F O R S K N I N G S R A P P O R T

Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar

Corrosion testing of different types of rock bolts

Bror Sederholm & Patrik Reuterswärd

KIMAB-2013-120 **BeFo Rapport nr 126**

Öppen

Swerea KIMAB

swerea | KIMAB

Swerea KIMAB AB ● Box 55970, 102 16 Stockholm
Tel. 08 440 48 00 ● Fax 08 440 45 35 ● kimab@swerea.se ● www.swereakimab.se
Titel: Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar

Författare: Bror Sederholm & Patrik Reuterswärd
Rapportnr: KIMAB-2013-120
ISRN:
ISSN: 1403-848X
Tryck Swerea KIMAB Stockholm 2013

Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar

Författare: Bror Sederholm & Patrik Reuterswärd

Rapport: KIMAB-2013-120 | Swerea KIMAB Projektnummer: 411003
BeFo rapportnummer 126 | BeFo projektnummer 304
Datum: 2013-09-03 | Status: Öppen

Sammanfattning

Bergbult av kolstål, förzinkat kolstål, förzinkat och epoxibelagt kolstål och rostfritt stål är alternativ för bergförstärkning i tunnlar och bergrum. Eftersom man numera ibland specificerar mer än 150 års teknisk livslängd, finns osäkerhet avseende korrosionsrelaterad livslängd hos ingjutna bergbultar i de fall grundvattnet innehåller klorider eller att grundvattnets sammansättning av annan anledning är mycket aggressivt.

Våren 2010 startades forskningsprojektet *Korrosionsskydd av bergbultar* med inriktningen att ta fram nya krav på korrosionsskydd av bergbult och andra produkter utsatta för sprickvatten från berg med hög kloridhalt. Projektet förväntas även ge ett tekniskt underlag för val av material och beläggningar.

Denna slutrapport redovisar resultat upp till två års korrosionsprovning av delvis ingjutna bergbultar exponerade i bergväggen i Muskötunneln och i Äspötunneln. I undersökningen ingår bergbultar av obelagt kolstål, rostfritt stål och varmförzinkade samt varmförzinkade och epoxibelagda bergbultar.

Provmaterial var rundstång av kolstål och kommersiellt tillverkade bergbultar som var varmförzinkade, utförda i rostfritt stål och som var både varmförzinkade och epoxibelagda. För att studera korrosionen och korrosionsskyddsförmågan för injekterade bergbultar tillverkades provkroppar genom att gjuta in provmaterialen i anläggningscement. Provkroppar har införts i förborrade hål i Muskötunneln och i Äspötunneln. Dessa två tunnlar utvaldes som provplatser på grund av känd hög kloridhalt i grundvattnet.

För att accelerera korrosionen i tunnelatmosfär sprutades saltlösning på de utstickande delarna på ett urval av bergbultar under det första året.

Samtliga korrosionsprovade bergbultar har varit utsatta för ett relativt stagnant vatten i berget under den större delen av provningstiden.

Obelagt kolstål hade efter två års exponering i tunnelmiljö frätgropar upp till 350 µm i Muskötunneln. Synliga lokala korrosionsangrepp förekommer varken på de ingjutna bergbultsdelarna eller på stålytor omgivna av vatten inne i berget. För de ändar som under ett år sprutats med 3 % NaCl, var frätgroparna upp till 465 µm i Äspötunneln.

Bergbultar i rostfritt stål hade inga synliga korrosionsangrepp, varken efter ett års sprutning med 3 % NaCl eller efter två års korrosionsprovning i någon av tunnlarna.

Varmförzinkade bergbultar har vitrost på ytor exponerade i tunnlarna och på ytorna i borrhålen. För bultar med ca 45 µm ursprunglig zinkskikttjocklek var zinkskiktet lokalt helt bortfrätt i kontakt med anläggningscement efter två års korrosionsprovning. Korrosionshastigheter för både ingjutna ytor och fritt exponerade för vatten längst in i berget var c:a 20 µm zink per år. Den höga korrosionshastigheten för zink var oväntad.

Epoxibelagda varmförzinkade bergbultar
Samtliga epoxibelagda och varmförzinkade bergbultar är helt oskadade efter två års korrosionsprovning.

Grundvattnets påverkan av anläggningscement
Analyser av vattnet i borrhålen efter ett år kunde påvisa att pH-värdet och alkaliniteten ökade genom inverkan av anläggningscement. Vattenomsättningen var dock så hög att efter två år hade pH-värdet börjat sjunka och alkaliniteten var åter på samma nivå som före monteringen av provkropparna.

Efter två års provning är rekommendationen att om inte höga klorider i grundvattnet kan uteslutas, ska man överväga bergbultar i rostfritt material eller varmförzinkade bergbultar med epoxibeläggning för mycket lång teknisk livslängd. Detta på grund att man påvisat att cementens alkaliserande verkan kan förvinna inom två år och att varmförzinkning kan förbrukas snabbt.

För en säker bedömning av den tekniska livslängden hos olika bergbultar i bergtunnlar med höga kloridhalter i grundvattnet, är en 2-årig provning alldeles för kort. Därför bör provningen pågå ytterligare några år.

Nyckelord: Bergtunnlar, konstruktioner, grundvatten, bergbultar, kolstål, varmförzinkning, rostfritt, epoxibeläggning, hållbarhet, korrosivitet, korrosionsprovning, teknisk livslängd

Summary

Rock bolts made of carbon steel, galvanized zinc coated steel, zinc coated and epoxi coated carbon steel and stainless steel are alternatives for rock support in tunnels and underground rock cavities. Since more than 150 years of technical service may be presently specified there is uncertainty regarding the lifetime of grouted rock bolts where the groundwater contains chlorides or where the groundwater composition is otherwise very aggressive.

In spring 2010 the research project Korrosionsskydd av bergbultar – Corrosion protection of rock bolts started, with the aim of drawing up new requirements for corrosin protection of rock bolts and other products exposed to fissure water in rocks with high chloride content. The project is also expected to provide a technical basis for the selection of materials and coatings.

The present final report presents the results of up to two years of corrosion testing of partially cast-in rock bolts exposed in rock walls in the Muskö tunnel and the Äspö tunnel. The investigation includes rock bolts made of uncoated carbon steel, stainless steel and galvainzed steel and galvanized bolts with epoxy coating.

Test specimens were carbon steel round bars or commercially produced rock bolts: galvanized, galvanized with epoxy coating or made of stainless steel. In order to investigate the corrosion and the corrosion protection of grouted rock bolts, test specimens were manufactured by casting the test materials in Portland cement (anläggningscement). Test specimens were inserted in pre-drilled holes in the Muskö and Äspö tunnels. The two tunnels were selected as test sites based on the known high concentration of chlorides in the respective ground waters.

In order to accelerate corrosion in the tunnel atmosphere, salt solution was sprayed on protruding parts of a number of rock bolts during the first year.

All tested rock bolts have been exposed to a relatively stagnant water in the rock environment during the greater part of the test period.

<u>Uncoated carbon steel</u>
Corrosion pits up to 350 µm on protruding parts in the Muskö tunnel after two years. There were no visible local corrosion attack on the cast-in rock bolt parts or on steel surfaces submerged in water in the rock. On the surfaces that had been sprayed with 3% NaCl during one year the pit depth was up to 465 µm i the Äspö tunnel.

<u>Rock bolts made of stainless steel</u>
No visible corrosion attacks after one year of 3 % NaCl spraying or after two years of corrosion testing in the tunnels.

<u>Galvanized rock bolts</u>
White rust on surfaces exposed in the tunnels and on surfaces in the drilled holes. On bolts with an original zinc coating thickness of ca 45 µm the zinc coating was locally corroded away after being in contact with Portland cement during two years of corrosion testing. The corrosion rate for both cast-in surfaces and surfaces submerged in water in the rock was about 20 µm zinc per year. The high corrosion rate of zinc was unexpected.

Epoxy coated galvanized rock bolts
No visible corrosion attack on epoxy coated galvanized rock bolts was seen after two years of corrosion testing.

Effect of Portland cement on ground water
Analyses of the water in the drilled holes after one year showed that the pH and alkalinity had increased as an effect of the Portland cement. The water turnover however was so high that after two years the pH value had started to decrease and the alkalinity was again at the same level as before installation of the test specimens.

After two years of testing it is recommended that, unless the possibility of high chloride levels in the ground water can be excluded, rock bolts made of stainless steel, or galvanized bolts with epoxy coating should be considered for very long technical service, since it has been shown that the alkalising effect of cement may disappear within two years and that zinc coating can be rapidly consumed.

For a reliable evaluation of the technical service of various rock bolts in rock tunnels with high levels of chloride in the ground water two years is not a sufficiently long test period. The tests should continue for some more years.

Keywords: Rock tunnels, constructions, groundwater, rock bolts, carbon steel, galvanized steel, stainless steel, epoxy coating, durability, corrosivity, corrosion testing, technical service time

Innehåll

1 Inledning ... 1
2 Bakgrund ... 3
3 Mål och Syfte ... 4
4 Tekniska krav på bergbult ... 4
4.1 Inledning ... 4
4.2 Material ... 4
4.3 Korrosionsskydd av bergbultar ... 5
5 Bedömning av vattens aggressivitet ... 5
5.1 Tysk standard DIN 50929, del 3 ... 5
5.2 Bedömning av aggressivt vatten enligt Trafikverket ... 8
5.3 Svensk standard SS-EN 12502-5:2005 ... 8
6 Europeisk standardisering av organiska beläggningar för bergbult ... 9
7 Experimentell teknik ... 10
7.1 Provningsmetodik ... 10
7.2 Provplatser ... 10
7.3 Provmaterial ... 11
7.3.1 Obelagt kolstål ... 11
7.3.2 Varmförzinkat kolstål ... 11
7.3.3 Rostfritt stål ... 12
7.3.4 Epoxibelagt och varmförzinkat kolstål ... 12
7.4 Provkroppar ... 12
7.5 Placering av bergbultar i bergvägg ... 13
7.6 Vattenprovtagning ... 14
7.7 Utvärdering av korrosionstillstånd hos bergbultar ... 15
8 Resultat ... 18
8.1 Utvärdering av korrosionstillstånd hos bergbultar exponerade i Muskötunneln och i Äspötunneln ... 18
8.2 Vattnets korrosivitet i borrhålen enligt DIN 50 929 ... 22
9 Diskussion ... 25
10 Slutsatser ... 27
11 Referenser ... 28
Bilaga 1 Exponerade obelagda kolstålsstänger ... 29
Bilaga 2 Exponerade varmförzinkade bergbultar ... 31
Bilaga 3 Exponerade rostfria bergbultar ... 33
Bilaga 4 Epoxibelagda bergbultar leverantör A ... 37
Bilaga 5 Epoxibelagda bergbultar leverantör B ... 39
Bilaga 6 Obelagt kolstål exponerat 2 år ... 41
Bilaga 7 Varmförzinkad bergbult exponerad 2 år ... 42
Bilaga 8 Rostfria bergbultar exponerade 2 år ... 43
Bilaga 9 Epoxibelagda bergbultar leverantör A 2 år ... 45
Bilaga 10 Epoxibelagda bergbultar leverantör B 2 år ... 47

1 Inledning

Våren 2010 startades forskningsprojektet *Korrosionsskydd av bergbultar* med inriktningen att ta fram nya krav på korrosionsskydd av bergbult och andra produkter utsatta för grundvatten från berg med hög kloridhalt samt att ge ett tekniskt och ekonomiskt underlag för val av material och beläggningar. Ytterligare ett syfte har varit att öka kunskapen om olika grundvattens korrosiva inverkan, både som dropp på luftexponerade bultdelar och som sprickvatten på helt eller delvis injekterade bultar.

