

KORROSIONSPROVNING OCH KORROSIONSSKYDD AV OLIKA TYPER AV BERG- BULTAR I TUNNLAR - LÅNGTIDSEXPONERING



Bror Sederholm & Helen Pahverk, RISE KIMAB

2019-03-31

FÖRORD

Denna rapport omfattar slutrapporteringen av forskningsprojektet – Korrosion och *korrosionsskydd av olika typer av bergbultar i tunnlar*.

Projektet har finansierats av Trafikverkets branschprogram för forskning och innovation avseende byggnadsverk för transportsektorn (BBT), Stiftelsen för Bergteknisk forskning (BeFo), Energiforsk, Outokumpu Stainless AB, Svenska Byggbranschens utvecklingsfond (SBUF), Nordic Galvanizers, Galvano Tia AS, Vik Ørsta AS och Swerea KIMAB

Projektet påbörjades i april 2018 och avslutas med denna rapport i mars 2019.

I projektets arbets-/referensgrupp har följande medlemmar medverkat:

Arvid Taube, Trafikverket
Odd Nordal, Galvano Tia AS
Staffan Hintze, NCC Constructing (SBUF)
Rolando Berty, NCC Construction
Asgeir Odde, Galvano Tia AS
Annikki Hirn, Nordic Galvanizers
Lena Wegrelius, Outokumpu Stainless AB
Peter Lundqvist, Vattenfall AB (Energiforsk)
Jarle Björdal, Vik Ørsta AS
Thomas Dalman, Trafikverket
Per Tengborg, BeFo
Bror Sederholm, RISE KIMAB
Helen Pahverk, RISE KIMAB

Ett stort tack riktas till samtliga medlemmar i referensgruppen för intressanta och givande diskussioner under projektets gång samt till samtliga finansiärer som bidragit ekonomiskt till att detta projekt kunna genomföras.

Bror Sederholm den 31 mars 2019

Sammanfattning

I april 2018 startades fortsättningsprojektet *Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i tunnlar - långtidsexponering* 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 åtta års korrosionsprovning av delvis ingjutna bergbultar exponerade i bergväggen i Muskötunneln och i Äspötunneln. I undersökningen ingår bergbultar av obelagt kolstål, rostfritt stål (tre stålkvaliteter), varmförzinkat samt varmförzinkat och epoxibelagt.

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

Samtliga korrosionsprovade bergbultar har varit utsatta för ett stillastående vatten i berget under hela provningstiden.

Obelagda kolstålsbultar har efter åtta års exponering i trafikutrymmet frätgroppar upp till 1350 μm i Äspötunneln och 370 μm i Muskötunneln. Synliga lokala korrosionsangrepp förekommer varken på de ingjutna bergbultsdelarna eller på stålytor omgivna av vatten inne i berget.

Bergbultar i rostfritt stål har inga synliga korrosionsangrepp efter åtta års korrosionsprovning varken inne i berget eller i trafikutrymmet i någon av tunnlarne.

Varmförzinkade bergbultar har vitrost på utstickande ytor exponerade i trafikutrymmet och inne i borrhålen. För bultar med ca 45 μm ursprunglig zinkskiktjocklek är zinkskiktet lokalt helt bortfränt i kontakt med anläggningscement efter åtta års korrosionsprovning. Korrosionshastigheter för både ingjutna ytor och fritt exponerade för vatten längst in i berget varierade mellan 7,7 och 12,2 μm zink per år i de båda tunnlarne. För de utstickande delarna i trafikutrymmet uppmättes en korrosionshastighet mellan 1,6 och 3,1 μm i de båda tunnlarne.

Epoxibelagda varmförzinkade bergbultar

Dålig vidhäftning vid blottlagda skador hos beläggningen har konstaterats för ett av två beläggningssystem efter åtta års exponering. Samtliga exponerade beläggningar utan blottlagda skador var helt oskadade med en mycket bra vidhäftning mot underlaget. Det är viktigt att beläggningens vidhäftning kontrolleras noga efter applicering av beläggningen.

Grundvattnets påverkan av anläggningscement

Analyser av vattnet i borrhålen efter åtta år kunde påvisa att pH-värdet och alkaliniteten var hög genom inverkan av anläggningscement. Det höga pH-värdet och den höga alkaliniteten tillsammans med en låg syrehalt ger tillräckligt korrosionsskydd för kolstål, rostfritt stål och epoxibelagda varmförzinkade även vid mycket höga kloridhalter i grundvattnet. Inget flödande grundvatten har kunnat konstateras i något av borrhålen.

Sammanfattningsvis framgår det av resultaten efter åtta års korrosionsprovning att välinjekterade förstärkningsbultar av kolstål, rostfritt stål och epoxibelagda varmförzinkade med god vidhäftning kommer att få en lång livslängd så länge den alkaliska miljön runt bultarna är intakt. Om kolstålsbultarna utsätts för flödande grundvatten med hög kloridhalt och hög flödes hastighet så att vattnet inte hinner alkaliseras runt bultarna kommer korrosionshastigheten på kolstålet att öka något.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	6
2	SYFTE OCH MÅL	7
3	BAKGRUND	8
4	TEKNISKA KRAV PÅ UNDERMARKSMILJÖN	9
4.1	INLEDNING	9
4.2	KRAV VID BULTSÄTTNING ENLIGT AMA ANLÄGGNING 17	11
5	BEDÖMNING AV VATTNETS AGGRESSIVITET	12
6	EUROPEISK STANDARDISERING AV ORGANISKA BELÄGGNINGAR FÖR VARMFÖRZINKADE STÅLKONSTRUKTIONER (BERGBULTAR)	16
7	ROSTFRIA BERGBULTAR	18
7.1	HANTERING AV ROSTFRIA BERGBULTAR	20
7.2	LAGRING OCH FÖRVARING AV ROSTFRIA BERGBULTAR	21
7.3	IHOPKOPPLING AV KOLSTÅL MED ROSTFRITT STÅL	21
8	GENOMFÖRANDE	21
8.1	PROVNINGSMETODIK	21
8.2	PROVPLATSER	22
8.3	PROVMATERIAL	23
8.3.1	<i>Obelagt kolstål</i>	23
8.3.2	<i>Varmförzinkat kolstål</i>	23
8.3.3	<i>Rostfritt stål</i>	24
8.3.4	<i>Epoxybelagt och varmförzinkat kolstål</i>	24
8.4	PROVKROPPAR	25
8.5	PLACERING AV BERGBULTAR I BERGVÄGG	25
8.6	VATTENPROVTAGNING	27
8.7	UTVÄRDERING AV KORROSIONSTILLSTÅND HOS BERGBULTAR	28
9	RESULTAT	32
9.1	UTVÄRDERING AV KORROSIONSTILLSTÅND HOS BERGBULTAR EXPONERADE I MUSKÖTUNNELN OCH I ÄSPÖTUNNELN	32
9.2	VATTNETS KORROSIONSTILLSTÅND ENLIGT MODIFIERAD TYSKA STANDARDEN DIN 50929, DEL 3 39	39
10	DISKUSSION	45
11	SLUTSATSER	50
12	REFERENSER	51

1 INLEDNING

Under våren 2018 startade Swerea KIMAB fortsättningsprojektet *Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i tunnlar - långtidsexponering* med inriktningen att ta fram nya krav på korrosionsskydd av olika typer av förstärkning- och förankringsbultar och andra produkter utsatta för grundvatten från berg och tösalter i trafiktunnlar och i bergrum med hög kloridhalt. Projektet är en fortsättning av projektet *Korrosionsskydd av bergbultar* som påbörjades 2010 och avslutades 2013. I projektet redovisades resultat efter två års korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i bergväggen i Muskötunneln (trafiktunnel) och i Äspötunneln (SKB:s försökstunnel i Oskarshamn). Resultaten från denna utvärdering redovisades i en FoU-Rapport som publicerats 2013 av BeFo (**Ref 1**). Från resultaten efter två års korrosionsprovning av olika typer av bultar framgick det att samtliga korrosionsprovade bergbultar hade varit utsatta för ett relativt stillastående vatten i berget under den större delen av provningstiden. Obelagda stålbultar 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.

Bergbultar i rostfritt stål hade inga synliga korrosionsangrepp efter två års korrosionsprovning i någon av tunnelarna.

Varmförzinkade bergbultar hade vitrost på ytor exponerade i tunnelarnas trafikutrymme och på ytorna i borrhålen. För cementingjutna bultar med ca 45 µm ursprunglig zinkskiktjocklek var zinkskiktet lokalt helt bortfränt i kontakt med anläggningscement efter två års korrosionsprovning. Korrosionshastigheter för både ingjutna ytor och fritt exponerade för vatten längst in i berget var ca 20 µm zink per år. Den höga korrosionshastigheten för zink var oväntad (**Ref 1**).

Samtliga epoxibelagda varmförzinkade bergbultar var helt oskadade efter två års korrosionsprovning. Detta gäller belagda bultar med och utan blottlagda skador. Analyser av vattnet i borrhålen redan efter ett år kunde påvisa att pH-värdet och alkaliniteten ökade genom inverkan av anläggningscement. Vattenomsättningen var i några enstaka fall dock så hög i vissa hål att efter två år hade pH-värdet börjat sjunka och alkaliniteten var i vissa fall åter på samma nivå som före monteringen av provkropparna (**Ref 1**).

Med de långa tider som förankring- och förstärkningssystemen ska fungera är dock två års fältförsök en alldeles för kort provningstid. Därför lämnades flera bultar kvar orörda så att dessa kunde tas ut betydligt senare för utvärdering av bultarnas korrosionstillstånd efter en lång tids korrosionsprovning i Muskö- och i Äspötunneln.

I denna rapport redovisas resultat från utvärderingar av korrosionstillståndet hos de olika typerna av bultar efter ca åtta års korrosionsprovning.

2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med detta projekt är framförallt att fastställa korrosionshårdigheten för olika typer av bergbultar när de utsätts för kloridhaltigt grundvatten vid användning som förstärkning och förankring i tunnlar och bergrum. 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 (> 150 mg/l).

3 BAKGRUND

Bergbultar av kolstål, förzinkat kolstål, förzinkat och epoxibelagt kolstål och rostfritt stål är alternativ för bergförstärkning i tunnlar. Osäkerhet råder avseende korrosionsrelaterad livslängd hos ingjutna stålbulvar, liksom hos sådana med korrosionsskydd i form av enbart varmförzinkning eller varmförzinkning med 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.

När projektet påbörjades för ca åtta år sedan fanns inga bra metoder för att bedöma korrosiviteten hos bergets grundvatten. Bergets grundvatten kan påverka i olika grad metallers korrosionshastighet och beläggningars korrosionsskyddande egenskaper. För bedömning av vattnets korrosivitet för t ex kolstål används oftast den tyska standard DIN 50929, del 3. I denna standard bedöms inverkan från följande kemiska parametrar i vattnet:

- pH-värde
- Alkalinitet (syrakapacitet)
- Kalciumhalt
- Kloridhalt
- Sulfathalt

En ytterligare parameter som tas hänsyn till i den tyska standarden vid bedömning av vattnets korrosivitet är om vattnet varit flödande eller stillastående. Den tyska standarden är i första hand anpassad för vatten i rörledning, vilket innebär att den uppskattade korrosiviteten blir högre i stillastående vatten än i flödande vatten. För ingjutna bergbultar av kolstål eller rostfritt stål är stillastående vatten dock mindre korrosivt, eftersom det alkaliserar av kringliggande bultbruk. I standarden anges vidare att syrefattigt vatten kan vara korrosivt, vilket beror på avlagringar vilka kan bilda en luftningscell (skillnader i syrehalt).

