

SVEBEFO-RAPPORT 58

INNEHÅLL

FÖRORD	FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.
INNEHÅLL	II
SAMMANFATTNING	IV
SUMMARY	VI
KOMMENTARER	VII
1 BULTARS KORROSIONSEGENSKAPER	1
1.1 Inledning	1
1.2 Korrosion i bergvatten	2
1.3 Atmosfärisk korrosion	5
1.3.2 Luftens temperatur	5
1.3.3 Luftens fuktighet	5
1.3.4 Luftföroreningar	6
1.3.5 Övriga faktorer	6
1.3.6 Speciella förhållanden att ta hänsyn till i tunnlar	6
1.4 Korrosionsmekanismer vid ofullständig kringgjutning	8
1.5 Betydelsen av ytbeläggning för ingjuten bergbult	11
1.6 Diskussion	12
1.7 Förslag till fältförsök	13
1.8 Slutsatser och rekommendationer	14
1.9 Referenser	14
BILAGA 1. Korrosionsteori	15
BILAGA 2. Beräkning av övergångsmotstånd för bristfälligt kringgjuten bergbult	17
2 CEMENTBRUKETS EGENSKAPER OCH	20
BESTÄNDIGHET	20
2.1 Inledning	20
2.1.1 Terminologi, definitioner och förutsättningar	20
2.2 Cementbrukets egenskaper	22

2.2.1	Cementhydratation, styrmedel och konsekvenser.....	23
2.2.2	Tillsatsmedel/material och dess effekt på cementbruk	24
2.2.3	Diskussion	25
2.3	Cementbrukets beständighet	27
2.3.1	Åldringseffekter.....	27
2.3.2	Reaktioner med berg.....	27
2.3.3	Angrepp från omgivande miljö.....	28
2.3.4	Diskussion	31
2.4	Lakning.....	33
2.4.1	Diffusionsstyrkt angrepp.....	33
2.4.2	Penetrativt angrepp	34
2.4.3	Nedbrytning i sprucket cementbruk.....	34
2.4.4	Diskussion	35
2.5	Konsekvens-scenario analys.....	36
2.5.1	Ofullständig eller felaktig ingjutning.....	36
2.5.2	Sprickor i cementbruket.....	38
2.5.3	Berg rörelser.....	38
2.5.4	Ocentrerat stål.....	40
2.6	Slutsatser	41
2.7	Förslag till undersökningsprogram.....	42

SAMMANFATTNING

Denna SveBeFo-rapport redovisar kunskapsläget för de beständighetspåverkande mekanismerna i systemet berg-vatten-bult-cementbruk. Rapporten består av två delar där Korrosionsinstitutet beskriver bultars korrosionsegenskaper och Cement och Betong Institutet, CBI, beskriver cementbrukets egenskaper och beständighet. Författare av Korrosionsinstitutets rapport är bergsingenjör Bertil Sandberg och författare av CBI:s rapport är fil dr Björn Lagerblad.

Inom detta projekt har endast behandlats problematiken runt cementingjutna bergbultars beständighet. Bultarnas bergmekaniska funktion beaktas således inte i detta projekt.

Här sammanfattas några viktiga konstateranden från de två studierna.

Det som i första hand påverkar ingjutna bergbultars beständighet är lågt pH, tillgång på syre samt tillgång på vatten.

Systemet med cementingjutna bergbultar är i sig ett kemiskt robust system som ger ett gott skydd för stålbulvar utan annan skyddande behandling och som har en inbyggd självläkande förmåga. Det är den alkaliska miljön med högt pH-värde som ger systemet dessa gynnsamma egenskaper. En väl cementingjuten obehandlad bergbult har ett effektivt korrosionsskydd. Förutsättningen är att bulten är fullständigt ingjuten samt att man vid monteringen använder ett ingjutningsbruk med lågt vattencementtal, vct.

Med ett lågt vattencementtal, vct, finns ett överskott av ohydratiserat cement i bruket. Ingjutningsbruk med vct under ca 0,4 har alltid ett överskott på cementkorn som inte reagerat med vatten. Kommer vatten i kontakt med detta ingjutningsbruk reagerar cementet med vattnet och bidrar till självläkning av vattenförande sprickor.

I det fall defekter uppkommit i samband med bultmonteringen så att bulten inte fullständigt täcks av ingjutningen kan fara för korrosion föreligga. För att korrosion skall kunna uppkomma krävs emellertid dels tillgång på syre och vatten dels att betongen förändrats så att pH-värdet radikalt sänks. Bulten behöver därmed inte bli angripen om tillfört vatten är syrefritt eller inte omsätts. Om vattnet inte omsätts blir det alkaliserat och därmed sker ingen korrosion. Enligt CBI's rapport kan man inte påvisa någon negativ förändring av en ren cementpasta på åtminstone 100 år och det finns från geologiska analogier indikationer på att det inte sker någon kristallisation av cementgelen på 1000-tals år.

Defekter i bultingjutningen som resulterar i att bultstålet utsätts för strömmande vatten från större bergsprickor behöver inte heller innebära korrosionsrisk eftersom vattnet rör sig mot tunneln och normalt innehåller en begränsad mängd syre. För ett skadligt förlopp krävs en viss mängd vatten för att transportera bort så mycket cementkomponenter så att pH-värdet sänks samt att det ohydratiserade cementet som finns i ingjutningen förbrukas. Eftersom även syre måste finnas tillgängligt är risken för korrosion mycket liten om inte bergutrymmet ligger ytligt eller om sprickvattnet på annat sätt blir syrehaltigt. Låga pH-värden kan förekomma i speciella geologiska miljöer och kloridinnehåll kan behöva beaktas i marin miljö och eventuellt som följd av vägsalter.

De teoretiska utredningar som ligger till grund för denna rapport visar att den typ av beständighetsproblem som man kan få i normala betongkonstruktioner inte är aktuella för cementingjutna bergbultar. De flesta för betong vanliga skademekanismer, som sulfatangrepp, alkalisilikareaktioner och frost, leder till expansion som kan fördärva betongkonstruktioner. Den avgörande skillnaden är att de ingjutna bultarna är inspända i berget. Om denna typ av fenomen ändå skulle inträffa, exempelvis på grund av sulfathaltigt vatten, ger svällningen ingen negativ verkan utan resultatet blir istället en ytterligare tätning av borrhålet.

Krympning kan orsakas av olika processer i bultarnas ingjutningsbruk, exempelvis uttorkning. Det slutna borrhålet medför dock ett bra skydd mot uttorkning. Om vissa förutsättningar är uppfyllda kan viss begränsad krympning ske i bergbultarnas ingjutningsbruk. Denna krympning är dock liten i jämförelse med den kemiska expansion som sker i bruket under ett stort antal år vid tillgång på vatten.

Enligt rapporterna finns ur beständighetssynpunkt ingen särskild anledning att använda Anläggningscement i samband med monteringen av bultar. Denna cementsort används allmänt idag eftersom den är sulfatresistent och skyddar mot olika svällningsreaktioner. Som framgår av ovanstående resonemang är det för ingjutning av bergbultar inte nödvändigt med sulfatresistent cement eftersom svällning inte är ett problem. Dessutom hårdar Anläggningscement långsammare än standardcement vilket kan vara en nackdel.

Nyckelord: bergbult, bultbeständighet, korrosion

SUMMARY

This report presents theoretical considerations on mechanisms that are significant for the durability of cement grouted rock bolts in underground structures. The report is based on two parts namely one part from the Swedish Corrosion Institute dealing with corrosion of steel bolts and the second part from the Swedish Cement and Concrete Research Institute dealing with the behaviour and durability of the grout. Bertil Sandberg, M Sc, is the author from the Swedish Corrosion Institute and Björn Lagerblad, Ph D, is the author from the Swedish Cement and Concrete Research Institute.

In this project we have focused on the durability question in the system rock-water-bolt-grout. The project has not been dealing with any rock mechanics problems.

In the following we are summing up the most important conclusions:

There are three main factors that govern the durability of grouted rock bolts, i.e. low pH, water and oxygen.

Cement grouted rock bolts represents a corrosion safe and robust system with a self healing function. The environment around the steel bolt with a high pH-value gives for a well grouted bolt a good protection.

A low water-cement ratio, W/C, is a prerequisite to get a grouted rock bolt with good durability and function. Using a grout with low water-cement ratio, under 0.4 means that there are always unhydrated cement grains that could react with groundwater from fractures. This phenomena is what makes the system self sealing.

The high pH value that is established by the cement grout around the steel bolt gives a good corrosion-barrier. The report from the Swedish Cement and Concrete Research Institute refers to research work that indicates that there is no effect on the durability of the grout during at least 100 years.

As mentioned above an environment with water, oxygen and a low pH value is needed for corrosion. Rock bolts that are not well grouted or have other defects in the grout so that water is coming into contact with the bolt do still not necessarily corrode. If the water is free from oxygen and is not circulating the bolt will not corrode because the water will be alkalized. Groundwater flowing in fractures towards a tunnel has normally a low oxygen content and is therefore not corrosive.

This report shows that some processes that may cause damage in concrete structures based on Portland cement is not a problem for grouted rock bolts. The reason for this is that these processes cause a swelling reaction in the concrete and for rock bolts a swelling reaction will rather lead to a better function of the bolt. For the same reason it is not necessary to use a sulphur resistant cement for the grout, this type of cement is also hardening slower than ordinary cement.

Keywords: rock bolts, durability, corrosion

KOMMENTARER

Kunskap om cementingjutna bergbultars långtidsbeständighet är av central betydelse för alla inom bergbyggnadsbranschen. Beställare, entreprenörer och konsulter, alla behöver sådan kunskap.

Resultatet av de två studier som redovisas i denna rapport visar att korrekt ingjutna bergbultar normalt har mycket lång beständighet. Ett bra utförande på bergbultningen är därmed avgörande för bergförstärkningens livslängd. Kvalitetstänkande, utbildning och bra hjälpmedel är sådant som resulterar i ett bra utförande av bergbultningen. Förståelse för varför ett visst vct skall användas och varför det är viktigt med en bra hålfyllnad i kombination med en fungerande kontrollfunktion bör resultera i en bra beständighet för bergbultarna.

För att i framtiden höja kvaliteten på de ingjutna bergbultarna och öka säkerheten i berganläggningar är det viktigt att fokusera även på monteringen av bergbultar. Baserat på den kunskap som framkommit inom detta projekt rekommenderas ett utvecklingsarbete med målsättningen att säkerställa att bergbultar blir perfekt ingjutna. Exempelvis kan projekt inriktas på utveckling av tekniska hjälpmedel vid monteringen eller hjälpmedel för att kunna kontrollera statusen för redan monterade bultar. Vidare bör rutiner för kontroll av arbetet att montera bergbultar ses över. Man bör även utreda behovet av kontraktuella åtgärder samt ändrade upphandlingsformer.

Andra intressanta fortsättningar på detta projekt är fältförsök för att skapa ytterligare förståelse för de korrosionsrisker som kan föreligga i speciella geologiska miljöer samt skapa underlag för översyn och uppdatering av tidigare presenterade förslag till klassificering av olika geomiljöer. I dessa fall kan monterade bultar urborras och studier genomföras av såväl betong som stål bultar. Alternativt kan kalibrerade ståltrådar monterade i borrhål genom vattenförande zoner studeras. Genom att studera korrosionen under ett antal år samt jämföra med vattenkvaliteten kan intressant kunskap inhämtas.

1 BULTARS KORROSIONSEGENSKAPER

Bergsingenjör Bertil Sandberg, Korrosionsinstitutet

1.1 Inledning

Genom SveBeFo har ett projekt rörande bergbultars beständighet initierats. I en första etapp sker en kunskapsinsamling. Som nästa steg avses att genomföra fältförsök. Sycon Teknikkonsult AB står för projektledningen och har givit Korrosionsinstitutet SCI AB i uppdrag att ta fram vilka parametrar i vatten och atmosfär som är kritiska för korrosionshastigheten hos bergbultar. Vidare ska en teoretisk betraktelse utföras avseende de korrosionsmekanismer som är verksamma då en bergbult har defekter i kringgjutningen. Motsvarande betraktelse ska också göras avseende betydelsen av ytbeläggningar på bergbultar. CBI genomför parallellt en studie av vilka parametrar som inverkar på den korrosionsskyddande förmågan hos kringgjutningsbruket.

1.2 Korrosion i bergvatten

Korrosion i vattenlösningar är av elektrokemisk natur. Korrosionsmekanismen beskrivs i bilaga 1. I normala grundvatten krävs löst syrgas i vattnet för att nämnvärd korrosion på kolstål ska uppstå. Teoretiskt kan vätegasutvecklande korrosion ske även vid pH-värden som är vanliga i grundvatten. Något påtagligt tillskott till korrosionshastigheten får man dock inte förrän pH-värdet sjunkit till ca 4 (1).

Grundvattnets korrosivitet mot kolstål brukar främst sättas i samband med vattnets förmåga att avge kalk som tillsammans med rost kan bilda en tät och skyddande beläggning på metallytan. Möjligheten till kalkutfällning bestäms av den så kallade kalk-kolsyra-jämvikten. Om vattnet befinner sig i kalk-kolsyra-jämvikt löser det inte upp kalk (CaCO_3) och inte heller utfäller det kalk spontant. Jämvikten påverkas bl.a. av pH-värdet, halter av koldioxid, kalcium- och vätekarbonatjoner samt temperatur. Neutrala salter som klorider påverkar skyddsskiktets bildning negativt.

Man kan grovt anta att mycket mjuka vatten är korrosiva mot kolstål medan hårda vatten är mindre korrosiva. Om man önskar göra noggrannare bedömning av korrosiviteten hos ett vatten med avseende på kalkutfällning finns flera så kallade mättnadsindex att tillgå, t.ex. Langlier index eller Ryznar index.

