

## **Korrosionsprovning av ingjutna stålstänger i betongblock och ingjutna bergbultar**

### **Fem års exponering i Äspölaboratoriet**

Behnaz Aghili, Svensk Kärnbränslehantering AB

Bror Sederholm, Johan Ahlström  
Swerea KIMAB AB

Jan Trägårdh, CBI Betonginstitutet AB

Oktober 2014

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm  
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB R-14-27

ID 1427804

Uppdaterad 2016-03

# **Korrosionsprovning av ingjutna stålstänger i betongblock och ingjutna bergbultar**

## **Fem års exponering i Äspölaboratoriet**

Behnaz Aghili, Svensk Kärnbränslehantering AB

Bror Sederholm, Johan Ahlström  
Swerea KIMAB AB

Jan Trägårdh, CBI Betonginstitutet AB

Oktober 2014

*Nyckelord:* Låg-pH-betong, Låg-pH-bruk, Korrosion, Bergbultar.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se).

Den ursprungliga rapporten, daterad oktober 2014, visade sig innehålla redaktionella fel som har korrigerats i denna uppdaterade version.

# Sammanfattning

I samband med byggandet av slutförvaret för använt kärnbränsle, kommer konventionella byggmaterial som stål och betong att användas. En lämplig kemisk miljö är av vikt med hänsyn till förvarets långsiktiga säkerhet. Därför förespråkas användning av cementbaserade låg-pH-material som ger ett lakvatten med tillräckligt lågt pH ( $\leq 11$ ).

SKB har varit involverat i utveckling av cementbaserade låg-pH-material sedan 2001. Korrosion av stål i låg-pH-betong har ansetts vara en potentiell risk då betongens pH är lägre och dess förmåga att passivera stålet därmed kan tänkas vara sämre.

Mot denna bakgrund har fältförsök på Äspölaboratoriet initierats. En förväntad ökad risk för stålkorrosion i cementbaserade låg-pH-material har studerats genom undersökning av olika provkroppar som har fältexponerats i Äspölaboratoriet. Provkropparna består av stålstänger ingjutna i betongblock och bergbultar ingjutna i låg-pH-pasta eller låg-pH-bruk. Fältexponeringen är planerad att pågå under minst 10 år.

Undersökning av stålstänger ingjutna i betongblocken efter cirka 18 månaders exponering, har tidigare redovisats i Bodén och Pettersson (2011). I föreliggande rapport redovisas en kortfattad version av resultatet av korrosionsprovning av både bergbultar och ingjutna stålstänger i betongblock efter fem års exponering i Äspölaboratoriet. Undersökningen har utförts av Swerea KIMAB och CBI Betonginstitutet. Provningsmetoderna och resultatet av undersökningarna är utförligt beskrivna i Swerea KIMAB:s rapport Sederholm et al. (2014).

Undersökning av de ingjutna stålstängerna i betongblocken, efter 18 månaders exponering i Äspölaboratoriet visade inga tecken på korrosion (Bodén och Pettersson 2011). Undersökning av stålstänger gjutna i betongblock, efter fem års exponering i fältet, tyder på att korrosionshastigheten för stål är försumbar både i låg-pH-betong och anläggningsbetong när klorider inte är närvarande. Korrosionshastigheten blir högre i låg-pH-betong jämfört med anläggningsbetong när klorider har nått stålets yta, det vill säga i fallet då klorider blandades i betongen i samband med gjutningen. Däremot blev korrosionshastigheten för stål lägre i låg-pH-betong än i anläggningsbetong när betongblocken lades i en lösning med 10 % klorider under tre månader innan de placerades i Äspölaboratoriet. Detta beror på att kloriderna inte har nått fram till stålstängerna i betongblock med låg-pH-betong på grund av låg-pH-betongens högre täthet. Korrosion kommer att uppstå när kloriderna når stålstängernas yta.

På grund av låg-pH-betongens lägre pH är stål ingjutet i detta material inte passivt i samma grad som stål som är ingjutet i en konventionell betong. Provning under en längre tid kommer troligen att förändra korrosionsbilden som har angetts ovan. Den planerade exponeringen förlängs därför och ytterligare undersökning av stålstänger och bergbultar kommer att ske om 5 och 10 år, det vill säga 2018 och 2023. De återstående bergbultarna kommer att exponeras vidare i fält och undersöks om 15 år. I kommande undersökningar av bergbultarna ska även dragprovning av dessa ingå.