4 TEKNISKA KRAV PÅ UNDERMARKSMILJÖN

4.1 Inledning

I Sverige är kategorisering av undermarksmiljön, exponeringsklasser, kriterier, krav och råd f.n. (2019) sammanställda av Trafikverket i publikationerna Krav Tunnelbyggnad, TDOK 2016:0231 (**Ref 2**) och Råd Tunnelbyggnad, TDOK 2016:0232 (**Ref 3**).

De konstruktionsdelar (t ex bergbultar) i en bergtunnel som skall säkerställa tunnelns mekaniska stabilitet och beständighet brukar benämnas det bärande huvudsystemet. En tunnel ska utformas, dimensioneras och utföras så att skadlig nedbrytning förhindras under den tekniska livslängd som anges i **Tabell 1** (vägtunnlar och järnvägstunnlar). Med skadlig nedbrytning avses även skador på grund av biologiska angrepp samt urlakning av injekteringsmedel.

Det är dessa tunneldelar som säkerställer trafikantsäkerheten och tunnelns goda funktion. I nybyggda tunnlar brukar man anta en livslängd på 120 år (TLK 120) för det bärande huvudsystemet enligt TDOK 2016:0231. Vid tillämpning av de nationella kraven får L 20, L 50 och L 100 i SS-EN 1992-1-1 anses motsvara en avsedd teknisk livslängd lika med 40, 80 respektive 120 år.

Anordningar och åtgärder som förhindrar inläckning av vatten och som inte är åtkomliga och utbytbara ska ha samma avsedda tekniska livslängd som det bärande huvudsystemet. Krav på avsedd teknisk livslängd avser ett helt system av anläggningsdelar eller installationer. Byte av slitdelar får anses ingå i normalt underhåll. Om byggherren så anger får andra anläggningsdelar än bärande huvudsystem utformas och dimensioneras för andra avsedda tekniska livslängder än vad som anges i **Tabell 1**. Om en kortare avsedd teknisk livslängd än den i **Tabell 1** angivna tillämpas ska anläggningen utformas så att anläggningsdelen är åtkomlig för underhåll.

Tabell 1. Krav på avsedd teknisk livslängd för väg- och järnvägsbro, TDOK 2016:0231.

Anläggningsdel	(år)
Bärande huvudsystem inklusive i detta ingående inklädnad och undergrund	120
Bärande konstruktion som inte ingår i tunnelns bärande huvudsystem Inredning exklusive inklädnad	80
Inklädnad som inte ingår i ett bärande huvudsystem Ledningar, brunnar etc. Skyddsanordningar av betong (gäller endast vägtunnlar)	40
Säkerhetsutrustning Ventilationsanläggning inklusive huvudfläktar Mekanisk utrustning för vatten och avlopp såsom pumpar m.m. Dörrar och luckor inklusive anordningar för stängning och låsning Övrig utrustning	20
Servrar och datorer	10

Bergbult – bärförmåga enligt TDOK 2016:0231

Krav enligt "Krav tunnelbyggnad – TDOK 2016:0231" gäller för ospända bergbultar av stål eller förspända bergbultar av stål med hållfasthet mindre än 800 MPa. Bergbultarnas stångdiameter ska vara minst 20 mm.

Det är möjligt av använda rörbultar eller friktionsbultar som permanent förstärkning förutsatt att det är verifierat att dessa uppfyller ställda krav på drag- och skjuvhållfasthet, beständighet samt täthet. Bultar som förutsätts samverka med sprutbetong ska vara försedda med bricka, halvkula och mutter eller en likvärdig förankring. Bultar vid selektiv bultning får utformas utan förankringsbricka och mutter. Selektiv bultning i tak i ett trafikutrymme får dock utformas utan förankringsbricka och mutter endast om ett skydd i form av sprutbetong eller en annan inklädnad anordnas och denna dimensioneras för en last av 6 kN med $\psi_0 = \psi_1 = 0,6$ och $\psi_2 = 0$. Lasten ska antas vara vinkelrät mot förstärkningsskiktet eller inklädnaden. Lastens yta ska sättas till 0,5x0,5 m. Om förstärkningen eller inklädnaden inte är belägen i kontakt med bergytan ska lastens yta sättas till 0,2x0,2 m.

Bergbult – beständighet enligt TDOK 2016:0231

En förspänd bergbult med glidlager ska vara försedd med ett dubbelt korrosionsskydd. För förspända bultar ska en detaljerad arbetsritning, arbetsbeskrivning och plan för tilläggskontroll upprättas. För bergbultars beständighet gäller korrosivitetsklassificering av kolstål i olika miljöer.

Rostskydd i trafikutrymme, sidoutrymme och utrymningsväg enligt TDOK 2016:0231

Rostskyddet ska omfatta bultstången inklusive tillbehör som bricka, mutter och halvkula. För den del av bergbulten belägen i betong eller sprutbetong ska krav som följer av TDOK 2016:0231, bilaga 5 för angivna exponeringsklasser för betong användas. För varmförzinkade bultar i exponeringsklasserna XS3 och XD3 får det minsta täckande betongskiktet minskas till 30 mm. För luftexponerade bultar av kolstål ska rostskyddssystemet vara för varmförzinkat stål med ytskydd av värmehärdad epoxi med skiktjocklek $\geq 80 \mu\text{m}$. Rostskyddssystemet ska användas för korrosivitetsklasserna C3, C4 och C5-M.

Rostskydd i berg enligt TDOK 2016:0231

Om byggherren anger att rostskydd ska användas så får ett rostskyddssystem med varmförzinkning kombinerat med ytskydd av värmehärdad epoxi användas.

4.2 Krav vid bultsättning enligt AMA Anläggning 17

Borrhålsdiametern ska vara minst 20 mm större än bultens diameter. Borrhålet borrar 0,1 m djupare än den ingjutna bultdelen.

Bergbult ska vara av typ kamstål stålqualität K500C-T eller likvärdigt eller i vissa fall KS600ST eller likvärdigt.

Bultar för säkring av block ska vara förankrade 1 m i bedömt fast berg. Bergbult ska vara fullt ingjuten till en minsta bedömd längd av 0,4 m i löst block, i annat fall kompletteras bulten med bricka.

Stålmateriäl i bergbult ska ha en övre sträckgräns eller 0,2-gräns av minst 380 MPa. Gränstöjning eller brottförlängning ska vara minst 5 procent. Materialkrav avseende kemisk sammansättning och bockningsegenskaper enligt SS 212540, **Ref 16** (Produktspecifikation till SS-EN 10080, **Ref 15**) ska vara uppfyllda.

Vid krav på samverkan med sprutbetong ska bultarna förses med bricka, halvkula och mutter eller likvärdig lastfördelande förankring. Bricka eller likvärdig lastfördelande förankring ska vara insprutad, undergjuten, understoppad eller på annat sätt utförd så att full anliggnings mot underlaget uppnås.

Monterade bultar som ska provas med Boltometertest ska ha minst 0,1 m utstickande del. Boltometertest kan utföras innan bricka eller lastfördelande förankring insprutas. Cement för ingjutning ska vara av typ CEM I-SR3 enligt SS-EN 197-1.

Cementbruk ska ha vattencementtal, vct, $\leq 0,30$.

Borrhålet ska fyllas med cementbruk från botten med slang. Efter det att bulten införts i det bruksfyllda hålet ska bruket helt fylla hålrummet mellan bult och berg. Bultarna ska monteras centriskt i borrhålet.

Cementbruk för ingjutning av varmförzinkat stål ska ha sådan sammansättning att brukets vidhäftning och täthet inte försämras av förzinkningen.

5 BEDÖMNING AV VATTNETS AGGRESSIVITET

För närvarande finns inga definierade krav för att bedöma aggressivt vatten utifrån explicita vattenkemiska parametrar gentemot kolstål i Trafikverkets regelverk.

RISE KIMAB har under flera år använt den tyska standarden DIN 50929, del 3, (**Ref 5**) för att bedöma korrosiviteten hos bergets grundvatten. Undersökningar utförda av RISE KIMAB har visat att bergets grundvatten kan påverka i olika grad metallers korrosionshastighet och beläggningars korrosionsskyddande egenskaper, (**Ref 1**). För bedömning av vattnets korrosivitet för t ex kolstål används oftast den tyska standarden DIN 50929, del 3. I denna standard bedöms inverkan från följande kemiska parametrar i vattnet:

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

En ytterligare parameter som tas hänsyn till i den tyska standarden vid bedömning av vattnets korrosivitet är om vattnet varit flödande eller stillastående. Den tyska 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 alkaliserar av kringliggande bultbruk. I **tabell 2** anges i förenklad form positiv respektive negativ inverkan på korrosionshastigheten på kolstål i vatten enligt DIN 50 929, del 3.

Tabell 2. Inverkan av olika kemiska parametrar på korrosionshastigheten på kolstål i vatten enligt DIN 50 929, del 3, (Ref 5)

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

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 3**. Korrosionssannolikhet för jämn korrosion (medelavfrätning) och gropfrätning för kolstål i vatten anges utgående från bedömningssumman W_0 , **tabell 4**. Utgående från beräknat värde på W_0 kan förväntad korrosionshastighet och förväntad maximal gropfrätningshastighet utläsas ur **tabell 5**.

Tabell 3. Parametrar för bedömning av korrosionsrisk för kolstål, (Ref 5)

Vattenparametrar	Värde
Vattentyp	N₁
Flödande	0
Stillastående	-1
Insjö	-3
Anaerobt kärr, hav	-5
Placering av aktuell konstruktion	N₂
Under vatten	0
Gränsyta vatten / luft	1
Skvalpzon	0,3
c(Cl⁻) + 2c(SO₄²⁻) (mol/m³)	N₃
<1	0
1-5	-2
>5-25	-4
>25-100	-6
>100-300	-7
>300	-8
Syrkapacitet till pH 4,3 (mol/m³)	N₄
<1	+1
1-2	+2
>2-4	+3
>4-6	+4
>6	+5
c(Ca²⁺) (mol/m³)	N₅
<0,5	-1
0,5-2	0
>2-8	+1
>8	+2
pH-värde	N₆
<5,5	-3
5,5-6,5	-2
>6,5-7,0	-1
>7,0-7,5	0
>7,5	+1

Tabell 4. Sannolikhet för jämn korrosion (medelavfrätning) och gropfrätning för kolstål i vattnet utgående från bedömningssumman W_0 enligt DIN 50 929, del 3, (Ref 5)

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

Tabell 5. Förväntad jämn korrosionshastighet i mm/år beräknad från korrosionsindex enligt DIN 50 929, del 3, (Ref 5)

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

Tidigare undersökningar utförda av Sandberg (Ref 4) visade att ett flödande grundvatten från berg gav betydligt högre korrosionshastighet hos kolstål jämfört med ett stillastående grundvatten i berg. Eftersom den tyska standarden DIN 50929, del 3 är framtagen för vattenledningar har ett förslag tagits fram för modifiering den tyska standarden som är mer anpassad för bedömning korrosiviteten hos grundvatten från berg. Modifieringen innebär att ett flödande grundvatten från berg är betydligt mer aggressivare än ett stillastående vatten.

