiera och hur dessa samverkar. I ett längre tidsperspektiv bryts alla material ner och sprutbetong är inget undantag.

Korrekt sammansatt och anpassad till sin miljö är betong mycket beständig. Vissa villkor gäller dock:

- ballasten måste anpassas till typen av cement (alkalisilikareaktion)
- luftporsystemet måste vara sådant att frostangrepp undviks
- cementet måste anpassas till de i tunnelmiljön förekommande kemikalierna (sulfatangrepp).
- Betongen måste göras sprickfri eller åtminstone ha så tunna sprickor att inte transportkanaler för vatten uppkommer

Även om betongen är korrekt sammansatt, sprickfri och anpassad till undermarksmiljön, kvarstår följande faktorer som påverkar livslängden:

- Karbonatisering
- Lakning
- Erosion
- Armeringskorrosion

Andra skademekanismer som måste beaktas är:

- Frost
- Alkalisilikareaktion (ASR)
- Sulfatangrepp
- Ballastreaktioner
- Kemiska reaktioner
- Försenad ettringit

4.4.1 MILJÖ OCH RANDVILLKOR

För att förstå och kunna göra en livstidsbedömning måste man först analysera den speciella miljö som gjuten respektive sprutad betong utsätts för i en berganläggning. Betongen är i kontakt med berget, vilket reglerar fuktighet och temperatur i denna gränsyta. Luftfuktigheten vid den andra gränsytan påverkar också betongen och dess beständighet.

I en ventilerad tunnel kommer under sommaren varmluft att kylas ner. Detta kommer att ge en höjning av relativa fuktigheten och kanske kondensation av vatten på tunnelväggen. På vintern kommer kall luft att värmas av tunnelväggarna vilket ger en uttorkning av betongen.

I oventilerade bergtunnlar kommer betongen ständigt att vara i kontakt med grundvatten och luften/betongen är därför fuktmättad. Temperaturvariationerna är små.

4.4.2 NATURLIGA OMVANDLINGS OCH NEDBRYTNINGSPROCESSER

Karbonatisering

Karbonatisering är en process där koldioxid från luft diffunderar in i betongen och reagerar med kalciumjoner i porlösningarna i cementpastan så att det bildas kalcit (karbonat). När all kalciumhydroxid är förbrukad i porerna, kommer cementgelen att bli mera silikarisk. Slutresultatet blir en karbonatiserad betong med blandning av silikagel, kalciumkarbonat och metallhydroxider i porsystemet. Betongen är fortfarande hållfast, men skyddet för armeringsjärnen har försvunnit⁶.

Som även diskuteras i Avsnitt 5, avgörs livslängden för armerade betongkonstruktioner av tjockleken av täcksiktet av betong samt av karbonatiseringshastigheten. Den senare styrs av koldioxidkoncentrationen i luften, samt av betongens porositet och vattenmättnadsgrad. Hastigheten blir lägst i vattenmättad betong och högst i betong i medeltorr inomhusklimat.

Lakning

Som nämnts ovan är cementshydraten lösliga i vatten och står i jämvikt med porlösningen. Innehållet i dessa domineras av alkali, kalcium och hydroxidjoner. Om joner lakas bort av omgivande vatten, kommer mer cementshydrat att gå i lösning för att återställa jämvikten. Detta bryter successivt ner betongen.

När det gäller lakning kan man skilja mellan *diffusionsstyrd lakning* och *transmissiv lakning*. Den diffusionsstyrda lakningen orsakas av *jondiffusion* (orsakad av olika jonkoncentration) från porlösningen till omgivande vatten. Vid transmissiv lakning finns en hydraulisk tryckgradient som pressar vatten genom betongen. Detta gör att porvattnet byts ut, vilket ger en pastanedbrytning.

⁶ Betongen i de kvarvarande, tvåtusenåriga romerska betongkonstruktionerna har i princip omvandlats till mörgerrik kalksten. Konstruktionerna innehåller inget järn.

Den diffusionsstyrda lakningen går mycket långsamt då man, liksom för karbonatisering, får ett lakat skikt som jonerna måste diffundera genom⁷. I tunnlar är däremot risken för transmissiv lakning allvarligast. I anslutning till sprickor kan man få en hydraulisk tryckgradient och vattenströmning som kan leda till betongskador. I många sprutade tunnlar kan man finna genomslag dvs. utfällningar av lakprodukter (som karbonater) på betongytorna.

Armeringskorrosion

I kontakt med syre och vatten korroderar stål. I betong sker dock ingen korrosion eftersom det höga pH-värdet stoppar reaktionen. Om betongen är karbonatiserad eller och kloridhalten i porvattnet är för högt får man korrosion. Detta problem behandlas i Avsnitt 5 av rapporten.

Frost

Frost är främst allvarlig i väg och järnvägstunnlar där trafiken drar in kall luft. En fördel med tunnarna är dock att under vintern sjunker den relativa luftfuktigheten, när kall luft dras in i tunnarna, vilket torkar betongen som därmed blir mindre frostbenägen.

Alkalisilikareaktion (ASR)

Alkalisilikareaktionen (ASR) beror på att viss typ av reaktiv ballast löses upp av porlösningarna i betong. Produkten ett koncentrerat vattenglas är hygroskopisk, dvs. den suger upp vatten, vilket ger ett tryck som får betongen att svälla och därmed spricka. Denna svällning kan ge upphov till sprickbildning som dels sänker hållfastheten dels öppnar upp för andra angrepp. Problemet är lite studerat för tunnlar i Sverige.

Yttre sulfatangrepp

Mekanismen bakom sulfatangreppet beskrevs i Avsnitt 4.3.4 (alkaliacceleratorer).

Sulfatreaktionen beror på att ett tillskott av sulfat ger upphov till bildning av ettringit som i sin tur spräcker betongen. Bildningen av ettringit kräver ett tillskott av vatten vilket oftast finns i tunnlar.

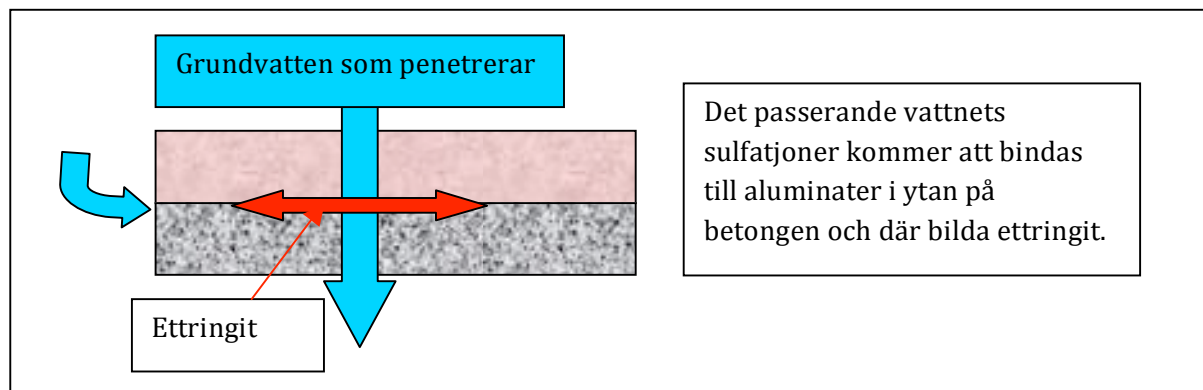
Till skillnad från ASR är sulfatangreppet ett yttre angrepp dvs. det startar från ytan och fortplantar sig inåt allteftersom ny sulfat tränger in till större djup. För att motverka ett sulfatangrepp används sulfatresistent cement.

Eftersom reaktionen är beroende av tillskott av sulfat måste man se på var den kan komma ifrån. Grundvatten kan ibland hålla höga halter. Detta gäller framför allt om man har sulfidjordar eller i vissa marker som förorenats av industriutsläpp.

Det viktigaste för en livstidsbedömning är att kunna beräkna konsekvenserna av ett angrepp. Man kan förmoda att det allvarligaste sulfatangreppet sker i kontaktytan mellan sprutbetong

⁷ I vatten kommer en betong med ett porositet motsvarande materialkvalitet K 40 att laka ca 10 mm på ett hundra år, vilket i praktiken gör att man bortse från denna lakningsform vid underhållsplanering för tunnlar.

och berg se skissen nedan Detta kan leda till ettringitbildning i kontaktzonen, vilket i sin tur kan göra att bindningen mellan berg och betong släpper, sprutbetongen blir ”bom”, se Figur 4.2 nedan.



Figur 4.2. Ettringitbildning i vidhäftningszonen mot berg.

4.4.3 GRUNDVATTEN OCH DESS EFFEKT PÅ BETONG

Problemet behandlas närmare i Avsnitt 7 i rapporten.

4.5 MATERIALANALYSER PÅ SPRUTBETONG

4.5.1 ORIENTERING

Sprutbetongprover hämtades från tre tunnlar i Stockholm (1 – 3) och tre tunnlar i Göteborg (4 – 6).

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 | Björns Trädgård, |
| 2 | Östberga |
| 3 | Agnegatan |
| 4 | Guldhedstunneln |
| 5 | Brudaremossen |
| 6 | Fjärrvärmestunnel Göta Älv |

Från varje provplats togs prover med bra respektive dålig sprutbetong i form av borrhärdar genom sprutbetongen och in i berget. Proverna skickades till CBI Betonginstitutet i Stockholm för materialanalys.

Generellt var betongen i alla proven inhomogen och skiktad.

4.5.2 ANALYTEKNIK

Vid CBI Betonginstitutet inspekterades kärnorna visuellt, varefter de sågades upp och användes för tillverkning av tunnslip. Detaljer studerades i svepelektronmikroskop. Ett tunnslip är ett

preparat som slipats så tunt att ljus kan penetrera materialet. Betongtunnslipen är 25 µm tjocka. Tunnslipen som täcker en yta av 45 x 25 mm går i de flesta fall från ytan och inåt men i en del fall täcker de gränsen mellan berg och sprutbetong. Tunnslipen vakuumimpregnerades med epoxi innehållande fluorescensmedel. I vanligt ljus syns detta som ett gult preparat. CBI's polarisationsmikroskop är utrustat med UV-ljuskälla. Med UV-ljus får man ett "fluorescensljus" som är proportionerligt mot mängden fluorescensmedel vilket i sin tur relaterar till hur mycket epoxi provområdet innehåller. Detta medför att hålrum får intensivast ljus och att porös pasta blir ljusare än tät pasta. Med hjälp av referenstunnslip och antagandet om att vct är relaterat till porositeten - som i sin tur relaterar till styrkan - kan man uppskatta vct och hållfasthet. Tunnslipen gav inte all behövlig information. Därför analyserades proven även i svepelektronmikroskop (SEM). I SEM får man en betydligt större upplösning och med hjälp av energi dispersiv teknik kan man analysera kemin i en punkt eller på en bestämd yta. Med hjälp av SEM kan man därför med hjälp av kornform och kemi identifiera enskilda komponenter och mineral. Man kan också få en uppfattning av vilket typ av cement som använts. Analysen avsåg att fastställa betongkvalité, betongstruktur och eventuella skador.

4.5.3 OBSERVERADE SKADEMEKANISMER OCH OMVANDLINGAR

De skademekanismer som kan observeras på laboratorium är *alkalisilikareaktion, sulfatreaktion, lakning (decalcifiering) samt karbonatisering*. Se vidare Avsitt 4.4.

Alkalisilikareaktionen är ett resultat av att ballasten reagerar med cementpastan så att man får en expansion och uppsprickning.

Sulfatreaktionen är ett resultat av att sulfatjoner från grundvattnet trängt in i betongen och reagerat med aluminatjoner från cementpastan. Detta ger en nybildning av ettringit. Alkaliacceleratoren baseras på alkalialuminat och ökar därmed förutsättningarna för sulfatreaktion. Sulfatreaktionen medför en uppluckring och expansion som kan ge skador, men kan under vissa förutsättningar också ge en tätande effekt.

Vid den visuella inspektionen i tunnlarna konstaterades vattengenomslag och lakning i de vattenförande zonerna. Detta kan, om grundvattnet innehåller sulfatjoner, leda till sulfatreaktion. Om vatten penetrerar, kommer reaktionen att börja i gränsskiktet sprutbetong/ berg och leda till att betongen släpper. Om sulfatförande vatten rinner genom en porös zon kan ettringitnålar fällas ut vilket borde leda till en tätningseffekt.

Lakning (dekalCIFIERING) av sprutbetong kan ske om grundvatten penetrerar betongskiktet. Det är kalciumhydroxid (portlandit) - den mest lösliga komponenten i cementpasta – som lakas ur vilket ökar porositeten och försvagar betongen. Skadorna som orsakas av lakning inträffar där vatten rör sig, längs zoner, i sprickor eller på betongytan. Vid större vattenflöden ger lakningen en nedbrytning av cementpastastrukturen. Förekomsten av en krusta av kalcitkristaller på sprutbetongens yta och kalkutfällning i närheten av sprutbetongen är också indikationer på lakning. Man kan förmoda att lakningen sker längs porösa zoner vilket i sin förlängning medför att ytan mot berg eller någon porös zon inne i betongen mer eller mindre tappar sin hållfasthet vilket i sin tur medför "bom" eller ras.

I tunnslip kan man även observera *karbonatisering*, som beror på att kalciumkomponenterna i cementpasta inte är stabila i kontakt med koldioxid och karbonatjoner. Både portlanditkristaller och kalciumjonerna i cementgelen kommer att lösas upp och kalciumet kommer att bindas till karbonatjoner och bilda kalciumkarbonatkristaller (kalcit). Analysen i mikroskop görs med polariserat ljus och korsade polarisationsplattor varvid färgen avslöjar den materialspecifika dubbelbrytningen. Vid denna uppställning så släcks ljuset ut när det passerar amorfa material såsom cementgel (C-S-H).

I normal betong karbonatiseras betongen från ytan och processen propagerar inåt med tiden. I flera av proven fann man emellertid stråk med "karbonatiserad" cementpasta inne i sprutbetongen. Det sammanhänger i allmänhet med porösa partier varvade med normal cementpasta. Dessa zoner kan inte ha uppkommit som ett resultat av koldioxid som trängt in från ytan, utan kan betyda att kolsyrerikt vatten har rört sig i betongen; alternativt kan kolsyran ha sitt ursprung i tillstyvnadsacceleratorn.

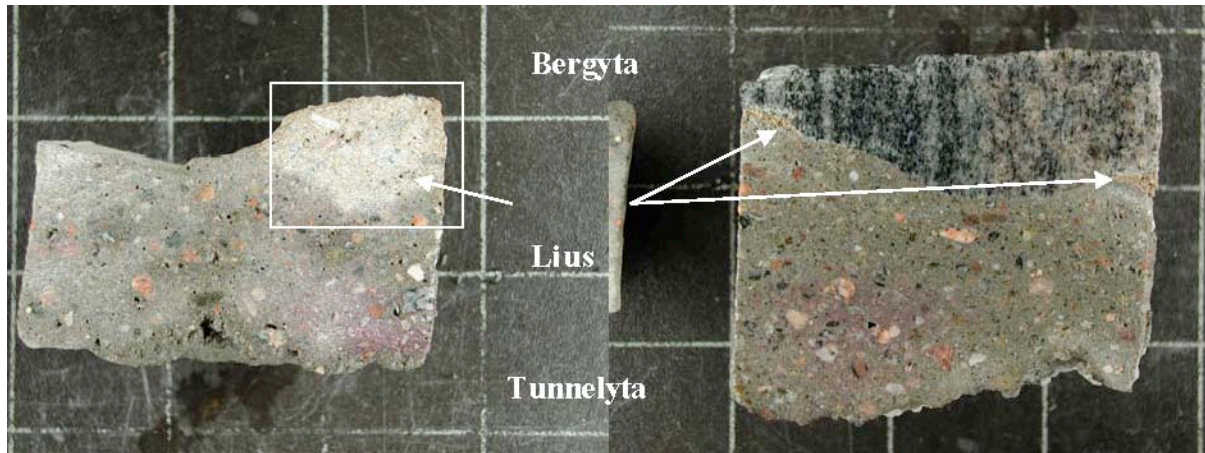
4.5.4 EXEMPEL PÅ RESULTAT AV MATERIALANALYSER

Tunnslip- och SEM analyser utfördes på samtliga prover från provtagningsplatserna i de sex tunnlarna. För fullständiga resultat hänvisa till rapporten i Bilaga 2. Här skall några exempel ges från tunneln under Brudaremassen och fjärrvärmetunneln under Göta Älv (Shelltunneln).

Tunnel under Brudaremassen

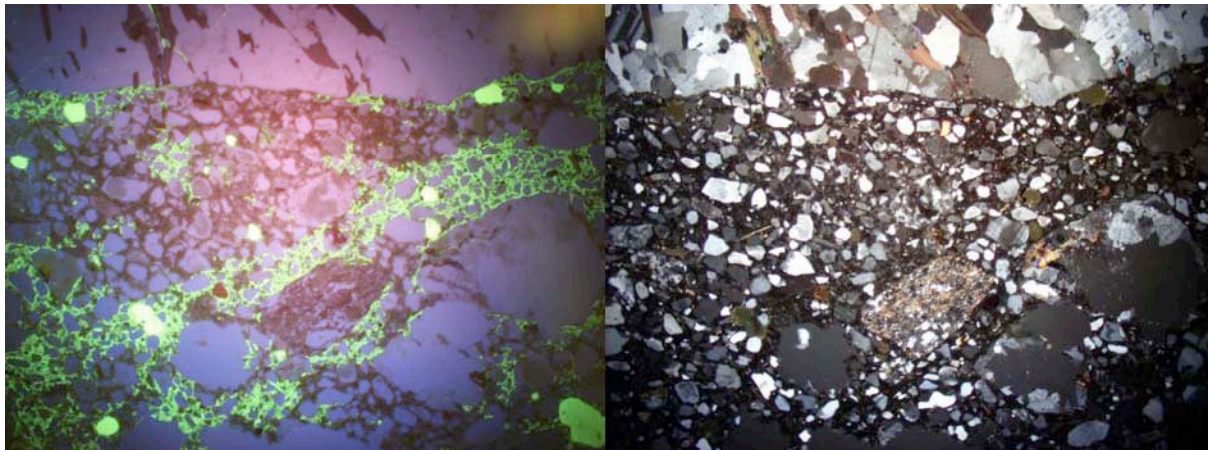
Foton av de två provena i Figur 4.3 visar fiberarmerad sprutbetongbetong med ganska mörk färg som indikerar cement av typ anläggningscement. Bra kontakt mot berg men med små fickor

med ljusare material. Ballast 0-8 mm.



Figur 4.3. Två prov från Brudaremossen. Varje ruta 30 mm. TV tunt parti sprutbetong. Relativt homogent parti. Det finns dock ett parti med ljus sprutbetong in mot berg. TH relativt homogen sprutbetong med tunna partier av annat ljusare vid bergytan.

Tunnslipen i Figur 4.4 visar tät och svagt bandad sprutbetong, vct varierar mellan ca 0,3 och 0,7. Något mera poröst mot berg. Betongen är porösast närmast berget. Karbonatisering är ca 2 mm. En svag kalcitutfällning återfinns på ytan. Luftporerna är öppna utan kristallisering vilket tyder på en tät betong eller torr miljö. Rikligt med kvarvarande cement med hög halt ferrit indikerar anläggningscement.



Figur 4.4. Tunnslip. Till vänster: UV-ljus Bild 9,5 mm visande parti mot berg. Kontakten mot berg något porös. Till höger: Samma yta men med polariserat ljus.

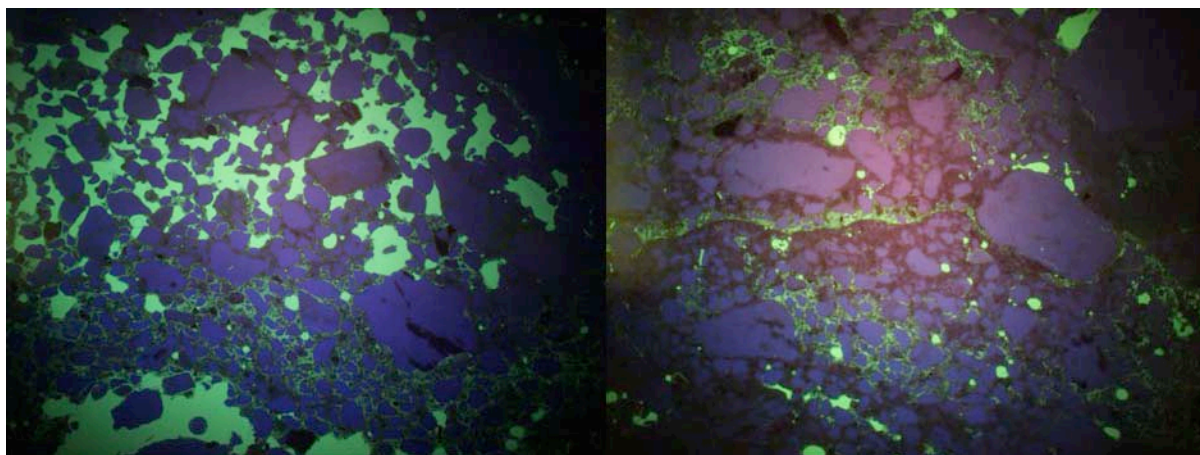
Fjärrvärmes tunnel under Göta Älv

Foton av de sågade proverna i Figur 4.5 visar nätarmerad, ljus sprutbetong med karakteristisk bandning. 0-8 mm ballast. Bra bindning mot berg



Figur 4.5. Foton av provbitar från tunneln under Göta Älv. Varje ruta 30 mm. Till höger sprutbetongytan och till vänster kontaktytan mot berg. Man kan observera en distinkt bandning antagligen orsakat av sprutlager. Naturballast 0-8 mm.

Tunnslipet i Figur 4.6 visar karbonatisering i sprickor. Bandad mellan porösa och täta partier. Vissa lager är mycket täta med kvarvarande cement. Man kan se kalciumaluminat vid övergångar vilket tyder på dålig blandning med tillstyvnadsaccelerator. Detta ger också upphov till mera porösa stråk.