De undersökta bergbultarna visar ingen tecken på korrosion. Mätning av Ca/Si-kvoten tyder på att ingen urlakning har skett hos ingjutningsmaterialen under exponeringstiden. Detta betyder att inget flödande vatten från sprickor i berget har varit i kontakt med ingjutningsmaterialen eller bergbultarna. Mätning av pH-värdet visar att ingjutningsmaterialens pH-värden varierar mellan 11,3 och 11,9. Dessa värden är uppmätta enligt den metod som har tagits fram genom ett internationellt samarbete (Alonso et al. 2012).



# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund och syfte</b>	7
<b>2</b>	<b>Fältförsök med stålstänger ingjutna i betongblock</b>	9
2.1	Provningsprogram	9
2.2	Korrosionsutseende, korrosionshastighet, maximalt frätgropsdjup och kloridhalt	10
<b>3</b>	<b>Fältförsök med ingjutna bergbultar</b>	11
3.1	Provningsmetodik	11
3.2	Utvärdering av utseende, pH-värde och Ca/Si-kvot hos låg- pH-pastan och låg-pH-bruket, samt korrosion hos bergbultarna	11
<b>4</b>	<b>Resultat och diskussion</b>	13
4.1	Utvärdering av utseendet hos betongblock och stålstänger efter fem års exponering i Äspölaboratoriet	13
4.2	Utvärdering av stålstångernas korrosionshastighet	15
4.3	Mätning av maximalt frätgropsdjup hos ingjutna stålstänger i betongblock efter 1,5 och 5 års exponering i Äspölaboratoriet	16
4.4	Bestämning av betongblockens totala kloridhalt per bindemedelsvikt efter exponering	16
4.5	Undersökning av borrhärnor och korrosionsangrepp hos ingjutna bergbultar	17
4.6	Undersökning av pH-värdet hos ingjutningsmaterial	18
4.7	Undersökning av Ca/Si-kvot hos ingjutningsmaterial	18
<b>5</b>	<b>Slutsatser</b>	19
	<b>Referenser</b>	21



# 1 Bakgrund och syfte

I samband med byggandet av slutförvaret för använt kärnbränsle, kommer konventionella byggmaterial som stål och betong att användas. En lämplig kemisk miljö är av vikt med hänsyn till förvarets långsiktiga säkerhet. Därför förespråkas användning av cementbaserade låg-pH-material som ger ett lakvatten med tillräckligt lågt pH ( $\leq 11$ ).

SKB har varit involverat i utveckling av cementbaserade låg-pH-material sedan 2001. Korrosion av stål i låg-pH-betong har ansetts som en potentiell risk då betongens pH är lägre och dess förmåga att passivera stålet därmed kan tänkas vara sämre.

Mot denna bakgrund har fältförsök på Äspölaboratoriet initierats. Undersökningarna omfattar 10 stycken bergbultar ingjutna i låg-pH-bruk, 10 stycken bergbultar ingjutna i låg-pH-pasta och stålstänger gjutna i betongblock (i anläggningsbetong respektive låg-pH-betong). För utförlig beskrivning av provuppsättningen se Bodén och Pettersson (2011).

I den här rapporten ges en kortfattad redovisning av resultatet av korrosionsprovnings och undersökning av bergbultar och pasta respektive bruk efter fem års exponering i Äspölaboratoriet. Undersökningarna och resultaten av dessa beskrivs utförligt i Sederholm et al. (2014). Notera att denna undersökning är en första utvärdering av bergbultar och ingjutningsmaterial. Undersökningen utfördes under 2013. Ytterligare utvärdering av bergbultarna genomförs förslagsvis om 5, 10 respektive 15 år efter detta första uttag, det vill säga 2018, 2023 och 2028. Korrosionen av stål i de återstående betongblocken planeras att utvärderas 2018 och 2023.

Undersökningen syftar till att:

- utvärdera och jämföra korrosionshastigheten för stål i låg-pH-betong med korrosionshastigheten för stål i anläggningsbetong,
- undersöka om den kloridinitierade korrosionen för stål ökar när stålet är ingjutet i låg-pH-betong jämfört med när anläggningsbetong används,
- utvärdera om låg-pH-pasta respektive låg-pH-bruk har varit utsatta för urlakning, och
- undersöka tillståndet hos pasta, bruk och bergbultar.

Eftersom förmågan att motstå kloridinitierad korrosion beror bland annat på pH-värdet i pasta respektive bruk så innefattar undersökningen bestämning av pH-värdet i dessa. För att undersöka om låg-pH-pastan respektive låg-pH-bruket har varit utsatt för urlakning på grund av flödande bergvatten så undersöktes förhållandet mellan kalcium och kisel i dessa material. Detta förhållande är en känslig indikator för urlakning.