Ett extra korrosionsskydd av cementingjutna bergbultar behövs ofta inte för att uppfylla teknisk livslängd i berg med ett grundvatten med låga kloridhalter. Däremot kan andra krav som estetiska krav och krav på demonterbarhet kan behöva olika typer av korrosionsskydd.

Nuvarande erfarenhet och kunskap är inte tillräckliga för att säkert bedöma om mycket lång teknisk livslängd i korrosiva miljöer kan uppfylls med enbart korrosionsmån. Kombinerat korrosionsskydd genom organisk beläggning och varmförzinkning ökar livslängden, men kräver normalt underhållsmålning för att ge skydd under hela tekniska livslängden.

I föreliggande projekt görs två provintag (efter ett och två års korrosionsprovning) för utvärdering av olika materials korrosionsbeständighet i tunnlar med sprickvatten från berget innehållande höga kloridhalter. Ett tredje provintag kommer att göras efter ca fem års exponering. Finansiering av detta intag kommer att göras inom ett separat projekt. Detaljplanering av projektet har gjorts av Swerea KIMAB tillsammans med en referens-grupp bestående av de företag och organisationer som medverkar och finansierar projektet.

Vilken inverkan har ett flödande vatten i berget på cementingjutna bergbultar har inte undersökts i detta projekt. Denna fråga kommer att tas upp i ett nytt projekt inom Geoinfra som har titeln - *Utveckling av tekniska råd för funktionskrav vid underjordanläggningar med avseende på den kemiska miljön.*

Projektet *Korrosionsskydd av bergbultar* finansieras med anslag från:

Trafikverket
Elforsk
BeFo
Nordic Galvanizers AB
Outokumpu Stainless AB
Galvano A/S
Vik Ørsta A/S
SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond)

Följande medlemmar ingick i projekts arbets- och referengrupp:

Arvid Taube, Trafikverket
Odd Nordal, Galvano AS
Manuel Flores NCC Constructing (SBUF)
Annikki Hirn, Nordic Galvanizers
Sara Randström, Outokumpu Stainless AB
Manouchr Hassanzadeh, Vattenfall Research and Development (Elforsk)
Jarle Björdal, Vik Ørsta AS
Thomas Dalman, Trafikverket
Per Tengborg, BeFo
Bror Sederholm, Swerea KIMAB
Patrik Reuterswärd Swerea KIMAB.

2 Bakgrund

Bergbult av kolstål, förzinkat kolstål, förzinkat och epoxibelagt kolstål och rostfritt stål är alternativ för bergförstärkning i tunnlar. Osäkerhet råder avseende korrosionsrelaterad livslängd hos ingjutna stålbultar, liksom hos sådana med korrosionsskydd i form av varmförzinkning eller organisk beläggning. Detta p.g.a. dålig tillgång på data och eftersom synliga delar snabbt får kraftiga angrepp medan tillståndet hos delar i berg är okänd.

I Vindötunneln, **Ref 1,** noterades efter 40 års exponering av ingjutna bergbultar upp till 3 mm avfrätning. I ett extrem fall konstaterades ett frätgropsdjup på 5 mm. Mätbara angrepp återfanns endast på bultarnas yttersta delar, 0-400 mm från bergväggen in i berget. Låga kloridhalter uppmättes i detta bergvatten, 24-35 mg/l.

För ingjutna bultar i Muskötunneln observerades också endast ringa angrepp på delar som befunnit sig i berg. Däremot hade utstickande delar kraftiga korrosionsangrepp, **Ref 2**.

För en gruva i Kvarntorp rapporterar Helfrich, **Ref 3**, kraftig gropfrätning för cementinjekterad bult. Sålunda är ingjutna delar av bergbultar inte helt förskonade från korrosionsangrepp.

Den tekniska livslängdsklassen för bärande huvudsystem i tunnel eller del av tunnel som är omgiven av berg, dit helt och delvis ingjutna bergbultar räknas, ska väljas enligt publikation 2011:085 TRVK Tunnel som ersätter ATM Tunnel 2004, livslängdsklass TLK 120. Detta innebär en förväntad medellivslängd hos bergbultar i väg- och järnvägstunnlar på 150 år.

Att icke cementingjutna bergbultar av kolstål drabbas av korrosion står dock klart. I en fältundersökning i olika aggressiva tunnlar utförd av Swerea KIMAB, **Ref 4**, uppmättes jämn korrosionshastighet upp till 65 µm/år och lokala korrosionsangrepp på ett maximalt djup av 500 µm i vatten med höga kloridhalter efter ett års provning. Generellt kan sägas att ju högre kloridhalt (> 150 mg/l i sprickvatten från berg) desto större är risken för kraftiga korrosionsangrepp. I tunnlar under Stockholm är det inte ovanligt med kloridhalter som överstiger 500 mg/l.

En perfekt cementingjutning förväntas innebära ett gott korrosionsskydd för bergbulten. Detta kan dock aldrig garanteras, bulten kommer att ha större eller mindre blottlagda ytor. Dessutom kan sprickor i ingjutningen uppstå med tiden. Små skador bedöms i allmänhet inte innebära någon större risk, eftersom en alkalisk miljö (anläggningscement) som passiverar bergbultens stålyta förväntas uppstå. Större skador, orsakade av ofullständig ingjutning eller av sprickor i cementen, befaras vara en risk för korrosionsskador i kombination med ett högt vattenflöde i berget eftersom vattenflödet runt bergbulten kan förhindra en passivering av bergbultens stålyta. Även för ytor som utsätts för stillastående alkaliskt sprickvatten finns risk för korrosionsangrepp om kloridhalten i vattnet är tillräckligt hög. Klorider bryter ner metallers passiverande ytskikt samt ökar konduktiviteten vilket ökar risken för bildande av lokala aktiva/passiva celler. Helfrichs observation av lokala korrosionsangrepp på cementinjekterad bult i miljö med sprickvatten från berg med låga kloridhalter, **Ref 3** talar dock för att angrepp skulle kunna uppstå även vid låga kloridhalter i små (eller inga) skador.

Med organiskt belagda (t.ex. epoxibelagda) bergbultar fås beläggningsskador vid hantering och montering som kan ha betydelse för lokala angrepp. Beläggningens korrosionsresistens beror främst på förbehandlingen som görs innan epoxibeläggningen appliceras. En förzinkad bult är inte lika känslig för skador i beläggningen, livslängden styrs av zinkskiktets tjocklek och miljöförhållanden.

Vad gäller rostfria bergbultar finns en del undersökningar gjorda, slutsatser från dessa undersökningar har varit att endast högvärdiga legeringar kan användas. För förankringar i berg måste framförallt risker för spänningskorrosion beaktas. För utstickande delar kan droppande sprickvatten från berg med låga kloridhalter ge upphov till plötsligt brott på grund av spänningskorrosion. Anledningen till att man även vid låga kloridhalter kan få spänningskorrosionssprickning är att när vattnets avdunstar ökar kloridhalten i vattnet vilket ger upphov till mycket höga kloridhalter på metallytan.

3 Mål och Syfte

Målet för projektet är att ta fram underlag för att ta fram tekniska krav för dimensionering, val av material och korrosionsskydd på bergbult och andra produkter, utsatta för sprickvatten från berg med hög kloridhalt.

Syftet med detta projekt är framförallt att fastställa korrosionshärdigheten för olika typer av bergbultar när de utsetts för kloridhaltigt grundvatten vid användning som förstärkning och förankring i tunnlar och bergrum.

4 Tekniska krav på bergbult

4.1 Inledning

Den tekniska livslängden för bärande huvudsystem vid planering av ny infrastruktur i tunnel som är omgiven av berg kan numera vara upp till 150 år

Trafikverket formulerar kravet på teknisk livslängd genom att livslängdsklassen TLK 120 ska väljas enligt TRVK Tunnel 11, **Ref 5**. Denna ersätter BV Tunnel och Tunnel 2004. Bergbultar och bergstag (luftexponerad bult) anses tillhöra det bärande huvudsystemet.

4.2 Material

Material i bergbult skall enligt, **Ref 5** vara:

- armeringsstång (kamstång) av minst 20 mm diameter, med en draghållfasthet motsvarande den nedre 5-procentsfraktilen för materialets övre sträckgräns eller 0,2-gräns

  eller
- stång (kolstål[1]) av minst 20 mm diameter med en övre sträckgräns eller 0,2-gräns av minst 380 MPa och gränstöjning eller brottförlängning på minst 5 %.

(1)Noteras bör att Trafikverket som alternativ anger rostfri armering med hållfasthetsklass 500 MPa.

4.3 Korrosionsskydd av bergbultar

I dokumenten TRVK Tunnel 11 finns generella specifikationer på bergbults korrosionsskydd med krav, godtagbara alternativa utföranden och rekommendationer.

Korrosionsskyddet kan utföras genom ingjutning med cementbruk eller med ytbehandling i kombination med ingjutning. Korrosionsskyddande ytbeläggning är ett krav på bergbultar som är utsatta för aggressivt vatten enligt TRVK Tunnel 11. Om vattnet bedöms som aggressivt skall bergbultarna skyddas både med ett varmförzinkningsskikt enligt SS EN ISO 1461 och ett skikt värmehärdad och epoxi av en skikttjocklek ≥ 80 µm.

5 Bedömning av vattens aggressivitet

För närvarande finns ingen bra metod att bedöma aggressiviteten hos sprickvatten från berg. Grundvatten kan påverka i olika grad metallers korrosionshastighet och beläggningars korrosionsskyddande egenskaper. Detta innebär att de metoder som idag används för att bedöma aggressiviteten hos ett sprickvatten från berg är inte särskilt relevanta. I de efterföljande kapitlen ges en beskrivning av några metoder som i dag används för bedömning av vattnets aggressivitet.

5.1 Tysk standard DIN 50929, del 3

Med utgångspunkt från vattnets sammansättning bedöms vattnets korrosivitet mot kolstål enligt klassificeringssystemet i den tyska standarden DIN 50 929, del 3: *Corrosion of metals – Probability of corrosion of metallic materials when subject to corrosion from the outside – Buried and underwater pipelines and structural components*, **Ref 6**.

Den tyska DIN standarden är i första hand anpassad för vatten i rörledningar, vilket innebär att den uppskattade korrosiviteten blir högre i stillastående vatten än i flödande vatten. För ingjutna bergbultar är stillastående vatten dock mindre korrosivt, eftersom det alkaliseras av kringliggande anläggningscement.