Organisk substans anses kunna motverka skyddsskiktets bildning och därmed vara negativ ur korrosionssynpunkt.

Korrosionshastigheten för kolstål kan som sagt variera starkt med vattensammansättningen. För ett normalhårt vattenledningsvatten ligger korrosionshastigheten $< 50 \mu\text{m}/\text{år}$ (1). Internationella litteraturdata finns inom följande intervall $10\text{-}70 \mu\text{m}/\text{år}$ (2). I mjuka svenska älvvatten ligger korrosionshastigheten enligt Wranglen på $50 \mu\text{m}/\text{år}$ (3) medan undersökningar av Vattenfall (4) gör gällande att värdet ligger på ca $30 \mu\text{m}/\text{år}$. Dessa värden avser den allmänna korrosionen. Kolstål angrips dock samtidigt av gropfrätning. De djupaste frätgroparna kan bli 5 gånger så djupa som medelavfrätningen. För en lastbärande bergbult torde dock den allmänna korrosionen vara bestämmande för livslängden.

Utgående från vattnets sammansättning har ett flertal olika klassificeringssystem tagits fram. Kanske mest känd är den tyska normen DIN 50 929 part 3 (5). Li (6) har i sitt system utgått från den del av normen som avser en jords korrosivitet och anpassat denna efter faktorer som kan förmodas vara av betydelse för korrosionsmiljön i berget. Korrosionsinstitutet har i sina bedömningar av korrosiviteten i olika berg för obelagda Swellex-bultar använt en annan del av samma tyska norm nämligen avsnitt 6 som behandlar olika vattens korrosivitet. Li har i sitt system tagit hänsyn till vissa bergparametrar (vatteninflöde, sprickavstånd osv). Korrosionsinstitutets bedömningar förutsätter att bulten är utsatt för vattenflöde.

Syftet med detta uppdrag har varit att försöka fastställa vilka parametrar som är relevanta för ståls korrosion i vatten varför den del av den tyska normen som vi på Korrosionsinstitutet använt fram till dags datum synes vara mest lämplig. Troligen bör dock vissa justeringar utföras om normen även ska kunna användas i gruvtunnlar. Vid brytning av sulfidhaltig malmer kan svavelsyra bildas. Vidare torde högre halter av olika metalljoner än i normala grundvatten vara aktuella. Diskussioner har även förts om förhöjd angreppshastighet pga mikrobiell korrosion. I första hand har det rört sig om mikroorganismer som oxiderar sulfid till svavelsyra (7).

Enligt DIN 50 929, del 3, avsnitt 6 beräknas ett korrosionsindex:

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

Vad de olika faktorerna står för framgår av tabellen nedan.

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

5,5-6,5	-2
6,5-7,0	-1
7,0-7,5	0
>7,5	+1

Utgående från beräknat värde på W_0 kan förväntad korrosionshastighet utläsas ur nedanstående tabell.

W_0	Medelavfrätning, mm/år	Största djup frätgropar, mm/år
>0	0,01	0,05
-1 till -4	0,02	0,1
-5 till -8	0,05	0,2
<-8	0,1	0,5

Även om syftet med den tyska bedömningsmetoden inte är att ta hänsyn till gruvvatten så kan vi se att ett "sulfidvatten" som oxiderats dvs har lågt pH och hög sulfathalt hamnar i klassen "mycket hög korrosion". Det kan dock inte uteslutas att vissa gruvvatten borde placeras i en ändå högre korrosivitetsklass än den högsta enligt ovan.

Om fältförsök genomförs i framtiden bör vattenanalyser utföras och resultaten jämföras med uppgjorda klassificeringssystem dels enligt Li dels enligt DIN-normen ovan. DIN-normen är anpassad för vattenledningsvatten. Kategori 1, vattentyp, anger t.ex. att korrosiviteten är högre i stillastående än i flödande vatten. Detta gäller för ett syresatt vatten i ett metallrör. För en delvis ingjuten bergbult är dock stillastående vatten mindre korrosivt eftersom detta alkaliserar av kringliggande bruk. Vidare anges anaerobt vatten som mycket korrosivt. Detta beror på risken för sulfatreducerande bakterier som kan orsaka allvarlig korrosion. Om dessa bakterier inte finns närvarande sker ingen korrosion i syrefritt vatten.

1.3 Atmosfärisk korrosion

Faktorer som påverkar den atmosfäriska korrosionen kan delas in, med avseende på sitt ursprung, enligt nedan:

- Naturligt förekommande meteorologiska faktorer nämligen temperatur och temperaturväxlingar, luftfuktighet och nederbörd.
- Tillkommande naturliga faktorer såsom inläckande saltvatten.
- Av människan förorsakade luftföroreningar såsom SO₂ och NO_x.

Den atmosfäriska korrosionen är därför lokalt betingad och varierar avsevärt inom olika geografiska områden (4).

1.3.2 Luftens temperatur

I jämförelse med luftens fukt- och föroreningshalt är dess temperatur minst viktig ur korrosionssynpunkt. Temperaturen inverkan beror inte så mycket på dess gradtal som dess variationer i tiden, som ofta förorsakar daggbildning. Även om temperaturvariationerna är viktigast så är lufttemperaturen även i sig själv en faktor att räkna med. Således är stålets korrosionshastighet högre vid högre temperatur. Vid temperaturer <-2 °C minskar stålets korrosionshastighet starkt.

1.3.3 Luftens fuktighet

Luften innehåller både inom- och utomhus en viss fuktighet. Den relativa fuktigheten $RF = p/p_s$, där p är vattenångans uppmätta tryck och p_s dess mättnadstryck vid rådande lufttemperatur. Vid $p = p_s$ har luftens mättnadsgrad uppnåtts, vilket innebär fukttnedslag på fritt exponerade metallytor. Om p är konstant men luftens temperatur sjunker kommer mättnadsvärdet p_s att sjunka. Den temperatur då $p_s = p$ och således kondensation sker benämns daggpunkten.

Även vid luftfuktigheter under mättnadsvärdet (temperaturer över daggpunkten) kan fuktbildning uppstå på metallytor. Orsaken till detta kan vara:

- Kondensation på ytor vars temperatur är lägre än den omgivande luftens t.ex. bergbult i kontakt med kallt berg.
- Kondensation pga hygroskopiska salter på metallytan t.ex. vägsalt eller salter från bergvatten.
- Kondensation pga förekomst av vattenadsorberande ytskikt t.ex. smuts.
- Kondensation pga kapillärkondensation i mikroskopiska fördjupningar på metallytan (ångtrycksnedsättning i små vattenmenisker).

Med hänsyn till ovanstående är det därför svårt att fastlägga en kritisk relativ fuktighet under vilken korrosionen är försumbar. Normalt ligger den dock inom intervallet 60-80 %.

1.3.4 *Luftföroreningar*

I samverkan med luftens fuktighet utgör normalt luftföroreningar den allvarligaste atmosfäriska korrosionsfaktorn. Höga korrosionshastigheter uppstår ofta inom industri- och gruvdistrikt samt i tätorter. En svår korrosionsmiljö är också där saltvattenstänk kan uppstå.

Man skiljer mellan fasta och gasformiga luftföroreningar. Fasta partiklars korrosiva verkan sker genom något av följande sätt:

- Genom skador på metallens ytskikt som gör att korrosiva ämnen når den frilagda metallytan.
- Genom bildande av lokalelement om partiklarna t.ex. järnoxid eller koldamm, är elektriskt ledande och samtidigt ädlare än basmetallen (galvanisk korrosion).
- Genom kvarhållande av fukt.
- Är partiklarna hygroskopiska kan de ge upphov till kondensation vid relativa fuktigheter som ligger under daggpunkten.

I industriområden är oftast de fasta luftföroreningarna de svåraste, kolpartiklar, metalloxider, aerosoler av HCl och H₂SO₄ samt olika salter.

I kustområden är NaCl den viktigaste luftföroreningen ur korrosionssynpunkt.

Av de gasformiga luftföroreningarna är SO₂ den viktigaste. De gasformiga föroreningarna löser sig i fuktfilmen på metallytan och ökar dess korrosivitet.

1.3.5 *Övriga faktorer*

Förutom nämnda faktorer inverkar också meteorologiska faktorer som regn, sol och vind. Regn har den korrosionsbefrämjande inverkan att luftens fuktighet stiger. Samtidigt har dock regn en korrosionsförhindrande verkan genom att ytor tvättas rena från korrosiva vätskor och smutsbeläggningar. Solen har en torkande effekt.

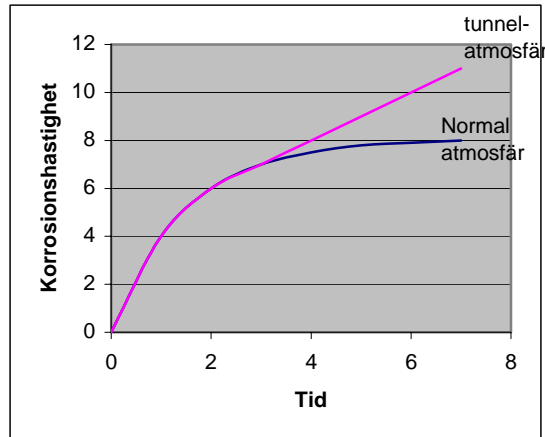
1.3.6 *Speciella förhållanden att ta hänsyn till i tunnlar*

För metallytor fritt exponerade i atmosfären finns stora mängder data avseende korrosionshastigheter samlade. Dos-respons funktioner har tagits fram där följande faktorer ingår (8):

- SO₂-halt
- NO_x-halt
- Cl-halt
- Rh (alternativt våttid)
- Temperatur

I tunnelmiljö måste vi även ta hänsyn till att ytorna inte tvättas rena av regn. I många tunnlar är troligen våttiden nära 100 %. I kombination med en successiv nedsmutsning

medför sannolikt detta att också tiden är en viktig faktor. Kolståls korrosion i atmosfären uppvisar normalt ett paraboliskt samband dvs korrosionshastigheten avtar med tiden. I tunnlar kan den med tiden ökande depositionen av fasta föroreningar göra att detta paraboliska samband övergår till att bli mer linjärt, se figur nästa sida.



Slutligen har vi att ta hänsyn till vattendropp från berget. Detta kan vara av vikt för t.ex. innertak och liknande konstruktioner men är troligen av underordnad betydelse för en bergbult. Ska vattnets korrosivitet tas med i bedömningen av den atmosfäriska korrosionen blir utvärderingen mycket komplex eftersom vattnet kan ha en tvättande verkan och därmed korrosionsförhindrande.

Följande faktorer bör beaktas:

- SO₂-halt
- NO_x-halt
- Cl-halt
- Rh (alternativt våttid)
- Temperatur
- Tid

Om dessa registreras i ett fältförsök kan inverkan av fasta partiklar fastställas genom att uppmätt korrosion jämförs med atmosfärdata från fritt exponerade prover i icke regnskyddat läge. Ett alternativ kan vara att man samlar in de fasta föroreningarna och analyserar dessa. Denna senare metod är troligen särskilt lämplig i vägtunnlar eftersom man på goda grunder kan misstänka att stänk av kloridhaltigt vatten (tösaltning) är av avgörande betydelse för korrosiviteten i denna miljö.

1.4 Korrosionsmekanismer vid ofullständig kringgjutning

En fullständigt ingjuten bergbult korroderar inte. Om inte hela bergbultens yta täcks av bruk kan däremot korrosion uppstå på den blottlagda delen. (Vi förutsätter att bruket fortfarande har god korrosionsskyddande förmåga). Den blottlagda ytan behöver dock inte bli angripen. Om håligheten/sprickan i ingjutningen tillförs vatten och detta inte omsätts kommer det att alkaliseras och därmed förlora sin korrosivitet. Någon korrosion uppstår inte heller om vattnet är syrefritt. I detta fall kan även vattenomsättning accepteras.

I det följande utgår vi dock från att vattnet är syresatt och att det omsätts i en sådan takt att det inte hinner erhålla någon pH-förhöjning av betydelse. Stålet på den blottlagda delen kommer då att angripas dels pga vattnets korrosiva inverkan dels pga att en aktiv/passiv-cell bildas. Mekanismen bakom en sådan korrosionscell beskrivs i bilaga 1.

Vilka korrosionshastigheter som är att förvänta pga vattnets egen korrosivitet har redovisats i kapitel 2.

Då man ska beräkna korrosionen som kan uppstå i en aktiv/passiv-cell har det omgivande mediets resistivitet stor betydelse. I vårt fall kommer den höga resistiviteten i berget att kraftigt minska korrosionsströmmen.

Följande parametrar krävs för att beräkna korrosionsströmmen:

- Övergångsmotståndet för anodytan (den blottlagda ytan)
- Övergångsmotståndet för katodytan (övriga ytor på bulten)
- Den drivande potentialskillnaden mellan anod- och katodytan.

I bilaga 2 har formler för övergångsmotstånden härletts. Dels har övergångsmotstånden beräknats för ett typfall där 20 mm av bulten saknar bruk. Följande resultat erhöles:

$$R_{\text{obelagd}} = 28847 \Omega$$

$$R_{\text{belagd}} = 1796 \Omega$$

Eftersom resistansen i själva bulten är försumbar blir den totala resistansen i kretsen 30643 Ω .

