



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Ingvar Bogdanoff

2013:26

Degradering av berg, förstärkningar
och injektering i tunnlar

SSM perspektiv

Sammanfattning

Uppdraget består av att sammanställa kunskapen om degraderingsprocesser för berg, bergförstärkningar samt tätning i berg. Beskrivning av degraderingsmekanismer samt dess förekomst i anläggningarna såsom SFR och Clab redovisas.

Bakgrund

Befintliga och planerade slutförvarsanläggningar för radioaktivt avfall kräver särskilda kunskaper för dess projektering och för att följa upp dess utveckling under drift samt efter förslutning. Kunskaper behövs för att välja anläggningens utformning, passande material, underhåll samt förslutningsmetoder. De långa drifttiderna för slutförvarsanläggningarna ställer också krav på uppföljning av materialdegradering och åldring i undermark- samt marin miljö.

Syfte

Syftet med detta uppdrag är att kombinera konsultens egna erfarenheter med resultaten från besiktningar av Svensk Kärnbränslehantering AB:s anläggningar (SKB) samt Strålsäkerhetsmyndighetens tillsyn av dessa. Kunskap om degraderingsmekanismer och de associerade undermarksmiljöerna är ett viktigt verktyg för SSM:s fortsatta tillsyn av undermarksanläggningar med långa drifttider samt för granskning av drift- och långsiktig säkerhet för SKB:s planerade anläggningar i Forsmark.

Resultat

I berganläggningarna SFR och Clab uppstår med tiden miljörelaterade processer och skador på betong, sprutbetong, injektering och stål. Skadorna beror väsentligen på vatteninläckage i berggrummen vilket börjar direkt efter utsprängning. Inläckaget kan leda till olika grader av degradering av berg, injekteringar och bergförstärkningar. Rinnande vatten kan bidra till urlakning och erosion av cementbruk i injekteringshål och sprutbetong. Den alkaliska miljön i cementbruket för ingjutna bergbultar är gynnsam. Risken för korrosion av bultar är därför generellt liten förutom för bultändarna nära bergytan. I SFR och Clab förstärks skyddet genom att sprutbetongen täcker bultändarna.

Hög luftfuktighet som bildas i berggrummen samt rinnande inläckagevatten påverkar även andra konstruktioner som inte har direkt kontakt mot berget. I SFR har man åtgärdat detta genom att installera tunneldukar som avleder vatten och skapar en torrare miljö. I hängrännorna till tunnelduken synliggörs stora mängder av utfällningar. Källan till dessa kan vara kalk som urlakas från sprutbetong och injekteringscement som urlakas från bergsprickor. Urlakning av kalk från sprutbetong nedsätter dess hållfasthet medan urlakning från injekteringshål ökar risken för att injekteringen brister med konsekvent ökat inläckage. Inklädnad med tunnelduk ger en god miljö inne i berggrummen men man förlorar möjligheten till nära besiktning av bultar, berg- och sprutbetongytor.

Vattenströmningen mot bergrummen kan också medföra degradering av bergmassans hållfasthet genom urlakning av naturliga sprickfyllnader, svällning av leror och andra omvandlingsprocesser i berg.

Slutsatser

Provtagning av sprutbetong utförs idag genom att borra ur små kärnor från tunnelväggarna. Resultatet från små prover kan därför bli slumpartad och ger dålig överblick av degraderingsförloppet. Systematiska metoder för provtagning bör utvecklas och kampanjerna dimensioneras beroende på degraderingsrisken. Man bör även klargöra om testerna på betongprover redovisar karbonatisering eller urlakning, som den första kan förväxlas med. Vidare bör man utreda om icke-sulfatbeständig SH-cement har använts i sprutbetong och därefter följa upp dess degradering på grund av sulfat-angrepp med provtagning och tester.

Projektinformation

Kontaktperson SSM: Flavio Lanaro
Referens: SSM2012-3660



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Ingvar Bogdanoff
WSP Sverige AB, Göteborg

2013:26

Degradering av berg, förstärkningar
och injektering i tunnlar

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Innehåll

1. Sammanfattning.....	1
2. Inledning.....	5
3. Vatteninläckage	7
Bakgrund till läckageproblematiken	8
Läckande injekteringshål – Ett systematiskt byggfel	12
Ett alternativt sätt att hålfylla injekteringshål	17
Skonsam sprängning.....	18
Berganläggningar med tät betonglining.....	19
Läckagens tidsberoende i SFR och Clab	20
4. Berganläggningars livslängd.....	25
5. Degradering av injektering	27
6. Degradering av bergbultar	31
Problematik omkring bergbultar	32
Korrosionsskyddad bergbult.....	35
Kontroll av bergbultar.....	36
Kontroll av bergbultar i SFR och Clab	38
7. Degradering av sprutbetong	41
Stålfibrer	43
In-situ provning av sprutbetong.....	43
Sprutbetong i Clab och SFR	44
8. Dräner.....	47
9. Inklädnad med tunnelduk.....	49
Inklädnad med tunnelduk i SFR	49
Utfällningar i SFR.....	51
10. Nedfall och ras	53
Graversfors tunnlarna (Sverige)	53
Hanekleivtunneln (Norge)	53
Bolmentunneln (Sverige).....	55
Slutsatser från erfarenheter av ras.....	56
Svällande leror samt icke-sulfatbeständig cement i Clab och SFR	57
11. Slutsatser	59
12. Referenser.....	61

1. Sammanfattning

Bergrummen för mellanlagring av avfall från kärnkraftindustrin planeras för ökade drifttider. Dessa sträcker sig betydligt längre in i framtiden än vad som kunde förutses när nuvarande anläggningarna SFR och Clab byggdes.

Inne i berganläggningarna SFR och Clab uppstår med tiden miljörelaterade processer och skador på betong och stål. Skadorna beror väsentligen på inläckage av vatten. Hög luftfuktighet bildas inne i bergrummen. Den påverkar även konstruktioner som inte utsätts för direkt vattenbelastning från väggar och tak.

Berget runt ett bergrum är byggnadsmaterial som samverkar med bergförstärkningarna. Efter utsprängning börjar vatten att strömma mot bergrummet. Det kan leda till olika grader av degradering av berg, injekteringar och bergförstärkningar.

Orsaken till inläckage är i grunden konceptet med förstärkning med tunn sprutbetong. Den är inte konstruerat med tanke på att betongen skall bli tät mot inläckage. Barriären mot inläckage förutsätts ske genom injektering som tätar bergmassans spricksystem. Men injekteringen blir ofta oduglig som tät barriär. En orsak är att injekteringshålerna får bristfälliga hålfyllningar. De får då läckage. I synnerhet är branta nedåtriktade injekteringshål från bergrummens pallar utsatta för felaktiga hålfyllningar. Det är ett systematiskt fel som följer med projektering, bygglösning och entreprenörens kvalitetskontroll.

Skador från sprängning bildar nya sprickor som skär de naturliga. Sprickor från sprängning saknar sprickfyllning och injekteringsbruk. Det medför att vattenströmning kan fördelas i bergytan. En risk är att sprängningarna har skadat injekteringar och hålfyllningar i injekteringshål. Skadorna kan på så sätt öka hastigheten i urlakning och erosion av cementbruk från injekteringshål och sprutbetong. Nuvarande sättet att beräkna teoretisk skadezon vilar på en teori som visats inte vara relevant. I bygghandlingar tas inte hänsyn till skaderisk från bottenladdningar. Dessa är kraftigare än de pippladdningar som dimensioner skonsam sprängning. Hur skadezonen sträcker sig till injekteringarna kan inte beräknas och ingår inte i dimensionering av laddningar.

I SFR har inläckaget minskat stadigt med tiden till 2011. En vanlig uppfattning är att orsaken till minskat inläckage är att sprickor i sprutbetongen sätter igen sig. Det kan ske till viss del. Men en dominerande orsak kan vara att grundvattnets tryck har minskat. Under det sista året har inläckaget ökat i SFR. Det kan bero på ökat läckage genom brustna injekteringar eller ökad grundvattentryck.

I Clab har inläckaget liksom trycket i det grundvatten som är pådrivande kraft mot sprickorna ökat under senare tid. De förlängda tidsperspektiven på drifttid som ställs på bergrummen ökar kravet på kontroll av förändringar i läckage. Vid SFR och Clab kan man rikta anmärkningar mot att man har haft dålig kontroll på inläckaget, med det sätt som läckage har mätts – genom att mäta pumparnas gångtider. Om inläckaget ökar kan det i längre tidsperspektiv även uppstå behov att lokalisera stora läckage till sina källor i bergkonturerna. Vid en eventuell renovering som omfattar efterinjektering behöver man identifiera läckagen för åtgärder och kvalitetskontroll av utförandet.

Den alkaliska miljön för bergbultar som är ingjutna i cementbruk är gynnsam. Risken för korrosion är generellt liten. Den största risken för korrosion är i bultarnas

delar nära bergytan. I bergrum som SFR och Clab förstärks skyddet av den sprutbetong som täcker bultändarna. I Clab etapp 2 har bultarna dessutom dubbelt rostskydd med förzinking och epoxi.

En allmän uppfattning är att läckage förekommer från bulthål i tunnlar och bergrum. Ett inte uppmärksammat fel är att läckage vid bultar kan bero på att block nära bulthålet har vibrerat loss eller spräckts vid borring för bulthålet. Sprickorna bildar då läckagevägar vid bultarna. En annan risk är att bultbruket har runnit ut från hålets del nära bergytan. Det är ett monteringsfel. En följd av läckage längs bultarnas ytliga delar, är att sprutbetong som omsluter bultarna riskerar att urlakas på kalk. Urlakning medför nedsättning av hållfasthet i bruket. En följd av det är att den samverkan som förutsatts för konstruktionen med sprutbetong och bultar avtar.

Tillståndskontroller av gamla bergbultar med den akustiska metoden med Boltometer ifrågasätts. Den detekterar inte fel i bultbruk eller korrosion där det kan förväntas uppstå, vid området nära bergytan. Risken för att bultbruk kan lakas ut långt in i bulthålet är i sammanhanget försumbart liten. Kontroller med Boltometer som utförts av bultar under byggnadsstadiet, i Clab etapp 2 har visat att monteringsfel förekommer i bultbruk. Men i resultatet finns ett mörkertal eftersom Boltometerns ekodiagram störs från bergytan och ca 1,5 m in i hålet.

Ett sätt att kontrollera bultars tillstånd kan vara att frilägga bultars ändar. Det ger förutom undersökning av bultars mest utsatta del även möjlighet att bestämma omfattning av läckage vid bultändar och urlakning av bultbruk och sprutbetong som omger bulten.

I hängrännorna i SFR och som avleder vatten från tunnelduken synliggörs stora mängder utfällningar. Källan kan vara kalk som urlakas från sprutbetong. En annan stor källa till kalk är injekteringscement i bergsprickor. Urlakning av kalk från sprutbetong sätter ner dess hållfasthet. Urlakning av kalk från injekteringshål ökar risken för att injekteringar runt bergrummet brister.

Provtagning in-situ från sprutbetong utförs genom att borra ut små kärnor. Resultatet från litet antal prover kan bli slumpartad. Ett mer informativt resultat av sprutbetongs tillstånd kan man få genom större, ursågade, prover. Det kan företrädesvis ske från blöta bergpartier där sprutbetongen kapslar in svaghetszoner i berget.

Inklädnad med tunnelduk har utförts av ett bergrum i SFR. Det ger en god miljö inne i rummet. Men man förlorar möjlighet till nära besiktning av stora ytor med sprutbetong. Tunnelduk bedöms inte medföra förändring i degradering av berg eller bergförstärkningar. Tunneldukens nackdel är att den kan verka hämmande på frekvensen kontroller som bomknackning av sprutbetong. I ett långt tidsperspektiv förbrukas sprutbetong genom olika grader av processer som lakning, erosion, karbonatisering och sulfatangrepp. Behovet av in-situ kontroller av stora ytor med sprutbetong ökar då.

I betraktelser som avser förlängning av teknisk livslängd och osäkerheter avseende degradering av berg och bergförstärkningar är renovering av tunnlar och bergrum att föredra framför inklädnad med tunnelduk. Sprutbetong har potential för vattentät betong om den utförs med vattentätande tillsatsmedel, flera skikt, och lokala dräneringar. Nya skikt sprutbetong över defekt kan förankras med korta korrosionsskyddade bult. Stora läckage kan tätas genom efterinjektering.

Cement som inte är sulfatbeständigt har använts i SFR, i sprutbetong och injekteringar. Sulfatangrepp orsakar svällning. När det finns plats för svällning ökar risken för urlakning och erosion.

Om man uppskattar risken för ras baserat på tidigare inträffade ras i Sverige är risken mycket liten. Erfarenheter från ras i tunnlar visar att risken är störst i zoner där det förekommer svällande lera, Smektit. Den kan vara svår att identifiera när bergytor friläggs vid sprängning. Om en svällningsprocess kan ske kan tidsförloppet inte bedömas.

2. Inledning

Uppdraget innefattar en litteraturgenomgång av degraderingsprocesser i sprutbetong, bergbultar, bergstag, ingjutningar, betong och injektering kombinerad med genomgång av besiktningssprotokoll för SFR och Clab för relevant information om processer, tidsförlopp och omfattning. Resultatet för aktiviteten syftar till att kartlägga degraderingsmekanismer, dess djupare förståelse och tidsförlopp samt möjliga förebyggande och förbättringsåtgärder, kontroller, provtagningar, tester, analyser och inspektioner.

Med underjordsanläggningar eller berganläggningar avses i föreliggande text, tunnlar och bergrum. En tunnel är en transportled i berg till ett bergrum eller trafikled genom ett berg. Med ett bergrum avses vanligen ett utrymme i berg avsedd för t.ex. lagring och där människor kan vistas. Ett specialfall är lagring av bränslen i bergrum utan någon annan inkapsling än berg och omgivande grundvatten.

Stora bergrum har normalt spännvidder omkring 20 m och höjder ca 20-30m. Exempelvis har bergrummen i Clab spännvidd ca 21 m och höjd 26 m. Längden är 115 m. Vad avser bergrums längder finns inga bestämda begränsningar. Oljebergrum som byggdes på 70-talet kunde vara omkring 300 m långa. Att bergrummens spännvidder och höjder har begränsats, beror på att det har visat sig vara möjligt att bygga med dessa mått med överkomliga bergmekaniska och bergtekniska problem. Med ökade insatser i bergförstärkningar kan måtten ökas. Trafiktunnlar tåg och vägar har spännvidder och höjder typiskt omkring 8-10m.

Underjordsanläggningars livslängd är beroende av att bergförstärkningar, som bergbultar, bergstag, bergnät, sprutbetong, och eventuella stödjande betongkonstruktioner inte degraderas okontrollerat. Degradering av stål och betong kan analyseras med känd betong- och korrosionsteknologi. När dessa material finns i berg ingår grundvattenkemin som ett randvillkor. För dessa analyser redogörs inte här annat än ibland i korta citat. Inriktningen är istället att analysera omständigheter som påverkas av bergteknik. Till den hör injektering, sprängning, bergförstärkning och kontroller av dessa.

Den huvudsakliga orsaken till degradering kan sammanfattas relativt enkelt till inläckage av vatten. I metoden för att bygga tunnlar och bergrum enligt den nuvarande metoden ingår injektering av berg med cementbruk. Att man använder cementbruk beror på att det anses vara det mest långtidsbeständiga injekteringsmedlet. Rätt använt är det också relativt hälso- och miljövänligt och i storskalig användning är det även kostnadseffektivt. Som reglerare av inläckage är cementinjektering kopplat till de degraderingsproblem som uppstår med tiden i bergrum och tunnlar. I uppdragets önskade mål, att förmedla en djupare förståelse för problem med degradering, har författaren bedömt att det är nödvändigt att ägna en stor del av arbetet till att beskriva varför inläckage sker till en berganläggning. En annan del har varit att försöka förmedla att det finns teknikutrymme för att bygga bort läckage och därigenom förlänga livslängden och minska problemen i driftstadiet i en berganläggning.

Bergbultar finns i alla bergrum och större tunnlar. De är systematiskt satta för att förstärka bergets valv över anläggningen. Numera är deras uppgift även att samverka med sprutbetong. Utöver systematiskt monterade bultar, finns sporadiskt monterade bultar. Deras uppgift är att säkra berget tillfälligt medan arbeten pågår under bergtak- och väggar (driftförstärkning). I äldre tunnlar utan sprutbetong är bultarnas uppgift även att säkra block som i olika skeden i driftskedet bedöms kunna bli instabila. En del av arbetet har avsatts för att försöka analysera och förmedla risker för bergbultar.

Sprutbetong kan ingå som förstärkning i tunna skikt i alla berganläggningar. Här kan sprutbetongen utföras som bärande och förseglande konstruktion på bergväggar. Men de tunna skikten med sprutbetong kan i regel inte stänga ute grundvattnet. Det kommer därför att rinna mer eller mindre okontrollerat igenom betongen. Ur degraderingssynpunkt är det en oönskad effekt. Men den ingår, om än som ett resignerat faktum i konceptet för berggrum som de har byggts hittills.

Att berget kan degraderas ingår vanligtvis inte i betraktelser av en berganläggnings livstid. Ofta utgås ifrån att förändringar i berget är försumbara i ett geologiskt tidsperspektiv. Berget runt en tunnel eller ett berggrum kan emellertid degraderas genom urlakning av bergsprickor och genom omvandling av bergtyper. Det kan inträffa när bergtyper blottas mot luft och vatten efter sprängning. Degradering av berget kan ske t.ex. genom vittring, erosion och verkan av svällande lermineral i berget. Sprickfyllnader kan vara både hållfasta och tätande mot vatteninträning. Bergmassans kvalitet runt anläggningen betraktat som ett byggnadsmaterial är i hög grad beroende av utförande av sprängning, bergtätande injekteringar, förstärkande och plomberande sprutbetong samt bergbultar som förstärker berget.

Att skador i bergväggar och bergtak uppstår från sprängning har uppmärksammats i svensk bergteknik ända sedan 60-talet. De svenska forskningsinsatserna inom området har varit omfattande och internationellt ledande fram till 90-talet. Resultatet av skonsam sprängning relateras ofta till hur släta bergväggarna blir och mängden synliga borrhålspipor efter spränghål. Reducering av kostnader för bergförstärkning och bergunderhåll är de önskade effekterna av skonsam sprängning. Även om sprängskador ibland har nämnts som parameter för ökat inläckage genom att injekteringarna skadas, så är området inte undersökt. Sprängskador är synliga i nästan alla bergväggar. Man kan utgå från att de har stor betydelse för läckagevägar längs bergytorna och därmed följande risk för degradering av sprutbetong, bergbultarnas del mot bergytan och eventuellt för berg- och sprickmaterial i bergytan.

Författarens erfarenheter från renovering av de två nybyggda berggrummen under Kungliga Biblioteket (KB) under mitten på 90-talet bildar en stomme till rapporten. Renoveringens första del var att identifiera orsaker till de omfattande läckagen och det andra var att täta dessa. Till det tillkom ombesiktning av all sprutbetong och lagning av ett stort antal skador som hade uppstått i betongytorna redan vid utförandet. Degradering av berganläggningar är ofta en långsam process. De långa tiderna som krävs för synlig degradering gör att man sällan får relevant information om hur åldern påverkar anläggningar. Men i Bolmentunneln som är en 80 km lång tunnel för transport av färskvatten har degradering skett ovanligt fort. Till egna erfarenheter från tunneln hör byggnadskontroll i delar av tunneln när den byggdes för 30 år sedan och nyligen utförda renoveringar av 55 km av huvudtunneln och accesstunnlar. Reparationerna omfattade allt från lindrig degradering av berg och sprutbetong till den mest oönskade formen av degradering, fullskaliga ras.

3. Vatteninläckage

De flesta berganläggningar under jord hamnar under grundvattenytan. Inläckage av vatten sker nästan alltid genom bergytorna. Det är den största anledningen till underhållsåtgärder i trafiktunnlar och berganläggningar.