Sandberg (Ref 4) föreslår att DIN 50929, del 3 förändras med avseende på vattentyp enligt **tabell 6**.

Tabell 6. Förslag på ändring av bedömningsparameter N_1 enligt DIN 50 929, del 3.

Vattentyp	Bedömningsparameter (N_1), enligt DIN 50929	Bedömningsparameter (N_1) enligt Sandberg (Ref 4)
Flödande	0	-3
Stillastående	-1	0
Torrt	-	+3

6 EUROPEISK STANDARDISERING AV ORGANISKA BELÄGGNINGAR FÖR VARMFÖRZINKADE STÅLKONSTRUKTIONER (BERGBULTAR)

Varmförzinkat stål som är belagt med pulverfärgsbeläggning behandlas i den europeiska standarden SS-EN 13438 (2013) *Paints and varnishes – Powder organic coatings for galvanized or sherardized steel products for construction purposes – Färg och lack – Organisk pulverbeläggning för varmförzinkade och sherardiserade produkter av stål för konstruktionsändamål (Ref 7)*.

Denna europeiska standard SS-EN 13438 (2013) behandlar specificerade krav på organiska beläggingspulver och organiska pulverbeläggningar som appliceras på varmförzinkade stålprodukter (varmdoppade eller sherardiserade stålprodukter). Varmförzinkade stålprodukter kan vara stålprodukter som har varmdoppats i ett zinkbad eller kontinuerligt varmförzinkats. Standarden ställer inga krav på själva pulverbeläggningsprocessen. Däremot ges riktlinjer för hur rengöring och förbehandling av varmförzinkade eller sherardiserade stålprodukter före applicering av pulverfärg på zinkytan skall göras. Standarden anger även hur en provning av pulverbeläggningar applicerade på varmförzinkade ytor skall provas och vilka krav som pulverbeläggningen bör klara. Standarden gäller inte för stålprodukter som är belagda med en zink-aluminiumbeläggning eller en aluminium-zinkbeläggning, eller för kontinuerligt varmförzinkad tråd. I **tabell 7** ges en sammanfattning av de krav som ställs på de organiska pulverbeläggningar som appliceras på varmförzinkade ytor och som ska uppfyllas av tillverkaren av organiska pulverbeläggningar.

Tabell 7. Sammanfattning av provningar på organiska pulverbeläggningar som används på varmförzinkat substrat enligt SS-EN 13438:2013. Provningsarna görs av pulvertillverkarna.

Provning	Provningsmetod/standard	Sammanfattning av krav
Ytans utseende	SS-EN 3668:2007	Inga skador ned till substratet. Inga blåsor, kratrar, håligheter eller repor synliga från < 1 m
Färg	SS-EN ISO 3668:2007 SS-EN ISO 11664-4:2012	Enligt föreslagna toleranser
Glans	SS-EN ISO 2813:2014	Enligt föreslagna toleranser

Vidhäftning	SS-EN ISO 2409:2013	Betyg 0
Reptålighet	SS-EN ISO 1518-1:2011	Inga repor ned till substratet
Slagtålighet	SS-EN ISO 1519:2011	Inga sprickor vid slag
Motståndskraft mot cement	Accelererad provning, enligt metod föreslagen SS-EN 13438:2013	Cementet lossnar lätt. Inget avlägsnande av beläggning eller förändring i utseende
Ultraviolett ljus, laboratorieundersökning	SS-EN ISO 11341:2004	Inga sprickor eller blåsor. Inga färgförändringar enligt krav
Ultraviolett ljus, laboratorieundersökning	SS-EN ISO 2810:2004	Inga sprickor eller blåsor. Inga färgförändringar enligt krav
Fuktighet	SS-EN ISO 6270-1: SS-EN ISO 2409	Inga blåsor. Ingen minskning av beläggningens hårdhet. Ingen korrosion.
Svaveldioxid	SS-EN ISO 3231	Inga blåsor, inget avlägsnande av beläggningen
Permeabilitet	Metod beskrivs i SS-EN 13438:2013	Inga blåsor, inget avlägsnande av beläggningen
Neutral saltdimma	SS-EN ISO 9227:1998	Ingen underkorrosion och vidhäftningsförlust från repa (< 5 mm). Ingen blåsbildning eller sprickbildning
Ättiksyra saltdimma	SS-EN ISO 9227:2012	Ingen underkorrosion och vidhäftningsförlust från repa (< 5 mm). Ingen blåsbildning eller sprickbildning

I **tabell 8** ges en sammanfattning av de krav som ställs på de organiska pulverbeläggningar som applicerats på varmförzinkade ytor och som ska uppfyllas av den som applicerar pulverfärgen på substratet enligt SS-EN 13438:2013.

Tabell 8. Sammanfattning av provningar på organiska pulverbeläggningar som används på varmförzinkat substrat enligt SS-EN 13438:2013. Provningsarna görs av de som applicerar pulverfärgen på substratet.

Provning	Provningsmetod/ standard	Sammanfattning av krav
Beläggningens utseende	SS-EN ISO 3668:2013	Inga repor ned till substrat. Ingen blåsbildning, repor eller kratrar synliga på ett avstånd mindre än 3 m
Färg	SS-EN ISO 3668:2013	Enligt specifikation
Tjocklek	SS-EN ISO 2808:2007	> 60 µm. Inga synliga delar av substratet
Glans	SS-EN ISO 2813:2014	Enligt specifikation
Vidhäftning	SS-EN ISO 2409:2013	Betyg 0

Utgångspunkt för en specifikation av värmehärdad epoxipulverbeläggning på förzinkat kolstål bör vara den europeiska standarden SS-EN 13438:2013 som beskriver krav på pulverbeläggningar på varmförzinkade stålkonstruktioner. 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 en beläggning av bergbultar. Krav på zinkfosfateringen som inte ingår i standarden måste särskilt specificeras.

7 ROSTFRIA BERGBULTAR

Förmågan hos rostfria bergbultar att motstå korrosionsangrepp i en kloridhaltig betong eller vattenlösning beror framförallt av halten legeringsämnen som finns i det rostfria stålet. De legeringsämnen som har stor betydelse för det rostfria stålets förmåga att motstå korrosionsangrepp är framförallt krom, nickel, molybden och kväve. En tumregel för en grov bedömning av korrosionsmotståndet hos rostfria stål är det så kallade PRE-värdet (Pitting Resistance Equivalent). Det beräknas enligt nedan:

$$PRE = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$$

Ju högre PRE-värde desto bättre motstånd mot lokala korrosionsangrepp (gropfrätning och spaltkorrosion). Den rostfria bergbultens korrosionsegenskaper i t ex en icke karbonatiserad och icke kloridhaltig betong kan jämföras med ett passiverat kolstål i samma miljö. De elektrokemiska potentialerna för rostfritt stål och passiverat kolstål i betong är jämförbara. Vid en karbonatisering av betongen, då pH-värdet i betongen sjunker från ca 12,5 till 9-10, ökar risken för

korrosionsangrepp på kolstålet. Detta gäller inte för rostfria stål exponerade i en karbonatiserad betong. Anledningen till detta är att det rostfria stålets bildade passivskikt har ett högt motstånd mot lokala korrosionsangrepp vid en karbonatisering av betongen.

Om klorider tränger in i betongen, genom diffusion eller på grund av sprickor och skador i betongen, ökar dock risken för lokala korrosionsangrepp (gropfrätning) både på kolstål och rostfria stål. För kolstål bedömer man att totala kloridhalter överstigande 0,4 viktsprocent klorider per cementvikt i en betong kan ge en ökad risk för korrosionsangrepp, ett så kallat tröskelvärde. Tröskelvärden för kolstålsarmering är ett mycket debatterat ämne, som avspeglar komplexiteten i betongmiljön. För en rostfri bergbult är det så kallade tröskelvärdet betydligt högre (**Ref 11, Ref 12**).

Vid låglegerade rostfria stål ($PRE < 18$) finns risken för lokala korrosionsangrepp i betong vid kloridhalter ($>1-2\%$ klorider per cementvikt) (**Ref 12**). För normalt och högt legerade rostfria stål ($PRE \geq 18$) har inga korrosionsangrepp konstaterats vid så höga kloridhalter som ca 4% klorider per cementvikt (**Ref 13**). Det ökade legeringsinnehållet innebär dock en ökad kostnad, varför en optimering av behovet av korrosionsmotstånd görs för att undvika onödiga kostnader. För närvarande finns inga angivna tröskelvärden för rostfria stål i betong.

Även om den rostfria armeringen skulle korrodera, är det en betydligt lägre risk för sprickbildning och efterföljande rostsprängning hos betongen då de bildade korrosionsprodukterna hos den rostfria armeringen har en avsevärt mindre volym (små lokala gropar) jämfört med kolstålarmeringens voluminösa korrosionsprodukter.

De stålsorter som man normalt talar om för användning för rostfri armering/bergbult är någorlunda normalt legerade ($PRE 18-30$). En anledning till detta är den alkaliska miljö betongen utgör, som gör att mer låglegerade rostfria stål kan användas. Typiska stålkvaliteter för användning som rostfri armering och deras benämningar i olika standarder visas i Tabell 9. Fullständig förteckning på alla rostfria stål finns som tidigare nämnts i SS-EN 10088-1:2014 (**Ref 15**).

Tabell 9. Vanliga stålsorter använda för rostfria bergbult

Handelsnamn	Beteckning EN 10088	ASTM (USA)	Mikrostruktur	PRE
	1.4301/1.4311	304/304	Austenitisk	18
	1.4401/1.4404	316/316L	Austenitisk	24
LDX 2101®	1.4162	UNS S32101	Duplex	26
2304	1.4362	UNS S32304	Duplex	26
2205	1.4462	UNS S32205	Duplex	35

En fördel med de duplexa stålen är att de innehåller en lägre nickelhalt än ett jämförbara austenitiska stål med liknande korrosionsmotstånd. Detta gör att dessa stål är mer prisstabila eftersom nickelpriset fluktuerar med råvarupriserna, och nickel är ett av de dyrare legeringsämnen i ett rostfritt stål. Dessutom har de duplexa stålen en högre hållfasthet än de austenitiska vilket gör att tillverkningsprocesserna för duplex rostfri armering kan förenklas.

7.1 Hantering av rostfria bergbultar

En av de stora frågorna vid praktisk hantering av rostfri armering är de små stålpartiklar som kan fastna på rostfritt stål under bockning, kapning och transport och som kan orsaka rostfläckar på det rostfria stålet då dessa partiklar korroderar och orsakar missfärgning. Denna missfärgning är därför främst en visuell defekt, men kan i vissa extrema fall utgöra en startpunkt för lokala korrosionsangrepp eftersom dessa partiklar kan ha en oxiderande och surgörande effekt. I den alkaliska miljön som betongen utgör tros detta inte ha någon praktisk betydelse, men främmande stålpartiklar bör i alla fall i möjligaste mån undvikas.