I syresatt vatten ligger ståls korrosionspotential på ca -500 mV relativt Cu/CuSO₄. Motsvarande värde för stål i cementbruk är ca 0 mV relativt Cu/CuSO₄. I ett inledningssskede är således den drivande potentialdifferensen ca 500 mV. Då korrosionsströmmen börjar flyta kommer dock ytorna att polariseras dvs deras potentialer närmar sig varandra. Uppskattningsvis inställer sig en potentialdifferens på 300 mV i fortfarighet. Korrosionsströmmen blir således:

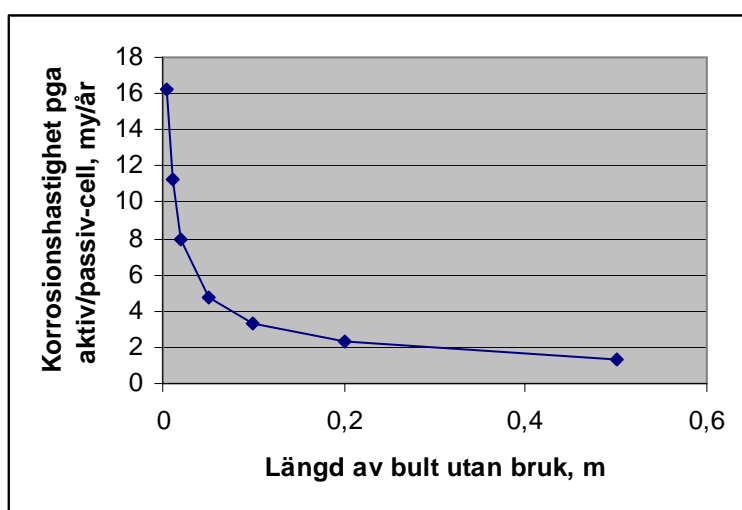
$$I = U/R = 0,3/30643 = 9,8E-6 \text{ A}$$

Stål förbrukas med ca 10 kg/A.år och har en densitet på 7,9 g/cm³ varför den exponerade obelagda stålytan (15,7 cm²) kommer att erhålla en korrosionshastighet pga aktiv/passiv-cellen:

$$\text{Korrosionshastighet} = 10000 \cdot 9,8\text{E-}6 / (7,9 \cdot 15,7) = 7,9\text{E-}4 \text{ cm/år} = 7,9 \mu\text{m/år}$$

Detta är en låg korrosionshastighet om man jämför den orsakad av vattnet självt. Hänsyn behöver således inte tas till aktiv/passiv-cellen utan vattnets aggressivitet bestämmer förväntad korrosionshastighet.

Givetvis inverkar en rad faktorer. Den utförda analysen i bilaga 2 visar dock att cementbrukets och vattnets resistivitet har liten betydelse jämfört med bergets. Om vi bortser från vissa malmer, kalksten osv så ligger normalt urbergets resistivitet högre än antagna 5000 Ωm vilket gör att korrosionen blir ändå lägre. En inverkande faktor är förhållandet mellan borrhålets diameter och bergbultens. Den andra är storleken på den obelagda ytan. Då ytan ökar minskar anodytans övergångsmotstånd men samtidigt ska korrosionsströmmen fördela sig på en större yta. Om vi utgår från att antagna diametrar är realistiska kan vi studera förhållandet mellan obelagd längd av bulten och korrosionshastighet till följd av aktiv/passiv-cellen, se diagram nedan.



Högst korrosionshastighet pga aktiv/passiv-cellen erhålls då den obelagda längden är kort. Vid 5 mm:s längd ligger korrosionshastigheten på 16 μm. Mycket kortare längder är knappast aktuellt att räkna på eftersom vid små sprickor i bruket sker en alkalisering av elektrolyten i sprickan, från det omgivande bruket, och därmed ingen korrosion.

Det är troligt att korrosionshastigheten är högre i gränsytan mellan blottlagd och ingjuten del av bulten. Detta ger dock ett lokalt angrepp och enligt tidigare resonemang är det den jämna korrosionen över en större yta som bedöms vara bestämmande för bultens livslängd.

Sammanfattningsvis kan vi således konstatera att aktiv/passiv-celler troligen har en marginell inverkan på korrosionshastigheten. Vattnets korrosivitet kommer att vara bestämmande för korrosionshastigheten.

1.5 Betydelsen av ytbeläggning för ingjuten bergbult

Hanteringen av bergbultar gör att det är svårt att helt undvika skador på en eventuell ytbeläggning (9). Korrosionsinstitutet har undersökt de korrosionsskyddande egenskaperna hos epoxibeläggningar på ingjutet armeringsstål (10). Sammanfattningsvis visade undersökningen att om man inte kan undvika skador i epoxibeläggningen är det tveksamt om sådan beläggning bör användas som korrosionsskydd på armeringsstål i aggressiva miljöer. Denna slutsats baserade sig på resultat där belagda armeringsstål exponerades för betong med höga kloridhalter. Omfattande korrosionsangrepp uppstod under beläggningen pga närvaron av skador i beläggningen. Viktigt att observera är dock att ingen ytomvandling (fosfatering) utförts före målning.

Höga kloridhalter i bergvatten är dock ovanligt utom där havsvatten eller vägsalt förekommer. En beläggning på en bergbult i normalt bruk kommer att minska korrosionen till följd av aktiv/passiv-celler på de delar som inte blivit kringgjutna eftersom katodytorna på kringgjutna delar minskar i storlek.

Enligt våra beräkningar i föregående kapitel så har aktiv/passiv-celler en förhållandevis liten inverkan på korrosionen av icke kringgjutna ytor. Bestämmande för korrosions-hastigheten på dessa ytor blir istället aggressiviteten hos omgivande bergvatten.

På en helt ingjuten bergbult uppstår inte några angrepp. Extra korrosionsskydd i form av ytbeläggning är således endast motiverat i de fall man kan misstänka att kringgjutningen kommer att misslyckas eller då man vill gardera sig mot en dylik eventualitet.

Med detta som bakgrund kan vi sluta oss till att de krav som bör ställas på en beläggning applicerad på en bergbult bör vara de samma som för övriga konstruktioner exponerade för fuktig miljö eller helt nedsänkta i vatten.

När det gäller pulverfärgers korrosionsskyddande egenskaper är det viktigt att komma ihåg att dessa inte innehåller några korrosionsskyddande pigment utan endast fungerar som en barriär mot omgivningen. Resultat från tidigare undersökningar visar att förbehandlingen är det viktigaste steget i ett system med pulverfärger (11). Om korrosionsprocessen ska vara begränsad till skadan i färgskiktet eller fortgå under färgfilmen beror på vidhäftningen mellan metall och färg och på det extra korrosionsskydd som en ytomvandling eller korrosionsskyddande grundfärg ger. Försök har visat att zink- eller zinkmangan-fosfatering ger mycket god vidhäftning hos pulverfärger.

Stor potential bedöms också duplexa system ha dvs stål som både varmförzinkats och målats. Även i detta fall är dock förbehandlingen av avgörande betydelse.

1.6 Diskussion

Angrepp på bergbultar kan uppstå av två olika skäl. Antingen genom att kringgjutningsbruket med tiden förlorar sina korrosionsskyddande egenskaper (karbonatisering/kloridinträngning) eller genom att bulten saknar kringgjutningsbruk på vissa delar.

Om bruk saknas kring någon del av bulten kan två olika fall uppstå:

- Vatten ansamlas i det aktuella området men blir stillastående.
- Vatten transporteras förbi området.

I det första fallet är risken för korrosion liten eftersom ett stagnant vatten med tiden alkaliserar av kringliggande bruk. I det andra fallet uppstår angrepp om vattnet är syresatt.

Vår bedömning är att aktiv/passiv-celler ej kommer att ge något stort bidrag till korrosionen. Således är det **vattnets kemiska sammansättning som kommer att bestämma korrosionshastigheten** på icke ingjutna delar av en bergbult.

För att beräkna korrosionen i olika typer av vatten finns redan idag färdiga klassificeringssystem. Genom fältförsök kan det verifieras hur väl dessa stämmer för bergvatten. Vidare bör man på något sätt väga in sannolikheten för att vatten ska flöda förbi bulten.

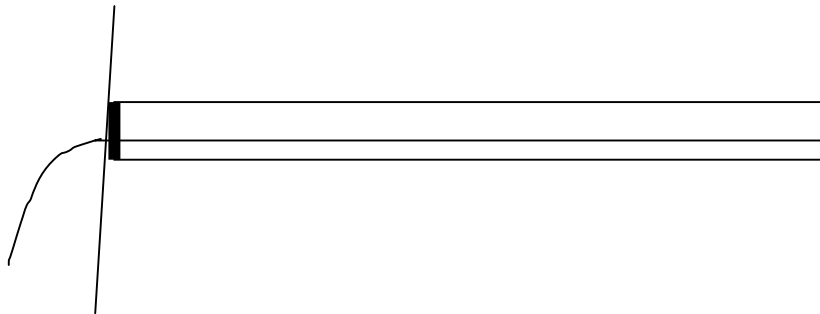
Fältförsök bör också genomföras för de atmosfäriskt exponerade delarna av bergbultar eftersom de dos-respons funktioner som idag finns baseras på fritt exponerade ytor som tvättas rena av regn. I tunnlar torde partikulära föroreningar ha stor inverkan.

När det gäller ytbeläggningar på bergbultar så bör samma praxis som för ytbeläggningar av andra konstruktioner tillämpas. För att säkerställa att korrosionen ska begränsas till eventuella hanteringsskador i färgskiktet måste förbehandlingen ske på ett riktigt sätt.

1.7 Förslag till fältförsök

Följande förslag på fältprovning föreslås.

På ett utvalt antal platser borrar hål med en längd motsvarande en bergbults. I hålet införs en ståltråd alternativt ett antal sammanfogade mindre stålstänger. Tråden/stången tillåts även sticka ut ett stycke utanför hålet. Hålet tätas för att medge ansamling av vatten.



Skillnaden i korrosionshastighet mellan varm- respektive kallvalsat stål i vatten är marginell, även om det varmvalsade erhåller lite mer gropfrätning inledningsvis. Kallvalsad tråd har större ytfinhet varför denna bör väljas. Före exponering avfettas, vägs och märks tråden samt emballeras i tät förpackning med torkmedel. Vid montering markeras vilken del som exponeras för atmosfär och utstickande längd noteras. Bergvatten tas för analys. Provtagare för atmosfärsdata placeras ut. Efter exponering tvättas tråden i rent vatten, sköljs i etanol och torkas samt emballeras och returneras. Korrosionen utvärderas dels som viktsförlust genom upprepad betning dels med avseende på förekomst av lokala angrepp med hjälp av ljusmikroskop.

Uppmätt korrosion jämförs med miljödata.

För att erhålla maximal noggrannhet får inte tråden alternativt stången väga mer än 160 g. En 3 meter lång tråd med diametern 2 mm väger ca 75 g.

1.8 Slutsatser och rekommendationer

Den genomförda utredningen medger följande slutsatser och rekommendationer:

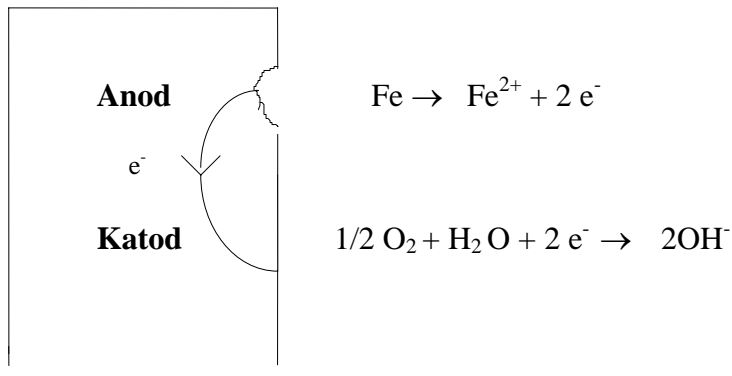
- Korrosiviteten hos ett bergvatten påverkas av faktorer som flöde, syrakapacitet, pH-värde samt halter av klorid, sulfat och kalcium.
- För att korrosion ska inträffa på icke kringgjutna delar av en bergbult krävs dels att vattnet transporteras förbi den obelagda ytan dels att vattnet är syresatt.
- Aktiv/passiv-celler bedöms ha en liten inverkan på korrosionen. Vattnets kemiska sammansättning bestämmer korrosionshastigheten.
- Faktorer som inverkar på den atmosfäriska korrosionen är temperatur, luftfuktighet och luftföroreningar. För bergbultar bedöms de partikulära föroreningarna ha stor betydelse.
- Av störst betydelse för en ytbeläggning på en bergbult är vidhäftningen mellan ytbeläggningen och metallytan och därmed förbehandlingen av stålytan före beläggning.
- Fältförsök bör genomföras där uppmätt korrosion jämförs med analyser av vatten och atmosfär. Redan befintliga klassificeringssystem och dos-respons samband korrigeras med avseende på erhållna resultat.

1.9 Referenser

1. Linder, M: Vattensammansättningens inverkan på korrosion av olika material i vattenledningar. KI-rapport 1984:1.
2. Shreir, L.L: Corrosion. Butterworth-Heinemann Ltd. 1995.
3. Wranglen, G: Metaller korrosion och ytskydd. Almqvist & Wiksell. Uppsala 1967.
4. Troselius, L: Personligt meddelande.
5. DIN 50 929 Teil 3.
6. Li, C: Bultars beständighet-verifiering av två klassificeringssystem med avseende på korrosiv miljö. SveBeFo Rapport 46.
7. Minick, G.A: Corrosion in the Mineral Industry. Material Handbook 9th edition. Vol 3. 1987.
8. Tidblad, J: Development of dose-response functions for the revision of ISO 9223 and comparison of calculated and experimental data. ISO/TC 156-N384.
9. Windelhed, K: Personligt meddelande.
10. Sederholm, B: Korrosionsskyddande egenskaper hos epoxibeläggningar på ingjutet armeringsstål- tre års fältexponeringar. KI-rapport 1996:1.
11. Iverfeldt, E: Pulverfärgers korrosionsskyddande egenskaper. KI-rapport 1995:2.