En stor del av alla anmärkningar i besiktningensprotokoll från Clab Bergbesiktning 2010 beror på inläckande vatten (Lundin, 2011). Av protokollets ca 165 anmärkningar handlar ca 90 st om fuktiga eller blöta ytor. Ca 15 skador inne i anläggningen beror på vatten. Av protokollet får man intrycket att inläckagets betydelse är så dominerande att det är värt att notera att det finns torra ytor. Dessa upptar 56 av protokollets anmärkningar.

Av Minnesanteckningar SFR Bergkontroll 2011 (Stephansson 2011) framgår att anmärkningar som noteras vid besiktningarna beror till övervägande del på fukt och vatten. Dokumentet beskriver informativt de synliga problemen i berganläggningen, citat:

”Miljön i SFR1 är korrosiv där luften har en närmast 100 % relativ fuktighet och en medeltemperatur på 15 °C, med en något högre temperatur under sommarmånaderna. Stora delar av anläggningen har ett inläckande kloridhaltigt grundvatten. Vattnet rinner eller droppar från de fria ytorna i tunnlar och bergrum vilket leder till kloridinträngning i betongen vid normal CO₂- och O₂-halt.

SKB har låtit utföra en indelning av de befintliga konstruktionerna i ett antal olika typkonstruktioner uppdelade i balkar, bjälklag, bottenplattor, pelare, pelarfundament, skiljeväggar, strålskärmar, tak, ventilationskulvertar, väggar och vägghyllor. En vanligt uppträdande skada på betongkonstruktionerna är delaminering där kloridhaltigt grundvatten trängt in i betongen och orsakat korrosion hos armeringen. Expansionen av korrosionsprodukterna ger upphov till en volymökning som alstrat ett expansionstryck som trycker ut den ytliga delen av täcksiktet mellan den fria ytan och armeringen. Skadorna till följd av delamineringen är relativt tunna flak eller utfall av den ytliga delen av betongen. Oftast blottläggs den korroderade armeringen i samband med delamineringen av betongen. Denna typ av skador finner man idag vanligt förekommande längs väggar och tak i betongkulverten i Drifttunneln, traversbalkarna i BMA samt på lokala ställen i anläggningen med stort läckage. Delaminering förekommer också hos bottenplattor som har takdropp och dålig avrinning. Skadorna förekommer där ofta i gjutfogar. Pelarfundament uppvisar skador till följd av konstruktioner som inte leder bort läckvattnet. Strålskärmar uppvisar ofta kloridansamlingar på toppen och vid foten...

Tröskelvärde för korrosionshastigheten varierar med luftfuktigheten och når sitt maximum vid 95 % relativ fuktighet. Detta motsvarar den fuktighet som hela tiden råder i SFR1 idag.”

En tunnel eller ett bergrum som sprängs ut i berg under grundvattenytan medför att vatten i berget och som hittills i detta sammanhang kan anses näst intill stilla, börjar strömma in i tunneln. Läckagen sker via spricksystemet i berget. En vanlig konsekvens är korrosion av stål som inträffar när luftfuktigheten blir högre än 70 %. I fuktiga bergrumsväggar korroderar utstickande stålfibrer på kort tid och bildar rostfläckar i betongytan. I torra trapphus i SFR kan man konstatera att 0,5 mm tunna sprutbetongfibrer fortfarande efter ca 30 år är lika tjocka som de var när sprutbetongen utfördes. Det indikerar vattnets betydelse för degradering.

Den stora risken för sprutbetong vid utförandet är att läckage i bergväggar försämrar möjligheten att få bra betongkvalitet i området med blöt bergyta. Följden blir att läckaget minskar möjligheten till bra vidhäftning. Om sprutbetongen utförs på vattenförande ytor kan vattnet bilda tryck mot den färska sprutbetongen med följd att det uppstår ”släppor” där betongen faller ut. Alternativt urlakar läckaget den färska betongen.

Vatten kan även urlaka material från bergsprickorna och det kan i sin tur göra att sprickorna runt ett bergblock förlorar friktion och kohesion. Men vatten kan även bygga upp tryck som belastar sprutbetong eller ett bergblock och verka som smörjmedel mellan bergblock, med ökad risk för nedfall. En välkänd risk i bergslanter och tunnlar med frysrisk är isbildning som bygger upp tryck och vidgar sprickor som får block att lossna.

Slutligen måste allt vatten som rinner in i berganläggningarna pumpas ut och ofta även renas under anläggningens livstid.

Bakgrund till läckageproblematiken

Trots att vatten är den största orsaken till degradering av berg och bergförstärkningar i anläggningar under jord fortsätter man att bygga efter samma olämpliga täthetsprinciper. I korthet är byggnadssättets huvudmoment, att man utgår från att berget är så kompetent att man kan spränga ut anläggningen och förstärka berget med tunna skikt av fiberarmerad sprutbetong och genom systematiskt monterade bergbultar. De senare monteras över rummens valv och ibland i rummets väggar och golv. Stora läckage förutsätts kunna tätas genom cementinjektering.

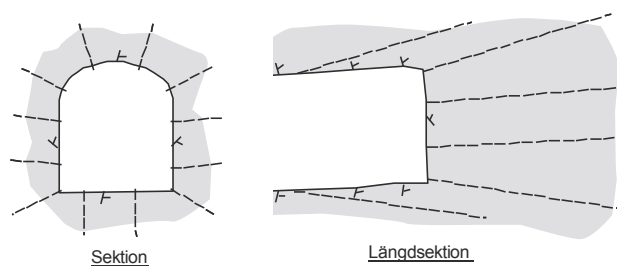
Inläckaget till en berganläggning berörs av nästan alla större steg i byggnadsprocessen. De dominerande arbetsmomenten för att göra en berganläggning är:

1. Vattendom (fastställer tillåtet inläckage)
2. Förundersökningar (gör prognoser över vattenföring i berget)
3. Projektering (föreslår bergtätande injektering och dräner)
4. Förinjektering av berget (försöker täta berget med cementbruk)
5. Borrning av kontrollhål utförs för att försöka verifiera utförd injektering
6. Om kontrollhålen läcker i olika grad krävs ställningstagande om kompletterande injektering
7. Sprängning (medför sprängskador som bildar vattenvägar i bergytan och luckrar upp injektering)
8. Lastning
9. Bergrensning även kallad skrotning (berör vattenvägar mellan lösa stenar och block)
10. Driftförstärkning med bultar eller sprutbetong (olika grader av svårighet uppstår beroende på inläckagens art)
11. Kartering utförs av bergytor som blottas efter sprängning (vid karteringen noteras läckage som blir underlag för dräner eller efterinjektering. Men läckagen kan ofta uppstå lång tid efter karteringstillfället om den hydrauliska konduktiviteten i berget är låg)

12. Montering av dräner görs för att avleda vatten för att kunna utföra sprutbetong
13. Permanent förstärkning med systematisk bergbultning och därefter med sprutbetong (läckage uppstår ofta i hål för bultar och genom sprutbetong)
14. Eventuell efterinjektering utförs för att tätar kvarstående stora läckage. Detta misslyckas ofta eftersom medel i form av tid och pengar inte har avsatts i tillräcklig grad. Ambitionsgraden liksom tron över möjligheterna att tätar berget är mycket varierande. Dessa påverkas starkt av byggledningens erfarenhet. Entreprenörens à-priser för dräner och efterinjektering är ofta avgörande. Projektets läge i tidplanen påverkar också
15. Avledning av vatten från sprutbetongytan utförs med dräner om man inte har lyckats tätar läckagen
16. Om kvarstående läckage ger oacceptabel miljö återstår inklädnad av tak och väggar med t.ex. tunnelduk eller med betongelement.

Beställaren accepterar ofta redan tidigt i projektet ett inläckage som fastställs av den vattendomen som ställer krav på tillåtet läckage till anläggningen. Ofta uppfattar beställaren att det är i hans intresse att vattendomen är generös, för att byggkostnaden inte skall skjuta i höjden. Från underhållssynpunkt borde analyser också utföras för att förstå vilka inläckage som är acceptabla för anläggningens tekniska livslängd.

Figur 1 visar principen för horisontell förinjektering av en tunnel. Förhoppningen är att detta arbetsmoment skall bilda ett tätt skal omkring tunneln som förhindrar inläckage av vatten.



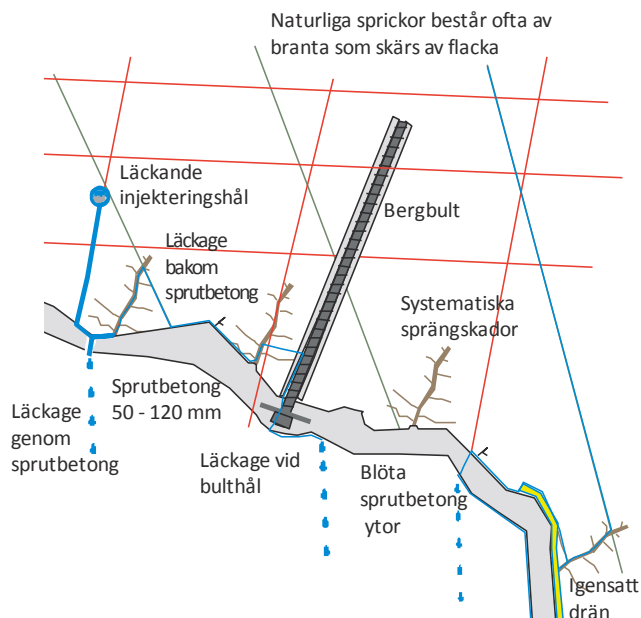
Figur 1. Princip för förinjektering av tunnel. Runt tunneln borrar ca 20 m långa hål. Dessa injekteras med cementbruk som tränger ut i sprickor i berget. Tätningsgraden kan variera. Tätheten i det injekterade området framför tunneln kan delvis kontrolleras genom att borra kontrollhål från tunneln. Vid läckage borrar en ny skärm med hål mellan de tidigare injekterade hålen.

Det är välkänt och accepterat av branschen att förinjekteringen som den utförs idag inte tar bort allt vatten. Kvarstående läckage till anläggningarna går att tätar genom efterinjektering. Men arbetets omfattning är svår att uppskatta i tid och pengar. Kraven på projektens effektiva färdigställande gör, att man ofta överger efterinjektering – efter mer eller mindre lyckade injekteringsförsök. Istället avleder man vatten via dräner till anläggningens golv. I ytliga tunnlar som trafiktunnlar kan vatten ofta ledas ut genom självvrinning. Men i berggrum under grundvattenytan måste vattnet pumpas upp. Det för med sig driftkostnader och eventuellt risker för översvämning vid eventuella längre elavbrott.

När läckagen väl är synliga kan kostnader och tid för installation av vattenavledande dräner beräknas. Men inläckaget finns nu kvar i anläggningen under dess livstid. Det kan avta eller öka med tiden. Det rinnande vattnet riskerar att utsätta ytligt berg mot bergutrymmet och bergförstärkningar för degradering. Men långt allvarligare, på kort sikt, är den störning som vattnet för med sig för berggrummens funktion som förvaringsplats. I trafiktunnlar blir vatten en allvarlig säkerhetsrisk när det fryser till istappar.

Vattnet kan avledas med dräner. Dessa läggs på bergytan och täcks med sprutbetong. Ibland som i trafiktunnlar sätts dränerna direkt på sprutbetongen. Ett problem är att dränerna som skall avleda vatten kan sättas igen av avlagringar som faller ut från det rinnande vattnet. Igensatta dräner för med sig att vattentryck kan bildas bakom dränen och droppen kan uppstå från annan plats i anläggningen nära dränen.

Om läckagen är mycket små och grundvattentrycket är lågt kan de delvis minska med tiden. Igensättningar av små sprickor i sprutbetongen kan minska läckaget. Större läckage fortsätter dock för att endast avta och öka med fluktuationer i grundvattenytan som utövar tryck mot sprickorna i berget.



Figur 2. En vanlig situation vid en bergkontur i en berganläggning. Utöver de naturliga sprickorna bildas alltid sprickor från sprängning. Dessa saknar sprickfyllnad som hindrar vattenströmning. Typiskt avstånd mellan spränghålen i tunnelns kontur är ca 0,6 m. Vatten strömmar in i anläggningen via sprickor som inte har tätats med injektering. Dåligt igengjutna (hålfyllda) injekteringshål som skulle tätta berget bildar själva läckagevägar. Läckage vid bergbultar är vanligt. Att läckagen sker vid bultarna kan bero på att det saknas cementbruk i hålmynningarna. En annan orsak kan vara att den extrema belastningen från borningen för bultålet skapar sprickor längs block i bergytan. Vattengenomslag sker i den tunna sprutbetongen som har anomalier med varierande porositet och tjocklek. Dräner som ska avleda vatten till botten kan sättas igen. Vattentrycket stiger lokalt och läckaget kan flyttas till en annan punkt.

I figur 2 visas i principskiss ett avsnitt av en vanlig situation i bergväggen för en berganläggning som förstärkts med bergbultar och sprutbetong. I figuren indikeras

ett spricknätverk med naturliga sprickor samt sprickor från sprängning. De senare kan löpa längs stora delar av språnghålet och skära av de naturliga typiska sprickplanen. Det samverkande spricksystemet av naturliga och konstgjorda sprickor gör att bergblock kan lossna från bergytan under lång tid. I motsats till de flesta naturliga sprickor är sprickor från sprängning inte fyllda med sprickmaterial. När vatten når sprängskadorna sprids vattnet lätt vidare. Det yttnära spricksystemet av naturliga sprickor och sprängskador kan sedan fördela vattnet mellan sprutbetongen och bergytan. Detta kan ofta yttra sig genom att läckage flyttar i bergytan. Om en spricka sätts igen ökar vattentrycket lokalt och ett nytt läckage uppstår i närheten.

Problemen med inläckage drabbar nästan alla tunnlar och berganläggningar. Det kan förefalla märkligt att samma byggmetod används från ett projekt till ett annat. Men metoden som beskrivits ovan är inarbetad, genomförbar och någorlunda beräkningsbar ur kostnadssynpunkt för svenska förhållanden.

Konsekvenser av kvarstående vattenläckage utreds ofta inte om det inte överskrider vattendomens tillåtna inläckage. De följer med hela kedjan från vattendomen till driften av anläggningen. Några konkreta orsaker till inläckage av vatten under anläggningens drift listas nedan:

- Byggnadshandlingarna som upprättas av konsulterna är likartade från projekt till projekt. De granskas växelvis av konsulter som ena gången upprättar bygghandlingen för att nästa gång granska en kollegas förslag. Bristfälliga eller rent av dåliga lösningar följer med från ett projekt till nästa
- Sedan 80-talet utför beställaren inte byggnadskontroll. Kontrollen är överlämnad till entreprenörens egenkontroll. Det kan medföra att beställarkompetensen minskar vad avser arbeten som sprängning och injektering. Byggfusk av dessa arbeten är svåra eller omöjliga att påvisa i efterhand. Kvalitetshöjande kontroll kräver både teoretiska kunskaper och lång erfarenhet från arbetsledning
- Omfattningen av tätande injektering beslutas i de flesta fall av beställarens byggleddning. Rätt beslut är avgörande för kvarstående läckage. Bedömningen är svår och kräver stor erfarenhet. Beslutsunderlaget kan finnas med i bygghandlingen som ett tillåtet läckage i kontrollhål. Men om de fåtaliga kontrollhålen inte passerar vattenförande sprickor blir beslutsunderlaget fel. Dessutom kan kraven på läckage i kontrollhålen vara illa underbyggda
- Kvalitetskontrollen på utförandet ligger på entreprenörens arbetsledning. Men det ligger inte alltid i dess intresse att produktionen minskar genom mer omsorgsfullt arbete eller utförliga egenkontroller på plats. Resultat från dåligt hantverk vid injekteringen blir synliga som läckage. Men de kan inte belastas entreprenören i efterhand. En ny förbättrande injektering ersätts enligt kontraktet. Förinjekteringsarbetet utförs ofta under natten. Det ligger nära tillhands att anta att detta leder till lägre frekvens av kontroller
- Om resultatet blir bristfälligt kan entreprenören alltid, och utan risk, skylla på sämre bergförhållanden än i prognosen. Han kan också skylla på att bygghandlingarna inte har förutsett de faktiska bergförhållandena, vilket det ofta inte har

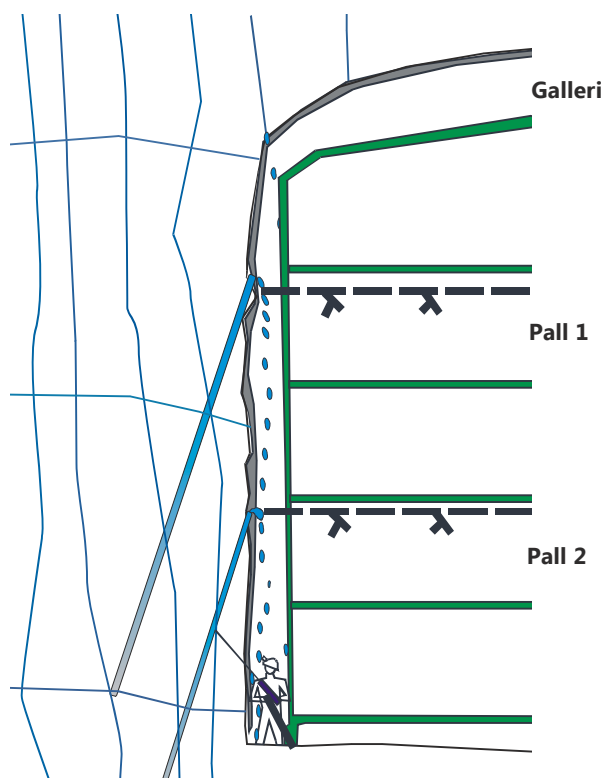
- Arbetet med tätning av bergsprickor genom injektering är komplext. Den påverkas av många parametrar som gör att det är svårt att förstå hela processen. Under senare år har införts förändringar som förkortar injekteringstiderna. Men dessa har inte värderats i ett större sammanhang. Förändringar som leder till kortare injektering kan ha förtagit positiva resultat som tidigare var möjliga. Vid injekteringsarbetet idag hoppar man över flera steg i injekteringen med lågviskösa bruk som var vanliga tidigare. Som exempel kan nämnas (Christiansson 1985) att vid injektering av byggtunneln till SFR utfördes injekteringar med vct 3. Vid Clab, etapp 2 användes vct 07-0,8 (Boden 2002). De låga vct är en följd av forskningsresultat i laboratorium. Att inträngningen minskar med styvare injekteringsbruk är dock klart. Metoden med minskning av vct har fått fäste utan att det har utvärderats i ett större sammanhang som exempelvis om strömningen av bruk gynnas genom att successivt minska vct från högt till lågt vct.

Läckande injekteringshål – Ett systematiskt byggfel

Bergrummen under Kungliga Biblioteket (KB) i Stockholm byggdes 1994. De består av två 150 m långa rum (Bogdanoff, 2001). Spännvidd och höjd är de vanliga för stora bergrum, ca 20 m. Efter att bergarbetena hade avslutats konstaterades att stora läckage kvarstod. Men också att läckagen hade skadat sprutbetong på många ställen. Att det dröjde länge innan omfattningen av inläckaget blev kända berodde på att entreprenören inte hade kartlagt det. Till viss del beroende på att processvatten tillfördes för olika arbeten och det försvårade bestämningen.

Efter omfattande efterinjekteringar kunde läckaget minskas från ca 32 m³/dygn till 8 m³/dygn. Att man inte lyckades täta merparten av de sista läckagen berodde på att dessa kom att hamna under de stora byggnaderna som uppfördes innan efterinjekteringarna hade hunnit avslutas.