I standarden anges vidare anaerobt vatten som mycket korrosivt. Detta beror på risken för mikrobiell korrosion orsakad av sulfatreducerande bakterier som kan orsaka allvarlig korrosion. Om dessa bakterier inte finns närvarande sker ingen påtaglig korrosion i syrefritt vatten (anaerobt vatten).

I DIN 50 929, del 3 bedöms inverkan från följande kemiska parametrar i vattnet,

- pH-värde
- Alkaliniteten (syrakapacitet)
- Kalciumhalt (Ca^{2+})
- Kloridhalt (Cl^-)
- Sulfathalt (SO_4^{2-})

I **tabell 1** anges i förenklad form positiv respektive negativ inverkan på korrosionshastigheten på kolstål i vatten enligt DIN 50929.

Tabell 1 *Inverkan av olika kemiska parametrar på korrosionshastigheten på kolstål i vatten enligt DIN 50 929 del3 (Influnce of chemical parameters on corrosion rate of carbon steel)*

Inverkan på korrosionshastigheten på kolstål i vatten	
Positiv effekt (minskande korrosionshastighet hos kolstål	**Negativ effektiv** (ökande korrosionshastighet hos kolstål
Högt pH-värde (pH> 9)	Hög kloridhalt[(1)] (>150-200 mg/l)
Hög alkalinitet (>120 mg/l HCO_3^-)	Hög sulfathalt[(1)]
Hög kalciumhalt (>80 mg/l)	

[(1)] Klorid- och sulfathalt räknas samman vid bedömning enligt DIN 50 929, del 3

Vid bedömning av korrosiviteten hos kolstål beräknas poängsumman W_0 enligt avsnitt 6 i DIN 50 929, del 3:

$$W_0 = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_3/N_4$$

De parametrar som undersöks och mäts redovisas i **tabell 2**. Korrosionssannolikhet för jämn korrosion (medelavfrätning) och gropfrätning för kolstål i vattnen anges i utgående från bedömningssumman W_0, **tabell 3**. Utgående från beräknat värde på W_0 kan förväntad korrosionshastighet och förväntad maximal gropfrätningshastighet utläsas ur **tabell 4**.

Tabell 2 *Parametrar för bedömning av korrosionsrisk för kolstål, Ref 6 (Parameters for assessing the risk of corrosion for carbon steel).*

Vattenparametrar	**Värde**
Vattentyp	N_1
Flödande	0
Stillastående	-1
Insjö	-3
Anaerobt kärr, hav	-5
Placering av aktuell konstruktion	N_2
Under vatten	0
Gränsyta vatten / luft	1
Skvalpzon	0,3
$c(Cl^-) + 2c(SO_4^{2-})$ (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 (Ca^{2+}) (mol/m^3)	N_5
<0,5	-1
0,5-2	0
>2-8	+1
>8	+2
pH-värde	N_6
<5,5	-3
5,5-6,5	-2
6,5-7,0	-1
7,0-7,5	0
>7,5	+1

Tabell 3 *Sannolikhet för jämn korrosion (medelavfrätning) och gropfrätning för kolstål i vattnet utgående från bedömningssumman W_0 enligt DIN 50 929, del 3 (Estimated probability of even corrosion (mean) and pitting of carbon steel in the water based on the assessment sum W_0 according to DIN 50929, Part 3).*

W_0	**Medelavfrätning**	**Gropfrätning**
≥ 0	Mycket liten	Mycket liten
-1 till -4	Mycket liten	Liten
-5 till -8	Liten	Måttlig
< -8	Måttlig	Hög

Tabell 4 *Förväntad jämn korrosionshastighet i mm/år beräknad från korrosionsindex W_0 (Estimation of even corrosion rate based on the assessment sum W_0)*

W_0	Medelavfrätning (mm/år)	Maximal gropfrätningshastighet (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

5.2 Bedömning av aggressivt vatten enligt Trafikverket

Definitionen av aggressivt vatten, enligt BV Tunnel och Vägverkets Tunnel 2004, är vatten som vid analys enligt Vägverkets publikation 1993:32 – Bestämning av vattens korrosiva egenskaper uppvisar någon eller några av följande egenskaper:

- pH < 6,5
- vattenhårdhet < 20 mg (Ca+Mg) per liter (totalhårdhet)
- alkalinitet < 1mekv/l (motsvarar 60 mg HCO_3^-)
- ledningsförmåga > 100 mS/m

Grunden till definitionen är ett arbete utfört under 1980-talet, av Torsten Johnsson på Korrosionsinstitutet. Arbetet omfattade genomgång av inspektioner av förzinkade vägtrummor utsatta för korrosion i sötvatten. Målet för utredningen var att ge riktlinjer för när förzinkade ståltrummor behöver ett extra korrosionsskydd utöver förzinkningen. För att få överblickbarhet bestämde man sig för att bara beakta vattenparametrarna pH, vattnets hårdhet och alkalinitet. I rapporten dras slutsatsen att extra korrosionsskydd utöver varmförzinkning behövs om någon av följande villkor är uppfyllt:

- pH < 6,5
- vattenhårdet < 20 mg Ca/l
- alkalinitet < 1 mekv/l
- strömningshastighet > 0,5 m/s under större delen av året

Vid ”översättningen” till förhållanden i berg, har uppgifter om strömningshastighet tagits bort (stillastående vatten), uppgift om konduktivitet har lagts till för att försäkra att vatten med viss salthalt bedöms som aggressivt. Förutom detta måste observeras att Johnssons bedömningskriterier avser zink och inte kolstål.

5.3 Svensk standard SS-EN 12502-5:2005

Den svenska standarden SS-EN 12502-5:2005 gäller för sötvatten i vattensystem för distribution och lagring. Den anger att jämna korrosionshastigheten för kolstål och låglegerat stål är mycket låg i vatten om:

- Syrehalten (O_2) i vattnet är mindre än 0,1 mg/l
- pH-värdet i vattnet är större än 8,5.

Inga korrosionshastigheter anges i standarden. I föreliggande undersökning används inte denna standard.

6 Europeisk standardisering av organiska beläggningar för bergbult

Varmförzinkat stål som är belagt med pulverfärgsbeläggning behandlas i EN-standarderna:

- EN 15773 (2009), *Industriell applicering av organisk pulverfärg på varmförzinkat eller sherardiserat stål (duplex system) – Specifikationer, rekommendationer och riktlinjer* som behandlar upphandling av förzinkade stålprodukter som är pulverfärgsbelagda.
- EN 13438 (2005) *Paints and varnishes – Powder organic coatings for galvanized or sherardized steel products for construction purposes* som behandlar specificerade krav och provning

EN 13438 (2005) har under projekttiden varit under revidering hos standardiseringskommittén CEN/TC 139 WG 8. Därför har den planerade tekniska specifikationen och verifieringen av kravnivåer ersatts med att bearbeta CEN/TC 139 WG8 så att EN 13438 är bättre anpassad för att användas vid offentlig upphandling, exempelvis då korrosionsskydd av bergbultar kravsätts. Ett slutgiltigt förslag (Final Vote) har godkänts genom omröstning inom CEN under våren. Omröstningen godkände förslaget FprEN13438 (april 2013) med enbart redaktionella kommentarer lämnadevid omröstningen.

Standardserien EN-ISO 12944 omfattar normalt inte pulverfärger.

7 Experimentell teknik

7.1 Provningsmetodik

För att kunna ställa krav på konstruktionsutförande av bergbultar behöver man undersöka och fastställa korrosionshärdigheten för olika typer av bergbultar när de utsetts för kloridhaltigt grundvatten.

Efter ett och två års korrosionsprovning i Muskötunneln och i Äspötunneln togs ett urval av bergbultarna in för utvärdering av korrosionsutseendet, för bestämning av korrosionshastighet och maximalt gropfrätning.

De resterande bergbultarna kan undersökas i framtiden då korrosionen kommit längre.

7.2 Provplatser

Som provplatser för korrosionsprovning med kloridhaltigt vatten valdes Muskö- och Äspötunnlarna ut.

Muskötunneln är 2895 meter lång vägtunnel som förbinder Muskö med fastlandet, **figur 1**. Den öppnades för allmän trafik i mitten av 60-talet. Byggnationen av Muskötunneln skedde i Fortifikationsförvaltningens regi och öppnade för militär trafik 1963. Den 15 mars 1964 öppnades tunneln för allmän trafik. Numera passerar ca 1 300 fordon dagligen tunneln (vardagsmedeldygnstrafik). Provplatsen ca 1300 meter från tunnelmynningen på fastlandssidan ligger c:60 m under havsytan.

Äspötunneln, som ingår som en del i Äspölaboratoriet, är en 3600 meter lång tunnel som sträcker sig från Simpevarpshalvön, där Oskarshamns kärnkraftverk ligger, till södra delen av Äspö i Misterhults skärgård, **figur 2**. På Äspö fortsätter huvudtunneln i två spiralvarv ned till ett djup av 460 meter. Äspölaboratoriet med tillhörande tunnel ägs av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB). Provplatsen, ca 2598 meter från tunnelmynningen, ligger på c:a 350 meters djup.

Figur 1 *Muskötunneln (The Muskö tunnel).*

Figur 2 *Äspötunneln (The Äspö tunnel)*

7.3 Provmaterial

Provmaterial i undersökningen är rundstång i kolstål samt kommersiellt tillverkade bergbultar i förzinkat kolstål, förzinkat och epoxibelagt kolstål samt rostfritt stål. Rundstång och bergbultar har längden 1000 mm och diametern ca 20 mm.

7.3.1 Obelagt kolstål

Som bergbult av obelagt kolstål användes rundstång av kolstål av stålkvaliteten S235JR från Ståldepån AB. I **tabell 5** visas den kemiska sammansättningen.

Tabell 5 *Kemisk sammansättning av obelagt kolstål (mass-%)*
(Composition of the uncoated carbon steel used (%))

C	Mn	P	S	N	Cu
0,17	1,40	0,035	0,035	0,12	0,55

7.3.2 Varmförzinkat kolstål

De varmförzinkade kolstålsbultarna levererades av Galvano A/S respektive Vik Ørsta A/S, Norge.

Zinkens tjocklek mättes på toppen av kammarna, mellan kammarna, på toppen av gängorna samt mellan gängorna (botten). I **tabell 6** visas resultaten från 32 mätningar per bergbult.

Tabell 6 *Uppmätt zinkskikttjocklek (Zinc coating thickness measurements)*

Leverantör	Gängtopp medelvärde µm (std dev)	Gängbotten medelvärde µm (std dev)	Kamtopp medelvärde µm (std dev)	Kambotten medelvärde µm (std dev)
Galvano AS	61,9 (5,2)	57,2 (8,2)	40,3 (6,5)	42,1 (7,8)
Vik Ørsta AS	111,3 (10,2)	202,5 (10,6)	96,6 (7,9)	94,7 (9,8)

7.3.3 Rostfritt stål

De rostfria bergbultarna levererades av Outokumpu Stainless AB. Tre olika rostfria stålkvaliteter ingår i undersökningen. I **tabell 7** visas den kemiska sammansättningen av de olika rostfria stålkvaliteter som ingår i undersökningen.

