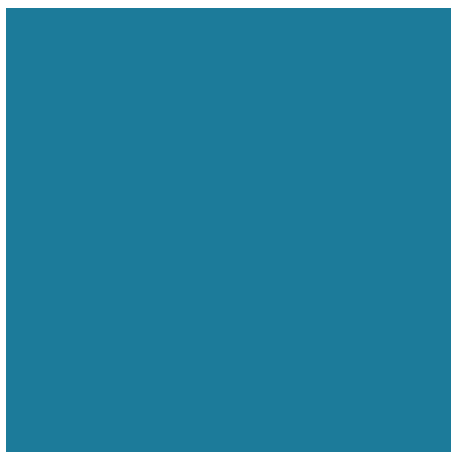
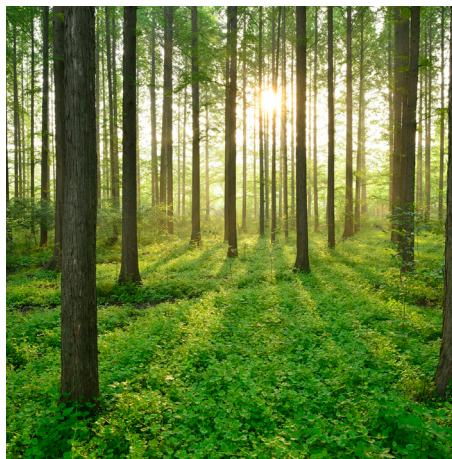


INSTALLATION AV KATODISKT SKYDD VID REPARATION AV BETONGKULVERT FÖR FJÄRRVÄRMELEDNINGAR

RAPPORT 2024:1060



Installation av katodiskt skydd vid reparation av betongkulvert för fjärrvärmeledningar

Teori och praktisk tillämpning

BROR SEDERHOLM

ISBN 978-91-89919-60-0 | © Energiforsk november 2024

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Detta projekt har undersökt att genom en optimal användning av katodiskt skydd med påtryckt ström hindra pågående armeringskorrosion hos betongkulvertar/kamrar. Genom att minska pågående armeringskorrosion kan antalet betongskador (delaminering) som orsakats av armeringskorrosion avsevärt minskas. Detta innebär att risken för att aggressivt grundvatten tränger in i betongkulvertar/kamrar och ger upphov till korrosionsangrepp på värmerören minskar vilket leder till mindre underhållskostnader och längre livslängd.

Öresundskraft började under sommaren 2022 installera Sveriges första katodiska skydd med påtryckt ström på betongkulvert med fjärrvärmerör av stål för att hindra framtida betongskador orsakad av armeringskorrosion. Installationen gjordes vid Furutorpsgatan i centrala Helsingborg. Inledningsvis gjordes en provinstallation där ett flertal sensorer användes för att kontinuerligt digitalt kontrollera skyddseffektivitet, ström- och spänningsutmatning och det katodisk skyddets inverkan på främmande konstruktioner (telekablar, vattenledningar och elkablar). Projektet har letts av Bror Sederholm från RISE.

Projektet har haft en referensgrupp bestående av Magnus Ohlsson, Öresundskraft AB (sammankallande), Mats Svarc, Mälarenergi AB, Emil Widgren, Finspångs Tekniska Verk AB, Gun Bjurling, Vattenfall AB, Mikael Karlsson, Energiforsk.

Projektet ingår i programmet FutureHeat vars långsiktiga mål är att bidra till visionen om ett hållbart uppvärmningssystem med framgångsrika företag som utnyttjar nya tekniska möjligheter och där de samhällsinvesteringar som gjorts i fjärrvärme- och fjärrkyla tas till vara på bästa sätt. Detta projekt ingår i programmets tredje etapp. Programmet leds av en styrgrupp bestående av Cecilia Bergquist (ordförande), Halmstad Energi och Miljö; Stefan Hjærtstam, Borås Energi och Miljö; Peter Mattsson, Södertörns Fjärrvärme; Svante Carlsson, Skellefteå Kraft; Stina Berg, Tekniska Verken i Linköping; Dado Hadziomerovic, Vattenfall; Fabian Levihn, Stockholm Exergi; Lisa Granström, Mälarenergi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft; Magnus Revland, Finspångs Tekniska Verk; Harald Andersson, E.ON Energiinfrastruktur; Linda Östberg, Karlstads Energi; Ulf Lindqvist, Jämtkraft; Patrik Grönbeck, Norrenergi; Erik Axelsson Göteborg Energi.

Mikael Karlsson, Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

I det svenska fjärrvärmenätet förekommer det olika typer av fjärrvärmeldningar. De äldsta fjärrvärmeledningarna består av stålrör med en omgivande kulvert av betong. Förläggningen av stålrören gjordes i betongkulvert för att efterlikna en inomhusmiljö där stålrören skulle ligga torrt och därmed skyddade från korrosion. Den torra inomhusmiljön har inte alltid kunnat upprätthållas då fukt trängt in genom skarvar eller i olika betongskador orsakade av armeringskorrosion. Betongkulvertar ligger ofta centralt placerade i städer, samt i många fall vid utmatningspunkter från fjärrvärmens produktionsanläggningar vilket gör att de ofta är ledningar med stora dimensioner.

Syftet med projektet har varit att vid reparation av markförlagda armerade betongkulvertar använda katodiskt skydd med påtryckt ström för att hindra pågående armeringskorrosion och därmed hindra uppkomna betongskador så att korrosivt vatten inte kan tränga igenom betongkulverten och ge upphov till korrosionsangrepp på stålrören.

Ägaren av den undersökta fjärrvärmeledningen är Öresundskraft AB och som installatör av det katodiska skyddet har varit 3C Corrosion Control Company AB.

Från genomförda undersökningar vid installation av det katodiska skyddet och mätningar av skyddsförmågan kan följande slutsatser och rekommendationer ges:

- De betongskador som uppstått i betongkulverten är orsakade av kloridinitierad armeringskorrosion. Vid betonggjutningen av betongkulvertens väggar användes kalciumklorid för att accelerera härdningen
- Manuella potentialmätningar utförda på den katodiska skyddade betongkulverten vid 24 mätpunkter utefter betongkulverten visade att skyddsförmågan är god i 17 mätpunkter och dålig i 7 mätpunkter enligt SS-EN 12969:2022.
- Övervakningssystemet som installerats för kontinuerliga mätningar av skyddsförmågan fungerar inte tillfredställande på grund av för låg ingångsimpedans (10 MΩ) hos mätutrustningen.
- Vid kontrollmätning av skyddsförmåga hos katodiskt skyddade betongkonstruktioner är det viktigt att mätutrustningen har en hög ingångsimpedans (> 1000 MΩ).
- Den ovanligt höga impedansen som uppmätts mellan stålarmering och referenselektroden är orsakade av både en uttorkning av referenselektrodens elektrolyt och en kraftig ökning av betongens resistivitet, vilket förfalskar mätvärdena vid en användning av en mätutrustning med för låg ingångsimpedans.

- De genomförda undersökningarna visade att enbart manuella mätningar på plats, som utförts med en mätutrustning med hög ingångsimpedans ($>1000\text{ M}\Omega$), kan användas för bestämning av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet.

Nyckelord

Fjärrvärmeledning, reparationsmetod, katodiskt skydd, armeringskorrosion, betongkulvert, skyddspotential, fyllnadsjord

Summary

In the Swedish district heating network, there are different types of district heating. The oldest district heating network consist of steel pipes with a surrounding concrete culvert. The laying of the steel pipes was done in concrete culverts to simulate an indoor environment where the steel pipes would lie dry and thus protected from corrosion. The dry indoor environment has not always been able to be maintained as moisture penetrated through joints or in various concrete damages caused by reinforcement corrosion. Concrete culverts are often centrally located in cities, and in many cases at output points from district heating production facilities, which means that they are often pipes with large dimensions.

The purpose of the project has been to use cathodic protection with pressurized current when repairing reinforced concrete culverts laid in the ground to prevent ongoing reinforcement corrosion and thereby prevent concrete damage so that corrosive water cannot penetrate the concrete culvert and cause corrosion attack on the steel pipes.

The owner of the investigated district heating network is Öresunds Kraft AB and the installer of the cathodic protection has been 3C Corrosion Control Company AB.

From the investigations carried out during the installation of the cathodic protection and measurements of the protective capacity, the following conclusions and recommendations can be made:

- The concrete damage that occurred in the concrete culvert is caused by chloride-initiated reinforcement corrosion. In the concrete casting of the concrete culvert walls, calcium chloride was used to accelerate the hardening
- Manual potential measurements performed on the cathodically protected concrete culvert at 24 measurement points along the concrete culvert showed that the protective ability is good in 17 measurement points and poor in 7 measurement points according to SS-EN 12969:2022.
- The monitoring system installed for continuous measurements of the protection capability does not work satisfactorily due to too low input impedance of the measuring equipment.
- When checking the protective capacity of cathodically protected concrete structures, it is important that the measuring equipment has an enough high input impedance.
- The unusually high impedance measured between the steel reinforcement and the reference electrodes is caused by both a drying out of the reference electrode's electrolyte and a sharp increase in the resistivity of the concrete, which falsifies the measured values when using a measuring equipment with too low an input impedance.

- The studies carried out showed that only manual measurements on site, performed with a measurement equipment with high input impedance ($>1000\text{ M}\Omega$), can be used to determine the protective capacity of the cathodic protection.

Key words

District heating network, repair method, cathodic protection, reinforcement corrosion, concrete culvert, protection potential, backfill soil

Innehåll

1	Extended Summary	10
1.1	Background	10
1.2	Performance	12
1.3	Results and discussion	18
1.4	conclusions and recommendations	21
2	Inledning och syfte	23
3	Armeringskorrosion	25
4	Katodiskt skydd av betongkonstruktioner	27
4.1	Principen för katodiskt skydd av betongkonstruktioner	27
4.2	Skyddskriterier för katodiskt skydd av betong-konstruktioner	29
4.3	Inverkan på betongen från katodiskt skydd	30
4.3.1	Gynnsamma effekter av den katodisk skyddsströmmen	30
4.3.2	Negativa effekter från den katodiska skyddsströmmen	30
5	Förundersökning av fjärrvärmeledning vid Furutorpsgatan	31
6	Installation av katodiskt skydd på betongkulvert vid Furutorpsgatan i Helsingborg	37
6.1	Utformning av det katodiska skyddet vid Furutorpsgatan	46
7	Mätningar av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet vid Furutorpsgatan	50
8	Resultat och diskussion	53
8.1	Resultat från mätningar av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet vid Furutorpsgatan	53
8.2	Resultat från mätningar av resistans mellan referenselektrod och inguten stålarmring	55
8.3	Resultat från mätningar av jordresistivitet vid katodiskt skyddad betongkulvert och resistivitet av reparationsbruk	57
9	Slutsatser och rekommendationer	58
10	Referenslista	59

1 Extended Summary

1.1 BACKGROUND

In the Swedish district heating network, there are different types of district heating. The oldest district heating network consist of bare steel pipes with a surrounding concrete culvert. The laying of the steel pipes was done in concrete culverts to simulate an indoor environment where the steel pipes would lie dry and thus protected from corrosion. The dry indoor environment has not always been able to be maintained as moisture penetrated through joints or in various concrete damages on the concrete culverts caused by reinforcement corrosion.