En första utvärdering av korrosionshastigheten hos stålstänger ingjutna i betongblock med låg-pH-betong respektive anläggningsbetong har genomförts efter cirka 18 månaders exponering i Äspölaboratoriet (Bodén och Pettersson 2011, Vogt 2009).





## 2 Fältförsök med stålstänger ingjutna i betongblock

### 2.1 Provningsprogram

Sammansättningen av låg-pH-betongen och anläggningsbetongen framgår av tabell 2-1 nedan.

Totalt har 24 betongblock tillverkats enligt nedan:

- 12 betongblock av låg-pH-betong:
  1. 4 obehandlade betongblock (inga klorider).
  2. 4 betongblock med 2 % klorider (av bindemedlets vikt) ingjutet.
  3. 4 betongblock som exponerades för en 10 %-ig kloridlösning under tre månader innan fält-exponeringen startades.
- 12 betongblock av anläggningsbetong:
  1. 4 obehandlade betongblock (inga klorider).
  2. 4 betongblock med 2 % klorider (av bindemedlets vikt) ingjutet.
  3. 4 betongblock som exponerades för en 10 %-ig kloridlösning under tre månader innan fält-exponeringen startades.

Tre stycken stålstänger har gjutits i varje betongblock. Varje stålstång, diameter 20 mm och längd 200 mm, rengjordes noggrant och vägdes med en mätnoggrannhet av tusendelar av gram före gjutningen. De 24 betongblocken placerades därefter i en öppen container i nisch NASA2715 i Äspölaboratoriet, figur 2-1.

I en tidigare undersökning har tre betongblock av vardera betongtypen undersökts och även i den undersökning som beskrivs här användes tre av vardera betongtypen. De resterande 12 blocken, 6 av vardera betongtyp, är kvar i containern i Äspölaboratoriet och sparas för undersökningar i framtiden förslagsvis under 2018 och 2023. Figur 2-2 visar de betongblock som är kvar för senare undersökningar.

**Tabell 2-1. Betongblockens sammansättning (kg/m<sup>3</sup>) (Bodén och Pettersson 2011).**

	Låg-pH-betong	Anläggningsbetong. referens
Cement	120	480
Silikastoft	80	–
Kalkstensfiller Limus 25	369	–
Ballast 0–8 mm	1 596	1 622
Vatten	165	216
Flyttillsatsmedel Genuim 51	6,4	2,0
Vct	1,375	0,45
Vbt	0,825	0,45



**Figur 2-1.** Exponering av betongblock i container i Äspölaboratoriet. Containern har ett skyddande tak för att hindra att betongblocken utsätts för droppande bergvatten. En sida av containern är helt öppen mot tunnel, ursprunglig provuppsättning med de 24 betongblocken (Bodén och Pettersson 2011).



*Figur 2-2. De 12 kvarvarande betongblocken i containern i Äspölaboratoriet.*

## **2.2 Korrosionsutseende, korrosionshastighet, maximalt frätgropsdjup och kloridhalt**

Samtliga sex uttagna betongblock undersöktes med avseende på sprickor och rostutfällningar och eventuellt andra defekter. Lokala korrosionsangrepp mättes efter att korrosionsprodukterna hade avlägsnats. Undersökningsmetodiken beskrivs utförligt i Sederholm et al. (2014).

Mätning av betongblockens kloridhalt efter exponering utfördes av CBI på de betongblock (4 stycken) som förväntades innehålla klorider. Den totala kloridhalten redovisas som vikt-%  $\text{Cl}^-$  per bindemedelsvikt. Provningsmetoderna beskrivs utförligt i Sederholm et al. (2014).

## 3 Fältförsök med ingjutna bergbultar

### 3.1 Provningsmetodik

Installation av bergbultarna beskrivs i Bodén och Pettersson (2011). Totalt har 20 stycken bergbultar installerats i Äspötunneln (10 horisontella och 10 vertikala) och två olika typer av låg-pH-material användes, en låg-pH-pasta och ett låg-pH-bruk. Figur 3-1 visar provplatsen i Äspölaboratoriet, nisch NASA0408A. För nuvarande undersökning överborrades 3 bergbultar, två horisontella och en vertikal, HA 0410 A03 och HA 0410 A02 (horisontellt i bergvägg), HA 0412 H02 (vertikalt i bergtak).