Figur 4.6. Tunnslip, UV-ljus bilder 9,5 mm. Till vänster: inhomogent parti. Till höger: Gräns mellan två sprutomgångar.

4.5.5 SLUTSATSER AV MATERIALTESTERNA

Kvalitetsskillnaden är stor både när det gäller mellan de olika tunnlarna liksom inom respektive tunnel. Rent generellt är alla sprutbetongerna skiktade.

Proven är inhomogena med en varvning mellan täta och porösa lager. Detta kan bero på spruttekniken som sveper över ytorna men även på doseringen av tillstyvnadsacceleratorn. Vid

överdosering eller ojämn inblandning av denna kan betongen bli porös och få kristalltillväxt. Det finns också indikationer på att bergytan i vissa fall fått en dos av ren tillstyvnadsaccelerator som gett ett poröst lager närmast berg. Detta är uppenbart i proverna från Brudaremossen där man kan identifiera lager och klumpar av oblandad accelerator.

I tunnlar är det uppenbart att den mest skadade betongen finns i anslutning till de vattenförande zonerna. Det är också från dessa zoner som de "dåliga" betongproverna kommer. Man finner här både bomma partier, nedfall av sprutbetong och vattengenomslag. Testerna visade det att dessa "dåliga" betongprover hade överskott på aluminat. Det är svårt att få fäste mot vått berg, varför det finns en misstanke att man vid sprutningen tillsatte extra tillstyvnadsaccelerator så att betongen snabbt stelade på plats och inte rann av. Resultatet blev en porös sprutbetong som kan ge vattengenomträngning och ytterligare sämre betong.

Testerna kunde inte i något fall påvisa alkalisilikareaktion. De kunde inte heller säkert konstatera sulfatreaktion vilket tyder på att det inte finns någon större halt av sulfater i grundvattnet.

4.6 SAMMANFATTNING

- Sprutbetong har delvis andra egenskaper än vanlig betong, dels beroende på applikationstekniken, dels på tillstyvnads- och hårdnandeförloppet. Strukturen skiljer sig från vanlig betong, främst beroende på vilket typ av tillstyvnadsaccelerator man använder.
- Sprutbetong är något mera krympbenägen än vanlig betong då den oftast innehåller mera cement. Den alkalifria cementen och antagligen även alkaliacceleratorn ger en något större krympning. Detta gör att man relativt lätt kan få sprickor speciellt om bindningen till underlaget är dåligt.
- Vattenglas- och alkaliacceleratorn ändrar bindemedelssammansättningen så att sprutbetongen blir mera benägen för expansiv alkalisilikareaktion. Med alkaliacceleratorn blir sprutbetongen mera benägen för sulfatreaktion. Miljön i tunnlar är normalt fuktig varför båda dessa reaktioner kan ske.
- Den reaktion som kan ställa till med störst problem och mest sätta ner livslängden hos betong i tunnelmiljö är antagligen sulfatreaktionen. Speciellt känslig är kontaktzonen mot berg, då den expansiva sulfatreaktionen här kan spjälka loss betongen. Om man beaktar filtrering kan man få en sulfatreaktion med relativt lite sulfat i grundvattnet.
- En annan reaktion som kan få stor betydelse för underhållsbehovet är lakning i rörligt grundvatten i porsystem och sprickor i sprutbetongen

- För gjutna betongkonstruktioner i en tunnel eller ett bergrum domineras de underhållskrävande processerna av karbonatisering och armeringskorrosion

5 KORROSION HOS STÅL I BERG – PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP⁸

⁸ Detta avsnitt är ett referat av två rapporter från KIMAB, författade av Bertil Sandberg. Rapporterna, med tillhörande referenser finns i sin helhet som Bilaga 3 och Bilaga 4.

5.1 KUNSKAPSLÄGET

I samband med ett uppdrag från SveBeFo 2002 rörande cementingjutna bultars beständighet, utfördes en litteratursökning. För att kontrollera om några nya rapporter publicerats på senare år utförde KIMAB en förnyad sökning för projektets räkning, se referenserna i Bilaga 3.

5.1.1 KORROSIONSMILJÖER

En ingjuten bergbult exponeras för i princip tre olika korrosionsmiljöer:

- Atmosfärisk korrosion i tunneln.
- Korrosion i cementbruk påverkat av närheten till tunneln.
- Korrosion i cementbruk längre in i berget.

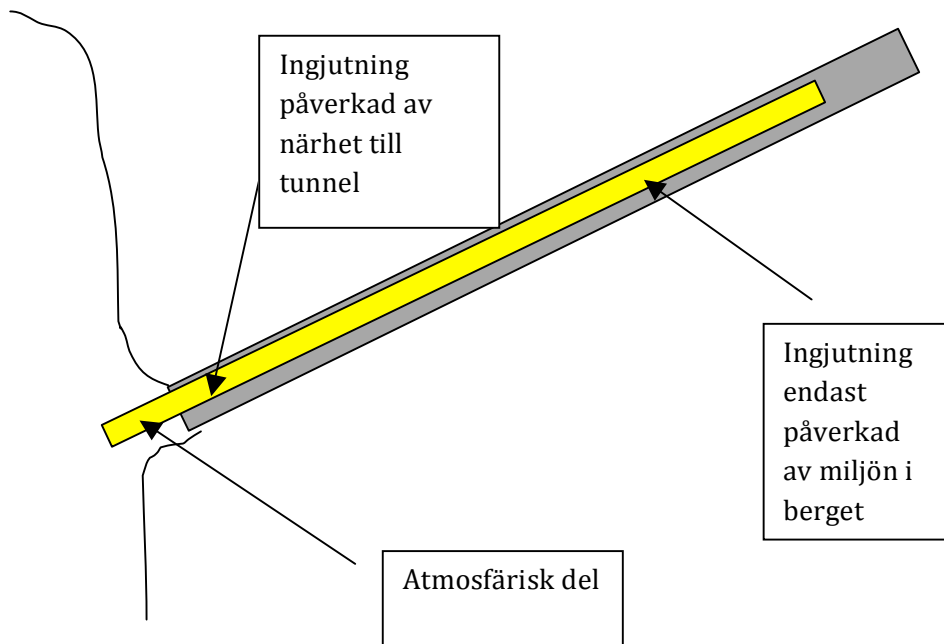
För en armerande bult är den atmosfäriska korrosionen utan betydelse. Rostrinning från ytterändan kan dock försvåra bedömningen av bultens tillstånd längre in i berget. Korrosion på en förspänd bults bricka verkar försvagande men i de flesta fall är den yttre ingjutna delen av minst lika stor betydelse för förankringen.

Bruket i den yttre delen av den ingjutna bulten påverkas av närheten till tunneln. Således kan bruket karbonatiseras genom kontakt med luftens koldioxid (se Avsnitt 4), svällning av bruket kan ge avspjälkning, bruket kan tillföras syre från luften och sprickor i bruket kommunicera med atmosfären och medge transport av vatten.

Längre in i berget råder andra förhållanden än i ytterändan. De flesta reaktioner mellan bruket och vatten ger upphov till svällning. Här ger inte svällningen upphov till några negativa konsekvenser, typ spjälkning, istället tätas eventuella torksprickor i bruket. Vidare är möjligheten till urlakning av bruket begränsat till punkter där berget är sprucket och vatten kan transporteras förbi bulthålet.

5.1.2 KORROSIONSMEKANISMER

De korrosionsmekanismer som är aktuella för de ovan identifierade korrosionsmiljöerna framgår av Figur 5.1.



Figur 5.1. Korrosionsmekanismer för en bergbult.

Atmosfärisk korrosion

En relativ luftfuktighet på ca 70 % krävs för att korrosionen skall komma igång. Den korrosionshastighet som uppstår bestäms av luftens innehåll av SO₂, NO_x och Cl⁻ samt av temperaturen och graden av nedsmutsning. I tunnlar har de partikulära föroreningarna (smutsen) och tölsalter en stor inverkan. En markant ökning av korrosionshastigheten inträffar om bultändan är utsatt för vatten som droppar från väggen särskilt om detta är surt och innehåller klorider.

Korrosion i cementbruk påverkat av miljön i tunneln

Den yttersta delen av den ingjutna bulten är mer utsatt för korrosion än delar längre in, eftersom:

- Bruket står i kontakt med atmosfären i tunneln och blir därmed successivt karbonatiserat från ytan och inåt.
- De flesta reaktioner mellan cementpastan och vatten leder till svällning. I ytterändan av bulten kan detta ge upphov till avspjälkning och angrepp på stålet
- Syrehalten i bruket är högre genom kontakt med luften i tunneln
- Håligheter i bruket kan skapa vattenflöde som leder till urlakning

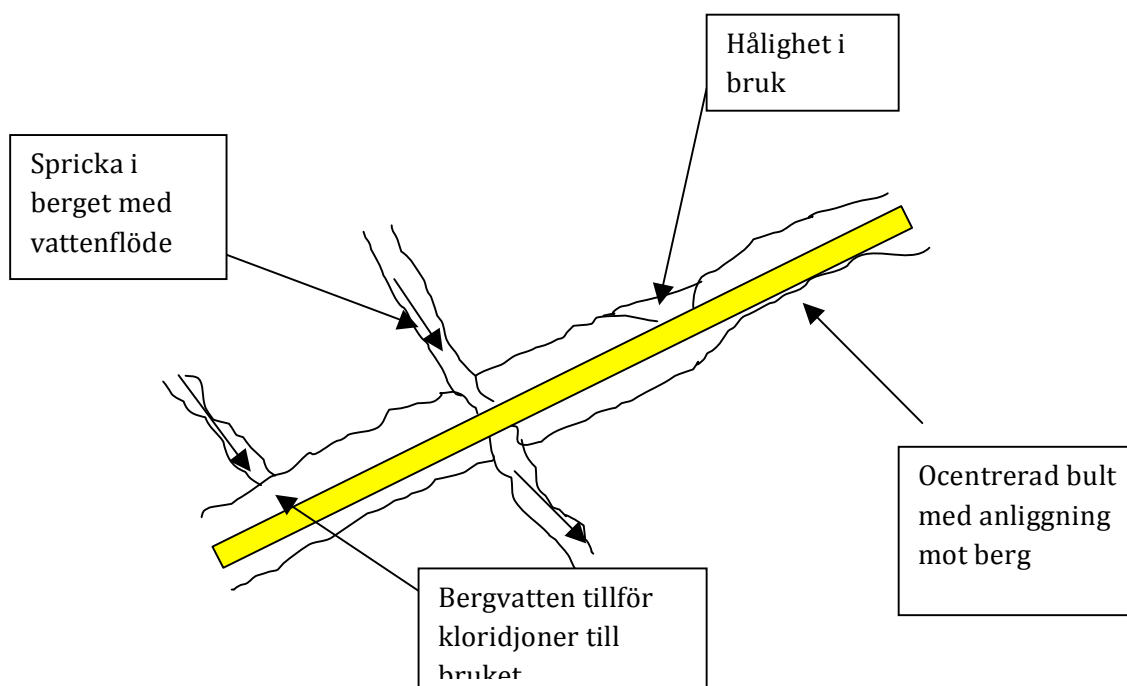
Klorider tillförs från tölsalter eller från grundvattnet (om tunneln går under havsvatten). Vid högre kloridhalter än 0,3 vikts % räknat på cementvikten i bruket uppstår angrepp på stålet. I karbonatiserat bruk är gränsen 0 %.

Korrosionsprodukterna på stål fritt exponerat i luft har 10 gånger så stor volym som stålet. Motsvarande värde för stål ingjutet i betong är två. I ytterändan kan trycket från korrosionsprodukterna leda till avspjälkning.

Utvärderingen av de nedsprängda bultarna från Vindö-tunneln bekräftar att det är ytterändan som är mest utsatt för korrosionsrisk. Av totalt 1400 bultar uppvisade 199 st angrepp. Av dessa hade 31 % mätbara angrepp. Angreppen på samtliga dessa 62 bultar var belägna på den del av bulten som sträckte sig från bergväggen och 0,4 m in i berget.

Korrosion i cementbruk längre in i berget

Risk för korrosion längre in i berget föreligger vid ofullständig fyllning, dåligt centrerat järn, tillförsel av kloridrikt vatten till bruket och vid vattenflöden i sprickor som lakar ut bruket, se Figur 5.2.



Figur 5.2. Orsaker till korrosionsangrepp på inre delen av en bergbult.

I en sluten hålighet kommer tillfört vatten att gå i jämvikt med cementpastan och erhålla ett pH-värde på 12,4 vilket passiverar stålet. Motsvarande förhållanden uppstår för en ocentrerad bult med anliggnings mot berg. Saknas ett kontinuerligt vattenflöde kommer tillfört vatten att alkaliserar och korrosionen blir försumbar.

Tillförs bruket kloridjoner via bergvattnet kan kloridhalter över 0,3 vikts % uppstå. Den begränsade tillgången på syrgas medför dock att korrosionshastigheten blir låg. En jämförelse med betongkonstruktioner i havsvatten kan göras. I vattenmättad betong blir korrosionen på armering obetydlig även vid mycket höga kloridhalter, då den begränsas av den låga diffusionshastigheten för syrgas.

Den största risken för stålkorrosion är om det existerar vattenförande sprickor i berget som passerar bruket och lakar ut det. Bestämmande för korrosionshastigheten blir vattnets kemiska sammansättning, flödes hastigheten och vattnets syrehalt. Denna risk minimeras om injektering utförs så att borrhålen är torra vid bultsättningen.

5.2 REKOMMENDATIONER FÖR UTFÖRANDE AV BULTSÄTTNING

Vid närvaro av vatten i bulthål bör berget injekteras innan bulten sätts. Vid risk för ökad kloridhalt kan ökad säkerhetsmarginal erhållas om bulten varmförzinkas, se Tabell 5-1.

Tabell 5-1. Kloridhalter i bruk då korrosion initieras (vikts % av cementvikten).

Material	Icke karbonatiserat bruk	Karbonatiserat bruk
Stål	0,3 %	0 %
Varmförzinkat stål	1,5 %	1,0 %

I tunnelmiljö varierar zinkens korrosionshastighet mellan 1 och 5 $\mu\text{m}/\text{år}$, varför ett normalt zinkskikt på 60 μm är förbrukat efter 12-60 år. I de flesta tunnelmiljöer torde 20 år vara max. Zinkens korrosionshärdighet bygger på att skyddande korrosionsprodukter bildas på ytan. Detta sker om ytan ömsom utsätts för fukt, ömsom får torka upp. Vid ständig kondens kan dock korrosionshastigheten bli hög. I "blöta" tunnlars typ spillvattentunnlar rekommenderas att den varmförzinkade bultens ytterända doppas i varm asfalt före montering.

5.3 KONTROLL AV BEFINTLIGA INSTALLATIONER

Den svaga länken för ingjutna bergbultar är den yttre delen, från bergväggen och 40 cm in i berget. Längre in krävs sprickor med flödande syresatt vatten som lokalt lakar ur bruket för att angrepp ska uppstå. Vid inspektion av äldre bultar bör man således fokusera på dessa yttre delar. Kan bulten friläggas från bruk från väggen och 50 cm in samt inspekteras torde det stora flertalet försvagade bultar kunna identifieras och ominjekteras.

Arbetena blir dock så omfattande att det normalt torde bli billigare att sätta nya bultar i korrosionsutsatta tunnelpartier.

5.4 FÄLTFÖRSÖK I TUNNLAR

5.4.1 INLEDNING

Som nämndes i Avsnitt 5.3, är den största risken för korrosion i cementingjutna bultar om vattenförande sprickor finns i berget och lokalt lakar ut bruket. För att få kvantitativa mått på denna risk uppdrog projektet åt KIMAB att genomföra försök i borrhål i tre tunnlar i Göteborg och Stockholm.

Provningen pågick under tiden 2008-01-23 till 2008-12-10 på följande platser:

- Arbetstunnel till Södra Länken, Sickla (Stockholm)
- Tunnel under Brudaremsen (Göteborg)
- Fjärrvärmestunnel under Göta Älv (Göteborg)

För att efterlikna det förhållande som uppstår då en del av bulten inte längre skyddas av cementbruk utan i stället dess korrosionsstatus bestäms av bergvattnet installerades ståltrådar i borrhål som förslöts med gummiexpander. Ytterändan av gummiexpandern försågs även med en aluminiumfolie som extra diffusionskydd gentemot tunnelatmosfären.

5.4.2 PROVMETODIK

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

I Södra Länkens arbetstunnel pågick provningen under tiden 2008-01-23 till 2008-11-28 och i Göteborgstunnlarna under tiden 2008-03-05 till 2008-12-10.

Provmaterialet som användes var avfettade, vägda ståltrådar, diameter 2 mm, längd 0,7 m (svetstrådar). Vid monteringen av provtrådarna spolades borrhålet med kvävgas innan förslutning med gummiexpander. Figur 5.3 visar borrhål och arbete vid en av provplatserna.

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



Figur 5.3. Montering av prover.

5.4.3 KEMISKA ANALYSER

Försök gjordes att samla in bergvatten ur borrhålen för kemisk analys, vilket emellertid visade sig vara svårt.

5.4.4 RESULTAT

Resultaten redovisas i *Tabell 5-2* som total massförlust under provperioden och som korrosionshastighet.

Figur 5.4 – 5.6 visar exempel på korrosionens utseende från de 3 provplatserna vid olika korrosionshastigheter. Ur resultaten framgår, att korrosionshastigheten för kolstål skiljer sig markant mellan provplats Brudaremossen och provplatserna Södra Länken och Göta Älv. Medelkorrosionshastigheten under Brudaremossen är ca. 3 $\mu\text{m}/\text{år}$ medan de två andra provplatserna uppvisar ca. 10 gånger högre korrosionshastighet 27 $\mu\text{m}/\text{år}$ respektive 32 $\mu\text{m}/\text{år}$, se tabell 5-2.

Tyvärr kunde bara ett vattenprov insamlas från provplatsen under Brudaremossen men detta prov tyder på att vattnet innehåller lägre halter av både klorid och sulfat än de övriga provplatserna. Det faktum att bara ett vattenprov kunde tas visar också att mängden genomströmmande vatten är liten på denna plats.

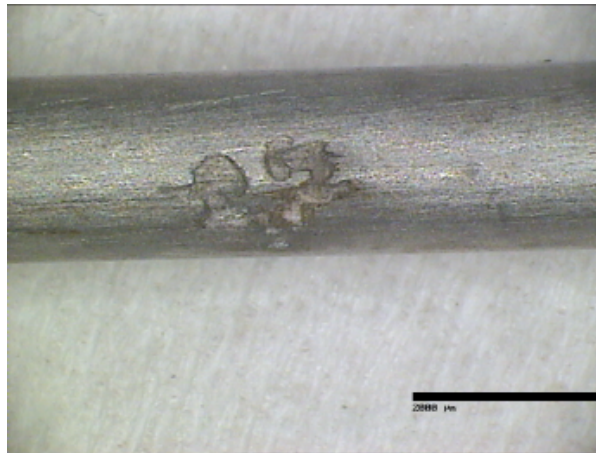
Korrosionsangreppen på prover, från alla provplatser, uppvisar i många fall kraftiga lokala angrepp. Även korrosion av allmän karaktär utan utpräglad gropfrätning förekommer i mer eller mindre utvecklad form på prover från samtliga provplatser, se Figur 5.4

Underhåll av berganläggningar – Etapp II

SBUF Utvecklingsprojekt 11844. Slutrapport mars 2009

Tabell 5-2. Resultat av korrosionsprovningen.

Prov nr.	Massförlust g	Korrosion			Anm.
		g/m ²	g/m ² ,år	µm/år	
Vägtunnel i Södra Länken					
1	1.59	372.5	438.6	56.2	vattenprov
2	0.93	218.4	257.1	33.0	fukt
3	0.24	55.3	65.2	8.4	vattenprov
4	1.02	239.0	281.4	36.1	fukt
5	0.33	76.7	90.3	11.6	vattenprov
6	0.82	191.5	225.5	28.9	vattenprov
7	0.52	121.6	143.2	18.4	vattenprov
8	0.30	70.0	82.4	10.6	vattenprov
9	0.65	151.4	178.2	22.9	vattenprov
10	1.24	291.1	342.8	43.9	fukt
Tunnel under Brudareossen					
16	0.02	3.5	4.6	0.6	vatten
17	0.02	4.5	5.9	0.8	vatten
18	0.04	8.3	10.8	1.4	fukt
19	0.36	83.6	108.9	14.0	vattenprov
20	0.15	35.6	46.5	6.0	fukt
22	0.05	10.8	14.1	1.8	fukt
23	0.003	0.7	1.0	0.1	fukt
24	0.04	8.5	11.0	1.4	fukt
25	0.003	0.7	0.9	0.1	fukt
Tunnel under Göta Älv					
32	0.01	1.4	1.9	0.2	torrt hål
33	0.34	78.6	102.5	13.1	vattenprov
34	0.93	217.0	282.9	36.3	vattenprov
35	0.08	18.6	24.3	3.1	vatten
37	1.13	265.9	346.6	44.4	vattenprov
38	1.51	353.7	461.1	59.1	fukt
39	1.65	387.5	505.1	64.8	vattenprov
40	0.21	49.7	64.8	8.3	vattenprov
42	1.53	358.1	466.8	59.8	vattenprov



Figur 5.4. Södra Länken, tråd 1: korrosionshastighet 56 µm/år



Figur 5.5. Brudaremossen: Tråd 18, korrosionshastighet 1 µm/år



Bild 5.6. Tråd 39, Göta Älv: korrosionshastighet 65 µm/år

Det lokala angreppsdjupet kan vara betydande, se Figur 5.6, där korrosionsdjupet lokalt kan uppskattas till ca.250 µm medan den allmänna korrosionen begränsar sig till 65 µm.

5.4.5 JÄMFÖRELSE MED TYSKA NORMEN DIN 50 929

Ett sekundärt syfte med undersökningen var att studera om den tyska normen DIN 50 929, som används för bedömning av vattenledningsvattens korrosivitet på stålrör, även kan användas för bergvatten runt bultar där täckning av bruk saknas.