Tabell 7 *Kemisk sammansättning av rostfria bergbultar i mass-% (Composition of the stainless steel rock bolts used (%)*

Stålkvalitet (EN-nummer)	C	Cr	Ni	N	Mo	Mn	Mikro-struktur
1.4311	0,02	18,5	9,2	0,14	-	-	Austenit
1.4162	0,03	21,5	1,5	0,22	0,3	5,0	Duplex
1.4362	0,02	23,0	4,8	0,10	0,3	-	Duplex

7.3.4 Epoxibelagt och varmförzinkat kolstål

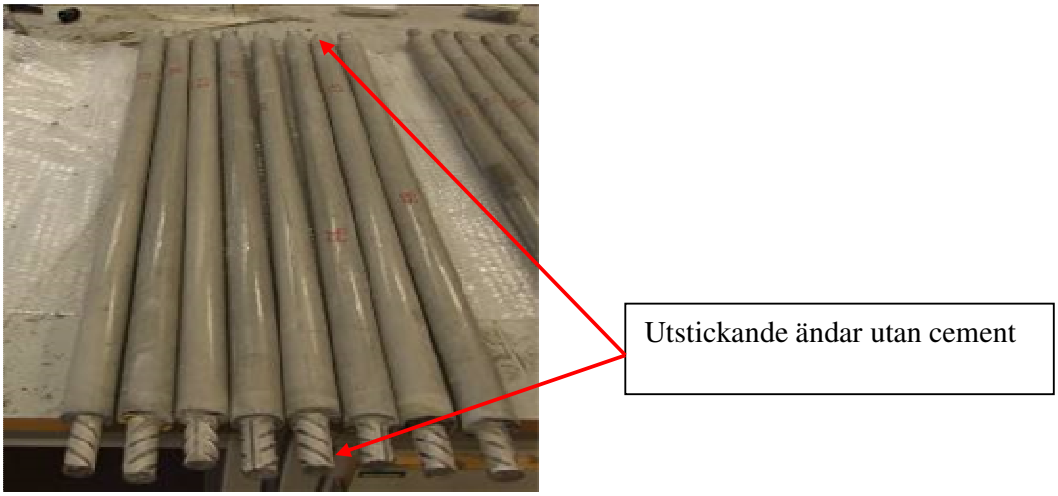
De epoxibelagda och varmförzinkade bergbultarna levererades av Galvano AS och Vik Ørsta AS, Norge. Beläggningarnas totala tjocklek mättes mellan kammarna före exponeringarna. I **tabell 8** visas resultaten från 10 mätningar per bergbult.

Tabell 8 *Total skikttjocklek i kambotten hos de 32 epoxibelagda och varmförzinkade bergbultar (Total coating thickness of the epoxy and the zinc layer on 32 epoxy coated and hot-dip galvanized rock bolts)*

Leverantör	Zinkskikt medelvärde µm (std. dev.)
Galvano AS	163 (14)
Vik Ørsta AS	210 (16)

7.4 Provkroppar

För att kunna göra relevanta undersökningar i bergtunnlar gjordes provkroppar som simulerar injekterade bergbultar genom att gjuta in provstängerna i cylindrar med anläggningscement. Av bergbultarnas totala längd gjöts 900 mm in. Ändarna som sticker ut i var ände är c:a 50 mm, se **figur 3**. Vid framställning av provkroppen användes anläggningscement som uppfyller kraven för standard cement CEM I enligt SS-EN 197-1. Cementcylindern har en diameter av 42 mm. Cementskiktet som täcker provstängerna är därför c:a 10-12 mm tjockt.



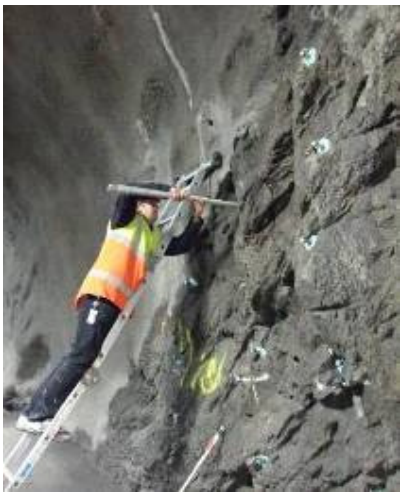
Figur 3 *Provkroppar för korrosionsprovning i tunnlar*
(Test specimens for corrosion testing in tunnels)

7.5 Placering av bergbultar i bergvägg

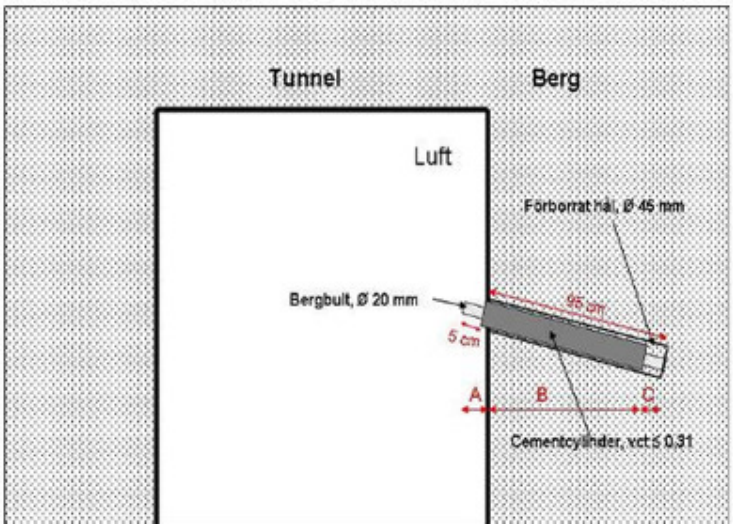
Delvis ingjutna bergbultarna av olika material och skyddsbeläggningar monterades i förborrade hål i bergväggen i Muskötunneln och i Äspötunneln, **figur 4 och figur 5**. De förborrade hålens diameter är 45 mm och har ett djup av 950 mm in i berget. Hålen har en lutning av ca 30° snett nedåt i berget, se skiss i **figur 6**. Spalten mellan bergvägg och cementcylinder tätades i hålmynningen med en tätningsmassa, **figur 7**.

Den ena utstickande bultänden kommer att utsättas för aggressivt sprickvatten i berget och den andra bultänden är luftexponerad och utsättas för droppande bergvatten från berget samt aggressiva partiklar från tunnelns inre.

För att accelerera korrosionen i tunnelmiljön sprutades ett urval utstickande bultändar en gång i månaden under det första året med 3 % natriumkloridlösning. Denna sprutning med saltlösning liknar den accelererade provmetoden SCAB enligt SS-EN ISO 11474.



Figur 4 *Montering av provkroppar i förborrade hål i Muskötunneln*
(Mounting of rock bolts in drilled holes in the Muskö tunnel).



Figur 5 *Schematisk skiss av monterad provkropp förborrat hål som lutar c:a 30° (Illustration of a test specimen mounted in a rock wall)*

Figur 6 *Bergbultar monterade i Äspötunneln (Rock bolts mounted in the Äspö tunnel)*

Figur 7 *Tätning av spalt mellan och cementcylinder och berg (Sealing of the gap between the rock and the concrete cylinder).*

7.6 Vattenprovtagning

Vattenprovtagning utfördes i vid tolv olika borrhål (sex placerade i Muskötunneln och sex i Äspötunneln). Provtagningen utfördes både före montering av provkropparna och efter att provkropparna tagits ut från hålet, ett och två år senare. Vattenproverna har analyserats av ALS Scandinavia och följande analyser har utförts:

Analyser
Färgtal
pH
Alkalinitet
Konduktivitet
Hårdhet total
Ammonium-nitrogen
Nitrat-nitrogen
Nitrit-nitrogen
Fosfat-fosfor
Fluorid, F
Klorid, Cl
Sulfat, SO_4
Aluminium, Al
Kalcium, Ca
Koppar, Cu
Järn, Fe
Kalium, K
Magnesium, Mg
Mangan, Mn
Natrium, Na

7.7 Utvärdering av korrosionstillstånd hos bergbultar

Efter ett och två års korrosionsprovning i Muskö- och i Äspötunneln togs ett urval av bergbultarna in för utvärdering av korrosionsutseendet, korrosionshastighet och maximalt gropfrätningsdjup.

Provstänger av obelagt kolstål

Efter ett års exponering rengjordes provstängerna från cementrester och korrosions-produkter genom en lätt blästring med glaskulor på de korroderade stålytorna.

Efter två år rengjordes provstängerna genom en upprepad betning i Clarkes lösning (20 g Sb_2O_3 och 60 g $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ löst i en liter koncentrerad HCl) vid rumstemperatur.

Genom vägning bestämdes massförlusten för hela provstången. Massförlusten bestämdes genom att provstängerna vägs före exponeringen och efter exponeringens då provstängerna rengjorts från cement och korrosionsprodukter.

Därefter bestämdes frätgropsdjupet med ljusoptiskt mikroskop.

Varmförzinkat kolstål

Efter ett års exponering rengjordes bergbultarna från cementrester och korrosionsprodukter genom betning i 5 volym-% ättiksyra vid rumstemperatur. Genom vägning bestämdes massförlusten för hela provstången.

Efter två års exponering utvärderades zinkens korrosionshastighet genom att ta ut provbitar från provstängerna och mäta zinkskiktets tvärsnitt genom ett ljusoptiskt mikroskop och jämföra med provstänger som inte varit exponerade.

Rostfritt stål

Provstängernas korrosionstillstånd utvärderades genom enbart att okulärt undersöka provstängernas yta med avseende frätgropar och missfärgning.

I denna undersökning har inga spänningsbelastade rostfria bultar ingått.

Epoxibelagda varmförzinkade bergbultar

För att bedöma de olika skyddsbeläggningarnas förmåga att hindra korrosionsangrepp på varmförzinkat kolstål har skyddsbeläggningarnas skikttjocklek, rostgrad, blåsbildning, sprickbildning, avflagning och maximal rostutbredning från rits undersökts.

Skikttjocklek

Skikttjockleken på mäts med magnetisk metod med en skikttjockleksmätare Elcometer 456 enligt svensk standard SS 18 41 60.

På varje bergbult mäts skikttjocklek i fem mätområden. Varje mätområde är en cirkulär yta mellan bergbultarnas kammar. Inom varje mätområde gjordes fem mätningar. Medelvärdet från dessa fem mätningar inom ett provningsområde utgör en lokal skikttjocklek. Totalt erhölls fem lokala skikttjocklekar per bergbult. Medelskikttjockleken är medelvärdet av alla lokala skikttjocklekar.

Rostgrad

Rostgraden på provobjekten utvärderades enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-3:2004. Förhållandet mellan rostgrad och rostad yta framgår av **tabell 9**. I svensk standard SS-EN ISO 4628-3:2004 anges allmänna principer för utvärdering av intensitet, mängd och storlek på skador på färgskikt vid utvärdering av rostgrad, blåsbildning, sprickbildning och flagning.

Tabell 9 *Rostgrader enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-3:2004*
Degree of rust according SS-EN ISO 4628-3:2004).

Rostgrad	**Rostad yta** %
Ri 0	0
Ri 1	0,05
Ri 2	0,5
Ri 3	1
Ri 4	8
Ri 5	40/50

Blåsbildning

Blåsbildningsgraden på bergbultarna utvärderades enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-2:2003. Förhållandet mellan blåsbildningsgrad och mängden blåsor framgår av **tabell** 10.