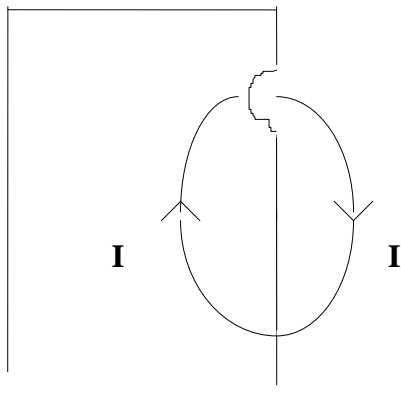
BILAGA 1. Korrosionsteori

Vid korrosion på järn och stål i vattenlösningar är oftast syrgas löst i vattnet det oxidationsmedel som är nödvändigt för processen. Vid pH-värden lägre än ca 4 kan även vätejoner ge ett bidrag som oxidationsmedel. Oxidationsmedlet reduceras på katodytor medan metallen oxideras på anodytor och går i lösning, se figuren nedan.

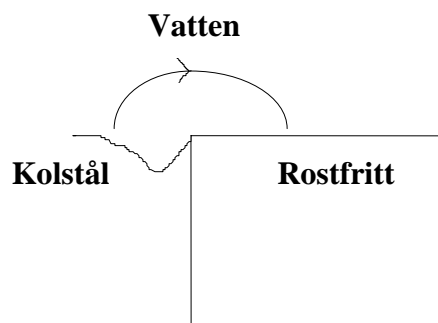


Anod- och katodprocessen balanserar alltid varandra så att lika många elektroner frigörs på anodytor som det förbrukas på katodytor. Om den ena processen stoppas stannas också den andra i samma ögonblick.

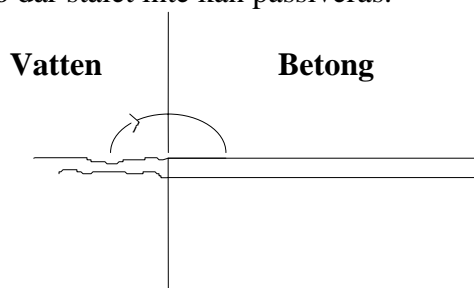
I metallen transporteras elektroner från anod till katod. Detta innebär att det går en svag likström i motsatt riktning. En strömkrets måste vara sluten. Detta sker genom jonvandring i vattnet, se nedanstående figur.



På jämnt rostande stål är anod- och katodytor jämnt fördelade över ytan. Anod- och katodytor kan emellertid också vara makroskopiskt skilda från varandra. Detta gäller t.ex. vid galvanisk korrosion, där två olika ädla metaller - exempelvis rostfritt stål och kolstål - har kontakt med varandra och befinner sig i en gemensam elektrolyt. Katodprocessen sker då på den ädla metallen och anodprocessen på den oädla, se nedan.



Liknande makroskopiska korrosionsceller kan också uppstå på en och samma metall. Ett exempel på detta är aktiv- passivceller på kolstål i alkalisk miljö. Sådana celler kan uppstå om stålet till en del är ingjutet i betong och till en del befinner sig i en mindre alkalisk men fuktig miljö där stålet inte kan passiveras.



BILAGA 2. Beräkning av övergångsmotstånd för bristfälligt kringgjuten bergbult

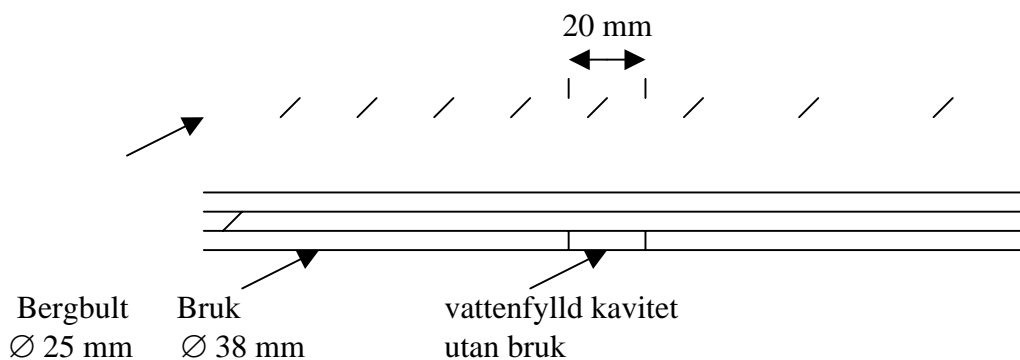
Vi utgår från ett fall med en 3 meter lång bergbult med diametern 25 mm införd och kringgjuten i ett borrhål med diametern 38 mm. På en sträcka av 20 mm har en hålighet uppstått i kringfyllningen. Detta hålrum har fyllts med vatten från berget.

Följande värden på resistiviteter antas och bedöms vara realistiska.

Berggrund: 5000 Ωm

Bruk: 100 Ωm

Vatten: 100 Ωm



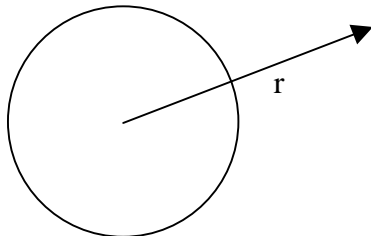
1. Härledning av den icke kringgjutna delens övergångsmotstånd:

Vi jämför den obelagda delen av bulten med en sfär. Vid ett strömflöde mellan denna sfär och en oändligt stor och avlägsen jord uppstår en spänning U där $U = R \cdot I$. R är sfärens övergångsmotstånd.

Strömflödet kring sfären blir radiellt och symmetriskt. Den elektriska fältstyrkan, E , blir:

$$E = \rho \cdot J = (\rho \cdot I) / (4 \cdot \pi \cdot r^2) \quad (1)$$

där ρ är omgivande mediums resistivitet och J är strömtätheten.



Potentialen ϕ , i en punkt r , relativt avlägsen jord ($r \rightarrow \infty$) ges av:

$$\phi(r) = \int_r^\infty E \, dr = (\rho \cdot I) / (4 \cdot \pi) \int_r^\infty r^{-2} \, dr = (\rho \cdot I) / (4 \cdot \pi \cdot r) \quad (2)$$

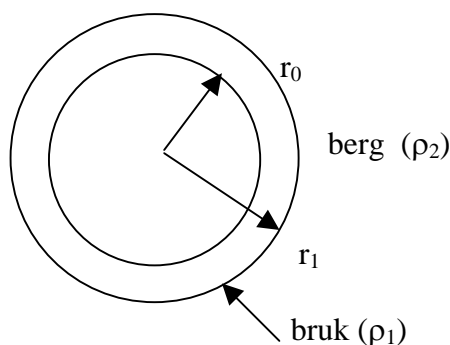
U_0 för sfären svarar mot $r = r_0$

$$U_0 = \varphi(r_0) = (\rho \cdot I)/(4 \cdot \pi \cdot r_0) \quad (3)$$

Vilket ger övergångsmotståndet för sfären.

$$R = U_0/I = \rho/(4 \cdot \pi \cdot r_0) \quad (4)$$

Om resistiviteten varierar med avståndet r , måste integration ske över varje segment. I vårt fall har vi 2 segment (bruk och berg).



$$\begin{aligned} \varphi(r_0) &= \int_{r_0}^{r_1} E_1 dr + \int_{r_1}^{\infty} E_2 dr = (\rho_1 \cdot I)/(4 \cdot \pi) \int_{r_0}^{r_1} r^{-2} dr + (\rho_2 \cdot I)/(4 \cdot \pi) \int_{r_1}^{\infty} r^{-2} dr = \\ &= (\rho_1 \cdot I)/(4 \cdot \pi) \Big|_{r_0}^{r_1} (1/r) + (\rho_2 \cdot I)/(4 \cdot \pi) \Big|_{r_1}^{\infty} (1/r) \\ &= I \cdot (\rho_1 \cdot r_1 - \rho_1 \cdot r_0 + \rho_2 \cdot r_0)/(4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot r_1) \end{aligned} \quad (5)$$

vilket ger:

$$R = (\rho_1 \cdot r_1 - \rho_1 \cdot r_0 + \rho_2 \cdot r_0)/(4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot r_1) \quad (6)$$

Den obelagda stålytan har en yta på $1,57E-3 \text{ m}^2$. En sfär med samma yta har en radie 0.011 m. Den vattenfyllda håligheten yta mot berget är $2,39E-3 \text{ m}^2$ vilket motsvarar en radie på 0,0138 m. Utgående från detta kan en jämförelse göras.

$$\begin{aligned} \rho_1 \cdot r_1 &= 1,38 \Omega\text{m}^2 \\ \rho_1 \cdot r_0 &= 1,10 \Omega\text{m}^2 \\ \rho_2 \cdot r_0 &= 55,0 \Omega\text{m}^2 \end{aligned}$$

Eftersom faktorerna $\rho_1 \cdot r_1$ och $\rho_1 \cdot r_0$ är små i jämförelse med $\rho_2 \cdot r_0$ så kan övergångsmotståndet approximeras med:

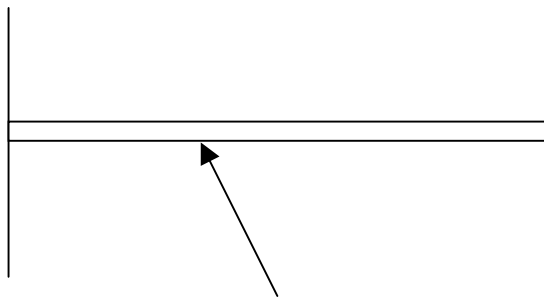
$$R = (\rho_2 \cdot r_0)/(4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot r_1) = \rho_2/(4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot r_1) \quad (7)$$

Detta innebär att övergångsmotståndet bestäms av det omgivande bergets resistivitet. Effekten av det vattenfyllda hålrummet är endast att radien ökar från r_0 till r_1 .

$$R_{\text{obelagd}} = 5000 / (4\pi \cdot 0,0138) = 28847 \Omega$$

2. Beräkning av det belagda stålets övergångsmotstånd

Den obelagda delen är mycket liten i förhållande till den belagda varför vi räknar på hela bultens längd.



Bult med längden L och diametern d

Övergångsmotståndet för denna geometri ges av:

$$R = \rho / 2\pi L \cdot \ln(4L/d) \quad (8)$$

Som värde på d bör diametern för borrhålet utnyttjas eftersom bergets resistivitet bestämmer det verkliga övergångsmotståndet, se ovan.

Detta ger $R_{\text{belagd}} = 1796 \Omega$

2 CEMENTBRUKETS EGENSKAPER OCH BESTÄNDIGHET

Fil dr Björn Lagerblad, Cement och Betong Institutet.

2.1 Inledning

SveBeFo har initierat ett projekt om beständighet hos cementingjutna bergbultar. Inom detta projekt har Cement och Betong Institutet (CBI) fått i uppdrag att utreda de faktorer som påverkar cementbrukets egenskaper och därtill hörande beständighet.

Bergbultar består av stål som gjuts in i borrarade hål i berget. I princip skall stålet vara inneslutet i cementbruk. Cementbrukets funktion är att fylla ut utrymmet mellan stål och berg så att stålet dels förankras i berget dels ger skydd åt stålet.

Bergbultars beständighet berör komplexfären cementbruk-korrosion-miljö. En lyckad ingjutning med cementbruk av god kvalité som helt innesluter stålet passiviserar detta. Frågeställningen är därför närmast hur cementbruk utvecklas med tiden och vilka förändringar som kontakten med miljön kan ge. Det är liknande typer av frågeställningar som är väl undersökta när det gäller armeringsjärn i betong.

Denna rapport är en allmän genomgång av vad som kan hända och vilka konsekvenser detta kan ge. Den försöker belysa hela problemkomplexet och beaktar därför även egenskaper som kan vara positiva. Rapporten går först igenom ett cementbruks egenskaper när det är förslutet i berg. Sedan går rapporten igenom hur det stelade och härdade bruket påverkas av den yttre miljön. Därefter beaktas vilka konsekvenser som fel vid ingjutning och yttre påverkan kan ge.

2.1.1 Terminologi, definitioner och förutsättningar.

Bergbultarna gjuts in med en blandning av cement och vatten. Bland bergfolk benämns produkten bruk eller cementbruk. Enligt betongteknisk ordlista (TNC 46) betyder bruk eller cementbruk en "blandning av cement, fingrus och vatten". Beteckningen cementbruk används dock i denna rapport, utom i de delar som speciellt behandlar cementreaktioner där den korrekta termen cementpasta används.

I beständighetsanalysen utgår vi från att bergbultarna inne i berget står i kontakt med bergvatten medan bultmynningen står i kontakt med luft. Bergvattnet kommer att rinna in mot tunneln, då trycket är lägst där. Vattnets sammansättning kan variera beroende på ursprung (regn, hav, etc) och miljö (tösalter, sulfidjordar, mossmarker etc). I tunnlar etc kan vattnet ändra sammansättning, exempelvis kan sulfid (pyrit) oxidation kan ge sulfat och surt vatten p.g.a. oxidation etc. I gruvor kan därför vattnets sammansättning lokalt bli extrem. I vissa tunnlar kan halten koldioxid vara förhöjd.

För cementkemi används för enkelhetens skull följande vedertagna förkortningar.

C= CaO S= SiO₂ A= Al₂O₃ F= Fe₂O₃ H=H₂O

2.2 Cementbrukets egenskaper

Cementbruk består av cement och vatten och eventuella tillsatsmedel. Det måste ha vissa reologiska egenskaper när det injekteras i hålet. Bruket skall vara tillräckligt rörligt för att kunna injekteras och fylla ut hålrummet mellan stål och berg, sedan måste det vara tillräckligt styvt för att stanna kvar och slutgiltigt måste det stelade bruket ha god styrka för att fylla sin mekaniska funktion.

Cementbruken är från början en partikelslurry där partiklarna, cementet, efter en tid börjar reagera exotermt med vattnet och slutgiltigt bilda en massa bestående av cementshydrat.