Trots det begränsade antalet vattenanalyser gjordes ett försök till tillämpning av den tyska normen, med resultatet:

Korrosionsindex DIN*	Provplats (tunnel)	Korrosionsindex DIN provplats	Medel- avfrätning mm/år	Största djup, frätgropar mm/år
>0			0,01	0,05
-1 till -4			0,02	0,1
-5 till -8			0,05	0,2
<-8			0,1	0,5
	Södra Länken	-3 till -5	0,027	
	Brudaremassen	1 till -2	0,003	
	Göta Älv	-3 till -9	0,032	0,25 lokalt

*Beror av 5 vattenspecifika egenskaper

Lokala frätgropar är kritiskt för vattenledningar eftersom dessa kan leda till genomfrätningar. Lokala gropar uppkommer även på bultar. Sannolikt råder även för bultar motsvarande förhållande mellan allmän korrosion och djupaste frätgropar, 1:5. Dock kommer dessa frätgropar att vara mindre kritiska för bultar. Med tiden växer de ihop och det blir den allmänna korrosionen som avgör bultens livslängd.

Av tabellen framgår att de i denna undersökning uppmätta korrosionshastigheten i borrhål ligger ca 50 % lägre än vad DIN-normen anger för korrosion i vattenrör.

5.4.7 SLUTSATSER

Den uppmätta medelkorrosionshastigheten i tunneln under Brudaremassen är ca 3 $\mu\text{m}/\text{år}$, medan de två andra provplatserna, Södra Länken och tunneln under Göta Älv, uppvisade en tiopotens högre korrosionshastighet, 27 $\mu\text{m}/\text{år}$ respektive 32 $\mu\text{m}/\text{år}$. Orsaken står troligen att finna i vattenkemin och mängden vatten. Vattenprovet från Brudaremassen 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.

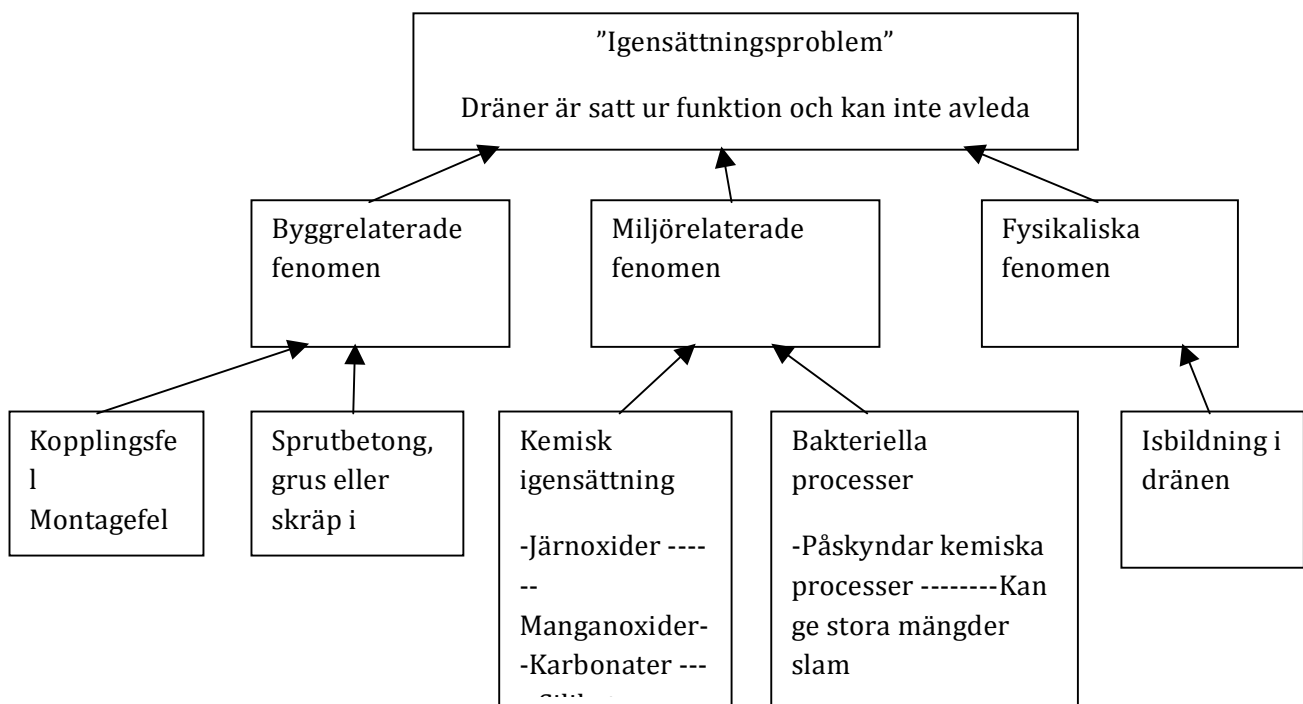
Förutom allmän korrosion visade prover från samtliga platser många fall av kraftig lokal gropfrätning. Korrosionsdjupet kan då vara betydande, upp till 250 μm .

Viss korrigering av den tyska korrosionsnormen måste göras vid tillämpning för bergbultar.

6 IGENSÄTTNING AV DRÄNER – PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP⁹

6.1 ORSAKER TILL IGENSÄTTNING AV DRÄNER

Dräner i tunnlar monteras för att leda bort vatten som, trots injektering, läcker in till berganläggningar och tunnlar samt för att förhindra dropp på vägbanor och installationer. I tunnlar i kallt klimat där man under vinterhalvåret riskerar köldinträngning föreligger även risk för isbildning och svallisformationer som begränsar berganläggningens funktion, exempelvis genom att ta trafikutrymmen i anspråk, dessutom löper installationer risk att överbelastas och gå sönder. Fordon kan skadas genom påkörning av svallis eller fallande is vid passage.



Figur 6.1 Orsaker till igensättningsproblem hos dräner, efter Johansson och Stille, 1996.

⁹ Detta avsnitt har författats av Lars-Olof Dahlström och är en sammanfattning av det examensarbete i ämnet som under 2008 drivits inom projektets försorg. Jim Eklidens examensarbete finns att läsa i sin helhet i Bilaga 5.

Det är inte ovanligt att dränernas funktion begränsas och då framförallt på grund av igensättning i någon form. Om en drän tätnar och tappar sin funktion innebär det att vattnet bakom dränen vanligen tränger ut vid sidan av densamma. Det finns flera orsaker till orsaken till varför en drän kan sätta igen, vilket illustreras i Figur 6.1.

I tunnlar där det föreligger risk för köldinträngning (inträngning av nollisotermen) och isbildning installeras vanligen isolerande dräner, för att förhindra frysning.

Kemiska och bakteriella utfällningar av metaller som finns lösta i grundvattnet är en vanlig orsak till igensättning. De metaller som orsakar störst problem med utfällning är järn, mangan och kalcium. Vid järnutfällningar är det Eh- eller pH-förhållanden som avgör om det är den kemiska eller bakteriella utfällningen som dominerar. Vid högt Eh och pH förbrukas snabbt det Fe^{2+} som finns löst i grundvattnet genom kemisk utfällning, vilket hindrar den biologiska utfällningen. Vid lägre Rh och Ph är de rent kemiska processerna långsamma och utfällningen är huvudsakligen biologisk.

Material som rasar ner från berget bakom dräner är ytterligare en orsak till igensättning, samt material som finns suspenderade i grundvattnet. Om dränen inte sluter tätt mot berget vid installationen finns risk för att betongspill tränger in i samband med att den sprutas in med sprutbetong, vilket leder till att den sätts igen redan vid byggskedet.

Under vinterhalvåret kan isbildning bakom en otillräckligt isolerad eller för kort drän leda till igensättning.

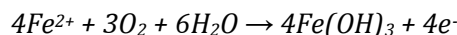
Ett annat fenomen som inte direkt kan förknippas med igensatt drän är sprickmineralisering som medför att vattnet söker sig nya vägar och orsakar läckage utanför dränen.

Den absolut vanligaste orsaken till igensättning är bakteriella processerna som påskyndar de kemiska processerna och bidrar till stora mängder slam. Därför har vi valt att fokusera speciellt på just kemiska och bakteriella orsaker till igensättning.

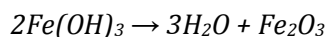
6.1.1 KEMISK UTFÄLLNING

Vid ett tunnelbygge störs den kemiska jämvikten som råder mellan grundvattnet och det omkringliggande berget. En stor bidragande orsak till utfällning är den syresättning av det vatten som finns i sprickor i anslutning till tunneln. Dessutom sker en förändring av temperatur och tryck som påverkar vattnet. Grundvattnet i berggrunden har normalt mer eller mindre reducerande förhållanden och när syre blir tillgängligt i anslutning till tunneln kommer vissa ämnen som är lösta i grundvattnet att falla ut genom oxidation. De ämnen som vanligtvis bildar utfällningar i bergtunnlar är som tidigare nämnts järn, mangan och kalcium.

Järn i grundvattnet förekommer främst som Fe^{2+} . När syretillgången ökar oxideras Fe^{2+} till Fe^{3+} samtidigt som det reagerar med vatten enligt:

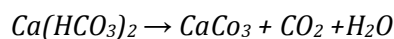


Järnhydroxiden ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) som faller ut är en rödbrun elastisk massa som är svårlöslig i vatten. Med tiden avges vatten som är bundet till utfällningens struktur och istället bildas avlagringar av järnoxider, som exempelvis hematit (Fe_2O_3) och magnetit (Fe_3O_4). Vid omvandlingen hårdnar utfällningen. Reaktionen vid omvandlingen till hematit sker enligt

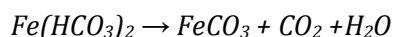


Mangan som är löst i grundvatten med låg syrehalt förekommer som Mn^{2+} . Vid ökad syretillgång bildas liksom för järn en utfällning orsakad av oxidation där Mn^{2+} oxiderar till Mn^{4+} .

Kalcium faller ut på grund av ändrade förhållanden när grundvattnet rinner ut i tunneln. Vattnet blir övermättat på kalcium pga. trycksänkning och avdunstning. Kalcium i form av



Om vattnet innehåller järn kan det på samma sätt falla ut som järnkarbonat [Lindblad -Påsse, 1986].



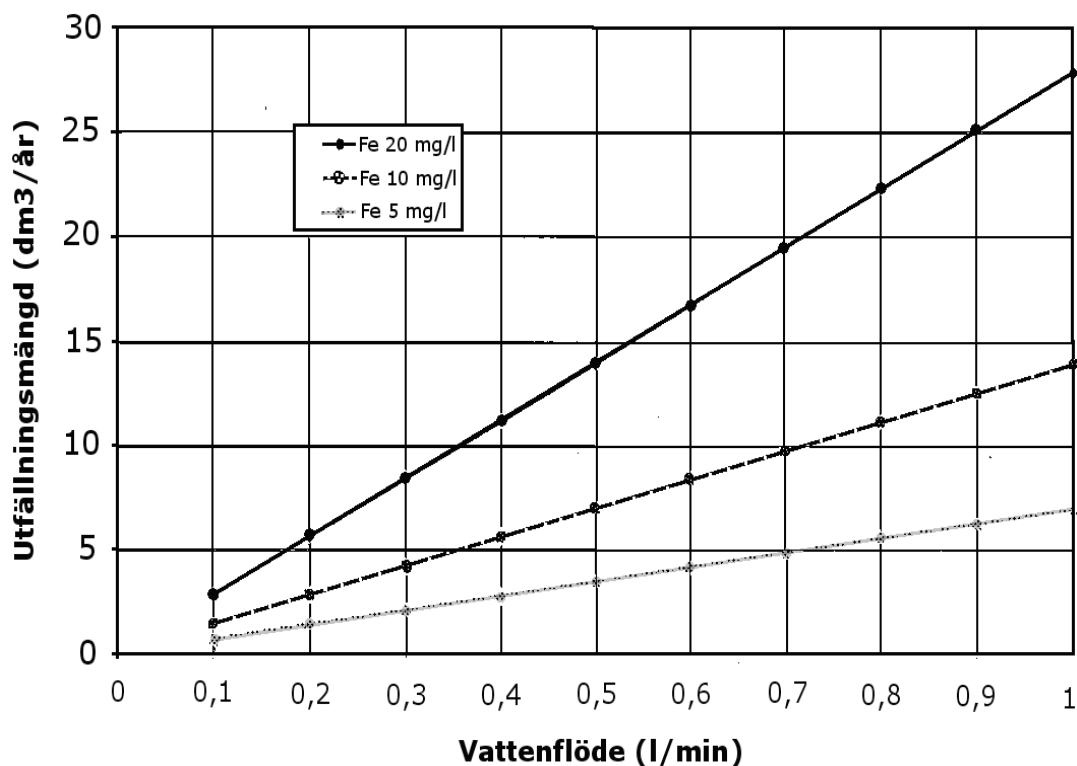
6.1.2 BIOLOGISK UTFÄLLNING

Den kemiska utfällning och igensättningen påskyndas av bakterier. Bakterierna är encelliga organismer med en genomsnittlig storlek av någon mikrometer. De existerar som tusentals olika arter över världen [SKB, 2002; www.bioresurs.uu.se] och förekommer i mycket skiftande miljöer. Förutsättningen för bakterierna är tillgång till vatten, energi och kol, antingen organiskt eller oorganiskt. Bakterier förökar sig genom delning och med rätt förutsättningar kan en bakterie dela sig var 20:e minut [Lindblad-Påsse, 1986] Bakterietillväxten begränsas av tillgången på näring, men också yttre fiender som olika former av virus [Eydal et al. 2008]. Ett virus kräver andra organismer som näringskälla för sin överlevnad och i bergrunden finns virus som lever på bakterier. Allteftersom virus konsumerar bakterier (näringskälla) försvinner virusets gynnsamma förutsättningar och antalet virus minskar, vilket leder till att bakterierna åter kan öka till antal.

I sedimentär berggrund förekommer bakterier som förmodligen har sitt ursprung i de bakterier som blev instängda i sedimenten och som har anpassat sig till den nya miljön [SKB, 2000]. Magmatiska bergarter eller metamorfa som har sitt ursprung ur magmatiska bergarter, bildas vid högre temperaturer i vilket inget liv kan leva ($\geq 1000^\circ$). Bakterierna har istället nått ner först efter att bergrunden spruckit upp och vatten letat sig ner i sprickorna [SKB, 2000].

Utfällningsproblem orsakade av bakterier brukar oftast förknippas med järn. Det finns både järnreducerande och järnoxiderande bakterier, vilka omvandlar järn mellan olika oxidationstal. De reducerande bakterierna reducerar järn i olika kemiska föreningar, som inte själva bildar några utfällningar med bidrar indirekt genom att öka mängden Fe^{2+} , vilket gynnar de

järnoxiderande bakterierna. De bakterier som oxiderar Fe^{2+} till Fe^{3+} och som dessutom utnyttjar den energi som frigörs vid oxidation kallas järnbakterier. Till de vanligaste järnbakterierna räknas *Gallionella ferrugina*, *Acidithiobacillus ferroxidans* och bakterier tillhörande gruppen *Sphaerotilus-Leptothrix*. Den mängd energi som blir tillgänglig för järnbakterierna vid oxidation är ganska liten. Detta medför att stora mängder Fe^{2+} måste oxideras för att bakterierna skall överleva, vilket orsakar att stora mängder utfällningar. I Figur 6.2 visas mängden bakteriella utfällningar som kan bildas under ett år som funktion av vattenflöde och järnhalt. Förutom att bilda stora mängder utfällningar så fastnar utfällningar som orsakats av bakterier lättare på ytor än vad rent kemiska utfällningar gör [Lindblad-Påsse, 1986]. Utöver järnbakterierna finns det bakterier som skyndar på oxidationen av Fe^{2+} till Fe^{3+} utan att utnyttja den frigjorda energin.



Figur 6.2 Mängden bakteriella järnutfällningar som funktion av vattenflöde och vattnets järnhalt.

Dessa bidrar till att skapa stora volymer utfällningar dels genom att fungera som katalysator för oxidationsprocessen och dels genom att det utfälllda järnet binder direkt på bakterierna. Utfällningen av järn benämns BIOS "Bacteriogenic Iron Oxides". Förutom oxidation av Fe^{2+} kan vissa bakterier bidra till oxidation av Mn^{2+} till Mn^{3+} eller Mn^{4+} [Ghiorse & Siering, 1997;

Salomonson, 2001]. Det finns ett stort antal kända bakterier som ger utfällningar av antingen järn eller mangan eller båda dessa metaller. Tabell 6-1 ger en översikt av bakterier som förknippas med järn- och manganutfällningar. Dessa bakterier förekommer i miljöer som skiljer sig stort beträffande förhållanden som pH och Eh.

Tabell 6-1. Bakterier som faller ut järn och/eller mangan, efter [Andersson, 1991 och Salomonsson, 2001].

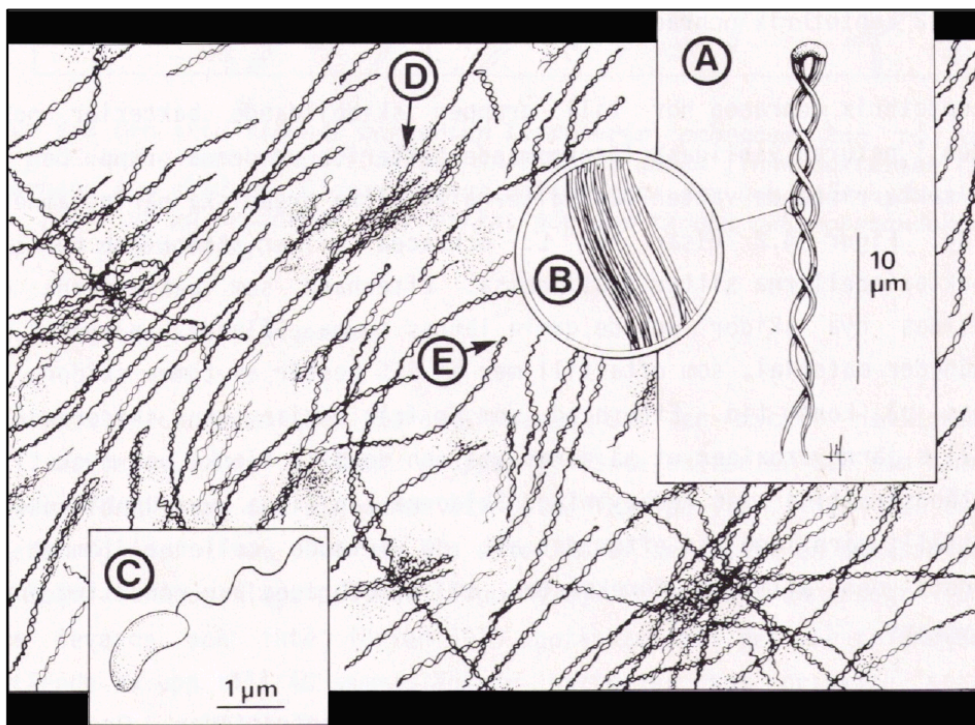
Släkte	Utfälld metall	Släkte	Utfälld metall
Acidithiobacillus	Fe	Naumaniella	Fe
Arthrobacter	Mn	Ochrobium	Fe
Clonothrix	Fe, Mn	Pseudomonas	Mn
Clostridium	Fe	Siderobacter	Fe
Crenothrix	Fe, Mn	Siderocapsa	Fe, Mn
Desulfovibrio	Fe	Siderocystis	Fe, Mn
Ferribacterium	Fe, Mn	Sideromonas	Fe, Mn
Ferrobacillus	Fe	Sideronema	Fe, Mn
Gallionella	Fe	Siderophacus	Fe
Hyphomicrobium	Fe, Mn	Siderosphaera	Fe
Leptothrix	Fe, Mn	Sphaerotilus	Fe
Metallogenium	Fe, Mn	Sulfolobus	Fe
Micromonospora	Fe	Toxothrix	Fe

I Bilaga 5 finns beskrivning över ett flertal kända bakterier som bidrar till utfällningar som kan sätta igen dräner. Den absolut vanligaste bakterien vid kända igensättningsproblem på grund av bakteriell tillväxt är Gallionella Ferruginea. Genom att beskriva dess tillväxt kan man lätt förstå varför det kan bildas så stora mängder utfällningsslam.

Gallionella ferruginea tillhör gruppen stjälkförsedda bakterier och producerar en stjälk som består av två tvinnade knippen av tunna fibrer. Varje knippe består i sin tur av 70 – 80 fibrer. Den enda levande delen på bakterien är den böjformade cellkroppen, se Figur 6.3. Stjälkarna växer till först när bakteriens livsmiljö blir ansträngd. Innan bakterien börjar bilda stjälk är den frilevande och förflyttar sig med en eller flera flageller. När bakterien börjar bilda stjälk övergår den istället att vara fastsittande. Cellkroppen är liten och svår att upptäcka i ljusmikroskop men med sin karaktäristiska stjälk är de lätta att identifiera. Längden på stjälken kan vara relaterad till hur mycket Fe^{2+} som oxideras [Anderson & Pedersen, 2003], vilket skulle innebära att det allt eller det mesta av det Fe^{3+} som bildas binds vid bakteriens stjälk. Desto mer Fe^{3+} som bildas desto längre måste stjälken vara för att kunna binda järnet. Även om inte allt Fe^{3+} binds till stjälkarna, så binds en stor del av det utfällda järnet hit. Den stora volym av utfällningar som orsakas av Gallionella Ferruginea beror på att bakteriens stjälkar blandas med det utfällda

järnet. Utfällning av Fe^{3+} sker 60 gånger snabbare i miljöer som domineras av *Gallionella Ferruginea* jämfört med miljöer som saknar bakterier, [Anderson & Pedersen, 2003].