Tabell 10 *Blåsbildningsgrader enligt svensk standard SS ISO 4628-2:2003 (Degree of blistering according SS-EN ISO 4628-3:2003).*

Klass	Mängd blåsor
0	Inga blåsor
1	Mycket få blåsor
2	Få blåsor
3	Måttlig mängd blåsor
4	Avsevärd mängd blåsor
5	Stor mängd blåsor

Sprickbildning

Sprickbildningsgraden på bergbultarna utvärderades enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-4:2003. Förhållandet mellan sprickbildningsgrad och mängden sprickor framgår av **tabell 11**.

Tabell 11 *Sprickbildningsgrader enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-4:2003 (Degree of cracking according SS-EN ISO 4628-4:2003).*

Klass	Mängd sprickor
0	Inga sprickor
1	Mycket få sprickor
2	Få sprickor
3	Måttlig mängd sprickor
4	Avsevärd mängd sprickor
5	Stor mängd sprickor

Flagning

Flagningsgraden på bergbultarna utvärderades enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-5:2003. Förhållandet mellan flagningsgrad och avflagnad yta framgår av **tabell 12**.

Tabell 12 *Flagningsgrad enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-5:2003 (Degree of flaking according to SS-EN ISO 4628-5:2003).*

Klass	Avflagnad yta %
0	0
1	0,1
2	0,3
3	1
4	3
5	15

Spridning från avsiktliga skador

Spridning av korrosion och nedbrytning från den avsiktligt gjorda ritsen på de målade provplåtarna undersöktes enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-8:2003.

8 Resultat

8.1 Utvärdering av korrosionstillstånd hos bergbultar exponerade i Muskötunneln och i Äspötunneln

Efter ett och två års exponering i Muskö- och Äspötunneln togs ett urval provkroppar in på för undersökning av korrosionstillstånd. Samtliga exponerade provkroppar har varit utsatta dels för tunnelns atmosfär inne i tunneln, dels grundvatten inne i berget.

Obelagt kolstål

Utseendet efter ett och två års exponering i Muskö- och Äspötunneln visas i **bilaga 1** (ett års exponering) och **bilaga 6** (två års exponering). På de fria obelagda ytorna som exponerats i tunnlarna förekommer rödrost och mindre frätgropar på stålytan.

Tabell 12 visar massförlusterna för hela provstängerna.

I **tabell 13** visas resultat från frätgropsmätningar av bergbultarnas olika delar. Provyta A är utstickande i tunnelns atmosfär, Provyta B är ingjuten i cement och Provyta C är utsatt för grundvatten längst in i borrhålet.

I bilagorna och tabell 13 kan man se att korrosion varken uppstått på de delar som varit ingjutna i anläggningscement eller på de ytor som exponerats fritt för vatten i berget.

Korrosionen på kolstål har främst skett på ändarna som sticker ut i tunnlarna. Korrosionsnivån i Muskötunneln är något högre än i Äspötunneln.

Korrosionsangreppen var betydligt mer omfattande på de NaCl-sprutade bergbultsdelarna jämfört med icke sprutade bultar. Med saltsprutning är korrosionsnivåerna i Muskö- och Äspötunnlarnas atmosfärer nästan lika höga.

Tabell 13 *Massförlust för kolstål (Mass loss of carbon steel).*

Provplats	Prov nr	Exponeringstid År	Korrosionshastighet beräknad över hela stången µm/år
Muskö	A1	1 år	2,3
Muskö	A2	1 år	1,5
Muskö	A3	2 år	3,5
Muskö	A4	2 år	3,2
Muskö	A7	1 år + 3 % NaCl	8,3
Muskö	A8	1 år + 3 % NaCl	9,3
Äspö	N1	1 år	2,2
Äspö	N2	1 år	3,2
Äspö	N3	2 år	2,0
Äspö	N4	2 år	1,8
Äspö	N7	1 år + 3 % NaCl	7,9
Äspö	N8	1 år + 3 % NaCl	9,3

Tabell 14 *Gropfrätning för obelagt kolstål. Medelvärde av maximal frätdjup på tre kolstålsstänger. (Pitting depth for carbon steel).*

Provplats	Prov nr	Exponering år	Provyta A µm	Provyta B µm	Provyta C µm
Muskö	A1	1 år	150	0	0
Muskö	A2	1 år	217	0	0
Muskö	A3	2 år	325	0	0
Muskö	A4	2 år	350	0	0
Muskö	A7	1 år + 3 % NaCl	433	0	0
Muskö	A8	1 år + 3 % NaCl	417	0	0
Äspö	N1	1 år	83	0	0
Äspö	N2	1 år	125	0	0
Äspö	N3	2 år	155	0	0
Äspö	N4	2 år	225	0	0
Äspö	N7	1 år + 3 % NaCl	465	0	0
Äspö	N8	1 år + 3 % NaCl	450	0	0

Bergbult av varmförzinkat kolstål

Utseendet hos varmförzinkade bergbultar visas i **bilaga 2** (ett års exponering) och **bilaga 7** (två års exponering). De utstickande delarna av de varmförzinkade ändarna i tunneln och på de fria obelagda ytorna som exponerats för vatten i berget är täckta av vitrost.

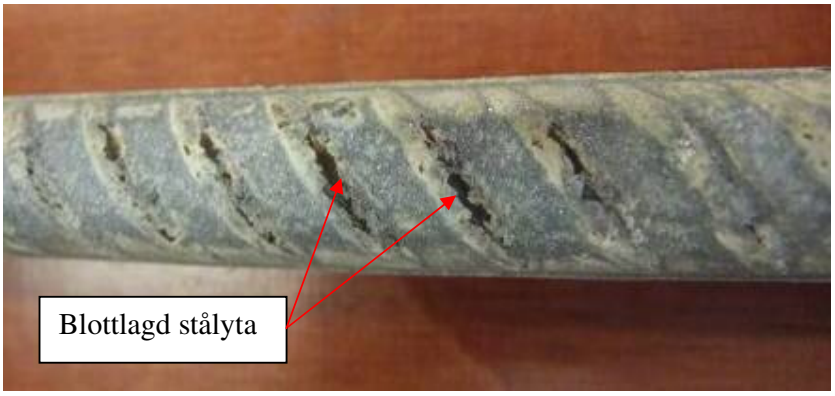
Samtliga varmförzinkade bergbultar hade god vidhäftning mellan zinkskikt och cement. Det är inte möjligt att särskilja zinkens korrosionsprodukter (vitrost) på grund av att zinkytan är mer eller mindre täckt med anläggningscement som reagerat med zinken.

I **tabell 15** visas korrosionshastigheten efter ett år, baserat på massförsluten för hela bergbulten. Korrosionshastigheten är eventuellt underskattad genom att man inte lyckades avlägsna alla och cementrester.

Tabell 15 *Korrosionshastigheten hos varmförzinkade bergbultar av kolstål exponerade 1 år (Corrosion rate for galvanized rock bolts exposed 1 year).*

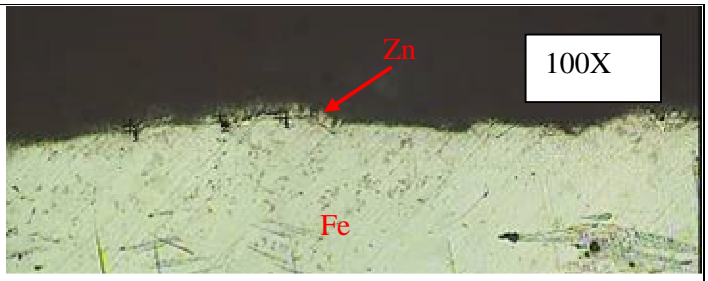
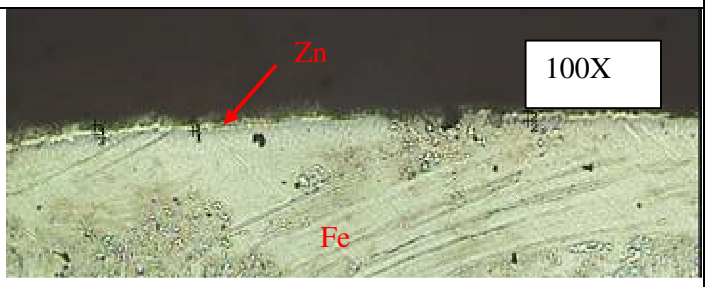
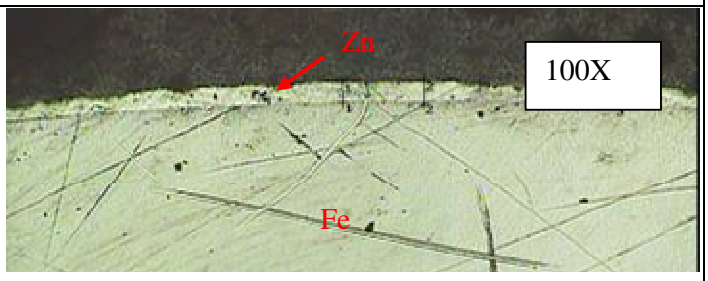
Provplats	Prov nr	Exponering år	Korrosionshastighet µm/år
Muskö	B1	1 år	6,1
Muskö	B2	1 år	7,2
Muskö	D3	1 år	6,1
Muskö	B7	1 år + 3 % NaCl	10,3
Muskö	B8	1 år + 3 % NaCl	6,1
Äspö	O1	1 år	5,9
Äspö	O2	1 år	6,9
Äspö	Q1	1 år	5,8
Äspö	O7	1 år + 3 % NaCl	8,8
Äspö	O8	1 år + 3 % NaCl	9,2

Korrosionshastigheten efter två år är bestämd genom att studera zinkskiktet i slipade tvärsnitt med ljusoptiskt mikroskop, se **tabell 16 och 17.** Bergbultar från Galvano har förlorat nästan hela zinkskiktet både på ytan som är exponerad för vatten längst in i berget och under cementen. Under cementen har stålet fläckvis börjat rosta, se **figur 8**.