### 3.2 Utvärdering av utseende, pH-värde och Ca/Si-kvot hos låg-pH-pastan och låg-pH-bruket, samt korrosion hos bergbultarna

De överborrade borrhämnarna innehöll bergmaterial, låg-pH-pasta eller låg-pH-bruk och bergbultar. Samtliga borrhämnar undersöktes okulärt med avseende på sprickor och håligheter. Därefter togs provbitar från bruket och pastan för undersökning av pH-värdet och Ca/Si-kvot med SEM/EDS. Provningsförfarandet beskrivs utförligt i Sederholm et al. (2014).

Figur 3-2 nedan visar en bergbult frilagd från bergmaterial och ingjutningsmaterial. Bergbultarna kapades i mindre bitar och undersöktes med avseende på korrosion.



*Figur 3-1. Provtvättning NASA0408A i Äspölaboratoriet (Bodén och Pettersson 2011).*



*Figur 3-2. Bergbult frilagd från bergmaterial och ingjutningsmaterial (Sederholm et al. 2014).*



## 4 Resultat och diskussion

### 4.1 Utvärdering av utseendet hos betongblock och stålstänger efter fem års exponering i Äspölaboratoriet

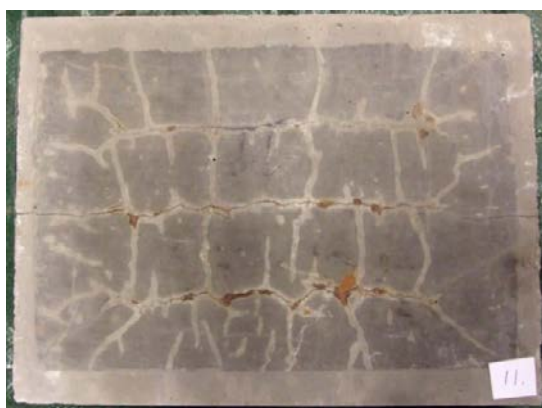
Vid undersökning av utseendet hos betongblocken konstaterades ett kraftigt sprickmönster hos betongblock i låg-pH-betong med ingjutna klorider, figur 4-1. En svag tendens till sprickmönster kunde även konstateras hos betongblock i låg-pH-betong utan klorider, figur 4-2.

Däremot kunde inga sprickor konstateras i blocken med låg-pH-betong som hade exponerats för kloridlösning i tre månader innan den placerades i Äspölaboratoriet, figur 4-3.

I betongblocken med anläggningsbetong konstaterades inga sprickor men täcksiktet hade släppt från de rostiga stålstångerna i blocket med anläggningsbetong och ingjutna klorider, figur 4-4.

Utseendet hos de stålstänger som varit ingjutna i anläggningsbetong utan klorider efter fem års exponering i Äspölaboratoriet visade inga tecken på korrosionsskador. Det förekommer inga korrosionsangrepp på stålstänger gjutna i låg-pH-betong utan klorider heller. Däremot kunde ytliga korrosionsangrepp konstateras på dessa stålstångers ändrar, figur 4-5. En möjlig förklaring är att stålstångernas tvärsnittsytta saknar det ädla glödskal som finns på stålstångernas mantelyta och har fungerat som en effektiv anodyta med mantelytan som katodyta i en korrosionscell.

Kraftiga korrosionsangrepp kunde konstateras hos de stålstänger som var ingjutna i anläggningsbetong exponerat för kloridlösning, figur 4-6. Mätningar av kloridhalten i betongen i detta block visade en kloridhalt per cementvikt på 0,6 vikt-%.



**Figur 4-1.** Låg-pH-betong med ingjutna klorider (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-2.** Låg-pH-betong utan klorider (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-3.** Låg-pH-betong exponerad för klorider (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-4.** Anläggningsbetong med ingjutna klorider (Sederholm et al. 2014).

Stålstänger som var ingjutna i låg-pH-betong exponerade för kloridlösning var å andra sidan helt fria från korrosionsangrepp, figur 4-7. Mätningar av kloridhalten i betongblocket efter exponering tyder på att kloriderna inte hade nått fram till stålytan (Sederholm et al. 2014).

Figur 4-8 och 4-9 visar utseendet hos stålstängerna i anläggningsbetong respektive låg-pH-betong med ingjutna klorider. Korrosionsangrepp förekommer på både stålstänger ingjutna i anläggningsbetong och i låg-pH-betong med ingjutna klorider efter fem års exponering i Äspölaboratoriet.



