

BULTARS BESTÄNDIGHET - VERIFIERING AV TVÅ KLASSIFICERINGSSYSTEM MED AVSEENDE PÅ KORROSIV MILJÖ

Chunlin Li



STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

BULTARS BESTÄNDIGHET - VERIFIERING AV TVÅ KLASSIFICERINGSSYSTEM MED AVSEENDE PÅ KORROSIV MILJÖ

**Durability of rock bolts - verification of two
classification systems with regard to the
corrosivity of environments**

Chunlin Li, Luleå tekniska universitet

SveBeFo Rapport 46

Stockholm 2000
ISSN 1104-1773
ISRN SVEBEFO-R--46--SE

FÖRORD

Nya regelverk för tunnelbyggande med krav på stora livslängder har lett till ökad uppmärksamhet på nedbrytningsprocesser hos ingående komponenter i bergförstärkning som sprutbetong och bergbultar. Det föreskrivs numera i vissa anläggningar ett särskilt korrosionsskydd utöver cementingjutning för bergbultar beroende på vilken miljö som förväntas. Samtidigt är kunskaperna begränsade om den faktiska beständigheten hos ingjutna bultar. De har använts med allmänt goda erfarenheter i en stor mängd berganläggningar men deras aktuella status har sällan kartlagts. Vissa mindre undersökningar har gjorts på utborrade bultar i Kvarntorp och sammanställningar har gjorts av boltometermätningar genomförda av Vattenfall. Vid Luleå Tekniska Universitet (LTU) har också gjorts en studie 1995 med ett förslag till klassificering av tunnelmiljöer med avseende på risk för korrosion.

Frågan om ingjutna bultars tillstånd behöver utredas ytterligare, varför SveBeFo har stött en mindre förstudie vid LTU med syfte att kartlägga miljöer vid några berganläggningar och gruvor och jämföra miljöbedömningen med tillståndet hos befintliga bultar. Föreliggande rapport redovisar resultaten av dessa undersökningar och ska ses som ett underlag för planering av fortsatta arbeten inom området.

Stockholm i december 1999

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Stålbultar används i stor omfattning som bergförstärkningselement. Ett problem med stålbultar är att de riskerar att angripas av rost speciellt i aggressiva miljöer. Fungerar bultarna fortfarande 30 eller 40 år efter installation? Hur snabbt avtar bultarnas bärförmåga p g a korrosion? Dessa frågor är viktiga att besvara för att kunna bestämma tillståndet för en bergslänt eller en underjordsanläggning där bultar används som bergförstärkningselement. För att besvara frågorna behövs kriterier som relaterar korrosivitet hos en given miljö till bultens lastbärande förmåga och tid.

Två klassificeringssystem utvecklades för miljökorrosivitet under 1995 med ekonomiskt stöd från Atlas Copco Rock Drills AB. Det första systemet är för vattenförande bergmassor och involverar sex parametrar, pH värde, syrehalt, resistivitet, temperatur, vattentillstånd i bergmassan och kalcitutfällning. Det andra systemet är för atmosfäriska miljöer och har tre parametrar, halten av såväl svaveldioxid som kväveoxider och klorid i luften, luftens relativ fuktighet och temperatur. De två systemen föreslogs i sin helhet på basis av litteraturstudier med mycket liten verifiering. Inom SveBeFos ramprogram för 1997-99 ingår ett projekt med syfte att pröva de två klassificeringssystemen genom bultinspektioner i fält. Rapporten redovisar resultatet av arbetet. Fältstudier som genomfördes i programmet inkluderade tre gruvor och tre civila tunnlar. Rostade bultar i varierande åldrar fotograferades samt temperatur och relativ fuktighet i gruvorterna och tunnlarerna mättes. Vattenprover samlades in i fält och analyserades senare med bärbar mätutrustning. Dessa mätdata användes för att klassificera de besökta områdena enligt de två klassificeringssystemen. Därefter kontrollerades om klassificeringen stämde med bultarnas rostningsgrad.

Fältinspektionerna visar att förekomst av vatten är avgörande för bultars korrosion. Bultar är i torra miljöer opåverkade av korrosion under en lång tid. I våta miljöer kunde bultar korrodera snabbt. Bultar kan även bli allvarligt korroderade i fuktig luft. I mycket aggressiva miljöer kan även ingjutningsmedlet korrodera. Bilderna tagna i Kristineberg och Renström visar att ingjutningscementen som användes på 1960 talet har korroderat.

Klassificeringssystem I kan ge en uppfattning om aktuell korrosivitet på grund av rådande vattentillstånd i bergmassan och också om potentiell korrosivitet på basis av bergmassans kvalitet. Ordningen av de inspekterade områdena med avseende på aktuell korrosivitet enligt system I är som följande från hög till låg: Kristineberg → Renström → Vietas → Malmberget → Ormberget och Glödbberget. Denna ordning passar bra med vad som sågs i fält. Det verkar som om system I rimligt kan klassificera en miljö med avseende på korrosivitet. Verifieringen har visat att klassificeringssystem II inte är tillräckligt känsligt för att skilja på olika miljöer. Alltså har detta system modifierats för att ge en rimlig klassificering för en given atmosfärisk miljö.

För att utveckla en metod som kan nyttjas för att bestämma bultsbeständighet föreslås fortsatt arbete för att etablera ett förhållande mellan bultars bärformåga, miljökorrosivitet och tid. Arbetet inkluderar boltometermätning, bultfriborring, utdragsförsök och korrosionsanalys av utborrade bultar.

Nyckelord: bergbult, bultbeständighet, korrosion, klassificeringssystem, miljökorrosivitet.

SUMMARY

Steel bolts are widely used for rock reinforcement today. One big problem with steel bolts is rusting, particularly in aggressive environments. When considering corrosion, one might pose the following questions, "Do bolts installed 30 or 40 years ago still work well?" and "How much load-bearing capacity is left in the bolts if corrosion has occurred?" These questions are important for constructions that use bolts as reinforcement elements, from a safety point of view. To answer the questions we need criteria that relate the corrosivity of a given environment to the load-bearing capacity of the bolts and to time.

Two classification systems were developed for the corrosivity of an environment in 1995 through a grant provided by Atlas Copco Rock Drills AB. The first system is for water-bearing rock masses and has six parameters, i.e. the pH value, dissolved oxygen and resistivity of the water, the temperature, the rock mass quality and the precipitation of calcite on bolts. The second system is for atmospheric environments and includes three parameters, i.e. the sulphur-and-nitrogen oxides and chloride ($\text{SO}_2+\text{NO}_x+\text{Cl}^-$) in the air, the relative humidity of the air and the temperature. These two classification systems were developed on the basis of a thorough literature study, but with very little verification. Therefore, SveBeFo established a project in its 97/99 research programme to verify the two classification systems through field inspections.

This report presents the results of the verification work. Field inspections were carried out in three mines and three civil tunnels. Rusted bolts of different ages were photographed. The temperature and the relative humidity in the mine drifts and the tunnels were measured. Water samples were collected in the field and analysed with portable instruments afterwards. The measurement data were used to classify the inspected areas according to the two classification systems. After that the classifications were checked to see if they agreed with the corrosion intensity of the bolts in the inspected areas. The field inspections show that the presence of water is crucial for bolt corrosion. A rock bolt can remain free from rust in a dry environment during a long period. In a wet environment it can rust rapidly. Bolts can also rust in humid air. In very aggressive environments the grouting cement can also rust. The pictures taken in Kristineberg and Renström Mines show that the grouting cement used in the 1960s has rusted badly.

Classification system I can classify the current corrosivity on the basis of the water condition in the rock mass, as well as classify the potential corrosivity according to the quality of the rock mass. The order of the inspected places with regard to their current corrosivity is as follows, from high to low: Kristineberg → Renström → Vietas → Malmberget → Ormberget and Glödsberg. This order agrees well with what we saw in the field. It seems that system I can reasonably classify rock masses with regard to corrosivity. The verifications show, on the other hand, that classification system II is not sensitive enough to distinguish different atmospheric environments. Therefore it was modified on the basis of the verifications.

In order to develop a method to determine the durability of rock bolts, further research work is suggested to establish a criterion that relates the corrosivity of an environment to the load-bearing capacity of the bolts and to time. This work would include boltometer measurement, bolt overcoring, pullout tests of the overcored bolts, and analysis of the corrosion state of the bolts.

Key words: rock bolts, durability of bolts, corrosion, classification systems, corrosivity of the environment.

INNEHÅLL

Förord	i
Sammanfattning	iii
Summary	v
1 Inledning	1
2 Uppgifter om geologi och bergmassan	3
3 Kort beskrivning av klassificeringssystemen	6
3.1 System I för vattenförande bergmassor	6
3.2 System II för atmosfäriska miljöer	9
4 Datainsamling	10
4.1 Bultinspektioner i fält	10
4.2 Mätningresultat	18
5 Korrosivitetsklassificering för inspekterade områden	23
6 Diskussioner	26
6.1 Korrosivitetsklassificering enligt system I	26
6.2 Korrosivitetsklassificering enligt system II	31
7 Slutsatser	34
8 Förslag till fortsatt arbete	35
8.1 Bestämning av bultars livslängd	35
8.2 Fortsatt verifiering av systemen I och II	35
Erkännande	36
Referenser	36
Bilaga A Ytterliga fotobilder av rostade bultar	37

1. INLEDNING

Stålbultar används i stor omfattning för bergförstärkning. De festa bultar är tillverkade av vanliga kolstål på grund av ståls höga draghållfasthet. Kolstål kan dock riskera att rosta i aggressiva miljöer. Om bultar rostar reduceras deras bärförmåga. Därmed tvingas man ibland att utnyttja antingen dyrbara bultar tillverkade av särskilt stål t ex rostfritt stål eller ytbehandlade bultar i mycket aggressiva miljöer. Det är och kommer fortsätta att vara en trend att använda vanliga kolstålbultar för bergförstärkning. I detta fall behövs någon metod att bestämma bultars beständighet i givna miljöer. Det förväntas att metoden kan beskriva hur snabbt bultars bärförmåga reduceras på grund av korrosion och hur lång tid det tar för bultarnas bärförmåga att hamna inom intervallen för tillåtna gränsen i en given miljö. En sådan metod borde innehålla klassificeringssystem för miljökorrosivitet och förhållandet mellan bultarnas bärförmåga och tid (dvs korrosionsmängden på bultarna).

