

U P P D R A G S R A P P O R T

K O N F I D E N T I E L L

Fältförsök, korrosion av kolstål i berg utan injektering

Utfärdare: Bertil Sandberg/Urban Andersson
Sektion: Korrosion och provning
Telefon: 08 674 1711
E-post: bertil.sandberg@swerea.se

Date: 2009-03-13

Er referens: GECON AB
Ulf Lindblom
Viktor Rydbergsgatan 1 A
411 34 Göteborg

Vårt referensnummer: 788059
Ert referensnummer:

Godkänd av: _____
(Bertil Sandberg)

1. Bakgrund

I en tidigare genomförd studie bedömdes den största risken för cementingjutna bultars driftsäkerhet ur korrosionssynpunkt vara om det existerade vattenförande sprickor i berget som passerar bulten och lokalt lakar ut bruket. För att få kvantitativa mått på denna risk har KIMAB uppdragits att genomföra försök i borrhål i ett antal utvalda bergmiljöer i Göteborg och Stockholm. Provingen påbörjades 2008-01-23 och avslutades 2008-12-10.

På följande platser sattes prover ut:

- Vägtunnel i Södra länken vid Sickla (Stockholm).
- Tunnel under Brudaremossen (Göteborg).
- Tunnel tillhörande Göteborgs Energi under Göta Älv

2. Fältförsök

För att efterlikna de förhållande som uppstår då en del av bulten inte längre skyddas av cementbruk utan i stället dess korrosionsstatus bestäms av bergvattnet installerades ståltrådar i borrhål som förslöts med gummiexpandrar, se *Bild 1*. Ytterändan av gummiexpandrarerna försågs även med en aluminiumfolie som extra diffusionsskydd gentemot tunnelatmosfären.

I respektive tunnel valdes en plats ut där vattenföringen bedöms vara stor. 15 hål borrades med lutning snett uppåt, diameter 25 mm och längd 1m. Hålen sköljdes med vatten och blåstes rena från borrhålen före det att provtrådar installerades.

I vägtunnel Södra länken pågick provningen under tiden 2008-01-23 till 2008-11-28 och i Göteborgstunnelarna under tiden 2008-03-05 till 2008-12-10.

Provmaterialet som användes var avfettade, vägda ståltrådar, diameter 2 mm, längd 0,7 m (svetstrådar).

Vid monteringen av provtrådarna spolades borrhålet med kvävgas innan förslutning med gummiexpander. *Bild 2* visar borrhål och arbete vid en av provplatserna.

Efter ca 10 månader demonterades 9-10 av trådarna på varje plats. Några trådar var svåra att få ut men trots detta bör åtminstone 2-3 trådar per plats finnas åtkomliga för framtida utvärdering.

Efter proverna tagits ut utvärderades korrosionsangreppen med avseende på allmän korrosion (upprepad betning i Clarkes lösning och vägning) och lokal korrosion (mikroskop).



Bild 1. Expanderbultar av gummi för förslutning av borrhål



Bild 2. Montering av prover.

3. Kemiska analyser

Försök gjordes att samla in bergvatten ur borrhålen för kemisk analys. Det visade sig emellertid svårt att samla in tillräckligt stora mängder vatten. Vid borttagandet av den gummiexpander som utgjorde tätning mellan berg och atmosfär rann vattnet långsamt ut under demontagearbetet och spred sig i ett mycket tunt skikt utmed bergväggen. Endast undantagsvis kunde tillräckliga mängder vatten för analys uppsamlas. Analysresultaten redovisas i *Tabell 1* nedan.

Tabell 1. Analysresultat, vattenprov ur borrhål uttaget efter exponering.