**Figur 4-5.** Stålstänger som varit ingjutna i låg-pH-betong utan klorider efter fem års exponering i Äspölaboratoriet (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-6.** Stålstänger som varit ingjutna i anläggningsbetong exponerad för kloridlösning efter fem år i Äspölaboratoriet (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-7.** Stålstänger som varit ingjutna i en låg-pH-betong exponerad för kloridlösning efter fem år i Äspölaboratoriet (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-8.** Stålstänger ingjutna i anläggningsbetong med **ingjutna klorider** efter fem års exponering i Äspötunneln (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-9.** Stålstänger som varit ingjutna i låg-pH-betong med ingjutna klorider efter fem års exponering i Äspö tunneln (Sederholm et al. 2014).

## 4.2 Utvärdering av stålstångernas korrosionshastighet

I tabell 4-1 och 4-2 visas korrosionshastigheter för stålstänger gjutna i anläggningsbetong respektive låg-pH-betong. Observera att den totala massförlusten har kompenserats för vikten av glödskalet.

Sammanfattningsvis kan sägas att korrosionshastigheten hos ingjutna stålstänger i betongblock med ingjutna klorider i en låg-pH-betong är betydligt högre (cirka 5–6 gånger högre) jämfört med korrosionshastigheten hos stålstänger ingjutna i betongblock med anläggningsbetong efter fem års exponering i Äspölaboratoriet.

**Tabell 4-1. Kompenserade korrosionshastigheter på stål ingjuten i låg-pH-betong (Sederholm et al. 2014).**

Klorider	1,5 års exponering			5 års exponering		
	Prov nr. (märkning)	Massförlust (g)	Korrosionshastighet (µm/år)	Prov nr. (märkning)	Massförlust (g)	Korrosionshastighet (µm/år)
Exponerade för kloridlösning	1	0,0	0	4	0,0	0
	2	0,0	0	5	0,1	0
	3	0,0	0	6	0,0	0
	Medel	0,0	0	Medel	0,0	0
Inga	14	0,0	0	17	0,0	0
	15	0,0	0	18	0,1	0
	16	0,0	0	19	0	0
	Medel	0,0	0	Medel	0,0	0
Ingjutna	26	1,5	10	29	6,2	12
	27	1,5	10	30	7,5	14
	28	1,4	9	31	7,0	13
	Medel	1,4	10	Medel	6,9	13

**Tabell 4-2. Kompenserade korrosionshastigheter på stål ingjuten i anläggningsbetong (Sederholm et al. 2014).**

Klorider	1,5 års exponering			5 års exponering		
	Prov nr. (märkning)	Massförlust (g)	Korrosionshastighet (µm/år)	Prov nr. (märkning)	Massförlust (g)	Korrosionshastighet (µm/år)
Exponerade för kloridlösning	38	3,2	22	41	6,9	13
	39	3,3	22	42	5,9	11
	40	4,6	31	43	7,1	14
	Medel	3,7	25	Medel	6,6	13
Inga	50	0,1	1	53	0,1	0
	51	0,0	0	54	0	0
	52	0,0	0	55	0	0
	Medel	0,0	0	Medel	0,0	0
Ingjutna	62	0,8	5	65	0,8	1
	63	0,4	3	66	1,6	3
	64	0,0	0	67	1,4	3
	Medel	0,4	2,7	Medel	1,2	2,3



### 4.3 Mätning av maximalt frätgropsdjup hos ingjutna stålstänger i betongblock efter 1,5 och 5 års exponering i Äspölaboratoriet

Djupa frätgropar konstaterats på de flesta stålstångerna efter 1,5 och 5 år i Äspölaboratoriet i betongblock med ingjutna klorider. Undantaget är stålstänger ingjutna i låg-pH-betong som exponerades för kloridlösning i tre månader efter gjutning och härdning (Bodén och Pettersson 2011 respektive Sederholm et al. 2014).

Det maximala frätgropsdjupet är betydligt större efter 1,5 års exponering i Äspölaboratoriet jämfört med 5 års exponering för stålstänger ingjutna i anläggningsbetong som hade exponerats för kloridlösning. Detta tycks bero på att kloridkoncentrationsprofilen jämnas ut med tiden och leder till att kloridkoncentrationen vid stålets yta sjunker, vilket minskar korrosionshastigheten med tiden.

Ingen större skillnad i maximalt frätgropsdjup kunde konstateras hos stålstänger som varit ingjutna i låg-pH-betong respektive anläggningsbetong med ingjutna klorider.

Det maximala frätgropsdjupet hos stålstänger i låg-pH-betong exponerade för klorider var mellan 80 och 150 µm efter fem års exponering medan för stålstänger i anläggningsbetong varierade det maximala frätgropsdjupet mellan 1 000 och 1 500 µm efter samma exponeringstid. Anledningen till denna stora skillnad i maximalt frätgropsdjup tycks vara att låg-pH-betongens tätare struktur försvårar transport av kloriderna fram till stålstångerna vilket innebär att korrosionen ännu inte initierats, tabell 4-3.