Man delar in ett cementbruks utveckling i tre perioder;

- 1 Det färska cementbruken vilket betecknar den period då cementpastan har full flytförmåga. Cementbruken injekteras under denna period
- 2 Det unga cementbruken vilket är den period när cementpastan börjat stelna men ännu inte har hårdnat. Kallas ofta det plastiska stadiet. Under denna period flyter cementbruken inte, men kan inte belastas.
- 3 Det hårdnade cementbruken som kan belastas

Egenskaperna styrs primärt av vatten/cement talet (vct) och typ av cement. De kan sedan justeras med olika tillsatsmaterial och tillsatsmedel

Det finns flera typer av cement. De olika typerna av cement finns definierade i den Europeiska standarden ENV 196 som kommer att bli svensk standard. I Sverige används vid anläggningsbyggande normalt Cementas Anläggningscement (Degerhamn Std portland). Det är ett rent portlandcement och betecknas därför CEM I. Anläggningscement har underbeteckningarna BV, LA och SR för att visa att det har begränsad värmeutveckling, är lågalkaliskt och sulfatresistent. För husbyggnad används normalt Cementas Byggcement (Byggcement Std PK). Det betecknas CEM II då det även innehåller ca 15 vikt % inmalad kalkstensfiller (PK = portland-kalk). Byggcementen är inte sulfatresistent, dessutom är de relativt snabbt bindande och innehåller relativt höga halter av alkalier. De två typerna av cement är framtagna för att fylla vissa produktionstekniska och beständighets krav. När man väljer cement måste man beakta båda aspekterna. Även om bergbultning är en del av anläggningsbyggande betyder det inte att man nödvändigtvis behöver använda anläggningscement. Man skall utgå från vad den speciella tekniken och specifika miljön kräver och välja cement utifrån detta. För att få speciella egenskaper kan även slaggcement, aluminatcement och blandningar av de olika typerna som cementbruk i vissa fall användas. För att inte komplicera rapporten för mycket utgår resonemanget från ren portlandcement (CEM I). Dessutom finns det en uppsättning av olika tillsatsmedel och tillsatsmaterial för att ge cementbruken olika egenskaper. Detta diskuteras senare (kapitel 2.2).

Ett portlandcement tillverkas av lera och kalksten som värms upp till ca 1400°C. Härvid bildas cementmineralen Alit (C_3S), Belit (C_2S), Kalciumaluminat (C_3A) och Ferrit (C_4AF).

Dessa cementmineral, klinkern, mals sedan tillsammans med gips (CaSO_4). Gipsens funktion är att styra tillstyvnadsförloppet.

I kontakt med vatten reagerar dessa komponenter exotermt och bildar cementhydrat. De främsta cementhydraten är C-S-H (kalciumsilikathydrat), CH (kalciumhydroxid, portlandite), ettringit ($\text{C}_3\text{A}(\text{CaSO}_4)_3 \times 32 \text{H}_2\text{O}$) och monosulfat ($\text{C}_3\text{A} \text{CaSO}_4 \times 12 \text{H}_2\text{O}$). Ferriten bildar varianter av ettringit och monosulfat där järn substituerar för aluminiumjonen. Fördelningen mellan ettringit och monosulfat styrs av mängden gips. Med ett vatten/cement tal (vct) på över 0,4 kommer med tiden all cement att övergå i cementhydrat. Vid lägre vct kommer med tiden pastan bli helt tät och det kommer att finnas kvar ohydratiserade cementkorn. Då ingjutningsbruk normalt har ett lågt vct kommer det alltid finnas kvar ohydratiserade cementkorn, som kommer att fungera som ballast.

Mängden av de olika hydraten beror på fördelningen av klinkermineralen och deras inbördes reaktionshastighet. Normalt är dock cementet underbalanserat på sulfat vilket gör att den färska massan är rik på ettringit som sedan omvandlas till monosulfat. Om det finns gips/sulfat kvar när bruket stelnat så kommer detta att bilda ettringit i det stelnade bruket, vilket ger en svällning. (detta utnyttjas i expansionsbruk se kap. 2.2).

2.2.1 *Cementhydratation, styrmedel och konsekvenser*

En ingjutnings kvalitet beror främst på hur väl man kan få in cementbruket i borrhålet och sedan hålla det på plats tills det stelnat. Tillstyvnaden ger dock förändringar som kan påverka det stelnade cementbrukets infästningsegenskaper. I ett torrt borrhål i ett sprickfritt berg kan man utgå från att cementbruket är förseglat och borrhålet har en konstant volym.

1. Plastisk krympning.

Den plastiska krympningen uppkommer vid snabb uttorkning (vattenförlust). Krympningen, som ger upphov till sprickor, minskar med mängden fasta partiklar (cement och ballast). Krympningen av ren cementpasta kan bli ca 7 promille. I ingjutningsbruk blir krympningen mindre då vct är relativt lågt. I berghålen i sprickfritt/tätt berg sker ingen uttorkning varför man kan bortse från fenomenet. Om bruket förlorar vatten i sprickor kan dock ett liknande fenomen ske (se nedan)

2. Kemisk/autogen krympning.

Denna krympning beror på att hydratationen förbrukar vatten. Vid lågt vct kan man helt förbruka vattnet vilket ger upphov till självuttorkning. Sammandragningen av cementpastan minskar med ökad mängd ballast. Den autogena krympningen är därför betydligt kraftigare i ett ingjutningsbruk baserat på ren cementpasta än i ett riktigt bruk med ballast. Krympningen ökar vid låga vct då detta bruk innehåller relativt sett mindre vatten. I ett ingjutningsbruk kan den autogena krympningen uppgå till 0.7 promille. Om vatten tillförs kommer krympningen att avta och övergå till en svällning (se nedan).

3. Kemisk svällning.

Om cementpastan har fri tillgång på vatten under lång tid kommer detta att ge upphov till en svällning. Expansionen av ren cementpasta kan uppgå till något över 2 promille efter 10 år. Detta bör vara positivt för bergbultarna då en svällning tätar till eventuella sprickor alternativt förtätar cementpastan.

4. Uttorkningskrympning.

När det hårdnade cementbruket torkar ut genom avdunstning ger detta upphov till krympning. Det beror på att när cementpastan förlorar sitt fria vatten så sker en sammandragning. Normalt fordras ganska låg relativ fuktighet (RH) och långa tider i exempelvis inomhusklimat eller i ökenområden för att det skall få full effekt. I sämsta fall kan krympningen uppgå till en promille. Krympbeloppet är förutom RH avhängigt vct och mängd ballast. En ren cementpasta krymper mer än betong och bruk. Ett lägre vct ger mindre uttorkningskrympning då mängden fritt vatten blir mindre men man måste beakta att den autogena krympningen samtidigt ökar (se ovan).

5. Avvattning.

Om berget är poröst eller sprickigt och torrt kan cementbruket förlora delar av sitt vatten till omgivningen. Resultatet blir en avvattning som ger plastisk krympning.

6. Separation.

Om vatten/cement kvoten är för hög eller om man överdoserar med superplasticerare kan man få en gravitativ sättning av cementbruket vilket resulterar i en vattenhinna som blir en transportkanal (se kap. 5).

2.2.2 *Tillsatsmedel/material och dess effekt på cementbruk*

Till cementbruk kan man tillsätta olika medel för att styra dess egenskaper. Typiska produkter är superplasticerare, retarder, acceleratorer, förstyrningsmedel, krympreducerare/ expansionsmedel, korrosionsinhibitorer, etc.

1. Superplasticerarna är ytaktiva medel som ökar rörligheten och därmed möjliggör ett lägre vct vid samma rörlighet. De fungerar endast i det färska cementbruket. I det stelade cementbruket är de inbyggda i strukturen och påverkar därmed inte beständigheten. Överdoserar kan ge upphov till separation.
2. Retarder och acceleratorer påverkar tillstyvnads- och härdningsförloppet. De påverkar normalt inte beständigheten hos det stelade cementbruket. Om det behöver användas bör det dock testas. Man bör inte använda medel baserade på klorider då detta ökar ståls korrosionsbenägenhet.

3. Förstyvningsmedel används för att ge en mera stabil massa. Detta åstadkoms i bultbruket genom att sänka vct men man kan även få ett styvare cementbruk vid högre vct genom att stabilisera det. Det är oftast organiska ämnen men även bentonit används för detta ändamål. Bentonit bör användas med försiktighet då det med tiden kan tappa sin svällförmåga, vilket kan ge upphov till krympning.
4. Krympreducerare används för att minska plastisk- och uttorkningskrympning. Man kan minska krympningen genom att tillsätta polyoler som sänker porvattnets ytspänning vilket i sin tur minskar sammandragningen.
5. Expansionsmedel används för att expandera cementbruk i framför allt det plastiska stadiet eller tidiga hårdnade tillståndet. Man kan åstadkomma detta på flera olika sätt. Det vanligaste är att tillsätta finmald aluminium som reagerar med den alkalina porlösningen vilket ger en vätgasutveckling som sväller det unga och plastiska cementbruket. Det finns även sk. expanderbruk där man avsiktligt översulfonerar cementet. Detta medför att man nybildar ettringit i den plastiska massan vilket leder till volymsökning och expansion. Man kan även tillsätta periklas (MgO) som långsamt reagerar med cementbruket och ger en svällning (hydrerar till brucit). En mindre expansion kan inte skada ett inspant cementbruk. Tvärtom skulle antagligen en mindre plastisk expansion vara bra, då det ger en bättre utfyllnad. Expansionen skall dock ske först när cementbruket börjat stelna, då det annars trycks ut.
6. Korrosionsinhibitorer. Det är i allmänhet olika typer av nitrater och nitrider som man tillsätter det färska cementbruket. De gör stålet mindre rostbenäget. De har ingen påvisad negativ inverkan på cementpastans långtidsstabilitet.
7. Polymerer. Polymermodifierat bruk är cementbruk till vilket man tillsatt en polymer. Polymermodifiering ger ofta en förbättrad vidhäftning och segheten ökar. Dessutom minskar porositeten och genomsläppligheten.

2.2.3 *Diskussion*

Ett cementbruk är känsligt för mängden blandvatten och fuktrörelse. Man kan få både svällning och krympning, men då bultbruket sitter inspant i berg är det endast krympning som kan ge negativa konsekvenser. Krympning sker främst genom uttorkning men man kan även få en autogen (kemisk) krympning om man inte tillför vatten

Både krympning och svällning blir större hos ett bultbruk baserat endast på cement och vatten än i riktigt bruk med ballast då partiklarna både spär ut cementpastan och ger en inre stabilitet.

Vid låga vct kommer en del av cementkornen att fungera som ballast vilket minskar uttorkningskrympning. Den stora relativa mängden cement vid låga vct ger å andra sidan en kraftigare autogen kemisk krympning.

Då bergbultarna sitter fast i utborrade hål i berget kan man anta att cementbruket inte kan torka. Undantaget är om berget kan suga vatten från det unga cementbruket. Poröst och sprickigt berg bör därför vara vattenmättat vid injektering. Oftast är det fuktigt i tunnlår och bergrum. Vattenförhållandena i berget kan dock förändras. Om det är torrt kan man få uttorkningskrympning från mynningarna. Det största problemet är därför antagligen den kemiskt/autogen krympningen i torra hål. Om hålen är torra kommer krympningen och den medföljande sprickbildningen främst att påverka de mekaniska egenskaperna, då vattentillförsel åter får cementbruket att svälla. Effekten av autogen krympning i slutna borrhål borde undersökas närmare då det finns flera effekter som vi inte känner till.

Om det finns tillgängligt vatten i hålet från någon bergspricka etc kommer detta att i det plastiska eller hårdnade cementbruket ge upphov till en svällning som ger en bättre utfyllnad/förankring. I det färskt cementbruket kan tillfört vatten ge en utspädning och försämrade egenskaper hos cementbruket.

För att klara de olika krympningsfenomen kan det vara bättre att blanda ut cementbruket med finsand eller filler då detta minskar krympningen dels genom att minska mängden cementpasta dels genom att bygga upp ett skelett som motverkar krympning. Ett riktigt bruk är mera stabilt än ett cementbruk.

De olika tillsatsmedlen är främst till för att styra det unga cementbrukets egenskaper. Normalt påverkar dessa inte det hårdnade cementbrukets egenskaper. En del av medlen kan användas för att i vissa situationer ge en bättre infästning. Framför allt gäller detta expansionsmedlen som skulle kunna ge en hårdare infästning.

2.3 Cementbrukets beständighet

I detta kapitel används ofta den korrekta termen cementpasta när det handlar om cementreaktioner. I annat fall används termen cementbruk.

Cementpastans struktur förändras med tiden och de olika komponenterna i den reagerar med komponenter i miljön. Man måste därför göra en analys av cementpastans grundstruktur och vilka komponenter som finns tillgängliga i miljön. Man måste exempelvis beakta om cementpastan befinner sig i torrt hål utan förbindelse med den yttre miljön eller om det finns sprickor etc som ger kontakt med omgivande grundvatten/atmosfäriska gaser. I ett helt slutet hål kan endast egenomvandlingar ske.

2.3.1 Åldringseffekter

Cementhydratationen går snabbt i början och sedan allt långsammare. Redan efter ett par timmar börjar cementbruket bli plastiskt och efter ytterligare några timmar börjar det stelna men det når ingen egentlig styrka förrän efter något dygn. Full styrka uppnår cementbruket efter ett par veckor. Hastigheten i hydratationsprocessen beror på typ av cement, vct, temperatur och tillsatsmedel.