Gallionella Ferruginea kräver en viss mängd syre för att trivas. Helst skall syrehalten i vattnet vara mellan 0,1 – 1 mg/l. Om syrehalten skulle vara högre är inte Fe^{2+} längre stabilt vilket betyder att bakteriens huvudsakliga energikälla försvinner. Vidare trivs bakterien bäst vid ett pH 6,0 – 7,6 och redoxpotentialen (Eh) någonstans mellan +200 till +350 mV. En gynnsam temperatur ligger mellan 8-16°C, och även om den föredrar tvåvärt järn i halter mellan 5-25 mg/l så kan den leva vid lägre halter. Koldioxidhalten bör vara ≥ 20 mg/loch det är även gynnsamt med låga mängder av organiskt material. Dessutom behöver bakterien en viss mängd organiska salter, som tex. ammonium och en god tillgång på karbonater. När syrehalten är mellan 0,3 – 1,5 mg/l och redoxpotentialen är större än 145 mV lever bakterien under ansträngda förhållanden och bildar därför stjälk, [Anderson & Pedersen, 2003].



Figur 6.3 *Gallionella Ferruginea*, A) Cellkropp med stjälkar, B) Stjälkarna består av ett antal fibrer, C) frilevande cell som förflyttar sig med Flagell, D) Utfällda järnhydroxider, E) Cellkroppen i sig är mycket liten och svår att identifiera.

I Tabell 6-2 redovisas faktorer som påverkar risken för utfällning. Det skall dock påpekas att de optimala förhållandena för olika typer av bakterier varierar.

Tabell 6-2. Faktorer som påverkar kemiska och bakteriella utfällningar

Faktor	Förklaring
Tid	Tidsaspekten avgör främst om utfällningspotential kan observeras och leda till förebyggande åtgärder.
Vattenföring	Mängden vatten avgör hur mycket metalljoner som transporteras till tunneln och därmed hur stor volym utfällningar som kan bildas.
Bergart	Tillför grundvattnet metalljoner genom vittring.
Bakterier & Virus	Bakterier medverkar både vid vittringsprocesser och vid utfällning. Virus motverkar bakterier och begränsar därmed mängden utfällningar.
pH	Påverkar vittringsgrad samt vilka bakterier som förekommer och om utfällning sker rent kemiskt eller med hjälp av bakterier.
Eh (redox)	Påverkar om kemisk eller biologisk utfällning dominerar, samt om miljön är gynnsam eller inte för olika bakterier.
Mängd cementinjektering	Tillför kalcium till grundvattnet samt påverkar pH.
Kolsyra	Bidrar till vattnets vittringsförmåga.
Temperatur	Påverkar vilka bakterier som förekommer.
Bergtäckning över tunnel	Påverkar vattnets uppehållstid i berggrunden och därmed bl.a. syrehalt samt jonstyrka hos grundvattnet.
Markförhållanden över tunnelsträckning	Om organiskt material förekommer i stor mängd så bidrar det till reducerande förhållanden, vilket ökar risken för höga halter järn i grundvattnet.
Bergbultar	Kan tillföra metalljoner till grundvattnet p.g.a. korrosion.

6.1.3 SUSPENDERAT MATERIAL

En annan orsak till igensättning beror på suspenderat material som successivt avsätts i dränerna. Typiskt suspenderat material som transporteras med vattnet i berget är vittringsprodukter, framförallt lerpartiklar, levande och döda bakterier samt kolloider av olika slag. Dessa partiklar transporteras med vattnet och avsätts i sprickor som då sätter igen delar av vattnets flödesvägar. Den del av det suspenderade materialet som når fram till tunneln och mynnar ut bakom en drän kan medverka till igensättning av dräner.

6.1.4 UTRASAT BERG- BETONGMATERIAL

Dräner monteras antingen direkt mot berget eller utanpå sprutbetong som applicerats som bergförstärkning. Bergmaterial eller dålig sprutbetong kan falla ner i dränen och blockera den. Att material faller är inte ovanligt. Dräner placeras ofta i samband med sämre bergpartier, där berget är uppsprucket genom förskjutningar i bergmassan. I dessa områden finns det många flödesvägar och trots injektering brukar mer eller mindre vatteninläckage återstå. Skulle inte dessa områden förstärkas med sprutbetong kommer successivt bergmaterial (vittringsprodukter, lera -grus till större stenar) falla ut på grund av vattenflöde som drar med sig material i kombination med en kontinuerlig spänningsomlagring som orsakar krypning och uppluckring. I dessa områden kan det vara svårt att erhålla god vidhäftning mellan berg och sprutbetong, och det är inte helt ovanligt att sprutbetongen faller ner.

I tunnlar där temperaturen tillåts falla under noll, kan vattnet i ytnära sprickor frysa. Isen utövar då ett tryck i sprickan som hjälper till att successivt bryta loss material.

Under byggskedet, vid insprutning av dräner är det viktigt att se till att sprutbetong inte tränger in bakom dränen. Denna risk är störst vid smala dränkonstruktioner. ’

6.1.5 ISBILDNING

Isbildning i dräner kan tvinga det icke frusna vattnet att tränga ut vid dränens sidor, vilket i sin tur fryser och bildar mer eller mindre stora isformationer (svallis). Kraftig isbildning i dräner och utanpå riskerar att skada genom att den utsätts för tryck, större än för vilken dränkonstruktionen är dimensionerad.

6.2 FÄLTFÖRSÖK

För att få en ökad förståelse av dräner i tunnlar, igensättningsproblem och dess konsekvens har en fältundersökning utförts i två av projektets huvudfinansiärers (TeliaSonera och Göteborgs Energi), tunnlar i Göteborg. Till skillnad mot trafiktunnlar som ägs av Banverk och Vägverk, är temperaturen i Telias och Göteborgs Energis tunnlar nästan uteslutande frostfria. Dels på grund av indirekt uppvärmning från fjärrvärmesystem, men också orsakat av att tunnelsystemen har dörrar vid infarter och utfarter. Detta begränsar luftströmmar av kallluft under vintern, och bergmassan ges därför möjlighet att temperera tunnelarna. Dränerna i de undersökta tunnelarna har alltså generellt inte problem med isbildning.

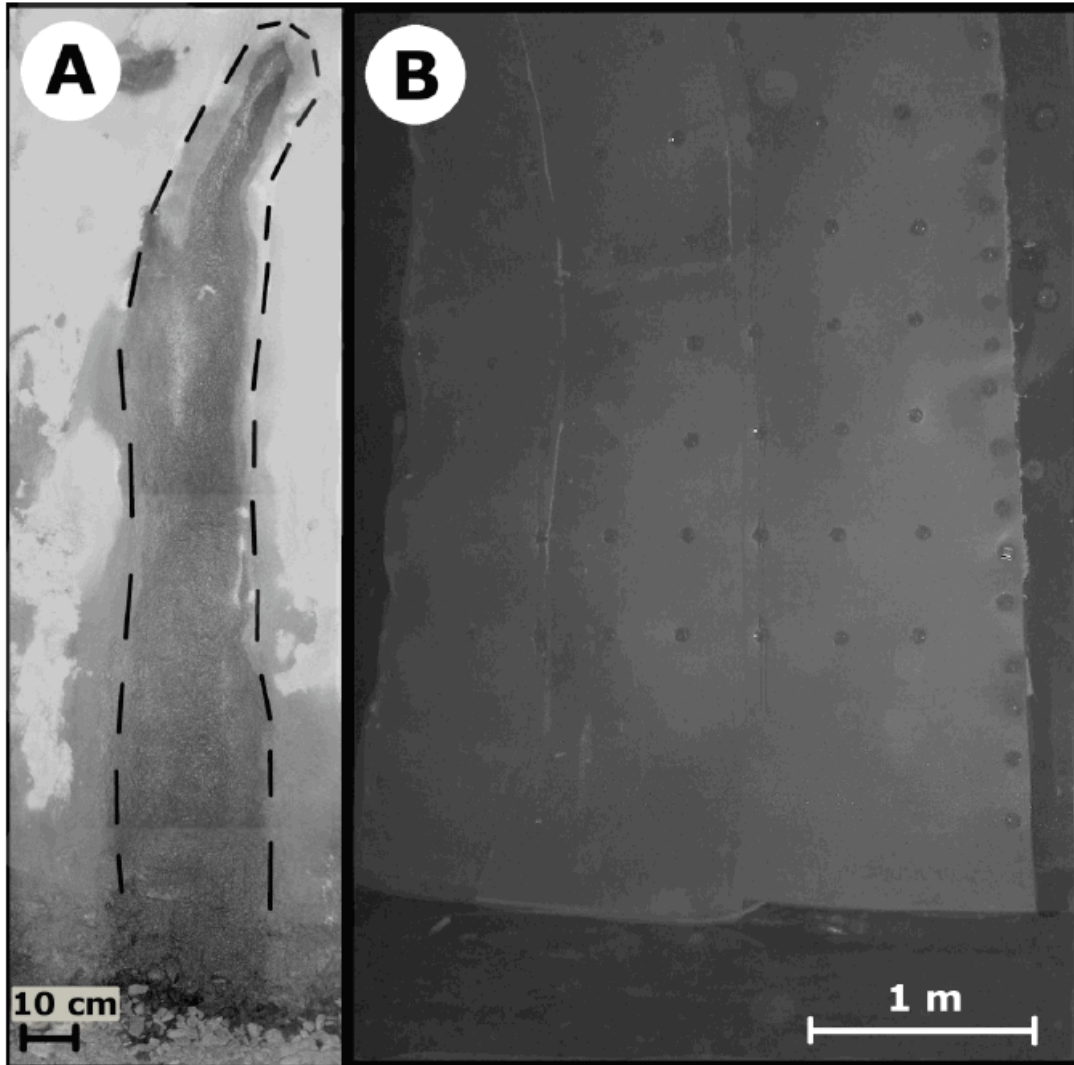
De undersökta tunnelarna har varit i drift relativt länge, redan sen slutet av 1960-talet. Tunnelarna uppvisar problem med utfällningar, och dränerna mynnar strax ovanför sulan och gör det därför möjligt att se i vilket tillstånd de befinner sig.

6.2.1 UNDERSÖKTA TUNNLAR

Dränerna i TeliaSoneras tunnlar är smala, ca 30 cm, och täckta med sprutbetong. Detta gör det mycket tidskrävande att identifiera alla dräners läge och avgöra i vilket skick de befinner sig. De delar av Kålltorps- och Delsjötunnelarna som studerats har en sammanlagd längd av ca 7,7 km och utgör ca 35 % av TeliaSoneras tunnlar i Göteborg. Tunnelsystemet är sekretessbelagd, varför inga kartor kommer att redovisas. Delsjötunneln nyttjas endast av TeliaSonera, medan Kålltorpstunneln även nyttjas av Göteborgs Energi. I Kålltorpstunneln är därför ena tunnelväggen utnyttjad för dragning av fjärrvärmeledningar. I Delsjötunneln pendlar temperaturen över året mellan 10 – 15 °C och i Kålltorpstunneln mellan 20 -25°.

Bygget av TeliaSoneras tunnlar pågick under slutet av 1969-talet och början av 1970-talet. Både för- och efterinjekteringar utfördes, men i mycket varierande omfattning. Dräner är vanligt förekommande och konstruktionen består av inplastad mineralull som täckts med stålnät och oarmerad sprutbetong. Dränerna följer helt sprickorna längs bergytan och täcker endast en liten

del av berget vid sidan av sprickorna. Till skillnad mot moderna dräner som mer eller mindre täcker in hela bergväggen där vattenförande sprickor förekommer, se Figur 6.4

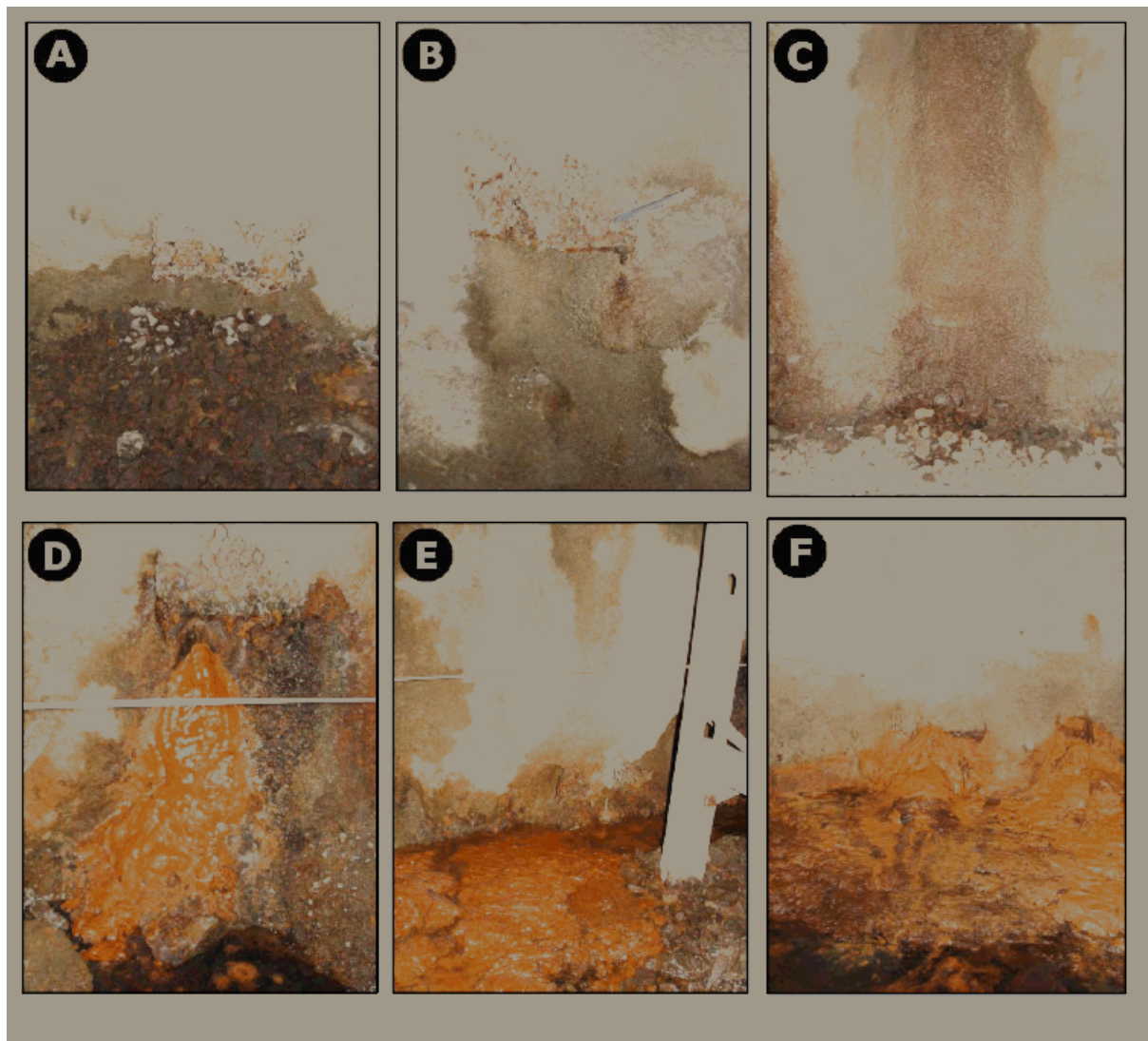


Figur 6.4 Olika dränkonstruktioner. A) Äldre, smal dränkonstruktion som helt följer den vattenförande sprickan. Fotot visar en drän i Delsjötunneln. B) Frostisolerad drän.

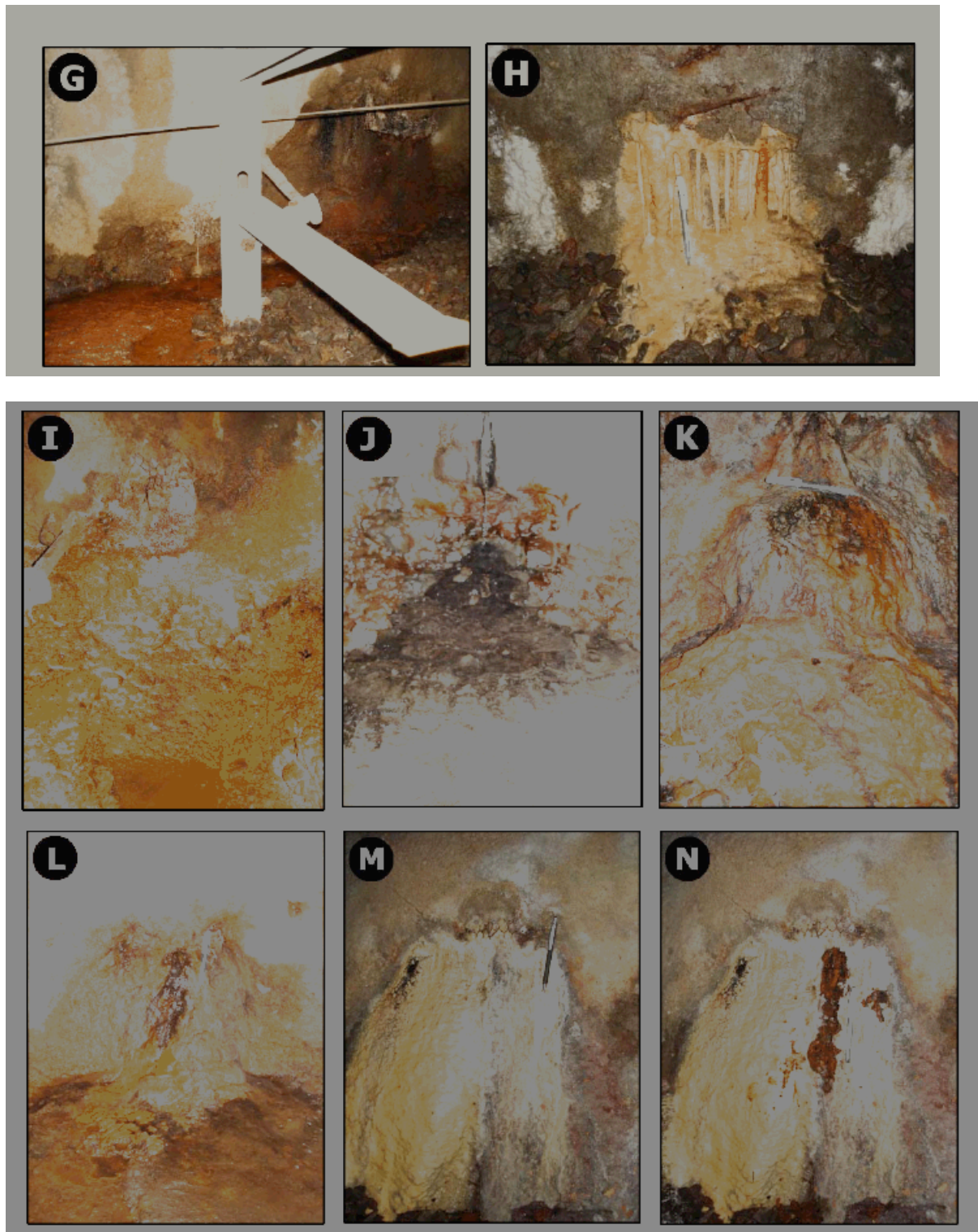
Dräner i Figur 6.4A är täckt med sprutbetong men den streckade linjen visar ett ungefärligt läge. En nyare dränkonstruktion som täcker in ett större område av bergväggen visas i Figur 6.4B. Den isolerande dräner kommer senare att täckas med fiberarmerad sprutbetong. Bilden är tagen från Nygårdstunneln (järnvägstunnel), några mil norr om Göteborg.

6.2.2 STATUSBEDÖMNING AV DRÄNER

En inventering av dräner i Kålltorps- och Delsjötunneln har visat ett antal typtillstånd. Dräner med gulvit, brunröd, svart eller olikfärgad fällning, varav vissa var helt täta och vissa fyllde sin funktion, dock i mer eller mindre begränsad omfattning. Dessutom fanns öppna men torrlagda dräner, samt fullt fungerande dräner utan utfällningar. Figur 6.5 redovisar foton med några typiska förhållanden



Figur 6.5 Foton från Kålltorpstunneln och Delsjötunneln. A) Torr drän utan utfällningar. B) Fullt fungerande drän. C) Tätt drän, vattnet tränger ut genom sprutbetongen. D) Nästan heöt tätt drän, järnutfällningar. E) Fullt fungerande drän, järnutfällningar har bildats utanför dränen. F) Järnutfällningar.



Figur 6.5 Forts. G) Två fungerande dräner, järnutfällningar nedanför. H) Drän med järnförorenade kalcitavlagringar. Bredvid dränen har ren kalcit bildats på sprutbetongen. I) Delvis förhårdnade järnutfällningar. J) Manganutfällningar. K) Järn- och Manganutfällningar.

L) Järn- och Manganutfällningar. M+N) Järn- och manganutfällningar med kalcitskorpa.

De tre typer av utfällningar och avlagringar som förekommer i tunnarna är rödbruna, svarta eller vita till färgen och respektive bildning antas vara baserad på järn, mangan eller kalcium, vilket bekräftades av analyserade vattenprover. En intressant iakttagelse var att grundvattenkemin och utfällningspotentialen kan vara mycket lokal. Undersökning av vattenkemin vid två dräner alldeles intill varandra, där den ena fungerar och den andra är helt igensatt, visade stora skillnader i vattenkemin och utfällningspotential. Vilket visar hur svårt det kan vara att avgöra var dräner riskerar att sätta igen pga. utfällningar.

Den stora volymen hos de järnbaserade utfällningarna talar för att bakterierna haft en stor inverkan vid utfällningsprocessen. Vattenkemin enligt analysen talar dock generellt mer för att utfällningarna bildats genom oxidation av Fe^{2+} i grundvattnet pga. vattnets pH och järnhalt. Vid $\text{pH} > 7$ och järnhalt < 1 mg/liter anses den kemiska oxidationen av järn dominera och bakteriell oxidation vara mindre i sin omfattning [Johanson & Stille, 1996].