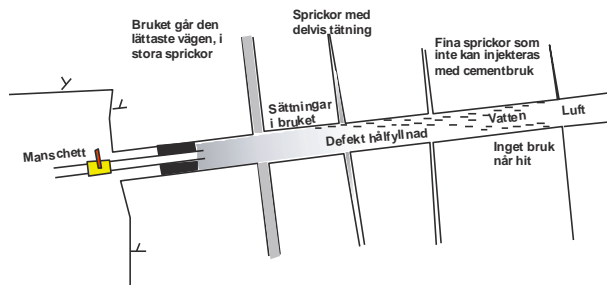
Huvudorsaken till läckagen var att injekteringshål hade lämnats med kraftiga läckage. Hålen hade efter avslutad injektering inte fyllts ”hålfyllts” med cementbruk. Figur 3 visar en principskiss för läckagesituationen från branta injekteringshål längs bergrummens väggar och golv.



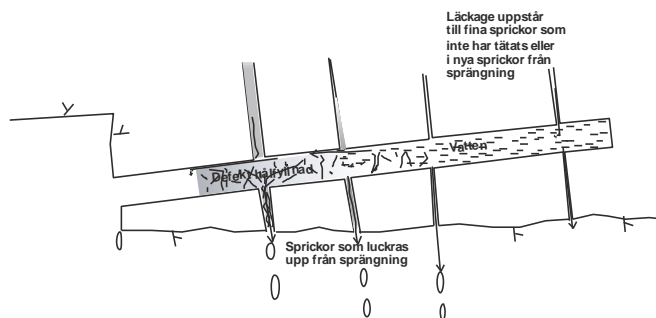
Figur 3. Principskiss visande läckage genom förinjekteringshål som borrats brant neråt från galleriet och pallarna. Skissen visar även borring vid reparation för att nå de läckande hålen från det meterbredda utrymmet bergvägg och byggnad.

Bergmassan under galleriet blev först förinjekterad genom de brant nedåtriktade hålen från galleriets botten sedan från pall 1 och slutligen från pall 2 som även skulle tätas rummens botten. Men eftersom hålen inte hade hålfyllts med cementbruk på ett korrekt sätt, uppstod läckage till bergrummen. Läckagen konstaterades ske via hålmynningar och sprickor som stod i kontakt med hålen. Dessa kommer in i rummet med flack vinkel. De får då kontakt med sprickorna i bergytan. Sprickorna består av naturliga sprickor och sådana som har bildats vid sprängning eller injekterade sprickor som har skadats av sprängning. När man ser läckagen i bergytan utan att se injekteringshål i berget kan det vara svårt att förknippa läckagen till injekteringshål. Men det finns även sprickor som inte har tätats vid injekteringen. Det beror dels på att sprickor under en viss storlek inte kan tätas med cementbruk. Men även dels på ovarsam injektering som täpper igen sprickornas mynningar.

Problemet med läckande hål är även giltigt för horisontella injekteringshål som utförs i de flesta tunnlar idag. Figur 4 beskriver hur injekteringshål kan själva bli stora konstgjorda kanaler som leder vatten till tunneln.



a) Förinjektering från tunneln fronten



b) Efter sprängning

Figur 4. a) Principskiss av ett förinjekteringshål i en tunnel. Vid förinjekteringen trycks bruket in via manschetten. Bruket går den lättaste vägen genom de största sprickorna som korsar hålet. I figuren finns dessa nära manschetten. Om det inte finns något stort läckage i hålbotten kan det relativt styva och cementrika hålfyllnadsbruket vanligen med vattencementtalet vct 0,5 fylla hålet – än mindre täta fina sprickor längre in i hålet. En vanlig situation är att injekteringen avslutas efter att stopptryck, ca 3-6 MPa har uppnåtts med inledande bruk med t.ex. vct 0,8. Då lämnas hålet med sluten manschett utan att det finns något "hålfyllande" bruk i hålet. Eftersom bruket har gått den lättaste vägen kan man inte heller veta hur lång del av hålet som har tagit emot bruk. b) Sprängning intill hålen som kommer in i tunneln orsakar skador i den genomförda injekteringen. Läckage uppstår genom sprickorna från injekteringshålen till tunneln. Om man vrider bilden 90° medsols så beskriver den läckagesituationen vid pallinjektering i ett bergrum som fördjupas genom att spränga pallar från galleriet som i figur 3.

Foton i figur 5 visar typiska läckage i bergrummen under KB. Läckagen skedde genom injekteringshål som hade borrats neråt från galleriets botten. Liknande problem kan ha förekommit vid förinjektering för Clab etapp 2. Figur 6 visar ett foto efter utsprängning av tre pallar (Berglund, 2001). Typiska regelbundna läckage syns från injekteringshål från galleriets botten, på samma sätt som i figur 5. Till höger och vänster efter tvärtunneln läcker injekteringshål som borrats från den senaste pallbotten.



a)



b)

Figur 5. a) Läckande branta injekteringshål i berggrummen under KB. Hålen har borrats neråt från galleriet. b) Ett tätat läckande hål som har orsakat följdskador under hålet i sprutbetongen (de mörka fläckarna under hålet). Den vita randen under hålmynningen beror på urlakning av kalk från injekteringshålet och från sprutbetongen. (Foto Bogdanoff 2001).



Figur 6. Clab etapp 2 efter utsprängning av tre pallar. Läckagen startar från samma nivå under galleriet som i figur 5a. Läckagen sker genom förinjekteringshål borrats neråt från galleriet. Läckage syns även från injekteringshål borrade från den sista pallen, vid bilen och även på motstående sida vid tvärtunneln. Läckagen sker sannolikt via injekteringshål som inte har tätats med hålfyllning. (Foto: Berglund 2001).

I de tekniska beskrivningarna för injektering föreskrivs som regel att injekteringshål skall hålfyllas med cementbruk vct 0,5. Att styvare bruk än vct 0,5 inte skall användas beror på att pumpar för injektering inte har kapacitet för styvare bruk. Hålfyllningen utförs alltid från samma manschettläge i bergytan som injekteringen. Men att hålfylla ca 20 m långa injekteringshål från en manschett i hålmynningen är dömt att misslyckas. Analogt kan man jämföra med att – ingen skulle komma på tanken att fylla cementbruk för ingjutning av bultar på detta sätt. Inte heller skulle man tillåta ett så löst bruk som vct 0,5. Sättet att hålfylla från manschettläget innebär att injekteringshålen lämnas med en okänd blandning av luft, vatten och cementslam.

Av erfarenheter som har sammaställts från injekteringar i Clab etapp 2 framgår att man vid injekteringsarbetet har använt följande mängder cementbruk (Boden, 2002) citat:

”Totalt har 19637 liter använts varav 14637 liter utgör hålfyllnad och 5147 liter har fyllt sprickor i berget.”

Den dominerande och mycket exakta cementmängden av hålfyllnad. Den är med stor sannolikhet samma som den borrade hålvolymen för injekteringshålen. Den är vidare, också sannolikt, hämtad från injekteringsprotokollen. Protokollen utgör även ofta underlag för å- priser för hålfyllning. Som redan nämnts, är det inte är möjligt att denna mängd cementbruk kan ha tillförts injekteringshålen via manschetter i borrhålsmynningarna. Inte heller är det sannolikt att hålen har hålfyllts med slang från botten.

Det systematiska felet med de ofullständiga hålfyllningarna är så inarbetad i praxis att det av denna anledning är svår att argumentera mot metoden på ett övertygande sätt. Ett ytterligare förtydligande kan därför göras. När injekteringen utförs så pumpar man in alltmer styvare bruk tills man når stopptryck. Detta kan uppnås vid vilket vct som helst, exempelvis mellan 0,5 och 1; beroende på bergförhållanden just vid det hålet och vilka vct som används. Därefter låter man manschetten sitta kvar i hålmynningen tills bruket har stelnat. Man utför alltså vid sådana hål inget separat arbetsmoment med hålfyllning. Hur mycket av hålen som är fyllda med bruk förblir okänt. Man kan inte heller veta hur det inpumpade brukets kvalitet fördelar sig längs hålet. Av figur 4a borde inses att om läckaget finns nära manschetten så kan hålets djupare delar inte bli injekterade överhuvudtaget. Däremot brukar hål som genom vattenförlustmätningar konstateras vara helt täta fyllas med slang från hålbotten.

Siffrorna i cementmängderna från Clab etapp 2, manar till eftertanke. De genom borrning bildade kanalerna längs bergkonturen d.v.s. injekteringshålen har tre gånger större volym än den volym som man antagit består av injekteringsbara sprickor i berget. Frågan är vad man vunnit i täthet med det mycket kostsamma injekteringsarbetet – om injekteringshålen som stryker längs bergrummets konturer inte är tätade. Att det är så, framgår tydligt från figur 6. Läckagemönstret är densamma som i bergrummen under KB. Där konstaterades det med säkerhet att hålen läckte. Genom att täta dessa kunde man också lyckas med efterinjekteringen.

Det finns ytterligare ett systematiskt fel. I volymen för bruk till sprickorna inryms all bruk som förbrukas som spill i slangar och manschetter och läckage genom manschetter. Eventuellt ingår även bruk som tömts till bergbotten från omrörare efter avslutad injektering av hål. Vid injektering i bra berg som i Clab etapp 2 ger spillet ett relativt stort fel. Detta har inte någon betydelse för resultatet för injekteringen. Men en konsekvens är att informationen blir missvisande avseende sprickvolym som tagit emot injekteringsbruk.

Att man hade en hög ambitionsnivå för injekteringarna vid Clab etapp 2 framgår av de bruksblandningar som bestämdes för att utföras med det extremt finmalda Micro-cementet Ultrafin 12 (Berglund, 2001).

Ett alternativt sätt att hålfylla injekteringshål

Vid järnvägstunneln i Skee i Bohuslän som byggdes 2011 föreskrevs att injekteringshålen skulle hålfyllas från hålbotten med vct 0,3 bruk med tillsats av Intraplast A (Bogdanoff m.fl., 2012). Förutom nedsättning av viskositeten ger Intraplast A även svällning av bruket. Medlet var för övrigt det dominerande tillsatsmedlet i injekteringsbruk under 70- och 80-talen.

Förslagets kontroversiella del var att manschetten skulle demonteras innan bruket hade stelnat. En slang fördes sedan med slangmatare genom injekteringsbruket till hålbotten. Detta är en avvikelse från den sedan decennier inarbetade praxisen där manschetten inte får demonteras innan injekteringsbruket har stelnat i hålen. Vanliga tider för demontering av manschett i sex projekt mellan åren 1996-2004 var 4,7 och 5,5 timmar (Eriksson och Stille, 2005). Tidigare var det även vanligt med längre väntetider. Orsaken till de långa väntetiderna är att man befarar att bruket rinner ut ur sprickorna om manschetten demonteras efter avslut av injektering. Motargumentet från förslagsställaren är att det är uteslutet att injekteringsbruk som pressats in berget med injekteringstrycket 3-4 MPa kan pressas tillbaka av det vanligen låga grundvattentrycket i berget, ca 0,1- 0,3 MPa, även om manschetten demonteras kort tid efter avslut av injektering. Figur 7 visar ett avsnitt av ett injekteringshål i tunneln i Skee som fyllts med vct 0,3 bruk. Hålet är som förväntat helt fyllt med en hård cementkärna.

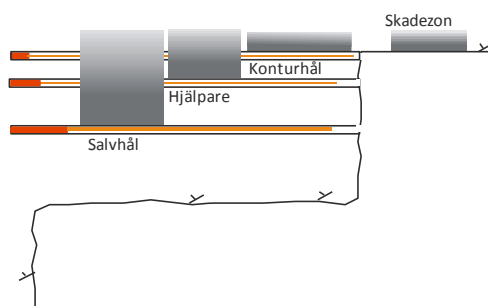


Figur 7. Hålfyllning från hålbotten med bruk vct 0,3 och tillsats av Intraplast A som ger låg viskositet vid pumpning samt svällning av bruket efter pumpning. Hålet är helt fyllt med en hård cementkärna. Flagor från bruket upptill i hålet har lossnat vid sprängning som blottade hålet där det kommer in i tunneln (Foto: Bogdanoff, 2011).

Skonsam sprängning

Skonsam sprängning innebär per definition att sprängning utförs så att sprängskador i den kvarstående bergkonturen begränsas. Vanligtvis associeras sprängskadornas effekt med behovet av mer bergförstärkning och bergrensning (skrotning). Men skadorna kan även ges en annan aspekt. De bildar fler läckagevägar för vatten som kan rinna bakom sprutbetongen i väggar och tak. Att sprängning skadar injekterade sprickor nära bergkonturen och luckrar upp undermåligt bruk i injekteringshål är förståeligt och högst sannolikt. Detta förhållande är dock föga uppmärksammat. Det ingår inte heller i dimensionering av skonsam sprängning som den utförs idag.

Skonsam sprängning ingår som en fundamental del i sprängningsteknik under jord. Det åstadkoms genom att använda allt mindre laddningskoncentrationer ju närmare laddningarna kommer den slutliga bergväggen. Se figur 8. Hjälpårhål och salvhål kan laddas med stigande laddningskoncentration eftersom de får längre avstånd till den kommande bergkonturen. Förhoppningen är att dessa hål inte skall bilda sprickor som går djupare in i berget än de från konturhålen.



Figur 8. Principskiss visande skonsam sprängning av tunneltak eller vägg. Konturhålen pip-laddning laddas med lägst laddningskoncentration. För den mest förekommande vanliga laddningskoncentrationen motsvarande ca 0,17 kg/m (dynamit) bildas en ca 0,2- 0,3 m djup spricka in i berget. Eftersom hjälpårhål och salvhål ligger på längre avstånd från den blivande konturen kan dessa laddas hårdare för att sprickorna inte skall nå längre än de från konturhålen. Det skuggade partierna illustrerar de förväntade skadezonerna från de olika laddningarna.

En teori för att kvantifiera ”teoretisk sprickzon” från långa laddningar i språnghål lanserades 1979 (Holmberg och Persson, 1979). Med hjälp av den beräknades en skadezon från olika kraftiga laddningskoncentrationer. Resultatet arbetades in i bygganvisningar, Anläggnings-AMA och handböcker.

Teorins bärande del var att randzonen till sprickbildningen i berget skulle kunna relateras till vibrationsnivån uppmätt som svängningshastighet, m/s. Enligt teorin beräknades sprickbildningen upphöra när vibrationsnivån i berget hade klingat av till 0,7-1 m/s.

Blair & Minchington (1996) visade att teorin var fel. Parallellt och oberoende av varandra presenterades även resultat från mätningar som utförts för att kontrollera teorin. Mätningarna visade att svängningshastigheten i randzonen till skador var mycket högre ca 2-2,5 m/s (Bogdanoff, 1996 och 2000).

Ett vanligt fel i bygghandlingar som upprättas enligt Anläggnings-AMA är även att kravet på skonsam sprängning endast definitionsmässigt föreskriver pipladdningar. Mot de kraftiga bottenladdningarna som ger djupare skador finns inga föreskrifter.

Berganläggningar med tät betonglining

Bergbyggnadstekniken söder om Skandinavien skiljer sig från det nordiska på ett avgörande sätt genom att dessa utförs med inklädnad av tjock betong. Också Lindblom (2012) konstaterar citat:

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

Man spränger och driftförstärker med bultar, sprutbetong, men i dåligt berg förstärker man ofta även med stålågar. Den stora skillnaden är att utanför Skandinavien utför man en permanent inbyggnad (lining) med tjock över 0,8m armerad betong. Den permanenta betongförstärkningen i det svenska konceptet är jämförelsevis blygsam ca 0,05 - 0,12 m sprutbetong.

Med tjockare betonglining skulle man vinna avsevärt mycket längre livslängd. Samtidigt skulle man kunna utföra betongen vattentät. En tjock betong skulle även ge en överförstärkning som skulle reducera behovet förstärkning med bultar. Effektiv efterinjektering av eventuella enstaka läckage är också mycket lätt att utföra bakom kraftiga betongkonstruktioner.

Stephansson (2011) skriver:

”Inför den kommande utbyggnaden av SFR2 och byggandet av SFL drar SKB följande slutsatser när det gäller kvalitet och utförande av de nya anläggningarna

- Utomhuskonstruktion i havsnära miljö
- Dimensionera för lång drifttid
- Skärpt kontroll av arbetsutförandet
- Tydliga inspektionsrutiner
- Upprätta funktionsbeskrivningar
- Avfuktare till ventilationsluften och alternativ lösning för ventilationssystem.
- Bättre betongkvalitet.
- Tjockare täckskikt och minimera slakarmering
- Alternativa material
- Mindre andel betong i direkt kontakt med berg.
- Skydda betong från bergläckage.
- Tunnelduk
- Takbeläggning
- Avrinningsklackar
- Separation mellan bärande- och barriärfunktion.”

Punkterna ovan avser huvudsakligen konstruktioner inne i bergrummet. Om de tunna sprutbetongskikten runt bergrummen istället omgavs av ett tjockare skikt betong som utförs vattentät, skulle många av problemområdena ovan kunna elimineras eller lindras väsentligt.

De fyra motorvägstunnlarna mellan Västerås och Enköping byggdes 2010. En avgörande skillnad mot alla liknande tunnlar var att de projekterades utan förinjektering av berget. I stället valdes ett något tjockare skikt av sprutbetong än vanligt,

ca 0,20 m. Till betongen föreskrevs tillsats av vattentätande medel (Lindén, Bogdanoff, Magnusson 2011). Figur 9 visar en av tunnelarna. Begränsad efterinjektering utfördes med polyuretän. Även om vatten till viss del behöver avledas med dräner, blev tunnelarna relativt täta, trots att de inte hade förinjekterats.



Figur 9. En av motorvägstunnelarna mellan Västerås och Enköping. De mörka fläckarna på asfalten är läckage från taket. Trots att man inte har utfört dyrbar och tidsödande förinjektering är läckagen relativt få (Foto: Bogdanoff, 2011).

Av olika skäl, typiskt för pilotprojekt, nådde inte förslaget fullt ut för att bilda en helt tät tunnel. Men projektet visade att det finns stor potential för vidareutveckling.

Läckagens tidsberoende i SFR och Clab

Transientflödet som i samband med tunnelbyggandet ofta orsakar en grundvattensänkning, stabiliseras med tiden. Igensättning av läckande sprickor i sprutbetong inträffar delvis genom självläkning. Det kan leda till minskning av inflödet sett i ett långt tidsperspektiv. Men det är också vanligt att om en spricka sätts igen så leder det till en tryckhöjning i närområdet. Den kan då punktera sprutbetongen med ett nytt läckage i sin närhet.

Även om tunn sprutbetong när den är som bäst kan vara tät mot låga vattentryck så finns det vanligen anomalier i den. Ojämn tjocklek och varierande kvalitet leder till att den kan börja släppa igenom vatten. Kvalitetsvariationerna kan bero på att porositeten i betongen är beroende av sprutförarens skicklighet. Men sprutbetong är även cementrik och det bidrar till att det bildas krympsprickor. Effekter av olika accelerationer i varierande grader är även svårtolkade.

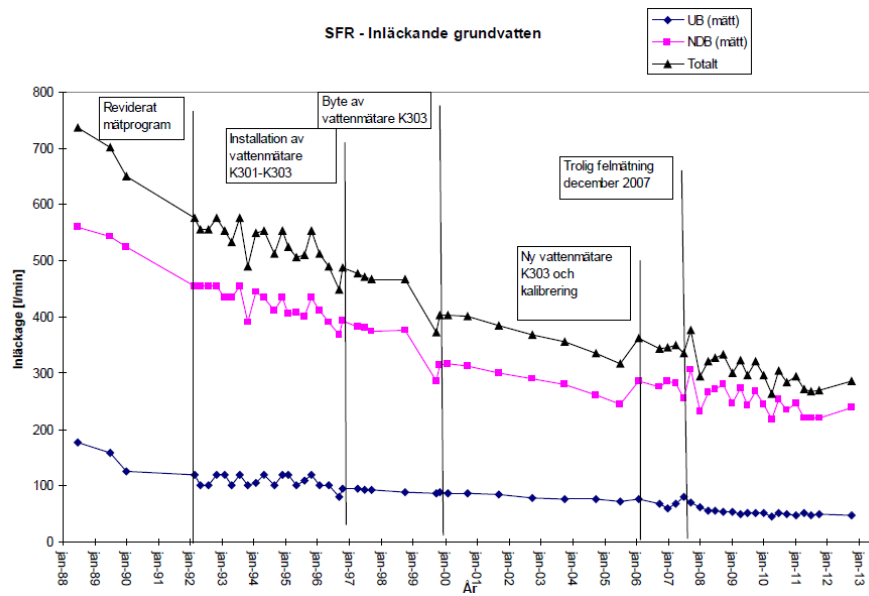
Läckage i bergsprickor kan minska men även öka. Det är svårt att avgöra hur mycket av läckage-minskning som kan tilldelas läkning av sprickor i sprutbetong. Eventuell läkning av vattenförande bergsprickor bakom sprutbetong är mycket svår att påvisa. Det ligger nära till hands att anta självtätningen kan bli större i en anläggning som omges av ett lågt grundvattentryck, än en anläggning som omges av högt vattentryck som ökar genomspolning av sprickor.