There is a great need to extend the life of the concrete culverts by preventing the occurrence of concrete damage (delamination) caused by reinforcement corrosion and so that corrosive ground water cannot leak into the concrete culverts and cause corrosion attack on the steel district heating pipes.

The purpose of the project has been to investigate the possibilities of using cathodic protection with pressurized current when repairing concrete culverts to prevent ongoing reinforcement corrosion and thereby prevent concrete damage so that aggressive water does not penetrate and cause corrosion attacks on the carbon steel heating pipes

In this project, which was part of Energiforsk's research program FutureHeat, stage 3, a test installation of cathodic protection with impressed current has been carried out on a concrete culvert to prevent future concrete damage caused by reinforcement corrosion on the concrete culvert. The owner of the examined district heating network is Öresundskraft AB and the installer of the cathodic protection has been 3C Corrosion Control Company AB.

A reinforcing steel that is well embedded in a concrete culvert is, due to the high alkalinity that prevails in the concrete (pH value > 12.5), in a so-called passive state. The corrosion rate is very low (< 1 µm/year), which means in practice that the corrosion is in principle negligible. When the passive layer of the cast-in steel reinforcement has broken down and the corrosion rate of the steel reinforcement increases greatly, this means that the formed corrosion products increase in

volume in the steel reinforcement, which leads to tensile stresses arising in the covering concrete layer, which means that concrete damage occurs, and concrete parts detach from the reinforcement.

Cathodic protection is an electrochemical protection method based on making the metal surface, in this case the steel, so electrically negative that the electrochemical corrosion reactions are prevented, by making all steel surfaces cathodic. What happens is that the corrosion potential of the steel is lowered by a few tenths of a volt so that the entire steel surface becomes cathodic. In this way, all anodic, corrosive parts on the steel surface are eliminated.

The potential lowering is achieved by feeding a weak direct current through the concrete to all steel surfaces to be protected. The current is output from special current electrodes (usually titanium mesh or titanium tape coated with a noble metal oxide, MMO = Metal Mixed Oxide), often called anodes, which have been cast into the concrete. When the direct current flows into the steel surfaces, they become cathodic and cannot rust. The cathodic protection current is generated by an external DC source which is usually a main connected rectifier and transformer unit. The anodes used for the current output in concrete are almost insoluble, which means that they have a very long service life. **Figure 1** shows the electrochemical reactions that normally occur on the steel surface and on the surface of the anode during current output in a protected reinforced concrete structure.

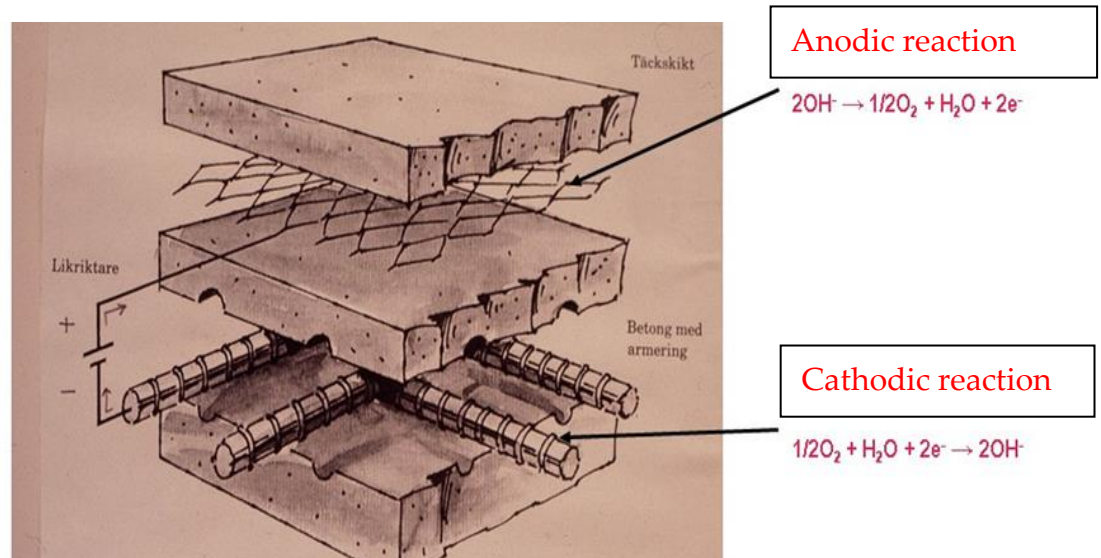


Figure 1. Electrochemical reactions in cathodic protection with impressed current.

The Swedish standard SS-EN 12696:2022 – Cathodic protection of concrete structures were followed during the installation of cathodic protection with pressurized current of concrete culvert to the district heating network in Furutorpsgatan in Helsingborg.

1.2 PERFORMANCE

Before the cathodic protection was installed on the concrete culvert at Furutorpsgatan, non-destructive examinations of the condition of the district heating network were carried out.

The equipment used was geo-radar where the measurements were carried out on the ground surface, **figure 2**. Measurements on the inside of the heat pipes of the material thickness were also determined with an acoustic measurement methodology (Delta-T), **figure 3**. The Delta-T method, in short, means that sound waves are sent into the material for determining the thickness of the heating pipes. The measured values are compared with the original material thickness of the heating pipes.



Figure 2. Measurements carried out with georadar technology (photo Öresundskraft).



Figure 3. Measurements performed with acoustic sound waves (Delta-T) (photo Öresundskraft).

The results from the measurements of the material thickness with the Delta-T method showed that the existing material thickness of the heating pipes was greater than 80% of the original material thickness. The results from the Delta-T measurements showed that no replacement of the heating pipes needed to be done.

The results of the measurements using GPR technology showed that 180 potential inaccuracies could be identified and of these 35 were investigated more thoroughly. From these investigations, the district heating fire was excavated at three different locations.

When excavating the concrete culvert for the district heating network at Furutorpsgatan, corrosion damage was found on the walls of the concrete foundation at two out of three excavated locations.



Figure 4. Reinforcement corrosion in concrete walls for concrete culverts, Furutorpsgatan in Helsingborg (photo Öresundskraft).

After the district heating network was excavated, **figure 5**, and the concrete culvert was high-pressure washed, **figure 6**, loose concrete was removed from the walls of the concrete culvert, **figure 7**. Afterwards, reference electrodes and cables were mounted in connection with repairing the concrete damage by spraying, **figures 8 and 9**. In the lower part of the wall/floor of the concrete culvert, the concrete culvert was reinforced with a concrete-reinforced weir, **figure 10**. In the weir, anode tape was cast instead of an anode net, **figure 11**. **Figure 12** shows the assembled anode net on repaired concrete. After the installation of the anode mesh, concrete is sprayed on the anode mesh.



Figure 5. High-pressure washing of concrete culverts (photo Öresundskraft).

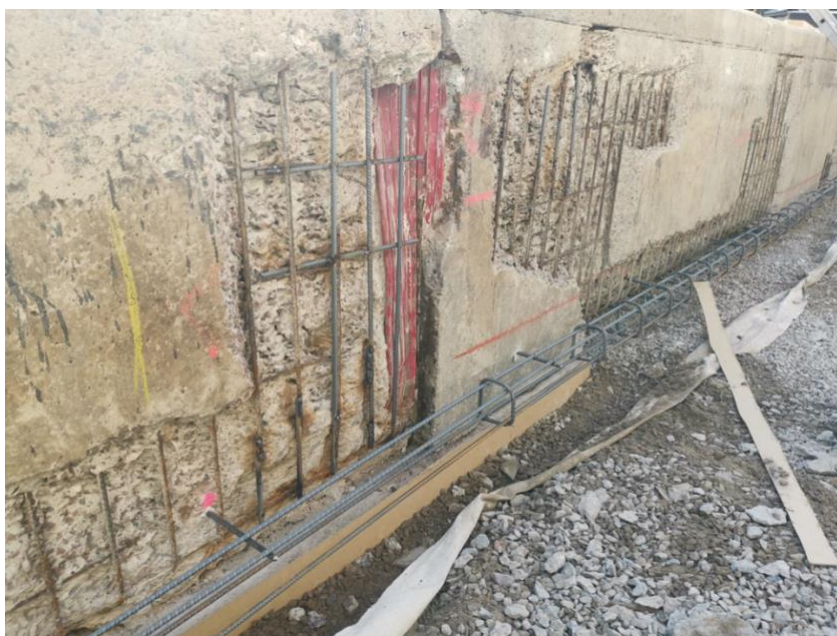


Figure 6. Removed loose concrete and new reinforcement for the manufacture of a weir (photo Öresundskraft).



Figure 7. Reference electrodes of the manganese dioxide type that are attached to the reinforcement before concreting (photo Öresundskraft)



Figure 8. Repair of concrete damage and injection of mounted reference electrodes and cable connections. (photo Öresundskraft)



).

Figure 9. Newly cast vat with cast-in anode band (photo Öresundskraft).



Figure 10. Spraying of anode mesh (photo Öresundskraft).

When checking the ability of the cathodic protection to protect the concrete culvert against continued reinforcement corrosion, manual control measurements were carried out on site. There was also a possibility to carry out continuous measurements by using an installed monitoring system via PC for the output of current and voltage and to carry out control measurements of the protective ability of the cathodic protection.

Impedance measurements between cast-in steel reinforcement and reference electrode showed a strong increase in impedance already after approx. one month of operation of the cathodic protection. This meant that the measuring equipment (input impedance 10 MΩ) which is normally used for continuous measurements of the protective capacity of concrete structures could not be used. In contrast, the manual measurements worked well using measurement equipment with a very high input impedance (≥ 1000 MΩ).

When assessing the protective capacity, the electrochemical potential of the steel reinforcement in the concrete culvert has been measured with 24 embedded reference electrodes of manganese dioxide (MnO₂) according to SS-EN 12696:2022 – Cathodic protection of concrete structures in atmosphere. The protective capacity of the cathodic protection is assessed according to **table 1**.