6.2.3 REFERENSTUNNLAR

TeliaSonerans tunnlar är byggda utan systematisk förinjektering och inläckaget är på viss ställen rikligt. Höga vatteninflöden skapar goda förutsättningar för stora mängder utfällningar och därmed igensättning av dräner. Vid besök i två tunnlar som ägs av Göteborgs Energi konstaterades att inläckande vatten och utfällningar fanns i betydligt mindre omfattning. De två tunnarna, Guldhedstunneln och Majornatunneln byggdes under början av 1980-talet och omfattande förinjekteringsarbeten utfördes. För övrigt överensstämmer geologin med de tidigare undersökta TeliaSonera tunnarna.

6.3 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Igensättning av dräner orsakar underhållsbehov i berganläggningar. Igensättning leder till att vatten bakom dränerna tvingas leta sig andra vägar och därför läcker fram bredvid dränerna. Underhållsbehovet varierar beroende på tunnarnas funktion. Hade den status på dräner som noterats i de i denna studie undersökta tunnarna gällt trafiktunnlar hade dessa behövt åtgärdas för länge sedan till en mycket hög kostnad, eftersom belastningen och funktionskravet i trafiktunnlar i Skandinavien är ett helt annat. I TeliaSonerans och Göteborgs Energis tunnlar måste icke fungerande dräner bytas ut i de fall vattnet utgör ett hot mot ledningar och installationers funktion, eller utgör ett hot mot tunnelns bärande huvudsystem. En renovering eller ersättning med nya dräner kan i dessa tunnlar även ske utan avstängning av väg- eller tågtrafik och man är inte i samma utsträckning utsatta för tidspress eller nattarbeten.

I princip alla bergtunnlar har problem med inläckande vatten men problemets storlek varierar mycket. Normalt är mängden inläckande vatten direkt relaterat till hur omfattande injekteringsarbeten som utförts, däremot inte mängden dräner. Trots omfattande injektering

kommer återstående dropp finnas kvar. Dessutom kan injektering orsaka utökad mängd dräner, eftersom injektering medför ett totalt mindre inflöde men spritt över ett större område.

För att undvika igensättning av dräner bör de installeras under förutsättningar som undviker igensättning pga. vittringsprodukter av berg eller betong. Dräner bör konstrueras spolbara för att undvika igensättning pga. bakteriell utfällning. De skall spolas i en sådan omfattning att utfällningar inte börjat täckas av en förhårdnat skikt eller börjat stelna, vilket normalt innebär 2 à 3 gånger per år.

Vidare studier bör omfatta utveckling av dränsystem samt kvantitativa och kvalitativa studier av dräners installations- och underhållskostnader, för att kunna anpassas till projektets huvudsyfte, att studera det bärande huvudsystemet och installationer utifrån ett LCC- analys perspektiv.

Det bärande huvudsystemet i tunnlar dimensioneras idag för 120 år, medans installationer såsom dräner dimensioneras för 40 år. Det har emellertid visat sig att dräner ofta måste åtgärdas i betydligt större omfattning. Naturligtvis kan man utveckla mer robusta och effektiva dränsystem. Alternativt utvecklas system som är smidiga att åtgärda eller bytas ut. En fortsättning på denna studie kunde vara att studera vilka förutsättningar det finns för att utveckla sådana system.

Underhåll av dräner utgör en stor kostnad för tunnelägare, men hur stor är den och hur fördelas den? För att kunna föra in dränproblematiken i en LCC- analys måste sådana uppgifter i större utsträckning vara kända. Dessa uppgifter bör kunna erhållas genom kvantitativa såväl som kvalitativa bedömningar. Information tas fram tillsammans med tunnelägare genom genomgång av uppföljningsdokumentation och intervjuer.

6.4 REFERENSER

Andersson C R & Pedersen K (2003): *In-situ growth of Gallionella biofilms partitioning of lamthanides and actinides between biological and ferric oxyhydroxides*. Geobiology, Vol. 1. No 2, pp 169-178.

Andersson A-C (1991): *Förekomst av järn i grundvatten*, Publ. 2:91, Geologi, CTH, Göteborg.

Giorse W C & Siering P L (1977): *Development and application of 168 rDNA-targeted probes for detection of iron- and manganese-oxidizing sheathed bacteria in environmental samples*. Applied and Environmental Microbiology, Vol. 63, No 2, pp 644-651.

Johansson J & Stille B (1996): *Ringan & Ytrre Tvärleden. Test av dräner i tunnel vid Hornsberg. Dränfunktion vid igensättning*. Vägverket, Stockholm.

Lindblad-Påsse (1986): *Järnutfällningsproblem i grundvattenvärmsystem*. Byggeforskningsrådet rapport R:109. Liber Tryck, Stockholm.

Underhåll av berganläggningar – Etapp II
SBUF Utvecklingsprojekt 11844. Slutrapport mars 2009

Salomonsson M (2001): *Utvärdering av manganavskiljningen i Söndrums vattenverk*. Luleå Tekniska Universitet.

SKB (2000): *Mikrober*. SKB Informationsblad.

7 NEDBRYTNING AV INJEKTERINGSCEMENT I BERGSPRICKOR – PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP¹⁰

7.1 BAKGRUND

Utredningen som gjordes i samarbete mellan Chalmers Geo-avdelning och Avdelningen för kemi på Göteborgs Universitet avsåg att belysa beständigheten av cementmaterial för berginjektering. Arbetet har inriktat sig på förhållandena i storstäder som Stockholm och Göteborg. Injekteringsens beständighet är kopplat till många faktorer: grundvattnets kvalitet, mekanismerna vid urlakning av injekteringsmedlet i sprickorna, utförandet vid injekteringen och lösligheten hos injekteringen i olika vattenmiljöer. Arbetet har omfattat en analys av samtliga dessa faktorer.

En gemensam slutsats av arbetet är att cementinjektering har mycket god beständighet i den urbergsgeologi och den vattenkemiska miljö som råder.

7.2 GRUNDVATTENKEMI

7.2.1 INLEDNING

Grundvattnets kemi har betydelse på många sätt i bergbyggandet, både med hänsyn till konstruktioner och till andra byggnadsdelar. Inläckande vatten medverkar till korrosion och andra bekymmer och detta är direkt kopplat till vattenkvaliteten. Genom att vi bygger i berg påverkar vi också vattenomsättningen vilket kan ge förändringar i vattenkvalitet.

Grundat på denna analys görs ett försök att kondensera datamaterialet till ett litet antal "typvatten" som kan användas som utgångspunkt för bedömningar och beräkningar av beständigheten hos injektering. Slutligen redovisas en analys av den hydrogeologiska situationen i Stockholm och Göteborg och den vattenkvalitet man kan förvänta sig i berggrunden där.

7.2.2 PROCESSER I MARKZONEN

Figur 7.1 visar att det är markzonen som avgör när grundvattenbildningen sker. Det är här vi har växtrötter och djur som lever och det är här en mängd biogeokemiska processer äger rum. Markzonen brukar med ett annat ord också kallas *jordmånen*.

¹⁰ Detta avsnitt är ett extrakt av en rapport författad av Gunnar Gustafson, Magnus Hagström och Zareen Abbas "Beständighet av cementinjektering". Rapporten finns i sin helhet i Bilaga 6. Där finns också hänvisningar till Litteratur som refereras till i rapporten.

Figur 7.1. Grundvattenbildningen och markens magasinssystem. P = nederbörd, E = evapotranspiration, w_{FC} = fältkapacitet, w_{WP} = vissningspunkt och S = vattenmättnadsgrad.

En viktig process är gasutbytet med atmosfären. Det innebär att syre förs till alla skikten så att en aerob nedbrytning av växt- och djurrester kan ske och att bildad koldioxid kan avgå till atmosfären. En följd är att det finns ett syreöverskott i hela profilen och också i grundvattenmagasinet.

7.2.3 SALT GRUNDVATTEN

Ett fenomen som har stor betydelse för grundvattenkemin är förekomsten av salt grundvatten på djupa nivåer. Det mesta salta grundvattnet kom dit efter senaste istiden när landet var täckt av hav efter isavsmältningen. Genom att havsvattnet har högre densitet har det sjunkit ned mot djupet och genom att det är tungt stannar det kvar om grundvattenomsättningen är liten.

7.2.4 PÅVERKAN PÅ VATTENKEMIN AV VATTENUTTAG OCH BERGANLÄGGNINGAR

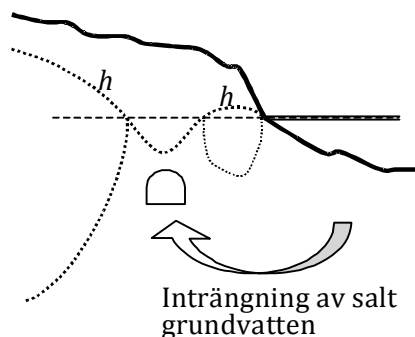
Genom att ta ut grundvatten från brunnar eller genom att bygga tunnlar, bergrum och stora schakter förändrar vi vattenbalans och flödesmönster. Detta påverkar vattenkvaliteten.

När en tunnel byggs ökar grundvattenbildningen och nya områden blir produktiva. Speciellt gäller att tidigare torvområden blir aktiva och den anaeroba miljön medför att järn löses ut som tvåvärt järn i det vatten som strömmar mot tunneln. Vid tunneln blandas detta vatten med det

syrehaltiga från tunnelns topp och i tunneln kommer det i kontakt med luftens syre. Resultatet blir de järnutfällningar som man kan se i nästan alla tunnlar som läcker vatten.

7.2.5 SALTVATTENUPPTRÄNGNING

I kustbandet och under öar finns som nämnts oftast ett salt grundvatten på större djup. Genom dränering till brunnar eller tunnlar kan detta salta vatten dras upp till högre nivåer (upconing) och ge bräckt vatten i brunnarna och ett korrosivt inläckande vatten i tunnlarna. En konceptuell modell av saltvatteninträngning ges i Figur 7.2.



Figur 7.2. Saltvatteninträngning (upconing).

För en brunn eller en tunnel finner vi att avsänkning ger en motsvarande höjning av gränsskiktet. Det innebär att en sänkning av grundvattenytan ovanför en tunnel till under havsnivån alltid ger en risk för salt grundvatten om man är nära kusten.

7.2.6 GRUNDVATTENBILDNINGSFÖRHÅLLANDEN I STADSBEBYGGELSE

En tät stadsbebyggelse är en mosaik av olika grundvattenbildningsmiljöer. Ursprungligen har även en stadsmiljö varit naturmark och liknande förhållanden förekommer också i dag i parker och obebyggda områden. Dock har stadsbebyggelsen också medfört stora förändringar i grundvattensystemet som också påverkar grundvattnets sammansättning.

Grundvattenkvaliteten i berget styrs av förhållandena i jordlagren. I områdena med friktionsjord upp till markytan går processen relativt snabbt och kvaliteten närmar sig så småningom en vattensammansättning som liknar den i fyllningen. På vägen bryts dock det mesta organiska materialet ned och under denna process förbrukas syre. Detta gör att järn och mangan går i lösning. Nitrat och viss mån sulfat reduceras också. Många tungmetaller binds till stor del till markmaterialet. Det som främst går igenom opåverkat NaCl från gatusaltningen. I de lertäckta områdena är processen mycket långsam.

7.2.7 GRUNDVATTENDATA I SGU:S DATABAS

I det följande ges en kort sammanfattning av de grundläggande vattenkemiska egenskaperna hos det grundvatten som kan korrodera och bryta ned cementinjektering, utgående från SGUs databas för grundvattendata över berggrundvatten. Denna är relaterad till bergart vilket kan vara en viktig fråga för injekteringens beständighet.

I SGUs bedömningsgrunder behandlas 7 miljörelaterade aspekter på grundvattnet:

- Alkalinitet – risk för försurning
- Kväve
- Salt – klorid
- Redox
- Metaller
- Bekämpningsmedel
- Grundvattennivå

Av dessa har alkalinitet – risk för försurning och ökning av sulfathalten samt total salthalt direkt betydelse för cementinjekteringens beständighet. Övriga är sannolikt av mindre intresse. Man kan möjligen lägga till att redox har stor betydelse för beständighet och livslängd för dräner och dränsystem.

En intressant fråga är om det finns några regionala skillnader av betydelse. För denna jämförelse indelades Sverige i ett antal geologiska regioner där man funnit signifikanta skillnader i vattenkvalitet och grundvattenpåverkan. Dessa visas i Tabell 7-1

Tabell 7-1. Grundvattenregioner i Sverige enligt SGU

A	Sydsveriges sedimentära berggrundsområde
B	Sydsvenska höglandet
C	Väst- och sydostkusten
D	Mellansveriges sedimentära berggrundsområde
E	Mellansvenska sänkan
F	Upplands kalkpåverkade område
G	Norrlandskusten
H	Sedimentära berggrundsområden i Dalarna och Jämtland
I	Urbergsområden i norrlandsterrängen ovanför högsta kustlinjen

Alkalinitet – risk för försurning

Alkaliniteten är en faktor som påverkar nedbrytningen av cement och är därför av intresse för underhållsbehovet. Då variationerna inom varje region kan vara stora är det intressant att se fördelningen av alkalinitet för olika grundvatten. Detta visas i tabell 7-2.

Tabell 7-2. Procentuell fördelning av alkalinitet i grundvattnet i de olika typområdena. Underlag: brunnsanalyser från SGU:s databas, Kristallin berggrund.

Alkalinitet Region	> 180 mg/l	60-180 mg/l	30-60 mg/l	10-30 mg/l	< 10 mg/l
B	10	55	20	<u>11</u>	<u>3</u>
C	23	59	11	<u>5</u>	<u>2</u>
D	72	24	4	1	0
E	43	48	5	3	1
F	83	16	1	0	0
G	19	67	10	3	1
H	44	51	5	0	0
I	7	62	18	<u>12</u>	<u>1</u>

Som framgår av tabellen (markerat med understrykning) är det urbergsområdena i Sydsverige, B och C, och Norrlandsterrängen över högsta kustlinjen, inlandet i norr från Värmland till Norrbotten, som de sura och försurningskänsliga grundvattnen är främst företrädade. I Sydsverige där försurningsbelastningen är hög förekommer sådana grundvatten även i kustområdena.

Salt och klorid

Det är av intresse för underhållsbehovet i tunnlar att se i vilka berggrundsregioner grundvatten med höga kloridhalter förekommer. Det är vid kloridhalter över 100 mg/l som risk för korrosionsangrepp på järn uppkommer, se Avsnitt 5. Fördelningen visas i Tabell 7-3.

Tabell 7-3. Procentuell fördelning av kloridhalten i grundvattnet i de olika grundvatten-regionerna i Sverige, se Tabell 2². Underlag: brunnsanalyser från SGU:s databas, Kristallin berggrund.

Kloridhalt	> 20 mg/l Cl	20-50 mg/l	50-100 mg/l	100-300 mg/l	>300 mg/l
Region					
B	72	24	4	0	0
C	38	38	11	<u>7</u>	<u>5</u>
D	48	30	11	<u>9</u>	<u>2</u>
E	61	23	7	<u>6</u>	<u>3</u>
F	51	26	11	<u>8</u>	<u>4</u>
G	73	14	5	<u>5</u>	<u>2</u>
H	89	8	3	0	0
I	93	5	2	0	0

Som de understrukna värdena visar, är det i kustområdena, C, F och G, som kloridrikt, salt grundvatten förekommer. Intressant nog finns också relict grundvatten i låglandsområdena i Mellansverige, D, E och F.

7.2.8 ANVÄNDA TYPVATTEN

Med utgångspunkt från det ovanstående har i detta projekt tre typiska vatten valts ut för att ge underlag för en analys av deras korrosionsbenägenhet mot cementinjektering:

1. Grundvatten i Sydsveriges kustområden och den mellansvenska sänkan. Berggrundvatten i Stockholm och Göteborg är också av denna typ. Karakteristiskt för dessa grundvatten är en hög alkalinitet (HCO₃-halt) och relativt hög halt av klorid (Cl) och sulfat (SO₄). Dominerande katjoner är Natrium och Kalcium
2. Berggrundvatten i Syd- och Mellansverige ovanför högsta kustlinjen. I dessa områden saknas i stort sett det marina inflytande som ej beror på nederbörd. Det gör att Natrium- och kloridhalterna är låga.
3. Berggrundvatten i Svealands och Norrlands inland. I detta område är det marina inslaget obetydligt, vilket medför att Natrium- och Kloridhalter är låga. Det beror dels på att man befinner sig över högsta kustlinjen men också att man befinner sig i regnskugga från fjällkedjan.

7.2.9 SAMMANFATTNING

Berggrundvattnet i storstadsområdena är:

- Svagt alkaliskt
- Välbuffrat
- Hög salthalt (klorid)
- Korrosivt mot stål

Baserat på detta har tre typvatten valts ut för de fortsatta kemiska experimenten.

7.3 MEKANISK EROSION AV CEMENTBRUKET

En uppenbar fara för beständigheten av cementinjektering är erosion och uppblandning av cementpastan (bruket) med grundvattnet i samband med injekteringen. Det innebär att cementpastan späds ut och leder till att kvaliteten på den stelnade injekteringen försämras och om det går tillräckligt långt stelningar inte injekteringen över huvudtaget.

Utredningen har visat, att erosion är ett problem endast vid dåligt injekteringsutförande och att underhållsarbetet måste säkerställa att vid reparation av bristfällig injektering villkoren för erosion inte uppstår. Problemet behandlas inte vidare i denna rapport.

7.4 TRANSPORTMEKANISMER FÖR LAKNINGSPRODUKTER FRÅN INJEKTERING

7.4.1 FLÖDANDE VATTEN

Genom att en utsprängd tunnel under grundvattennivån har ett lägre tryck än grundvattnet kring den läcker grundvatten in i tunneln. Det innebär att det finns en hydraulisk gradient från berget utanför in mot tunneln.

Lakning av cement som injekteras i bergets sprickor medför att lakprodukterna också transporteras in i tunneln. Grundvattnet som lakar strömmar då antingen genom injekteringsbruket och lakar det direkt eller också transporteras lakprodukterna med diffusion ut till grundvatten som strömmar i bergsprickorna.

Genom att flödet i de öppna sprickorna är mycket snabbare än i de injekterade, kan man begränsa sig till att studera två processer:

- Flöde genom injekteringen
- Diffusion till grundvatten i öppna sprickor

Flödets storlek, och därmed transporten av utlakat material, styrs av den hydrauliska konduktiviteten och gradienten i tunnelns närområde. Teoretisk påverkar detta livslängden och underhållsbehovet för injekteringen.

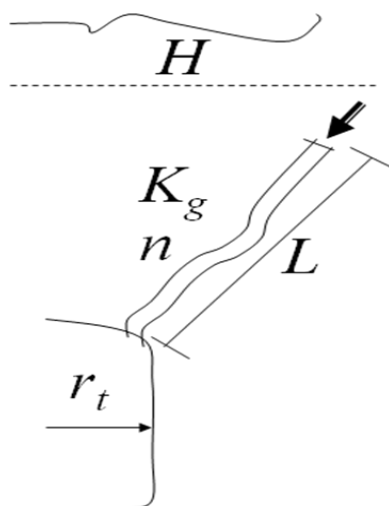
Injekteringen i bergets sprickor har en liten men mätbar hydraulisk konduktivitet på mindre än cirka $K = 10^{-12}$ m/s.

Grundvattenflödet genom injekteringen kommer att styras av gradienten dh/dr genom den injekterade zonen och konduktiviteten K hos det stelade injekteringsmedlet, se Figur 11. Flödeshastigheten, v , genom injekteringen bestäms av Darcy's lag:

$$v = -\frac{dh}{dr} \cdot \frac{K}{n}$$

Här är n den härdade injekteringens porositet som kan uppskattas till ca 50 %. Flödestiden genom en injekterad zon med tjockleken t som motsvarar längden, L , på en injekterad spricka i Figur 7.3 blir då:

$$t_{fl} = \frac{L}{v} \tag{12}$$

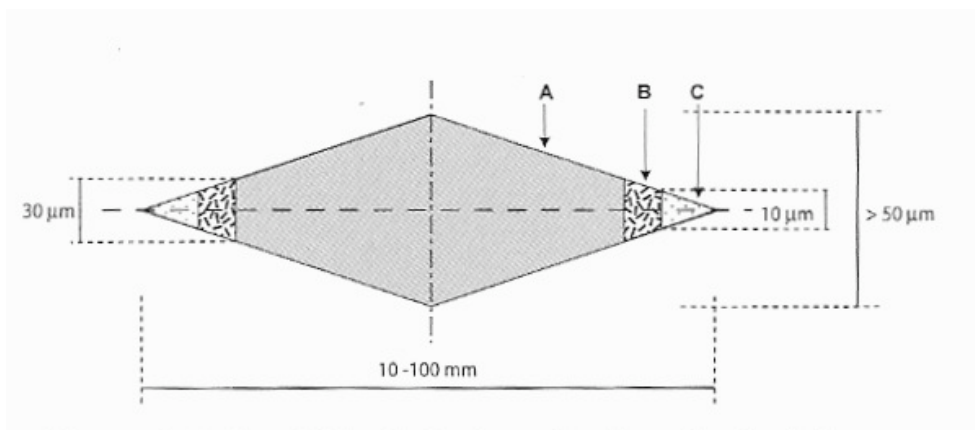


Figur 7.3. Urlakning vid genomströmning av en injekterad spricka.

För en normal tjocklek på den injekterade zonen, $t \approx 5$ m, blir utbytestiden över 1000 år eller mer vid de vilande vattentryck som är aktuella. Urlakning på grund av vattenflöde genom det härdade injekteringsbruket får därför ses som en osannolik orsak till uppkommande underhållsbehov i en tunnel.

7.4.2 DIFFUSION

Diffusion av porvatten från cementen kan vara en annan orsak till urlakning. Mekanismen illustreras av Figur 7.4.