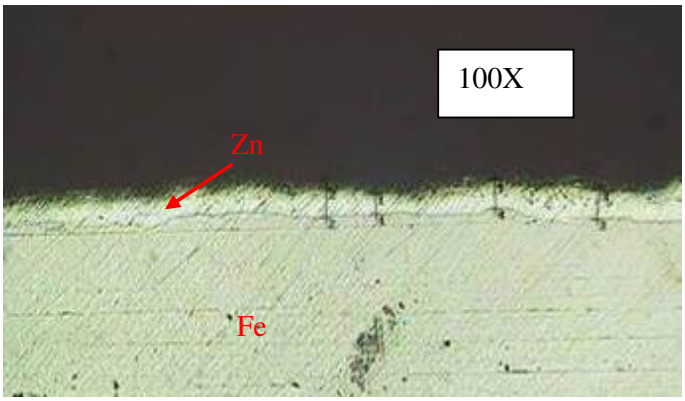
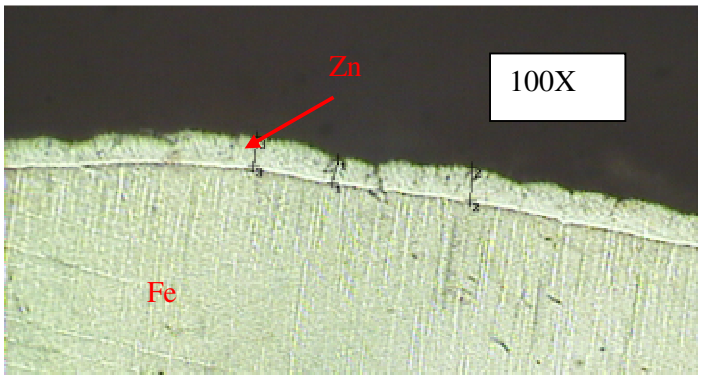
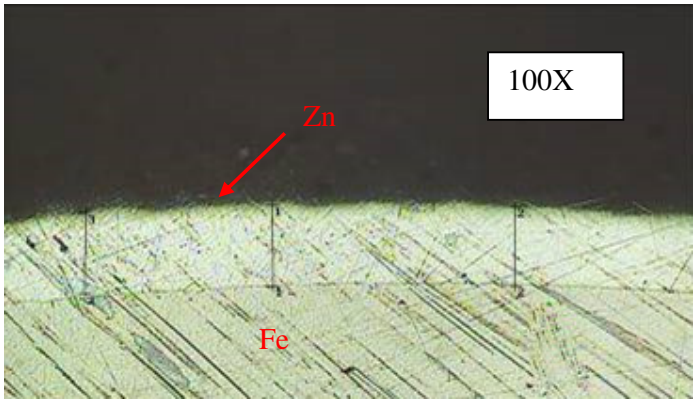


Figur 8 *Varmförzinkad bergbult där zinkskiktet är fläckvis bortkorroderat lokalt efter två år (Galvanized rock bolt where the zinc coating is locally corroded through after two years).*

Tabell 16 *Tvärsnitt från bergbultar levererade av Galvano AS efter två års exponering i Muskötunneln. (Cross sections of rock bolts supplied by Galvano AS after two years of exposure at Muskö).*

Tvärsnitt av varmförzinkad bergbultsdel utan cement som har exponerats inne i berget. Zinkskiktet är mer eller mindre bortfrätt efter två års exponering.	
Tvärsnitt av en varmförzinkad bergbultsdel i kontakt med anläggningscement. Punktvis är zinkskiktet är bortfrätt efter två års exponering.	
Tvärsnitt av en varmförzinkad bergbultsdel utan cement som har exponerats i tunnelns atmosfärsdel. Zinkskiktets tjocklek är ca 35-40 µm efter två års exponering.	

Tabell 17 *Tvärsnitt från bergbultar levererade av Vik Ørsta AS efter två års exponering i Äspötunneln. (Cross sections of rock bolts supplied by Vik Ørsta AS after two years of exposure in the Äspö tunnel).*

Tvärsnitt av varmförzinkad bergbults del utan cement som har exponerats två år inne i berget. Zinkskiktets tjocklek varierar mellan 45 och 53 µm efter två års exponering.	
Tvärsnitt av en varmförzinkad bergbultsdel som varit i kontakt med anläggnings-cement. Zinkskiktets tjocklek varierar mellan 48 och 57µm efter två års exponering.	
Tvärsnitt av en utstickande varmförzinkad bergbultsdel som har exponerats i Äspötunnelns atmosfär. Zinkens skikttjocklek varierar mellan 95 och 101µm efter två års exponering	

I **tabell 18** visas resultat från mätningar från tvärsnitt i ljusoptiskt mikroskop. Provyta A är utstickande i tunnelns atmosfär, Provyta B är ingjuten i cement och Provyta C är utsatt för grundvatten längst in i borrhålet. Av resultaten framgår att korrosionshastigheten är betydligt högre i Muskötunnelns atmosfär än i Äspötunneln. Korrosionshastigheten i berget vid Muskö och vid Äspö är c:a 20 µm/år vilket är mycket högt.

Tabell 18 *Zinkskikttjocklekar före och efter två års exponering (Measured zinc coating thicknesses after two years of exposure).*

Provplats	Bergbultsdel	Ursprunglig zinkskikttjocklek µm (std.dev.)	Zinkskikttjocklek efter exponering µm (std.dev.)	Beräknad skillnad µm (std.dev.)
Muskö	A.	42,1 (7,8)	36 (5,8)	6,1
	B.	42,1 (7,8)	3,5 (5,5)	38,6
	C.	42,1 (7,8)	2,0 (5,0)	40,1
Äspö	A.	94,7 (9,8)	92 (7,5)	2,7
	B.	94,7 (9,8)	53 (7,3)	41,7
	C.	94,7 (9,8)	52 (6,7)	42,7

Rostfria bergbultar

I **bilaga 3** (ett års exponering) och **bilaga 8** (två års exponering) visas utseendet hos rostfria bergbultar som exponerats ett år i Muskö- och i Äspötunneln. Som framgår av **bilaga 3** (ett års exponering) och **bilaga 8** (två års exponering) så förekommer inga synliga korrosionsangrepp på de rostfria bergbultarna efter ett och två års exponering i Muskö- och i Äspötunneln. De rostfria bergbultarna är helt oskadade efter ett och två års exponering.

Epoxibelagda och varmförzinkade bergbultar (

I **bilaga 4** och **5** (ett års exponering) och **bilaga 9** och **10** (två års exponering) visas utseendet hos de epoxibelagda och varmförzinkade bergbultarna efter ett års exponering i Muskö- och Äspötunneln.

Inga korrosionsangrepp, sprickor, blåsor eller andra defekter har konstaterats på de epoxibelagda och varmförzinkade bergbultarna efter både ett och två års exponering.

Ingen utbredning av rost från beläggningsskada har konstaterats på någon av de exponerade bergbultarna efter två års exponering. På de utstickande bultdelarna med en avsiktlig skada som sprutats en gång i månaden med en 3 % NaCl-lösning konstaterades ytlig rödrost i ritsen efter 1 år.

8.2 Vattnets korrosivitet i borrhålen enligt DIN 50 929

I de förborrade hålen, där de föringjutna bergbultarna exponerats i ett eller två år i Muskö- och i Äspötunneln, uttogs vattenprover både före inmontering av bergbultarna och direkt efter att bultarna togs ut för utvärdering efter ett och två års exponering. I **tabell 19** och **20** visas analysresultat av tre prover från Muskötunneln och tre prover från Äspötunneln.

Tabell 19 *Analysresultat från vattenprover uttagna från de förborrade hålen i bergväggen i Muskötunneln (Test results from water samples taken from the drilled holes before mounting of rock bolts in the Muskö tunnel)*

Analys	Enhet	Provuttag före exponering	Provuttag efter ett års exponering,	Provuttag efter två års exponering.
Ca	mg/l	921	1230	975
Mg	mg/l	115	108	34,3
Na	mg/l	1790	1110	1250
K	mg/l	23,1	29,6	9,65
Fe	mg/l	0,0053	1,29	0,004
Al	mg/l	0,0134	5,020	0,001
Cu	mg/l	0,0485	3,930	0,001
Mn	µg/l	0,447	0,334	0,0001
Totalhårdhet	°dH	155	197	144
Konduktivitet	mS/m	1330	1080	1098
pH		7,8	11,4	9,8
Alkalinitet (HCO_3^-)	mg/l	68	850	77
Nitritkväve	mg/l	0,11	<0,5	0,21
Fosfat-fosfor	mg/l	<0,010	<0,010	<0,010
Klorid	mg/l	3650	3720	3500
Sulfat	mg/l	606	238	384
Nitratkväve	mg/l	1,53	0,006	<0,500
Ammoniumkväve	mg/l	0,137	0,048	0,118
Fluorid	mg/l	<0,20	<1,00	<0,400

Tabell 20 *Analysresultat från vattenprover uttagna från de förborrade hålen i bergväggen i Äspötunneln (Test results from water samples taken from the drilled holes before mounting of rock bolts in the Äspö tunnel).*

Analys	Enhet	Provuttag före exponering	Provuttag efter ett års exponering,	Provuttag efter två års exponering
Ca	mg/l	3820	794	3360
Mg	mg/l	46,6	15,8	36,3
Na	mg/l	2990	3340	2880
K	mg/l	13,2	3000	339
Fe	mg/l	0,201	6,60	0,0025
Al	mg/l	0,175	1,060	0,004
Cu	mg/l	0,838	3,180	0,007
Mn	mg/l	0,255	0,105	0,050
Totalhårdhet	°dH	546	115	457
Konduktivitet	mS/m	2800	3240	2830
pH		7,3	12,4	8,8
Alkalinitet (HCO_3^-)	mg/l	25	3300	27
Nitritkväve	mg/l	0,0040	0,33	0,788
Fosfatfosfor	mg/l	<0,01	<0,652	<0,010
Klorid	mg/l	11300	6580	5200
Sulfat	mg/l	603	117	573
Nitratkväve	mg/l	3,40	1,13	<0,50
Ammoniumkväve	mg/l	0,187	<2,48	0,504
Fluorid	mg/l	1,34	9,10	<2,00

I **tabellerna 21-23** ges en sammanställning för bedömningssumman W_0, korrosionsrisk-bedömning för jämn korrosion och gropfrätning samt förväntad korrosionshastighet för jämn korrosion och maximal gropfrätning enligt DIN 50 929, del 3
Bedömningen gjordes både före och efter exponeringen av de ingjutna bergbultarna. Det framgår av resultaten att grundvattnet från bergväggen i Äspötunneln bedöms något mer aggressivt än grundvattnet ifrån bergväggen i Muskötunneln. Efter ett års exponering i bergväggarna har framför allt vattnets pH-värde och alkalinitet ökat i borrhålen, i både Muskö och Äspötunneln. Efter två års exponering framgår det att pH-värdet och alkaliniteten har börjat sjunka ned mot de ursprungliga värden som uppmättes innan exponeringen startades.

Tabell 21 *Bedömningssumma Wo enligt DIN 50929, del 3*
(Assessment sum W_o according to DIN 50929, part 3)

	Vattenprov före exponering	Vattenprov efter ett års exponering	Vattenprov efter två års exponering
*W*o, Muskö	-10	+0,8	-10
*W*o, Äspö	-13	-1,4	-10

Tabell 22 *Korrosionsriskbedömning enligt DIN 50 929, del 3*
(The possibility to corrosion according to DIN 50929, part 3)

	Vattenprov före exponering	Vattenprov efter ett års exponering	Vattenprov efter två års exponering
Jämn korrosion, Muskö	Måttlig	Mycket liten	Måttlig
Jämn korrosion, Aspö	Måttlig	Mycket liten	Måttlig
Gropfrätning, Muskö	Hög	Mycket liten	Hög
Gropfrätning, Aspö	Hög	Liten	Hög

Den förväntade gropfrätningen i vattenfas i berget hos kolstål enligt DIN 50 929 har inte observerats, **tabell 23**.