Table 1. Assessment of the protective capacity of the cathodic protection at Furutorpsgatan

Depolarization after 24 hours of shutdown (mV)	Assessment of the protective capacity according to RISE	Assessment of the protective capacity according to SS-EN 12696:2022
0-49	Bad	Bad
50-99	Less good	Bad
100-150	Good	Good
>150	Very good	Good

1.3 RESULTS AND DISCUSSION

The results from the potential measurements, **table 2**, showed that the protective capacity in May 2024, according to RISE, was very good at

9 measurement points, good at 9 measurement points, less good at 6 measurement points and poor at 1 measurement point. When assessed according to SS-EN 12696:2022, it appears that the protective ability is good at 17 measurement points and poor at 7 measurement points.

Table 2. The protective capacity of the cathodic protection installed on concrete culverts for district heating pipes at Furutorpsgatan in Helsingborg in May 2024. Location of reference electrodes can be seen in figures 20 and 21..

Rectifier No.	Reference electrode No.	Corrosions-potential mV (MnO ₂)	On-potentials mV (MnO ₂)	Off-potential (0, hours) mV (MnO ₂)	Off-potential after 24 hours depolarization mV (MnO ₂)	Depolarization after 24 hours off mV (MnO ₂)	Protective ability according to experiences of RISE	Protective ability according to SS-EN 12696:2022
1. Low south	SV 1	-725	-930	-810	-700	110	Good	Good
	SV 2	-620	-777	-685	-580	105	Good	Good
	SV 3	-594	-1170	-706	-480	226	Very good	Good
	SE 1	-800	-920	-856	-750	106	Good	Good
	SE 2	-824	-1040	-935	-810	125	Good	Good
	SE 3	-613	-1030	-590	-420	170	Very good	Good
	SE 7 (*)	+900	+405	+664	+900	236	Very good	Good
2. High South	SV 4	-595	-1100	-666	-500	166	Very good	Good
	SV 5	-576	-990	-598	-444	145	Good	Good
	SV 6	-555	-920	-626	-440	186	Very good	Good
	SE 4	-620	-1100	-540	-470	70	Less good	Bad
	SE 5	-610	-1130	-630	-500	130	Good	Good
	SE 6	-545	-1090	-567	-460	107	Good	Good
3. Low North	NV 1	-685	-800	-715	-660	55	Less good	Bad
	NV 2	-680	-880	-753	-670	83	Less good	Bad
	NV 3	-600	-1130	-818	-560	258	Very good	Good
	NE 1	-685	-790	-670	-600	70	Less good	Bad
	NE 2	-750	-1000	-842	-740	102	Good	Good
	NE 3	-625	-1150	-813	-580	233	Very good	Good
4. High North	NV 4	-590	-970	-712	-530	182	Very good	Good
	NV 5	-590	-980	-712	-540	172	Very good	Good
	NV 6	-535	-870	-592	-480	112	Good	Good
	NE 4	-590	-890	-510	-450	60	Less good	Bad
	NE 5	-560	-900	-400	-370	30	Bad	Bad
	NE 6	-580	-800	-450	-400	50	Less good	Bad

Experience from investigations of cathodically protected edge girders on the Öland Bridge showed that only a potential decay of 20 mV after turning off the cathodic protection decreased the corrosion rate by 79% compared to unprotected steel reinforcement.

It is also clear from the results from the potential measurements that the IR drop of the concrete culvert is much higher than previously measured on cathodically protected concrete structures such as bridge piers, edge beams on bridges and parking garages (pillars and floors).

Table 3 shows results from two different measurements of the output current and voltage of the rectifiers. The rectifier is set to a constant current output with a varying voltage output dependent on the resistance in the circuit.

Table 3. Measurement results from the output voltage and current of the rectifiers, May 2024.

Rectifier No.	Output voltage from rectifier (Volt)	Output current from rectifier (Ampere)
1. Low, south	1,5	0,80
2. High, south	3,4	0,98
3. Low, north	1,6	0,80
4. High, north	3,4	0,99

Table 4 shows resistance measurements between cast-in reference electrodes and cast-in steel reinforcement carried out from the time the cathodic protection was commissioned (September 2022) until May 8, 2024. Measurement was carried out using an LCR-meter.

Table 4. Shows resistance measurements between cast-in reference electrodes and cast-in steel reinforcement carried out from the time the cathodic protection was commissioned (September 2022) until May 8, 2024.

Rectifier No.	Referens-elektrode No.	Resistance between MnO ₂ -electrode and rebars (2022-09-22) kΩ	Resistance between MnO ₂ -electrode and rebars (2023-01-19) kΩ	Resistance between MnO ₂ -electrode and rebars (2023-09-12) kΩ	Resistance between MnO ₂ -electrode and rebars (2024-03-12) kΩ	Resistance between MnO ₂ -electrode and rebars (2024-05-08) kΩ
1, Low, south	SV 1	83	804	800	1000	1800
	SV 2	18	54	66	65	58
	SV 3	76	471	400	17	18
	SE 1	76	970	1200	2000	2000
	SE 2	60	191	200	266	280
	SE 3	79	783	500	11	12
	SE 7 (*)	0,065	0,0067	60	0,1	0,09
2, High, south	SV 4	79	596	500	1200	1000
	SV 5	63	180	200	500	580
	SV 6	83	555	600	1200	1200
	SE 4	85	1100	800	17	19
	SE 5	81	932	900	200	230
	SE 6	88	1158	1400	700	600
3, Low, north	NV 1	65	2500	900	1100	900
	NV 2	82	4500	500	1300	1100
	NV 3	84	1036	700	1100	1300
	NE 1	64	355	600	1800	950
	NE 2	75	512	400	600	1000
4, High, north	NE 3	75	651	600	1000	665
	NV 4	85	3589	1700	1400	900
	NV 5	78	5119	1000	1100	900
	NV 6	82	5012	1000	1000	1500
	NE 4	80	1125	1300	1200	3000
	NE 5	75	-	1000	1300	2300
	NE 6	81	-	1400	2000	1500

The likely reason for the sharp increase in resistance between cast-in reinforcement and the cast-in reference electrodes is that both the concrete and the electrolyte of the reference electrodes have dried up due to the increased temperature in the concrete obtained from the heated water in the district heating pipes.

During 2024, four measuring electrodes were installed for measuring the resistivity of the backfill soil on the outside of the cathodically protected concrete culvert. The distance between the electrodes is 1 meter between the electrodes. The measurement is performed according to Wenner's 4-electrode method.

Results from the measurements showed that the backfill soil's resistivity has decreased from the start of March 1, 2024 to May 17, 2024, **Table 5**.

Table 5. Results from measurements of the backfill soil resistivity using Wenner's 4-electrode method.

Resistivity in soil Ωm (2024-03-01)	Resistivity in soil Ωm (2024-03-05)	Resistivity in soil Ωm (2024-04-08)	Resistivity in soil Ωm (2024-05-17)
548	366	223	214

1.4 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

From the investigations carried out during the installation of the cathodic protection and measurements of the protective capacity, the following conclusions and recommendations can be made:

- The concrete damage that occurred in the concrete culvert is caused by chloride-initiated reinforcement corrosion. In the concrete casting of the concrete culvert walls, calcium chloride was used to accelerate the hardening
- Manual potential measurements performed on the cathodically protected concrete culvert at 24 measurement points along the concrete culvert showed that the protective ability is good in 17

measurement points and poor in 7 measurement points according to SS-EN 12969:2022.

- The monitoring system installed for continuous measurements of the protection capability does not work satisfactorily due to too low input impedance (10 MΩ) of the measuring equipment.
- When checking the protective capacity of cathodically protected concrete structures, it is important that the measuring equipment has a enough input impedance.
- The unusually high impedance measured between steel reinforcement and the reference electrodes is caused by both a drying out of the reference electrode's electrolyte and a sharp increase in the resistivity of the concrete, which falsifies the measured values when using a low input impedance measuring equipment.
- The studies carried out showed that only manual measurements on site, performed with a measurement equipment with high input impedance (>1000 MΩ), can be used to determine the protective capacity of the cathodic protection.

2 Inledning och syfte

I det svenska fjärrvärmenätet förekommer det olika typer av fjärrvärmeldningar. De äldsta fjärrvärmeledningarna består av nakna stålrör med en omgivande kulvert av betong. Förläggningen av stålrören gjordes i betongkulvert för att efterlikna en inomhusmiljö där stålrören skulle ligga torrt och därmed skyddade från korrosion. Den torra inomhusmiljön har inte alltid kunnat upprätthållas då fukt trängt in genom skarvar eller i olika betongskador på betongkulvertarna som orsakats av armeringskorrosion.

Det finns ett stort behov av att förlänga betongkulvertarnas livslängd genom att hindra uppkomsten av betongskador (delaminering) som orsakats av armeringskorrosion och så att inte korrosivt markvatten kan läcka in i betongkulverten och ge upphov till korrosionsangrepp på fjärrvärmerören av stål.

Syftet med projektet har varit att undersöka möjligheterna att använda katodiskt skydd med påtryckt ström vid reparation av betongkulvert för att hindra pågående armeringskorrosion och därmed hindra betongskador så att aggressivt vatten inte tränger in och ger upphov korrosionsangrepp på värmerören av kolstål

I detta projekt som ingått i Energiforsks forskningsprogram FutureHeat, etapp 3, har en provinstallation av katodiskt skydd med påtryckt ström utförts på en betongkulvert för att hindra framtida betongskador orsakade av armeringskorrosion på betongkulverten. Ägaren av den undersökta fjärrvärmeledningen är Öresundskraft AB och som installatör av det katodiska skyddet har varit 3C Corrosion Control Company AB.

Projektet påbörjades i september 2022 och avslutades den 30 september 2024.

Den till projektet knutna referensgruppen har följande medlemmar ingått:

Gun Bjurling, Vattenfall AB
Mikael Karlsson, Energiforsk
Johnny Nyberg 3C Corrosion Control Company AB
Magnus Ohlsson (ordf.), Öresundskraft AB

Bror Sederholm (projektledare), RISE AB
Mats Svarc, Mälarenergi AB
Emil Widgren, Finspångs tekniska verk AB

Ett stort tack riktas speciellt till Magnus Ohlsson, Öresundskraft AB
och Johnny Nyberg, 3C AB som har varit till stor hjälp för
genomförandet av projektet.