Under 1994 startade Atlas Copco Rock Drills AB ett särskilt projekt om bultkorrosion. Syftet med projektet var att undersöka bultars korrosion i underjordsmiljöer samt utvärdera de huvudfaktorer som påverkar bultars korrosion. Arbetet genomfördes i huvudsak genom litteraturstudier. Två klassificeringssystem utvecklades för miljökorrosivitet, en (system I) för vattenförande bergmassor och det andra (system II) för atmosfäriska miljöer (Li och Lindblad, 1995). De två systemen föreslogs i helhet på basis av litteraturstudierna med verifiering av mycket liten datainsamling från Kirunasgruvan och Glödbergstunneln. Därmed behöver de verifieras i varierande fältmiljöer.

Inom SveBeFos ramprogram för 1997-99 ingår bultsystems beständighet som ett särskilt projekt. Första etappen av projektet syftar till att verifiera de två klassificeringssystemen genom bultinspektioner i fält. Rapporten ska redovisa resultatet av arbetet som genomfördes i den första etappen. Fältstudier genomfördes i programmet inkluderade tre svenska gruvor och tre civila tunnlar. En fördel att besöka gruvor är chansen att kunna se korrosionstillståndet av bultar på sektioner som är insatt i berget, då berget har rasat från väggar och tak vilket exponerar bultarna. Rostade bultar i varierande åldrar fotograferades och temperatur och relativ fuktighet i gruvorter och tunnlar mättes. Vattenprover samlades från fälten och analyserades senare med bärbar mätutrustning. De besökta gruvorna är fortfarande i drift idag vilket innebär att både temperatur och relativ fuktighet bibehålls på ungefär konstanta nivåer året runt. Markvatten har ingen stor påverkan på gruvvatten för vilket det kan antas egenskaperna heller varierar ej mycket året om. Därmed kan den uppmätta temperaturen, relativa fuktigheten och egenskaper av gruvvattnet antas vara representativa data för gruvorna. Temperaturen, relativa fuktigheten och vattnets egenskaper i de civila tunnlarerna kanske varierar för olika månader. Några gånger per år borde en uppföljning ske av de olika parametrarna för att få ett noggrant genomsnittligt värde. Detta har inte utförts i den första etappen. Vi antar tills vidare att uppmätta data i civila tunnlarerna är genomsnittliga värden. Med hjälp av mätdata klassificerades de besökta områdena enligt de två klassificeringssystemen. Sedan jämfördes klassificeringen med rostningsgrader av bultarna. Det har visat sig att system I ger en rimlig korrosivitetsklass för en given

miljö, men att system II inte är tillräckligt känslig att skilja på olika atmosfäriska miljöer. Därmed föreslogs en modifierad version av system II.

I följande avsnitt används termen "ort" för "tunnel" i gruvor. "Nivå" är annan term som ofta används i gruvindustrin. Nivå refererar till ett horisontellt plan underjord. I Sverige definieras nivåns siffra vanligtvis som det avstånd från nivåns plan till högsta punkten på markytan i gruvområdet. Till exempel menas nivå 250 ett plan i gruvan som är 250 m ner från högsta punkten på markytan.

2. UPPGIFTER OM GEOLOGI OCH BERGMASSAN

I avsnittet introduceras uppgifter om geologi och bergmassans kvalitet av följande områden som besöktes:

- Malmbergsgruvan, LKAB
- Kristinebergsgruvan, Boliden
- Renströmsgruvan, Boliden
- Ormbergstunneln, en gammal militär fortifikation
- Vietas tunnlar, maskinsalar i Vietas kraftstation, Vattenfall

Malmbergsgruvan

Gruvan, belägen ca. 5 km norr om Gällivare, är en av LKABs två järnmalmgruvor. Den första huvudnivån på djupet 600 m påbörjades 1969 och den tredje huvudnivån M1000 skall komma i drift år 2000. Järnmalmen är magnetit och råbergarterna består i huvudsak av leptit och granit. Leptit är en metamorf bergart som är omvandlad från sura vulkanisk bergarter, t ex tuff och lava. Den rödfärgade leptiten är dominerande i området. Temperaturen i gruvans orter varierar från 5 till 16°C. Bergarternas enaxiella tryckhållfasthet och bergmassans kvalitet index (RQD) redovisas i följande tabell (Rutqvist och Sjöberg, 1987; Beshiry, 1998):

Bergart	σ_c (MPa)	RQD (%)
Magnetit järnmalm	100	30-60
Röd leptit	180-230	40-75
Grå leptit	130-180	40-75
Granit	230	40-75

Kristinebergsgruvan

Gruvan är belägen ca. 100 km väster om Boliden. Här bryts komplexmalm som innehåller koppar, bly, zink, guld och silver. Driften startades 1940 och malmbrytningen pågår på över 1000 m djup. Huvud bergarter i området är vulkaniska och sedimentära, t ex kvartsit, sericitkvartsit, kloritkvartsit, kloritskiffer. Genomsnittliga temperaturen i gruvans orter är ca. 10-15°C. RQD värdet av bergmassan varierar mellan 20% och 70%. Bergarternas enaxiella tryckhållfasthet redovisas i följande tabell (Nyström och Board, 1991; Rådberg, 1991):

Bergart	σ_c (MPa)	RQD (%) Medelvärde
Kvartsit	50-250	
Sericitkvartsit	5 – 100	60
Kloritkvartsit	low – 100	
Kloritskiffer	0.2 –50	50
Talcskiffer	0.2-1	
Malm	25-100	57

Renströmsgruvan

I Renströmsgruvan, som etablerades 1952, bryts också komplexmalm. Berggrunden i området tillhör Skellefteåfältets vulkanitserie och kan grovt delas in i sura och intermediära vulkaniter, sediment och en intermediär gångbergart. Sura vulkaniter dominerar och utgörs av lavar och tuffer. Andra bergarter inkluderar sericitkvartsiter, skiffer, dolomit, dacit och dioritporfyr. Genomsnittliga temperaturen i gruvan är ca. 14°C. RQD-värdet för bergmassan och bergarternas enaxiella tryckhållfasthet redovisas i följande tabell:

Bergart	σ_c (MPa)	RQD (%)	
		värde	medelvärde
Dolomit	100-200	23-82	60
Skiffer	100-200	45-65	46
Sericitkvartsit	100-150	23-74	50
Dacit	100-150	63	63
Kloritbergarter	20-100		

Ormbergstunneln

Ormberget är beläget i Luleå, Norrbotten. Tunneln drevs för ungefär 50 år sedan och hölls i drift som en militär fortifikation till början av 90 talet. Idag är den en allmän tunnel. Tunneln är belägen på ett djup mellan 20 och 50 m. Huvudbergarter i området är granit och gnejs med en uppskattad enaxiell tryckhållfasthet av ca. 200 MPa och ett medelvärde av RQD värdet på ca. 80%. Tunneln är ganska torr med en liten vattenföring på sommaren. Den genomsnittliga temperaturen var ungefär 20°C då tunneln hölls i drift.

Vietas tunnlarna

Vietas kraftstation är en av de tiotal kraftstationer som finns längs Luleälv. Den är belägen ca. 150 km nordväst om Jokkmokk. De besökta tunnlarna används som maskinsalar. Kraftstationen har varit i drift sedan 1971. Bergarter i området är i huvudsak av sedimentärt ursprung. Bergmassan är rik på sprickor med sprickavstånd varierande från några centimeter till ca. 2 m. Bergarternas enaxiella tryckhållfasthet uppskattas ligga i intervallet från 100 till 200 MPa med ett RQD-värde för bergmassan på ungefär 60-80%. Vattnet droppar mycket i några tunnelsektioner, men vattenföringen uppskattas i genomsnitt vara mindre än 1 liter per minuten, inom en 10 m lång tunnelsektion. Temperaturen i tunnlarna hålls ca. 14°C.

3. KORT BESKRIVNING AV KLASSIFICERINGSSYSTEMEN

Ett befintligt klassificeringssystem för att bedöma jordmaterials korrosivitet är DIN 50 929 part 3 (1985). Det är en tysk standard innehållande tolv parametrar, vilka är:

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. jordtyp | 8. sulfathalt [SO_4^{2-}] |
| 2. jords resistivitet | 9. läge av strukturen i förhållande till grundvatten |
| 3. vattenhalt | 10. jords homogenitet (horisontell) |
| 4. pH värde | 11. jords homogenitet (vertikal) |
| 5. buffertkapacitet | 12. strukturen/jord potentiell |
| 6. sulfid halt [S^{2-}] | |
| 7. salthalt | |

Varje parameter bedöms/mäts och ett värde mellan -12 och $+4$. Poängen av alla parametrarna adderas och detta leder till ett korrosivitetsindex, B_0 . Som en allmän standard tar den tyska standarden hänsyn till många parametrar, vilket gör det komplicerat att utföra en bedömning av korrosiviteten för en given miljö. Det finns önskemål om ett enklare system som bygger på tanken att ett mindre antal och lättare mätbara parametrar ska användas i systemet. Genom en grundlig litteraturstudie valde Li och Lindblad (1995) ut några viktiga parametrar som påverkar bultars korrosion och utvecklade två klassificeringssystem med en poängsättningsmetod lika den som användes för den tyska standarden. Den första systemet benämns som system I som är för vattenförande bergmassor och den andra benämns som system II som är för atmosfäriska miljöer.