Av SKBs dokumentation runt SFR framgår att läckaget minskar med tiden. En vanlig uppfattning tycks vara att minskningen beror på självläkning av sprickor i berg-

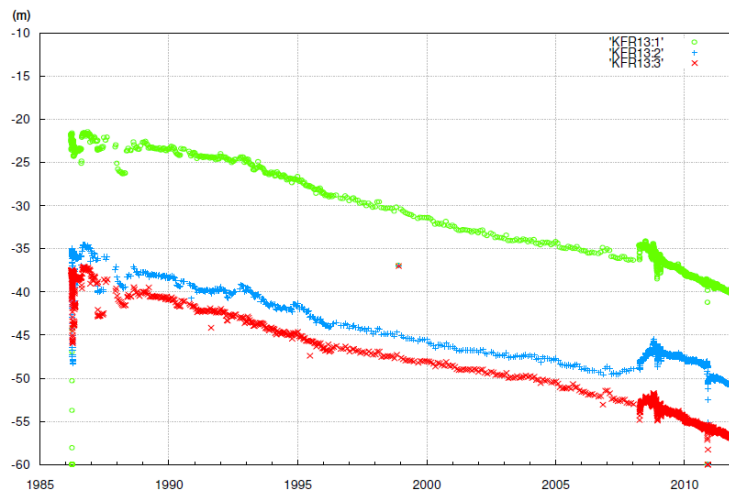
massan eller i sprutbetongen. Även bedömare utifrån har anslutit sig till antagandet om självläkning. Lindblom (2009) skriver om SFR:

”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 tiden.”

Figur 10 visar läckagehistorien i SFR (Jonsson 2013). Samtidigt har grundvatten-trycket i SFR också minskat, stadigt, i många mätpunkter. Se figur 11.



Figur 10. En stadig minskning av läckaget har skett i SFR fram till 2011. Då stagnerar läckaget för att sedan öka. Bilden visar värden för tidsspannet mellan 1989 och 2013 (Jonsson, 2013).



Figur 11. Grundvatten-trycket i några mätpunkter i SFR, borrhål KFR 13, visar en avtagande trend för tidsspannet mellan 1998 och 2011 (Lundin, 2012).

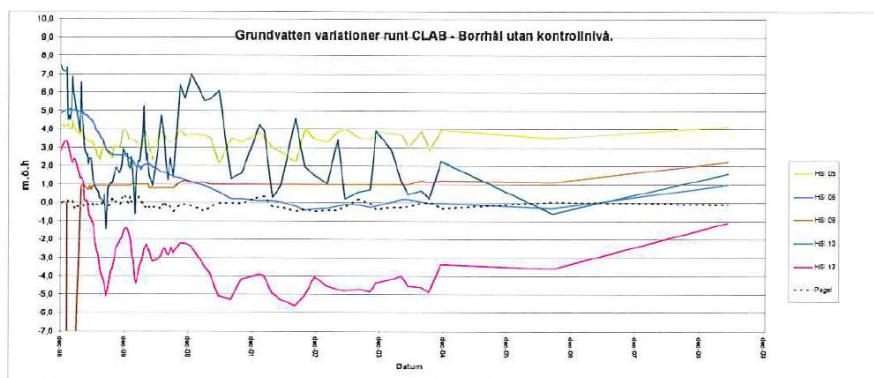
Komplexiteten i variationer hos grundvattentrycket i SFR uttrycks av Jönsson (2011). Av rapporten framgår att det finns en avtagande trend i flera mätpunkter. Likaså att mätningarna är förenade med risker för fel.

Stephansson (2011) skriver om SFR:

”Grundvattennivån har förändrats från ca -35 m 1988 till ca -50 m 2010 och visar på en transientperiod som ännu inte har avstannat.”

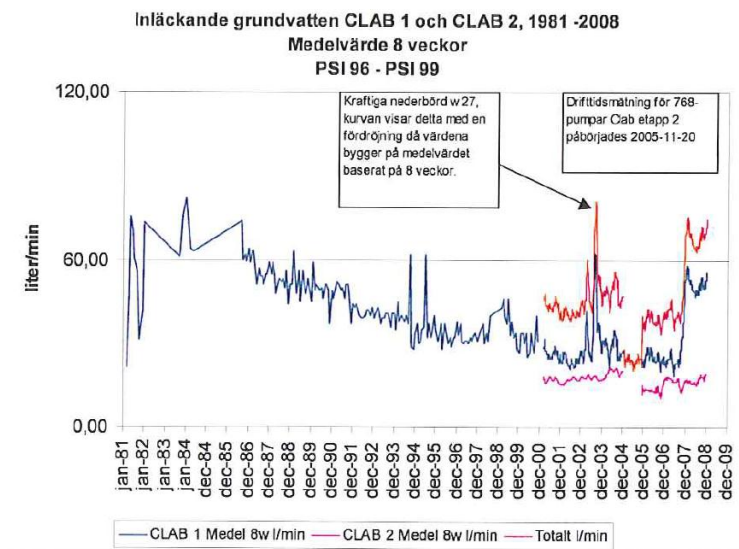
Enligt SKBs dokumentation har grundvattentrycket sjunkit. Var det har skett över anläggningen är svårt att tyda. Men att läckageminskningen till stor del beror på minskande grundvattentryck verkar vara tydligt.

I Clab har det skett en ökning av grundvattentrycket från 2006 fram till 2008 (Lundin 2010). Se figur 12. Även här har det skett en minskning av läckaget för att sedan följas av en ökning när trycket i grundvattnet stiger. Det vanliga skälet till att ökningen är att regnvatten fyller akvifärer i bergmassan. Figur 12 visar grundvattentrycket i borrhål utan kontrollnivå. Även för borrhål med kontrollnivå har trycket ökat på liknande sätt. En skillnad är att borrhål HSI 03 har ökat med ca 7 m. Ökningen är mycket större än i andra hål och Lundin (2010) nämner att en orsak kan vara att hålet behöver rensas d.v.s. vattenvägarna har satt igen sig.



Figur 12. Grundvattennivåer i Clab I borrhål utan kontrollnivå mellan 1998 och 2009. Trycket ökar under senare tid (Lundin 2010).

Ökningen av grundvattentrycket i Clab är tydlig. Det resulterar som väntat, att inläckaget ökar. Uppförandet av Clab etapp 2 komplicerade bilden ytterligare. Det bör för tydlighetens skull även nämnas att sprängningarna för Clab etapp 2 inte kan ha skadat injekteringar i Clab 1. Det förväntade skadeområdet med sprickbildning i berg, som diskuterats i avsnittet Skonsam sprängning är ca 0,3 m, även om den i verkligheten kan variera. Uppluckring av dåligt injekteringsbruk bedöms kunna ske på längre avstånd men knappast längre bort än ett par meter (Författarens bedömning). Avståndet mellan de bägge bergrummen är 40 m, se t.ex. Lundin (2010).



Figur 13. Utpumpat vatten i Clab har sjunkit stadigt för att sedan börja stiga igen mellan 2002 och 2008. Jämför med figur 12 som visar tryckhöjning under samma tid (Lundin 2010).

I Clab utförs mätning av utpumpat vatten genom att mäta pumparnas gångtid. I Lundin (2010) uppmärksammas att läckaget normalt borde minska, men att det ökade inläckaget kan bero på fel i mätning av utpumpat vatten. Ökningen av inläckaget skulle åtminstone delvis kunna bero på slitna pumpar som orsakar ökad gångtid. Samtidigt har dock grundvattentrycket stigit och det ökar det pådrivande vattentrycket i bergets sprickor. Att det finns brister i mätningstekniken även vid SFR är man medveten om och Jonsson (2013) att:

”Mätsystemet för inläckande vatten bör ses över för att utforma, och i förlängningen ge, tillförlitligare mätningar.”

Man kan av dokumentationen omkring SFR invaggas i uppfattningen att minskade inläckage beror på igensättning av sprutbetong. Att inläckaget minskat i SFR är klart. Men det är även klart att det pådrivande grundvattentrycket har minskat. Det minskande läckaget beror troligen mer av det senare än av igensättning av sprickor i sprutbetong och berg.

I ett långt perspektiv kan noggranna mätningar av både grundvattentryck och läckage kunna vara avgörande för bedömningar av degradering av sprutbetong och injekteringar i berg.

4. Berganläggningars livslängd

Stora anläggningar har byggts under 1900 och 2000-talet där nya tekniker, metoder och material har använts för första gången eller utanför deras vanliga användningsområden. Exempel är stora broar i betong, slanka strukturer i marin miljö eller med armering med hög förspänning. Satsningen på teknik har inte alltid motsvarat kraven på underhåll och hållbarhet av konstruktionerna. Byggprocessen som sådan har inte heller alltid varit anpassad för kvalitet som är förutsättning för de långa livslängder som de stora ekonomiska investeringarna kräver. Exempel är de senaste årens stora hallbyggnader som gett vika för snölast. Ett annat är nu aktuella enstegstättade husfasader som resulterat i stort antal fuktskador i småhus.

Den främsta orsaken till begränsad livslängd för berganläggningar som trafiktunnlar, SFR och Clab, är som denna rapport inleddes med, vatteninläckage. Från 90-talet har det skett en kraftig ökning av forskningsinsatser avseende injektering. Parallellt har alltmer finmalda cement börjat användas för bergtätning. Både forskningsframgångar och användning av mer finmalda cement borde ha bidragit till tätare tunnlar. Det finns emellertid en allvarlig risk att de produktionsökande inslagen i injekteringsarbetet har förtagit eventuella vinster som hade kunnat erhållas från forskning och cementförbättringar. Det finns inte några undersökningar om man vunnit eller förlorat på förändringar som tillkommit under senare år. Som visats i avsnitt ”Ett systematiskt byggfel” så är injekteringshål utan hålfyllnader en stor orsak till den dominerande orsaken till läckage i bergrum. Andra orsaker är att hantverket med injektering där injekterarens kunskap utnyttjas har getts allt mindre utrymme.

Berganläggningar som trafiktunnlar förväntas ha en teknisk livslängd på 150 år om den dimensioneras för 120 år. Citat ur Trafikverkets Tunnel 2004:

”Den förväntade tid under vilken en konstruktion med normalt underhåll uppvisar erforderlig funktionsduglighet. Krav på teknisk livslängd uttrycks som TLK X där TLK avser Teknisk livslängdsklass och X anger krav på teknisk livslängd uttryckt i år som förväntas uppnås med minst 90 % sannolikhet. Medelvärde av teknisk livslängd antas vara minst 25 % större än X. Förväntad medellivslängd är således 150 år för TLK 120, 100 år för TLK 80, 50 år för TLK 40 och 25 år för TLK 20.”

Förväntningarna baseras sannolikt inte på känd degradering av berg och bergförstärkningar i tunnlar i landet. Mer troligt är att kraven är anpassningar till t.ex. krav för andra byggnadsverk som broar.

För Clab övervägs förlängning av den tekniska livstiden från 60 till 200 år (Pettersson och Grundfelt, 2006; Söderman, 1997). Vid SFR, som skulle ha varit i drift till 2010, planeras nu SFR-utbyggnaden samt kärnbränsleförvaret, bredvid den nuvarande.

Med den komplexitet som ges av berganläggningarnas geometri, de geologiska förhållandena, vatteninrinning och varierande kvalitet på bergförstärkningar är en berganläggnings tekniska livslängd mycket svårbedömd. Och det är först under senare tid som man börjat med mer systematiska undersökningar av hur bergförstärkningar degraderas.

Sprutbetongen utgör ett viktigt förstärkningselement i tunnlår och berggrum. Sprutbetongskiktet är dimensionerat för lastfall som ges av bergförhållanden, bergtäckning, tunnelns geometri m.m. I hårt berg, som ofta i Sverige, leder dimensioneringen till att fiberarmerad sprutbetong inte behöver utföras med särskilt tjocka skikt. Typiska krav på tjocklek är 50 till 70 mm och vid dåligt berg upp till 90 eller 120 mm. Till det tillkommer ofta ett skikt om 20 mm oarmerad sprutbetong som täcksikt för att täcka över utstickande stålfibrer. Man bör dock vara medveten om att sprutbetong inte är dimensionerad med åtanke att den kan degraderas under anläggningens förväntade livstid.

Söderman (1997) skriver citat:

”Berget som sådant förutsätts vara stabilt eftersom skillnaden mellan 60 år och 200 år i ett geologiskt sammanhang är betydelselöst. Den påverkan som kan ske är aningen genom vittring av sprickytor eller lermineral, eller genom korrosion eller degradering av material som använts för att förstärka sådana områden. Vittring eller försvagning i dessa områden kan förorsaka nedfall av utrustning, betong eller bergblock i bassängerna och därmed åstadkomma skada.”

I sammanfattningen för samma referens skrivs att:

”För att undersöka de tekniska förutsättningarna för nollalternativet har SKB låtit studera möjligheten att förlänga lagringstiden i Clab från den planerade drifttiden på ca 60 år till 100–200 år. En grundläggande förutsättning i den studien är att drift och underhåll uppfyller samma kvalitetskrav som i dag, så att vattenkemin och miljön i förvaringsdelen kan upprätthållas enligt gällande specifikationer. Byggnadskonstruktionerna i förvaringsdelen bedöms, enligt den studien, i huvudsak ha en livslängd om 200 år. Ett uppföljningsprogram som kan visa reparations- och renoveringsbehov skulle dock krävas.

Bergförstärkningar kan inte med dagens kunskap förutsägas ha en livslängd om 200 år. Detsamma gäller infästningsbultar för innertak och installationer. Om lagringstiden i Clab förlängs måste uppföljningsprogram för dessa delar upprättas och vissa konstruktionsdelar bytas ut. Installationer och hanteringsutrustning har i regel begränsad livslängd, men kan bytas ut och moderniseras. Detsamma gäller el- och kontrollutrustning. Modernisering och byte av sådana komponenter görs redan i dag”.

Rapporten utesluter inte degradering av berg eller bergförstärkningar inom 200 år som kan leda till nedfall av berg. Men förutsatt att det inte händer något oväntat, så kan det bli mycket svårt att visa när en kritisk ålder närmar sig för kombinationen berg och bergförstärkning. Men väl där torde alla anläggningar som tillåter tillträde med byggnadsställningar eller sky-lift kunna renoveras.

Ersättning av sprutbetong eller ny fiberarmerad sprutbetong ovanpå gammal betong är sannolikt långt in i framtiden ett effektivt sätt att förlänga livslängden i bergförstärkningarna. Den senaste tidens insikt om fördelarna med torr miljö i anläggningarna är förenlig med tillämpning av tjocka sprutbetongskikt. Dessa kan även utföras i en befintlig anläggning. Degraderad sprutbetong kan täckas med ny betong som förankras med korrosionsskyddade korta bultar.

Brandskydd är ett område där det kan komma ställas förnyade krav på material som tål termisk spjälkning. Olika konstellationer av bergförstärkningar med hänsyn till brand diskuteras ingående av Rosengren (2008).

5. Degradering av injektering

Det finns pågående forskning av hur cementer kan brytas ner när dessa omges av berg (Lindblom 2012). Men även om man identifierar de kemiska processerna som eventuellt kan bryta ner injekteringscement kvarstår de praktiska aspekterna av problematiken som synnerligen svårbedömda randvillkor. Några exempel ges för att förtydliga:

- Degradering av injekteringsmedel kan ske på olika djup in i bergsprickor med olika egenskaper. Strömningssituationerna som påverkar injekteringsmedel i en bergspricka blir mycket svårbedömd eller omöjlig att sätta in i ett större sammanhang med läckageförändringar
- Vattencementalet i bruket inne i en spricka kan variera från slammat vatten till bruk med vct 0,5. Det är rimligt att anta att brukets inträngningslängd in i sprickan är en viktig parameter eftersom grundvatten kan penetrera randzonen för brukets inträngning. De är också rimligt att anta att de numera relativt högvätskösa bruken inte tränger lika långt in i sprickorna som mer lågvätskösa. Till det kan tilläggas att man numera även vill begränsa inträngningslängden
- Om bruket bryts ner i en sluten spricka förväntas bruket svälla enligt gängse teori. Men svällning mot sprickväggar kan minska tillträde av vatten, d.v.s. en självläkning som beror på degradering av cement.

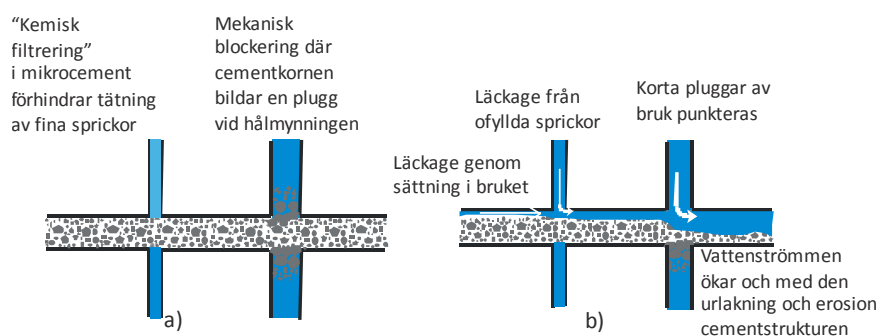
Lindblom (2012) har sammanställt undersökningsdata som utförts vid Chalmers Tekniska Högskola och Göteborgs Universitet. Dessa visade att vid nedbrytning av cement vid en diffusionsstyrd lakning så skulle en nedbrytning under 100 år endast kunna bli ca 0,1 m. Nedbrytningen som startar vid sprickmynningen är således långsam med tanke på att man strävar efter flera meter breda injekterade zoner runt berganläggningen. Som anmärkning kan tillfogas att Lagerberg (2007) anger för betong (K40) att lakningen förväntas bli 10 mm på 100 år.

Av slutsatser de utförda undersökningarna som Lindblom (2012) refererar till framgår att den mest centrala parametern gällande cements stabilitet är pH och närvaron av portlandit, citat.

”Den senare är en god indikator på nedbrytningstillståndet för åldrad cement. Om en cement har närvaro av portlandit är den stabil. Portlandit (kalciumhydroxid) är den dominerande kristallina fasen i hydratiserad cement. Utan portlandit finns risk för att porvattnet blir surt. Detta kan leda till utlakning av andra mineraler och en mer porös struktur på cementet”

Risken för nedbrytning av cement bedöms vara mycket större genom penetrativ lakning som leder till erosion av cementbruk. Den penetrativa lakningen styrs av hydraulisk gradient, porositet och sprickighet (Lagerblad, 2007). Grundvatten kan strömma längs cementbruket i sprickan och vidare ut i tunneln. Lakningen mjukar upp bruket som sedan kan erodera med vattenströmmen. Penetrativ urlakning blir möjlig eftersom sprickorna inte fylls helt vid injektering.