3 Armeringskorrosion

Ett armeringsstål, som är väl ingjutet i en betongkulvert befinner sig på grund av den höga alkaliniteten som råder i betongen (pH-värde > 12,5) i ett sk passivt tillstånd. Korrosionshastigheten är mycket låg (< 1 µm/år) vilket innebär i praktiken att korrosionen är i princip försumbar. När passivskiktet hos den ingjutna stålarmeringen har brutits ned och korrosionshastigheten hos stålarmeringen ökar kraftigt, innebär detta att det bildade korrosions-produkterna ökar i volym hos stålarmeringen vilket leder till att dragspänningar uppstår i det täckande betongskiktet vilket innebär att betongskador uppkommer och betongdelar lossnar från armeringen.

Det passiva tillståndet hos stålarmeringen kan brytas ned av två orsaker:

- Klorider (Cl⁻) från t ex en kloridhaltig jord eller från tölsalter som är i kontakt med en betongkonstruktion kommer att gradvis att tränga in i betongen. Kloridkoncentrationen kommer med tiden att öka och nå fram till den passiverade stålarmeringen. När kloridkoncentrationen passerar ett visst värde (tröskelvärde, 0,4 % Cl⁻ per cementvikt) vid stålytan kommer stålets passiverande skikt att brytas ned och stålarmeringen börjar att rosta. Under ogynnsamma betingelser vid den ingjutna stålarmeringen (hög fukthalt, hög kloridhalt samt tillgång till syre) så kan korrosionshastigheten bli mycket hög på armeringsstålet. Korrosionsangreppen vid kloridinitierad korrosion är nästan alltid i formen av lokal korrosion, sk gropfrätning. Spännstål är särskilt känsliga för kloridinitierad korrosion. Ett specialfall är armeringskorrosion orsakad av ingjutna kloridhaltiga betongtillsatsmedel (t ex kalciumklorid, CaCl₂). Kalciumklorid i betong användes förr i tiden för att accelerera härdningstiden (vanligt förekommande när gjutning skedde på vintern).
- Koldioxid (CO₂) från omgivande luft/jord tränger långsamt in i betongen och reagerar kemiskt med betongens cement ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) vilket innebär att betongens pH-värde kommer att sjunka. Denna sk

karbonatiseringen tränger in med relativt väldefinierad front som åtskiljer en yttre zon av karbonatiserad betong med ett pH-värde < 9 från en inre zon av okarbonatiserad med ett bibehållet högt pH-värde (pH-värde $> 12,5$). När karbonatiseringsfronten når armeringsstålet aktiveras detta på grund av det låga pH-värdet och stålet börjar rosta med en hastighet som i första hand bestäms av hur snabbt syre (O_2) kan tränga in. Under ogynnsamma betingelser med avseende på fukt och syretillgång är korrosionshastigheten mångdubbelt högre än för vanlig atmosfärisk korrosion av oingjutet stål. Den höga korrosionshastigheten ökas ytterligare på grund av de stora skillnader av pH-värdet som förekommer i en delvis karbonatiserad betong.

Om betongen är karbonatiserad och innehåller samtidigt höga kloridhalter ökar risken armeringskorrosion betydligt jämfört med om betongen enbart är karbonatiserad eller enbart innehåller höga kloridhalter.

4 Katodiskt skydd av betongkonstruktioner

I detta kapitel beskrivs översiktligt hur katodiskt korrosionsskydd med påtryckt ström används vid skydd av armeringsstål i betongkonstruktioner. Katodiskt skydd i betong behandlas mera i detalj i handboken – *Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner* (Ref. 1) och i den svenska standarden ISO SS-EN 12696 – *Katodiskt skydd av betongkonstruktioner* (2022) (Ref 2)

Katodiskt skydd med påtryckt ström används sedan många decennier i jord, vatten, betong och i vissa kemikalier för skydd av konstruktioner av skilda material, såsom gjutjärn, stål, förzinkat stål, aluminium, bly, rostfritt stål och kopparlegeringar (Ref 3-5).

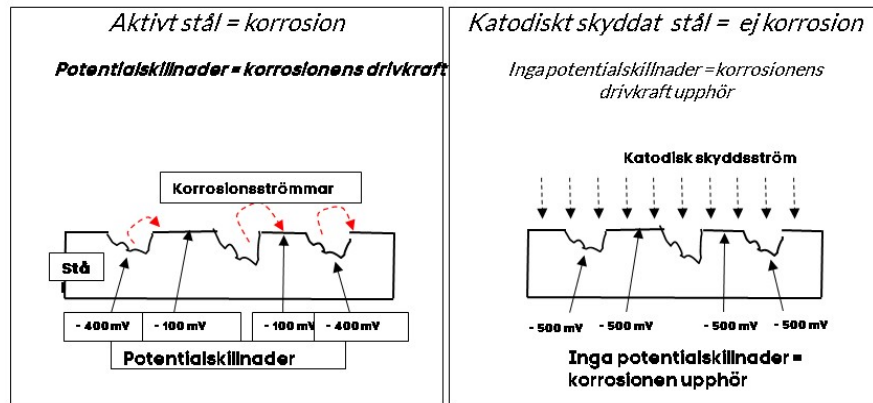
Sedan 1970-talet har armerade betongkonstruktioner blivit ett viktigt tillämpningsområde för skyddsmetoden. Metoden utvecklades under 1970-talet i USA och Kanada för användning i betong.

I Sverige gjordes i början av 1990-talet de första installationerna av katodiskt skydd med påtryckt ström i betongkonstruktioner såsom betongbroar, betongkajer, vattentorn och parkeringsgarage (Ref 6).

Den första betongkulverten till fjärrvärmeledningar som installerats med katodiskt skydd med påtryckt ström utfördes i centrala Helsingborg 2022.

4.1 PRINCIPEN FÖR KATODISKT SKYDD AV BETONGKONSTRUKTIONER

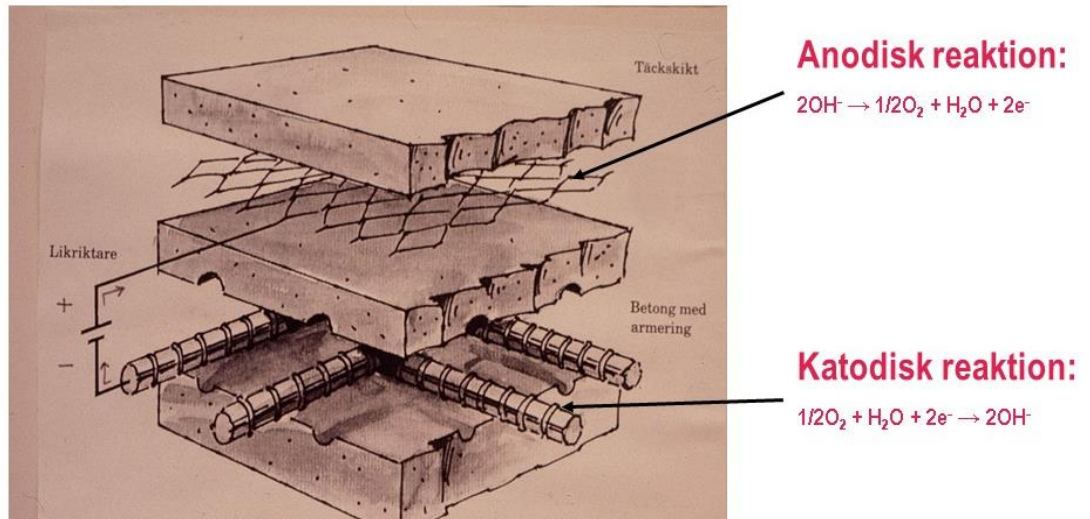
Katodiskt skydd är en elektrokemisk skyddsmetod som bygger på att man gör metallytan, i detta fall stålet, så elektriskt negativt att de elektrokemiska korrosionsreaktionerna hindras, genom att alla stålytor blir katodiska. Vad som sker är att stålets korrosionspotential sänks några tiondels volt så att hela stålytan blir katodisk. På det sättet elimineras alla anodiska, korroderande, partier på stålytan, **figur 1**.



Figur 1. Schematisk beskrivning av det katodiska skyddets funktion allmänt

Potentialsänkningen åstadkoms genom att mata en svag likström genom betongen till alla ståltytor som ska skyddas. Strömmen matas ut från speciella strömelektroder (oftast titannät eller titanband belagt med en ädelmetalloxid, MMO = Metal Mixed Oxide), ofta kallade anoder som har gjutits in i betongen. När likströmmen flyter in i ståltytorna blir de katodiska och kan inte rosta. Den katodiska skyddsströmmen alstras av en yttre likströmskälla som vanligen är en nätansluten likriktar- och transformatorenhet. Anoderna som används för strömutmatningen i betong är i närmaste olösliga, vilket innebär att de har en mycket lång livslängd.

Anoderna och stålet som ska skyddas i betongkonstruktionen ansluts med elkabel till likriktaren. Anoderna kopplas till likriktarnas pluspol och armeringen kopplas till likriktarnas minuspol. I **figur 2** visas de elektrokemiska reaktioner som sker normalt på ståltytan och på anodens yta vid strömutmatning vid en skyddad armerad betongkonstruktion.



Figur 2. Elektrokemiska reaktioner vid katodiskt skydd med påtryckt ström.

4.2 SKYDDSKRITERIER FÖR KATODISKT SKYDD AV BETONG-KONSTRUKTIONER

Vid katodiskt skydd av betongkonstruktioner i jord eller vatten tillämpas nästan uteslutande ett fast potentialvärde hos stålets elektrodpotential, så kallad skyddspotential. Vid katodiskt skydd av betongkonstruktioner som exponeras i luft eller i välluftade jordar används normalt skyddskriteriet "potentialavklingning". Potentialavklingningsmetoden innebär att man låter skyddet vara tillslaget en viss tid, exempelvis en månad efter start av det katodiska skyddet, därefter stängs det katodiska skyddet av i 24 timmar och efter 24-timmars frånslag ska den elektrokemiska potentialen öka med minst 100 mV i positiv riktning.

Skyddspotentialen och potentialavklingningen mäts med ingjutna referenselektroder av typen MnO_2 eller Ag/AgCl lämplig för betongkonstruktioner. Vilken skyddspotential som ska tillämpas för skydd i betongkonstruktioner i betong i jord/vatten eller luft anges mer detaljerat i den svenska standarden SS-EN 12696:2022 (Ref 2).

4.3 INVERKAN PÅ BETONGEN FRÅN KATODISKT SKYDD

4.3.1 Gynnsamma effekter av den katodisk skyddsströmmen

Utöver att den katodisk skyddsströmmen verkar direkt korrosionsskyddande har strömmen också några indirekta gynnsamma effekter såsom att kloridjonerna dras bort från armeringen till anoden och att vid stålarmeringen bildas hydroxidjoner som sänker korrosionshastigheten på stålytan.