3.1 System I för vattenförande bergmassor

Det här klassificeringssystemet gäller en bergmassa som innehåller vatten. Sex parametrar används i systemet. Tre av dem är relaterade till vatten, vilka är pH värdet, syrehalt och resistivitet av vatten. De kallas huvudparametrar därför att de avgör korrosionens intensitet. De resterande parametrarna, vilka är temperatur och bergmassans kvalitet samt kalcitutfällning på bultar, kallas influerande parametrar. Temperatur respektive kalcitutfällning på bultar kan öka eller minska hastigheten av bultarnas korrosion. Bergmassans kvalitet, särskilt sprickor i bergmassan, bildar kanaler för vattenföring och ökar därför potentialen till att bultar korroderar. Likt den tyska standarden poängsätts alla parametrarna förutom kalcitutfällningen. Indexet W_{sat} erhålls genom följande beräkning:

$$W_{\text{sat}} = (N_{\text{pH}} + N_{\text{O}_2} + N_{\text{R}}) \times K_t \times K_R \quad (1)$$

där W_{sat} = index för miljöns korrosivitet,
 N_{pH} = poäng för pH värdet,
 N_{O_2} = poäng för syrehalt,
 N_{R} = poäng för resistiviteten,

K_t = faktor för temperaturen och
 K_t = faktor för kalcitutfällningen.

Poängsättning av enskilda parametrarna redovisas i Tabell 3.1. Korrosivitetsklassificering enligt indexet W_{sat} sammanställs i Tabell 3.2. Klass nummer bestämde enligt indexet W_{sat} behöver nersättas en klass när kalcitutfällningen inträffar på bultar. Till exempel bestäms en miljö att tillhöra klass III enligt indexet W_{sat} . Om det är möjligt att kalcitlager blir bildade på bultar, dvs $K_{Ca} = -1$ enligt Tabell 3.1, bör den slutliga klassen nersättas till klass II.

Det är ibland svårt att bestämma bergmassans kvalitet endast enligt en parameter, t ex RQD, därför att parameterns värde inte alltid är tillgänglig. Alltså ges fyra alternativa sätt i Tabell 3.1 för att sätta en poäng till bergmassans kvalitetsfaktor, K_R . Alternativ (a), dvs vattenföringen i tunneln, prioriterar de andra tre alternativa för att bestämma värdet för K_R .

Tabell 3.1 Poängsättning av enskilda parametrarna för klassificeringssystem I.

Parameter	Värde					
Huvudparametrar						
1	pH värde	>11	11-9	9-7	7-5	<5
	Poäng, N_{pH}	0	1	2	3	4
2	Syrehalt (ppm)	<1	1-2	2-4	4-7	>7
	Poäng, N_{O_2}	1	2	3	4	5
3	Resistivitet (Ω -cm)	>10 000	10 000-2 000	2 000-1 000	1 000-500	<500
	Conductivitet (μ S/cm)	<10	10-500	500-1 000	1 000-2 000	>2 000
	Poäng, N_R	0	0.25	0.5	1	2
Influeraende parametrar						
4	Temperatur Faktor, K_t	$K_t = 2^{\left(\frac{T-20}{10}\right)}$, (T= 0 - 60°C)				
5	Bergmassans kvalitet	Mycket bra	Bra	Acceptabelt	Dåligt	Mycket dåligt
	(a) Vattens inflöde per 10 m tunnels längd, (l/min)	< 1	1 - 10	10 - 25	25 - 125	> 125
	(b) Sprickors avstånd	>2 m	2-0.6	0.6-0.2	0.2-0.06	<0.06
	(c) RQD	100-95	95-75	75-50	50-25	<25
	(d) RMR	I	II	III	IV	V
	Faktor, K_R	1	1.25	1.5	1.75	2
6	Kalcitutfällning Faktor, K_{Ca}	Icke			Ja	
		0			-1	
Redox potentialen tros en lämplig parameter för att ersätta parametrarna pH värde och syrehalt i framtiden. Den har följande beskrivning om jordmaterials korrosivitet (Shreir et al., 1994):						
	Redox potential (mV)	>400	400-200	200-100	<100	
	Beskrivning av korrosivitet	ingen	liten	moderate	allvarlig	

Tabell 3.2 Indexet W_{sat} och motsvarande korrosivitetsklass nummer i system I.

Index, W_{sat}	<2	2-4	4-7	7-10	>10
Klass Nr.	I	II	III	IV	V
Beskrivning av korrosivitet	ingen eller mycket liten	liten	måttlig	allvarlig	mycket allvarlig
Referens korrosions hastighet av kolstål (mm/år)	<0.05	0.05-0.10	0.10-0.15	0.15-0.30	>0.30

* Justering av Klass Nr. av kalcitutfällnings faktor: Klass Nr. nedsätts en klass när $K_{Ca}=-1$.

3.2 System II för atmosfäriska miljöer

Ståls korrosion i luften påverkas i huvudsak av såväl svaveldioxid som kväveoxider och klorid ($\text{SO}_2 + \text{NO}_x + \text{Cl}^-$) i luften som relativ fuktighet av luften. Indexet för luftens korrosivitet beräknas enligt:

$$W_{\text{atm}} = N_{\text{ox}} \times N_{\text{rh}} \times K_t \quad (2)$$

där W_{atm} = index för luftens korrosivitet,

N_{ox} = poäng för halten av såväl svaveldioxid som kväveoxider och klorid i luften,

N_{rh} = poäng för relativa fuktigheten av luften och

K_t = faktor för temperaturen.

Poängsättning av enskilda parametrarna redovisas i Tabell 3.3. Korrosivitetsklassificering enligt indexet W_{atm} sammanställs i Tabell 3.4.

Tabell 3.3 Poängsättning av enskilda parametrarna för klassificeringssystem II.

Parameter	Värde			
	Lantluften	Stadsluften	industri- och sjöluften	
1 $\text{SO}_2 + \text{NO}_x + \text{Cl}^-$				
(a) Nedsättnings hastighet, ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{dag}$)	<20	20-100	100-200	>200
(b) Koncentration, ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<100	100-200	200-350	>350
Poäng, N_{ox}	1	2	3	4
2 Relativ fuktighet (%)	<60	60-75	75-100	dagg
Poäng, N_{rh}	0	1	2	3
3 Temperatur Faktor, K_t	$K_t = 2^{\left(\frac{T-20}{10}\right)}$,			($T = 0 - 40^\circ\text{C}$)

Tabell 3.4 Indexet W_{atm} och motsvarande korrosivitetsklass nummer i system II.

Index, W_{atm}	0-6	6-10	>10
Klass Nr.	I	II	III
Beskrivning av korrosivitet	ingen eller mycket liten	liten	måttlig till allvarlig
Referens korrosions hastighet av kolstål ($\text{mm}/\text{år}$)	<0.05	0.05-0.10	>0.10

4. DATAINSAMLING

4.1 Inspektioner av bultar i fält

Bultar i gruvorna och civila tunnlar inspekterades och fotograferades. I följande redovisas del av de fotograferade bultarna med detaljerade beskrivningar. Resterande fotobilder av bultar som rostade sammanställs i Bilaga A.

Malmbergsgruvan

Figur 4.1 En cementingjuten bult i en ort på nivå 250 i Malmbergsgruvan. Orten drevs i början av 1950 talet. Bergytan är idag våt idag. Bultens ålder är ungefär 15 år. En stor del av bulten är idag exponerad i luften på grund av bergras i väggen. Måttlig korrosion har inträffat över hela bultens yta.

Figur 4.2 Armeringsstänger i en betongvägg i orten på nivå 250 i Malmberget. Betongväggen byggdes möjligen under tiden då orten drevs i början av 1950 talet. Det kan sägas, på grund av den relativa färskheten på betongytan, att stängerna har varit exponerade i luften under en kort tid. Det kan ses att stängerna har blivit utsatt för ganska liten punktkorrosion i den torra förhållandet (se bilden a), men yttlig korrosion har inträffat på stängernas yta i det våta förhållandet (se bilden b).

Figur 4.3 Två cementingjutna bultar på nivå 350 i Malmbergsgruvan. Orterna på denna nivå drevs i mitten av 1960 talet. Bultarnas ålder är ungefär 15 år. Det syns att berget har varit i ett torr förhållande under en lång tid. Det finns inte synliga sprickor på bergytan och gruvvattnet har liten chans att rinna till bultarna. Bultarna är lätt korroderade på ytan.

Figur 4.4. En cementingjuten bult på nivå 350 i Malmberget. Bultens ålder tycks vara samma som orterna på nivån, dvs ungefär 35 år. Vad vi ser i fotobilden är bultens utstickande del som har korroderat i gruvluften. Korrosionen är allvarlig över hela den utstickande delen och har nått ett djup av några millimeter. Dessutom är ingjutningscementen vid borrhålets mynning också korroderade.



Figur 4.1



Figur 4.2 (a) Torra betongytan



(b) Våt betongytan



Figur 4.3



Figur 4.4

Figur 4.5 Bultar i en ort som drevs i mitten av 1970 talet på nivå 400 i Malmbergsgruvan. De två bultarna som pekas ut i fotobilden är expanderande bultar och tros ha monterats vid tiden när orten drevs, det vill säga, ungefär 25 år gammal. Bultarnas yta har direktkontakt med gruvluften under hela livslängden eftersom bulthålen inte fylls av ingjutningsmedel. Mörkbruna korrosionen inträffar på bultarnas brickor och även över hela bulten. Den allvarliga korrosionen har åstadkommit en mycket rå yta över bultens hela längd. De tredje bulten med triangelbricka är cementingjutna bultar och tros att installerats senare efter drivning av orten för att förstärka den originalförstärkningen. Korrosionen på denna bults bricka har röd färg. Den är obetydligt korroderade i jämförelse med korrosionen på de originalbultarna.