Prov nr.	Klorid mg/L	Sulfat mg/L	Kalcium mg/L	pH
Vägtunnel i Södra länken				
1	16,8	464	102	6,7
3	22,6	708	242	6,7
5	7,4	398	167	-*
6	18,0	760	189	-
7	7,4	482	149	6,3
8	5,0	420	133	6,4
9	8,0	299	106	-
Tunnel under Brudaremossen				
19	2,8	0,2	0,6	-
Tunnel tillhörande Göteborgs Energi under Göta Älv				
33	72,0	9,4	3,0	-
34	22,0	2,3	1,4	-
37	24,9	2,2	1,5	-
39	38,5	4,0	1,3	-
40	5,6	0,6	0,4	-
42	23,7	2,2	1,5	-

* För liten provvolym

4. Resultat från fältförsök

Efter provuttag betades provtrådarna i Clarkes lösning enligt ett fastlagt förfarande som syftar till att kompensera för betlösningens inverkan på uppmätt viktsförlust. Resultaten redovisas i *Tabell 2* som total massförlust under provperioden och som korrosionshastighet.

Bild 3 till 14 visar exempel på korrosionens utseende från de 3 provplatserna vid olika korrosionshastigheter.

Tabell 2. Resultat från korrosionsprovningen redovisad som total massförlust och korrosionshastighet.

Prov nr.	Massför- lust g	Korrosion			Anm.
		g/m ²	g/m ² ,år	µm/år	
Vägtunnel i Södra länken					
1	1.59	372.5	438.6	56.2	vattenprov
2	0.93	218.4	257.1	33.0	fukt
3	0.24	55.3	65.2	8.4	vattenprov
4	1.02	239.0	281.4	36.1	fukt
5	0.33	76.7	90.3	11.6	vattenprov
6	0.82	191.5	225.5	28.9	vattenprov
7	0.52	121.6	143.2	18.4	vattenprov
8	0.30	70.0	82.4	10.6	vattenprov
9	0.65	151.4	178.2	22.9	vattenprov
10	1.24	291.1	342.8	43.9	fukt
Tunnel under Brudaremsan					
16	0.02	3.5	4.6	0.6	vatten
17	0.02	4.5	5.9	0.8	vatten
18	0.04	8.3	10.8	1.4	fukt
19	0.36	83.6	108.9	14.0	vattenprov
20	0.15	35.6	46.5	6.0	fukt
22	0.05	10.8	14.1	1.8	fukt
23	0.003	0.7	1.0	0.1	fukt
24	0.04	8.5	11.0	1.4	fukt
25	0.003	0.7	0.9	0.1	fukt
Tunnel tillhörande Göteborgs Energi under Göta Älv					
32	0.01	1.4	1.9	0.2	torrt hål
33	0.34	78.6	102.5	13.1	vattenprov
34	0.93	217.0	282.9	36.3	vattenprov
35	0.08	18.6	24.3	3.1	vatten
37	1.13	265.9	346.6	44.4	vattenprov
38	1.51	353.7	461.1	59.1	fukt
39	1.65	387.5	505.1	64.8	vattenprov
40	0.21	49.7	64.8	8.3	vattenprov
42	1.53	358.1	466.8	59.8	vattenprov