4.3.2 Negativa effekter från den katodiska skyddsströmmen

En negativ effekt av skyddsströmmen är att det sker en mycket långsam transport av vattenmolekyler från anoden mot stålarmeringen, så kallad elektroosmos. I inomhuskonstruktioner i torr luft och betongkonstruktioner som är utsatta för hög temperatur t ex betongkulvertar, kan detta så småningom leda till en upptorkning av betongen och av elektrolyten i de ingjutna referenselektroderna. Denna upptorkning kan innebära en kraftig ökning av resistansen i både betongen och i de ingjutna referenselektroderna. Detta innebär att den ökade resistansen hos betongen och referenselektroderna kan innebära att en mätutrustning med en hög ingångsimpedans måste användas vid mätning av skyddspotentialer.

Risken för läckströmskorrosion vid katodiskt skydd av betongkonstruktioner är mycket liten. Det beror på att strömtätheten på anoden och skyddsobjektet är flera 10-potenser lägre vid skydd i betong än vid skydd i jord och vatten. Dessutom är avståndet mellan anod och armering väldigt kort i betong vilket innebär en minskad risk för läckströmskorrosion jämfört med anoderna placerade i jord och vatten som ligger på ett långt avstånd från skyddsobjektet.

5 Förundersökning av fjärrvärmeledning vid Furutorpsgatan

Innan det katodiska skyddet installerades på betongkulverten vid Furutorpsgatan gjordes oförstörande undersökningar av fjärrvärmeledningens tillstånd.

Den utrustning som användes var georadar där mätningarna genomfördes uppe på markytan för att undersöka omfattningen av betongskador hos betongkulverten, **figur 3**. Även mätningar på värmerörens insida av medelgodstjockleken bestämdes med en akustisk mätmetodik (Delta-T), **figur 4**. Delta-T metoden innebär i korthet att ljudvågor skickas in i godset för bestämning av värmerörens medelgodstjocklek. De uppmätta värdena jämförs med värmerörens ursprunglig godstjocklek.



Figur 3. Mätningar utförda med georadarteknik (foto Öresundskraft)



Figur 4. Mätningar utförda med akustiska ljudvågor (Delta-T) (foto Öresundskraft)

Resultaten från mätningarna av medelgodstjockleken med Delta-T metod visade att värmerörens befintliga godstjocklek var större än 80 % av ursprunglig godstjockleken. Resultaten från Delta-T-mätningarna visade att inget utbyte av värmerören behövdes göras.

Resultaten från mätningarna med georadarteknik visade att 180 potentiella felaktigheter (betongskador) kunde identifieras och av dessa undersöktes 35 mer noggrant. Från dessa undersökningar grävdes fjärrvärmelningen fram vid tre olika ställen.

Vid framgrävning av betongkulverten till fjärrvärmeledningen vid Furutorpsgatan konstaterades korrosionsskador på betongfundamentets väggar vid två av tre framgrävda ställen, **figur 5** och **6**.



Figur 5. Armeringskorrosion i betongväggar till betongkulvert, Furutorpsgatan i Helsingborg (foto Öresundskraft).



Figur 6. Armeringskorrosion på betongväggar till betongkulvert, Furutorpsgatan i Helsingborg (foto, Öresundskraft).

Som framgår av **figur 5** och **6** så har de bildade korrosionsprodukterna kraftigt försämrat betongens vidhäftning till stålarmeringen. Armeringens tvärsnittsytta har även lokalt minskat kraftigt på grund av korrosion.

Undersökningar utförda av Nordisk Broinspektion AB visade att betongkulvertens väggar hade lokalt höga kloridhalter upp till 2 % klorider per betongvikt. Det fanns dock även ytor där kloridhalten var betydligt lägre (0,2 % per betongvikt). Även uttagna betongborrkärnor med rostig armering analyserades med avseende på kloridhalt och tryckhållfasthet.

En förklaring till de höga kloridhalterna som förekommer på de platsgjutna betongväggarna skulle kunna vara att vid platsgjutning av betongkulvertens golv och väggar användes kloridhaltiga betongtillsatsmedel (t ex kalciumklorid, CaCl_2). Kalciumklorid i betong användes förr i tiden för att accelerera härdningstiden (vanligt förekommande när gjutning skedde på vintern).

För att fastställa fyllnadsjordens resistivitet runt betongkulverten utfördes resistivitetsmätningar på plats av 3C AB enligt Wenners 4-pinmetod. Avståndet mellan mätelektroderna är ca 1 meter, **figur 7**. Även jordprover togs ut för analys av kloridhalt. Detta utfördes på RISE laboratorium i Kista, Stockholm

Från resultaten av mätningar utförda av RISE framgick det att kloridhalten i fyllnadsjorden runt betongkulverten är mycket låg (< 16 mg/l), **tabell 1**.

Fyllnadsjordens resistivitet är hög vilket indikerar på att klorid- och fukthalten i fyllnadsjorden är låg.

Tabell 1. Undersökningar av jordprover från Furutorpsgatan 36-38.

Märkning prov	pH-värde	Kloridhalt (mg/l)	Konduktivitet (mSm)	Resistivitet Wenners-4-pin (Ω m)	Resistivitet, Soil-box, Ω m
1	8,2	12	9,3	108	212
2	9,0	16	19,4	52	-
3	9,1	11	5,9	169	600
4	8,9	3	5,5	182	542

När det gäller betongkulvertens lock framgick det av den okulära inspektionen att inga betongskador, orsakade av armeringskorrosion, har kunnat konstaterats på betonglocken. Betonglocken, som är framställda på fabrik, har inga tillsatser av kalciumklorid använts.



Figur 7. Mätning av jordresistivitet med Wenners 4-pinmetod (Furutorpsgatan)(foto, 3C AB)

Från resultaten av förundersökningarna av betongkulverten och värmerörens korrosionsstatus vid Furutorpsgatan och en jämförelse av kostnaderna för att ersätta den gamla fjärrvärmeledningen med en ny ledning på en sträcka av ca 500 meter beslutades det att göra en provinstallation av katodiskt skydd med påtryckt ström för att hindra fortsatt armeringskorrosion. Provinstallationens längd av fjärrvärmeledningen var ca 45 meter av den totala längden av ca 500 meter.

6 Installation av katodiskt skydd på betongkulvert vid Furutorpsgatan i Helsingborg

Vid installationen av katodiskt skydd med påtryckt ström av betongkulvert till fjärrvärmeledningarna i Furutorpsgatan i Helsingborg följdes den svenska standarden SS-EN 12696:2022 – Katodiskt skydd av betongkonstruktioner (Ref 1).

Nedan ges en kort sammanställning av vilka arbetsmoment som ingick före, vid och efter installationen av det katodiska skyddet av betongkulverten med påtryckt ström vid Furutorpsgatan:

Förundersökningar i samband med det katodiska skyddet

Betongytor i de områden där katodiskt skydd kommer att installeras ska okulärt inspekteras med avseende på synliga skador, rostutfällningar, sprickor, spjälkning, bomknackning.

Armeringen och närliggande metallkonstruktioner elektriska kontinuitet ska bestämmas.

Det täckande betongskiktet ska vara minst 15 mm tjock efter vattenbilning.

Projektering av katodiskt skydd

Bygghandlingar ska upprättas som visar hur det katodiska skyddet ska monteras och kopplas in för att få bästa funktion.

Efter utfört arbetet ska relationsritningar upprättas i direkt anslutning till avslutat arbete.

Montering av katod och mätanslutningar

I varje skyddszon ska flera anslutningar till armeringen göras. Detta görs antingen med en skruvad eller påsvetsad förbindelse av rostfri stålqualität EN 1.4404 till armering. Kablar monteras med kabelskor, brickor och mutter.

Elektrisk kontakt till främmande metalledar

Metalledar som ligger i närheten av den skyddade armeringen och som inte har kontakt med armeringen ska elektriskt förbindas med den skyddade armeringen för att undvika läckströmskorrosion.

Installation av referenselektroder

För att övervaka det katodiska skyddet ska referenselektroder som passar för konstruktionen användas. Kontroll och bedömning av skyddsförmågan görs enligt SS-EN 12696:2022 (**Ref 2**). Efter ingjutning kontrolleras armeringspotential genom att mäta med ett instrument anpassat för betongkulverten.

Montering av nätanod med strömtilledare

För att undvika kortslutning och säkerställa en jämn strömfördelning ska avståndet till armeringen vara minst 15 mm. Efter montage av nätanod ska kontroll utföras med avseende på kortslutning.

Dragning och inkoppling av kablar

Kablar från anod-, katod- och mätanslutning samt referenselektroder ska var noggrant märkta och dras på lämpligt sätt till mät- och likriktarskåp.

Montering av kopplingsskåp

Kopplingsskåp för kablar från anodzoner på betongkulvertar monteras på lämpliga ställen.

Dragning och montage av kablar från kopplingsdosor till kopplingsskåpen och skåp för likriktare

Kablar från kopplingsdosor dras fram till kopplingsskåpen och skåp för likriktare via kabelrör av plast nedgrävda i mark. Samtliga kablar till det katodiska skyddet ska vara samlade och märkta enligt installatörens dokumentation.

Installation och montage av kopplingsskåpen

Kopplingsskåpen ska monteras på en lämplig plats i skåp för likriktar. Skåpen ska vara uppmärkta med "*Mät och kopplingsskåp katodiskt skydd*".

Installation och montage av skåpen med likriktare

Likriktarna monteras i ett skåp i vid ett lämpligt ställe.

Driftsättning av anläggning

För en nygjuten betongkonstruktion med katodiska skydd tas det katodiska skyddet i drift efter ca 28 dygns härdning av betongen vid 20 °C. Vid en pågjutning kan det katodiska skyddet startas redan efter 14 dygns härdning av betongen vid 20 °C.