7.2 Lagring och förvaring av rostfria bergbultar

För att undvika korrosionsangrepp på den rostfria bergbulten bör lagring i kloridhaltiga miljöer (såsom marina miljöer eller platser där avisningssalter används) undvikas före ingjutning. Korrosionsmotståndet i kloridhaltiga miljöer hos rostfri bergbult är högre i betong än i atmosfären, och korrosionsangrepp kan därför uppstå trots att det rostfria armeringsstålet bedömts klara dessa miljöer efter ingjutning i betong. Om förvaring i miljöer där klorider förekommer är oundvikligt bör de rostfria bergbultarna täckas med presenning eller liknande och inte läggas direkt på marken.

7.3 Ihopkoppling av kolstål med rostfritt stål

Att sammanfoga kolstål och rostfritt orsakar vanligtvis galvanisk korrosion på kolstålet i vissa miljöer. Ingjutet i betong, kommer dock inte detta orsaka några problem. Detta har undersökts i ett flertal olika studier (**Ref 10, Ref 13, Ref 14**) och beror på att skillnaden i elektrokemisk potential mellan ett passiverat kolstål i betong och ett rostfritt stål i betong är mycket liten. Detta innebär att den drivande kraften för galvanisk korrosion mellan rostfritt stål och passiverat kolstål i en icke karbonatiserad betong är försumbar.

Det framgår vidare att ett passiverat ingjutet kolstål har större inverkan på ett korroderande kolstål än vad ett rostfritt stål har på ett korroderande kolstål. Anledningen till detta är att reduktionshastigheten av syrgas är lägre på en rostfri stålyta än motsvarande kolstålsyta, och korrosionshastigheten därför blir lägre. Syrgasreduktionen är sålunda mer gynnsam på passiverat ingjutet kolstål än på rostfritt stål (**Ref 12**). Stålsorten hos det rostfria stålet har bevisats inte ha någon påverkan på denna effekt (**Ref 13, Ref 14**).

Sammanfattningsvis kan sägas att det inte är någon risk för galvanisk korrosion på betongingjuten kolstål vid hopkoppling med betongingjuten rostfri armering/bergbult.

I den svenska standarden SS 212545:2016 (**Ref 16**) ges tekniska leveransbestämmelser för korrosionsbeständigt armeringsstål (bergbult) för stång, coil, svetsat nät och armeringsbalk i rostfritt stål. Standarden ger även ett förslag på en testmetod för att undersöka förmågan att motstå kloridinitierad korrosion för olika rostfria stålqualiteter.

8 GENOMFÖRANDE

8.1 Provningsmetodik

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

Efter ca åtta års korrosionsprovning i Muskötunneln och i Äspötunneln togs totalt 44 st delvis ingjutna bergbultar in för utvärdering av korrosionsutseendet, för bestämning av korrosionshastighet och maximal gropfrätning. Tidigare intag och utvärdering har gjorts efter ett och två års exponering (**Ref 1**).

8.2 Provplatser

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

Muskötunneln är en 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 är placerad ca 1300 meter från tunnelmynningen på fastlandssidan och ligger ca. 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 ca 350 meters djup.



Figur 1. Muskötunneln



Figur 2. Äspötunneln

8.3 Provmaterial

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

8.3.1 Obelagt kolstål

Som bergbult av obelagt kolstål användes rundstång av kolstål av stålqualiteten S235JR från Ståldepån AB. I **tabell 10** visas den kemiska sammansättningen.

Tabell 10. Kemisk sammansättning av obelagt kolstål (mass-%)

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

8.3.2 Varmförzinkat kolstål

De varmförzinkade kolstålsbultarna levererades av Galvano Tia AS respektive Vik Ørsta AS, Norge.

Zinkens tjocklek mättes på toppen av kammarna, mellan kammarna, på toppen av gängorna samt mellan gängorna (botten). I **tabell 11** visas resultaten från 32 mätningar per bergbult.

Tabell 11. Uppmätt zinkskiktjocklek

Leverantör	Gängtopp medelvärde μm (std dev)	Gängbotten medelvärde μm (std dev)	Kamtopp medelvärde μm (std dev)	Kambotten medelvärde μm (std dev)
Galvano Tia 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)

8.3.3 Rostfritt stål

De rostfria bergbultarna levererades av Outokumpu Stainless AB. Tre olika rostfria stålqualiteter ingår i undersökningen. I **tabell 12** visas den kemiska sammansättningen av de olika rostfria stålqualiteter som ingår i undersökningen.

Tabell 12. Kemisk sammansättning av rostfria bergbultar i mass-%

Stålqualitet (EN-nummer)	C	Cr	Ni	N	Mo	Mn	Mikrostruktur
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

8.3.4 Epoxibelagt och varmförzinkat kolstål

De epoxibelagda varmförzinkade bergbultarna levererades av Galvano Tia AS och Vik Ørsta AS, Norge. Beläggningarnas totala tjocklek mättes mellan kammarna före exponeringarna. I **tabell 13** visas resultaten från 10 mätningar per bergbult.

Tabell 13. Total skiktjocklek i kambotten hos de 32 epoxibelagda och varmförzinkade bergbultarna

Leverantör	Epoxi- och zinkskikt medelvärde μm (std. dev.)
Galvano Tia AS	163 (14)
Vik Ørsta AS	210 (16)

8.4 Provkroppar

För att kunna göra relevanta undersökningar i bergtunnlar gjordes provkroppar som simulerade injekterade bergbultar genom att gjuta in provstängerna i cylindrar med anläggningscement. Av bergbultarnas totala längd av 1000 mm gjöts 900 mm in. Ändarna som sticker ut i var ände är ca. 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 ca 10-12 mm tjockt.



Figur 3. Provkroppar för korrosionsprovning i tunnlar.

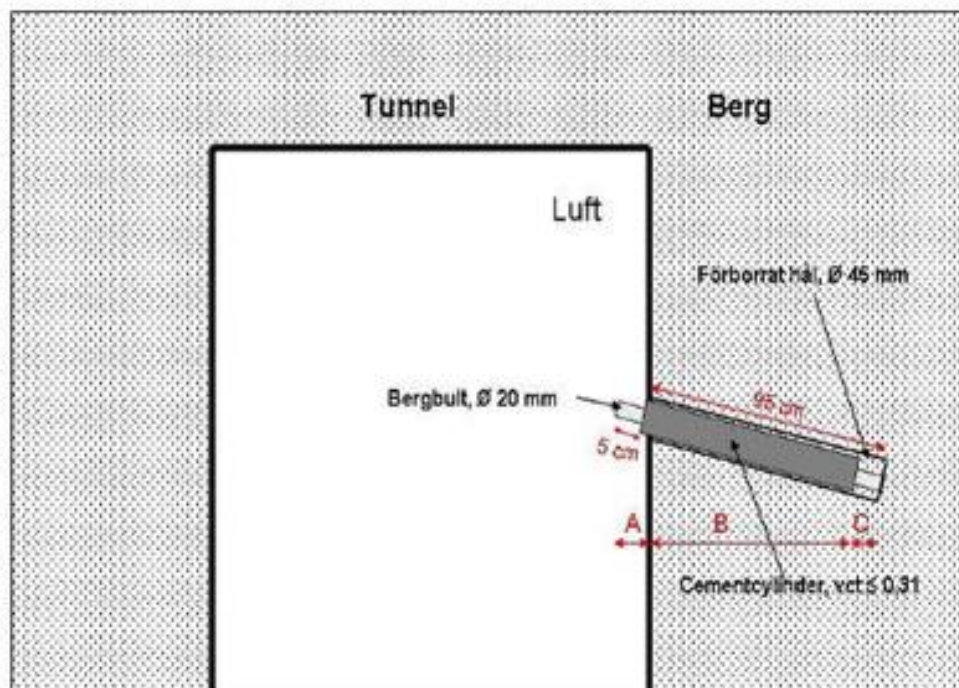
8.5 Placering av bergbultar i bergvägg

Delvis ingjutna bergbultar av olika material och skyddsbeläggningar monterades i förborrade hål i bergväggen i Muskötunneln och i Äspötunneln, **figur 4 och figur 6**. 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 5**. Spalten mellan bergvägg och cementcylinder tätades i hålmynningen med en tätningsmassa, **figur 7**.

Den ena utstickande bultändan kommer att utsättas för aggressivt sprickvatten i berget och den andra bultändan är luftexponerad i trafikutrymmet och utsätts för droppande grundvatten från berget samt stänk från fordon (tösalter, partiklar och smuts).



Figur 4. Montering av provkroppar i förborrade hål i Muskötunneln



Figur 5. Schematisk skiss av monterad provkropp förborrat hål som lutar ca 30°



Figur 6. Bergbultar monterade i Äspötunneln



Figur 7. Tätning av spalt mellan cementcylinder och berg

8.6 Vattenprovtagning

Vattenprovtagning utfördes både före exponering (fem vattenprover från Muskötunneln och fyra vattenprover från Äspötunneln) och efter åtta års exponering (11 vattenprover i Muskötunneln och 12 vattenprover i Äspötunneln). Vattenproverna har analyserats av ALS Scandinavia (före provning) Eurofins (efter åtta års exponering) och följande analyser har utförts:

Analyser

pH

Alkalinitet

Konduktivitet

Hårdhet total

Klorid, Cl

Sulfat, SO₄

Kalcium, Ca

Koppar, Cu

Järn, Fe

Kalium, K

Magnesium, Mg

Mangan, Mn

Natrium, Na

Vattenprovernans korrosivitet för t ex kolstål har uppskattats med den modifierade tyska standarden DIN 50929, del 3, se avsnitt 5. I denna modifierade standarden bedöms förutom inverkan från följande kemiska parametrar i vattnet även inverkan av grundvattnets flöde:

- pH-värde
- Alkalinitet (syrakapacitet)
- Kalciumhalt
- Kloridhalt
- Sulfathalt
- Flödande vatten/stillastående vatten

8.7 Utvärdering av korrosionstillstånd hos bergbultar

Efter ca åtta års korrosionsprovning i Muskö- och i Äspötunneln togs bergbultarna in för utvärdering av korrosionsutseendet, korrosionshastighet och maximalt gropfrättningsdjup. Tidigare utvärdering har gjorts efter ett och två års korrosionsprovning och redovisats i (**Ref 1**).

Provstänger av obelagt kolstål

Efter exponering rengjordes provstängerna från cementrester och korrosionsprodukter genom en lätt blästring med glaskulor på de korroderade stålytorna.

Efter åtta års exponering rengjordes provstängerna genom en upprepad betning i Clarkes lösning (20 g Sb_2O_3 och 60 g $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ löst i en liter koncentrerad HCl) vid rumstemperatur.

Massförlusten bestämdes genom att provstängerna vägdes före och efter exponering, då provstängerna rengjorts från cement och korrosionsprodukter genom betning. Då erhöles ett mått på stångens massminskning. Därefter beräknades korrosionshastigheten dels för hela bultytan dels för enbart den del bultytan som stack ut i trafikutrymmet.