För det nu vanligaste cementet, Injektering 30, har man genom filtrering visat att minsta spaltvidd för inträngning vid vct 1-2 är ca 60 µm. En kritisk spaltvidd med delvis inträngning är ca 80 µm (Eriksson & Stille 2005). Gränserna har tolkats som en form av kemisk filtrering som förekommer för finmalda cement, mikrocement. För en tidigare variant av Injekteringscement med största kornstorlek 100 µm konstaterades minsta sprickvidd för inträngning till 100 µm i försök i glasspalter och även i rör med glaspärlor som bildade en fiktiv sprickvidd, 100 µm (Bogdanoff 1990). Men i praktiken tillkommer att läckagevägar kan täppas till genom ovarsam injektering. Det kan ske t.ex. genom för snabb pumpning eller genom plötslig tryckhöjning. Det senare är för injekterare ett välkänt sätt att försöka få stopp på en cementinjektering av ett hål som sakta tar emot bruk – men som verkar dra ut på tiden. Det skapar en mekanisk pluggbildning där kornen hastigt stockar sig i mynningen till sprickan. I vissa typer av finsprickigt berg verkar en plötslig tryckhöjning som en backventil som stoppar flödet. Ett annat sätt att få stopp på inflödet är att göra korta uppehåll i pumpningen. Detta görs ofta avsiktligt t.ex. när bruket läcker förbi manschetter eller man har ett ytläckage i bergytan. Vid återupptagen pumpning har cementet bildat stelnade proppar i sprickorna. Fenomenet kan ofta ses vid ventiler till manschetter. Efter uppehåll i pumpningen blir bruket stelt i förträngningen vid ventilen medan den i injekterings-slangen fortfarande är lättrinnande. På så sätt bildade korta inträngningar av bruk får grundvattnet större möjlighet att punktera den korta pluggen. Läckagevägar genom injekterade sprickor kan skapas genom att det relativt dåliga injekteringsbruket sedimenterar eller cementbruket krymper. I figur 14 illustreras hur urlakningen kan antas öka till erosion där korn i bruket slits bort.



Figur 14. a) Fina sprickor tätas inte av cementbruket p.g.a. "kemisk filtrering och mekanisk flockning som bildar pluggar i spricköppningarna. b) Läckage sker genom sättningar i bruket, genom ofyllda sprickor och korta pluggar av cement som brister. Det integrerade läckaget längs hålet bildar en vattenström som kan accelerera urlakning som övergår till erosion av cementstrukturen.

Det finns således läckagevägar genom sprickor som inte har kunnat injekteras och genom sprickor som helt eller delvis fyllts med cementbruk. De samlade läckagen kan strömma till en gemensam större vattenledade spricka, t.ex. ett injekteringshål med dålig kvalitet på bruket. Bruket urlakas sedan av vattenströmmen som sliter loss alltmer större korn och i snabbare takt från cementstrukturen. Risken för sådan erosion bedöms kunna öka främst genom redan stora kanaler som utgörs av bristfälligt fyllda injekteringshål.

Lakningsprocessens mekanik och kemi beskrivs i (Lagerblad 2007) och (Windelhed, Lagerblad och Sandberg 2002). De senare refererar lakningsförsök för bultbruk som beställts av SKB och utförts av Cement och Betonginstitutet (CBI). Resonemanget som anförs torde i allt väsentligt även gälla för injektering. Citat:

”I injutningsbruket skall vct vara under 0,4 vilket gör att det alltid finns ett överskott på ohydratiserade cementkorn. För att ingreppet skall bli allvarligt fordras därför mera distinkta sprickor. Sprickor med en vidd på 0,1-0,3 mm kan man anta att de självläker om inte vattentrycket mycket högt.”

Slutsatsen ovan tolkas som att vct upp till 0,4 säkerställer mot risk för lakning. Man kan till det konstatera att gynnsamma förhållandet med vct under 0,4 aldrig råder vid injektering. Lägsta möjliga är vct 0,5. Men i de ofullständigt fyllda injekteringshålerna finns allt från luft, vatten, cementslam till bruk med vct 0,5. Lakning med erosion som följd är därför en risk i injekteringshål.

Författarens erfarenheter från Bolmentunneln, baserat på kontroll av injekteringsarbeten 1979 och från besiktning av ca 50 km av tunneln 2009-2010 är att stora läckage hade uppstått under en 30 års period. Ofta konstaterades sprutande läckage från injekteringshålens mynningar, men även från sprickor i bergväggar. Injekteringshålen hade borrats framåt, på samma sätt som de utförs idag, med flack vinkel från tunneln. När hålen närmade sig tunneln hade genomslag skett av vatten via sprickorna från injekteringshålen till tunneln. Det är för författaren inte möjligt att spekulera om eller vilka kemiska processer som bidragit till läckagen. Men vid injekteringar i Bolmentunneln användes huvudsakligen SH- cement. Den är inte lika sulfatresistent som anläggningscement. Detta kan ha bidragit till nedbrytning av cementbruk.

Sulfatangreppen förväntas orsaka svällning i cementbruk. I fina sprickor där svällningen sker mot sprickväggarna är den av godo. Eftersom sprickan sluts igen. I grova sprickor som dåligt fyllda injekteringshål med stora läckagevägar kan man anta att svällningsprocessen inte räcker till för att bilda stöd och hejda vattenströmmen. Den kan då föra bort kornstrukturen i cementbruket.

För att kunna tolka injekteringars beständighet torde noggrann mätning av inläckage korrelerad till grundvattentryck vara ett primärt sätt att upptäcka degradering av injekteringar. Man kan även bevaka läckage i bergkonturen. Att läckagepunkter försvinner på bergväggar innebär dock inte att läckaget är borta från anläggningen. Den kan som tidigare nämnts, bara ha flyttat sig.

6. Degradering av bergbultar

Degradering av bergbultar har analyserats av Windelhed, Lagerblad och Sandberg (2002). Den alkaliska miljön med cementbruk som omger bultarna är mycket gynnsam för att förebygga korrosion. Sammanfattningsvis visar undersökningarna att risken för degradering av bergbultar är liten.

Figur 15 visar en Perfobult i Bolmentunneln installerad för ca 30 år sedan. Bult och det Perforör som användes för att föra in bruket i hålet har ingen synligt korrosion.



Figur 15. Bergbult och Perforör för bultmontering efter 30 år i cementbruk i Bolmentunneln. Bultstål och Perforör för ingjutning av bult visar inga synliga tecken på korrosion (Foto: Bogdanoff 2010).

Den mest omfattande erfarenheten av gamla bergbultar har rapporterats från Vindötunneln som renoverades 2002, en biltunnel på väg 160 i Bohuslän. Tunneln byggdes i mitten på 60-talet. Vid renoveringsarbetet utvidgades tunneltaket varvid ett stort antal bergbultar sprängdes ner (Thorén, 2012). Dessa skickades sedan för korrosionsanalys. Resultatet beskrivs av Lindblom (2012):

- 199 av 1400 bult hade korrosionsangrepp
- angreppen på 62 bultar av 199 förekom inom 0,4 m från bergytan
- på endast 10 % av bultarna förekom korrosion djupare än 0,2 m från bergytan
- merparten angrepp förekom mellan 0,05 och 0,20 m från bergytan.

Att angreppen nästan alltid finns nära bergytan beror på att det är där den största möjligheten finns för rörligt syresatt vatten. I en trafikunnel finns även luftturbulens med inblandning av avgaser, fukt och salter från vägbanan. Det bidrar till en mer aggressiv miljö vid bergytan än i ett bergum. I bergytan nära konturen finns ett

spricksystem där vatten kan röra sig. Vatten som rinner efter bergytan kan också sugas in i sprickorna kapillärt. Bergblocken rör sig på grund av bergspänningar, vattentryck och av uttorkning i sprickorna. Att bergblocken rör sig bekräftas av att det nästan alltid, mellan skrotningstillfällena, har lossnat block i en tunnel. Sprängskador bidrar sannolikt till att block lossnar och att det bildas läckagevägar i bergytan. Sprickorna från sprängskador har inte heller sprickfyllnader som tätar mot vatteninträning. Men det är också sannolikt att det uppstod sprickor från borrningen för bulthålen. Den extrema belastningen från borrningen när den passerar ytliga block kan spräcka och vibrera loss block.

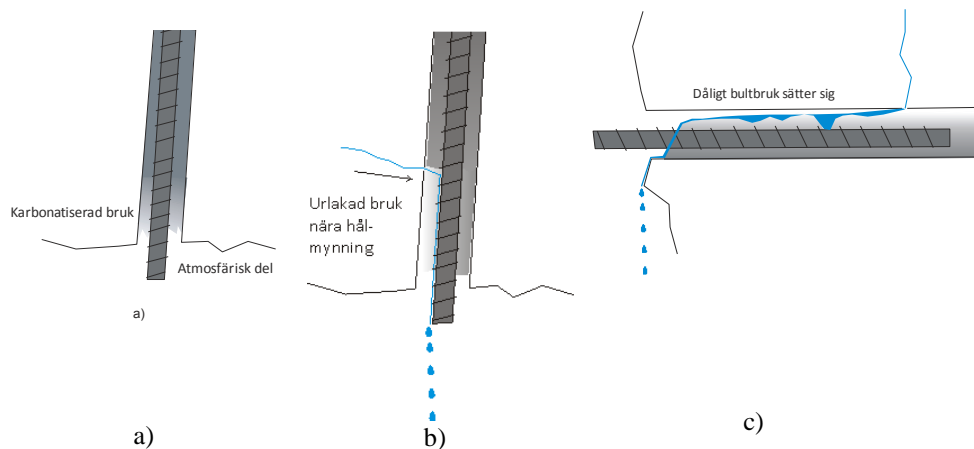
Om bergytorna skrotas med tidsintervaller innebär det att sprängskadorna kan få allt mindre betydelse ju längre tiden går. Allt fler block som kan vara i kontakt med sprängskador tas ner. Vid skrotning i SFR 2012 rensades ca 1000-1200 kg ($0,4 \text{ m}^3$) sten från nakna bergväggar (Jonsson, 2012). Tio år innan var volymen $9,4 \text{ m}^3$. (Stephansson, 2006). Det vanliga är att mängden lossnande sten avtar med tiden. Det är svårt att lägga några värderingar på volymen lös sten. Bergarbetarnas ambition är en faktor. Skrotning av bergväggar kan utföras enligt olika klasser som föreslås i Anläggnings AMA. Man kan också utföra arbetet med hjälp av olika effektiva hydrauliska spett. I SFR kan man förvänta sig att skrotningen har utförts av två man med skrotspett. Vid arbetet kan man också använda hand- eller maskindrivna stålklar som slås in i sprickor i block som bedöms kunna tas ner. I det manuella arbetet med spett och klar är det bergarbetarnas erfarenhet och klangljud i blocket som avgör om ett block skall skrotas ner. I finsprickigt berg kan man ofta skrota ner stora mängder berg utan att man når klingfast berg som förväntas av fast berg. Arbetet är även känsligt för nedtagning av låsblock, ofta mindre block, som låser fast större. Bergarbetarnas erfarenhet och omdöme är avgörande för om blocket skall tas ner.

Problematik omkring bergbultar

I figur 16 a-c visas tre principfall som bedöms kunna äventyra bergbultars livslängd. Dessa kan kort sammanfattas med:

I fall a) kan bruket karbonatiseras beroende av luftkvalitén inne i bergrummet och det kan orsaka utfall av bruk ur hålmynningen. Korrosion av den atmosfäriska delen har i regel ingen betydelse för den bärande funktionen hos bultar.

Om bulten är täckt med sprutbetong som de är i bergrummen i SFR och Clab, kan korrosion inte inträffa vid bultändan, innan den alkaliska miljön som ges av betongens täcksikt har neutraliserats. Se figur 17. En ytterligare fördel för bultar täckta av sprutbetong bedöms vara att de ytliga blocken är fastlåsta av sprutbetongen. Det borde minska risken för att nya vattenvägar öppnas till bulten. Men även syrehalten i vattnet är avgörande för korrosion.



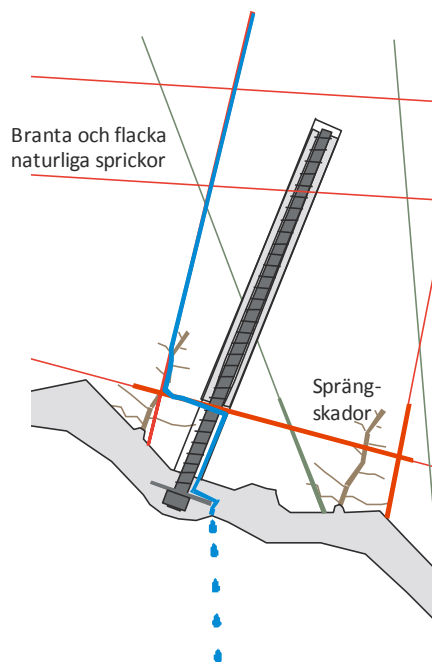
Figur 16. a) Om luftfuktigheten är mer än 70 % korroderar stål i del som finns utanför hålet, atmosfärisk del (t.ex. Sandberg, 2007). Bultbruket i hålmynningen kan svälla och kalva ut av karbonatisering. b) För löst kan bruk rinna ut ur hålmynningen eller ytliga sprickor kan laka och erodera ut bruk nära bergytan. Detta kan även inträffa om man trycker in bulten för snabbt. Bruk från hålmynningen sugas ut av "rörelseenergin" i överskottsbruket som rinner ut när bulten pressas in för snabbt (Larsson, 2013). c) I flacka hål, figur c) visas att löst bruk kan sätta sig och att det då kan bildas kanaler för vatten som kan laka ut bultbruket.

Intentionerna för bergbultar i SFR har beskrivits av Martna och Jansson (1986)

"Förutsättningarna för bultens funktion och bestånd är att cementhöljet är intakt. Därför har ingen bult fått sättas i läckande hål. Bultarnas ingjutning har kontrollerats stickprovsvis vid sättning och senare med Boltometer."

Slutsatsen är att om cementhöljet är intakt så är risken för degradering av bultar liten. Det stämmer med de undersökningar som har utförts under senare tid, exempelvis från Vindötunneln och av Windelhed m.fl. (2002).

Författarens erfarenhet är att även rutinerade bergarbetare kan montera bultar på ett mindre korrekt sätt. Vanliga fel är att bulten sätts i ett svagt läckande hål eller att bultbruket är så tunt att det rinner ut. Bultbruket kan även rinna ut en bit från bergytan om bulten trycks in för snabbt. Det är lätt hänt att installationsfelet med avsaknad av bruk döljs genom att smeta ut lite nytt bruk vid hålmynningen. Det medför att det kan bli ett tomrum en bit in i hålet.



Figur 17. Läckage vid bergbultar är vanligt. Det kan bero på att det lätt kan bildas vattenvägar vid bultändarna. Det kan saknas bultbruk i hålet vid bergytan. Blocken vid bergytan kan ha ett nät av läckagevägar från sprängskador och naturliga sprickor. En ytterligare faktor som ökar läckagevägar intill bultarna kan vara att borrkronan vibrerar block i bergytan som omger bultarna. Läckagevägar öppnas då runt bulthålet. Bergbultar i SFR och Clab har ett täcksikt av sprutbetong som skyddar bultändarna. Cementbruk i sprutbetong med hög pH och syrefattigt vatten i bergsprickorna ger skydd mot korrosion. Brickor och muttrar var tidigare ovanliga. Idag är de allmänt förekommande. Även i Clab etapp 2 har brickor använts till viss del (Boden, 2002)

Martna och Jansson (1986) nämner att bultbruk vct 0,27-0,3 har använts i SFR. Det finns emellertid en övertro från konstruktörer och bygglidning att det föreskrivna styva bruket vct 0,3 har använts vid bultsättningen. Det är ett gränsvärde för vanliga pumpar för bultbruk. Bruket bör inte heller vara för styvt för att det inte skall bildas luftfickor i det (Larsson, 2013).

En text som påträffas i nästan alla bygghandlingar genom decennier är att:

”Bult får inte sättas i hål med rinnande vatten”.

Ett inte uppmärksammat problem är att ett bulthål kan verka vara torrt när hålet borras. Men läckaget kan uppstå efter lång tid, om den hydrauliska konduktiviten i berget intill bulthålet är låg.

Vid järnvägstunneln i Skee föreskrevs att bulthål skulle injekteras med mikrocement innan bultsättning (Bogdanoff m.fl. 2011). Det utfördes så att bulthålet injekterades varefter det evakueras på det lösa injekteringsbruket. Hålet fylldes sedan som vanligt från botten med bultbruk, varefter bulten monterades. En fördel är att man använder de systematiskt tätt satta bulthålen till efterinjektering mot läckage. Metoden är en-

kel. Den verkar säkra bulthålen mot inläckage av vatten och dessutom ge efterinjektering av berget.

Windelhed m.fl. (2002) sammanfattar några faktorer som beskriver den gynnsamma miljön för bult i väl genomförd ingjutning:

- Nästan alla kända angrepp på cementpastan ger svällning som kan skada en betongkonstruktion, men det skadar inte ingjutningsbruket då det sitter inspänt i berg. Ett inspänt ingjutningsbruk bidrar till att motverka vattenflöde i hålet. Det enda en expansion kan ge är en avspjälkning av bruk vid mynningen.
- Det fenomen som eventuellt kan ske i ett välfyllt hål är autogen (kemisk) krympning eller uttorkningskrympning. Den är mindre sannolik då bergbultarna i allmänhet befinner sig i fuktig miljö och fuktransporten är låg i en tät cementpasta med låg vct. Den autogena krympningen övergår i en svällning om vatten tillförs vilket motverkar lakning. I vattenmätta cementpasta sker gas- och jon-diffusion mycket sakta. Korrosion i ett välfyllt hål kan därför endast ske i en relativt torr yttre miljö och om cementpastan av någon anledning är karboniserad eller kontaminerad av klorider. Själva korrosionen ger dock en svällning och kommer att avstanna eftersom stålet och bruket sitter inspänt i berget.
- Om man vill få bättre fäste mot berg och vill förhindra den autogena krympningen kan man även använda krympreducerande medel eller expansionscement. Ett enkelt och billigt sätt är att tillsätta små mängder av periklas (MgO) som ger en expansion när det hydreras.
- De problem som kan uppstå är om cementet är fel sammansatt, något har gått fel vid applikationen eller om bergbulten utsatts för bergdeformation. Detta kan öppna förbindelse mellan stålet och den omgivande miljön.

Sammanfattningsvis bedöms att största riskerna för bultar utgörs av hantverket att sätta bergbult.

Korrosionsskyddad bergbult

Under slutet på 70-talet började bergbultar att korrosionsskyddas genom förzinking. Emellertid uppstod misstankar att det kunde uppstå en reaktion mellan färsk cementbruk och zink, med vätgasbildning, som försämrade av bruket. Förzinkingen är numera kompletterad med ett epoxi skikt som blåses som ett pulver på förzinkingen.



Figur 18. Bergbultar med dubbelt rostskydd med zink och epoxi med brickor och muttrar (Foto Bogdanoff 2010)

Bergbultar med korrosionsskydd dubbelt rostskydd har använts i Clab etapp 2 (Söderström, 2003).

Det är inte långsökt att anta att skiktet med rostskydd kan försämra bultars bärförmåga. Den effektiva kamhöjden hos järnen minskar och därför minskar även friktionen. Epoxin ger en jämnare yta mot bruket än mot svart stål och med försämrade vidhäftning som tänkbar följd. Dessa problem har undersökts av Mosav (2008). Resultatet blev att bärförmågan försämras med 5 till 40% beroende på typ av bultar. Den större försämringen förekom för vissa bulttyper där kammar inte löper runt hela stångens periferi.

Det uttrycks ibland oro att skiktet med epoxi skulle kunna skadas vid hanteringen genom stötar, böjning mm. Enligt tester (Reutersvärd 2011) är detta inte något hot mot bultarnas korrosionsskydd. Testerna visar att slaghållfasthet, vidhäftning och elasticitet hos epoxiskiktet klarar alla krav enligt nedan. Aktuella standard i ämnet är enligt samma källa:

- Slaghållfasthet, minimum 60 enligt ASTM D2794-93
- Vidhäftning, Gt 0 enligt SS-EN ISO 2409 (2 mm)
- Elasticitet (cylindrisk dorn), minimum 12 mm enligt SS-EN ISO 1519.