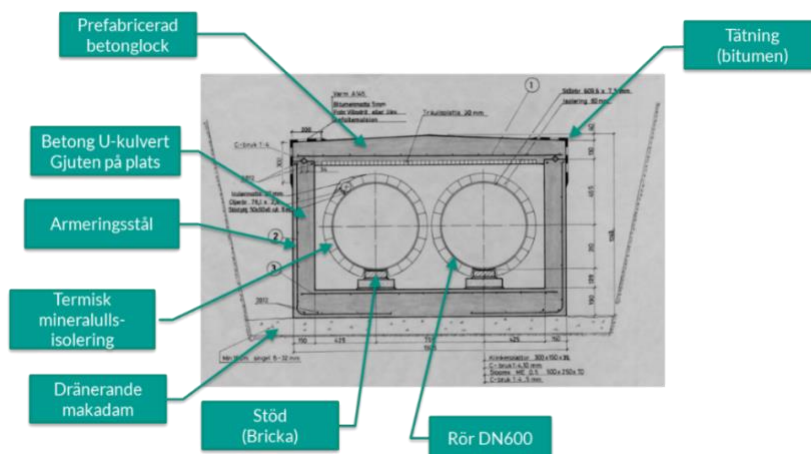
Vid start av det katodiska skyddet matas inledningsvis ca 10 till 20 % av beräknad strömutmatning, se avsnitt 8.3 i den svenska standarden SS-EN 12696:2022.

Dokumentation av hela installationen

Fullständig dokumentation på hela installationen med en lättfattlig manual ska levereras i direkt anslutning till att arbetet färdigställs.

Fjärrvärmeledning vid Furutorpsgatan som togs i drift 1976 utförs en reparation på ca 500 meter ledningen. Under 2022 har katodiskt skydd med påtryckt installerats på en provsträcka av ca 45 meter.

I **figur 8** visas en ritning av ett tvärsnitt av fjärrvärmeledningen vid Furutorpsgatan innan installation av katodiskt skydd har utförts.



Figur 8. Tvärsnitt av fjärrvärmledning vid Furutorpsgratan.

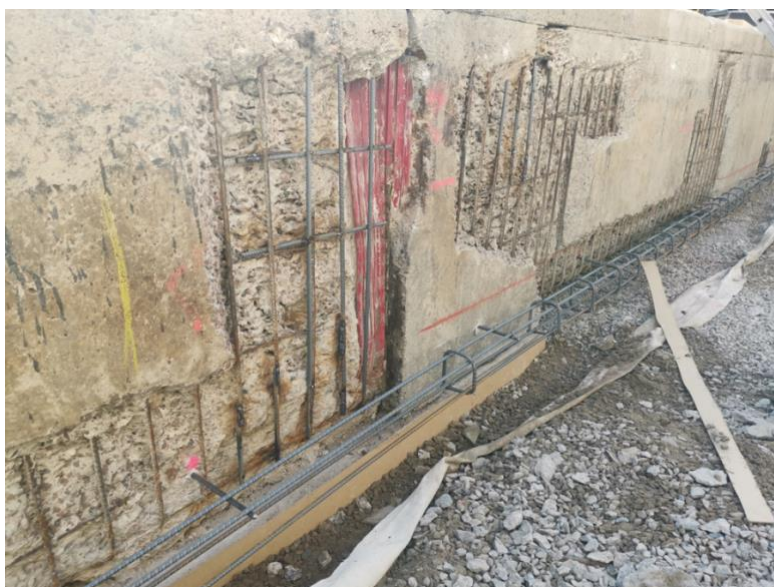
Efter att fjärrvärmeledningen schaktats fram, **figur 9**, och betongkulverten högtrycktvättats, **figur 10**, bilades löst sittande betong bort från betongkulvertens väggar, **figur 11**. Därefter monterades referenselektroder och kablar i samband med att betongskadorna lagades genom sprutning, **figur 12** och **13**. I den nedre delen av betongkulvertens vägg/golv förstärktes betongkulverten med en betongarmerad vot, **figur 14**. I voten gjöts anodband in i stället för ett anodnät, **figur 14**. I **figur 15** visas monterad anodnät på lagad betong. Efter monteringen av anodnätet betongsprutas anodnätet.



Figur 9. Framschaktad betongkulvert med betongskador orsakad av armeringskorrosion (foto Öresundskraft)



Figur 10. Högtryckstvätt av betongkulvert (foto Öresundskraft).



Figur 11. Bortbilad löst sittande betong samt ny armering för tillverkning av en vot (foto Öresundskraft).



Figur 12. Referenselektroder av mangandioxid som monteras fast på armeringen före betonglagning (foto Öresundskraft)



Figur 13., Lagning av betongskador och insprutning av monterade referenselektroder och kabelanslutningar. (foto Öresundskraft).



Figur 14. Nygjuten vot med ingjutet anodband (foto Öresundskraft).



Figur 15. Påsprutning av anodnät (foto Öresundskraft).

Vid dialationsfogarna mellan skarvarna hos olika betongkulverten skapades elektriskt kontinuitet genom att svetsa ihop armeringen med

ett vinkeljärn, **figur 16**. Även anodnäten punktsvetsades ihop med titanband i skarven mellan olika betongkulvertar, **figur 17**.



Figur 16. Påsvetsade bygeljärn för att erhålla elektrisk kontinuitet mellan stålarmeringen hos voten.



Figur 17. I hopskarvning av titannät mellan olika betongkulvertar (foto Öresundskraft).

Samtliga elkablar från referenselektroder, anodnät, anodband och anslutningar till stålarmeringen dras i kabelrör fram till ett mätskåp där likriktarna för det katodiska skyddet är placerade. Även övervakningssystemet är placerat i mätskåp, **figur 18**.



Figur 18. Plaströr för elkablar till det katodiska skyddet och mätskåp för övervakning av det katodiska skyddet (foto Öresundskraft).

Innan betongkulverten och plaströren med elkablar från det katodiska skyddet täcktes med sand tätades betongkulverten med en skyddsbeläggning, **figur 19**.



Figur 19. Tätning av betongkulvert (foto Öressundskraft)

Likriktarnas ström- och spänningsutmatning styrs digitalt av ett övervakningsprogram via en PC. Kontroll av det katodiska skyddet skyddsförmåga kan göras antingen manuellt på plats eller via PC.

Det katodiska skyddet startades ca tre månader efter den sista pågjutningen/påsprutningen utförts.

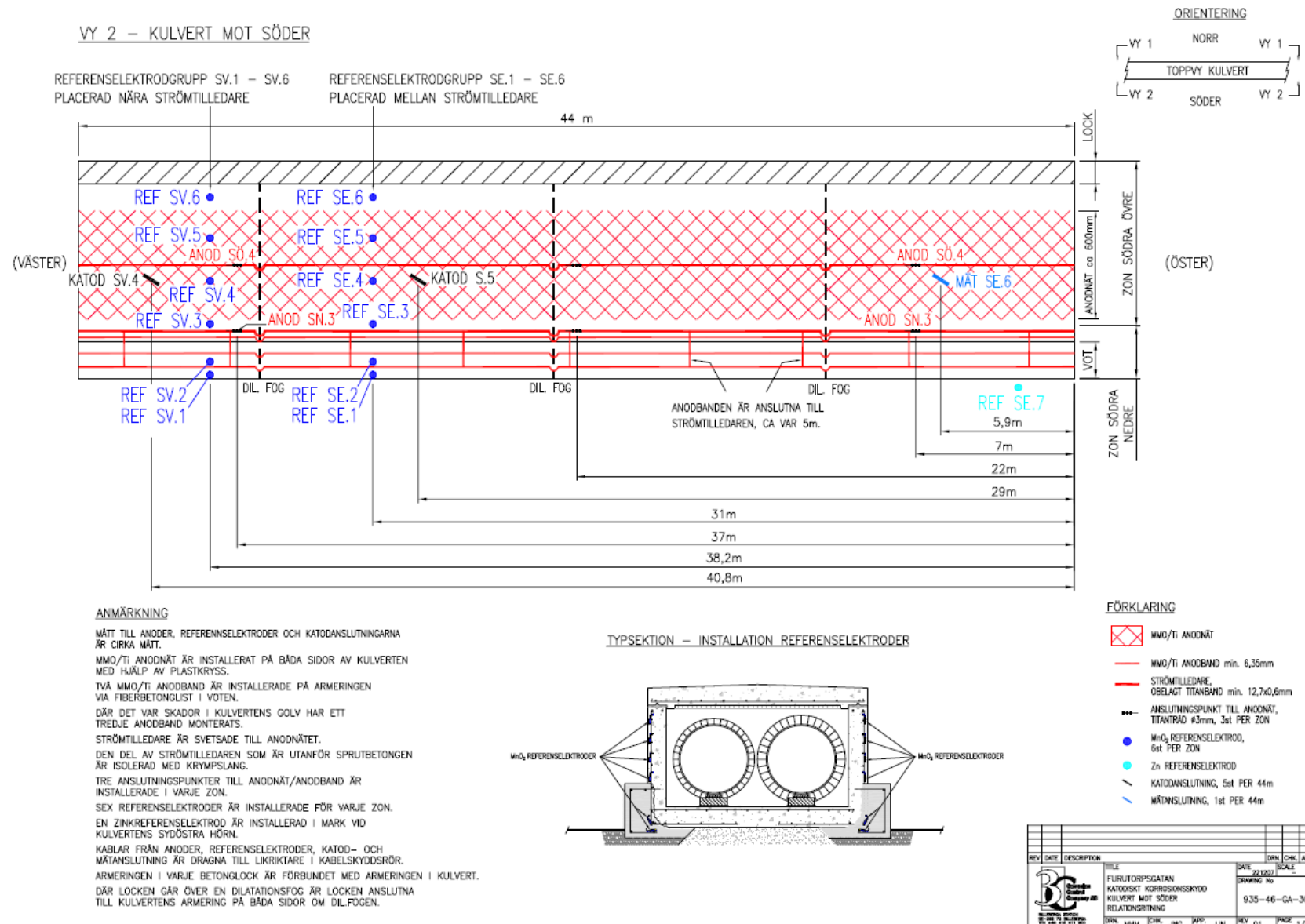
Tyvärr försenades starten av det katodiska skyddet på grund av att några elkablar klipptes av och stals.

Vid start av det katodiska skyddet matades ca 20-30 % av den beräknade strömutmatningen där efter ökades strömutmatningen för att uppnå fullgott skydd.

6.1 UTFORMNING AV DET KATODISKA SKYDDET VID FURUTORPSGATAN

I **figur 20** och **21** visas utformningen av det katodiska skyddet vid Furutorpsgatan. Det framgår av **figur 20** och **21** placeringen av referenselektroder, anodnät/band och anod- och katodanslutningar. Det katodiska skyddet består av totalt fyra separata skyddszoner (två på den norra sidan och två på den södra). I två skyddszonerna används nätanoder av titan belagt med ett ädelmetallskikt (MMO, Mixed Metal Oxide) och i två av skyddszonerna (voten) används bandanoder av titan belagt med ett ädelmetallskikt (MMO, Mixed Metal Oxide). Till varje skyddszon finns en separat likriktare, dvs

totalt fyra likriktare. De olika anoderna är kopplade till de separat likriktarnas pluspol och stålarmeringen är kopplad likriktarens minuspol.