Därefter bestämdes frätgropsdjupet med frätgropsmätare och ljusoptiskt mikroskop.

Varmförzinkat kolstål

Efter åtta års exponering utvärderades zinkens korrosionshastighet genom att ta ut provbitar från provstängerna och mäta zinkskiktets tvärsnitt med ett ljusoptiskt mikroskop.

Rostfritt stål

Provstängernas korrosionstillstånd utvärderades både före och efter betning genom att okulärt (med ljusoptiskt mikroskop i hög förstoring) undersöka provstängernas yta med avseende på frätgropar och missfärgning.

I denna undersökning har inga spänningsbelastade rostfria bultar ingått.

Epoxybelagda varmförzinkade bergbultar

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

Skiktjocklek

Skiktjockleken mättes med magnetisk metod med en skiktjockleksmätare Elcometer 456 enligt svensk standard SS ISO 19840:2012.

På varje bergbult mättes skiktjocklek 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 skiktjocklek. Totalt erhöles fem lokala skiktjocklekar per bergbult. Medelskiktjockleken är medelvärdet av alla lokala skiktjocklekar.

Rostgrad

Rostgraden på provobjekten utvärderades enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-3:2016. Förhållandet mellan rostgrad och rostad yta framgår av **tabell 14**. I svensk standard SS-EN ISO 4628-3:2016 anges allmänna principer för utvärdering av intensitet, mängd och storlek på skador på färgskikt vid utvärdering av rostgrad, blåsbildning, sprickbildning och flagning.

Tabell 14. Rostgrader enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-3:2016

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 4628-2:2016. Förhållandet mellan blåsbildningsgrad och mängden blåsor framgår av **tabell 15**.

Tabell 15. Blåsbildningsgrader enligt svensk standard SS ISO 4628-2:2016

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 4628-4:2016. Förhållandet mellan sprickbildningsgrad och mängden sprickor framgår av **tabell 16**.

Tabell 16. Sprickbildningsgrader enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-4:2016

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 4628-5:2016. Förhållandet mellan flagningsgrad och avflagnad yta framgår av **tabell 17**.

Tabell 17. Flagningsgrad enligt svensk standard SS-EN ISO 4628-5:200

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 4628-8:2016.

9 RESULTAT

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

Efter 8 års exponering i Muskö- och Äspötunneln togs återstående provkroppar in för undersökning av korrosionstillstånd. Samtliga exponerade provkroppar har varit utsatta dels för tunnelns trafikutrymme, dels grundvatten inne i berget samt av injekteringsbruk inne i berget. I **figur 8** visas korrosionsutseendet av en delvis utdragen ingjuten kolstålsbult efter åtta års exponering i Äspötunneln.



Figur 8. Delvis utdragen och ingjuten kolstålsbult efter åtta års exponering i Muskötunneln.

Obelagt kolstål

Utseendet efter åtta års exponering i Muskö- och Äspötunneln visas i **bilaga 1**. På de fria obelagda ytorna som exponerats i trafikutrymmet förekommer det rödrost och frätgropar på stålytan. Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på de ingjutna delarna och på de delar som exponerats fritt för vatten i berget. Den ytrost som kan ses i **bilaga 1** på de obelagda stålytorna (ingjutna och fritt exponerad i vatten) har bildats efter att bultarna avlägsnades från bergväggen.

I **tabell 18** visas massförlusterna (korrosionshastigheterna) för provstänger av kolstål exponerade upp till åtta år i bergväggen/trafikutrymme i Muskö- och i Äspötunneln. Eftersom korrosionen endast har skett på den utstickande delen i trafikutrymmet har även korrosionshastigheten beräknats för enbart den utstickande delen i trafikutrymmet.

Tabell 18. Korrosionshastighet för delvis cementingjutna provstänger kolstål i berg och trafikutrymme efter upp till åtta års korrosionsprovning.

Provplats	Prov nr	Exponeringstid år	Korrosionshastighet beräknad över hela provstången, $\mu\text{m}/\text{år}$	Korrosionshastighet beräknad på utstickande provstångsdel i trafikutrymme, $\mu\text{m}/\text{år}$
Muskö	A5	8 år	4,5	90
Muskö	A6	8 år	3,2	64
Äspö	N5	8 år	3,8	76
Äspö	N6	8 år	5,2	104

I **tabell 19** 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.

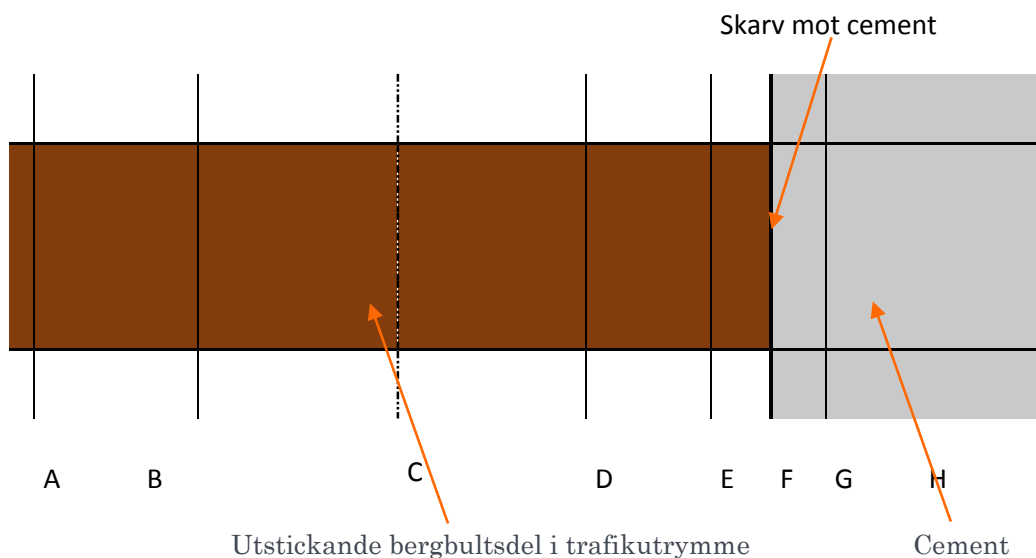
Tabell 19. Maximal frätgropsdjup för delvis cementingjutna provstänger av kolstål exponerade i berg och trafikutrymme efter åtta års korrosionsprovning.

Provplats	Prov nr	Exponering år	Provyta A μm	Provyta B μm	Provyta C μm
Muskö	A5	8 år	370	0	0
Muskö	A6	8 år	50	0	0
Äspö	N5	8 år	750	0	0
Äspö	N6	8 år	1350	0	0

I **tabell 20** och visas resultat från mätningar av yttre diameter och maximal frätgropsdjup på rengjorda provstänger av kolstål exponerade åtta år i trafikutrymme och i injekteringsbruk och fritt i berg. Provstång A5 och A6 har exponerats i Muskötunneln och provstång N5 och N6 har exponerats i Äspötunneln. I **figur 9** visas var på den utstickande bulten som de djupaste frätgroparna förekommer.

Tabell 20. Resultat från mätningar av yttre diameter och maximal frätgropsdjup på rengjorda provstänger av kolstål exponerade åtta år i trafikutrymme och i injekteringsbruk/berg. Provstång A5 och A6 har exponerats i Muskötunneln och provstång N5 och N6 har exponerats i Äspötunneln, se även figur 9.

Prov		A	B	C	D	E	F	G	H	Djupaste gropen
A5	Diameter [mm]	19,465	19,525	19,699	19,621	19,76	19,769	19,77	19,751	
A5	Frätgropar [µm]		140	370	270	160	200			370
A5	Frätgropar [µm]						140			
A6	Diameter [mm]	19,7	19,7	19,655	19,629	19,66	19,72	19,693	19,691	
A6	Frätgropar [µm]	30	50							50
A6	Frätgropar [µm]		40							
N5	Diameter [mm]	19,141	18,809	19,329	19,718	19,578	19,561	19,588	19,59	
N5	Frätgropar [µm]	180		630	550	720				720
N5	Frätgropar [µm]	360		550		570				
N5	Frätgropar [µm]			660		380				
N6	Diameter [mm]	19,19	18,965	18,286	18,91	18,03	18,893	19,691	19,753	
N6	Frätgropar [µm]	820	820			1240	710			1350
N6	Frätgropar [µm]	690	1000				720			
N6	Frätgropar [µm]	1350	1250				500			
N6	Frätgropar [µm]		900							



Figur 9. Delvis utdragen och ingjuten kolstålsbult efter åtta års exponering i Muskötunneln. A-H anger var mätningarna har utförts. Jämför med tabell 19.

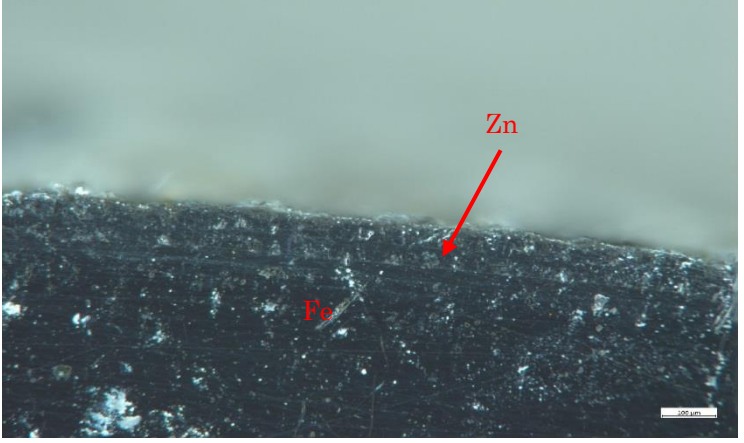
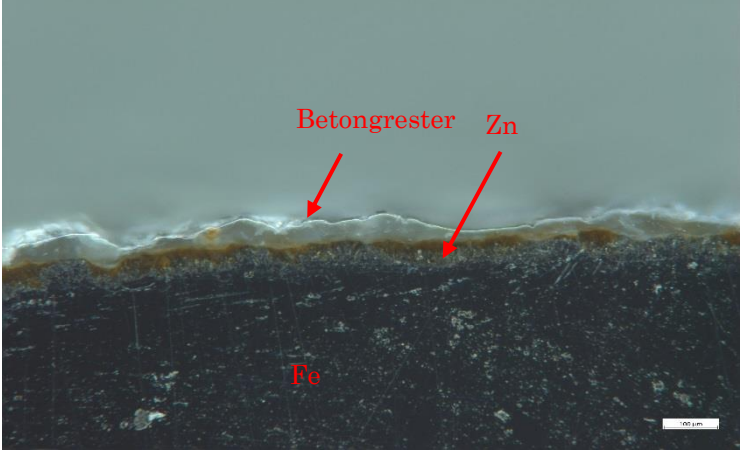
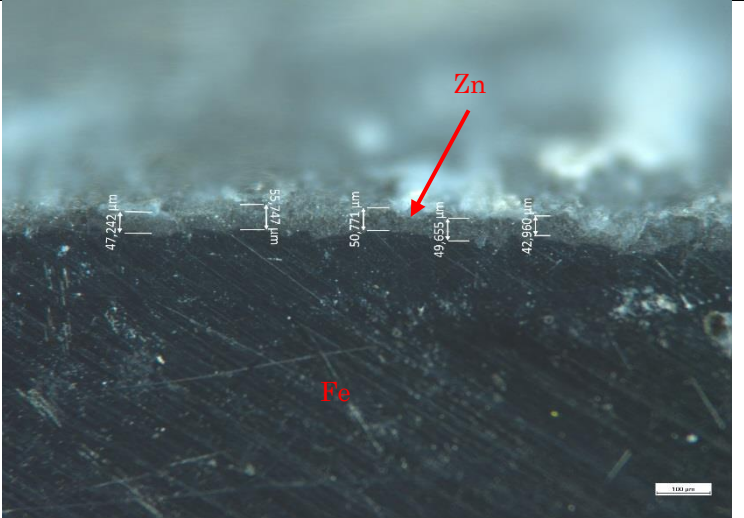
Bergbult av varmförzinkat kolstål

Utseendet hos varmförzinkade bergbultar efter åtta års exponering i Muskö- och Äspötunneln visas i **bilaga 2**. De utstickande delarna av de varmförzinkade ändarna i tunneln och de fria obelagda ytorna som exponerats för vatten i berget är täckta av vitrost.