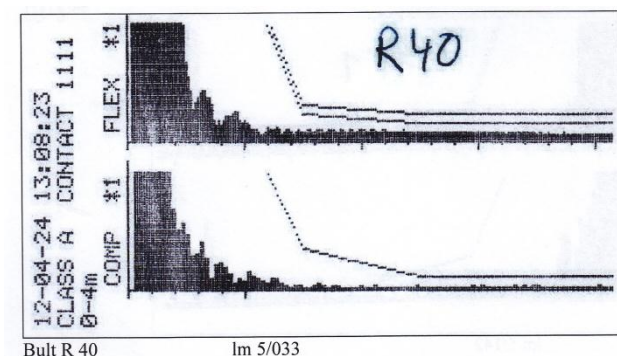
Kontroll av bergbultar

1978 utvecklades Boltometern av Geodynamik AB (<http://www.geodynamik.com>). Instrumentet ger möjlighet att utföra in-situ test av bergbultar. Testet indikerar felaktigheter i form av avsaknad av bruk eller bruk med högt vct i ingjutningen. Trots att metoden har funnits under lång tid så har tekniken inte fått ordentligt fäste hos branschen. Att det är så kan man dra som slutsats eftersom det endast finns tre instrument i landet (Stephansson, 2006). Ett av dessa finns hos Vattenfall Research and Development (VRD) som SKB har avtal med för tillgång till utrustning.

Vid provning med Boltometer skickar instrumentet en signal genom bultstålet som orsakar en kompressionsvåg och en böj- eller skjuvvåg som benämns som "flexural wave". Vid signaltransporten läcker energi från signalen till berget via bultbruket. Om det finns ihålligheter i bruket så reflekteras vågorna och avläses som eko (Boltometer 011, Users Manual). Samma sak händer om bultbruket är undermåligt med hög vct. Ekot ges av förändringar i akustisk impedans som kan uttryckas med materi-

alparametrarna kompressionsvågens hastighet och densiteten i mediet. I princip behöver ett eko inte uppstå om bruket och berget har samma akustiska impedans d.v.s. dåligt bruk i dåligt berg. Figur 19 visar ett diagram från kontroll av referens bultar i SFR med Boltometer. Diagrammet visar ett ekodiagram från en bult som har ingjutning som klassas som en A klass bult. Det är en korrekt satt bult utan fel i bultbruket. Vid hålmynningen och vanligen ca 1 m till 1,5 meter in i berget växer ekot. Det är en egenhet för Boltometern. Anledningen är att bergytan interfererar i diagrammet med reflekterande vågor.

Enligt manualen till Boltometern skall man kunna utvärdera bultens längd från änd-ekot när kompressionsvågen reflekteras. Vid provning av 18 referensbultar i Clab 2010 och 51 i SFR finns inga ändekon som medger bestämning av bultlängden. Ett ändeko har ”tonat bort” (Clab, bult PS1219) under tiden 2006 till 2010 (Lundin, 2010).



Figur 19. Ekogram från test av referensbult i SFR (Lundin, 2012). De mörka fälten är ekon som strålar ut från bulten. Den undersökta bultlängden skall ges av den horisontella skalan i den övre figuren som ett ändeko som dock inte finns i diagrammet. Om det saknas bruk längs bulten eller att bruket har haft högt vct blir ekot större. Linjerna ovanför ekot ges av instrumentet och används för att tolka ingjutningsklass. Linjerna bryter brant uppåt ca 1,5 från hålmynningen. Det beror troligen på att ekot stiger p.g.a. interferens från bergytan. Instrumentet kan därför inte användas för tolkning av ingjutningens kvalitet nära hålmynningen.

En nyutveckling av oförstörande provning har startats av Geosigma. Arbetet har stötts av SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond) och beskrivs i en slutrapport (Ekenbro, 2012). Av rapporten framgår dock inte om den nya varianten av instrument kan detektera defekter i bultbruket i bultens del mot bergytan, där risken för avsaknad av bruk är stor och där den största risken finns för korrosion. Inte heller om instrumentet kan detektera det svårupptäckta felet när dåligt bultbruk och dåligt berg har samma akustiska impedans. Rapporten visar informativt kända problem med bultsättningsarbetet.

Problemet med kontroll av bultsättning finns vid varje underjordsprojekt. Det bästa sättet att förebygga felaktigheter i monteringen av bergbultar är att beställaren utför kontinuerlig kontroll av arbetet.

Kontroll av bergbultar i SFR och Clab

Vid byggnation av Clab etapp 2 testades bergbultar (Boden, 2002) med följande resultat, citat:

”Knappt 10 % av de satta bultarna för permanentförstärkning har testats med en Boltometer, version 011, tillverkad av Geodynamik AB. För kalibrering användes tre bultar satta för detta ändamål i korsningen mellan transporttunnel in mot förvaringsbyggnad 2 respektive förvaringsbyggnad 1. Tre av de testade bultarna visade bristfällig ingjutning och tre stycken reducerad kvalitet, vilket dock är ett godkänt resultat enligt bygghandlingarna.”

Boltometer tester i Clab etapp 2 visar tydligt att fel vid bultsättning inte är ovanligt. Totalt sattes 2500 bultar. Av de testade 250 bultarna hade sex defekter som kunde spåras med Boltometern. Man måste dock betänka att utöver dessa upptäckta monteringsfel finns ett mörkertal i defekter från bergytan till ca 1-1,5 m in i berget.

Boltometer tester utförs med några års mellanrum på referens bultar i Clab och SFR. Undersökningar av 51 stycken referensbultar i SFR och 18 stycken i Clab med Boltometer har inte visat på betydande avläsbara skillnader i ekodiagram sedan testerna började. (Lundin, 2006, 2010 och 2012). Att skador skulle ha uppstått i delar på referensbultarna som kan kontrolleras med Boltometer är inte heller att förvänta. Vatten från berget som rör sig mot tunneln är syrefattigt. Om vatten skall kunna nå till bultbruket långt in i hålet, så måste bulten ha satts i ett hål med läckage. Alternativt med bruk med så hög vct att bultbruket släpper igenom vatten. Sandberg (2007) skriver, citat:

”Den kvarvarande risken är således om det existerar vattenförande sprickor i berget som passerar bruket och lakar ut det. Bestämmande för korrosionshastigheten blir vattnets kemiska sammansättning, flödeshastigheten och vattnets syrehalt. Denna risk minimeras om injektering utförs så att borrhålen är torra vid bultsättningen. I förinjekterat berg bildas nämligen vid lakningen ansenliga mängder hydroxidjoner som höjer pH värdet i omgivande vatten. Vid kontakt med luft kommer den utlösta kalciumhydroxiden att reagera med koldioxid så att det bildas kalciumkarbonat (kalk). Vid långsamt flöde i en spricka kommer denna kalk att läka sprickan. Det erfordras därför ett ganska stort flöde i sprickan för att det ska ge allvarlig lakning”.

Att ett relativt litet vattenflöde som passerar bulten skulle kunna orsaka skador på bulten eller bultbruket bedöms av som en synnerligen liten möjlighet. En möjlighet att observera förändringar i stelnat bultbruk med Boltometer är om det uppstår ett läckage längs bulten långt in i hålet så att bruket lakas ut längs bultbruket. Se figur 14 c, som visar sättningar i bultbruket i ett horisontellt hål. Men även det förutsätter att bulten har satts i ett läckande hål.

I SFR har några referensbultar borrats ut för kontroll. Trots att en bult hade installerats i kraftigt läckande hål med flöde ca 2-3 liter/minut och salthaltigt grundvatten, kunde ingen korrosion noteras (Lundin, 2004).

Eftersom bultarna i SFR är täckta med sprutbetong ökar livslängden genom att vatten som eventuellt når bulten blir alkaliskt. Skulle det inträffa korrosion i bultarna nära bergytan kan detta inte spåras med Boltometern.

Frågan är slutligen också hur eventuell korrosion i bultar nära bergytan påverkar bergrummens stabilitet och livslängd? För att svara på denna frågeställning måste man begrunda bultarnas uppgift.

- De systematiskt satta bultarna kan ha som uppgift att förstärka bergvalvet utanför konturen. Då har korrosion vid bergytan ingen stor betydelse
- Bultar kan även vara avsedda att ta laster från block i bergytan. Yttnära bärförmåga är då viktig
- En annan uppgift för systematiskt satta bultar tillsammans med sprutbetong är att samverka med sprutbetongen. I synnerhet i detta fall kan läckage och korrosion mellan bult och sprutbetong reducera bärförmågan. Kontaktytan som bultarnas mantelyta har är liten i den korta sträckan (50 - 120 mm) genom sprutbetongen. De ofta observerade läckagen vid bultar kan här innebära att sprutbetongen urlakas på kalk intill bultarna. Det innebär en försvagning av den stansningskraft som sprutbetongen upprätthåller om bultarna.

Risken för att korrosion på bultar är störst vid bergytan. Därför skulle undersökningar koncentreras till området vid bergytan, företrädesvis i områden med blöta ytor. Bultar som döljs av sprutbetong kan lokaliseras med metallsökare. Betongen bilas bort för att kunna besiktiga bultändarna. Efter undersökningarna tätas det bilade området med cementpasta.

En in-situ undersökning av bultar täckta med sprutbetong är ett tidskrävande arbete. Man kan förutsätta att undersökningsmaterialet blir begränsat. Vid urvalet borde man prioritera bultar med läckage. Dessa kan undersökas även med Boltometer. Men möjligheten att finna defekta bultar från ett litet undersökningsmaterial med Boltometer bedöms som liten (författarens bedömning).

Mörkertalet för fel finns i bultarnas del mot bergytan. Det är där risker finns för defekt ingjutning. Om den alkaliska miljön har avtagit och vattnet från bergmassan är syresatt följer risk för korrosionsangrepp. Men den helt okända risken är om läckage vid bultar kan ha försämrat bultars kontakt mot ytberg och sprutbetong.

7. Degradering av sprutbetong

Sprutbetong har använts i Sverige under mycket lång tid. Den första sprutbetongen för bergförstärkning i landet utfördes på 1930-talet i Hölebro kraftverk i Ljusnan (Nordström och Holmgren 2009). Men fortfarande gör komplexiteten i betongens komponenter samt de randvillkor som ges av varierande luft, berg och grundvattenmiljöer, att det är mycket svårt att överblicka degradering på lång sikt. Kända osäkerheter är dessutom att betongens kvalitet fortfarande är beroende av bl.a. sprutförarens skicklighet och av inblandning av accelerators vid sprutning mot blöta bergytor. Förutsättningarna för hur sprutbetong kan degraderas i tunnlar har beskrivits av Lagerblad (2007). Rapportens slutsatser citeras nedan:

”Sprutbetong har delvis olika egenskaper som vanlig betong men man kan ändå använda den kunskap man har om vanlig betong och dess beständighet på sprutbetong. För att kunna göra detta måste man emellertid få ett bättre grepp om sprutbetongs speciella egenskaper och speciellt dess porsystem och krympningsegenskaper. Detta fodrar att man gör en systematisk undersökning av befintlig sprutbetong för att verifiera skillnaderna och dess beständighet. En livstidbedömning och en analys av nedbrytningsförlopp fodrar en bättre förståelse för randvillkoren. Man måste ha ett grepp om klimatet och då speciellt fuktförhållandena. Man behöver också bättre kunskap om kemin i grundvatten och hur denna varierar. Speciellt viktigt är det att få ett bättre grepp om sulfathalterna. Även detta fodrar en systematisk genomgång av miljön i befintliga tunnlar. Om man fick ett bättre grepp om detta skulle man kunna anpassa sprutbetongen så att den bättre klarade den speciella miljön. I en del fall skulle det vara önskvärt att kunna använda ett annat cement än Cementas anläggningscement då detta är för långsamt. Denna rapport är huvudsakligen baserad på teoretiska resonemang. För att få en klarare bild om de verkliga förloppen behövs ett antal studiefall både av betong som är dålig och som är bra. Betongen och miljön behöver studeras i ett sammanhang bör att klara få fram vad som bestämmer sprutbetongs nedbrytning och livstid.”

Till ovan kan man tillägga att en vanlig observation är att tunn betong degraderas snabbare än ett tjockare (Ellison, 2012). Påståendet kan förefalla obestämbar. Men enligt författarens erfarenhet kan intrycket förstärkas när man ser tunn sprutbetong. Ofta ser man att den har synlig sprickbildning. På släta bergytor som blankslag krackelerar den tunna sprutbetongen och blir bom redan efter mycket kort tid. En annan faktor är frostsprängning av sprutbetong vid tunnelmynningar och bergslänter. Att tjock sprutbetong motstår frost bättre än tunn är att förvänta. Det var också tidigare vanligt att man sprutade tunnare betong på själva bergblocken och i synnerhet på blankslag. Detta eftersom sprutbetongen inte har bärande eller sammanbindande funktion där. Istället lade man mer betong i fördjupningarna mellan blocken för att bilda voter mellan dessa.

En sprutbetong kan anses vara förbrukad när den släpper från berget (Lagerblad, 2007). Han beräknar karbonatiseringsdjupet för en betong som applicerades på 60-talet till 12 mm. Lagerblad skriver också att hur karbonatisering påverkar betongens bindning till bergytan vet man inte.

Karbonatisering ger korrosion på armeringsstänger men anses inte orsaka korrosion på stålfibrer i sprutbetong. Lagerblad (2007) förklarar det med:

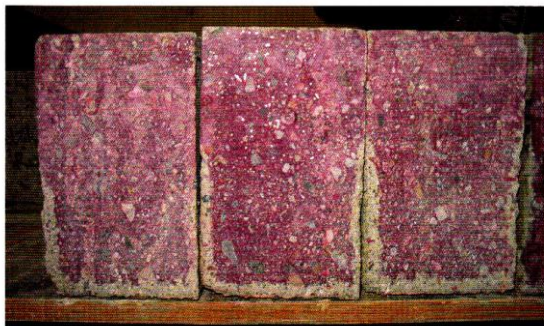
”Även om betongen är karbonatiserad så rostar inte stålfibrerna speciellt mycket, antagligen beroende på då fibrerna ligger spridda utan kontakt, så bildas ingen elektrisk cell. Dessutom kommer rostprodukterna inte, då fibrerna är så mycket mindre, att ge samma sprängkraft.”

Och beträffande sulfat:

”Normalt behöver man ganska höga halter av sulfat i vattnet för att det skall ge skada. När det gäller sprutbetongen och bindningen behövs det dock mindre eftersom sulfatreaktionen kommer att filtrera grundvattnet. Med tunna sprickor kan man även förvänta att en viss del av vattnet går åt sidan övergångszonen. Om så är fallet borde undersökas genom att se på utfällningar i övergångsfasen i bompartier.

Det stora problemet är antagligen om sulfathaltigt vatten penetrerar längs kontaktzonen eller penetrerar betongen. Detta kommer att leda till ettringit-bildning i kontaktzonen, vilket i sin tur leder till att bindningen mellan berg och betong släpper.”

Sprutbetongs degradering har studerats av Nordström (2005) och Thorsell och Nordström (2009). Undersökningarna är inriktade på stålfiberkorrosion när det uppstår sprickor i fiberarmerad betongen. Provunderlaget är 300 prover som exponerats vid Eugenia tunneln, vid Riksväg 40 vid Borås och Dalälven. Figur 20 visar prover som legat till hälften nedsänkta i strömmande vatten i Dalälven. Proverna har preparerats med fenofthalösning. Det ofärgade området indikerar karbonatisering. Undersökarna förkastar emellertid det och sluter sig till att det är urlakning av betong. Urlakningen har också lett till att residualhållfastheten (segheten) i betongen har sänkts.



Figur 20. Sprutbetongbalkar som har varit till hälften nedsänkta i strömmande vatten i Dalälven i 10 år. Det ljusa området längs provernas nedre delar indikerar karbonatisering men beror i det här fallet på urlakning. Fotot är från Thorsell och Nordström (2009).

Några sammanfattande slutsatser av Thorsell och Nordström (2009) är:

- Miljön för betongen ha stor betydelse. Omfattande korrosion förekommer redan efter fem års exponering för prover som legat vid Rv 40. Det antas bero på hög belastning från vägsalt. I Eugenia tunneln uppträder motsvarande korrosion efter 10 år
- Längre stålfibrer verkar korrodera mer än korta vid samma sprickvidd. En hypotes är att kvoten mellan anod- och katodarea är viktig

- Inverkan av sprickvidden verkar minska med tiden efter att korrosion har initierats.
- Prover som legat i 10 år strömmande vatten i Dalälven hade tappat mer residualhållfasthet än prover som legat i tunnel och väggkant. Som orsak anges vara urlakning från strömmande vatten.

Att en viss degradering har skett p.g.a. urlakning i strömmande vatten kan tolkas att det även kan ske av rinnande vatten längs sprutbetongväggar i bergtrum. Författarens intryck från Bolmen tunneln med 25-30 årig sprutbetong som utsatts för sakta rinnande insjövattnet, var att sprutbetongytorna var mjuka ca 5-10 mm från ytan. Intrycket baseras på tester med knivspets.

Stålfibrer

Stålfibrer används sedan 70-talet i sprutbetong för tunnlar för att skapa ett segt beteende hos betongen. Stålfibrer minskar även krympsprickor. Om betongen vid böjbelastning spricker är bärförmågan beroende av armeringens seghet residualhållfasthet. Fiberbetong för bergförstärkning har ersatt armering med varmvalsade armeringsnät och lösa armeringsstänger. Det finns olika typer av stålfibrer. I SFR användes två typer, E-E fibern med längden 18 mm med 1,0 volymsprocent och Dramixfibern med längden 30 mm med 0,8 volymsprocent (Martna och Jansson, 1986). Vid Clab etapp 2 föreskrevs fibrer med längd 30 mm och tjocklek 0,5 mm (Chang, 1988).

För att få bort vassa utstickande stålfibrer ur betongytan och skydda dem mot korrosion som bildar missfärgning av betongytan sprutas ofta ett 20 mm skikt utan fibrer. I trafiktunnlar används även fibrer av polymerer i täcksiktet. Avsikten med dessa är att minska termisk spjälkning vid brand.

In-situ provning av sprutbetong

Det vanliga sättet att undersöka sprutbetong in-situ är:

- Okulärbesiktning: Ger snabb översiktlig kontroll av eventuell sprickbildning, nedfall, fuktgenomslag och förändringar i större vattenläckage
- Bomknackning: Utförs för att undersöka om stora betongpartier har släppt från underlaget. Detta kan inträffa kort tid efter sprutning under betongens intensiva krympning. Vid bomknackning slår man lätt med en hammare på sprutbetongytan. Om betongen inte har kontakt med berget uppstår ett ihålligt ljud. Bomma ytor uppstår ofta på bergpartier med släta ytor s.k. blankslag. Betongen kan där krympa utan den valvverkan som erhålls av ojämna bergytor. Även bergytor som själva är bomma eller har mjuk beläggning t.ex. lera ger bomljud vid bomknackning.
- Tjockleksprovning: Utförs med handhållen slagbormmaskin
- Friborrade kärnor: Kan borrar för att undersöka vidhäftning mot berg eller mellan sprutbetongytor. Provetts största värde är att det kan bekräfta att vidhäftning har uppnåtts och därigenom att betongen inte är utförd på ned-

smutsade ytor. Provingen visar vidhäftning i en punkt vilket gör att man ska göra det vid många punkter för att den ska vara representativ. Eftersom provet bara kan göras en gång vid samma punkt kan man inte heller avgöra om det har skett en förändring av vidhäftning med tiden. Provtagningen är omständlig och antalet prover blir därför litet. Ofta följer det med bitar av berg och det försvårar utvärderingen av vidhäftning.

Nordström (2005) beskriver även ett sätt att få ut fibrer ur fiberarmerad sprutbetong för analys. Metoden går ut på att provernas porer vattenfylls genom vakumbehandling varefter proverna utsätts för frysning och uppvärmning tills proverna har fryst till betonggrus med fibrer. Fibrerna kan sedan plockas ut med magnet för korrosionsanalys.