Figur 20. Schematisk beskrivning av placering av referenselektroder, anodnät/band samt anod- och katodanslutningar i betongkulvertens södra vägg.



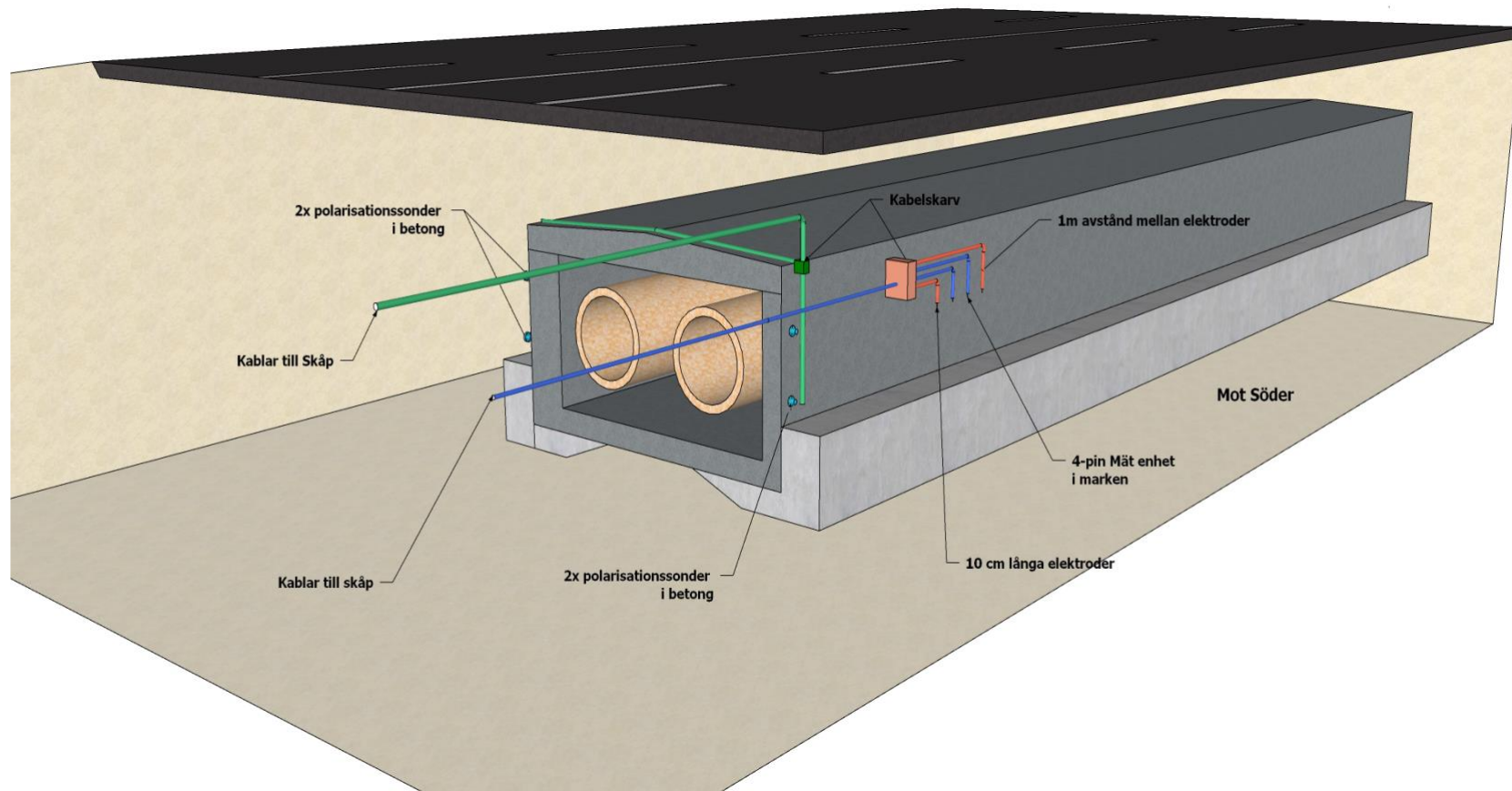
Figur 21. Schematisk beskrivning av placering av referenselektroder, anodnät/band och anod- och katodanslutningar i betongkulvertens norra vägg.

7 Mätningar av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet vid Furutorpsgatan

Vid kontroll av det katodiska skyddets förmåga att skydda betongkulverten mot fortsatt armeringskorrosion genomfördes manuella kontrollmätningar på plats. Det fanns även en möjlighet att utföra kontinuerliga mätningar genom att använda ett installerat övervakningssystem via PC för utmatning av ström- och spänning samt utföra kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet.

Impedansmätningar mellan ingjuten stålarmering och referenselektrod visade på en kraftig ökning av impedansen redan efter ca en månads drift av det katodiska skyddet. Detta innebar att den mätutrustning (ingångsimpedans 10 M Ω) som normalt används vid kontinuerliga mätningar av skyddsförmågan hos betongkonstruktioner inte kunde användas. Däremot fungerade de manuella mätningarna bra genom att använda en mätutrustning med en mycket hög ingångsimpedans (≥ 1000 M Ω).

För att kontinuerligt kunna övervaka skyddsförmågan hos det katodiska skyddet har fyra polarisationssonder av titan belagda med ett ädelmetallskikt (MMO) installerats (februari 2024) i betongkulverten, **figur 22**.



Figur 22. Schematisk skiss av placering av polarisationssonder och elektroder för mätning av betongresistivitet enligt Wenners-4-elektrodmätod.

Vid bedömning av skyddsförmågan har den elektrokemiska potentialen hos stålarmeringen i betongkulverten uppmätts med 24 st ingjutna referenselektroder av mangandioxid (MnO_2) enligt *SS-EN 12696:2022 – Katodiskt skydd av betongkonstruktioner i atmosfär*. Skyddsförmågan hos det katodiska skyddet bedöms enligt **tabell 2**.

Tabell 2. Bedömning av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet vid Furutorpsgatan

Potentialavklingning efter 24 timmars frånslag (mV)	Bedömning av skyddsförmågan enligt RISE	Bedömning av skyddsförmågan enligt <i>SS-EN 12696:2022</i>
0-49	Dålig	Dålig
50-99	Mindre god	Dålig
100-150	God	God
>150	Mycket god	God

8 Resultat och diskussion

8.1 RESULTAT FRÅN MÄTNINGAR AV SKYDDSFÖRMÅGAN HOS DET KATODISKA SKYDDET VID FURUTORPSGATAN

I **tabell 3** visas resultat från potentialmätningar med ingjutna referenselektroder av MnO₂ för bestämning av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet som installerats på betongkulverten i september 2022. Även en zinkelektrod har placerats i fyllnadsjord för att kunna mäta den elektrokemiska potentialen hos stålarmeringen i betongkulverten vid drift av det katodiska skyddet

Tabell 3. Skyddsförmågan hos det katodiska skyddet som installerats på betongkulvert till fjärrvärmerör vid Furutorpsgatan i Helsingborg i maj 2024.

Likriktare	Referens- elektrod	Korrosions- potential	Tillslags- potential	Frånlags- potential	Frånlags- potential efter 24 timmar frånlags	Potentialavklingning efter 24 timmar	Skyddsförmåga enligt erfarenheter av RISE	Skyddsförmåga enligt SS-EN 12696
Nr.	Nr.	mV (MnO ₂)	mV (MnO ₂)	mV (MnO ₂)	mV (MnO ₂)	mV (MnO ₂)		
1. Nedre söder	SV 1	-725	-930	-810	-700	110	God	God
	SV 2	-620	-777	-685	-580	105	God	God
	SV 3	-594	-1170	-706	-480	226	Mycket god	God
	SE 1	-800	-920	-856	-750	106	God	God
	SE 2	-824	-1040	-935	-810	125	God	God
	SE 3	-613	-1030	-590	-420	170	Mycket god	God
	SE 7 (*)	+900	+405	+664	+900	236	Mycket god	God
2. Övre söder	SV 4	-595	-1100	-666	-500	166	Mycket god	God
	SV 5	-576	-990	-598	-444	145	God	God
	SV 6	-555	-920	-626	-440	186	Mycket god	God
	SE 4	-620	-1100	-540	-470	70	Mindre god	Dålig
	SE 5	-610	-1130	-630	-500	130	God	God
	SE 6	-545	-1090	-567	-460	107	God	God
3. Nedre norr	NV 1	-685	-800	-715	-660	55	Mindre god	Dålig
	NV 2	-680	-880	-753	-670	83	Mindre god	Dålig
	NV 3	-600	-1130	-818	-560	258	Mycket god	God
	NE 1	-685	-790	-670	-600	70	Mindre god	Dålig
	NE 2	-750	-1000	-842	-740	102	God	God
	NE 3	-625	-1150	-813	-580	233	Mycket god	God
4. Övre norr	NV 4	-590	-970	-712	-530	182	Mycket god	God
	NV 5	-590	-980	-712	-540	172	Mycket god	God
	NV 6	-535	-870	-592	-480	112	God	God
	NE 4	-590	-890	-510	-450	60	Mindre god	Dålig
	NE 5	-560	-900	-400	-370	30	Dålig	Dålig
	NE 6	-580	-800	-450	-400	50	Mindre god	Dålig

(*) Zinkreferenselektrod placerad i fyllnadsjord.

Som framgår av resultaten från **tabell 3** så är skyddsförmågan i maj 2024, enligt RISE, mycket god vid 9 mätställen, god vid 9 mätställen, mindre god vid 6 mätställen och dålig vid 1 mätställe. Vid bedömning enligt SS-EN 12696:2022 framgår det att skyddsförmågan är god vid 18 mätställen och dålig vid 7 mätställen.

Erfarenheter från undersökningar utförda av RISE på katodiskt skyddade kantbalkar på Ölandsbron framgick det att endast en potentialavklingning av 20 mV efter frånlags av det katodiska skyddet

sjönk korrosionshastigheten med 79 % jämfört med oskyddad stålarmering, **Ref 3**. Det framgår vidare av **tabell 3** att IR-fallet betongkulverten är mycket högre än vad som tidigare uppmätts på katodiskt skyddade betongkonstruktioner såsom bropelare, kantbalkar på broar och parkeringsgarage (pelare och golv).