Vägtunnel i Södra länken

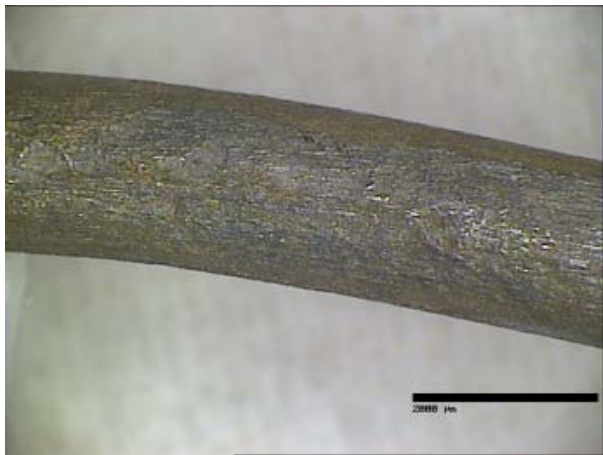


Bild 3. Tråd 1, korrosionshastighet 56 µm/år

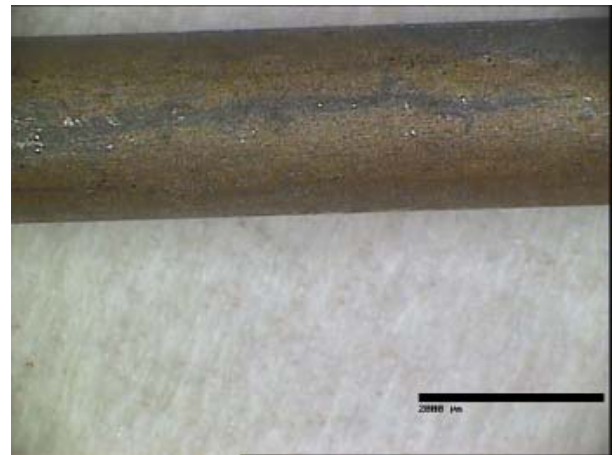


Bild 4. Tråd 5, korrosionshastighet 12 µm/år

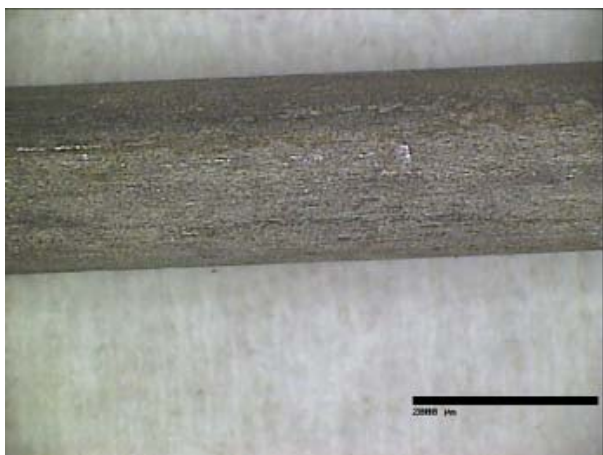


Bild 5. Tråd 8, korrosionshastighet 11 µm/år

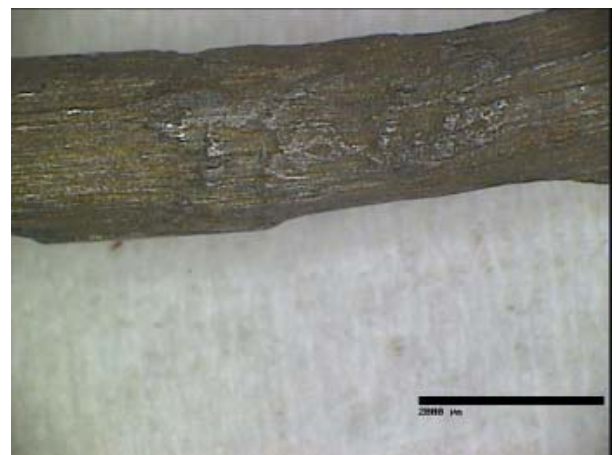


Bild 6. Tråd 10, korrosionshastighet 44 µm/år

Tunnel under Brudaremossen



Bild 7. Tråd 17, korrosionshastighet 1 µm/år

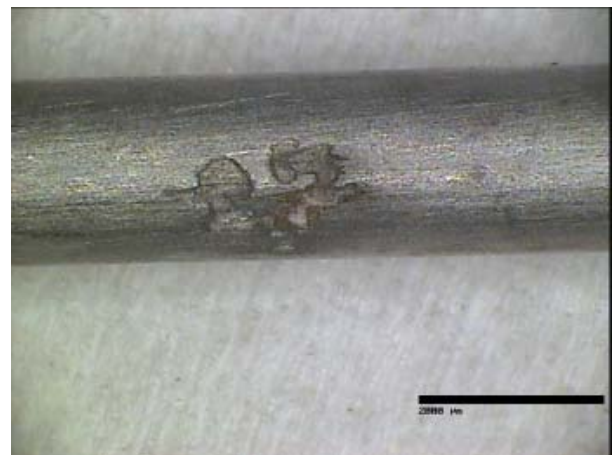


Bild 8. Tråd 18, korrosionshastighet 1 µm/år

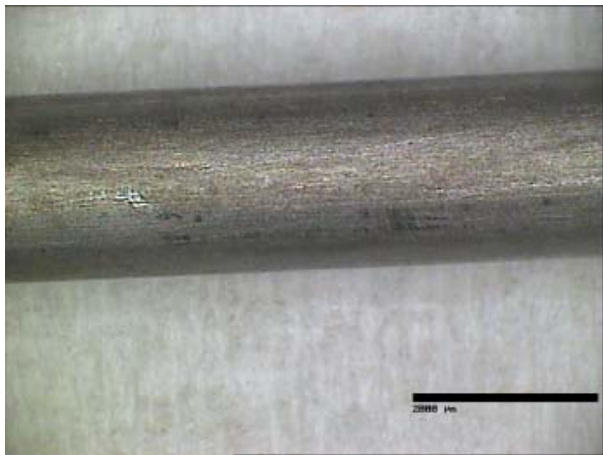


Bild 9. Tråd 20, korrosionshastighet 6 µm/år

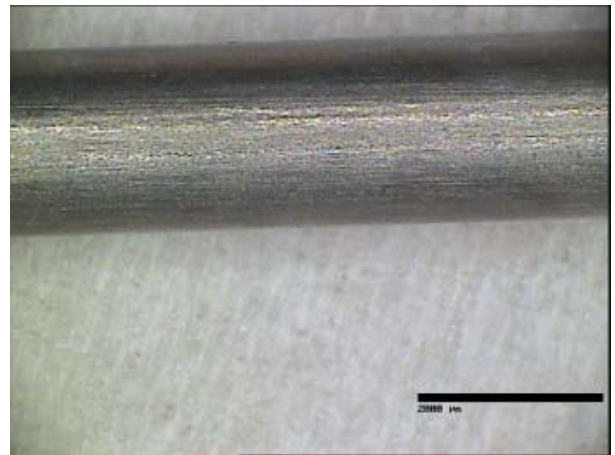