**Tabell 4-3. Maximalt frätgropsdjup hos stålstänger som varit ingjutna i betong under 1,5 och 5 år i Äspölaboratoriet (Sederholm et al. 2014).**

Klorider	Betong	1,5 års exponering		5 års exponering	
		Prov nr	Frätgropsdjup (µm)	Prov nr	Frätgropsdjup (µm)
Exponerade för klorider	Låg-pH	1	20	4	100
		2	35	5	80
		3	20	6	150
Inga	Låg-pH	14	25	17	< 40
		15	40	18	< 40
		16	25	19	< 40
Ingjutna	Låg-pH	26	800	29	1 400
		27	400	30	1 700
		28	600	31	1 200
Exponerade för klorider	Anläggning	38	2 200	41	1 500
		39	2 800	42	1 000
		40	1 700	43	1 000
Inga	Anläggning	50	30	53	< 40
		51	40	54	< 40
		52	65	55	< 40
Ingjutna	Anläggning	62	800	65	1 000
		63	700	66	1 100
		64	600	67	1 700

### 4.4 Bestämning av betongblockens totala kloridhalt per bindemedelsvikt efter exponering

I tabell 4-4 visas total uppmätt kloridhalt per bindemedelsvikt hos provblock med olika betongkvaliteter efter fem års exponering i Äspölaboratoriet, se Sederholm et al. (2014) för metodbeskrivningen. Det framgår att kloridhalten är betydligt högre 15 mm in i betongblocken om klorider tillsattes vid gjutning av blocken jämfört med fallet då blocken exponerades för en kloridlösning. En jämförelse mellan kloridhalten mitt i block för betongblock med anläggningsbetong respektive låg-pH-betong då blocken exponerades för en kloridlösning, visar att kloridhalten mitt i block är betydligt högre för block med anläggningsbetong jämfört med block med låg-pH-betong. Kloriderna verkar ha mycket lättare att tränga in i provblock med anläggningsbetong jämfört med betongblock med låg pH-betong.

**Tabell 4-4. Kloridkoncentration i olika djup hos betongblocken (Sederholm et al. 2014).**

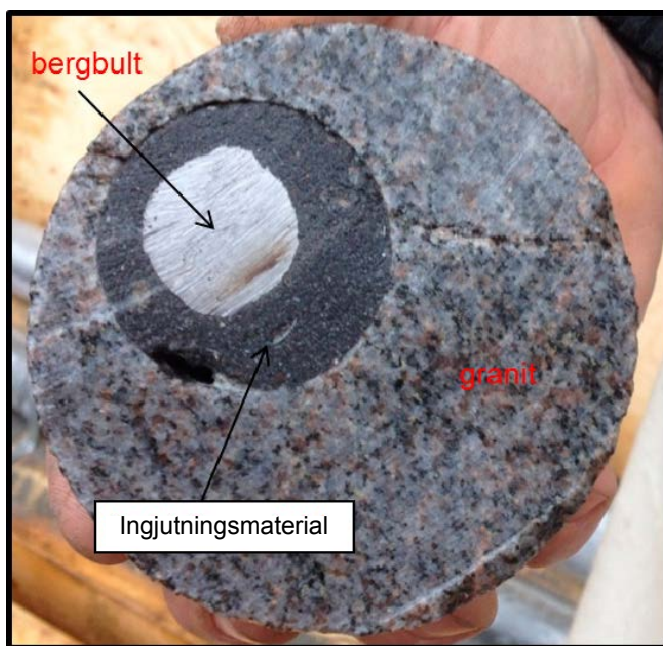
Betongtyp	Provuttag	Vikt-% klorider per bindemedelsvikt
Låg-pH-betong exponerad för kloridlösning	Ytan	1,1
	Mitt i block	0,1
Låg-pH-betong med ingjutna klorider	Ytan	1,3
	Mitt i block	1,9
Anläggningsbetong exponerad för kloridlösning	Ytan	1,7
	Mitt i block	0,6
Anläggningsbetong med ingjutna klorider	Ytan	1,8
	Mitt i block	1,8

## 4.5 Undersökning av borrhärnor och korrosionsangrepp hos ingjutna bergbultar

Samtliga borrhärnor undersöktes okulärt med avseende på sprickor och håligheter. Inga sprickor eller håligheter i ingjutningsmaterialet kunde konstateras vid den okulära undersökningen. Det konstaterades vidare att vidhäftningen mellan bergbult och ingjutningsmaterialet var mycket god. I figur 4-10 visas ett exempel av tvärsnittsytan hos en uppkapad borrhärna.