Tabell 23 *Förväntad korrosionshastighet [µm/år] enligt DIN 50 929, del 3, Muskötunneln jämförd med uppmätt (Expected corrosion rate according DIN 50 929, part 3 of the Muskö tunnel).*

	Vatten före exponering µm/år	Vatten efter 1 år µm/år	Vatten efter 2 år µm/år	Gropfrätning kolstål C efter 2 år µm/år
Jämn korrosion, Muskö	100	10	100	0
Jämn korrosion, Aspö	100	20	100	0
Maximal gropfrätning, Muskö	500	5	500	0
Maximal gropfrätning, Aspö	500	100	500	0

9 Diskussion

Efter både ett och två års exponering i förborrade hål av obelagt kolstål konstaterades inga korrosionsangrepp. Detta gäller även bergbultar av rostfritt stål av stålkvaliteterna EN 1.4311, EN 1.4162 och EN 1.4362 samt de epoxibelagda varmförzinkade bergbultarna. De bergbultar som enbart var varmförzinkade och som exponerats i de förborrade hålen var kraftigt korroderade, både ytor mot cement och ytor som varit omgivna av bergets grundvatten.

Obelagt kolstål som exponerats fritt i tunneln har lokalt kraftig gropfrätning, både vid undersökningarna efter ett och två år. Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på de rostfria bergbultar. Detta gäller även epoxibelagda varmförzinkade bergbultar med och utan beläggningsskada.

De varmförzinkade bergbultarna hade fått kraftig vitrost på de delar som exponerades både fritt och ingjutna i anläggningscement i de förborrade hålen i berget. Orsaken till de höga korrosionshastigheterna hos zinkskiktet i berget kan eventuellt förklaras med en kontinuerlig kontakt med grundvattnen som blivit alkaliskt. Den höga fuktbelastningen (låg syrehalt) i kombination med ett vatten av ett högt pH-värde ger en ökad korrosionshastighet under bildning av vätgas. Tidigare undersökningar utförda av Swerea KIMAB (**Ref 7**) visade att korrosionshastigheten hos zink vid betongingjutning initialt är mycket hög. Efter ca 24 timmar efter gjutningen sjönk korrosionshastigheten dramatiskt och zinken passiverades och vätgasutvecklingen avstannade helt.

De bergbultar som utvärderades efter ett års korrosionsprovning har varit utsatta för ett vatten med en låg vattenomsättning, vilket har inneburit att framför allt pH-värdet i vattnet runt de delvis ingjutna bergbultarna har ökat från 7,8 till ca 12,5 i Äspötunneln och från 7,3 till ca 11,4 i Muskötunneln. Även alkaliniteten i vattnet runt de ingjutna bergbultarna har ökat kraftigt efter ett års korrosionsprovning jämfört med ursprungligt värde. Även om vattnet runt innersta delen av bulten utan cement innehåller höga kloridhalter ger det höga pH-värdet, den höga alkaliniteten och en relativt låg syrehalt i vattnet tillsammans en låg korrosionshastighet för kolstål, rostfritt stål och epoxibelagda bergbultar. Syrehalten utefter bergbultarna varierar sannolikt utefter bergbulten på grund av avståndet från tunnelns atmosfärsdel, ju längre in berget desto lägre syrehalt. För de varmförzinkade bergbultarna har korrosionshastigheten dock varit hög i den alkaliska miljön.

Efter två års korrosionsprovning konstaterades att pH-värdet runt de ingjutna bergbultarna hade börjat sjunka. Vid provtagning efter två år hade pH-värdet i borrhålen sjunkit från 11,4 till 8,8 i Muskötunneln och från 12,4 till 9,8 i Äspötunneln. Även alkaliniteten var tillbaka till samma nivå som när borrhålen var nyborrade, **tabell 19 och 20**. Detta innebär att bergbultsdelen utan cement och cementcylindern har under exponeringen varit utsatt för visst flöde av grundvatten, vilket inneburit en urlakning av cementcylindern.

De flesta komponenterna i cementbruket är mer eller mindre vattenlösliga. Flödande rent vatten, i synnerhet mjukt vatten med låga halter av kalciumjoner, kan förväntas lösa upp kalciumhydroxid, men också kaliciumsilikater och alkalihydroxider, samt bryta ner hydratiserade silikat- och aluminatfaser. Kalciumförlusten leder till ökad porositet och därmed ökad permeabilitet och vattentransport genom cementen, vilket i sin tur accelererar fortsatt urlakning. Hur snabbt urlakningen sker är i huvudsak beroende av vattnets flödeshastighet och vattnets kemiska egenskaper.

I bergtunnlar förekommer det ofta stora vattenflöden i bergets spricksystem. Om de vattenförande sprickorna i berget är i kontakt med anläggningscement genom ofullständig cementingjutning, genomgående spricka etc. urlakas cementet. Urlakning av cement leder till ökade korrosionsangrepp. Korrosionsangreppets omfattning på bergbultarna påverkas av många faktorer. Inte alla faktorer finns med i bedömningarna som görs av DIN 50 929, del 3. En faktor som lokalt kan ge en ökad korrosion är när järnrikt grundvattnet som innehåller tvåvärda järnjoner (Fe^{2+}) kommer i kontakt med vattenlösligt syre och oxideras till trevärda järnjoner (Fe^{3+}). Vid denna oxidation kan en kraftig försurning (pH-sänkning) uppstå lokalt vilket kan öka korrosiviteten.

Undersökningen har hittills visat att både cementingjutna och fritt exponerade rostfria bergbultar av stålkvaliteterna EN 1.4311, EN 1.4162 och EN 1.4362 är helt oskadade efter två års korrosionsprovning i berg med höga kloridhalter.

Även för varmförzinkade bergbultarna som manganzinkfosfaterats samt belagts med en värmehärdande epoxipulverbeläggning har hittills ingen noterbar korrosion upptäckts. Även vid små blottlagda skador i beläggningen ned till stålytan har hittills ett bra korrosionsskydd erhållits. Beläggningens motstånd mot korrosionsangrepp i tunnelns inre miljö (atmosfärsdel) är mycket god efter två års korrosionsprovning.

En förutsättning för att använda epoxibelagda varmförzinkade kolstålsbultar är att zinkytan ska vara fosfaterad före applicering av epoxibeläggningen. Upphandling och tillverkning med varmförzinkning, fosfatering och pulverbeläggning kräver särskild omsorg och kompetens vid upphandling.

Utgångspunkt för en specifikation av värmehärdad epoxipulverbeläggning på förzinkat kolstål bör vara den europeiska standarden EN 13438 som beskriver krav på pulverbeläggningar. En reviderad version av EN 1438 kommer troligen att ges ut tidigast under senare delen av 2013 eller i början av 2014. Många av kraven som anges i standarden är dock inte relevanta för bergbultar. Ett urval av dessa specificerade egenskaper och krav är normalt tillräckliga för beläggning av bergbultar. Krav på zinkfosfateringen som inte ingår i standarden måste särskilt specificeras.

För att kunna göra en mer säker bedömning av den tekniska livslängden i bergtunnlar med höga kloridhalter i grundvattnet bör provningen pågå ytterligare några år. Förhoppningsvis kommer att dessa att utvärderas efter ytterligare några års korrosionsprovning i ett kommande projekt.

10 Slutsatser

Kolstål som är cementingjuten placerad i borrhål visar efter två år mycket lite korrosion, trots höga kloridhalter i det omgivande bergets grundvatten. Korrosion uppstår på stålytor utan korrosionsskydd som är exponerade utanför berget inne i tunnelns atmosfär.

Genom att man efter två år kan påvisa att alkaliniteten och pH återgått till grundvattnets nivå, kommer troligtvis korrosionshastigheten vara större för kolstål i framtiden jämfört med de första två åren. Därför är det fortfarande tveksamt om man för mycket långa specificerade livslängder kan använda bergbultar av kolstål utan extra korrosionsskydd om grundvattnet innehåller höga kloridhalter.

Korrosionsskydd genom varmförzinkning har troligtvis en relativt kortvarig skyddsverkan genom att zinkmetallen förbrukas, både som oskyddad och under anläggningscement under de fuktiga förhållanden som funnits i de förborrade hålen i berget.

Varmförzinkade bergbultar med epoxibeläggning ska noggrant specificeras och kontrolleras vid leverans för att säkerställa en lång livslängd på korrosionsskyddet. För detta rekommenderas starkt att man utgår från europastandarderna EN 15773 (2009) och EN 13438.

Erfarenheten efter två års provning ger att om inte höga klorider i grundvattnet kan uteslutas, ska man främst överväga bergbultar i rostfritt material och varmförzinkade bergbultar med epoxibeläggning för en mycket lång teknisk livslängd. Detta på grund att man påvisat att cementens alkaliserande verkan kan förvinna inom två år och att varmförzinkning överraskande förbrukades snabbt.

11 Referenser

Ref 1 Sandberg B: Beständighet hos ingjutna bergbultar – analys av bergbultar från Vindötunneln, etapp 3. Uppdragsrapport nr 55882. Korrosionsinstitutet 2002

Ref 2 Sandberg, B: Undersökning av tunnelmiljöns korrosiva egenskaper – Etapp 2. Uppdragsrapport nr 55 258. Korrosionsinstitutet 2001.

Ref 3 Helfrich, H. K: Bultars beständighet. Uppföljning av bultar av olika typ och ålder, Kvarntorps sandstensgruva. Föredrag vid Bergmekanisk diskussionsmöte i Stockholm den 26 januari 1989. Stiftelsen Bergteknisk Forskning

Ref 4 Sandberg, B: Fältförsök, korrosion av kolstål i berg utan cementingjutning. Uppdragsrapport nr 788059. Swerea KIMAB 2009.

Ref 5 TRVK Tunnel 11. Trafikverkets tekniska krav Tunnel, TRV publ. nr 2011:087.