Sprutbetong i Clab och SFR

Undersökningar av ingjutna fibrer i SFR har inte visat på korrosion (Lundin, 2011).

I uppsprucken betong kan fiberkorrosion uppstå. Om sprickans längd längs betongytan är kort och har uppstått p.g.a. betongens krympning så har fiberkorrosionen liten betydelse. Även om fibrerna har korroderat på kort djup in i sprutbetongen så finns det kvar residualhållfasthet. Om sprickan har uppstått av last från berget som orsakat utböjning i betongen, så nedsätter fiberkorrosionen självklart betongens lastupptagningsförmåga.

Vidhäftningskravet i Clab och SFR är 0,1 MPa. Det är ett lågt krav jämfört med andra anläggningar där det ofta krävs värden mellan 0,3 och 0,5 MPa. Men vidhäftningshållfasthetens värde är mindre viktig för betongskikten som är förstärkta med stålfibrer och som samverkar med bergbultarna samt genom den valvvekan som uppstår av den alltid ojämna bergkonturen. Det viktiga är att det finns sammanhängande stora ytor som har vidhäftning. Vidhäftningskraven började formuleras på slutet av 70-talet. Då användes vidhäftning vid överslagsberäkningar av bärförmåga för tunn, 30 mm, oarmerad sprutbetong.

Av bergkontrollgruppen för SFR (Stephansson, 2011) redovisas undersökning av sprutbetong. Se tabell 1.

Tabell 1. Sprutbetongkontroll från SFR. Undersökningsresultat (Stephansson, 2011).

Undersökning	Uppmätt	Krav
Vidhäftning	0,65 MPa	0,1 MPa
Tryckhållfasthet	47,5 – 69,6 MPa	28 MPa
Vatteninträngning	3-35 mm	Krav 60 mm
Karbonatiseringsdjup	6,5- 52 mm	Inga krav
Sulfathalt	0,4 %	Inga krav
Korrosion	Ingen korrosion av fibrer observerades i proverna	
Kloridhalt	Det finns en anrikning av klorid från inträngande vatten men ingen skillnad har inträffat sedan 2001.	

Variationerna i vidhäftningsvärdet ligger mellan 0,1 och 1,2 MPa (Stephanson, 2011). Även variationen i karbonatisering och vatteninträngning är stora. Provtagningsmetodens svaghet är att den bara ger små kärnor och med litet antal. Den är vidare känslig för hur man väljer punkterna för provtagning.

Vid test av prover som varit delvis nedsänkta i strömmande vatten i Dalälven fick dessa samma färg som vid karbonatisering. Se figur 20. Men att det är karbonatisering har avfärdats av undersökarna. Man anser att effekten beror på urlakning (Thorsell och Norström, 2009). Om testerna av karbonatisering av prover från SFR i Tabell 1 är utförda med fenofalösning finns risk för förväxling mellan karbonatisering och urlakning.

Om vattnet rinner mellan betongen och bergytan i sprickor (kanaler) så belastar vattnet betongen endast området vid sprickorna, en relativt liten del av betongytan. Ett annat förhållande kan antas uppstå när betongen sprutas mot sprick- och lerzoner. Här kan vattnet penetrera en yta av sprutbetongen. Som visats ovan från prover i strömmande vatten kan en urlakningsprocess inträffa i sprutbetongen med minskad residualhållfasthet följd.

I områden med mycket vatten på sprutbetongen så finns risken att betongen kan vara sämre. Urlakning kan ha skett redan tiden för utförandet. Provtagning från sådana områden kan ge svar hur degraderingen påverkas av rinnande vatten bakom betongen. Samtidigt kan det i lerzoner även bildas ökad last mot betongen.

8. Dräner

Ett antal typer av dräner har funnits i modern tid i form av t.ex. slangar, trattar och plåtar som monteras till läckagepunkten. Numera används mattor av cellplast sprutade eller icke-sprutade med sprutbetong. Avsikten med dräner är:

- Att vid byggnadsstadiet avleda vatten för att kunna få utföra sprutbetongen
- Att efter uppförandet av sprutbetong kunna avleda vatten från att droppa in i anläggningen.

Problemen med dränerna är många och dessutom finns det många olika typer som har tillämpats genom åren. Ett gemensamt uppmärksammat problem är att dränerna kan sätta igen sig av avlagringar som t.ex. utfällningar av järn, mangan- och kalcium. Dränerna kan även sättas igen av nedrasat eller suspenderat material från berget. Vid översprutning av dräner med sprutbetong kan betong tränga in bakom dränmattan och bidra till igensättning (Ekliden, 2008). Vattnet finner då nya vägar in i anläggningen ofta vid sidan av dränen.

Degradering av dräner brukar inte kopplas ihop med degradering av systemet med berg och bergförstärkningar. Dräners livslängd förutsätts vara relativt kort, högst 40 år enligt Lindblom (2012). Det antagande torde baseras på dränmattor av cellplast, PE skum, som är vanliga idag. Under denna tid kan det emellertid krävas insatser i form av underhåll som renspolning.

9. Inklädnad med tunnelduk

Inklädnad med tunnelduk (lining) skapar en miljö utan vattendropp inne i anläggningen. Liningen kan bestå av s.k. tunnelduk av PVC. Miljön för polymerer är gynnsam i ett bergrum utan solljus och med jämn temperatur. Det är därför att förvänta att degraderingen sker långsamt. Andra material som polyeten har ännu bättre motstånd mot nedbrytning i aggressiva miljöer. Emellertid förbättrar inte sådan tunnelduk förutsättningarna för bergrummens stabilitet eller livslängd. Tvärtom, ju oftare den byts ut eller repareras, ju fler inspektionstillfällen uppstår av bergväggarna. Och därmed möjlighet att upptäcka eventuella förändringar som nedfall av sprutbetong bom sprutbetong eller sprickbildning i den.

Inklädnad med tunnelduk i SFR

Liningen i silon och BMA-berggrummet i SFR består av s.k. tunnelduk av PVC, se figur 21. Livslängden prognosticeras av tillverkaren Giersten Tunnel AS till minimum 50 år. I den allmänna kvalitetsomsorgen som omgärdar anläggningar som SFR kan man ha synpunkter på dukens livslängd. Den är som nämnts mindre viktig eftersom man enligt programmet för undersökning av sprutbetong – skall bomknacka vart 10:e år. Det kan inte utföras utan att tunnelduken monteras ner. Vid dessa tillfällen finns möjlighet att ersätta eventuell degraderad duk.



Figur 21. Tunnelduk i SFR skapar en torr och ljus miljö (Foto:<http://www.skb.se>).

Enligt Tunnel 2004 krävs för trafiktunnlar, citat:

”Bärande huvudsystem och inredning skall normalt kunna inspekteras på handnära avstånd...

För att möjliggöra inspektion bör minst 0,5 m fritt utrymme finnas...

Om det bärande huvudsystemet utgörs av berg och 0,5 m fritt utrymme inte uppnås eller handnära inspektion av annat skäl inte är möjlig, till exempel ovanför innertak, skall konstruktionen utformas så att fjärrinspektion kan utföras och inklädnaden utformas lätt demonterbar. De vid detta utförande ökade drifts- och underhållskostnaderna skall utredas och värderas...

Inspektion av mot bergyta motgjuten inklädnad eller tätt anslutande insprutad drän anses ge tillräcklig information om tillstånd hos bakomliggande bärande huvudsystem...

Principer för hur inspektion skall utföras skall vara angivna i den tekniska beskrivningen.”

Man kan konstatera att Tunnel 2004 stora möjligheter till godtycke för att utföra inspektion. För det talar att kostnadsanalyser kan införas som en parameter för inspektionsbehovet.

En fråga är om tunnelduken bidrar till degradering av bergförstärkningarna som ligger bakom? I utrymmet mellan duk och sprutbetong försämras ventilationen längs bergväggarna. Där ökar fuktigheten och sannolikt tillväxt av bakterier. Klimatet i utrymmet mellan duk och sprutbetong blir förmodligen tämligen statistiskt p.g.a. utebliven ventilation. Författarens slutsats är att det nu inte finns något som tyder på att tunnelduken skulle påverka livslängd vare sig hos berg, eller bergförstärkningarna. Av undersökningar av sprutbetong som utförts av Nordström (2005) och Thorsell och Nordström (2009) framgår att det är svårt att dra långtgående slutsatser från prover under 10 år även om de har exponerats för vitt skilda miljöer.

En ytterligare fråga är om karbonatisering av betongen kan öka med fuktigare luft bakom duken. Temperaturen i SFR var ca 15°C och luftfuktigheten beskrevs som närmast 95-100% (Stephansson, 2011). Förändringar i miljön mellan duk och sprutbetong förefaller vara obetydlig. Vattnet fortsätter att rinna ungefär som förr längs sprutbetongytorna. Stora läckage rinner vidare. Små kan avstanna och nya kan tillkomma. Tidigare förekom det utan duk viss variation av miljön mot sprutbetongen genom ventilation. Den kunde torka ut vissa fuktfläckar. Skillnaden mellan förhållandena med duk och utan är små. Det förefaller svårt, att inom den närmaste framtiden komma fram till ett svar som baseras på undersökningar om duken kan påverka sprutbetongen.

I tunnelduken i SFR finns nu ca 20 st tittgluggar. De kan öppnas för man skall kunna se ut mot sprutbetongen. Men en nära okulärbesiktning kan bara utföras vid själva gluggen. Eventuell sprickbildning mellan gluggarna, som sitter ganska glest längs med väggarna och taket, kan inte ses. Det är möjligt att i golvnivå gå i utrymmet mellan berget och tunnelduken. Bergrummets botten och kanske någon meter upp blir fortsatt besiktningbara med avseende på sprickbildning.

Tunneldukens nackdel är att det är ett hot mot tillsyn av bergrummets väggar och tak. Betongytorna avskämmas från vardagsobservationer som man annars kan få genom att vistas i anläggningen.

I perspektivet krav på förlängd livslängd för anläggningen borde man ställa frågan om det inte hade varit bättre att renovera bergrummet. Detta hade kunnat göras med ett relativt tjockt skikt av sprutbetong. Svåra läckage hade kunnat efterinjekteras före den nya sprutbetongen, se kapitel ”Läckande injekteringshål – Ett systematiskt byggfel”. Alternativt hade dessa kunnat dräneras tillfälligt för att kunna utföra sprutbetongen. Varefter läckagen hade relativt lätt kunnat tätas. I allt väsentligt är detta känd och tillämplig teknik. En renovering baserat på tjockare sprutbetong hade kunnat utföras så att vattendropp hade eliminerats helt. Med flera skikt kan man undvika att lokala inhomogeniteter bildar en genomgående porös betong. Man hade kunnat flytta fram den tekniska livslängden i ett tidsperspektiv som sträcker sig längre än vad som är möjligt att överblicka med det nuvarande konceptet – tunn sprutbetong – som läcker igenom vatten på ett okontrollerat sätt.

Utfällningar i SFR

Vid besök i anläggningen i SFR hösten 2012 konstaterades stora mängder utfällningar som samlades i hängrännor som leder vatten från tunnelduken. Det ligger nära till hands att undra över vad som är källan till utfällningarna. Den första tanken är kalkurlakning från sprutbetong. Kalcitutfällningar är en vanlig syn på sprutbetongytor. Kalken i vattnet faller ut när den kommer i kontakt med luft. Att kalkurlakning även sker ur bergsprickor kan man också påträffa i gamla anläggningar. Men som regel är dessa små i jämförelse med utfällningar på sprutbetong. En stor kalkkälla runt anläggningen är injekteringscement. Dessutom kan vatten innehålla utfällningsprodukter innan det når området vid berggrummet.

Söderman (1997) skriver:

”Rent mjukt vatten kan lösa avsevärda mängder kalciumhydroxid, upp till 1,65 g/l vid 20°C. Vatten som strömmar genom otät betong eller genom sprickor kan därför gradvis lösa ut den kalciumhydroxid som bildats vid cementreaktionen. Kalkurlakningen kan medföra hållfasthetsförluster.”

Att kalkurlakning ur sprutbetong kan leda till hållfasthetsförluster är en del i urlakningsprocessen av sprutbetong. Andra tänkbara effekter kan vara:

- Att om källan är bergsprickor så skulle det kunna innebära att bergblock någonstans kan förlora friktion och kohesion samtidigt som vatten blir smörjmedel i de urlakade sprickorna. Urlakade bergsprickor borde leda till större punktläckage
- Om det är injekteringscement som lakas ut. Då borde inläckaget öka med tiden.

Att sprutbetong degraderas har förutsatts i antaganden om förlängning av anläggningarnas livstid. Om det är huvudsakligen kalkurlakning i hängrännorna så väcker de frågor för att de är så påtagligt stora mängder. Vad är det som urlakas? Är det lokala urlakningar? Kan man ta prover från dessa områden?

10. Nedfall och ras

Med tanke på den stora volym berganläggningar som byggts i landet och få dokumenterade ras kan man konkludera att berganläggningarna har en mycket hög säkerhet mot ras. Med olyckor i berganläggningar i drift tänker man kanske i första hand på nedfall av berg. Ordet nedfall i bergsammanhang uppfattas som en diminutiv form av ras. Ett ras kan börja med nedfall av sten och block.

Utöver nedfall och ras är brand en annan form av svår olycka. Brandrisken började på allvar uppmärksammas efter en svår brand i en vägtunnel i alperna under 1999 (Mont Blanc-tunneln mellan Frankrike och Italien). Kravet att konstruera mot brand har ökat med den stora infrastruktur utbyggnaden av tunnlar. Riskerna med brand är bl.a. att bergförstärkningarna havererar vid de höga temperaturerna som kan bli, över 1100°C. Det gör att räddningsinsatser kan bli omöjliga att utföra under branden.

Graversfors tunnlarna (Sverige)

Inklädnad (lining) av berggrums tak är inget nytt. Det har varit vanligt med skyddstak mot vattendropp och nedfall av sten i skyddsrum i berg och tunnlar. Lining väcker emellertid blandade känslor hos bergtekniker. Den grundas på att möjligheten att inspektera tunnelns väggar och tak försvinner eller i varje fall reduceras kraftigt. Det finns ett visst berättigande för denna oro. Som exempel kan nämnas renovering av Graversfors tunnlarna, järnvägen mellan Katrineholm och Åby där man upptäckte man att ett stort stenblock hade glidit ner på liningen av 10 cm armerad sprutbetong. Blocket hade dock fångats upp mellan den kraftiga liningen och berget. Berget hade inte inspekterats sedan liningen uppfördes för femtio år sedan i början på 60-talet.

Hanekleivtunneln (Norge)

Juldagen 2006 skedde ett ras i Hanekleivtunneln, E18 i Norge. Ett ca 25 m långt område från tunneltaket rasade genom tunnelns lining av betongelement och ner på vägbanan. Raset kom tio år efter att tunneln hade byggts, se figur 22.



Figur 22. Raset i Hanekleivtunneln, E18 i Norge, hände 10 år efter att tunneln togs i bruk. Rasmassorna från det 25 m långa raset trycktes genom sprutbetongen och vidare genom liningen. Vid tiden för byggnation hade sprickbildning observerats i sprutbetongen. Den kompletterande förstärkningen blev dock otillräcklig. Foto från skadeutredningen Bollingmo m.fl. 2006).

Huvudorsakerna till raset beskrivs i skadeutredningen (Bollingmo m.fl., 2006)

”Den direkte årsaken til raset var en svakhetssone (forkastning) med delvis omvandlet og forvitret bergart, infisert av svelleleire, som etter hvert ga et så stort trykk mot sikringskonstruksjonen at den brøt sammen. Dette kan ha foregått som en gradvis prosess, men nedfallet av det vesentlige av rasmassen skjedde trolig brått...

Rassonen ble registrert under drivingen, og dessuten vurdert på et senere tidspunkt da man oppdaget sprekker i sprøytebetongen. Det ble ved denne anledningen foretatt tilleggs sikring. Sonen ble derfor ikke oversett, men behovet for permanent sikring ble undervurdert.”

Svälltrycket från lera i Hanekleivtunneln var 0,15 - 0,18 MPa. Svällningen ger en typisk volymökning på ca 140- 150%.

Skadeutredningen kom fram till att bergkompetensen hos byggherrens organisation var dålig. Vid byggstadiet var existensen av svällande lera känd. Man hade även observerat att sprutbetongen hade spruckit. Men den permanenta förstärkningar som skulle säkra området dimensionerades fel.

Den fylliga skaderapporten ger en inblick i modern tunnelbyggnation i Norge. Efter flera stora ras är medvetenheten om riskerna stor och regelverket digert. Skadeutredarna konstaterar slutligen att det alltmer ökande regelverket kan bli ottydligt:

”Et tankekors kan være at mengden av interne retningslinjer, prosedyrer, håndbøker etc. er blitt så stor, at det kan være vanskelig for aktørene å bevare oversikten. I tillegg er det en rekke andre offentlige lover, forskrifter og andre pålegg å forholde seg til. Ofte er det dessuten slik at samme tema er behandlet flere steder, og alt dette gjør at det kan være problematisk å ikke "trå feil" og dermed bryte noen av påleggene. Dette er for øvrig noe som gjelder hele bygge- og anleggsbransjen.”

Bolmentunneln (Sverige)

Bolmentunneln är en ca 80 km lång vattentunnel från sjön Bolmen till Äktaboda i Skåne. Tunneln togs i bruk 1987. Flera ras har skett i tunneln med det lilla tvärsnittet som varierar omkring 2,8 x 2,8 m. Redan innan tunneln togs i bruk hade tunneln rasat. Ett ras skedde 1995 när tunneln var i drift. År 2008 rasade tunneln igen (Ellison m.fl., 2010). Figur 23 visar raset som täckte hela tunnelarean.



Figur 23. Raset 2008 i Bolmentunneln skedde i ett område där tunneln hade förstärkts med närtarmerad sprutbetong. (Foto: Bogdanoff 2009).

Efter att raset hade reparerats besiktigades ca 50 km av tunneln samt nio av det 400-500 m långa accesstunnlarna. Ytterligare ett ras som blockerade tunneln hittades några kilometer från det första. Här hade raset skett i ett område som var förstärkt med 75 mm sprutbetong, närtarmering, lösa slaka armeringsjärn och förbultning (spiling). Raset hade skett genom två, ca 1 m² stora hål i betongen.

Utöver de två rasen som hade fyllt hela tunneln påträffades flera begynnande ras.

Orsaken till rasen är övervägande svällande lera, Smektit. Kännetecknande för svällande leror är att det börjar svälla när det exponeras för vatten eller fukt. Svälltrycket i leror från Bolmentunneln hade vid raset 1995 bestämts kunna uppgå till 0,5 MPa, men var generellt lägre. Höga svälltryck kan bli ca 2 MPa (Bollingmo m.fl., 2006). Svälltrycket kan således bli flerfalt större än sprutbetongens vidhäftning mot berget.

Ett sannolikt rasförlopp i Bolmentunneln. Se figur 22 kan beskrivas ske enligt:

- Svälltrycket trycker loss betongen från bergytan.
- Betongen böjs inåt mot tunneln. Ett böjbrott inträffar i betongen
- Berget börjar sakta kalva ut. Efter varje nytt litet nedfall sugs nytt vatten in i lerzonen. Processen upprepas. Efter hand som kratern ökar så fortskrider processen allt snabbare
- Raset upphör när det inte finns mer plats för rasmassorna.

Det andra raset som hade skett ganska små hål i betongen kan ha berott på att betongen har degraderats lokalt.

Att det kan vara svårt att upptäcka en zon med svällande lera kunde konstateras i en nedfartstunnel. En omvandlingsprocess av berg hade startat långt nere på tunnelväggen. Berget i en sprickzon omvandlades till en blandning av grus, sand och lera. Vid tiden för tunneldrivningen hade man haft ett ras i den motsatta tunnelväggen. Endast någon meter därifrån. Trots omfattande reparationer, och säkerligen med assistans av geolog, hade man inte upptäckt zonen som nu, decennier senare sakta höll på att bildas till ett ras.