Okulär undersökning av utseendet hos bergbultarna efter fem års exponering i Äspölaboratoriets bergvägg och bergtak visade inga tecken på korrosion. På vissa delar av de ingjutna bergbultarna konstaterades dock en ytligt liggande rödrost. Denna rödrost har dock uppkommit efter exponeringen och på de delar av bergbultarna som inte varit ingjutna i berget, alltså varit exponerade för tunnelns atmosfär (Sederholm et al. 2014).

Sammanfattningsvis kan sägas att bergbultarna är helt fria från korrosionsangrepp i de delar som har varit ingjutna i berget. Detta förklaras med att bergbultarna har befunnit sig i en torr miljö. Om det förekommer vattenförande sprickor som är i kontakt med ingjutningsmaterialet, kan detta eventuellt medföra urlakning av ingjutningsmaterialet och kloridtilförsel kombinerad med ökad syretillgång. Korrosionsrisken ökar avsevärt i ett sådant fall (Sederholm et al. 2014).



**Figur 4-10.** Tvärsnitt av utborrad granitkärna med bergbult omkringgjuten av ingjutningsmaterial (Sederholm et al. 2014).

## 4.6 Undersökning av pH-värdet hos ingjutningsmaterial

Resultatet av mätningar av pH-värdet hos låg-pH-pastan och låg-pH-bruket visas i tabell 4-5. pH-värdet är något lägre för de provbitar som uttogs från berget i tunneltaket jämfört med de provbitar som uttogs i bergväggen. pH-värdet varierade mellan 11,3 och 11,9. Det lägre pH-värdet i ingjutningsmaterialet i bergets tunneltak beror inte på någon urlakning då undersökningarna visar att ingen sådan har förekommit utan kan troligtvis härledas till ett annorlunda förfarande vid ingjutningen (Sederholm et al. 2014). Observera att det pH-värde som bestämts i denna undersökning är det pH-värde som ges av betongens porlösning och är att jämföras med den pH-mätning som görs med porpressning enligt Alonso et al. (2012). Detta pH-värde får inte förväxlas med det pH-värde som omgivningen får vid urlakning av ingjutningsmaterial och betong. Det pH-värde som omgivningen får vid urlakning av ett cementbaserat material kommer att vara lägre än ingjutningsmaterialets och betongens pH-värde (Sederholm et al. 2014).

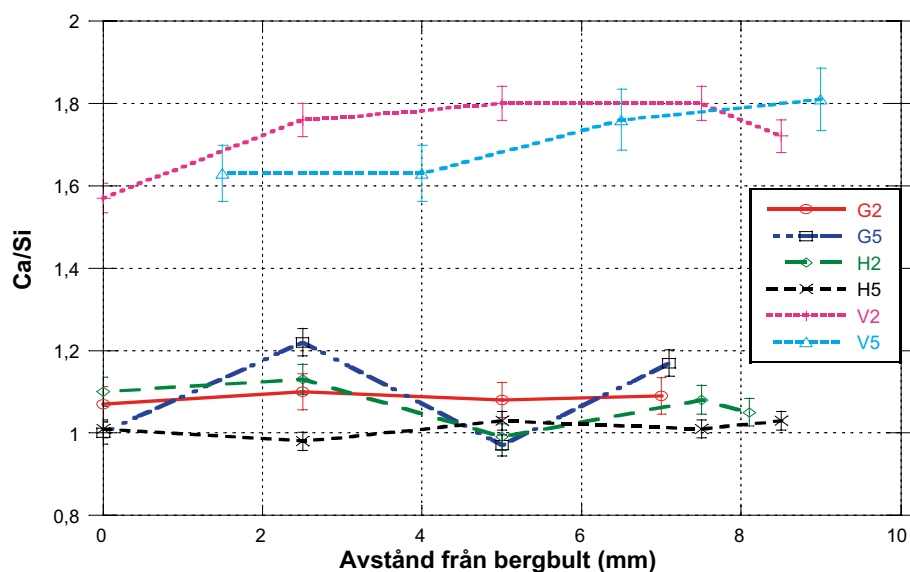
Tabell 4-5. Resultat av pH-mätning av ingjutningsmaterial (Sederholm et al. 2014).