Kristinebergsgruvan

Figur 4.6 En cementingjuten bult på nivå 170 i Kristineberg. Orterna på denna nivå var i produktion mellan 1939 och 1940. Bultens ålder är ungefär 55 år. Berget kring bulten utgör idag under torrt förhållande. Bulten korroderar mycket allvarligt. Bultbrickan och även bultens sektion som är ingjuten i berget har korroderat till ett djup av några millimeter. Stora korroderade bitar kan skrapas ner med en handkniv. Det uppskattas att ungefär 20-30% av bultens tvärsnitt har korroderats bort. Dessutom har ingjutningscement också korroderat till ett mjukt material.

Figur 4.7 En cementingjuten bult på nivå 170 i Kristineberg. Bultens ålder är ungefär 55 år. Berget kring bulten är idag torrt. Bulten är mycket allvarligt korroderad. Bitar som rostade kan skrapas ner med en handkniv.

Figur 4.8 En cementingjuten bult på nivå 490 i Kristineberg. Orterna på denna nivå var i produktion år 1966. Bultens ålder är nästa 35 år. Berget kring bulten är idag torrt. Bulten är allvarligt korroderade. Den vita färgen vid borrhålets mynning tyder på att även ingjutningscementen har korroderat.

Figur 4.9 En cementingjuten bult på nivå 690 i Kristineberg. Orterna på denna nivå drevs 1973. Bultens ålder är mer än 25 år. Berget kring bulten är idag torrt. Bulten korroderar mycket allvarligt. Korrosionen på bultytan är sprucken och delar av ytskiktet har släppt. Den vita färgen vid borrhålets mynning tyder på att ingjutningscementen har korroderat.



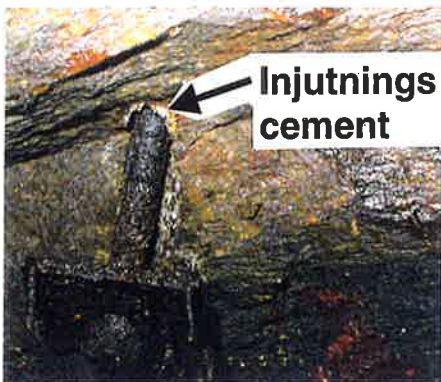
Figur 4.5



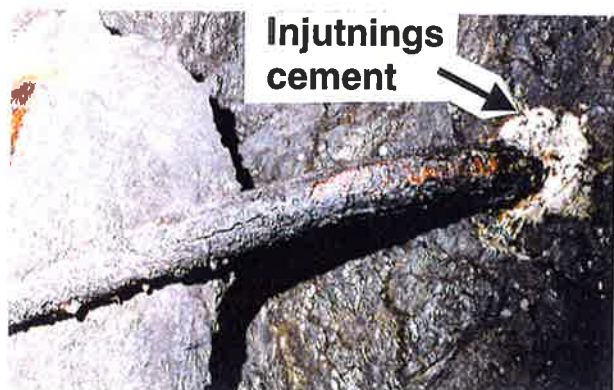
Figur 4.6



Figur 4.7



Figur 4.8



Figur 4.9

Figur 4.10 En cementingjuten bult på nivå 690 i Kristineberg. Bultens ålder är mer än 25 år. Berget kring bulten är idag torrt. Bulten är mycket allvarligt korroderad. Ingjutningscementen har korroderat till ett mjukt lerliknande material.

Figur 4.11 En cementingjuten bult på nivå 1004 i Kristineberg. Orterna på denna nivå var i produktion år 1989. Bultens ålder är maximalt 10 år. Bergrasen från väggen har exponerat delar av bulten till luften. Bulten har möjligen utsatts för en våt miljö under en längre tid vilket medfört att den korroderat.

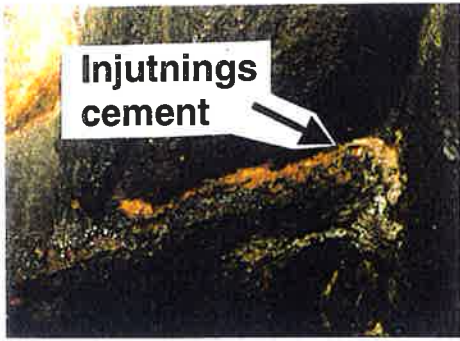
Figur 4.12 Jämförelse av bultkorrosion mellan den på bilden utpekade bulten i vått förhållande och två bultar i torra förhållandet på nivå 1004 i Kristineberg. Bultarnas ålder är maximalt 10 år. Den bruna färgen är spår av rinnande gruvvattnet. Bulten insatt i det rinnande gruvvattnet korroderade allvarligt, men de två bultarna insatt i det torra förhållandet har mycket liten korrosion på brickorna trots att alla de tre bultarna monterades vid samma tidpunkt.

Renströmsgruvan

Figur 4.13 En cementingjuten bult i en tilliedningsort på nivå 650 i Renström. Orten drevs mellan åren 1959 och 1960. Bultens ålder är ungefär 40 år. Den del av bulten som exponerat ut i luften har korroderat mycket allvarligt, vilket medfört att bitar som rostade fallit ner. Dessutom har ingjutningscementen korroderat till ett mjukt material.

Figur 4.14 En cementingjuten bult i en ventilationsort på nivå 400 i Renström. Orten var i produktion mellan åren 1989 och 1990. Bultens ålder är ungefär 10 år. Bulten utsätts för ett vått förhållande. Bultbrickan har korroderat allvarligt i luften.

Figur 4.15 En cementingjuten bult i ventilationsorten på nivå 400 i Renström. Bultens ålder är ungefär 5 år. Berget kring bulten är torrt. Liten korrosion har inträffat på bultbrickan.



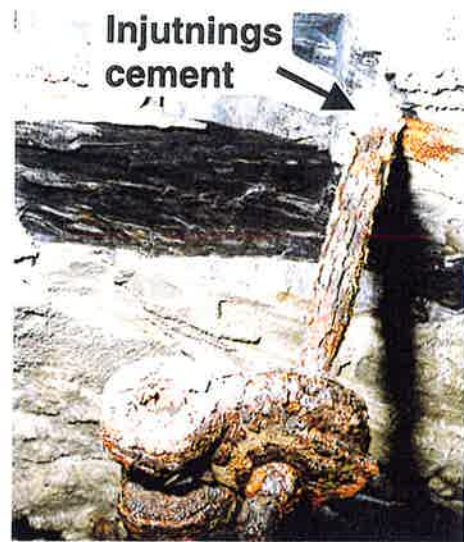
Figur 4.10



Figur 4.11



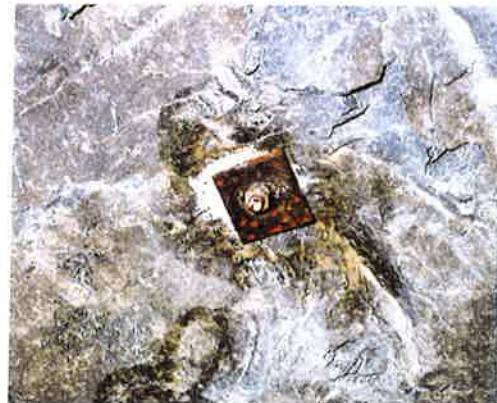
Figur 4.12



Figur 4.13



Figur 4.14



Figur 4.15

Figur 4.16 En cementingjuten bult i tilliedningsorten på nivå 650 i Renström. Bultens ålder är ungefär 40 år. Bergrasen har exponerat bulten som har korroderat mycket allvarligt. Dessutom har ingjutningscementen korroderat till vitfärgat pulver.

Figur 4.17 En cementingjuten bult i tilliedningsorten på nivå 650 i Renström. Bultens ålder är ungefär 40 år. Bergrasen har exponerat bultens inreände. Fotobilden visar klart att bulten har korroderat mycket allvarligt på den inreänden. Även ingjutningscementen har korroderat till ett vitfärgat mjukt material. Det förefaller att allvarlig korrosion har inträffat både på bulten och i ingjutningscementen längs hela bultlängden. På detta tillstånd är det möjligt att bulten har förlorat sin totala bärförmåga.

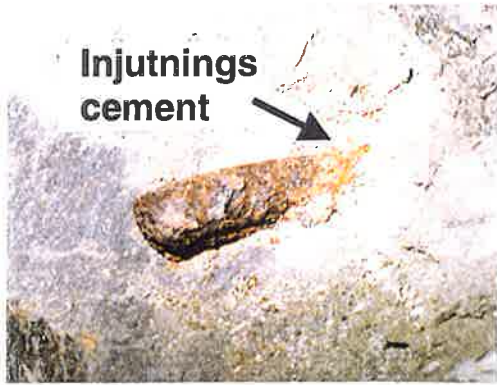
Figur 4.18 En fotobild som visar korrosion av ingjutningscement. Fotobilden togs på nivå 650 i Renström. Bulten som är insatt i borrhålet är ungefär 40 år gammal. Den korroderade bulten har redan glidit ut ur hålet. Det vit-gul färgade materialet på hålets vägg är korroderat ingjutningscement. Cementen har lösts upp och förlorat sin bärförmåga.

Figur 4.19 Nätet hängande på schaktet på nivå 650 i Renström. Nätet har hängt på platsen i över 30 år. Ståltrådens originaldiameter var 5 mm. Ståltrådarna har brutits av på många ställen på grund av korrosionen. Därmed uppskattas korrosionens hastighet ungefär 0.08 mm/år.