Den geologiska karteringen som utfördes när Bolmentunneln byggdes är föredömlig. Förekomst av svällande lera finns inlagda där man konstaterat det. Men svällande lera i en torr tunnel kan vara mycket svår att upptäcka. Som konsekvens fanns de flesta tillbud som upptäcktes 2010 i Bolmentunneln med svällande lera inte med i karteringarna. Att sprickzoner med lera ofta är torra när de friläggs vid sprängning är vanligt. Det är även vanligt att vatten kan småningom börjar tränga ut ur leran. Processen kan vara mer eller mindre långsam beroende på hur tät leran är.

Bland erfarenheterna från Bolmentunneln var att de begynnande rasen kunde finnas långt ner på bergväggen. Detta hade även observerats vid raset 1995. Att ras kan börja vid golvnivå kan underlättas av att sprutbetongens kontinuitet bryts där.

Svårförklarat var varför det hade bildats hål rakt igenom kraftigt förstärkt sprutbetong. Flera sådana hål konstaterades vid besiktningarna. En välkänd orsak till varför sprutbetong kan tryckas ut efter att det har förts direkt på zon med svällande lera är att betongen inte har elasticitet för svällningstryck från bergsidan. Andra orsaker kan vara att hål har bildats redan från början i den färska betongen. Hålet har sedan lakats ut. Sprutbetongen och injekteringsbruket i Bolmen tunneln var utförd med cement som inte var sulfatbeständig. Om detta har inverkat kan man i nuläget bara spekulera över.

Slutsatser från erfarenheter av ras

Problematiken med svällande lera är väl känd i tunnelbyggnation. Den beskrivs av Selmer-Olsen m.fl. (1989). Artikelnen beskriver fyra ras. Ett av rasen skedde i en järnvägstunnel i granit i södra Norge. Området var kraftigt förstärkt med platsgjutna betongbågar (lining). En dag, 8 år efter att tunneln tagits i bruk uppstod sprickbildning i linningen, läckaget upphörde. Nästa dag rasade tunneln.

Gemensamt för många av rasen är att det har funnits zoner med svällande lera. Även förekomst av breccia (ett konglomerat där mjukt bergmaterial omger kantiga stenar) är ofta nämnd. Lerzoner i någon form verkar alltid finnas i rasområdet.

Raskratrarna i Bolmen var förhållandevis torra. Vid Hanekleivtunneln nämns att det fanns lite dropp innan på platserna där raset uppstod men raskratern av torr.

Att berget vid rasområdena i Bolmen var kraftigt förstärkta beror givetvis på att man befann sig i en svaghetzon. Man förstärkte, men inte med tillräcklig kraftig bergförstärkning och inte tillräckligt utanför rasområdena.

I Hanekleivtunneln visste man om att man befann sig i ett område med svällande lera. Efter man hade sett sprickbildning i sprutbetongen förstärkte man ytterligare. Men det räckte inte till.

Ras inleds med sprickbildning i sprutbetong. Efter att man tagit tunneln i bruk är sprickbildning i sprutbetong det enda sättet att upptäcka ett begynnande ras. Tiden för processen med svällande lera kan knappast beräknas. I en tunnel kan svällnings-

processen starta när bergmaterialet exponeras för fukt eller vatten. Men det kan ta decennier innan det utvecklas till ras.

Orsaken till ras är att det uppstår en oväntad stor last från berget. Lastökningen beror på degradering av berg eller i bergets sprickor.

En sammanfattande bedömning är att om man gör riskanalyser med avseende på rasrisker i berganläggningar i drift. Då borde analyserna inledningsvis koncentreras på att sammanställa svaghetszoner från relationshandlingar från byggtiden. Interjuver av personer som deltagit i tunnelarbetet kan ge information om förhållanden som kan ha blivit ottydliga i relationshandlingarna. Därefter kan man följa upp med provtagning av sprutbetong och lerprover och vidare kontroll av säkerhetsfaktor i beräkningsprogram.

Svällande leror samt icke-sulfatbeständig cement i Clab och SFR

Svällande leror är vanliga i svensk berggrund. Smektit förekommer i SFR åtminstone i begränsad omfattning. Christiansson (1986) nämner:

”Smektit förekommer i vissa prover som blandskikt men att risk för svällande leror bedöms inte föreligga.”

Var dessa förekommer är dock inte tydligt.

Även från Clab etapp 2 anges (Berglund, 2001) att svällande lera finns med

”begränsade svällningsegenskaper”

Även standardcement som inte är sulfatbeständig har använts i sprutbetong i SFR. Martna och Jansson (1986) nämner att:

”Till största delen har Degerhamn Anläggningscement kommit till användning i sprutbetongen. I några fall har dock Slite standardcement använts till första påslaget närmast berget. I motsats till Degerhamn Anläggningscement är Slite standardcement betydligt mindre resistent mot sulfatskador eller alkali-kiselsyrereaktionen.”

Det är svårt att veta mer om hur och var standardcementet användes i sprutbetong i SFR och än mindre om det har degraderat. Man kan spekulera i att det var i torrspurtad betong som det användes för driftförstärkning. Efter att man passerat dessa zoner som har driftförstärkts har man sannolikt sprutad över driftförstärkningen med våtsprutad betong med sulfatbeständig cement. En sulfatreaktion skulle då, teoretiskt kunna få sprutbetong med driftförstärkningar att svälla och lakas ur. Med följd att den våtsprutade sprutbetongen utsätts för ökat last.

Om det på samma ställe finns svällande lera så skulle den kunna mobilisera ett ökat och högt tryck mot sprutbetongen med sprickbildning som följs av utfall för att övergå till ras. Det hör till sakens natur att driftförstärkning utförs av ett område som har så dåligt berg att man inte kan arbeta i området innan berget har förstärkts. Till sådana hör t.ex. zoner med lera, vittrat berg eller zoner med hög spricktäthet.

SH cement har i SFR använts vid injektering av drifttunneln till SFR (Christiansson, 1985).

11. Slutsatser

Inne i berganläggningarna SFR och Clab uppstår miljörelaterade processer och skador på betong och stål. Skadorna beror väsentligen på inläckage av vatten. Orsaken till inläckage i SFR och Clab är konceptet med tunn sprutbetong. Bergrummen är inte konstruerade med tanke på att de skall bli täta mot inläckage. Barriären mot inläckage förutsätts ske genom injektering av bergmassans spricksystem. Men injekteringen blir oftast inte en tät barriär. Det finns många orsaker till det. En sannolik orsak är att injekteringshål, i synnerhet de som har borrats neråt längs bergrummens väggar har kraftiga läckage.

I SFR har inläckaget minskat stadigt fram till 2011. Trenden för minskande inläckage är bruten. En ökning av inläckaget har skett under det senaste året. Även i Clab har läckaget ökat under senare tid. Vid de mycket förlängda tidsperspektiven på drifttid som ställs på bergrummen måste man utreda orsaker till läckageökningar när det uppstår. Orsak till läckageökningar kan vara att injekteringar brister. Detta bedöms ske först i redan stora läckagekanaler som injekteringshål. Om det är det som är orsaken till läckageökningar måste man utforma gränsvärden för åtgärder. Arbetet att kartlägga läckagen i bergrummens tak, väggar och golv samt utreda konsekvenser av dessa tar lång tid. Även om man vid byggnationen strävade efter täta bergrum så ingår inte bergets täthet mot inläckage som en parameter för bergrummens funktion eller livslängd. Dessa omständigheter medför att det i varje fall inledningsvis finns utrymme för varierande synpunkter från olika håll hur inläckaget kan komma att påverka behovet av framtida åtgärder. Men när inläckagen fortsätter att öka kan man inte låta det ske utan att utveckla hur man skall förhålla sig till dessa.

Det primära sättet att detektera inläckagets storlek är genom att mäta vatten som pumpas upp ur bergrummen. Vid SFR och Clab kan man rikta anmärkningar mot att man har haft dålig kontroll på inläckaget. Som den utförts – genom att mäta gångtider hos pumpar har man en dåligt underbyggt historik över läckagets variationer. När inläckaget ökar så uppstår i ett längre tidsperspektiv också behov att lokalisera större läckage till sina källor i bergkonturerna. Vid en eventuell framtida renovering som innefattar bergtätning blir den informationen viktig för åtgärder och kvalitetsbedömningar av utförda arbeten. För att åtgärda måste man veta var läckagen finns.

Bergbultar ingjutna i cementbruk bedöms stå emot degradering även sett i ett tidsperspektiv som sträcker över bergrummens nu antagna driftstider. Bergbultar kan dock så småningom utsättas för lindrig korrosion som sker vid området intill bergytan. Tillståndskontroller av bergbultar med nuvarande akustiska metod med Boltometer är inte särskilt meningsfulla. Metoden detekterar inte fel i bultbruket, eller korrosion, där de kan förväntas uppstå vid området nära bergytan. Risken för urlakning av cementbruk runt bultar långt in i hålet är mycket liten. Om man avser att kontrollera bultar i konstruktionerna d.v.s. andra än referensbultar med Boltometer bör man ha i åtanke att ett litet antal bultar redan har defekter i bruket långt inne i bulthål.

Undersökningar av bergbultar bör koncentreras till området vid sprutbetongen och bergkonturen. Det är känt att läckage ofta förekommer vid bulthål. Förutom dropp till i bergrummen kan läckage vid bulthål degradera sprutbetong som omsluter bultarna. Försämrade samverkan mellan bergbultar och sprutbetong är en följd av det. Senare när den alkaliska miljön har avtagit kan man förvänta att korrosion kan få betydelse, om syrehalten i vattnet tillåter detta.

I hängränorna i SFR och som leder vatten från tunnelduken synliggörs nu stora mängder utfällningar. Man bör utreda om det är sprutbetong eller injekteringscement som lakas ur på kalk. Urlakning av kalk medför nedsättning av hållfastheten hos betong. Om det är sprutbetong som urlakas måste man försöka lokalisera var det sker. Man bör även analysera prover från sådana områden.

Provtagning in-situ från sprutbetong utförs genom att borra ur små kärnor. Resultatet från små prover kan bli slumpartad och ger dålig överblick av degraderingsförlopp. Ett mer informativt resultat skulle kunna fås om man sågade ur större prover ur sprutbetong. Detta skulle företrädesvis ske från områden med läckage där sprutbetongen kapslar in svaghetszoner i berget.

Det bör klargöras om testerna som redovisar karbonatisering kan förväxlas med urlakning.

I SFR borde man utreda var icke sulfatbeständig SH-cement har använts i sprutbetong. Därefter följa upp med provtagning för att undersöka degradering från sulfatangrepp.

Vidhäftningskravet för sprutbetong är relativt lågt. Det är svårt att göra värderingar för kravets betydelse för betongens funktion. Om sprutbetongen inte är bom kan man anta att den har tillräcklig vidhäftning, och att den ligger över kravet. Om bomljud uppstår i gammal sprutbetong så tolkas det som att den har förlorat sin vidhäftning och att sprutbetongen kan vara förbrukad där. Vid de hittills relativt korta tider som bergrummen SFR och Clab varit i drift har man inte påträffat nytillkomna ytor med bom sprutbetong. Men vid längre tidsrymder kan degradering resultera i bomljud. Det är inte känt hur karbonatisering påverkar sprutbetongs vidhäftning mot berg. Det borde utredas.

Inklädnad med tunnelduk ger en god miljö inne i rummet. Men man förlorar möjlighet till nära besiktning av stora ytor med sprutbetong. En framtida risk med tunnelduk bedöms vara att man med tiden invaggas i tron att besiktningar av sprutbetongytor blir allt mindre nödvändiga. Men i de alltmer åldrande anläggningarna måste man utgå ifrån att behovet istället kommer att öka med tiden.

Med de långa tidsrymder som kan bli aktuella för bergrummen bör man istället för tunnelduk, utarbeta program för renovering av de gamla bergrummen. Det kan utföras med idag känd och tillämpad teknik.

12. Referenser

- AMA Anläggning 07. *Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten*. Svensk Byggtjänst. ISBN: 9789173332682, 2008.
- Berglund, J. *CLAB etapp 2 Byggnadsgeologisk dokumentation*. Uppdragsgivare: Svensk Kärnbränslehantering AB, Uppdrag nr 1184800.
- Blair & Minchington, *On the damage zone in tunnel blasting*. FRAGBLAST -5 Montreal 1996, page 177-185.
- Bodén, A. *CLAB etapp 2, Bergarbeten, Slutdokumentation, Sammanfattning och allmänna erfarenheter*. Svensk Kärnbränslehantering AB, Rapportnummer: 0519001-044, 2002.
- Bodén & Berglund. *CLAB etapp 2, Byggnadsgeologisk Dokumentation*. Uppdragsgivare: Svensk Kärnbränslehantering AB Rapportnummer: 0519001-045 Uppdrag nr 1184800 27 8; 2001.
- Bogdanoff, I, Sandström, B, Engström, R, 2012. *Ny metod för tätning av injektions- och bulthål i tunnlar*. Bergmekanikdagen 2012.
- Bogdanoff, I. *Vibrationsnivå intill sprängämnen vid tunneldrivning*. Temadag trafikmark- och byggnadsvibrationer. Kungl. Tekniska Högskolan, Skandinaviska Vibrationsföreningen, 2002.
- Bogdanoff, I. *Efterinjektering av sprutbetongtäckta bergväggar i stora bergrum*. 4th Nordic rock grouting symposium, 2001.
- Bogdanoff, I. *Vibration measurements in the damage zone in tunnel blasting*. FRAGBLAST -5 Montreal 1996.
- Bogdanoff, I. *Fintätning av berg, Inträngningsförsök i smala spalter och sand med polyuretanprodukt och injekteringscement*. Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för Geoteknik med grundläggning, Rapport B 90:1, 1990.
- Bollingmo, P m.fl. *Raset i Hanekleivtunnelen 25 desember 2006, Rapport fra undersøkelsesgruppen*. Ingeniørgeolog Per Bollingmo, MULTICONSULT AS, Professor Bjørn Nilsen, NTNU Institutt for geologi og bergteknikk, Avdelingsdirektør Øystein Nordgulen, Norges geologiske, undersøkelse (NGU).
- Chang, Y. *Bergentreprenad, Dimensionering av typförstärkning*, Projekt PM Clab etapp 2, dok nr 98-3450-22, 1986.
- Christiansson, R. *Byggnadsgeologisk uppföljning. Sammanställning av delrapporter SKB*, Arbetsrapport SFR 85-04.1985.
- Ekenbro, B. *Utveckling av oförstörande testmetod för ingjutna bergbultar*. Dokument SBUF 12545, 2012.
- Ekliden, J. *Igensättning av dräner*. Göteborgs Universitet, avd. för Geologi, B543, ISSN 1400-3821, 2008.

- Ellison, T. Personlig kommunikation dec 2012.
- Ellison, Bogdanoff, Lundqvist, *Åtgärder efter ras i Bolmentunneln*. Bergmekanikdagen 2010.
- Eriksson, M & Stille, H. *Cementinjektering i hårt berg*. SveBeFo rapport K22, ISBN 91-631-6632-1, 2005.
- Geodynamik AB. *Boltometer 11, Users Manual*, No: BO 011-1.1988.
- Holmberg, R & Persson, PA. *Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage*. 1979.
- Jonsson, H. *SFR Kontrollprogram. Bergkontroll. Bergkontrollgruppens årsrapport, 2012*. NE-EC 685. X. 2013.
- Jönsson, S. *SFR - Registrering av grundvattentryck under 2011*. Geosigma AB Uppsala, 2012.
- Lagerblad, B. *Livslängdsbedömning av sprutbetong i tunnlar*. Cement och betong Institutet och KTH. 2007.
- Larsson, PA. (bergarbetare). Personlig kommunikation 2013.
- Lindblom, U. *Underhåll av berganläggningar, Etapp 2*. SBUF Utvecklingsprojekt 11844. Slutrapport mars 2009.
- Lindblom, U. *Underhållskostnader för bergtunnlar i ett livslängdsperspektiv*. FoU – Väst 2012, ISSN 1402-7410. 2012.
- Lindén, Bogdanoff, Magnusson. *Vattentätande tillsatsmedel i sprutbetong i motorvägstunnlar*. Bergmekanikdagen 2011.
- Lundin, J. *SFR KONTROLLPROGRAM, Bergkontroll, Bergkontrollgruppens årsrapport 2011. Huvudrapport*. AE-NCS 12-005. 2012-03-01. 2011.
- Lundin, J. *SFR Kontrollprogram Bergkontroll, Boltometerundersökning av referensbultar*. AE – NCS 12-012; 2010.
- Lundin, J. *Clab Kontrollprogram, Sammanställning av mätningar. Berg- och bas-säng rörelser*. Clab dok 3018600-001, 2010.
- Lundin, J. *CLAB, Kontrollprogram, Bergkontroll, Boltometerprovning av referensbultar*. 3018600-003; 2010.
- Lundin, J. *CLAB. Kontrollprogram, Bergkontroll, Boltometerprovning av referensbultar*. 2244600-001; 2006.
- Lundin, J. *SFR kontrollprogram. Bergkontroll. Urbörning av bultar- korrosionsstudie*, rapport nummer 1919500-003; 2004.
- Martna, J & Jansson, S. *Bedömning och kontroll av bergförstärkningarnas beständighet i SFR*. BKU 86:3 SFR1. Forsmark. 1986.

- Mosav, M & Karimi, S. *Corrosion Protection of Rock Bolts by Epoxy coating and its Effect on Reducing Bond Capacity*. University of Tehran, Iran 2008. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. 2008
- Nordström, E. *Stålfiberkorrosion i sprutbetong – ett beständighetsproblem?* SveBeFo rapport nr 69. 2005.
- Nordström, E & Holmgren, J: *Sprutbetonghandboken, Reparation*. Elforsk rapport 09:74. 2009.
- Pettersson, M & Grundfelt, B. *Förlängd lagring i Clab*. KBS rapport R-06-62. 1996.
- Reutersvärd, P. *Provning beläggning för bergbultar*. Swerea KIMAB:s referensnummer 418209-1. Sektion: Korrosionsskydd. 2011.
- Rosengren, L, m.fl. *Riktlinjer för dimensionering och utformning av brandskydd i bergtunnlar. Underlag för projektering av bygghandling*. Dokument Nr: 9564-13-025-011. rap-08-02. Citybanan i Stockholm
- Sandberg, B. *Dagens kunskapsnivå – korrosion på bergbultar*. Grupp: 74. KIMAB:s referensnummer: 746693-745, Uppdragsrapport till GECON AB.2007.
- Selmer- Olsen, R m.fl. *Tunnel collapses in swelling clay zones*. Tunnels & Tunneling. November 1989.
- Stephansson, O. *SFR Bergkontroll 2011. Stor besiktning av berg och bergförstärkningar. Möte med besiktninggruppen*.2011.
- Stephansson, O. *Minnesanteckningar SFR Bergkontroll. Stor besiktning av berg och bergförstärkningar. Möte med besiktninggruppen*.2006.
- Söderman; E. *Kontrollerad långtidslagring i CLAB*. SKB R-98-17, 1997.
- Söderström, K. *Utbyggnadsentreprenad, Konstruktionsförutsättningar för byggnader*, KFB, Dok nr TP-00-12 B; 2003.
- Thorén, H. Geolog hos Vägverket vid tiden för renovering av Vindötunneln. Personlig kommunikation, 2012.
- Thorsell, PE & Nordström; E. *Erfarenheter från 10 års fältexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong*. Befo rapport 88. 2009.
- Trafikverket. *Tunnel 2004 VV Publ 2004:124.*, 2004.
- Vlasac, K. Statens Fastighetsverk, Kungliga Biblioteket, Protokoll från mätning av läckage genom mätvallar, 26 mars, 2013.
- Windelhed, K, Lagerblad B, Sandberg B. *Cementingjutna bultars beständighet*. SveBeFo Rapport 58. 2002.



2013:26

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 250 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se