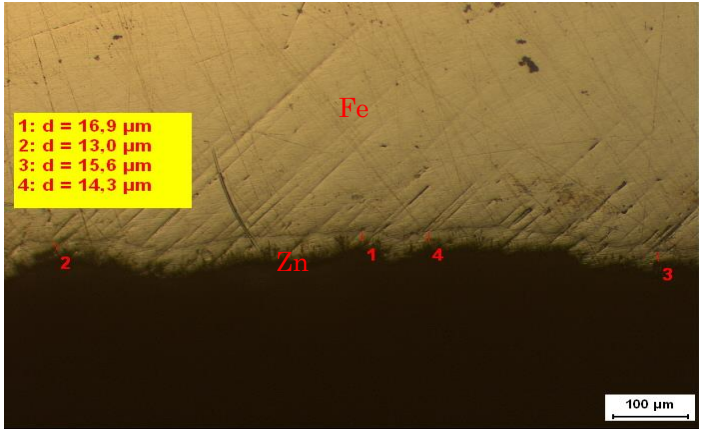
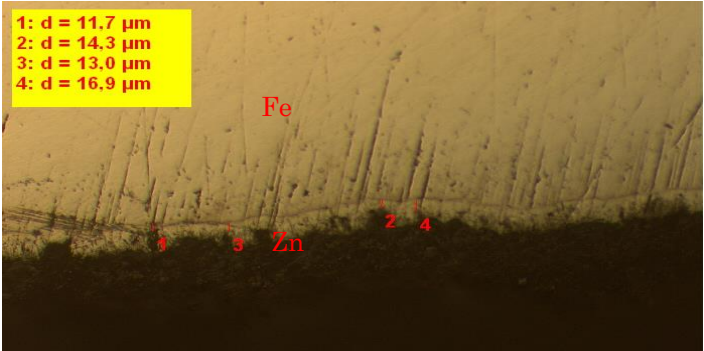
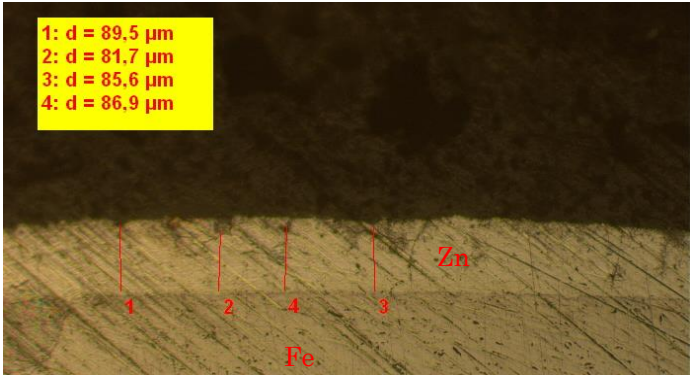
Samtliga varmförzinkade bergbultar hade god vidhäftning mellan zinkskikt och cement. Det är inte möjligt att särskilja zinkens korrosionsprodukter (vitrost) på grund av att zinkytan är mer eller mindre täckt med anläggningscement som reagerat med zinken. Även rödrost förekommer på enstaka ställen hos de delar som varit ingjutna och utstickande i botten på hålet.

Korrosionshastigheten efter åtta år är bestämd genom att studera zinkskiktet i slipade tvärsnitt med ljusoptiskt mikroskop, se **tabell 21 och 22**. Bergbultar från Galvano Tia AS har fläckvis förlorat hela zinkskiktet på ytan som varit exponerad för vatten längst in i berget och nästan all zink under cementen. Under cementen har stålet fläckvis börjat rosta, se **tabell 21**. Bergbultarna från Vik Ørsta AS har ett zinkskikt av ca 10-17 μm .

Tabell 21. Tvärsnitt från bergbultar levererade av Galvano Tia efter åtta års exponering i Muskötunneln.

<p>Tvärsnitt av varmförzinkad bergbultsdel utan cement som har exponerats inne i berget.</p> <p>Zinkskiktet är lokalt bortfrätt efter åtta års exponering.</p>	
<p>Tvärsnitt av en varmförzinkad bergbultsdel i kontakt med anläggningscement.</p> <p>Zinkskiktet lokalt bortfrätt efter åtta års exponering.</p>	
<p>Tvärsnitt av en varmförzinkad bergbultsdel utan cement som har exponerats i tunnelns trafikutrymme.</p> <p>Zinkskiktets tjocklek är ca 42-55 µm efter åtta års exponering.</p>	

Tabell 22. Tvärsnitt från bergbultar levererade av Vik Ørsta AS efter åtta års exponering i Äspötunneln.

<p>Tvärsnitt av varmförzinkad bergbults del utan cement som har exponerats åtta år inne i berget.</p> <p>Zinkskiktets tjocklek varierar mellan 13,0 och 16,9 μm efter åtta års exponering.</p>	
<p>Tvärsnitt av en varmförzinkad bergbultsdel som varit i kontakt med <u>anläggnings-cement</u>.</p> <p>Zinkskiktets tjocklek varierar mellan 11,7 och 16,9 μm efter åtta års exponering.</p>	
<p>Tvärsnitt av en utstickande varmförzinkad bergbultsdel som har exponerats i Äspötunnelns trafikutrymme.</p> <p>Zinkens skiktjocklek varierar mellan 81,7 och 89,5 μm efter åtta års exponering</p>	

I **tabell 23** visas resultat från mätningar av 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 Äspötunnelns trafikutrymme än i Muskötunnelns trafikutrymme. Korrosionshastigheten efter åtta år i berget i Muskötunneln är ca 7,7 µm/år och i Äspötunneln ca 12 µm/år. Korrosionshastigheten för varmförzinkade bultar är lägre efter 8 års exponering jämfört med korrosionshastigheten efter två års exponering (20 µm/år) (**Ref 1**)

Tabell 23. Zinkskiktjocklekar före och efter åtta års exponering.

Provplats	Bergbultsdel	Ursprunglig zinkskiktjocklek µm (std.dev.)	Zinkskiktjocklek efter exponering µm (std.dev.)	Beräknad korrosionshastighet, µm/år
Muskö (8 år)	A.	61,9 (5,2)	49,0 (4,7)	1,6 (0,2)
	B.	61,9 (5,2)	0	7,7 (0,3)
	C.	61,9 (5,2)	0	7,7 (0,2)
Äspö (8 år)	A.	111,3 (10,2)	85,9 (3,2)	3,1 (0,2)
	B.	111,3 (10,2)	14,0 (2,2)	12,2 (0,4)
	C.	111,3 (10,2)	15,0 (1,7)	12,0 (0,3)

Rostfria bergbultar

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

Epoxybelagda och varmförzinkade bergbultar

I **bilaga 4** och **5** visas utseendet hos de epoxybelagda varmförzinkade bergbultarna efter åtta års exponering i Muskö- och Äspötunneln. Vid undersökning på laboratorium av beläggningarnas vidhäftning vid en blottlagd beläggningsskada konstaterades att en av beläggningarna hade dålig vidhäftning mot underlaget, **figur 10**. För den andra epoxybeläggningen som ingick i exponeringen var vidhäftningen bra efter åtta års exponering vid blottlagda beläggningsskador.



Figur 10. Epoxibeläggning med dålig vidhäftning vid blottlagd yta.

9.2 Vattnets korrosivitet i borrhålen enligt modifierad tyska standarden DIN 50929, del 3

I de förborrade hålen, där de föringjutna bergbultarna exponerats i åtta år i Muskö- och i Äspötunneln, uttogs vattenprover både före exponering av bergbultarna och efter åtta års exponering. I **tabell 24** och **25** visas medelvärdet och standardavvikelsen från fem vattenprover före exponering och 11 prover efter exponering i Muskötunneln samt tre vattenprover före exponering och 12 vattenprover efter exponering i Äspötunneln. Det framgår av vattenanalyserna att vattnets kemiska innehåll varierar kraftigt mellan de olika borrhålen.

Tabell 24. Analysresultat från vattenprover uttagna från de förborrade hålen i bergväggen i Muskötunneln före exponering (fem vattenprover). Efter åtta års provning redovisas medelvärdet av 11 vattenprover.

Analys	Enhet	Provuttag före exponering	Provuttag efter åtta års exponering (medelvärde)
Ca	mg/l	1318±578	1246±361
Mg	mg/l	83,5±31	348±360
Na	mg/l	1808±679	1882±778
K	mg/l	17,4±7,5	74,0±67,1
Fe	mg/l	0,11±0,23	1,89±2,77
Cu	mg/l	0,04±0,02	0,31±0,23
Mn	mg/l	0,28±0,16	1,91±1,15
Totalhårdhet	°dH	204±83	254±111
Konduktivitet	mS/m	1478±516	1252±355
pH		7,6±0,2	>11
Alkalinitet (HCO ₃)	mg/l	48,2±15	385±229
Nitritkväve	mg/l	0,20±0,3	0,07±0,10
Fosfat-fosfor	mg/l	-	-
Klorid	mg/l	5780±2765	3936±1118
Sulfat	mg/l	551±73	211±118
Nitratkväve	mg/l	6,4±0,1	0,39±0,74
Ammoniumkväve	mg/l	0,1±0,08	0,29±0,27
Fluorid	mg/l	0,43±0,61	< 0,2

Tabell 25. Analysresultat från vattenprover uttagna från de förborrade hålen i bergväggen i Äspötunneln. Efter åtta års provning redovisas medelvärdet av 12 vattenprover.