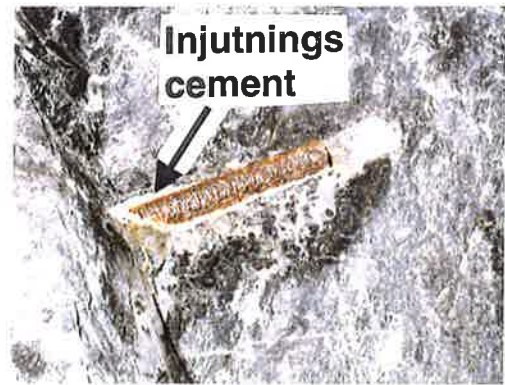
Ormbergstunneln

Figur 4.20 En stålstång spikad i tunnelväggen i Ormberget. Stången har blivit korroderad i luften under en period av ca. 30 år.

Figur 4.21 En stålspik insatt i tunnelväggen i Ormberget. Spiken har blivit allvarligt korroderad i luften under en period av ca. 30 år.



Figur 4.16



Figur 4.17



Figur 4.18



Figur 4.19



Figur 4.20



Figur 4.21

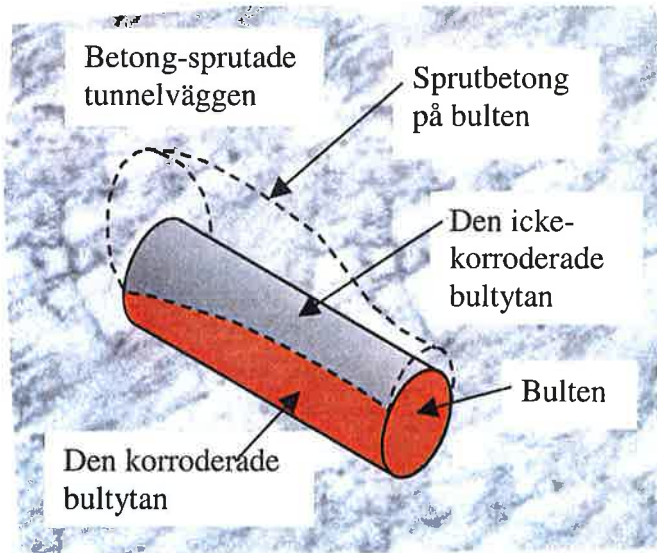
Vietas tunnlarna

Foto togs på bultar när tunnlarna besöktes, men filmen förstördes av ett misstag. Därför finns inga bultbilder att visas här. Några punkter kan dock sammanfattas. Tunnlarnas tak skrotas och bultas om det anses behövas, så att det finns både gamla och nya bultar i tunnlarna. De äldsta bultarna är ungefär 30 år gamla vilket är samma ålder som tunnlarnas. Ytlig korrosion har inträffat på bultarnas brickor och utstickande ändar. En stålstång som står mot tunnelväggen i ett vått förhållande har korroderat allvarligt. Korrosionstillståndet av stången är liknande det som visas i Figur 4.13. Det visade sig att mer än 3 mm stål har korroderat på stångens yta, vilket betyder att korrosionshastigheten är mer än 0.1 mm/år.

Den mest intressanta bulten var en cementingjuten bult insatt i tunnelväggen i en betong-sprutad tunnelsektion (se skissen i Figur 4.22). Bultens utstickande sektionen är ungefär 20 cm lång. Ovansidan av bultsektionen är övertäckt av sprutbetong, medan undersidan är utsatt till luften. Måttlig ytkorrosion har inträffat på bultens undersidan. Då sprutbetongen på bulten hamrades bort visade det sig att det övertäckta delen av bulten inte blir utsatt för korrosion. Betong sprutades på vid samma tidpunkt som tunneln drevs, dvs innan 1971. Därför vet vi att bulten installerades under denna tid. Sprutbetongs ytan är idag torr och det finns inget spår av vatten på sprutbetongen. Det kan sägas att bulten har varit i ett torrt förhållande sedan installation. Slutsatsen är att sprutbetong kan bilda ett fullvärdigt skydd hos bultar mot korrosionsangrepp i torra förhållande.

4.2 Mättningsresultat

Relativ fuktighet och temperatur mättes i fält. Insamlade vattenprover analyserades med utrustning som visas i Figur 4.23 och Figur 4.24. Mättningsresultat sammanställs i Tabellerna 4.1-4.6.



Figur 4.22 En skiss illustrerande korrosionstillståndet av en bult som övertäckts av sprutbetong på ovansidan och utsattes till luften på undersidan. Sprutbetongen bildade ett fullvärdigt skydd mot korrosionsangrepp i luften.



Figur 4.23 Water Test för att mäta vattens pH värde, konduktivitet (dvs resistivitet) och Redox potential.



Figur 4.24 Syremätare HI93732 för att mäta syrehalt i vatten.

Tabell 4.1 Mättningsresultat av gruvvattnet och andra miljöparametrar i Malmbergsgruvan.

Nr.	Ortens nivå	Ortens ålder (år)	Luften i orten		Gruvvattnet				Vattentillstånd i bergmassan
			Relativ fuktighet (%)	Temperatur (°C)	pH värde	Syre (ppm)	Konduktivitet (µS/cm)	Redox potential (mV)	
M1	350	≈ 35	50-70	10-16	11.4	4.2	938	27-45	fuktig
M2	350	≈ 35	85	9	7.2	2.0	489	241	fuktig, droppande
M3	250	≈ 50	84	8	7.7	1.3	366	236	
M4	400	≈ 25	92	7	6.1	1.5-1.9	1332	270	fuktig, droppande
Medelvärde			80	10	8	2.3	781		fuktig till droppande

Tabell 4.2 Mättningsresultat av gruvvattnet och andra miljöparametrar i Renströmsgruvan.

Nr.	Ortens nivå	Ortens ålder (år)	Luften i orten		Gruvvattnet				Vattentillstånd i bergmassan
			Relativ fuktighet (%)	Temperatur (°C)	pH värde	Syre (ppm)	Konduktivitet (µS/cm)	Redox potential (mV)	
R1	400	≈ 10	70-92	13-17	8.1	1.7-2.7	1117	205	droppande
R2	650	≈ 40	90-95	14	8.1	3.4-4.9	51	208	droppande
R3	800	≈ 20	94	14	7.4	0.7-0.9	1685	237	mycket droppande
Medelvärde			89	14	7.9	2.4	1350		droppande

Tabell 4.3 Mättningsresultat av gruvvattnet och andra miljöparametrar i Kristinebergsgruvan.

Nr.	Ortens nivå	Ortens ålder (år)	Luften i orten		Gruvvattnet				Vattentillstånd i bergmassan
			Relativ fuktighet (%)	Temperatur (°C)	pH värde	Syre (ppm)	Konduktivitet (µS/cm)	Redox potential (mV)	
K1	170	≈ 55	75-92	12-15	2.3	3.1	1677	655	droppande, rinnande
K2	330	≈ 45	95	13	2.6	1-2	1020	451	fuktig
K3a	1004	≈ 10	92	18	3.3	2	728	466	fuktig
K3b	1004	≈ 10	92	18	3.9	0.6	1039	318	Fuktig
Medelvärde			89	16	3	1.8	1116		Fuktig till rinnande

Tabell 4.4 Mättningsresultat av gruvvattnet och andra miljöparametrar i Kirunasgruvan och Glödbergstunneln (Li och Lindblad, 1995).

Läge	Nivå	Ortens ålder (år)	Luften i orten		Gruvvattnet				Vatteninflöde (l/min/10 m)
			Relativ fuktighet (%)	Temperatur (°C)	pH värde	Syre (ppm)	Konduktivitet (µS/cm)	Redox potential (mV)	
Kiruna gruvan	795			10	7.9		116	127	5.3
	1080a			10	7.7		172	159	0.9
	1080b			10	8.1		134	146	40
	Medelvärde			10	7.9		141		15
Glödberg tunnel				6	9.6		27	106	0.8

Tabell 4.5 Mätningresultat av gruvvattnet och andra miljöparametrar i Ormbergstunneln.

Nr.	Tunnels ålder (år)	Luften i tunnel		tunnelvattnet				Vattentillstånd i bergmassan
		Relativ fuktighet (%)	Temperatur (°C)	pH värde	Syre (ppm)	Konduktivitet (µS/cm)	Redox potential (mV)	
O1	50		10	7.7		196	243	torr
O2	50		10	7.9	2.3	32	257	torr
Medelvärde			10	7.8	2.3	114		torr

Tabell 4.6 Mätningresultat av gruvvattnet och andra miljöparametrar i Vietas kraftstations tunnlarna.

Nr.	Tunnels ålder	Luften i tunneln		tunnelvattnet				Vattentillstånd i bergmassan	
		Relativ fuktighet (%)	Temperatur	pH värde	Syre (ppm)	Konduktivitet (µS/cm)	Redox Potential (mV)		
Tunnel 1	V1	30 år	60%	14 °C	8.3	3.9	100	175	droppande
	V2	30 år	58%	13 °C	8.4	4.6	<100	170	droppande
	Medelvärde		59%	14 °C	8.3	4.3	<100		droppande
Tunnel 2	V3	30 år	77%	15 °C	8.2	4.3	200	168	droppande
	V4	30 år	77%	15 °C	8.0	2.9	100-200	177	droppande
	Medelvärde		77%	15 °C	8.1	3.6	150		droppande

5. KORROSIVITETSKLASSIFICERING FÖR INSPEKTERADE OMRÅDEN

Med hjälp av redovisade data i Tabellerna 4.1-4.6 erhålls poänger för de korrosivitetsparametrarna enligt Tabell 3.1 (för vattenförande bergmassan) och Tabell 3.3 (för atmosfäriska miljön). Korrosivitetindex W_{sat} respektive W_{atm} erhålls för de besökte områden via ekvationen (1) respektive (2). Resultaten av uppskattningen sammanställs i Tabell 5.1.

Poängen för bergmassans kvalitet K_R bestämdes på basis av bergmassans RQD värde i alla områden med undantag av Kirunasgruvan och Glödbergstunneln. I de två område bestämdes K_R med hänsyn till vattenflöde som mättes i fält.