Allteftersom det fria vattnet förbrukas får man en förhöjd styrka och minskad permeabilitet. Undersökningar av gammal betong och cementbruk som legat i vatten under lång tid visar att den kan bli mycket stark. Utan vatten kommer det emellertid att ske en viss autogen krympning. Med tiden kommer det även att ske en del omstrukturering av cementhydraterna, vilket dock inte ger upphov till någon försämring. Man kan inte påvisa någon negativ åldring av ren cementpasta på åtminstone 100 år och det finns från geologiska analogier indikationer på att det inte sker någon kristallisation (vilket skulle ge krympning) av cementgelen på 1000-tals år. Krympning är därför inget problem.

2.3.2 Reaktioner med berg

Cementbruket kommer att befinna sig i kontakt med berg. I bruk finns berg och bergartsmineral som ballast/filler i kontakt med cementpasta. I princip är det samma typ av reaktioner som sker vid kontakten mellan cementbruk och berg som hos ballast i betong. Det typiska för betong och cementbruk är det höga pH-värdet hos porlösningarna. Porlösningarna består framför allt av alkalihydroxider och har ett pH-värde på mellan 13 och 14. Det bestäms av alkaliinnehållet i cementet och vct. Om de lösliga alkalierna lakas ut bestäms pH-värdet av kalciumhydroxidens löslighet vilket vid 25 °C ger ett värde på 12,4.

Vid dessa höga pH-värden är många av bergartsmineralen i princip lösliga, men trögheten i reaktionerna gör att de i praktiken inte löses upp. Framför allt är kvarts löslig och omvandlas till en alkalisilikathydrat (vattenglas) vilket ger en svällning. I betong är det känt som alkalisilika-reaktionen (ASR) och ger en sprickbildning. Skadliga reaktioner i betong sker i praktiken endast i fuktig miljö med alkalireaktiva bergarter och med ett alkalirikt cement (exempelvis Slite Std P). De alkalireaktiva bergarterna är olika typer av

kvartsrika amorfa, semikristallina eller finkorniga bergarter (flinta, porfyrer och myloniter). Finkorniga bergarter som mylonit, leror och kemiska utfällningar av amorf kisel förekommer ofta i sprickor och kan reagera med cementpastan.

I ett borrhål sitter cementbruket inspänt och svällningen kommer därför endast att leda till en förtätning och inte fördärva det. Om det bildas ASR-gel i övergången mellan berg och cementbruk kommer denna att försluta eventuella gap. Eventuell ASR och dess svällning kommer därför endast att ge problem vid själva hålmynningen.

Bergarten kan även innehålla olika typer av svällande mineral. Speciellt kan sedimentära bergarter innehålla svällera, smektit. Uttorkning av detta berg kan ge krympning. På lång sikt kommer den alkalina miljön bryta ned dessa leror som därmed förlorar sin svällförmåga.

Karbonater reagerar svagt med cementpastan genom att det bildas karboaluminatföreningar vid ytan som ger bättre bindning.

2.3.3 *Angrepp från omgivande miljö*

1 Sulfatangrepp

Sulfatangreppet är komplicerat då det är en del av själva cementsystemet. I cementet ingår från början gips som reglerar den tidiga hydratationen. Dessa sulfater är emellertid förbrukade innan cementpastan stelnat. Framför allt bildas ettringit. Efter att cementpastan stelnat får det inte tillkomma flera sulfatjoner då dessa kommer att reagera med överskottet på aluminater och bilda mera ettringit. Detta mineral är rikt på vatten och därför voluminöst vilket leder till en svällning och uppsprickning av betongen. Sulfatjonerna kan komma antingen utifrån eller från ballast. I expansionscementen tillsätter man avsiktligt för mycket gips i cementet så att man även får en reglerad svällning i den plastiska och unga cementpastan.

I sulfatrik miljö används sulfatresistent cement som är cement som innehåller låga halter av aluminat som omöjliggör bildning av ettringit, normal mindre än 5 vikt-% C_3A (moderat sulfatresistent) eller mindre än 3 % C_3A (sulfatresistent cement). Sulfatangreppet kan också minskas genom att tillsätta finmald granulerad masugnsslagg eller att använda ett slagcement.

Den expansion som sulfatangreppet ger beror på mängden aluminat. Detta medför att en ren cementpasta såsom i bultbruk ger större expansion än ett vanligt bruk med filler/sand/ballast.

Då sulfatangreppet ger en expansion är den av mindre betydelse för bergbultarnas beständighet. Tvärtom kan svällningen ge en bättre infästning.

2 Thaumansitangrepp

Thumansitangreppet är en speciellt variant av det vanliga sulfatangreppet. Det sker endast vid låga temperaturer i fuktig miljö (vilket det är i tunnlar). Det sker endast i bruk med kalkballast eller kalkfiller. Karbonatjonen substituerar för aluminatjonen i ettringit vilket ger thaumansit. Detta gör att en blandning med sulfatresistent cement inte längre är sulfatrestistent. Thumansitangreppet kommer då det är ett svällande angrepp inte skada bergbultarna.

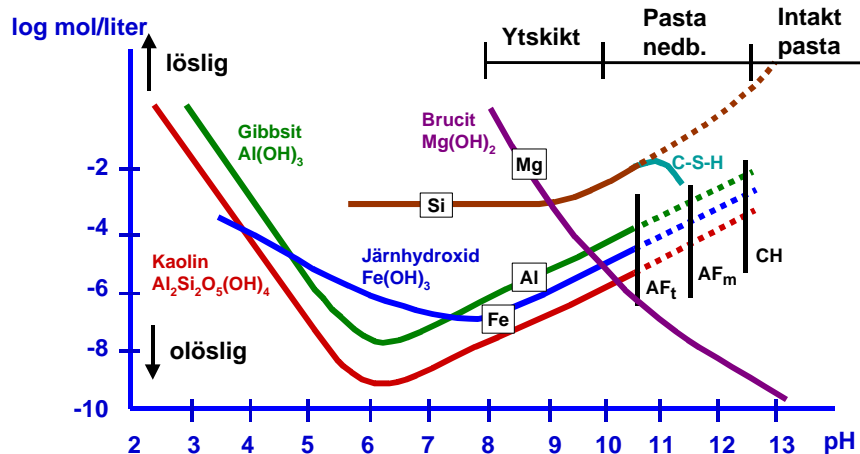
3 Surt angrepp

Oxidation av sulfider kan i berg ge upphov till sura sulfatrika lösningar. Det finns därför en möjlighet till surt angrepp.

I princip utsätts all cementpasta i kontakt med vatten för ett surt angrepp eftersom pH inne i den är över 12.5. Vid lägre värden går först portlandit och sedan C-S-H i lösning. Ettringit är endast stabilt vid pH-värden på över 10.5. (monosulfat > 11.5). Vid vanlig lakning som behandlas i (kapitel 4) bildas en skyddshinna av utfälld silika och metallhydroxider. Vid surt angrepp angrips även dessa vilket gör att upplösningen blir mera fullständig (Fig.1). Vissa svaga organiska syror ger också en mera fullständig upplösning då de bildar vattenlösliga salter med metallhydroxiderna. Andra syror bildar emellertid olösliga salter som bildar en skyddshinna. Man måste därför alltid analysera vilken syra som kan förekomma och vilken effekt denna ger.

I figur 1 redovisas lösligheten av olika i cementpasta ingående komponenter vid olika pH.

Cementkomponenters löslighet i vatten vid olika pH



Figur 1. Lösighet av metallhydroxider och cementkomponenter vid olika pH-värden. Vad vi kan observera från höger är. I opåverkad cementpasta buffras pH-värdet av portlandit (CH) vilket ger ett pH-värde på ca 12.4. Under detta buffras pH-värdet av nedbrytning av cementgel (C-S-H) som är helt upplöst vid ca pH 10 och övergår till en silica-gel. Vid ca pH 11.5 löses monosulfat upp och vid pH 10.5 löses ettringit upp. Magnesiumhydroxids löslighet minskar vid förhöjd pH vilket resulterar i en utfällning. Järn- och

aluminiumhydroxidernas löslighet minskar till pH 6 varefter lösligheten ökar. Vid ett pH-värde mindre än 4 (surt angrepp) ökar cementpastans nedbrytning kraftigt till del beroende på att aluminat och järnjonerna i ytskiktet går i lösning.

4 Övriga komponenter i bergvatten.

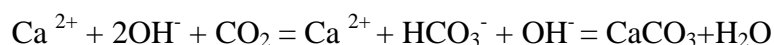
Bergvatten kan även innehålla Mg, Cl och nitrat, nitridjoner. Magnesiumjonerna binds till cementpastan vilket ger en viss svällning. Kloridjonerna ökar upplösningshastigheten något men det påverkar inte cementpastans stabilitet i sig.

5 Karbonatisering

Bergvatten innehåller bikarbonatjoner och luft innehåller koldioxid. Karbonatjonerna reagerar med kalciumjonerna i cementpastan och det bildas kalcit. Reaktionen är relativt volymsneutral och produkten är stark varför detta i sig inte påverkar bergbultarnas stabilitet. Reaktionen sänker dock pH-värdet vilket gör stålet mera korrosionsbenäget.

Det finns emellertid även en annan effekt. Cementpasta i kontakt med vatten kommer att höja pH-värdet i sin omgivning. Kalcits löslighet minskar vid förhöjd pH. Bergvatten är oftast mättat på kalcit. Höjningen av pH-värdet kommer därför att resultera i att det faller kalcit på brukets yta och i sprickor där vattnet har förbindelse med cementpasta. Detta är emellertid endast en fördel då det ökar kontaktzonens styrka och minskar bergets permeabilitet.

Cementpasta reagerar även med koldioxid från luft. Denna tränger in i betongen och reagerar med först CH sedan C-S-H. Detta resulterar i en kraftig sänkning av pH-värdet vilket gör att det tidigare av passiverade stålet kan börja korrodera.



För att kunna omvandla cementpastan måste koldioxid tränga in i betongen. Detta gör den framför allt genom gasdiffusion i cementbrukets kapillärsystem.

Karbonatiseringshastigheten bestäms av;

- Diffusionshastigheten för CO₂
- Cementpastans förmåga att absorbera CO₂
- Omgivningens halt av CO₂

Diffusionshastigheten för CO₂ beror på porositeten och hur fyllda porerna är med vatten. Helt vattenmättad cementpasta karbonatiserar mycket långsamt. Karbonatiseringen blir också mycket långsam i torr miljö då karbonatiseringsmekanismen fordrar vatten.

I berggrum är luftfuktigheten hög och pastan relativt vattenmättad vilket gör karbonatiseringshastigheten låg.

Liksom lakningen och kloridangreppet styrs karbonatiseringen av Fick's lag och hastigheten avtar med roten ur tiden då koldioxiden måste penetrera genom en allt tjockare skorpa av redan karbonatiserad pasta. För en tät cementpasta (vct < 0.4) kommer karbonatiseringsdjupet att bli mindre än 10 mm på hundra år. Förhöjda halter av koldioxid kommer att öka angreppsdjupet något.

Karbonatisering ger en svag krympning men den karbonatiserade pastan har i sig en god styrka.

6 Kloridangrepp

Klorider depassiverar stålet vilket gör att det kan oxideras inne i cementpasta. Kloriderna tränger in i betongen genom porsystemet vilket gör att det fordras fukt. För att börja rosta krävs i allmänhet halter på över 0.3 vikt % räknat på cementvikten. Dessutom fordras syretillförsel för att ge korrosion. I sig fördärvar kloriderna inte cementpasta ens i höga halter.

Klorider tränger genom cementpasta antingen genom diffusion eller genom perkulerande vatten. Som lakning bestäms hastigheten av Fick's lag (se kapitel 4), dvs hastigheten bestäms av koncentrationsgradienten och inträngningshastigheten avtar med roten ur tiden. Problem med klorider kan uppkomma i marin miljö och om vattnet är rikt på vägsalter.

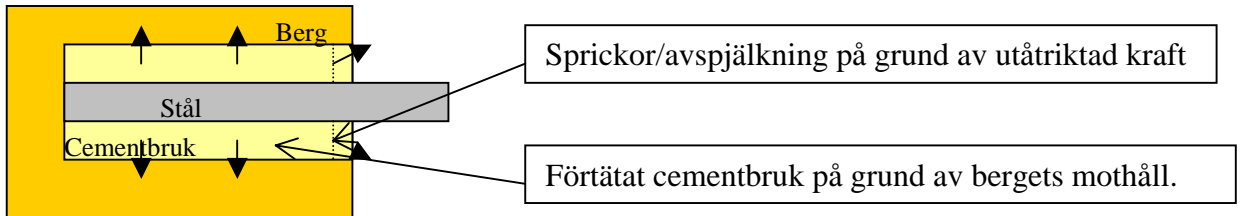
7 Frost

I en del tunnlar kan det föreligga risk för frost. Cementpasta innehåller en del fritt vatten i både kapillärsystemet och i porer. Då vatten fryser sker en volymsökning som kan spräcka cementbruket. Cementpasta med ett lågt vct innehåller dock ganska små mängder fritt vatten vilket minskar risken. Med ett vct under 0.3 anses risken för frostsador vara liten. Inspänt i berget ger frysningen upphov till en tryckförhöjning som motverkar själva iskristallbildningen och frosten kan därmed inte skada. Man måste dock beakta den utgående kraften och avspjälkning i själva mynningen. Frostsadorna kan förhindras genom att tillföra luftporer som fungerar som expansionskärl och därmed förhindrar kristallsprängning.

2.3.4 *Diskussion*

I ett väl injekterat hål med cementbruk som helt fyller ut hålet kommer cementpastan att skydda stålet och det uppstår inga korrosionsproblem. De flesta för betong vanliga skademekanismer, såsom sulfatangrepp, ASR, frost etc, leder till en expansion vilket inte är något större problem då cementbruket är inspänt i berg. Man kan dock förvänta vissa skador i mynningarna av borrhålen. Här kan skademekanismerna ge delaminering som åter sig inåt och frilägger stål. Man måste dock här beakta att korrosionen i sig i berget ger en volymsökning som ökar inspänningen och därmed tätheten. Detta i sin tur ger mindre möjlighet för syre att tränga in vilket minskar korrosionen. Som i övriga fall är det, såtillvida berget inte spricker, främst cementbruket och stålet i mynningarna som påverkas.