Bild 10. Tråd 25, korrosionshastighet 0,1 µm/år

Tunnel tillhörande Göteborgs Energi under Göta Älv



Bild 11. Tråd 32, korrosionshastighet 0,2 µm/år



Bild 12. Tråd 34, korrosionshastighet 36 µm/år



Bild 13. Tråd 39, korrosionshastighet 65 µm/år

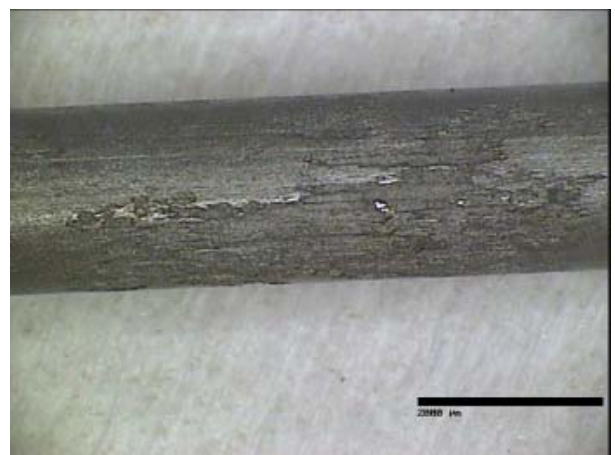


Bild 14. Tråd 40, korrosionshastighet 8 µm/år

Korrosionshastigheten för kolstål skiljer sig markant mellan provplats under Brudaremossen gentemot provplatserna Södra länken och under Göta Älv.

Medelkorrosionshastigheten under Brudaremossen är ca. 3 µm/år medan de två andra provplatserna uppvisar ca. 10 gånger högre korrosionshastighet 27 µm/år respektive 32 µm/år, se tabell 2.