Koncentrationen av såväl svaveldioxid som kväveoxider och klorid ($\text{SO}_2 + \text{NO}_x + \text{Cl}$) i underjords luften mättes inte i fält. Det antas att luften underjord är likvärdig som industriluft. Därför sätts värdet 3 till parametern N_{ox} enligt Tabell 3.3.

Tabell 5.1 utvärderingen av korrosiviteten av de inspekterade områden.

Område	Nr.	System I för vattenförande bergmassan							System II för atmosfäriska miljön				
		N _{pH}	NO ₂	N _R	K _t	K _R	W _{sat}	Klass	N _{ox}	N _{rh}	K _t	W _{atm}	Klass
Malmbergs gruvan	M1	0	4	0.5	0.62	1.25-1.75	3.5-4.9	II-III	3	1	0.62	2.5	I
	M2	2	3	0.25	0.47	1.25-1.75	3.1-4.3	II-III	3	2	0.47	2.4	I
	M3	2	2	0.25	0.43	1.25-1.75	2.3-3.2	II	3	2	0.43	2.2	I
	M4	3	2	1	0.41	1.25-1.75	3.1-4.3	II-III	3	2	0.41	2.1	I
* RQD = 40 -75%.									* N _{ox} - Industriella luften.				
Kristineberg gruvan	K1	4	3	1	0.64	1.5	7.7	IV	3	2	0.64	3.2	I
	K2	4	2	1	0.64	1.5	6.7	III	3	2	0.64	3.2	I
	K3a	4	2	0.5	0.87	1.5	8.5	IV	3	2	0.87	4.4	I
	K3b	4	1	1	0.87	1.5	7.8	IV	3	2	0.87	4.4	I
* RQD = 50 -60%.									* N _{ox} - Industriella luften.				
Renströms gruvan	R1	2	2	1	0.71	1.5	5.9	III	3	2	0.71	3.6	I
	R2	2	3.5	0.25	0.66	1.5	5.7	III	3	2	0.66	3.3	I
	R3	2	1	1	0.66	1.5	4.0	II-III	3	2	0.66	3.3	I
* RQD = 50 -63%.									* N _{ox} - Industriella luften.				

Tabell 5.1 (fortsättning)

Område	Nr.	System I för vattenförande bergmassan							System II för atmosfäriska miljön				
		N _{pH}	N _{O2}	N _R	K _t	K _R	W _{sat}	Klass	N _{ox}	N _{rh}	K _t	W _{atm}	Klass
Kirunas gruvan	795	2	3	0.25	0.5	1.25	3.3	II					
	1080a	2	3	0.25	0.5	1	2.7	II					
	1080b	2	3	0.25	0.5	1.75	5	III					
Glödbergs tunneln		1	3	0.25	0.35	1	1.5	I					
Ormbergs tunneln		2	3	0.25	0.5	1.25	3.3	II					
		* RQD = ca. 80 %.											
Vietas tunnlarna	V1	2	3	0.25	0.66	1.5	5.1	III	1	0-1	0.66	0-0.66	I
	V2	2	4	0.25	0.62	1.5	5.8	III	1	0	0.62	0	I
	V3	2	4	0.25	0.71	1.5	6.7	III-IV	1	1	0.71	0.71	I
	V4	2	3	0.25	0.71	1.5	5.6	III	1	1	0.71	0.71	I
		* RQD = 60 –80%.											
		* N _{ox} – Lantluften.											

6. DISKUSSIONER

6.1 Korrosivitetsklassificering enligt system I

I Tabell 3.1 har Redox potential reserverats som en alternativ parameter för klassificeringssystem I i framtiden. Det ses i Tabell 4.3 att Redox potentialen av gruvvattnet i Kristineberg varierar mellan 318 och 655 mV, vilken är nästan dubbel så mycket som den i Malmberget eller i Renström (se Tabellerna 4.1-4.2). Enligt Tabell 3.1 borde Kristineberg klassificeras som "inte korrosiv". Dock är detta inte sant då gruvvattnet i Kristineberg är riktigt aggressivt. Klassificeringen enligt Redox potential föreslås på basis av vissa experimentella resultat på jordmaterial. Shreir et al. (1994) framhöll att Redox potential är ett enkelt sätt att mäta korrosion av sulfat bakterie och kan inte ge någon uppgift på andra typer korrosion. Det förefaller som om Redox potential inte passar att klassificera bergmassans korrosivitet. Därmed kan Redox potential tas bort från Tabell 3.1.

I Tabell 5.1 bestäms värdet för faktor K_R på grund av bergmassans kvalitet, dvs RQD värdet i de flesta fall. Detta värde är faktiskt ett mått för potentiella vattentillståndet i bergmassan. Därför representerar korrosivitetsklassen, bestämd enligt bergmassans kvalitet, den potentiellt sämsta situationen med avseende av korrosion. Aktuella korrosiviteten bör bestämmas med hänsyn till rådande vattentillståndet. I system I kallas den femte parametern "Bergmassans kvalitet", vilket egentligen är en parameter för att bestämma vattentillståndet i bergmassan. För att skilja mellan den aktuella och potentiella korrosiviteten för ett givet område, delar vi upp den femte parametern i två grupper. Den första gruppen är för aktuellt vattentillståndet, vilket beskrivs av rådande vattenförhållande. Den andra gruppen är för potentiellt vattentillståndet, vilket beskrivs av bergmassans kvalitets parametrar, sprickors avstånd eller RQD. Efter modifieringen ser system I ut enligt det redovisade i Tabell 6.1. Enligt Tabell 6.1 och med parametrarnas medelvärde som redovisas in Tabell 6.2, klassificeras aktuell respektive potentiell korrosivitet av de besökta områden igen och resultaten sammanställs i Tabell 6.3.

Tabell 6.1 Poängsättning av enskilda parametrarna i modifierade system I.

Parameter	Värde							
Huvudparametrar								
1	pH värde	>11	11-9	9-7	7-5	<5		
	Poäng, N_{pH}	0	1	2	3	4		
2	Syrehalt (ppm)	<1	1-2	2-4	4-7	>7		
	Poäng, N_{O_2}	1	2	3	4	5		
3	Resistivitet (Ω -cm)	>10 000	10 000-2 000	2 000-1 000	1 000-500	<500		
	Konduktivitet (μ S/cm)	<10	10-500	500-1 000	1 000-2 000	>2 000		
	Poäng, N_R	0	0.25	0.5	1	2		
Influerande parametrar								
4	Temperatur Faktor, K_t	$K_t = 2^{\left(\frac{T-20}{10}\right)}$, (T= 0 – 60°C)						
5a	Vattentillstånd i bergmassan	Torr	Fuktig	Våt till droppande	Vattens inflöde per 10 m tunnels längd, l/min			
	Faktor, K_R	0.1	0.5	1	1 – 10	10 - 25	25 - 125	> 125
					1.25	1.5	1.75	2
5b	Bergmassans kvalitet (RMR)			Mycket bra (I)	Bra (II)	Acceptabelt (III)	Dåligt (IV)	Mycket dåligt (V)
	(a) Sprickors avstånd			>2 m	2-0.6	0.6-0.2	0.2-0.06	<0.06
	(b) RQD			100-95	95-75	75-50	50-25	<25
	Faktor, K_R			1	1.25	1.5	1.75	2
6	Kalcitutfällning			Icke	Ja			
	Faktor, K_{Ca}			0	-1			

Notering:

1. - 5a används för att bestämma faktor K_R för rådande vattentillståndet i bergmassan.
2. - 5b används för att bestämma faktor K_R för potentiella vattentillståndet.

Tabell 6.2 Medelvärde av parametrarnas.

Område	PH värde	Syrehalt (ppm)	Konduktivitet ($\mu\text{S}(\text{cm})$)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Rådande vattentillståndet	RQD (%)
Malmbergsgruvan	8	2.3	781	10	fuktig till droppande	40-75
Kristinebergsgruvan	3	1.8	1116	16	fuktig till rinnande	50-60
Renströmsgruvan	7.9	2.4	1350	14	droppande	50-63
Kirunasgruvan	7.9		141	10	15 l/min/10 m	60
Glödbergstunneln	9.6		27	6	0.8 l/min/10 m	
Ormbergstunneln	7.8	2.3	114	10	torr	70
Vietas tunnel 1	8.3	4.3	<100	14	droppande	60-80
Vietas tunnel 2	8.1	3.6	150	15	droppande	60-80

Tabell 6.3 Utvärderingen av aktuella respektive potentiella korrosivitetet av de inspekterade områden med parametrarnas medelvärden.

Område	N _{pH}	NO ₂	N _R	K _t	K _R		W _{sat}		Klass	
					Aktuell	Potentiell	Aktuell	Potentiell	Aktuell	Potentiell
Malmbergsgruvan	2	3	0.5	0.50	0.75	1.5	2.1	4.1	I-II	III
Kristinebergsgruvan	4	2	1	0.76	1.25	1.5	6.7	8.0	III-IV	IV
Renströmsgruvan	2	3	1	0.66	1	1.5	4.0	5.9	II-III	III
Kirunasgruvan	2	3	0.25	0.50	1.5	1.5	3.9	3.9	II-III	II-III
Glödbergstunneln	1	3	0.25	0.35	1		1.5		I	
Ormbergstunneln	2	3	0.25	0.50	0.1	1.25	0.3	3.25	I	II
Vietas tunnel 1	2	4	0.25	0.66	1	1.5	4.1	6.2	II-III	III
Vietas tunnel 2	2	3	0.25	0.71	1	1.5	3.7	5.6	II	III

Notering: Aktuella K_R bestäms på basis av rådande vattentillståndet, medan potentiella K_R bestäms på bergmassans kvalitet, dvs RQD-värdet.