Analys	Enhet	Provuttag före exponering	Provuttag efter åtta års exponering (medelvärde)
Ca	mg/l	4080±191	3592±970
Mg	mg/l	45±2,7	21±53
Na	mg/l	3110±91	3341±685
K	mg/l	21±9	675±617
Fe	mg/l	0,27±0,08	1,30±3,70
Cu	mg/l	0,39±0,31	0,50±0,30
Mn	mg/l	0,46±0,16	0,79±2,55
Totalhårdhet	°dH	582±26	338±255
Konduktivitet	mS/m	2920±88	2508±188
pH		7,2±0,1	>11,0
Alkalinitet (HCO ₃ ⁻)	mg/l	21±3	2862±1146
Nitritkväve	mg/l	0,004±0,001	0,31±0,48
Fosfatfosfor	mg/l	0,007±0,004	0,03±0,06
Klorid	mg/l	13175±472	7392±2329
Sulfat	mg/l	628±21	87,2±154
Nitratkväve	mg/l	2,8±1,2	0,11±0,02
Ammoniumkväve	mg/l	0,10±0,05	1,00±1,21
Fluorid	mg/l	1,39±0,35	1,09±1,82

Som framgår av resultaten från vattenanalyserna från bergväggen i både Muskö- och i Äspötunneln så är det stora variationer i vattenanalyserna mellan olika borrhål som är placerade relativt nära

varandra. För att få en relevant bedömning av korrosiviteten i bergets grundvatten bör flera vattenanalyser tas så att tillräckligt underlag fås för bedömning av korrosiviteten.

I **tabellerna 26-29** ges en sammanställning av bestämningar av korrosionsrisken för jämn korrosion och gropfrätning samt förväntad korrosionshastighet för jämn korrosion och maximal gropfrätning enligt den modifierade tyska standarden DIN 50929, del 3. Bedömningen gjordes både före och efter exponeringen av de ingjutna bergbultarna.

Det framgår att både Äspö- och Muskötunnelns grundvatten i bergvägg är mycket korrosivt enligt den modifierade tyska standarden, **tabell 26** och **27**. Den jämna korrosionen bestäms utifrån analyserade vattenprover till 100 µm/år och den maximala gropfrätningen till 500 µm/år för kolstål.

I samband med att de ingjutna bergbultarna togs in för undersökning efter åtta års exponering i Muskö- och Äspötunneln togs flera vattenprover från de förborrade hålen. Det framgår av analysresultaten att vattenprovernas korrosivitet hade minskat kraftigt och pH-värdet hade stigit från pH 7 till pH >11. Även alkaliniteten hade ökat kraftigt under exponeringen.

Tabell 26. Förväntad korrosionshastighet på kolstål i Äspötunneln i (µm/år) enligt modifierad DIN 50 929, del 3 före exponering. Förklaring av parametrarna N1-N6 och W0 framgår av avsnitt 5.

Prov (nr)	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N3/N4	Wo	Korrosionshastighet enligt modifierad DIN 50929	
									Jämn (µm/år)	grop. fr (µm/år)
Q3	0	+1	-8	+1	+2	+1	-8	-11	100	500
U5	0	+1	-8	+1	+2	+1	-8	-11	100	500
Y7	0	+1	-8	+1	+2	+1	-8	-11	100	500
V7	0	+1	-8	+1	+2	+1	-8	-11	100	500

Tabell 27. Förväntad korrosionshastighet på kolstål i Muskötunneln i ($\mu\text{m}/\text{år}$) enligt modifierad DIN 50 929, del 3 före exponering. Förklaring av parametrarna N1-N6 och W0 framgår av avsnitt 5.

Prov (nr)	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N3/N4	Wo	Korrosionshastighet enligt modifierad DIN 50929 Jämn grop. fr ($\mu\text{m}/\text{år}$) ($\mu\text{m}/\text{år}$)	
A1	0	+1	-7	+1	+2	+1	-7	-9	100	500
A2	0	+1	-8	+1	+2	+1	-8	-11	100	500
B1	0	+1	-7	+1	+2	+1	-7	-9	100	500
B2	0	+1	-7	+2	+2	+1	-3,5	-4,5	50	200
C1	0	+1	-7	+1	+1	+1	-7	-10	100	500

Efter åtta års provningen gjordes en bedömning av vattnets korrosivitet enligt modifierad DIN 50929, del 3, **tabell 28** och **29**. Det framgår av tabellerna att vattnet i borrhålen med bergbultar har blivit betydligt mindre aggressivt på grund av ökat pH-värde och ökad alkalinitet.

Tabell 28. Förväntad korrosionshastighet på kolstål i Äspötunneln i ($\mu\text{m}/\text{år}$) enligt modifierad DIN 50 929, del 3 efter åtta års korrosionsprovning. Förklaring av parametrarna N1-N6 och W0 framgår av avsnitt 5.

Prov (nr)	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N3/N4	Wo	Korrosionshastighet enligt modifierad DIN 50929 Jämn grop. fr ($\mu\text{m}/\text{år}$) ($\mu\text{m}/\text{år}$)	
S5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
N5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	20	100
N6	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	20	100
Q2	0	+1	-8	+1	+2	+1	-7	-10	100	500
P5	0	+1	-8	+5	+2	+1	-1,6	-0,6	50	200
R5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
T5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
U6	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
V5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
Y5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
X5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
O5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50

Tabell 29. Förväntad korrosionshastighet på kolstål i Muskötunneln i ($\mu\text{m}/\text{år}$) enligt modifierad DIN 50 929, del 3 efter åtta års korrosionsprovning. Förklaring av parametrarna N1-N6 och W0 framgår av avsnitt 5

Prov (nr)	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N3/N4	Wo	Korrosionshastighet enligt DIN 50929 Jämn grop. fr ($\mu\text{m}/\text{år}$) ($\mu\text{m}/\text{år}$)	
A5	-3	+1	-7	+1	+2	+1	-7	-12	100	500
B5	0	+1	-6	+3	+2	+1	-2	-1	20	100
C5	0	+1	-6	+5	+2	+1	-1,2	-1,8	20	100
E5	0	+1	-4	+3	+2	+1	-1,3	-1,7	20	100
A6	0	+1	-7	+3	+2	+1	-2,3	-2,3	20	100
F5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
G5	0	+1	-7	+5	+2	+1	-1,4	+0,6	10	50
H6	0	+1	-7	+3	+2	+1	-2,3	-2,3	20	100
K5	0	+1	-7	+4	+2	+1	-1,8	-0,8	10	50
L5	0	+1	-7	+4	+1	+1	-1,4	-0,4	10	50
M5	0	+1	-7	+5	+1	+1	-1,4	-0,4	10	50

10 DISKUSSION

Efter åtta års exponering i förborrade hål av obelagt kolstål ingjutet i bultbruk och omgivet av bergets grundvatten konstaterades inga korrosionsangrepp. Detta gäller även bergbultar av rostfritt stål av stålqualiteterna 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 i trafikutrymmet var kraftigt korroderat efter åtta års exponering i båda tunnlarna. Det maximala gropfrätningdjupet var betydligt djupare på det obelagda stålet som exponerats i trafikutrymmet i Äspötunneln jämfört med trafikutrymmet i Muskötunneln.

Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på de rostfria bergbultarna exponerade i trafikutrymmet.

Inga synliga korrosionsskador eller andra defekter kunde konstateras på epoxibelagda varmförzinkade bergbultar utan beläggningsskada. Däremot konstaterades ett en av två provade beläggningar hade fått en försämrade vidhäftning vid en avsiktligt blottlagd beläggningsskada. Ingen korrosion kunde dock konstateras under beläggningen. Den andra provade beläggningen hade bra vidhäftning vid den blottlagda skadan.

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 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 åtta års korrosionsprovning hade varit utsatta för ett vatten med en låg vattenomsättning, vilket hade inneburit att framför allt pH-värdet i vattnet runt de delvis ingjutna bergbultarna hade ökat från ca 7 till över 11 i både Muskö- och Äspötunneln. Även alkaliniteten i vattnet runt de ingjutna bergbultarna hade ökat kraftigt efter åtta års korrosionsprovning jämfört med ursprungligt värde. Även om vattnet runt innersta delen av bulten är utan cement och 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 med blottlagda skador. Syrehalten utefter bergbultarna varierar sannolikt 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. Korrosionshastigheten hos de varmförzinkade bergbultarna har dock minskat efter åtta års exponering i de olika tunnlarna jämfört med korrosionshastigheten efter två års exponering. En möjlig förklaring till detta är att det yttersta zinkskiktet är helt rent från järn. Ju närmare stålytan zinkskiktet ligger desto större halt av järn förekommer i zinkskiktet, vilket torde innebära ett större motstånd mot vätgasutvecklande korrosion och att det järninnehållande zinkskiktet passiveras. En annan möjlig förklaring är att det syre som finns i det borrade hållet har förbrukats på grund av av den höga korrosionshastigheten hos zinken, vilket innebär att korrosionen avstannar på grund av avsaknad av syre.

Efter åtta års korrosionsprovning konstaterades att de ingjutna bergbultarna varit utsatta för stillastående vatten under hela provningen. Vattnets pH-värde och alkaliniteten har varit mycket hög under provningen. Om bergbultsdelarna utan cement och cementcylindern under exponeringen

hade varit utsatt för ett visst flöde av grundvatten, hade det troligtvis 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 flödes hastighet och vattnets kemiska egenskaper.

Undersökningar, utförda inom projektet GeoInfra, i Äspötunneln, visade att stålprover som exponerades i ett år i två olika borrhål utan cement hade låga korrosionshastigheter efter ett års provning ($< 10 \mu\text{m}/\text{år}$) (**Ref 8**). Stålproverna i de båda borrhålen hade under exponeringen varit utsatta för ett flödande vatten 0,09 l/minut (borrhål A) respektive 0,21 l/minut (borrhål B). Det flödande grundvattnets kloridhalt var vid provinstallationen av stålprover i borrhål A 15000 mg/l och i borrhål B 340 mg/l. De låga korrosionshastigheterna som uppmättes hos kolstålet i båda borrhålen efter ett års exponering beror på den låga syrehalten i grundvattnet och inte på grund av grundvattnets kloridhalt.

När det gäller korrosionshastigheter på obelagt kolstål i olika väg- och järnvägstunnlar framgår det av (**Ref 9**) att korrosionshastigheten i trafikutrymmet varierar kraftigt beroende på hur tunneln är trafikerad. En järnvägstunnel har betydligt lägre korrosionshastighet för kolstål jämfört med korrosionshastigheten hos kolstål i trafikutrymmet i en vägtunnel. Den höga korrosionshastigheten hos vägtunnlar i trafikutrymmet beror på den kloridhaltiga smuts som fastnar på metallytor. En hög trafikintensitet i tunneln ger betydligt mer smuts vilket i sin tur ger högre korrosionshastigheter på kolstål jämfört med en vägtunnel med låg trafikintensitet. I **tabell 30** visas korrosiviteten hos kolstål i fem olika trafik-tunnlar efter ett års exponering vid olika tidpunkter i tunnarnas trafikutrymme (**Ref 9**).

Korrosivitetskategori enligt SS-EN ISO 9223:2012 för kolstål vid två olika exponeringsperioder i olika tunnlar. Korrosivitetsklass (C5-M) enligt enligt Krav tunnelbyggande, TDOK 2016:0231, bilaga 3 i tabellerna 4-6 så är dessa värden baserade på erfarenheter och avancerade gissningar och inte på kvantitativa undersökningar genom långtidsexponeringar i olika tunnelmiljöer.