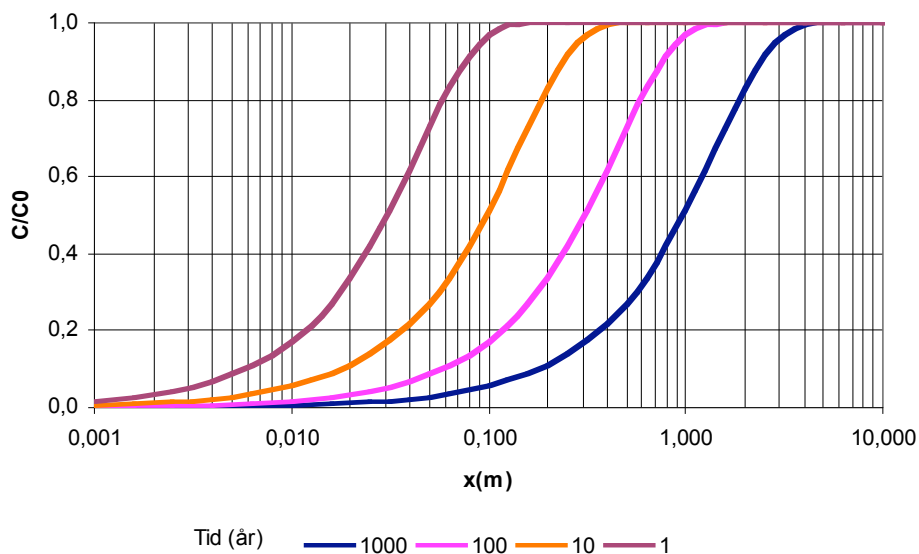


Figur 7.4. Transportmekanism i sprickigt berg, modifierad efter Pusch 1991.

Transporten av porvatten sker från cementen ut till den öppna delen av sprickan med diffusion snarare än genom flöde genom den injekterade cementen. Den vidare transporten sker sedan med ett grundvattenflöde i de öppna kilarna i figur 7.4.

Beräkningar visar, att efter 100 år har diffusionen nått 3-4 m in i det cementinjekterade området. En följd av detta är att en puls med högt pH uppträder direkt efter att injekteringen utförts och den klingar av inom ett år. Därefter blir processen mycket långsam och transport av joner från cementen mycket långsam.

Diffusionen innebär att halten av ett löst ämne i cementens porvatten kommer att vandra ut i det passerande flödet i den öppna delen av sprickan. Den kvarvarande halten på avståndet x' från gränssytan visas i Figur 7.5.



Figur 7.5 . Diffusion av en jon med $D'=10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ vid vissa tidpunkter.

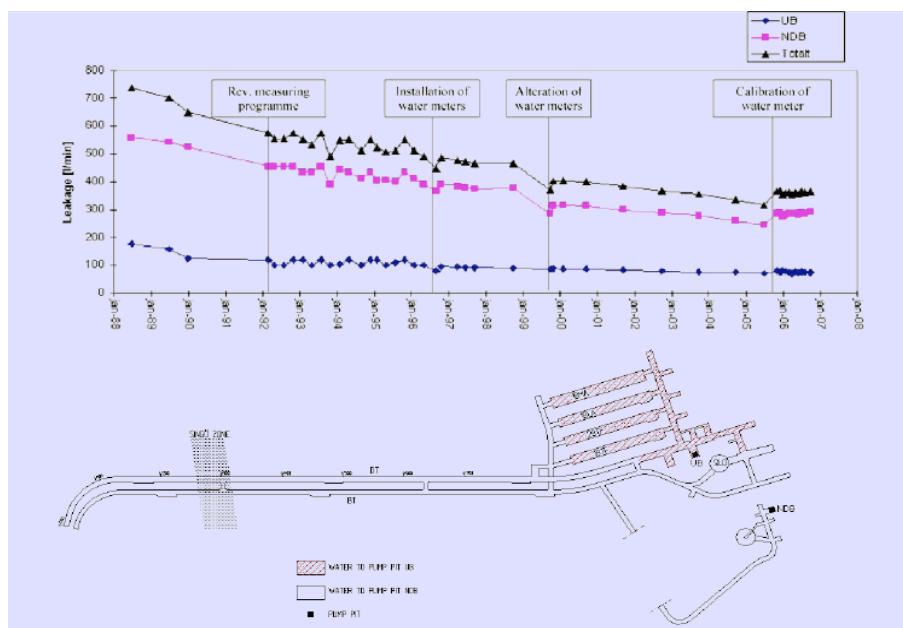
Som framgår av Figur 7.5 är koncentrationsgradienten och uttransporten stor men inträngningen liten för korta tider. Beträktad över lång tid är uttransporten mycket liten.

Efter 100 år har diffusionen nått 3-4 m in i det cementinjekterade området. En följd av detta är att en puls med högt pH uppträder direkt efter att injekteringen gjorts och den klingar av inom ett år. Därefter blir processen mycket långsam och transport av joner från cementen mycket långsam.

7.4.3 INDIKATIONER PÅ URLAKNING AV INJEKTERING I TUNNLAR

I en injekterad tunnel förekommer ofta droppstenar som bildas i taket ganska snart efter att tunneln byggts. De består av kalk och ursprunget till dem är injekteringen. Det kan därför vara rimligt att anta att de också är indikationer på att injekteringen bryts ned och lakas ut i berget. Detta medför att dränagevatten från injekterade tunnlar i samband med injekteringen har högt pH. Mängden begränsas dock av mängden injekteringsbruk. Detta visar sig också genom att pH på läckagevattnet går ned efter en tid och så småningom blir läckvattnet endast svagt alkaliskt. Detta har dessutom sannolikt ett samband med det marina inflytandet och påverkan från stadsmiljön. Man kan också konstatera att de droppstenar man ser i tunnlar inte motsvarar mängden injektering.

Om injekteringen skulle brytas ned borde man också se ett ökat inflöde av vatten till tunnlar med tiden. Emellertid är snarare det bestående intrycket från tunnlar och bergrum, att inläckaget minskar med tiden. En mätserie från SKBs förvar för låg och medelaktivt radioaktivt avfall i Forsmark, SFR, som ligger under Östersjön, visar en tydlig minskning med tiden, se Figur 7.6.



Figur 7.6. Inflöden av grundvatten till SFR i Forsmark.

Här kan man inte förklara minskningen av läckaget med en allmän sänkning av grundvattenytan eller liknande orsaker. Den enda rimliga förklaringen är att berget kring anläggningen blivit tätare med tiden¹¹.

Det mest kända exemplet på motsatsen, det vill säga där man konstaterat att injekteringsbruk inte finns kvar där det borde vara, och alltså sannolikt lakats ut, är injekteringskärmen under Suorvadammen. Det som utmärker grundvattnet här är dess jonfattighet.

7.4.4 SAMMANFATTNING

- Vattentrycket utanför injekteringen medför ett litet grundvattenflöde genom injekteringen
- Flödet medför ett utbyte av porvattnet i injekteringen med tiden. Utbytestiden är i normala fall mycket lång
- Transport av alkali från cementinjekteringen till omgivningen sker huvudsakligen med molekylärdiffusion
- Diffusionsprocessen är långsam och efter något år är den mycket liten

¹¹ En minskning av inläckaget med tiden har man också funnit vid SKBs Äspölaboratorium vid Oskarshamn.

7.5 NEDBRYTNING AV CEMENTBRUK I BERGSPRICKOR

7.5.1 INLEDNING

Cementbaserade material består till stor del av föreningar som är vattenlösliga även om lösligheten i många fall är mycket låg. Cement i kontakt med vatten är termodynamiskt instabilt men upplösningen sker så långsamt att cementstrukturen under rätt förhållanden kan behålla sin integritet i hundratals år. Då cement för spricktätning i de flesta fall kan betraktas som mättat med vatten kan små löslighetsvariationer ge stor effekt på tätningens effektivitet och livslängd.

Vanligen använda berginjekteringsmaterial baseras huvudsakligen på samma typ av klinker som används för konstruktionsändamål, i allmänhet portlandcement. Ofta vill man använda mycket finmalda produkter för att erhålla goda flytegenskaper och hög inträngningsförmåga. På grund av sin större tillgängliga yta för reaktion kommer ett finmalt cement att reagera snabbare och intensivare än ett grovmalt vilket kan försvåra inträngningen. Den valda cementsammansättningen blir en kompromiss mellan inträngningsförmåga och härdningshastighet.

Den tillgängliga litteraturen på cementbeständighet är i hög grad fokuserad på åldring och nedbrytning av betong och betongstrukturer. En stor del av det genomgångna materialet avhandlar också problemställningar relevanta för tätning av slutförvaringsplatser för använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall. Detta innebär i vissa fall behandling av specifika förhållanden som till exempel tätningens beständighet mot strukturförändringar orsakade av radioaktiv strålning medan andra processer behandlas mer översiktligt. Ett exempel är karbonatisering av cement, se Avsnitt 5 i rapporten.

7.5.2 ÅLDRINGSMEKANISMER

De vanligaste åldringsmekanismerna är:

- Alkali-silikareaktion, vilken kan leda till försvagning av kristallstrukturen, volymökning och sprickbildning.
- Sulfatangrepp, vilken kan leda till försvagning av kristallstrukturen, volymökning och sprickbildning.
- Karbonatisering, vilket leder till upptag av CaO, utfällning av CaCO₃ och minskad permeabilitet.
- Dekalcifiering (urlakning), vilken leder till upplösning och förlust av kalcium, ökad permeabilitet och potentiellt svåra strukturskador.
- Kloridpenetrering, vilket kan leda till korrosionsangrepp på metalliska armeringselement med påföljande sprickbildning.

Alkali-silikareaktion

Vatten som pressas igenom det porösa cementet blir kraftigt alkaliskt och i alkali-silikareaktionen reagerar hydroxidjoner i porlösningen med reaktiva kisel-faser på ytan av de aggregerade cementpartiklarna. Reaktionen resulterar dels i upplösning av kalciumsilikater vilket försvagar strukturen och dels i bildning av en kiselgel.

Kiselgelen får större volym än originalsilikaten, vilket kan ge upphov till sprickbildning i betongkonstruktioner, jämför avsnitt 5.

För tätning av bergsprickor används relativt små mängder injekteringsmedel och den svällande kraften blir för svag för att spränga upp nya sprickor eller utvidga befintliga sprickor. Svällning kan bara ske i befintliga utrymmen och ger snarare upphov till en förbättring av injekteringsmedlets tätande verkan.

Sulfatangrepp

Portlandcement med hög permeabilitet har låg motståndskraft mot vatten med hög sulfathalt och sulfatangrepp kan medföra urlakning och sprickbildning. I svenska naturliga grundvatten är sulfathalten i allmänhet alltför låg för att sulfatangrepp ska vara ett allvarligt problem för cementbaserade injekteringsmedel i berg. I likhet med alkali-silikareaktionen, har sulfatreaktionen, i den mån den över huvud taget förekommer, snarare en positiv påverkan på tätning av bergsprickor.

Karbonatisering

Karbonatjoner (löst CO_2) i grundvattnet kan reagera med kalciumjoner i porlösningen och bilda olöslig kalciumkarbonat, CaCO_3 . Utfällningen av CaCO_3 leder i allmänhet till minskad porstorlek och därmed minskad permeabilitet. Reaktionen sänker dock pH i porlösningen vilket löser ut mer kalcium ur cementets kalciumsilikatstruktur och kan så småningom, vid ständig nytillförsel av karbonatjonhaltigt vatten, leda till att strukturen helt töms på kalcium.

För cementinjekteringsmedel är omfattningen av karbonatiseringsproblemet något oklar. I miljöer med höga karbonatjonhalter och ständigt flöde av grundvatten kan man tänka sig att dekalcifering blir resultatet

Urlakning (dekalcifering)

De grundläggande processerna som leder till dekalcifering av cementmaterial är välkända. De flesta komponenterna i portlandcement är mer eller mindre vattenlösliga. Flödande rent vatten, i synnerhet mjukt vatten med låga Ca^{2+} -halter, kan förväntas lösa upp främst kalciumhydroxid, men också kalciumsilikater och alkalihydroxider, samt bryta ner hydratiserade silikat- och aluminatfaser. Kalciumförlusten leder till ökad porositet och därmed ökad permeabilitet och vattentransport genom materialet vilket i sin tur accelererar löslighetsreaktionerna. Urlakning av cement leder i slutänden till att allt som finns kvar av cementstrukturen är en olöslig kiselgel och hydroxider av aluminium och järn, med avsevärd förlust av strukturell styrka.

För att motverka urlakning av injekterat material använder man i möjligaste mån en tät cementblandning (låg kvot vatten/cement) för att minimera permeabiliteten. Om vattnet inte kan passera genom cementen måste jontransport och upplösning ske genom diffusion från ytan genom materialet, en betydligt långsammare process som blir allt långsammare allteftersom det olösliga skikt av reaktionsprodukter genom vilket diffusionen måste ske växer i tjocklek. Man har vid undersökningar av gammal betong kunnat bedöma att hastigheten för diffusionsstyrd urlakning avtar med roten ur tiden och att lakningen når ett djup av mindre än 1 cm på 100 år och 2 cm på 1000 år.

Kloridpenetrering

Särskild uppmärksamhet krävs för cement- och betonganvändning i kloridrika miljöer varav de mest uppenbara är miljöer i närhet av havsvatten och vägsalt. Förekomsten av kloridjoner, Cl⁻, medför normalt i sig själv ingen påverkan på cementmaterial, men andra typer av angrepp kan öka cementens permeabilitet och på så vis skapa förutsättningar för att kloridjoner ska kunna penetrera djupt in i strukturen. Armeringselement av stål i frisk betong skyddas av ett oxidlager vilket stabiliseras av porlösningens höga pH och förhindrar ytterligare attack. Detta oxidlager kan brytas ner vid lågt pH (orsakat av dekalcfiering eller karbonatisering) eller i närvaro av kloridjoner.

Rostbildning resulterar i en volymökning som kan orsaka sprickbildning i den omgivande betongen. Sammantagna leder dessa angrepp till att kloridinducerad korrosion av metalliska armeringselement är en av de vanligaste orsakerna till strukturell fel i betongkonstruktioner, jämför Avsnitt 5. Det är dock tveksamt om fenomenet har någon betydelse för cementinjekteringars bestånd.

7.5.3 SAMMANFATTNING

- Dekalcfiering (urlakning) är den huvudsakliga nedbrytningsprocessen och leder till upplösning av kalcium och ökad permeabilitet
- Lösligheten för kalciummineral ökar vid pH under 9
- Ingen upplösning sker inne i cementstrukturen där porvattenmiljön har ett pH-värde över 12. Upplösningen är begränsad till gränssytan cement/grundvatten

7.6 LAKNINGSEXPERIMENT

Som nämnt tidigare, kan urlakning av komponenter som kalcium, Ca, ur cementmatrisen (dekalcfiering) pekats ut som den huvudsakliga orsaken till nedbrytning av cementbaserade injekteringsmedel. Därutöver bör pH i porlösning i kontakt med den fasta cementfasen vara en avgörande parameter för kontroll av cementfasens stabilitet i vattenmiljö.

För att utvärdera stabiliteten hos cement i olika vattenmiljöer kan man studera cementets upplösningsbeteende i olika vattentyper samt vid olika pH. Genom att genomföra experiment vid extrema pH (pH = 2 - 12) har projektet utvärderat cementets stabilitet under svårast tänkbara förhållanden. Cementet finfördelades till partikelstorlekar omkring 100 µm för att öka kontaktytan cement/vatten och accelerera de diffusionsprocesser som styr nedbrytningen.

Erhållna experimentella data användes sedan som indata för datormodellering av upplösningsprocesserna för att identifiera de kritiska parametrar som är avgörande för upplösningen av de olika fasta faser som finns närvarande i cementet, se vidare Avsnitt 7.7.

7.6.2 METODIK – SATSVISA LAKNINGSFÖRSÖK

Valet av satsvisa lakningsförsök i detta projekt baserar sig på föreslagna riktlinjer för en europeisk standardmetod för lakningsförsök vid utvärdering av stabilitet hos fasta material.

Ett lakningsförsök har som mål att i ett laboratorium efterlikna de processer som förekommer i naturliga miljöer, men under accelererade förhållanden. I detta fall studerades de reaktioner som förekommer då injikerad cement i fina sprickor kommer i kontakt med grundvatten.

Processerna accelererades selektivt genom att:

- kontaktytan cement/grundvatten ökades (genom finfördelning av cementet)
- lösligheten för silikater och karbonater påverkades (genom extrem pH)

Laboratieförsöken genomfördes i en klimatkammare tempererad till +7 °C, samma som naturligt förekommande grundvattentemperaturer.

Tätningseffektiviteten hos ett injekteringsmedel beror till stor del på medlets förmåga att penetrera fina sprickor och spalter med dimensioner ner mot 100 µm. Nedbrytningen av det injikerade materialet i dessa fina sprickor börjar omedelbart när cementet kommer i kontakt med grundvattenflöde och kommer att styras av vattnets diffusion in i cementet, i kombination med diffusion av cementets olika kemiska komponenter ut ur cementmatrisen. Kontaktytan cement/vatten kommer på så sätt att förflyttas allt eftersom cementet bryts ner. För att accelerera dessa diffusionsprocesser och öka den aktiva ytan - vilket i sin tur leder till en förhöjd lakning av lösliga ämnen ur den fasta cementmatrisen - krossades det härdade cementet till partikelstorlekar omkring 100 µm.

De satsvisa lakttesterna utformades för att simulera cementets löslighet vid olika pH-värden och vid olika mängder vatten som kommer i kontakt med cementet. De krossade cementpartiklarna blandades med vatten i förhållandet vätska/cement = 5, det vill säga. Skaktid och vattenmängd valdes för att simulera lakning av komponenter i en fast matris under lång tid, till exempel 100 år. Tidsskalan är så lång att man på goda grunder kan anta att all nedbrytning kan förväntas ske under lakttestet med de hydrokemiska betingelser som råder. Försöken genomfördes med de tre typvatten som beskrevs i Avsnitt 7.2.8.

Många lösligheter för viktiga cementkomponenter som silikater och karbonater är mycket starkt pH-beroende. En separat serie lakningsförsök genomfördes vid fixerade pH-värden i området pH 2 till 9. pH justerades genom tillsats av syra (salpetersyra, HNO₃ 10M) eller bas (natriumhydroxid, NaOH 10M) till blandningen av cement och vatten. pH-justeringen utfördes kontinuerligt genom hela försökstiden. Dessa försök var speciellt utformade för att simulera cementets upplösningsbeteende vid extrema förhållanden. Cement är ett poröst material och när det kommer i kontakt med vatten kommer lösliga komponenter att frigöras från den fasta matrisen. I porlösningen kan koncentrationen av lösliga specier bli mycket hög. Dessa höga koncentrationer leder till hög jonstyrka och pH-värden som kan vara betydligt högre än i den utvändiga bulkfasen. Den kraftigt koncentrerade lösningen i porvätskan kan förstärka upplösningen av vissa solida faser i cementet och slutligen leda till nedbrytning av materialet.

7.6.3 KEMISKA ANALYSER AV VÄTSKEFAS OCH FAST FAS

Kontinuerligt under projektets gång analyserades alla lakvatten med avseende på Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, pH, konduktivitet, HCO₃, SO₄, Cl och SiO₂. Flera analysmetoder användes, bland annat jonkromatografi, röntgenfluorescens, ICP-MS och absorptionsspektrometri.

De olika cementens fasta faser före och efter lakning analyserades med röntgendifraktometri.

7.6.4 PROVPREPARERING

18 st provkroppar om ca 400 g göts och fick härda minst 28 dagar under 1 cm vattenspegel. Till detta ändamål användes portlandcement, IC 30, och vattenledningsvatten. Vattencementtalet sattes till $w/c = 1.0$. Provkropparna förvarades under vatten vid 8 °C i väntan på användning.

Före torkning och malning filtrerades vattnet ovanpå bruket (täckvatten) och hölls av på provflaskor för senare analys. Filter med utfällda kristaller (huvudsakligen CaCO₃) sparades för röntgendifraktionsanalys. De avvattnade cementkropparna vägdes, torkades 48 h i värmeskåp vid 105 °C och fick svalna 24 h i exikator före ny vägning. Bruket krossades med hammare till 5-10 mm diameter kornstorlek och maldes i ringkvarn. Det malda bruket siktades sedan.

7.6.5 LAKNINGSFÖRSÖK

Tabell 7-4 ger en sammanfattning av de utförda lakningsförsöken. Vattencementblandningarna filtrerades omedelbart efter avslutat lakförsök och vattenfas respektive fast fas sparades för analys.

7.6.6 VATTENANALYSER

Al, Ca, Fe, Mg, K, Na med flera med ICP

Inductively Coupled Plasma (ICP) är en metod bäst lämpad för samtidig och automatiserad analys av ett relativt stort antal prover. Metoden erbjuder mycket låga detektionsgränser för metaller med atomvikter från Na och högre.

Samtliga vattenprover som produceras inom projektet, både täck- och lakvatten, analyserades med ICP över ett brett spektrum av grundämnen.

Jonkromatografi

Medan ICP ger detaljerade data om provets ingående grundämnen är jonkromatografi är den analysmetod som ger mest detaljerad information om kemisk sammansättning för vattenlösta jonspecier, både katjoner och anjoner. Samtliga vattenprover analyserades med denna metod och resultat visas i Tabell 7-5.

Tabell 7-4. Utförda lakningstester.

Lakprov	Provkropp	Fraktion	Cementmängd	Vattenmängd	Skaktid	Temperatur	Vattentyp
---------	-----------	----------	-------------	-------------	---------	------------	-----------

Underhåll av berganläggningar – Etapp II

SBUF Utvecklingsprojekt 11844. Slutrapport mars 2009

1A	1	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
3A	3	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
3B	3	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
5A	5+6	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
5B	5+6	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
5C	5+6	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	15 mg/L NaCl
5D	5+6	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	35 mg/L NaCl
5E	5+6	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	100 mg/L NaCl
5F	5+6	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	500 mg/L NaCl
7A	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
7B	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
7C	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	48 h	8 °C	Milli-Q
7D	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Synt. R-BH1 (Tabell 7)
7E	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Synt. R-BH1 (Tabell 7)
7F	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	48 h	8 °C	Synt. R-BH1 (Tabell 7)
7G	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Synt. H-BP8 (Tabell 7)
7H	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Synt. H-BP8 (Tabell 7)
7I	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	48 h	8 °C	Synt. H-BP8 (Tabell 7)
8A	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	Milli-Q
8B	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	pH=9
8C	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	pH=8
8D	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	pH=7

8E	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	pH=6
8F	7-10	0.075-0.125 mm	10 g	50 ml	24 h	8 °C	pH=2

Tabell 7-5. Analysresultat från jonkromatografi.