Ref 6 DIN 50 929, part 3, ”Corrosion of Metals, probability of corrosion of metallic materials when subject to corrosion from the outside (Buried and underwater pipelines and structural components). DIN, Sept. 1985

Ref 7 Vinka, T-G, & Becker, M: Korrosion på förzinkat stål i betong. Bygg & Teknik, nr 7, 1999

Bilaga 1 Exponerade obelagda kolstålsstänger

Muskötunneln		Äspötunneln	
Nr: A1	A2	N1	N2
Utstickande ände av obelagt kolstål exponerat 1 år i tunnelatmosfär			
Obelagt kolstål exponerat 1 år ingjuten i borrhål. Bultarna har frilagts från cement före fotografering			
Obelagt kolstål exponerat 1 år längst in i borrhål			

Muskötunneln		Äspötunneln	
Utstickande ände av obelagt kolstål besprutat 1 år exponerat i tunnelatmosfär			
Nr: A7	A8	N7 efter rengöring	N8 efter rengöring
Obelagda ändar som har rengjorts exponerade 1 år längst in i borrhål			
Nr: A7	A8	N7	N8

Bilaga 2 Exponerade varmförzinkade bergbultar

Muskötunneln		Äspötunneln	
Utstickande varmförzinkad ände exponerad 1 år i tunnelatmosfär, utan skada			
Nr: B1 utan skada	C2 med skada	O2 utan skada	P1 med skada
Varmförzinkad bergbult med skada exponerad 1 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.			
B2 utan skada	C2 med skada	O1 utan skada	P2 med skada
Varmförzinkade ändar exponerade 1 år längst in i borrhål			
B2 utan skada	C2 med skada	O1 utan skada	P2 med skada

Muskötunneln			Äspötunneln	
Utstickande ände av varmförzinkad bergbult besprutad 1 år med NaCl lösning i tunnelatmosfär				
Nr:	B8 utan skada	C8 med skada	O7 utan skada	P8 med skada
Varmförzinkade ändar exponerade 1 år längst in i borrhål				
Nr:	B7 utan skad	C8 med skada	O7 utan skada	P8 med skada

Bilaga 3 Exponerade rostfria bergbultar

Rostfria bergbultar) exponerade ett år i Muskötunneln.		
Utstickande rostfri ände		
Nr: E1 E2 EN 1.4311	F1 F2 EN1.4362	G1 G2 EN 1.4162
Rostfri bergbult med skada exponerad 1 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.		
Nr: E1 E2 EN 1.4311	F1 F2 EN1.4362	G1 G2 EN 1.4162
Rostfria ändar efter rengöring exponerade 1 år längst in i borrhål		
Nr: E1 E2 EN 1.4311	F1 F2 EN1.4362	G1 G2 EN 1.4162

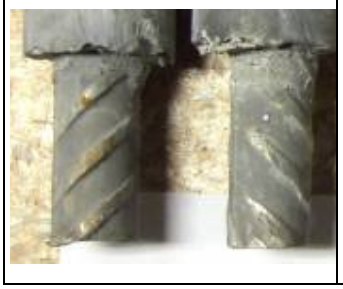
Rostfria bergbultar av stålkvaliteterna EN 1.4311 (E7, E8), EN1.4162 (F7, F8) och EN 1.4362 (G7, G8) exponerade ett år i Muskötunneln. Utstickande del i tunnel har sprutats en gång i månaden med 3 % NaCl

Utstickande rostfri ände

Nr: E8	F7 F8	G7 G8

Rostfria ändar efter rengöring exponerade 1 år längst in i borrhål

Nr: E7 E8	F7 F8	G7 G8

Rostfria bergbultar exponerade ett år i Äspötunneln .		
Utstickande rostfri ände		
Nr: R1 R2 EN 1.4162	S1 S2 EN 1.4311	T1 T2 EN 1.4362
Rostfri bergbult med skada exponerad 1 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.		
Nr: R2 EN 1.4162	S1 EN 1.4311	T2 EN 1.4362
Rostfria ändar efter rengöring exponerade 1 år längst in i borrhål		
Nr: R1 R2 EN 1.4162	S1 EN 1.4311	T1 T2 EN 1.4362
		

Rostfria bergbultar av stålkvaliteterna exponerade ett år i Äspötunneln. Utstickande del i tunnel har sprutats en gång i månaden med 3 % NaCl		
Utstickande rostfri ände efter rengöring		
Nr: S7 EN 1.4311	R8 EN 1.4162	T7 T8 EN 1.4362
Rostfri bergbult med skada exponerad 1 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.		
Nr: S7 EN 1.4311	R7 R8 EN 1.4162	T7 EN 1.4362
Rostfria ändar exponerade 1 år längst in i borrhål		
Nr: S8 EN 1.4311	R8 EN 1.4162	T7 T8 EN 1.4362

Bilaga 4 Epoxibelagda bergbultar leverantör A

Muskötunneln			Äspötunneln	
Utstickande epoxibelagda bergbultar från Galvano A/S exponerade 1 år i tunnelatmosfär				
Nr:	H2 utan skada	K1 med skada	U2 utan skada	X1 med skada
Epoxibelagda bergbultar med skada exponerad 1 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.				
H1 utan skada		K1 med skada	U1 utan skada	P1 med skada
Epoxibelagda bergbultar efter rengöring exponerade 1 år längst in i borrhål				
H1 utan skada		K1 med skada	U1 utan skada	X2 med skada

Muskötunneln			Äspötunneln	
Utstickande ändar av epoxibelagda bergbultar från Galvano A/S besprutade 1 år med NaCl lösning i tunnelatmosfär				
Nr:	H7 utan skada	K7 med skada	U8 utan skada	X7 med skada
Epoxibelagda bergbultar ändar exponerade 1 år längst in i borrhål				
H8 utan skada		K7 med skada	U7 utan skada	X8 med skada

Bilaga 5 Epoxibelagda bergbultar leverantör B

Muskötunneln			Äspötunneln	
Utstickande epoxibelagda bergbultar från Vik Ørsta A/S exponerade 1 år i tunnelatmosfär				
Nr:	L1 utan skada	M1 med skada	V1 utan skada	Y1 med skada
Epoxibelagda bergbultar med skada exponerad 1 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.				
L2 utan skada		M1 med skada	V1 utan skada	Y2 med skada
Epoxibelagda bergbultar exponerade 1 år längst in i borrhål				
L1 utan skada		M2 med skada	V1 utan skada	Y2 med skada

Muskötunneln			Äspötunneln	
Utstickande ändar av epoxibelagda bergbultar från Vik Ørsta A/S besprutade 1 år med NaCl lösning i tunnelatmosfär				
Nr:	L7 utan skada	M7 med skada	V8 utan skada	Y8 med skada
epoxibelagda bergbultar ändar exponerade 1 år längst in i borrhål				
L7 utan skada		M8 med skada	V7 utan skada	Y7 med skada

Bilaga 6 Obelagt kolstål exponerat 2 år

A3 A4 exponerad 2 år i Muskötunneln	N3, N4 exponerad 2 år i Äspötunneln
	Utstickande delar exponerade i tunnel Delar som varit ingjutna i anläggningscement
	Delar som varit ingjutna i anläggningscement Ändar exponerade för vatten längst in i hål

Bilaga 7 Varmförzinkad bergbult exponerad 2 år

B3 B4 (Galvano A/S) exponerad 2 år i Muskötunneln	O3 O4 (Vik Ørsta A/S) exponerade 2 år i Äspötunneln
	Utstickande delar exponerade i tunnel Delar som varit ingjutna i anläggningscement
	Delar som varit ingjutna i anläggningscement Ändar exponerade för vatten längst in i hål

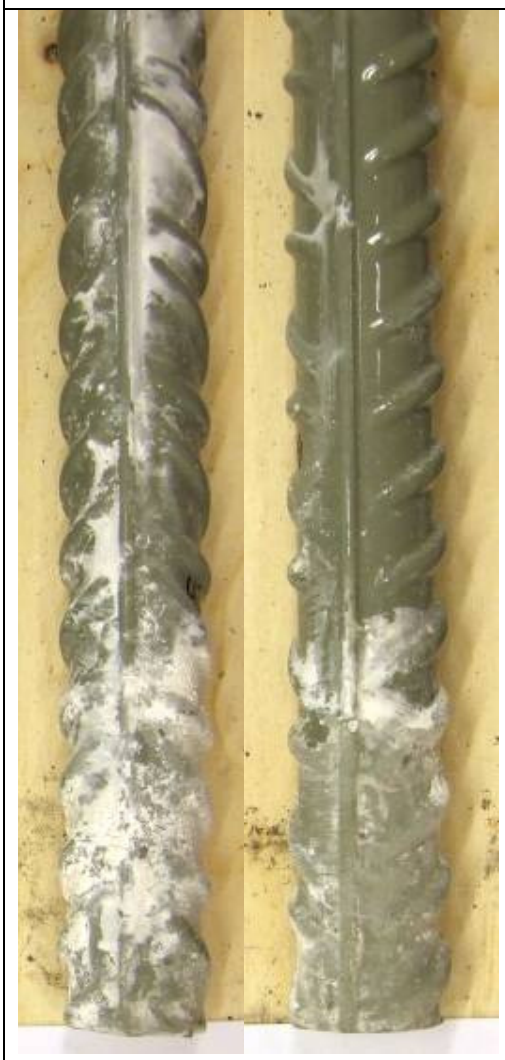
Bilaga 8 Rostfria bergbultar exponerade 2 år

E3 E4 i Muskötunneln EN 1.4311	F3 F4 i Muskötunneln EN 1.4362	G3 G4 i Muskötunneln EN 1.4162

R3 R4 i Äspötunneln EN 1.4311	S3 S4 i Äspötunneln EN 1.4362	T3 T4 i Äspötunneln EN 1.4162

Bilaga 9 Epoxibelagda bergbultar leverantör A 2 år

H3 H4 från Galvano A/S exponerade i Muskötunneln	K4 K5 från Galvano A/S exponerade med skada i Muskötunneln

U3 U4 från Galvano A/S exponerade i Äspötunneln	X3 X4 från Galvano A/S exponerade med skada i Äspötunneln
	

Bilaga 10 Epoxibelagda bergbultar leverantör B 2 år

L3 L4 från Vik Ørsta A/S exponerade i Muskötunneln	M3 M4 från Vik Ørsta A/S exponerade med skada i Muskötunneln

V3 V4 från Vik Ørsta A/S exponerade i Äspötunneln	Y3 Y4 från Vik Ørsta A/S exponerade med skada i Äspötunneln

Datum:	2013-09-03	**Rapport**	**Swerea KIMAB AB**
Sidor:	48	**ISSN**:	1403-848X
		ISRN:	
Språk	Svenska	**KIMAB-nr**	KIMAB-2013-120

Titel Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar

Författare Bror Sederholm & Patrik Reuterswärd

Swerea KIMAB-Projektnummer: KIMAB-2013-120
Forskningsavdelning: Korrosion & Ytteknik
Godkänd av: Johan Tidblad

Finansiering:
Trafikverket
Elforsk
BeFo
Nordic Galvanizers AB
Outokumpu Stainless AB
Galvano A/S
Vik Ørsta A/S
SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond

Nyckelord: Bergtunnlar, konstruktioner, grundvatten, bergbultar, kolstål, varmförzinkning, rostfritt, epoxibeläggning, hållbarhet, korrosivitet, korrosionsprovning, teknisk livslängd

Forskningskommitté: **Deltagande företag**

Distribution: Deltagande företag

swerea|KIMAB

Swerea KIMAB AB
Box 55970, SE-102 16 Stockholm, Sweden
Tel +46 (0)8 440 48 00, Fax +46 (0)8 440 45 35, kimab@swerea.se, www.swereakimab.se

Swerea KIMAB är ett ledande korrosions- och metallforskningsinstitut. KIMAB arbetar för att förbättra material och processer för materialframställning samt studerar hur nya material uppträder i verkstadsteknisk tillverkning och i mekaniska konstruktioner. Verksamheten omfattar forskningsprojekt, provning och uppdrag.

All forskning och allt utvecklingsarbete sker i ett nära samarbete med svenska och internationella företag inom stål-, metall-, elektronik-, verkstads-, plast-, pappers-, fordons-, tillverknings-, och kraftindustri. Resultatet av vårt arbete ska för våra kunder vara en god satsning för framtida intäkter.

swerea|KIMAB

Swerea KIMAB AB
Box 55970, SE-102 16 Stockholm, Sweden
Tel +46 (0)8 440 48 00, Fax +46 (0)8 440 45 35,
kimab@swerea.se, www.swereakimab.se