Tabell 30. Korrosivitetsklass enligt SS-EN ISO 9223:2012 för kolstål vid två olika exponeringsperioder i olika tunnlar. *Bedömning av Korrosivitetsklass (C5-M) enligt Trafikverkets Krav tunnelbyggande, TDOK 2016:0231

Provplats	Korrosionshastighet under 1 års exponering (medelvärde av tre provplåtar)		Korrosivitetskategori enligt SS-EN-ISO 9223:2012 under olika tidsperioder		
	Period okt-08- okt-09 µm/år	Period okt-09- okt-10 µm/år	Period okt-08- okt-09	Period okt-09- okt-10	
Lundbytunneln	46	60,1	C3	C4	(C5-M)*
Vägtunnel under Öresund	56	71,0	C4	C4	(C5-M)*
Eugeniattunneln	32	27,2	C3	C3	(C5-M)*
Järnvägstunnel, Öresund	6,7	5,3	C2	C2	(C5-M)*
Järnvägstunnel, Strängnäs	0,9	2,1	C1	C2	(C5-M)*
Bohus Malmön, Kvarnvik	66	33,1	C4	C3	-

Observera att de utvärderade korrosionshastigheterna gäller för kolstål som inte varit utsatt för rinnande grundvatten från berget. Undersökningarna i Strängnästunneln visade att korrosionshastigheten ökade med en faktor tio om stålproverna utsattes för rinnande grundvatten från berget (**Ref 9**).

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 cementen. Urlakning av cement leder till ökade korrosionsangrepp. Korrosionsangreppens 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 grundvattent 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. Om det finns en öppen vattenförande spricka mellan en bergbult och trafikutrymmet finns en ökad risk för korrosion på den ingjutna bergbulten. Anledningen är att syre från trafikutrymmet kommer att kunna transporteras in till bergbulten och öka risken för korrosion.

Denna undersökning har visat att både cementingjutna och fritt exponerade rostfria bergbultar av stålqualiteterna EN 1.4311, EN 1.4162 och EN 1.4362 är helt oskadade efter åtta års korrosionsprovning i berg med höga kloridhalter.

Även för de varmförzinkade bergbultarna som manganzinkfosfaterats samt belagts med en värmehärdande epoxipulverbeläggning har hittills ingen noterbar korrosion upptäckts.

Vid blottlagda skador i beläggningen ned till stålytan inne i berget har beläggningen lossnat på två provstänger för ett av två beläggningssystem. Inga korrosionsangrepp har dock kunnat konstateras under det lossnade beläggningsskiktet. Beläggningens vidhäftning och motstånd mot korrosionsangrepp i tunnelns yttre trafikmiljö är mycket god efter åtta års korrosionsprovning.

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

Utgångspunkt för en specifikation av värmehärdad epoxipulverbeläggning på förzinkat kolstål bör vara den europeiska standarden EN 13438:2013 som beskriver krav på pulverbeläggningar på varmförzinkade stålkonstruktioner. 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 en beläggning av bergbultar. Krav på zinkfosfateringen som inte ingår i standarden måste särskilt specificeras.

11 SLUTSATSER













Efter åtta års korrosionsprovning av olika typer av bergbultar som exponerats i bergväggen i Muskö- och i Äspötunneln kan följande slutsatser dras:

- Kolstål som är cementingjuten och placerad i borrhål visar efter åtta år mycket lite korrosion, trots höga kloridhalter i det omgivande bergets grundvatten. Korrosion uppstår på stålytor som saknar korrosionsskydd och är exponerade utanför berget i trafikutrymmet.
- Genom att man efter åtta år kan påvisa att alkaliniteten och pH fortfarande är hög omkring de cementingjutna bultarna bedöms risken för omfattande korrosionsskador på obelagda bultar som liten vid en rätt utförd bultsättning.
- Om bultarna utsätts för flödande vatten kommer troligtvis korrosionshastigheten att öka med tiden. Hur stor denna ökning blir går dock inte att säga utifrån denna undersökning.
- Korrosionsskydd genom varmförzinkning har en relativt kortvarig skyddsverkan genom att zinkmetallen förbrukas, både som oskyddad och under anläggningscement under de alkaliska och fuktiga förhållanden som funnits i de förborrade hålen i berget. Korrosionshastigheten i trafikutrymmet i båda tunnarna var låg hos utstickande varmförzinkade bultar.
- 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 vissa lämpliga delar av europastandarden EN 13438:2013.
- För rostfria bultar av stålqualiteterna EN 1.4311, EN 1.4162 och EN 1.4362 ingjutna i bultbruk och omgivna av bergets grundvatten samt utstickande bultar i trafikutrymmet konstaterades inga korrosionsangrepp.
- Bedömningen av grundvattnets korrosivitet enligt den modifierade tyska DIN standarden 50929, del 3 visade att grundvattnet i varje borrhål var mycket korrosivt före exponering. Efter åtta års exponering bedömdes vattnet som måttligt korrosivt på grund av stillastående grundvatten med hög alkalinitet och högt pH-värde.

12 REFERENSER

- Ref 1 Sederholm B & Reuterswärd P: Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar. BeFo rapport 127, Stiftelsen för Bergteknisk Forskning, 2013.
- Ref 2 Krav Tunnelbyggande. Trafikverkets tekniska krav på tunnelbyggande, TDOK 2016:0231.
- Ref 3 Råd Tunnelbyggande. Trafikverkets råd för tunnelbyggande, TDOK 2016:0231
- Ref 4 Sandberg, B: Fältförsök, korrosion av kolstål i berg utan cementingjutning. Uppdragsrapport nr 788059. Swerea KIMAB 2009.
- Ref 5 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 6 Vinka, T-G, & Becker, M: Korrosion på förzinkat stål i betong. Bygg & Teknik, nr 7, 1999.
- Ref 7 SIS: SS-EN 13438:2013 - Paints and varnishes – Powder organic coatings for galvanized or sherardized steel products for construction purposes
- Ref 8 Ahlström J & Sederholm B: Undersökning av grundvattnets korrosivitet i Äspötunneln. Rapport KIMAB-2017-179. Swerea KIMAB
- Ref 9 Sederholm B., Pahverk, H., Sjögren, L., Korrosion och korrosionsskydd av metalliska material i trafiktunnlar. KIMAB Rapport 2014-113. Swerea KIMB, 2014.
- Ref 10 Qian, S & Qu, D & Coates, G: Galvanic coupling between carbon steel a stainless reinforcements
- Ref 11 Randström, et al.: Reproducibility of critical threshold levels for stainless reinforcement, in structural faults and repair. 2010, Edinburgh.
- Ref 12 Randström, S et al. Testing for chloride Threshold levels of stainless reinforcing bar, 18th International Corrosion Congress, 2011
- Ref 13 Sederholm, B & Ahlström, J: Rostfria ståls korrosionshärdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt. KMAB Rapport KIMAB-2008-113, Swerea KIMAB.
- Ref 14 Sederholm, B & Almqvist, J: Stainless steel in concrete – Galvanic effects on carbon steel. KIMAB Rapport KIMAB-2008-113, Swerea KIMAB .
- Ref 15 SIS: SS-EN 10088-1:2014 Rostfria stål – del 1. Förteckning av rostfria stål
- Ref 16 SIS : SS 212545:2016: Armeringsstål – Korrosionsbeständigt armeringsstål-Tekniska leveransbestämmelser korrosionsbeständigt armeringsstål (bergbult) för stång, coil, svetsat nät och armeringsbalk i rostfritt stål.










Bilaga 1 Exponerade obelagda kolstålsstänger

Muskötunneln		Äspötunneln		
Nr:	A5	A6	N5	N6
Utstickande ände av obelagt kolstål exponerat 8 år i tunnelatmosfär				
				
Obelagt kolstål exponerat 8 år i borrhål. Bultarna har frilagts från cement före fotografering				
				
Obelagt kolstål exponerat 8 år längst in i borrhål				
				

Bilaga 2 Exponerade varmförzinkade bergbultar

Muskötunneln		Äspötunneln		
Utstickande varmförzinkad ände exponerad 8 år i tunnelatmosfär, med och utan skada				
Nr:	B5 utan skada	C5 med skada	O5 utan skada	P5 med skada
				
Varmförzinkad bergbult med skada exponerad 8 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.				
B5 utan skada	C5 med skada	O5 utan skada	P5 med skada	
				
Varmförzinkade ändar exponerade 8 år längst in i borrhål				
B5 utan skada	C5 med skada	O5 utan skada	P5 med skada	
				













Bilaga 3 Exponerade rostfria bergbultar

Rostfria bergbultar exponerade åtta år i Muskötunneln.						
Utstickande rostfri ände i trafikutrymme						
Nr:	E5 E6	EN 1.4311	F5 F6	EN 1.4362	G5 G6	EN 1.4162
						
Rostfri bergbult med skada exponerad 8 år. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.						
Nr:	E5 E6	EN 1.4311	F5 F6	EN 1.4362	G5 G6	EN 1.4162
						
Rostfria ändar efter rengöring exponerade 8 år längst in i borrhål						
Nr:	E5 E6	EN 1.4311	F5 F6	EN 1.4362	G5 G6	EN 1.4162
						









forts. bilaga 3. Exponerade rostfria bultar.

Rostfria bergbultar exponerade åtta år i Äspötunneln .		
Utstickande rostfri ände i trafikutrymme		
Nr: R5 R6 EN 1.4162	S5 S6 EN 1.4311	T5 T6 EN 1.4362
		
Rostfri bergbult med skada exponerad 8 år. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.		
Nr: R5 R6 EN 1.4162	S5 S6 EN 1.4311	T5 T6 EN 1.4362
		
Rostfria ändar efter rengöring exponerade 8 år längst in i borrhål		
Nr: R5 R6 EN 1.4162	S5 S6 EN 1.4311	T5 T6 EN 1.4362
		

Bilaga 4 Epoxibelagda bergbultar, Vik Ørsta AS

Muskötunneln		Äspötunneln		
Utstickande epoxibelagda bergbultar från Vik Ørsta AS exponerade 8 år i trafikutrymme				
Nr:	L6 utan skada	M6 med skada	V6 utan skada	Y6 med skada
				
Epoxibelagda bergbultar med skada exponerad 8 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.				
L6 utan skada	M6 med skada	V6 utan skada	Y6 med skada	
				
Epoxibelagda bergbultar exponerade 8 år längst in i borrhål				
L1 utan skada	M2 med skada	V6 utan skada	Y2 med skada	
				

Bilaga 5 Epoxibelagda bergbultar, Galvano Tia AS

Muskötunneln		Åspötunneln		
Utstickande epoxibelagda bergbultar från Galvano AS exponerade 8 år i trafikutrymme				
Nr:	H6 utan skada	K6 med skada	U5 utan skada	X5 med skada
				
Epoxibelagda bergbultar med skada exponerad 8 år ingjuten. Bultarna har frilagts från cement före fotografering.				
H6 utan skada	K6 med skada	U5 utan skada	X5 med skada	
				
Epoxibelagda bergbultar efter rengöring exponerade 8 år längst in i borrhål				
H6 utan skada	K6 med skada	U5 utan skada	X5 med skada	