Tyvär kunde bara ett vattenprov insamlas från provplatsen under Brudaremossen men detta prov tyder på att vattnet innehåller lägre halter av både klorid och sulfat än de övriga provplatserna. Det faktum att bara ett vattenprov kunde tas visar också att mängden genomströmmande vatten är liten på denna plats, se tabell 1 och 2.

Korrosionsangreppen på prover, från alla provplatser, uppvisar i många fall kraftiga lokala angrepp, se t.ex. bild 6 från Södra länken, bild 8 från Brudaremossen och bild 13 från provplats under Göta Älv. Även korrosion av allmän karaktär utan utpräglad gropfrätning förekommer i mer eller mindre utvecklad form på prover från samtliga provplatser, se t.ex. bild 3.

Det lokala angreppsdjupet kan vara betydande se bild 13 där korrosionsdjupet lokalt kan uppskattas till ca. 250 µm medan den allmänna korrosionen begränsar sig till 65 µm.

5. Diskussion

Syftet med undersökningen var att studera hur väl den tyska normen DIN 50 929, som används för bedömning av vattenledningstvattens korrosivitet, även gäller för bergvatten runt bultar där täckning av bruk saknas.

Trots det statistiskt begränsade materialet har ett försök till analys genomförts. Enligt DIN 50 929, del 3, avsnitt 6 beräknas ett korrosionsindex:

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

Vad de olika faktorerna står för framgår av tabellen nedan.

Enhet	Värde
Vattentyp	N ₁
Flödande	0
Stillastående	-1
Insjö	-3
Anaerobt kärr, hav	-5
$c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})$	N ₃
<1	0
1-5	-2
5-25	-4
25-100	-6
100-300	-7
>300	-8

Syrakapacitet till pH 4,3	mol/m ³	N ₄
<1		+1
1-2		+2
2-4		+3
4-6		+4
>6		+5
$c(\text{Ca}^{2+})$	mol/m ³	N ₅
<0,5		-1
0,5-2		0
2-8		+1
>8		+2
pH-värde	mol/m ³	N ₆
<5,5		-3
5,5-6,5		-2
6,5-7,0		-1
7,0-7,5		0
>7,5		+1

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

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

DIN-normen är anpassad för vattenledningsvatten. Kategori 1, vattentyp, anger t.ex. att korrosiviteten är högre i stillastående än i flödande vatten. Detta gäller för ett syresatt vatten i ett metallrör. För en delvis ingjuten bergbult är dock stillastående vatten mindre korrosivt eftersom detta alkaliserar av kringliggande bruk.

Vi kan också tydligt se av våra resultat att ”torra” borrhål ger mycket låg korrosion. Kategori 1 måste således anpassas till bergbultsförhållanden.

Lokala frätgropar är kritiskt för vattenledningar eftersom dessa kan leda till genomfrätningar. Lokala gropar uppkommer även på bultar. Sannolikt råder motsvarande förhållande mellan allmän korrosion och djupaste frätgropar nämligen 1:5. Dock kommer dessa frätgropar att vara mindre kritiska för bultar. Med tiden växer de ihop och det blir den allmänna korrosionen som avgör bultens livslängd.

Det begränsade underlaget från vattenanalyserna gör att vi måste göra vissa kvalificerade antaganden.

Södra länken

Den höga halten kalcium antyder att vattnet har en förhållandevis god buffringsförmåga. pH borde ligga något högre än uppmätt 6,3-6,7. Troligen har luftens koldioxid sänkt pH-värdet mellan tillfället för provtagning och analys. Vår bedömning är att pH har varit ca 7,0.

Syrakapacitet kan likställas med HCO_3^- - halt och denna har bedömts ligga vid 1-2 mol/m³.

Vattenförekomsten var god.

Medelvärdet för klorid och sulfat låg på 12,2 respektive 504 mg/l. Omräknat till mol/m³ ger detta 0,344 respektive 5,25. $c(\text{Cl}^-) + 2 c(\text{SO}_4^{2-})$ blir då 10,8.