Genomgången av de kemiska skademekanismerna visar att det egentligen endast är lakning som är allvarlig. Även vid dålig ingjutning kommer de svällande "skademekanismerna" ge en förtätning. Lakningen behandlas därför i ett eget kapitel nr 4.



2.4 Lakning

Vid lakning skiljer man mellan penetrativt angrepp och ytangrepp. Om vatten kan penetrera cementbruket beror på trycket och cementbrukets porositet/sprickighet. I sprickfritt cementbruk med lågt vct sker lakningen från ytan. Med kemiska termer blir angreppet diffusionsstyrkt, dvs utbytet mellan pastan och omgivande vatten sker genom jonrörelse i cementpastan och dess omvandlingsprodukter. I en spricka lakas cementpastan från dess väggar på samma sätt. De styrande parametrarna är därför den yta som vattnet är i kontakt med och hur mycket detta vatten kan transportera bort.

2.4.1 Diffusionsstyrkt angrepp

Det diffusionsstyrda angreppets hastighet bestäms av koncentrationsgradienten mellan vattnet och porlösningarna inne i cementbruket. Styrande faktorer är omgivande vattens sammansättning, omvandlingskiktets tjocklek och det i cementpastan liggande (porlösningen) vattnets sammansättning. Diffusionshastigheten avtar med tiden då jonerna måste passera genom sina egna omvandlingsprodukter. Det starkaste angreppet sker i början när omvandlingsskiktet är tunt och när vattnet snabbt omsätts så att det inte mäts av upplösningssprodukter. Då omvandlingsprodukten (genom vilken diffusion sker) blir allt tjockare avtar lakningshastigheten med roten ur tiden.

Den diffusionstyrda lakningen sker i enlighet med Fick's första lag,

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

där J är nettotransporten av utlösta komponenter genom en yta och (dc/dx) är koncentrationsgradienten. D är en konstant.

Man måste emellertid även beakta koncentrationsförändringen genom omvandlingsprodukten. Detta görs genom Fick's andra lag

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

En annan svårighet är att det skyddande lagret av restprodukter ändrar sina egenskaper med tiden. Lakningen ger zoner med inåt vandrande gränzoner vars tjocklekar och porositet bestämmer hastigheten. Med hänsyn taget till dessa vandrande zoner kan Fick's andra lag skrivas om som

$$\frac{\partial [Ca]}{\partial t} = D \frac{\partial^2 [Ca]}{\partial x^2} - \frac{a}{\phi} ([Ca_{eq}] - [Ca])^n$$

Där Ca beskriver kalciumkoncentrationen hos den lokala porlösningen i en zon och ϕ är porositeten i denna zon, t är tiden, D är diffusionskoefficienten för kalcium i zonen, n är

reaktionsordningen och a är en reaktionskonstant. Koncentrationen av Ca $[Ca]_{eq}$ sjunker från lakningsfronten inne i bruket ut mot ytan och det omgivande vattnet.

Som vi kan se ur formlerna styrs lakningshastigheten av den initiella och den orsakade porositeten och de olika lösligheterna av de ingående komponenterna. Om det är en pasta eller betong betyder inget för lakningsdjupet då lakningshastigheten styrs av den yta som är i kontakt med vatten och minskar med mängd ballast.

Det finns experiment som har undersökt lakningshastigheten hos bruk med olika vct/porositet. På uppdrag av SKB har CBI även undersökt lakningshastigheten hos gammal betong i kontakt med vatten. Med en bra kvalitet på cementbruket och ett rent diffusionsstyrt angrepp bli lakningen i normalt bergvatten under 10 mm på 100 år. Detta medför att om man kan förhindra penetration blir effekten mycket liten.

2.4.2 *Penetrativt angrepp*

Cementbaserade produkter är porösa. Porositeten beror på det ursprungliga vatten/cement talet (vct) och hydratationsgraden. Vatten kan därför tränga igenom betong speciellt om det hade ett högt vct från början och vattnet befinner sig under tryck. Vid penetrativ lakning löses först portlanditen, $Ca(OH)_2$, ut vilket ökar porositeten och därmed genomsläpligheten.

Permeabiliteten beräknas enligt Darcys lag

$$q_w = -K \frac{dP_w}{dx}$$

där q_v = flöde m^3/m^2 s

K = permeabilitetskoefficienten

Permeabilitetskoefficienten bestäms av vct och eventuella sprickor

$$\frac{dP_w}{dx} = \text{Tryckgradient(vattenpelare)}$$

Från flödet och mängden utlöst material kan man beräkna upplösningshastigheten och sätta denna i relation till styrkeförlusten. Porositeten ökar när komponenter löses ut vilket påskyndar nedbrytningen. Kvarvarande cementkorn ger en viss bufferteffekt då hydratationen av dem medför att de kan tappa halva sin vikt (framför allt kalcium) utan att det ger upphov till ökad porositet.

2.4.3 *Nedbrytning i sprucket cementbruk.*

I sprickfritt bruk sker praktiskt taget ingen vattengenomträngning vid ett vct < 0.6. I allmänhet leder sprickor med en vidd av mer än 0.2 mm vatten. Den kritiska sprickbredden

beror på vattentrycket. För att sprickorna skall kunna leda vatten måste de vara kontinuerliga eller bilda ett kontinuerligt nätverk.

För att detta skall få allvarliga konsekvenser fordras emellertid ett visst flöde, annars kommer de kvarvarande cementkornen att hydratisera och täta sprickorna. Man kommer även att få en viss förtätande effekt av utfällning av kalцит från bikarbonater i vattnet.

I ingjutningsbruket skall vct vara under 0,4 vilket gör att det alltid finns ett överskott på ohydratiserade cementkorn. För att angreppet skall bli allvarligt fordras därför mera distinkta sprickor. Sprickor med en vidd på mindre än 0.1-0.3 mm kan man anta att de självläker om inte vattentrycket är mycket högt.

Vid lakning i en spricka blir lakningen diffusionstyrt från sprickytan och nedåt i cementpasta. Angreppsytan i en sprucken cementpasta blir därför mindre än i en porös cementpasta.

2.4.4 *Diskussion*

I ett ingjutningsbruk kommer cementpasta i kontakt med vatten att laka. Den första komponenten som löses ut är portlandit, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Först efter att portlanditen lakats ur börjar de andra komponenterna destabiliseras. Cementpasta består av ca 22 volym-% portlandit varför detta kan ge en avsevärd porositetsökning.

Lösligheten för portlandit är ca 22 mmol per liter. Detta medför att man behöver 45 liter vatten för att lösa ut en mol portlandit (74 g) portlandit. Hydratisering av kvarvarande cementklinker ger också en viss fördröjning. Detta medför att ansemliga mängder vatten måste passera och ta upp kalciumjoner för att det skall bli någon effekt. Den diffusionstyrda lakningen är för långsam för att ge några allvarliga konsekvenser, för detta fordras större sprickor med flöde av vatten.

Vid lakning bildas ansemliga 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 kalk (kalciumkarbonat). Det är detta som syns som kalkutfällningar på bergytorna. I allmänhet är volymen liten även om de täcker en stor yta. Vid långsamt flöde i en spricka kommer denna kalk att läka sprickan. Det fordras därför ett ganska stort flöde i sprickan för att det skall ge allvarlig lakning.

2.5 Konsekvens-scenario analys

Det är svårt att kunna se några direkta problem med en korrekt ingjuten bergbult. Problem kan uppstå först när ingjutningen är ofullständig eller när bergvatten kan passera cementbruket och lösa ut/försvaga det.

För att kunna bestämma vad som kan ske måste man beakta olika situationer och sätta detta i relation till miljön. I denna analys bortser vi från effekten på mekanisk samverkan och ser endast på hur det kan påverka cementbrukets egenskaper och vilka konsekvenser detta ger.

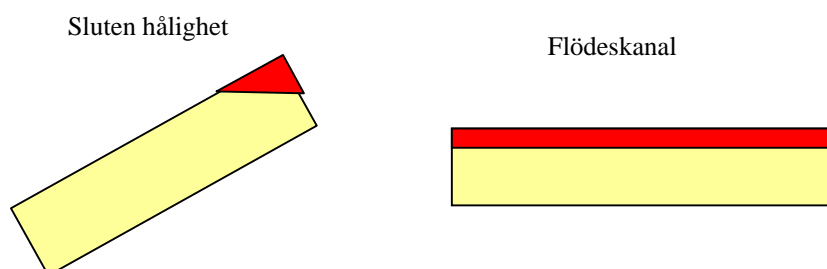
2.5.1 Ofullständig eller felaktig ingjutning

Ofullständig ingjutning resulterar i håligheter. Förutom att bindningen mellan berg och stål blir svagare resulterar dessa håligheter i att man kan få en förbindelse mellan omgivningarna och det inre av ingjutningsbruket. Konsekvensen av det beror på geometrin hos håligheten och hur den befinner sig i kontakt med omgivande miljö. Man kan i en tunnel eller ett bergrum anta att vatten rör sig ifrån berget mot öppningen. Man kan se flera olika fall;

1 Vattenseparation

Färskt cementbruk är en partikelslurry. Cement (och ballastpartiklar) är tyngre än vatten. Cementbruket måste därför proportioneras så att partikeldensiteten och krafterna mellan partiklarna blir sådana att slurryn blir stabil. Vid för högt vct eller dålig partikelkurva kommer partiklarna att sedimentera vilket ger en vattenrik överyta vid stelmandet. Detta ger antingen en flödeskanal eller en distinkt ihålighet i det stelnade cementbruket (se figur).

Detta kan ge en direkt förbindelse med den yttre miljön vilket kan leda till lakning eller karbonatisering. En hålighet kommer att fyllas med vatten. Detta vatten kommer genom lakning att bli alkaliskt och därmed förhindra att stålet rostar.



Denna situation kan uppstå om bruket är felblandat, med den kan även uppstå om hålet inte är torrt. Om det finns vatten i hålet från början kommer detta att antingen blandas med cementbruket och då höja dess vct. Alternativt kommer vattnet att bilda en separat fas

vilket ger samma resultat som vattenseparation. Då vattenseparation är styrd av gravitation kommer hålighetens utformning att styras av hållets vinkel in i berget.

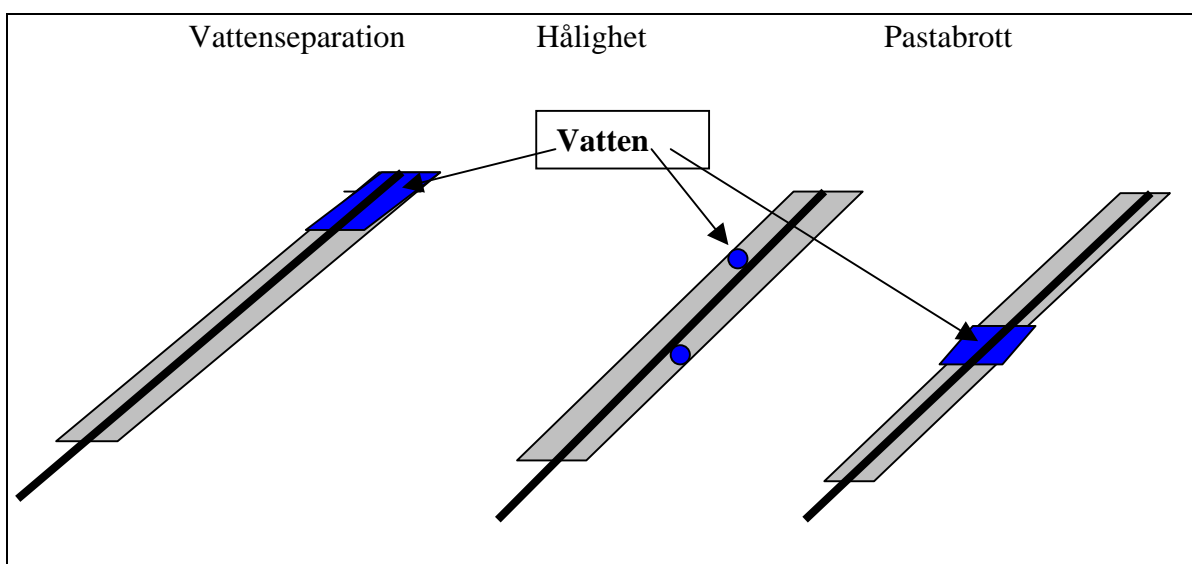
2 Håligheter

Vid för styvt cementbruk med ofullständig kompaktering etc, kan det uppkomma håligheter. Det kan bli stora enskilda hål eller många små håligheter. Konsekvensen av det beror på om de bildar ett kontinuerligt nätverk som ger förbindelse med omgivande miljö eller om det blir en isolerad hålighet. Om det är kontinuerligt kan det leda vatten vilket ger lakning.

3 Pastabrott

Vid gravitativ rörelse i det plastiska bruket kan man få en separation, dvs en del sjunker ned medan en annan blir kvar vilket resulterar i ett hålrum där stål och berg inte förbinds med cementbruk. Konsekvensen liksom i övriga fall beror på vilken förbindelse detta hålrum har med omgivande miljö. Mängden skadliga komponenter i innesluten luft eller vatten är för begränsat för att kunna leda till allvarlig korrosion. Är håligheten sluten kommer vattnet att gå i jämvikt med omgivande cementpasta och erhålla ett pH på över 12,4 vilket gör att stålet passiviseras. Om kloridhalten är hög kommer korrosionen och dess hastighet att bestämmas av syretillförsel. I en sluten hålighet är mängden koldioxid och syre för liten för att i sig kunna ge problem men karbonatisering eller korrosion.