Jonkromatografi								
		Li (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)
Täckvatten		5.1	532	> 3000	168	1.9	< 1.0	16.2
Laktest	MQ-vatten	< 1.0	57	367	816	4.0	< 1.0	12.6
Laktest	NaCl 15 mg/L	< 1.0	60	377	901	3.9	5.0	14
Laktest	NaCl 35 mg/L	< 1.0	72	383	876	3.4	9.2	13.4
Laktest	NaCl 100 mg/L	< 1.0	95	382	872	3.6	30.5	14
Laktest	NaCl 500 mg/L	n.a.	227.9	364.9	785.1	4.3	261.0	27.1
Laktest	R-BH1	n.a.	242.7	394.7	715.7	4.1	258.3	31.7
Laktest	H-BP8	n.a.	173.0	403.0	729.1	4.8	135.4	28.7
Laktest	pH=9	n.a.	36.9	326.3	> 9000	n.a.	215.1	1256.7
Laktest	pH=8	5.3	20.2	297.3	> 9000	n.a.	ca. 200	1071.1
Laktest	pH=7	6.8	765.6	242.7	> 9000	n.a.	ca. 200	820.5
Laktest	pH=6	7.7	422.9	247.6	> 9000	n.a.	ca. 200	750.3
Laktest	pH=2	11.3	7.9	307.7	> 9000	n.a.	ca. 200	536.6

Kiselanalys med Hach-instrument

Samtliga prover analyserades med VIS-spektroskopi (molybdatkomplexering, Hach) med avseende på totalhalt löst kisel och resultat visas i Tabell 7-6. Överensstämmelsen med ICP var relativt god och ett medelvärde för varje prov användes till modelleringen.

Tabell 7-6. Analysresultat från molybdatkomplexering.

Hach (molybdat)		
		Si (mg/L)
Täckvatten		1.8
Laktest	MQ-vatten	0.4
Laktest	NaCl 15 mg/L	0.44
Laktest	NaCl 35 mg/L	0.41
Laktest	NaCl 100 mg/L	0.37
Laktest	NaCl 500 mg/L	0.39
Laktest	R-BH1	0.467
Laktest	H-BP8	0.453
Laktest	pH=9	27.9
Laktest	pH=8	30.1
Laktest	pH=7	25.7
Laktest	pH=6	27.5
Laktest	pH=2	99.5

7.6.7 FASTFASANALYSER

Röntgendiffraktion

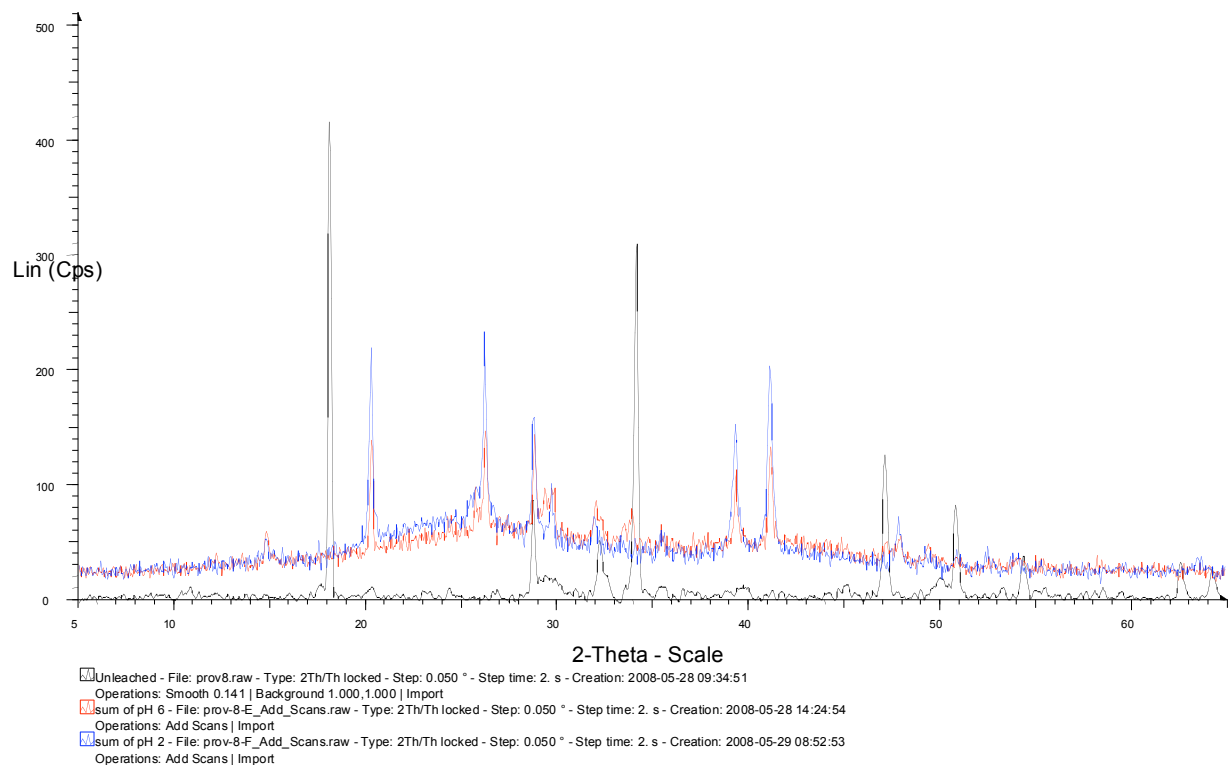
Analys har gjorts på utvalda cementbruk före och efter laktest, samt på insamlade utfällningar från täckvatten. Resultat visas i Tabell 7-7 och ett exempel på röntgendiffraktogram i Figur 7.7.

Underhåll av berganläggningar – Etapp II
SBUF Utvecklingsprojekt 11844. Slutrapport mars 2009

Tabell 7-7. Resultat från röntgendiffraktion av fasta faser.

Prov	Kristallina faser
Utfällning från täckvatten	Calcite (CaCO_3) Kyanite (Al_2SiO_5)
Provkropp 4 Fraktion 0.075-0.125 efter lakning med MilliQ vatten (lakvatten pH=12.4)	Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Larnit (Ca_2SiO_4) Melanterite ($\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) Chlorocalcite (KCaCl_3) Okenite ($\text{CaSi}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Sanidine disordered ($\text{K}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$)
Cementprov efter laktest vid pH=9	Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Katoite silicatian ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$)
Cementprov efter laktest vid pH=8	Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Katoite silicatian ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$) Kvarts SiO_2

Cementprov efter laktest vid pH=7	Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Katoite silicatian ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$) Kvarts SiO_2 Grumantite ($\text{Na}(\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH}))\text{H}_2\text{O}$)
-----------------------------------	---



Figur 7.7. Röntgendiffraktion av cementbruk före lakning och efter lakning vid pH 6 och pH 2.

Diffraktionsmönstren uppvisar också ett stort antal små toppar som troligen kommer av olika amorfa faser som finns i både lakat och olakat material. Från litteraturen är det välkänt att cement innehåller många amorfa faser. Röntgendiffraktion identifierar endast kristallina faser. För att i detalj undersöka de mineralogiändringar som sker under lakning vid olika pH behövs analys med infrarödspektroskopi eller andra metoder som kan detektera amorfa faser.

7.7 MODELLERING AV CEMENTLÖSLIGHET I OLIKA VATTENMILJÖER

7.7.1 INLEDNING

Modellering av cementlöslighet har som mål att underlätta förståelsen för vilka faktorer som kontrollerar lösligheten av olika komponenter och slutligen nedbrytningen av cementets fasta matris. För att kunna modellera lösligheten användes de experimentella data från de lakningsförsök vid olika pH-värden som beskrevs i föregående avsnitt. Experimentella upplösningstester ger översiktlig information om cementets löslighet under olika förhållanden, men det är också av stort värde att känna till vilka fasta faser som löses upp i olika miljöer och vilka eventuella nya faser som kan bildas. Modellering kan ge denna typ av information. Dessutom kan modellering ge möjlighet att detaljundersöka effekterna av olika jonspecier på lösligheten och lösningens jonstyrka. Denna typ av information är mycket användbar vid bedömning av exempelvis nya injekteringsmaterials löslighet, utgående från sammansättningen av cementet och grundvattnet.

Vid modellering av cementlöslighet krävs noggrant övervägande vid val av den modell som skall användas vid beräkningarna. Som nämnts tidigare kan både jonstyrka och pH nå mycket höga värden i cementets porlösning. Eftersom de utförda experimenten omfattade ett brett pH-område (pH 2-12) kan man förvänta mycket höga jonstyrkor.

Det skall påpekas, att teoretiska beräkningar av lösligheten för fasta faser vid höga jonstyrkor tidigare inte har studerats för cementbaserade material. Därför kommer de data som genererades i detta projekt komma att få särskilt nyhetsvärde och användbarhet.

7.7.2 LÖSLIGHETSMODELLERING

Pitzer-ekvationer

Modellering av cement har som mål att underlätta förståelsen för vilka faktorer som kontrollerar lösligheten av olika komponenter och slutligen nedbrytningen av injekterings fasta matris. För att modellera lösligheten användes de experimentella data från lakningsförsöken vid olika pH-värden som beskrevs i föregående avsnitt.

Experimentella lakningstester ger översiktlig information om lösligheten av kalcium och amorft kisel under olika förhållanden, men det är också av stort värde att känna till vilka fasta faser som löses upp i olika miljöer och vilka eventuella nya faser som kan bildas. Modellering kan ge denna typ av information. Dessutom kan modellering ge oss möjlighet att detaljundersöka effekterna av olika jonspecier på lösligheten och lösningens jonstyrka.

En lämplig teoretisk modell för beräkningar med höga jonstyrkor är så kallade Pitzer-ekvationer för elektrolytlösningar. Genom att använda Pitzer-ekvationer kan man modellera jon-jon-interaktioner i rena och blandade saltlösningar med jonstyrkor upp till 6 M.

Mättnadsindex

Modelleringsresultat har erhållits för lakningsexperiment på portlandcement som genomförts vid varierande kloridkoncentrationer i lakvätskan, Milli-Q-vatten. Mättnadsindex (SI) beräknades för olika mineraler. Ett mättnadsindex (Solution Index, SI) är kvoten av aktivitetsprodukten och jämviktskonstanten enligt:

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

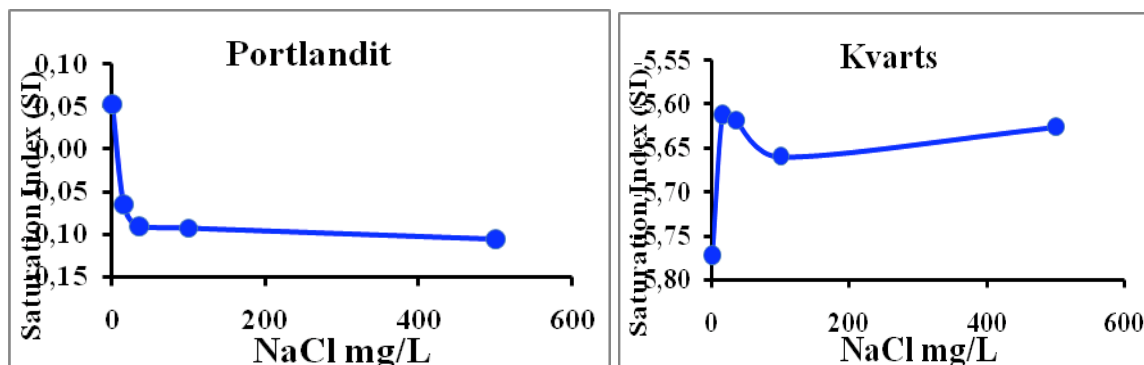
Här är Q aktivitetsprodukten och K jämviktskonstanten. Således har ett undermättat mineral ett negativt SI, ett övermättat mineral ett positivt SI, medan ett mineral vid mättnadspunkten har ett SI lika med noll.

Resultaten för de modellerade laktesterna visas i Tabell 7-8 nedan.

Tabell 7-8. Mättnadsindex (SI) för mineral i olika lakvättskor.

Laktest	pH	Portlandit Ca(OH) ₂	Quartz SiO ₂	Amorf Silica SiO ₂	Gypsum CaSO ₄	Larnite Ca ₂ SiO ₄	Brucite Mg(OH) ₂	Chrysotile Mg ₃ Si ₂ O ₅	Fluorite CaF ₂
Mättnings index SI		SI	SI	SI	SI	SI	SI		
Laktest MilliQ	12.80	0.053	-5.773	-7.058	-2.298	-3.482	2.261	5.007	1.017
Laktest MilliQ+15 mg/L NaCl	12.42	-0.065	-5.612	-6.898	-2.221	-3.560	2.149	4.993	1.045
Laktest MilliQ+35 mg/L NaCl	12.41	-0.091	-5.619	-6.904	-2.255	-3.616	2.151	4.985	0.906
Laktest MilliQ+100 mg/L NaCl	12.41	-0.093	-5.661	-6.947	-2.239	-3.663	2.150	4.897	0.952
Laktest MilliQ+500 mg/L NaCl	12.41	-0.106	-5.626	-6.912	-1.979	-3.654	2.142	4.942	1.094
Laktest Synt vatten R-BH1	12.40	-0.138	-5.516	-6.802	-1.922	-3.607	2.129	5.121	1.032
Laktest Synt vatten H-BP8	12.40	-0.135	-5.532	-6.818	-1.948	-3.618	2.133	5.102	1.176
Laktest konstant pH	9	-5.345	0.283	-1.003	0.159	-8.224	-1.492	5.860	
Laktest konstant pH	8	-7.232	0.745	-0.541	0.107	-11.536	-3.170	1.748	
Laktest konstant pH	7	-9.122	0.722	-0.563	-0.138	-15.537	-4.680	-2.827	
Laktest konstant pH	6	-11.210	0.780	-0.506	-0.048	-19.451	-6.738	-8.885	
Laktest konstant pH	2	-19.960	1.430	0.148	-0.256	-34.786	-14.469	-30.779	

Från resultaten i Tabell 7-8 kan man se vissa trender. I Figur 7.8 visas SI-värdena för portlandit och kvarts som funktion av ökande koncentration av NaCl. Indata kommer från laktester med MilliQ-vatten (tillsatt NaCl = 0) och med tillsatt NaCl från 15 till 500 mg/L. SI-värdet för portlandit är positivt i laktest med MilliQ-vatten men svagt negativt i laktester med tillsatt NaCl.

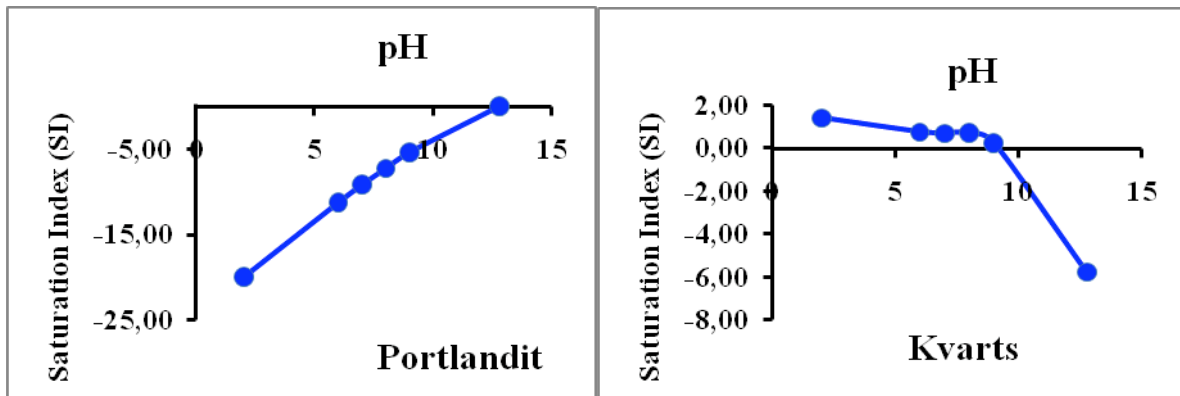


Figur 7.8. Trender i mättnadsindex för portlandit och kvarts vid ökande NaCl-koncentration.

Detta innebär att en närvaro av NaCl ökar lösligheten för portlandit, men att effekten är mycket liten. Man kan också ställa frågan vilken koncentration av NaCl som krävs för att lösa upp portlandit vid pH 12.4 i dessa lakvatten. Vi har beräknat SI-värden för portlandit vid koncentrationer upp till 10000 mg/l NaCl och SI-värdet ändras inte mer än från -0.1 till -0.4. Vi kan dra slutsatsen att NaCl, inte ens i höga koncentrationer, har någon märkbar effekt på lösligheten för portlandit vid pH-värden > 12.

Å andra sidan uppvisar kvarts (Figur 7.8) och amorft kisel (Tabell 7-8) negativa mättnadsindex vilket innebär att de är lösliga i dessa vatten.

Figur 7.9 visar mättnadsindex för portlandit och kvarts vid olika pH-värden. För portlandit ändras SI-värdet från svagt positivt vid pH 12.8 till mer negativa värden när pH minskar från 9 till 2. Detta säger att portlandit blir mer lösligt när pH minskar. Detta beteende bekräftar av röntgendifraktionsanalys av cement lakat vid olika pH-värden (Figur 18-19). Portlanditen börjar minska vid pH 9 och är helt frånvarande i prover lakade vid pH 6 och 2. Kvarts visar upp ett negativt SI vid pH 12.8 men har positiva värden vid pH 9, 8, 7, 6 och 2. Amorft kisel följer samma trend som kvarts men med svagt negativa värden. Detta innebär att koncentrationen av fritt kisel i cementlakblandningar med pH-värden < 9 troligen styrs av upplösningen av kvarts och amorft kisel.



Figur 7.9. Mättnadsindex för portlandit och kvarts vid varierande pH-värden.

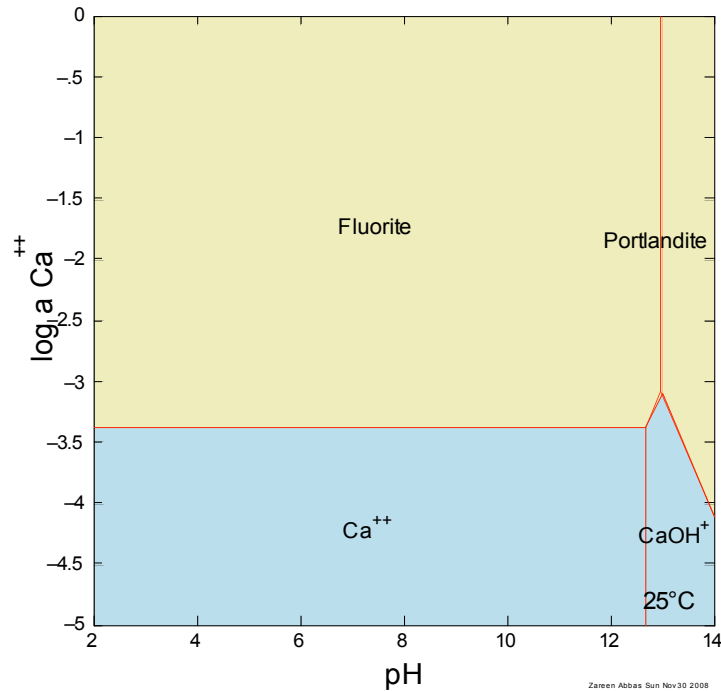
Mineral som brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), chrysotil ($\text{Mg}_3\text{Si}_3\text{O}_5$) och gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) har negativa mättnadsindex vid pH-värden < 7 och är därför lösliga (Tabell 21). Vid pH 8 och 9 har gips och chrysotil positiva SI-värden och kommer därför att kontrollera halterna av Ca respektive Mg (Tabell 7-8).

7.7.3 EFFEKT AV PH OCH JONSAMMANSÄTTNING PÅ MINERALFASERS LÖSLIGHET

För att ytterligare undersöka effekten av lakvattnets jonsammansättning på lösligheten för cementmineral som portlandit, gips, kvarts och amorft kisel, konstruerades löslighetsdiagram. Jon-jon-växelverknningar i lösningarna beräknades i form av aktiviteter genom att använda Pitzermodellen för joninteraktioner.

Löslighetsdiagram för portlandit

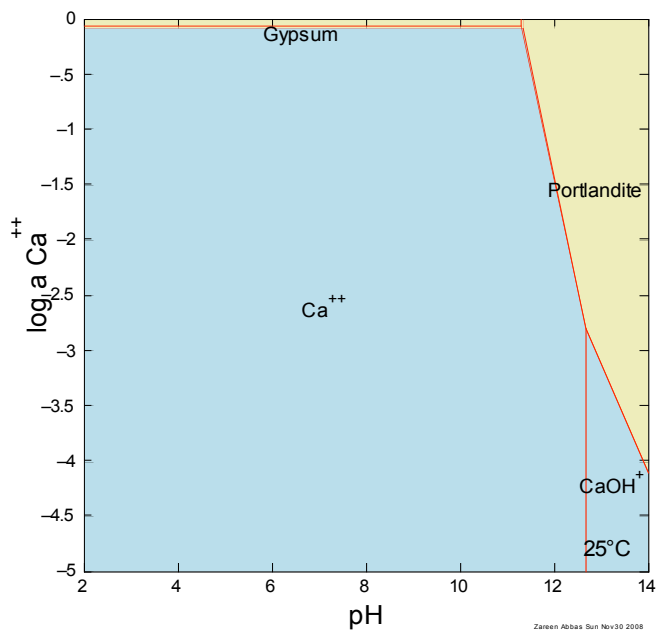
Lösligheten för portlandit som funktion av pH i en typisk cementlakvattenblandning visas i Figur 7.10. Lakvattnets sammansättning modellerades i enlighet med lakttesterna med MilliQ-vatten. De dominerande jonspecierna i dessa lakvattenblandningar var H^+ , K^+ , Na^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Cl^- , F^- , OH^- och SO_4^{2-} . Figur 23 visar tydligt att portlandit är stabilt vid $\text{pH} > 12$. I närvaro av fluoridjoner kommer också fluorit (CaF_2) att existera vid $\text{pH} < 12.4$.