Ca^{2+} - halten hade ett medelvärde på 155 mg/l (3,9 mol/m³).

Brudaremsen

Den låga kalciumhalten gör att vi antar ett pH-värde i intervallet 5,5-6,5 och en syrakapacitet <1.

Låga klorid och sulfathalter.

Lågt vattenflöde, i vissa håll torrt eller endast fuktigt.

Göta Älv

Den låga kalciumhalten gör att vi antar ett pH-värde i intervallet 5,5-6,5 och en syrakapacitet <1.

Vattenförekomsten var god.

Medelvärdet för klorid och sulfat låg på 31,1 respektive 3,5 mg/l. Omräknat till mol/m³ ger detta 0,88 respektive 0,04. $c(\text{Cl}^-) + 2 c(\text{SO}_4^{2-})$ blir då 0,96. Resultatet påverkas dock av ett avvikande värde varför $c(\text{Cl}^-) + 2 c(\text{SO}_4^{2-})$ bör antas vara något över 1.

Det föreslås att DIN-normen förändras med avseende på vattentyp enligt nedan.

Vattentyp	N ₁
Flödande	-3
Fuktigt	0
Torrt	+3

Bedömningen för de tre olika exponeringsplatserna skulle i så fall bli enligt nedan:

Plats	Vattenförhållanden	N ₁	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	W ₀
Södra länken	Flödande	-3	-4	+2	+2	-1	-5

Södra länken	Fuktigt	0	-4	+2	+2	-1	-3
Brudaremossen	Flödande	-3	0	+1	-1	-2	-5
Brudaremossen	Fuktigt	0	0	+1	-1	-2	-2
Brudaremossen	Torr	+3	0	+1	-1	-2	1
Göta Älv	Flödande	-3	-2	+1	-1	-2	-9
Göta Älv	Fuktigt	0	-2	+1	-1	-2	-4
Göta Älv	Torrt	+3	-2	+1	-1	-2	-3

Om vi jämför detta med uppmätta korrosionshastigheter får vi följande tabell:

Prov	Plats	Vattenförh.	Wo	Korr.hast DIN, µm/år	Korr.hast uppmätt, µm/år
1	Södra länken	Flödande	-5	50	56
2		Fuktigt	-3	20	33
3		Flödande	-5	50	8
4		Fuktigt	-3	20	36
5		Flödande	-5	50	12
6		Flödande	-5	50	29
7		Flödande	-5	50	18
8		Flödande	-5	50	11
9		Flödande	-5	50	23
10		Fuktigt	-3	20	44
16	Brudaremossen	Torrt	1	10	1
17		Torrt	1	10	1
18		Fuktigt	-2	20	1
19		Flödande	-5	50	14
20		Torrt	1	10	6
22		Torrt	1	10	2
23		Torrt	1	10	0
24		Torrt	1	10	1
25		Torrt	1	10	0
32	Göta Älv	Torrt	-3	20	0
33		Flödande	-9	100	13
34		Flödande	-9	100	36

35		Fuktigt	-4	20	3
37		Flödande	-9	100	44
38		Fuktigt	-4	20	59
39		Flödande	-9	100	65
40		Flödande	-9	100	8
42		Flödande	-9	100	60

Med flödande avses att det samlats så mycket vatten att ett prov kunde tas.

Av tabellen framgår att de i DIN-normen angivna korrosionshastigheterna ligger högre än de av oss uppmätta. Man bör dock vara lite försiktigt att dra allt för långtgående slutsatser baserat på det tillgängliga materialet men det finns indikationer på att korrosionshastigheten ligger ca 50 % lägre i borrhålen än vad DIN-normen anger.

6 Slutsatser

Den genomförda undersökningen medger följande slutsatser.

- Förutom vattnets kemiska egenskaper är vattenföringen viktig.
- Ett förslag på modifiering av DIN-normen ges i rapporten