Prov	Nummer	Avstånd från gränsyta betong/luft	pH
Låg-pH-pasta	2	1:a metern	11,8
HA 410 A02, bergvägg	3	2:a metern	11,8
	4	3:e metern	11,9
	5	4:e metern	11,8
Låg-pH-bruk	2	1:a metern	11,4
HA 410 A03, bergvägg	3	2:a metern	11,9
	4	3:e metern	11,7
	5	4:e metern	11,8
Låg-pH-bruk	1	1:a metern	11,4
HA 412 H02, tunneltak	2	2:a metern	11,3
	3	3:e metern	11,3
	4	4:e metern	11,3

## 4.7 Undersökning av Ca/Si-kvot hos ingjutningsmaterial

Ca/Si-kvoten för sex uttagna provbitar av ingjutningsmaterial från de tre utborrade borrhörnorna bestämdes med hjälp av SEM/EDS. Utförandet och resultaten redovisas utförligt i Sederholm et al. (2014). Figur 4-11 visar resultatet av dessa mätningar.

Resultatet tyder på att ingen urlakning har skett hos de två undersökta ingjutningsmaterialen efter fem års exponering i berget i Äspölaboratoriet. Detta beror på att det inte har funnits några vattenförande sprickor i närheten.



Figur 4-11. Resultat från mätningar Ca/Si-kvot som funktion av avstånd från bergbult (Sederholm et al. 2014).

## 5 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras av undersökning av ingjutna stålstänger i betongblock och ingjutna bergbultar efter fem års exponering i Äspölaboratoriet.

### **Korrosionsprovning i anläggningsbetong respektive låg-pH-betong:**

- Stålstänger ingjutna i båda betongtyperna *utan klorider* hade försumbara korrosionshastigheter och bedömdes vara i passivt tillstånd.
- Stålstänger ingjutna i låg-pH-betong *exponerade för kloridlösning* hade försumbara korrosionshastigheter och bedömdes vara i passivt tillstånd. Det bör dock påpekas att lokala korrosionsangrepp kunde observeras på stålstångernas ändtytor.
- Stålstänger ingjutna i anläggningsbetong *exponerade för kloridlösning* hade en korrosionshastighet av cirka 13  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter fem års exponering. Detta visar att kloridhalten har varit tillräcklig i närheten av stålstångerna för att korrosion ska starta.
- På stålstänger ingjutna i låg-pH-betong med *ingjutna klorider* uppmättes en korrosionshastighet av cirka 13  $\mu\text{m}/\text{år}$ . I anläggningsbetongen med *ingjutna klorider* uppmättes en korrosionshastighet av cirka 2,3  $\mu\text{m}/\text{år}$  hos de ingjutna stålstångerna.
- När korrosion har initierats på stål i låg-pH-betong kommer korrosionshastigheten att bli cirka 5–6 gånger högre jämfört med korrosionshastigheten i en anläggningsbetong med jämförbar kloridhalt.

### **Bergbultar ingjutna med låg-pH-pasta respektive låg-pH-bruk**

- Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på någon av de undersökta bergbultarna som varit ingjutna i låg-pH-pasta eller låg-pH-bruk. Detta beror på att det inte har funnits några vattenförande sprickor i berget i närheten.
- Inga krympsprickor kunde konstateras varken i låg-pH-pasta eller låg-pH-bruk.
- Vidhäftningen mellan bergbultarna och låg-pH-pasta respektive låg-pH-bruk var god.
- pH-värdet hos låg-pH-pasta och låg-pH-bruk varierade mellan 11,3 och 11,9.
- Undersökning av Ca/Si-kvoten visade att ingen urlakning hade skett hos låg-pH-pasta eller låg-pH-bruk efter fem års exponering.



## Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer).

**Alonso M C, García Calvo J L, Walker C, Naito M, Pettersson S, Puigdomenech I, Cuñado M A, Vuorio M, Weber H, Ueda H, Fujisaki K, 2012.** Development of an accurate pH measurement methodology for the pore fluids of low pH cementitious materials. SKB R-12-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Bodén A, Pettersson S, 2011.** Development of rock bolt grout and shotcrete for rock support and corrosion of steel in low-pH cementitious materials. SKB R-11-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Sederholm B, Ahlström J, Trägårdh J, 2014.** Korrosionsprovning av injekterade bergbultar och av provstänger av stål ingjutna i betongblock – resultat av fem års exponering i Äspötunneln. KIMAB-2014-118, Swerea KIMAB.

**Vogt C, 2009.** Corrosion of reinforcement in low pH concrete, samples for field exposure. Report 2009-91, CBI Betonginstitutet.