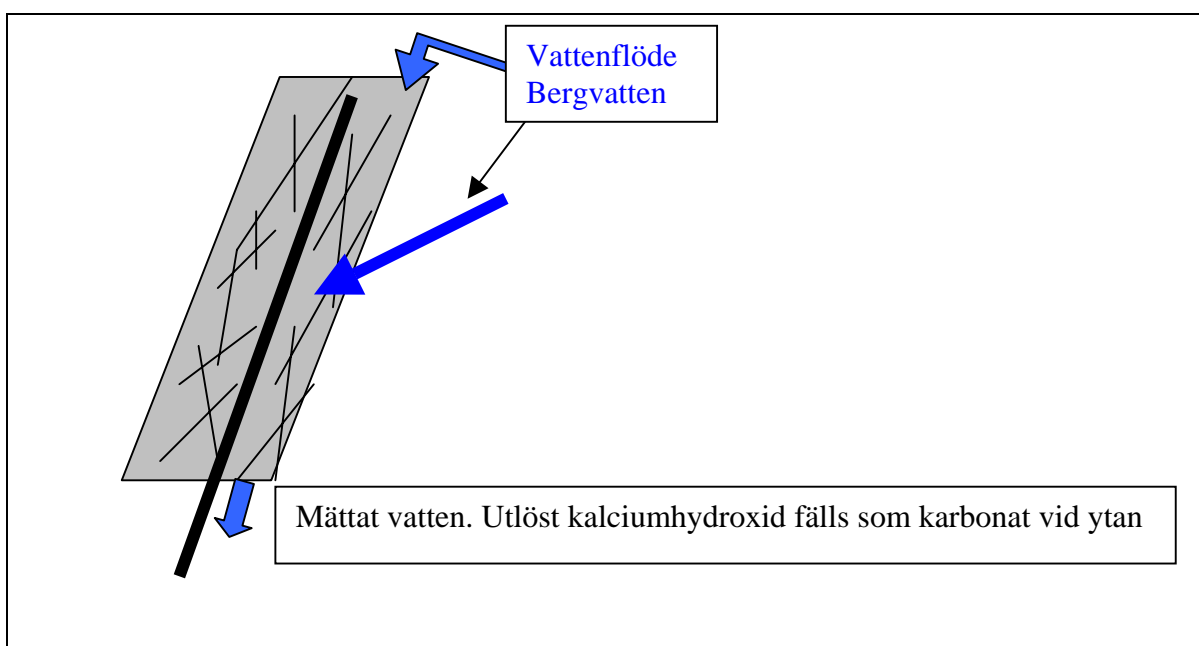
För en bedömning av faran med håligheten måste man därför beakta utbytet med omgivningarna, om håligheterna bildar en genväg för gaser och komponenter från omgivningarna.



2.5.2 Sprickor i cementbruket

Dessa kan uppkomma genom egenrörelser i det hårdnande cementbruket eller genom yttre påverkan. Konsekvensen av sprickorna beror på bredden och om de är sammanhängande. Sammanhängande sprickor får samma konsekvens som en ökad porositet, dvs de ökar möjligheten för vatten och gaser att tränga in och omvandla cementbruket och stålet. Hastigheten påskyndas av om porositeten och vattentrycket är så stort att perkulation kan ske, dvs om luft eller vatten kan röra sig i sprickorna.

I små tunna sprickor (< 0.1 mm) sker en självförtätning både vid luft och vattenkontakt. I grövre sprickor med flöde kan det leda till urlakning som sänker pH-värdet och därmed ökar risken för korrosion. Skadan kommer att beror på vattenflödet dvs hur mycket cementpasta som lakas ut. Då portlanditen lakats ut sjunker pH värdet till under 12 och järnet kan börja rosta, speciellt om vattnet anrikat cementbruket på kloridjoner. Hastigheten på korrosionen kommer att bero på vattnets syrehalt. Man kan anta att vattnet rör sig ut mot tunneln vilket gör syre tillgången begränsad. Korrosionen i sig leder till en expansion som tätar cementbruket och därmed sker en minskning av hastigheten.



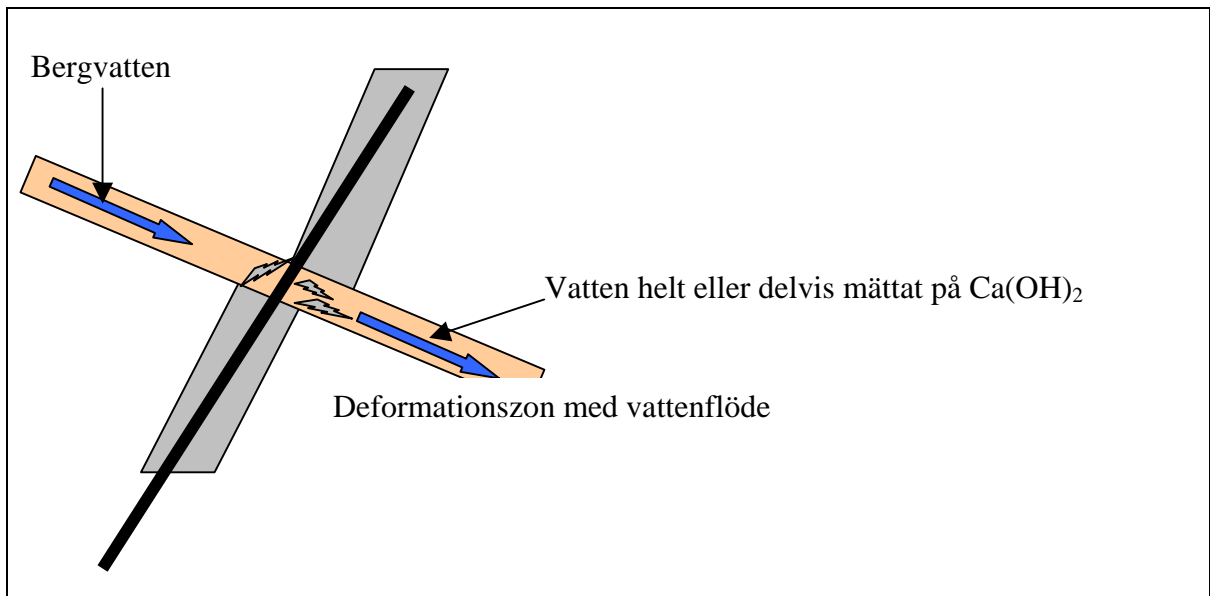
2.5.3 Bergrörelser.

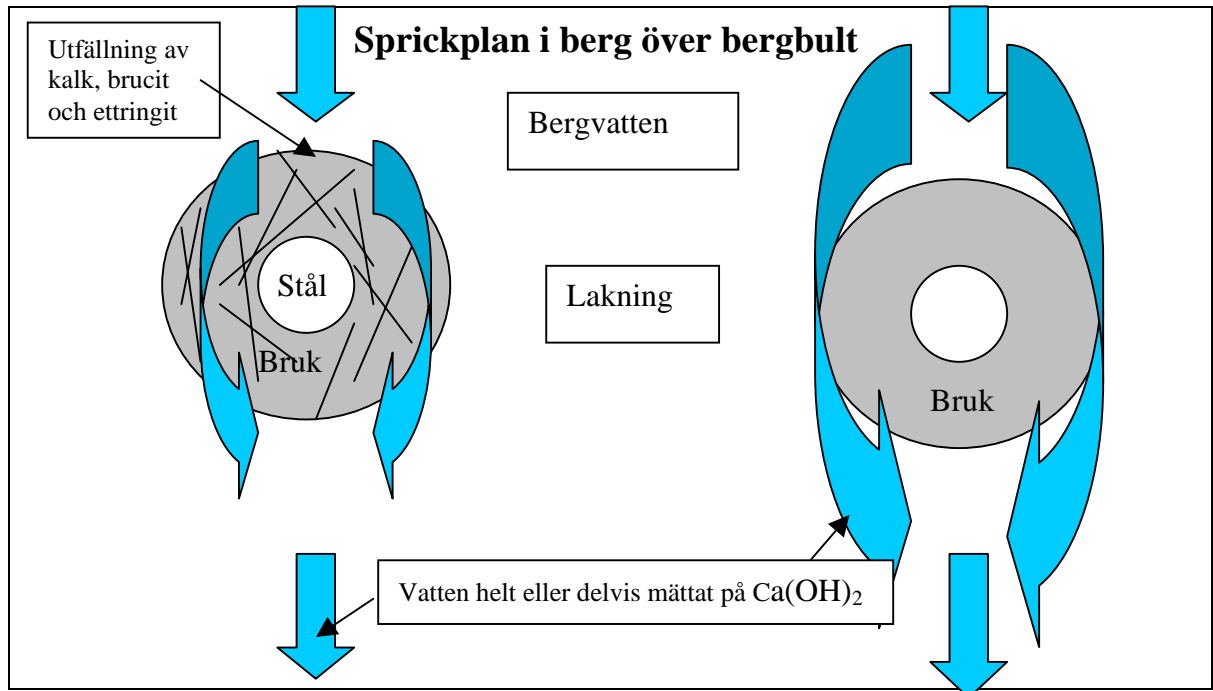
Vid berg rörelse kommer ingjutningsbruket att utsättas för deformation och kan spricka. Vid kraftig berg rörelse kan även stålet deformeras. Cementbruket är sprött vilket gör att det krossas i en zon och att själva bergbulten som är mera seg kommer att bli ocentrerad.

Om den uppkomna sprickan är vattenförande kommer detta att leda till urlakning och att stålet blir oskyddat. Om stålet inte kommer i kontakt med luft kommer dock syremängden

att vara relativt begränsad. Man kan anta att vattnet rör sig mot tunneln och att det har en begränsad mängd syre. Stål nedsänkt i vatten rostar mycket lite jämfört med stål i fuktig miljö.

Konsekvensen av lakningen beror på vattnets sammansättning och flödessituationen runt och genom cementbruket. Vid låg vattenföring i sprickan eller om huvudflödet går runt sprickan kommer överskottet av cement i cementbruket (under förutsättning av ett lågt vct) att hydrera och självläka cementbruket. Vid högre flöde/tryck kan man anta att cementbruket kommer att laka och eventuellt erodera. Sulfater blir här positivt då det ger en svällning vilket påskyndar självläkningen. Man kan även förvänta att en kalcit faller ut från bergvattnet då det kommer i kontakt med cementbruket. När cementbruket blivit tillräckligt urlakat eller kloridhalten blivit tillräckligt hög kommer stålet att börja rosta. Korrosionshastigheten kommer att beror på syrehalten i vattnet. Den farligaste situationen uppstår om det depassiverade stålet får tillgång till luft.





2.5.4 Ocentrerat stål.

Om stålet är ocentrerat i hålet kan en del av det ligga i direkt kontakt med berget. Utan vattenrörelse kommer det att ligga i vatten som är mättat på kalciumhydroxid. Det kan därför inte rosta.

2.6 Slutsatser

I den situation som en bergbult befinner sig är stålet skyddat mot korrosion av cementpastan. Det som främst kan ge upphov till problem är om cementbruket är skadat eller av någon anledning krymper då detta öppnar transportkanaler för komponenter och gaser från omgivningarna vilket kan ge korrosionsangrepp.

För att stålet skall kunna rost måste två villkor uppfyllas

Det finns tillgång till syre (och vatten) så att stålet kan oxidera/korrodera.

Cementpastan är delvis bortlakad eller karbonatiserad så att pH värdet vid stålet sjunkit. Alternativt finns så höga halter av klorider vid stålytan så att stålet kan korrodera trots ett högt pH-värde

Nästan alla kända angrepp på cementpasta ger svällning som kan skada en betongkonstruktion, men det skadar inte ingjutningsbruk då detta sitter inspänt i berg. Det enda en expansion kan ge är en avspjälkning av bruk vid mynningarna.

De fenomen som eventuellt kan ske i ett välfyllt hål är autogen (kemisk) krympning eller uttorkningskrympning. Uttorkningskrympning är mindre sannolik då bergbultarna i allmänhet befinner sig i fuktig miljö och fukttransporten är mycket låg i en tät cementpasta med lågt vct. Den autogena krympningen övergår i en svällning om vatten tillförs vilket motverkar lakning. I vattenmättad cementpasta sker gas- och jondiffusion mycket sakta. Korrosion i ett välfyllt hål kan därför endast ske i en relativt torr yttre miljö och om cementpastan av någon anledning är karbonatiserad 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 tillsätta filler och sand till cementbruket. Man kan även använda krympreducerande medel eller ett 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 cementbruket 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.

2.7 Förslag till undersökningsprogram.

Såsom diskuterats ovan kan skador uppkomma vid fel på bruk, vid ofullständig fyllning av borrhål, dåligt centrerat järn eller pålagd deformation.

Kunskapen om hur cementbruket verkligen ser ut i gamla bergbultar är bristfällig. För att få en uppfattning om detta fordras att man tar ut bergbultar och undersöker cementbrukets struktur och kemi. Med utgångspunkt från detta kan man få fram hur omgivande miljö påverkar beständigheten. Bergbultarna med cementbruk kan antingen borraras ut eller så kan ett bergparti med bergbult sågas itu så att man får olika snittytor.

Det viktigaste är att kunna se omvandlingar orsakade av miljöpåverkan. Detta syns i cementpastastrukturen som kan undersökas med tunnslip eller i svepelektronmikroskop. I svepelektronmikroskopet kan man förutom strukturen spåra eventuella kemiska förändringar.

För att förbättra bultbruk borde man närmare se på effekten av autogen krympning i den rena cementpasta som idag används och se närmare på effekten av fin ballast/filler och expansionsmedel.