Korrosivitetssklassificering av bergmassan i de besökta gruvorna och civila tunnlarna sammanfattas enligt Tabell 6.3 som följande:

Område	Aktuell korrosivitet		Potentiell korrosivitet	
	Klass	Beskrivning	Klass	Beskrivning
Malmbergsgruvan	I-II	Liten	III	måttlig
Kristinebergsgruvan	III-IV	måttlig till allvarlig	IV	allvarlig
Renströmsgruvan	II-III	liten till måttlig	III	måttlig
Kirunasgruvan	II-III	liten till måttlig	II-III	liten till måttlig
Glödbergstunneln	I	mycket liten		
Ormbergstunneln	I	mycket liten	II	liten
Vietas tunnel 1	II-III	liten till måttlig	III	måttlig
Vietas tunnel 2	II	liten	III	måttlig

Den potentiella korrosivitetklassen, för nästa alla område, är högre än den aktuella klassen eftersom bergmassans kvalitet potentiellt tillåter högre vattenföring och därför ökar miljöns korrosivitet. Gruvorna är mer korrosiva än civila tunnlarna. Ordningen på aktuella korrosivitet av bergmassorna från hög till låg är Kristineberg → Renström och Kiruna → Vietas → Malmberget → Glödberg och Ormberget.

Bland gruvorna är Bolidens gruvorna mer korrosiva än LKABs gruvorna. Kristinebergsgruvan är den mest korrosiva av de besökta platserna. Detta stämmer överens med det som man ser i fälten. Det är känt att gruvvattnet i Kristineberg är mycket aggressivt. Det tycks att klassificering system I efter modifieringen kan ge rimliga uppskattningar av korrosivitet för vattenförande miljöer. Det måste sägas att resultatet för Kiruna kanske inte representerar hela gruvområdet i och med att vattenproverna togs endast från tre platser. Fler vattenprover behövs för att bestämma Kirunasgruvans korrosivitet.

6.2 Korrosivitetsklassificering enligt system II

Klassificeringssystem II har tre parametrar, vilka är relativ fuktighet, koncentration av såväl svaveldioxid som kväveoxider och klorid ($\text{SO}_2 + \text{NO}_x + \text{Cl}$) samt temperatur. Relativ fuktigheten ligger vanligt i intervallet 75% och 100% vid gruvorna. I detta fall sätts poäng 2 alltid till N_{rh} enligt Tabell 3.3. Koncentration av såväl svaveldioxid som kväveoxider och klorid har inte mätts i fälten. Poäng 3 sätts till N_{ox} med antagandet att det är industriluft i gruvsorterna. Det kan ses i Tabell 5.1 att värdet av indexet W_{atm} varierar på de besökte områden, men korrosiviteten av luften klassificeras enligt Tabell 3.4 till samma klass, dvs klass I. Klassificeringen enligt Tabell 3.4 är för grov för att kunna skilja på olika atmosfäriska miljöer. Därmed modifieras system II som följande. Det föreslås att poängsättningen på relativ fuktighet, N_{rh} , och klassificeringen på indexet W_{atm} ändras som:

Relativ fuktighet:	75 - 90%	90% - dagg	
Poäng, N_{rh} :	2	3	
Indexet W_{atm} :	0 - 3	3 - 5	> 5
Klass:	I	II	III

Tabeller 3.3 och 3.4 blir Tabeller 6.4 och 6.5 efter modifieringen. Det bör noteras att referenshastigheten för korrosion också har ändrats i Tabell 6.5.

Luftens korrosivitet av gruvorna och Vietas tunnlarna klassificeras igen enligt Tabellerna 6.4 och 6.5 och resultaten sammanställs i Tabell 6.6. I den nya klassificeringen sätts Malmberget klass I, Kristineberg klass II-III, Renström klass II och Vietas klass I. Ordningen på atmosfärisk korrosivitet från hög till låg är Kristineberg → Renström → Malmberget och Vietas. Detta överensstämmer mer med verkligheten.

Tabell 6.4 Poängsättning av enskilda parametrarna för klassificeringssystem II efter modifieringen.

Parameter		Värde			
1	SO ₂ + NO _x + Cl ⁻	Lantluften	Stadsluften	industri- och sjöluften	
	(a) Nedsättning hastighet, (mg/m ² /dag)	<20	20-100	100-200	>200
	(b) Koncentration, (µg/m ³)	<100	100-200	200-350	>350
	Poäng, N _{ox}	1	2	3	4
2	Relativ fuktighet (%)	<60	60-75	75-90	90-dagg
	Poäng, N _{rh}	0	1	2	3
3	Temperatur	$K_t = 2^{\left(\frac{T-20}{10}\right)}$, (T= 0 - 40°C)			
	Faktor, K _t				

Tabell 6.5 Indexet W_{atm} och motsvarande klass nummer för korrosivitet i system II efter modifieringen.

Index, W _{atm}	0-3	3-5	>5
Klass Nr.	I	II	III
Beskrivning av korrosivitet	ingen eller mycket liten	liten	måttlig till allvarlig
Referens korrosions hastighet av kolstål (mm/år)	<0.025	0.025-0.05	>0.05

Tabell 6.6 Korrosivitetsklassificering av luften i gruvorna och civila tunnlarna enligt modifierade system II.

Område	Nr.	N _{ox}	N _{rh}	K _t	W _{atm}	Klass
Malmbergs gruvan	M1	3	1	0.62	2.5	I
	M2	3	2	0.47	2.4	I
	M3	3	2	0.43	2.2	I
	M4	3	3	0.41	2.5	I
Kristinebergs gruvan	K1	3	2	0.64	3.2	II
	K2	3	3	0.64	3.8	II
	K3a	3	3	0.87	5.2	II-III
	K3b	3	3	0.87	5.2	II-III
Renströms gruvan	R1	3	2	0.71	3.6	II
	R2	3	3	0.66	4.0	II
	R3	3	3	0.66	4.0	II
Vietas tunnlarna	V1	1	0-1	0.66	0-0.7	I
	V2	1	0-1	0.66	0-0.7	I
	V3	1	0	0.62	0	I
	V4	1	2	0.71	1.4	I
	V5	1	2	0.71	1.4	I

7. SLUTSATSER

Följande slutsatserna dras på basis av data insamlade under utredningen. Insamlade data är fortfarande en liten mängd. Därför kan det sägas att slutsatserna är endast indikationer. De bör provas med mer indata i framtiden.

- (1) Med avseende på bultars korrosion kan följande slutsatser dras:
 - (a) Huvudmekanism för bultars korrosion är förmodligen elektrokemisk, då fältstudier har visat att alla korroderade bultarna är belägna i våta eller fuktiga miljöer.
 - (b) Vattenförekomsten är avgörande för bultars korrosion. För bultar i torra miljöer kunde dessa motstå korrosion under lång tid (minst över 40 år enligt Figur 2). I våta miljöer kunde korroderar bultar snabbt.
 - (c) Bultar kan allvarligt korrodera i fuktig luft, se Figurer 4.19-22.
 - (d) Korrosion inträffar inte bara på bultar utan också i ingjutningsmedel. Ett exempel av detta fall redovisas i Figur 4.17.
 - (e) Ingjutningsmedel med låg permeabilitet kunde skydda bultar väl från korrosionsangrepp (se Figur 4.22). Tvärtom kan ett poröst ingjutningsmedel absorbera vatten från bergmassan eller luften, och följaktligen leda till korrosion av bergbultarna och även ingjutningsmedelet.
 - (f) Bilderna tagna i Kristineberg och Renstöm visar att ingjutningscementen använd på 1960 talet har blivit korroderat. Denna ingjutningscement var möjligen porös och hade svag motstånd mot korrosionsangrepp. Det är ett frågetecken om de bultar som installerade innan 60-talet fortfarande bibehållit sin bärförmåga om de varit belägna i aggressiva miljöer.
- (2) Klassificeringssystem I ger de inspekterade områden följande ordning med avseende på aktuella korrosivitet: Kristineberg → Renström → Vietas → Malmberget → Ormberget och Glödberg. Det verkar som om system I kan klassificera en miljö med avseende på korrosivitet.
- (3) Klassificeringssystem II är inte tillräckligt känslig för att kunna skilja på olika miljöer. Alltså har detta system modifierats för att ge en rimlig klassificering för en given atmosfärisk miljö.
- (4) Redox potential kunde inte ge en rimlig klassificering för vattenförande miljöer i de flesta fall. Därmed kan denna tas bort från Tabell 3.1.

8. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

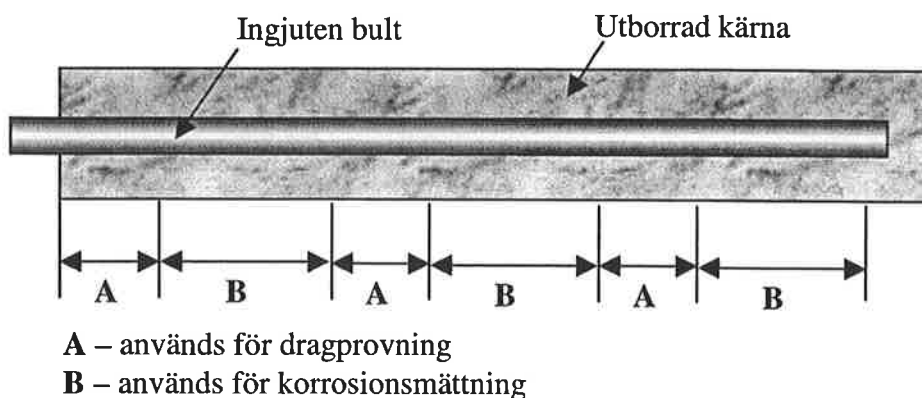
8.1 Bestämning av bultars livslängd

Syftet är att etablera ett förhållande mellan bultars livslängd och miljön där bultarna insatts. Med hjälp av detta förhållande kunde man bestämma livslängden av bultar i en given miljö. Förhållandet kunde etableras genom att analysera gamla bultars tillstånd. Bultar insatta i olika aggressiva miljöer bör friborras och i efterhand testas i laboratorieförsök. Konkreta steg för att genomföra arbetet kan beskrivas som följande:

- Välj gruvor och civila tunnlar där bultar skall friborras. De valde område bör ha en bredd spridning på korrosivitet och bultarnas ålder bör vara kända.
- Klassificera miljöskorrosivitet enligt systemen I och II.
- Boltometermät bulten innan friborringen för att kontrollera aktuella kvaliteten av kopplingen mellan bulten och injutningsmedel. Aktuella kvaliteten av kopplingen är beroende inte bara på injutningskvalitet utan också på korrosionstillståndet för de gamla bultarna. Om man kan få ett mönster för reflekterade vågar på nyligen injutna bultar är det möjligt att betstämna bultarnas korrosionstillstånd med hjälp av Boltometermättningsresultat.
- Friborra injutna bultar. Kärndiameter är minst 130 mm för att få tillfredsställande borkärnan enligt Helfrich och Finkel (1989).
- Friborrade bultarna skall kappas till små bitar och användas för dragprovning och korrosionsmätning (se Figur 8.1). Dragprovningen skall ge värde av bultarnas kvarstående bärförmåga.
- Etablera förhållandet mellan bultålder och lastbärande förmåga samt miljöns korrosivitetsklass.

8.2 Fortsatt verifiering av systemen I och II

Som tidigare nämnts är de antal data använde för verifieringen av systemen I och II fortfarande liten. Mer data skall samlas in under perioden vid genomförande av föreslagna arbeten.



Figur 8.1. En skiss som illustrerar hur den utborrade kärnan används.

ERKÄNNANDE

Tack för värdefull hjälp riktas till Erling Nordlund i LTU som hjälpte till att ordna fältinspektionerna, Tomas Savilahti, LKAB Malmberget, Urban Karlsson och Ulf Lindfors, Boliden Mineral AB, Anders Clarin, Per Byström och Jan-Olov Österberg, Vattenfall, vilka deltog i planering och genomförande av fältinspektionerna.

REFERENSER

Li, C. och Lindblad, K.: "Corrosion of rock bolts in underground environments". Research Report TULEA 1995:41, Luleå University of Technology / Atlas Copco Rock Drills AB, 1995.

Beshiry, E.: "Stabilitet hos bergstigar, LKAB/Malmberget – Norra alliansen". Examensarbete 1998:125 CIV, Luleå Tekniska Universitet, 1998.

DIN 50 929 part 3: "Probability of corrosion of metallic materials when subject to corrosion from the outside – Buried and underwater pipelines and structural components", 1985.

Helfrich H. och Finkel M.: "Bultars beständighet – undersökning vid Kvarntorps sandstengruva". BeFo 246:1/89, 1989.

Nyström, A. och Board, M.: "Parametervärden för bergarter i Kristinebergsgruvan: Faktainsamling – del rapport nr 6". Gruv teknik 2000, G2000 91:12, Projekt 323, 1991.

Rutqvist, J. och Sjöberg, J.: "Kaptensmalmens hängvägg – En analys av hängväggsproblematiken i Malmberget". Examensarbete 1987:153 E, Högskolan i Luleå, 1987.

Rådberg, G.: "Kritinebergsgruvans sprickteknik: Faktainsamling – del rapport nr 3". Gruv teknik 2000, G2000 91:09, Projekt 321, 1991.

Shreir, L.L., Jarman, R.A. och Burstein, G.T.: "Corrosion, Volume 1: Metal/Environment Reactions". Rutterworth-Heinemann, 1994.

BILAGA A YTTERLIGA FOTOBILDER AV ROSTADE BULTAR

Ytterliga fotobilder av rostade bultar redovisas i Figurer A.1 – A.12.

Figur A.1 Två cementingjutna bultar i en ort på nivå 250 i Malmbergsgruvan. Orten drevs i början av 1950 talet. Det bedöms från mutters- och brickasform att bultarna installerats senare efter orten var i produktion. Bultarnas ålder uppskattas ungefär 15 år. Bergytan är idag våt. Bultarnas mutter och bricka är måttligt korroderade.

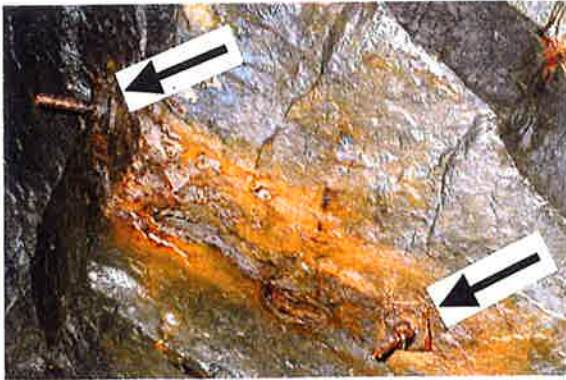
Figur A.2 En cementingjuten bult på nivå 350 i Malmbergsgruvan. Orterna på denna nivå drevs i mitten av 1960 talet. Bulternas ålder är ungefär 15 år. Bergytan är idag torr. Bulten är korroderad på muttern, brickan och den utstickande änden.

Figur A.3 Fotobilden visar korrosion av en stålbalk på nivå 350 i Malmberget. Det är fuktig över hela bergytan i orten. Vatten droppar från taket. Balken har korroderat allvarligt.

Figur A.4 En cementingjuten bult på nivå 455 i Malmbergsgruvan. Orterna på denna nivå drevs i början av 1980 talet. I det torra förhållandet har bulten korroderat på ytan i luften.

Figur A.5 En cementingjuten bult på nivå 170 i Kristineberg. Orterna på denna nivå drevs mellan åren 1939 och 1940. Bultens ålder är ungefär 55 år. Berget kring bulten är idag torrt. Bultens mutter och bricka är mycket allvarligt korroderade i luften. Rostbitar kan skrapas ner med en handkniv.

Figur A.6 En cementingjuten bult på nivå 690 i Kristineberg. Orterna på denna nivå drevs år 1973. Bultens ålder är mer än 25 år. Bulten är allvarligt korroderade i luften. Rostpulver kan skrapas ner med en handkniv.



Figur A.1



Figur A.2



Figur A.3



Figur A.4



Figur A.5



Figur A.6

Figur A.7 En cementingjuten bult på nivå 1004 i Kristineberg. Orterna på denna nivå drevs år 1989. Bultens ålder är maximalt 10 år. Berget kring bulten är idag torrt. Bulten är måttligt korroderade. Cementen också börjar att korrodera.

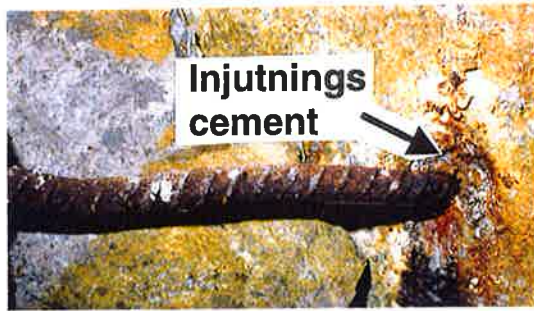
Figur A.8 Två cementingjutna bultar i tilledningsorten på nivå 650 i Renström. Bultens ålder är ungefär 40 år. En nylig bergras har exponerat del av bultarna till luften. Det visas att både bultarna och cementen har blivit allvarligt korroderade.

Figur A.9 Två cementingjutna bultar i en tilledningsort på nivå 650 i Renström. Orten drevs mellan åren 1959 och 1960. Bultens ålder är ungefär 40 år. En nylig bergras har exponerat del av bultarna till luften. Det visas att bultarna har blivit korroderade. Dessutom har cementen också blivit korroderade till vitfärgat materialet.

Figur A.10 En cementingjuten bult på nivå 800 i Renström. Orter på denna nivå drevs mellan åren 1977 och 1978. Bultens ålder är ungefär 20 år. Både bulten och ingjutningscementen har blivit allvarligt korroderade. Det låter att bultens förstärkningsförmåga har helt förlorat.

Figur A.11 En cementingjuten bult på nivå 800 i Renström. Bultens ålder uppskattas ungefär 15 år. Tunnelsektionen är torr och väl ventilerade. Bara liten korrosion inträffar på bultens bricka.

Figur A.12 En stålstång stående ungefär 30 år i tunneln i Ormberget. Stången har korroderat i luften.



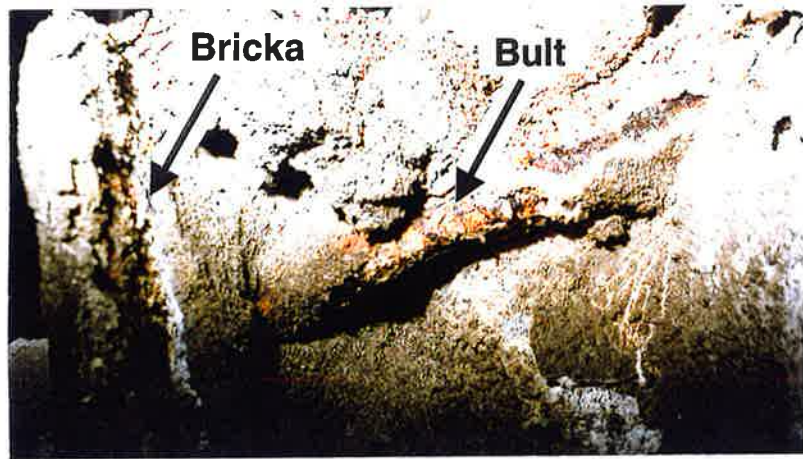
Figur A.7



Figur A.8



Figur A.9



Figur A.10



Figur A.11



Figur A.12