Figur 7.10. Löslighetsdiagram för portlandit i cementlakvatten

Effekten av ökande halter av Cl^- , Na^+ och Mg^{2+} på lösligheten för portlandit undersöktes också och befanns vara försumbar. En ökad koncentration av F^- och SO_4^{2-} hade däremot en kraftig effekt på fasdiagrammet. En ökning av fluoridjonhalten leder till att fluorit blir det dominerande mineralet

I frånvaro av fluoridjoner, som uppmätt i lakttesterna vid $pH < 9$, kommer lösighetsdiagrammet att domineras av lösta kalciumjoner enligt Figur 7.11.

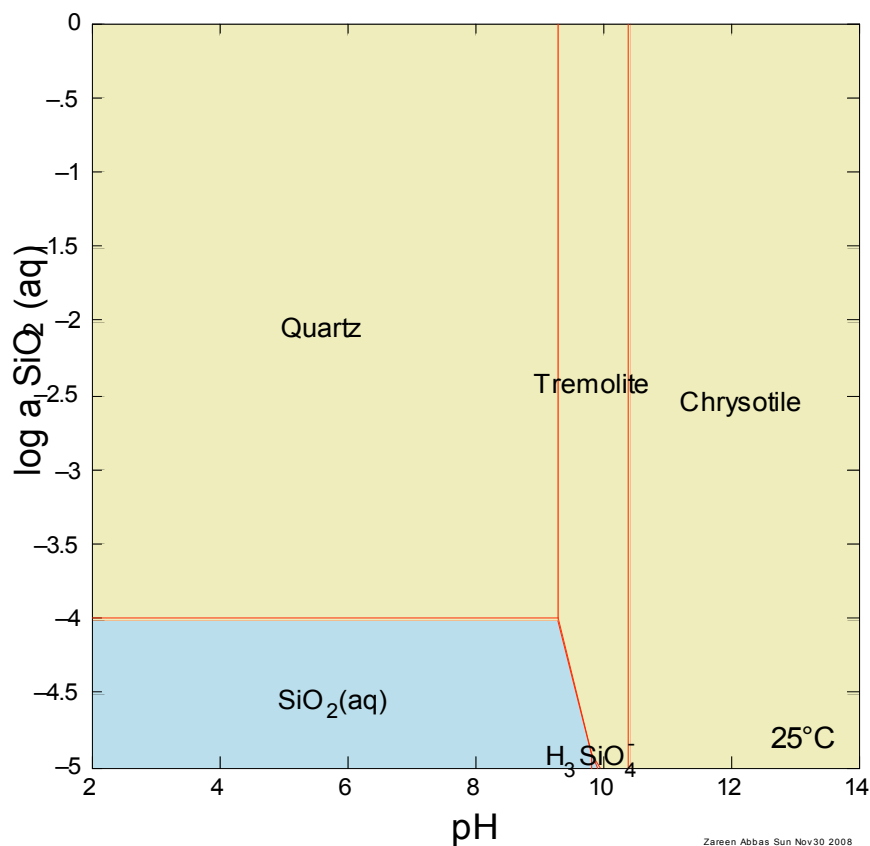


Figur 7.11. Löslighetsdiagram för portlandit i cementlakvatten i frånvaro av fluoridjoner.

Återigen visade förhöjda halter av Cl^- , Na^+ , K^+ och Mg^{2+} liten eller ingen effekt på lösligheten för portlandit.

Löslighetsdiagram för kvarts och amorft kisel

Den modellerade lösligheten för kvarts som funktion av pH i vatten från lakning av cement i MilliQ-vatten visas i Figur 7.12. Löslighetsdiagrammet visar att den fasta fasen chrysotil ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$) bildas vid $\text{pH} > 10.5$ i närvaro av magnesiumjoner.



Figur 7.12. Löslighetsdiagram för kvarts i cementlakvatten.

Löslighetsdiagram för amorft kisel beräknades också och visade samma beteende som diagrammet för kvarts i Figur 7.12.

7.7.6 SLUTSATSER AV KEMISK MODELLERING

Några allmänna slutsatser kan dras från modelleringsresultaten:

- Den viktigaste faktorn som bestämmer upplösningen av mineralfaser från cement är lösningens pH-värde.
- Portlandit är den dominerande kristallina fasen i hydratiserad cement.
- Så länge som lösningens $\text{pH} > 12$ ändras cementets mineralogi mycket lite.
- När pH når < 9 ökar upplösningen av portlandit vilket leder till ökad halt av Ca^{2+} -joner.
- Effekten av joner som Na^+ , K^+ , Mg^{2+} och Cl^- på portlanditens lösligheten är försumbar.
- I närvaro av lösta fluorid- och sulfatjoner kommer fasta faser som fluorit och gips att bildas.

- Vid pH-värden < 9 kommer kvarts och amorft kisel att kontrollera koncentrationen löst kisel.
- Vid höga pH är både kvarts och amorft kisel lösliga men lösligheten påverkas inte av närvaron av andra joner som fluorid, sulfater, Na⁺, K⁺, Mg²⁺ och Ca²⁺.
- Effekten av fluoridjoner på lösligheten för kvarts och amorft kisel är signifikant endast vid pH < 5.

7.8 KONSEKVENSER FÖR BESTÄNDIGHETEN HOS CEMENTMATERIAL I BERG

Som de kemiska och mineralogiska analyserna visat sker inga effekter på cementens mineralogi så länge pH hos dess porvätska är högre än 12. Detta bekräftas även av den kemiska modelleringen. Man kan därför hävda att så länge inte diffusionen av alkali till omgivningen sänkt porvätskans pH till 12 är injekteringen beständig. Porvätskan i färsk cement har ett pH ~12,8. För att komma ned till pH 12 måste därför koncentrationen av OH-joner sänkas med $1/10^{0,8} = 84$ %. Om initieringen av nedbrytningen kan beskrivas med en diffusionsprocess kan vi därmed föra över beständighetsproblemet till ett fysikaliskt problem. Om nedbrytningen sker med en diffusionsprocess enligt Figur 7.5 kan man sluta sig till att den efter 100 år motsvarar en inträngning av nedbrytningsfronten av endast ca 10 cm och därmed är utan betydelse för underhållet av en tunnel eller ett bergrum.

Inträngningen av injekteringsmedlet i bergsprickorna måste vara så lång att de vattenförande sprickorna mellan injekteringskärmens borrhål fylls med cement. Av detta följer att utbredningen av cementinjekteringen är mycket större än de diffusionslängder vi kan uppskatta. Detta fordrar dock att sprickorna är väl fyllda med cement så att vi inte har kanaler i injekteringen med förbipasserande grundvatten som transporterar bort alkali. Beständigheten kommer därmed att återföras på hur väl injekteringen är utförd. Man måste använda injekteringsmedel med god inträngningsförmåga och som inte separerar, man måste undvika erosion av injekteringsmedlet genom tillräckligt lång inträngning, Man måste injektera så att tunneln blir tillräckligt tät. Kvaliteten på utförandet är därmed mycket viktig.

Om man inte har en injektering av god kvalitet ger det förbiströmmande vattnet med pH ~7,5 en begynnande karbonatisering och slutligen dekalCIFIERING. Tidsförloppen för dessa är inte möjliga att uppskatta. Slutsatsen är dock att ju sämre injekteringen är (det vill säga ju större grundvattenläckaget), desto snabbare är förloppet.

Transporten av kiselhaltigt lakvatten bort från cementinjekteringen leder till utfällning av mineral innehållande kisel vid lägre pH och medverkar till en tätning av berget. Detta medför en reduktion av vattenflödet genom cementet och därmed en fördröjning av utlakningsprocessen. Det är möjligt att utfällning av silikater i fina sprickor kan förklara den observation av minskat inläckage i SKBs bergrum som visas i Figur 7.6.

De geologiska/kemiska studier som projektet genomfört vid Chalmers och Göteborgs Universitet har visat att cementinjektering har mycket god beständighet i urbergsmiljö. Bland slutsatserna av detta arbete kan nämnas:

- Den viktigaste faktorn som bestämmer upplösningen av mineralfaser från cement är lösningens pH-värde.
- Portlandit är den dominerande kristallina fasen i hydratiserad cement.
- Så länge som lösningens pH > 12 ändras cementets mineralogi mycket lite.
- När pH når < 9 ökar upplösningen av portlandit vilket leder till ökad halt av Ca²⁺-joner.
- Effekten av joner som Na⁺, K⁺, Mg²⁺ och Cl⁻ på portlanditens lösligheten är försumbar.
- I närvaro av lösta fluorid- och sulfatjoner kommer fasta faser som fluorit och gips att bildas.
- Vid pH-värden < 9 kommer kvarts och amorft kisel att kontrollera koncentrationen löst kisel.
- Vid höga pH är både kvarts och amorft kisel lösliga men lösligheten påverkas inte av närvaron av andra joner som fluorid, sulfater, Na⁺, K⁺, Mg²⁺ och Ca²⁺.
- Effekten av fluoridjoner på lösligheten för kvarts och amorft kisel är signifikant endast vid pH < 5.

Sammanfattningsvis kommer en väl genomförd förinjektering i byggskedet att reducera det kommande underhållsbehovet; denna effekt kommer att vara beständig livslängden ut.

En LCC-analys kommer att utvisa, hur stora efterinjekteringsinsatser i berganläggningen under driftstiden som är motiverade.

8 ANVÄNDNING AV TESTDATA I LCC-MODELLEN

8.1 INLEDNING

De viktigaste ingångsparametrarna i LCC-modellen är, jämför Figur 2.2 och ekvation 2.1.

- Underhållsfrekvensen för varje komponent (ger underhållsfrekvensen, antalet år t)
- Underhållskostnaden för varje komponent per underhållstillfälle (k_{xt})
- Inspektionskostnaderna
- Stilleståndskostnaden per underhållstillfälle (s_t)
- Kalkylräntan

De underhållskrävande komponenter som beaktas är:

- Berget (skrotning, ströbultning, påsprutning)
- Sprutbetong (nedbilning, tätning före sprutning, påsprutning)
- Betongkonstruktioner (nedbilning, armering, påsprutning/gjutning)
- Bultar (reovering av ingjutningsbruk, ersättningsbultar)
- Dräner (renspolning, ersättningsdräner)
- Injekteringar (efterinjektering för förbättrad tätningseffekt)

Till underhållet räknas även den *inspektion* som föregår själva arbetsinsatserna i tunneln eller bergrummet. I denna ingår bomknackning av sprutbetong, provdragning eller annan testning av bultar samt kontroll av funktion hos dräner.

8.2 UNDERHÅLLSFREKVENS¹²

Bedömningen av den tekniska livslängden för komponenterna vid olika berg- och grundvattenförhållanden har gjorts på basis av statistik över verkligt utförda underhållsinsatser i några tunnlar. Det ligger i sakens natur, att dessa uppgifter är mycket ungefärliga och kan variera från fall till fall.

Vid insättning i LCC-modellen har man möjlighet att enkelt variera livslängden för olika komponenter och att på så sätt studera inverkan av faktorer som kvalitet på utförande och torrhet i tunneln på underhållsfrekvensen.

8.2.1 BERGET

Torra bergförhållanden, bra berg

Begränsad nedskrotning och förstärkning av frilagt berg bedöms behöva göras vart 10:e år. Vid berg med mycket höga horisontalspänningar kan kortare tidsintervall behövas.

Kommentar. Det är mycket vanligt att bergsprickor i bra berg torkar ut, och då försvinner den kohesion som håller samman ytberget. Fenomenet uppträder som ljusa bergfragment i den något mörkare bergmassan. Detta ger upphov till ganska omfattande behov av skrotning för att undvika fallande stenar. Ett tunt sprutbetongpåslag motverkar denna uttorkning och gör att underhållsintervallerna kan ökas till säkert 25 år.

Våta bergförhållanden, bra berg

Viss nedskrotning och förstärkning av frilagt berg bedöms behöva göras vart 5:e år.

Svaghetszoner

Dessa förutsätts vara förstärkta med sprutbetong och/eller bultar, se nedan.

8.2.2 SPRUTBETONG

Bra sprutbetong på torrt berg

Begränsad nedbilning och ny påsprutning bedöms behöva göras vart 25 år.

Kommentar: Om sprutbetongskiktet är alltför tunt, <40 mm kan nedbrytningen ske snabbare.

Medelbra sprutbetong på fuktigt berg eller på tätade svaghetszoner

Ca 10 % av sprutbetongen bilas ner och ersätts vart 15 år, efter kompletterande injektering av berget.

Kommentar: Kontroll vart 5:e år, åtgärder vart 15:e år men bara 10 % bilas ner. Det beror förstås på tjocklek och annat.

¹² Kommentarer till de föreslagna tidsintervallerna för underhållsinsatser har gjorts av Tommy Ellison, AB Besab, och är skrivna i kursiv stil i detta avsnitt

Dålig sprutbetong på svaghetszoner med vått berg

Nedbilning och ersättning av ca 25 % av sprutbetongen vart 5:e år.

Kommentar: Som ovan men kontroll vartannat år, och ersättning av kanske 25 % vart femte år. Det är självklart inte någon bra lösning, utan man måste komma till rätta med problemet genom att efterinjektera och förstärka på ett bättre sätt.

8.2.3 BETONGKONSTRUKTIONER

Torrt berg

Betongen behöver inte underhållas.

Fuktigt berg

Begränsad nedbilning, armering och ny pågjutning (påsprutning) bedöms behöva göras vart 50:e år.

Kommentar: Okulär kontroll i samband med övrig bergbesiktning, och en särskild kontroll av karbonatisering och armeringskorrosion bör göras förslagsvis var 25:e år. Ganska små åtgärder kan förväntas. Dock finns en massa äldre betonggjutningar med för små täcksikt och utförda med icke sulfatresistent cement som kan brytas ner snabbare.

Vått berg med aggressivt grundvatten

Ca 20 % av betongen bilas ner och ersätts vart 15 år, efter kompletterande injektering av berget.

Kommentar: Kontroll var 10:e år, och måttliga åtgärder var 15:e år. Mest utbyte av täcksikt.

8.2.3 BULTAR

Bultar i torrt berg

Bultarna behöver inte underhållas eller ersättas.

Väl ingjutna bultar i vått berg

Ett fåtal bultar behöver ersättas vart 25 år

Dåligt ingjutna bultar i vått berg

Ca 20 % av bultarna behöver ersättas vart 10 år. Kompletterande injektering av berget övervägs.

8.2.4 DRÄNER

Tunnlar i kemiskt och biologiskt inaktivt grundvatten

Dränerna behöver inte underhållas eller ersättas

Tunnlar i biologiskt aktivt grundvatten

Alla dränerna spolas 2-4 gånger per år. Ca 10 % av dränerna byts ut vart 10:e år

Tunnlar i kemiskt aktivt grundvatten

Alla dränerna spolas 2-4 gånger per år. Ca 25 % av dränerna byts ut vart 10:e år

8.2.5 INJEKTERINGAR

Tunnlar med mycket bra förinjektering

Injekteringen behöver inte underhållas eller kompletteras

Tunnlar med medelbra förinjektering

För att dra fördel av ny injekteringsteknik och nya injekteringsmaterial, kan injekteringen kompletteras, exempelvis efter 10 år, för att minska underhållsbehovet resten av driftstiden

Tunnlar med dålig eller ingen förinjektering

Efterinjektering utförs i början av driftsperioden

Kommentar: Om efterinjektering behövs i början av driftsperioden, är tunneln felprojekterad eller felbyggd. Äldre tunnlar kan kanske efterinjekteras med gott resultat eftersom tekniken har utvecklats enormt de senaste 25 åren.

8.2.6 KALKYLBLAD

Ingångsdata till en LCC-beräkning bör systematiseras och "bokföras" på särskilda kalkylblad. Ett exempel på ett sådant i Bilaga. Detta utformas lämpligen i Excel-format, så att data automatiskt kan överföras till den matematiska algoritmen som sköter själva beräkningen enligt ekvation 2.1.

Viktiga parametrar är underhållsfrekvens, underhållskostnad per tillfälle samt kalkylräntan. Stilleståndskostnaderna bör också ingå, men bokförs separat.

8.3 UNDERHÅLLSKOSTNADER

Dessa finns angivna i slutrapporten för Etapp I av detta projekt och upprepas inte här.

8.4 UNDERHÅLLSINSPEKTIONER

8.4.1 INTERVALLER

Dessa diskuterades i avsnitt 8.2 ovan. Mer erfarenhetsåterföring bör ske på området i fortsatt forskning.

8.4.2 KOSTNADER

Dessa finns angivna i slutrapporten för Etapp I av detta projekt och upprepas inte här.

8.5 STILLESTÅNDSKOSTNADER

Är mycket individuella och kan inte generaliseras. Avgörs från fall till fall.

8.6 KALKYLRÄNTA

Beror av det allmänna ränteläget och av inflationen och bedöms från fall till fall.

9 FÖRSLAG TILL FORTSATTA ARBETEN (ETAPP III)

9.1 TIDSFÖRLOPP FÖR NEDBRYTNING AV SPRUTBETONG

Prover har tagits på sex ställen i tunnlar i Göteborg och Stockholm. Ytterligare provtagningar görs i trafiktunnlar och testerna utsträcks i tiden. Samråd sker med SL, BV och VV.

9.2 TIDSFÖRLOPP FÖR KORROSION AV STÅL I BERGFÖRSTÄRKNINGAR

KIMAB har monterat ståltrådar i borrhål i tunnlar i Stockholm och Göteborg för analys av korrosionshastighet.

Experimenten förlängs med två år och utökas eventuellt. Samråd sker med BV och VV.

9.3 PROCESSER OCH TIDSFÖRLOPP FÖR NEDBRYTNING AV DRÄNER

I Etapp II av projektet har en översiktlig inventering gjorts av problemen med *igensättning* av dräner i tunnlar. Ett examensarbete har också genomförts, som studerat de olika processer (kemiska, biologiska) som leder till igensättning. Eftersom renovering och utbyte av dräner utgör en viktig del av underhållsarbetet i en berganläggning skall dessa studier fördjupas i etapp III av projektet.

I den kommande etappen bör andra fenomen som bryter ner dräner behandlas. Till sådana fenomen hör istryck, rörelser i berg, krympsprickor i täckande sprutbetong, mekanisk nötning samt laster på grund av tryck och sugkrafter.

9.4 TIDSFÖRLOPP FÖR NEDBRYTNING AV INJEKTERINGSMATERIAL I BERGSPRICKOR

Arbetet i Etapp II har inte omfattat något fältarbete där prov på injektering av olika ålder tagits i befintliga tunnlar. Analyserna med röntgendiffraktion har visat att nedbrytningen av cementet direkt kan konstateras genom en förändring av dess mineralogi. En provtagning av injektering med korta kärnborrhål i injekterade tunnlar av olika ålder bör därför vara både upplysande och viktig för att bedöma förloppet. Dessa prov, kombinerade med röntgendiffraktionsanalys, skulle också kunna verifiera omfattningen av utfällning av silikatmineral i närheten av cementinjektering. Analysmetodiken bör i princip följa den som använts i denna undersökning.

Data för diffusiviteten hos cementpasta som publicerats gäller av naturliga skäl pasta av god kvalitet. Man vet att separering och utspädning av injekteringsmedel sker i samband med injekteringsprocessen men egenskaperna hos "dålig" cementpasta är inte kända. En undersökning av dessa egenskaper kommer att ge upplysning om systemets känslighet. Dessa analyser bör kopplas till analyserna av prov från befintliga tunnlar.

En integrering av molekylodynamiksimuleringar med både jämviktsberäkningar och laboratorieförsök skulle kunna belysa upplösningsreaktionernas kinetik (elementarreaktioner, reaktionsordning, temperaturberoende etc.).

Inledande geohydrologiska och hydrokemiska studier med lakningsförsök vid CTH/GU fortsättes och kompletteras med fältförsök. Samverkan skapas med studier av sprutbetongens åldrande. I styrgruppen från projektet ingår prof.em Ulf Lindblom och adj.prof Lars-Olof Dahlström. Gruppen utökas med representanter från BV och VV.

9.5 UTVECKLING AV LCC-MODELLEN

Samarbete etableras med forskargruppen C-MIS på LTU (ledare adj. prof Håkan Schunnesson). Projektet engagerar en doktorand på deltid med adj. prof Lars-Olof Dahlström som biträdande handledare. På detta sätt kan den excelbaserade LCC-modell för underhållsplanering på framtagits av C-MIS anpassas för användning till underhållsplanering för bergtunnlar.

BILAGOR

Av utrymmesskäl bifogas bilagorna på en CD-skiva.

1. *Livslängdsbedömning av sprutbetong i tunnlar.* Björn Lagerblad, Cement och betong Institutet och KTH. 2007.
2. *Materialanalys av sprutbetong från tunnlar i Göteborg och Stockholm.* Björn Lagerblad, CBI uppdragsrapport nr 2009-10.
3. *Dagens kunskapsnivå – korrosion på bergbultar.* Bertil Sandberg, KIMAB 2007.
4. *Fältförsök, korrosion av kolstål i berg utan injektering.* Bertil Sandberg/ urban Andersson, Swerea/KIMAB 2009.
5. *Igensättning av dräner i bergtunnlar.* Jim Ekliden, examensarbete. Göteborgs Universitet, institutionen för geovetenskaper, 2008.
6. *Beständighet av cementinjektering.* Gunnar Gustafson*, Magnus Hagström**, Zareen Abbas**, *GEO, Chalmers och **Kemiinstitutionen, Göteborgs universitet, 2008.

7. *Förslag till Kalkylblad för insamling av ingångsdata till en LCC-analys.*