I **tabell 4** visas resultat från mätningar av likriktarnas utgående ström och spänning. Likriktaren är inställd på en konstant strömutmatning med en varierande spänningsutmatning som är beroende av resistansen i kretsen

Tabell 4. Mätresultat från likriktarnas utgående spänning och ström, maj 2024

Likriktare Nr.	Utgående spänning från likriktare (Volt)	Utgående ström från likriktare (Ampere)
1. Nedre söder	1,5	0,80
2. Övre söder	3,4	0,98
3. Nedre norr	1,6	0,80
4. Övre norr	3,4	0,99

Som framgår av resultaten i **tabell 4** har den totala utmatningen av skyddsström till armeringen i betongkulverten är ca 2,0 A, vilket innebär en katodisk strömtäthet av ca 35 mA/m²

I **tabell 5** visas resultat från potentialmätningar av stålarmeringen i betongkulverten med titanelektroder. Som framgår av potentialmätningar sker ingen potentialavklingning av stålarmeringen efter 24 timmars fränslag av det katodiska skyddet vid titanelektrod 2 (övre vägg söder) och 4 (övre vägg norr). Däremot vid titanelektrod 1 (nedre vägg söder) och 3 (nedre vägg norr) sker en kraftig potentialavklingning efter 24 timmars fränslag av det katodiska skyddet.

Tabell 5. Resultat från potentialmätningar med ingjutna elektroder av titan belagda med ett ädelmetallskikt. Mätningarna är utförda med installerat övervakningssystem av en ingångsimpedans av 10 MΩ.

Polarisations- sond (Ti-elektrod)	Tillslagspotential rel. Ti-elektrod	Frånslags- potential rel. Ti-elektrod vid frånslag	Frånslagspotential relativt Ti-elektrod efter 24 timmas frånslag	Potential- avklingning efter 24 timmars frånslag
(nr.)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)
1. (nedre söder)	-1020	-530	-310	220
2. (övre söder)	-750	-190	-190	0
3 . (nedre norr)	-840	-510	-240	270
4 . (övre norr)	-650	-150	-150	0

En möjlig förklaring till de uppnådda resultaten skulle kunna vara att betongkulvertens vägg vid titanelektroderna 2 (övre vägg söder) och 4 (övre vägg norr) är placerade högt upp i betongkulvertens vägg jämfört med titanelektrod 1 (nedre vägg söder) och 3 (nedre vägg norr) är placerade långt ner i betongkulvertens vägg.

Troligtvis är upptorkningen mer omfattande i betongkulverten övre väggdelar jämfört betongkulvertens nedre väggdelar. Detta resulterar i en betydligt högre betongresistivitet i de övre delarna av betongkulvertens väggar jämfört med betongkulvertens nedre delar av väggen.

Vid stora skillnader i betongresistivitet i betongkulvertens väggar innebär det att strömfördelningen från anoderna till stålarmeringen påverkas av betongkulvertens resistivitet.

8.2 RESULTAT FRÅN MÄTNINGAR AV RESISTANS MELLAN REFERENSELEKTROD OCH INGUTEN STÅLARMERING

I **tabell 6** visas resistansmätningar mellan ingjutna referenselektroder och ingjuten stålarmering som har utförts från det att det katodiska skyddet togs i drift (september 2022) fram till den 8 maj 2024.

Tabell 6. Resultat från resistansmätningar mellan referenselektrod (MnO₂) och stålarmring.

Likriktare	Referens- elektrod	Resistans mellan MnO ₂ -elektrod och stålarmring (2022-09-22)	Resistans mellan MnO ₂ -elektrod och stålarmring (2023-01-19)	Resistans mellan MnO ₂ -elektrod och stålarmring (2023-09-12)	Resistans mellan MnO ₂ -elektrod och stålarmring (2024-03-12)	Resistans mellan MnO ₂ -elektrod och stålarmring (2024-05-08)
Nr.	Nr.	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ
1, Nedre söder	SV 1	83	804	800	1000	1800
	SV 2	18	54	66	65	58
	SV 3	76	471	400	17	18
	SE 1	76	970	1200	2000	2000
	SE 2	60	191	200	266	280
	SE 3	79	783	500	11	12
	SE 7 (*)	0,065	0,0067	60	0,1	0,09
2, Övre söder	SV 4	79	596	500	1200	1000
	SV 5	63	180	200	500	580
	SV 6	83	555	600	1200	1200
	SE 4	85	1100	800	17	19
	SE 5	81	932	900	200	230
	SE 6	88	1158	1400	700	600
3, Nedre norr	NV 1	65	2500	900	1100	900
	NV 2	82	4500	500	1300	1100
	NV 3	84	1036	700	1100	1300
	NE 1	64	355	600	1800	950
	NE 2	75	512	400	600	1000
	NE 3	75	651	600	1000	665
4, Övre norr	NV 4	85	3589	1700	1400	900
	NV 5	78	5119	1000	1100	900
	NV 6	82	5012	1000	1000	1500
	NE 4	80	1125	1300	1200	3000
	NE 5	75	-	1000	1300	2300
	NE 6	81	-	1400	2000	1500

(*) Zinkelektrod är placerad i fyllnadsjord vid betongkulverten

Av resultaten från resistansmätningarna mellan ingjutna referenselektroder av MnO₂ och ingjuten stålarmring framgår det att resistansen ökar kraftigt efter start av det katodiska skyddet, **tabell 6**.

Trolig orsak till den kraftiga ökningen av resistansen mellan ingjuten armering och de ingjutna referenselektroder är att både betongen och referenselektrodernas elektrolyt har torkat upp på grund av den ökade temperatur i betongen som fås från det uppvärmda vattnet i fjärrvärmerören.

Detta gäller dock inte mellan referenselektroder SV 2, SV 3, SE 3, SE 4 och den ingjutna stålarmringen, **tabell 6**. Det framgår vidare av resultaten från mätningarna av resistansen av referenselektroder SV3, SE 3 och SE 4 och den ingjutna stålarmringen varit hög fram till 12 september 2023 och kraftigt sjunkit till den 12 mars 2024. Ingen förklaring till detta kan tyvärr ges.

8.3 RESULTAT FRÅN MÄTNINGAR AV JORDRESISTIVITET VID KATODISKT SKYDDAD BETONGKULVERT OCH RESISTIVITET AV REPARATIONSBRUK

Under 2024 installerat fyra mätelektroder för mätning av fyllnadsjordens resistivitet vid utsidan av den katodiskt skyddade betongkulverten. Avståndet mellan elektroderna är 1 meter mellan elektroderna. Mätningen utförs enligt Wenners 4-elektrodmätning.

I **tabell 7** visas resultat från mätningar av fyllnadsjordens resistivitet från 1 mars 2024 till 17 maj 2024, **Tabell 7**.

Tabell 7. Resultat från mätningar av fyllnadsjordens resistivitet med Wenners 4-elektrodmätning.

Resistivitet i jord (Ωm) (2024-03-01)	Resistivitet i jord (Ωm) (2024-03-05)	Resistivitet i jord (Ωm) (2024-04-08)	Resistivitet i jord (Ωm) (2024-05-17)
548	366	223	214

Det framgår av resultaten från mätningar av jordresistiviteten i **tabell 7** att fyllnadsjorden har avsevärt minskat från 1 mars 2024 till 17 maj.

Resistivitetsmätningar har utförts med ett tvåelektrodsystem där elektroderna har gjutits in i betongblock innehållande reparationsbruk. Resultaten från mätningarna visade att reparationsbrukets resistivitet efter härdning är mycket hög (1980 Ωm). Vid torra miljöer bör ett reparationsbruk som är lågresistiv efter härdning användas.

9 Slutsatser och rekommendationer

Från genomförda undersökningar av installationen av katodiskt skydd med påtryckt ström av en betongkulvert vid Furutorpsgatan i Helsingborg innehållande fjärrvärmerör av stål kan följande slutsatser och rekommendationer ges:

- De betongskador som uppstått i betongkulverten är orsakade av kloridinitierad armeringskorrosion. Vid betonggjutningen av betongkulvertens väggar användes kalciumklorid för att accelerera härdningen.
- Manuella potentialmätningar utförda på den katodiska skyddade betongkulverten vid 24 mätpunkter utefter betongkulverten visade att skyddsförmågan är god i 17 mätpunkter och dålig i 7 mätpunkter enligt SS-EN 12969:2022.
- Övervakningssystemet som installerats för kontinuerliga mätningar av skyddsförmågan fungerar inte tillfredställande på grund av för låg ingångsimpedans (10 MΩ) hos mätutrustningen.
- Vid kontrollmätning av skyddsförmåga hos katodiskt skyddade betongkonstruktioner är det viktigt att mätutrustningen har en tillräckligt hög ingångsimpedans (> 1000 MΩ).
- Den ovanligt höga impedansen som uppmäts mellan stålarmering och referenselektroden är orsakade av både en uttorkning av referenselektrodens elektrolyt och en kraftig ökning av betongens resistivitet, vilket förfalskar mätvärdena vid en användning av en mätutrustning med för låg ingångsimpedans.
- De genomförda undersökningarna visade att enbart manuella mätningar på plats, som utförts med en mätutrustning med hög ingångsimpedans (>1000 MΩ), kan användas för bestämning av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet.

10 Referenslista

1. Camitz, G. Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner – Handbok. Swerea KIMAB, Stockholm 2018
2. SS-EN 12695:2022 – Katodiskt skydd av betongkonstruktion i atmosfär. SIS Stockholm 2022.
3. Sederholm, B. Utomhusprovning av enkelt installerade anodsystem för katodiskt skydd av räckesståndare och kantbalksarmering på Ölandsbron. KI Rapport 2003:3, Stockholm 2002.
4. Sederholm, B. Katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner – Praktiska erfarenheter av nya och konventionella anodsystem. KI Rapport 2000:7. Korrosionsinstitutet, Stockholm 2000.
5. Sederholm, B. Katodiskt skydd av stålarmring i olika typer av betongkonstruktioner. KI Rapport 1997:4. Korrosionsinstitutet Stockholm 1997.
6. Sederholm, B & Camitz G. Katodiskt korrosionsskydd av stålarmring i betongpelare under Ölandsbron – Inverkan av klimatparametrar. KI Rapport 1993:2. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1993.

INSTALLATION AV KATODISKT SKYDD VID REPARATION AV BETONGKULVERT FÖR FJÄRRVÄRMELEDNINGAR

Katodiskt skydd med påtryckt ström har använts av Öresundskraft AB för första gången i Sverige vid reparation av betongskador på en betongkulvert orsakad av armeringskorrosion. Installatör av det katodiska skyddet har varit det svenska företaget 3C (Corrosion Control Company) AB.

De uppkomna korrosionsskadorna på stålarmeringen i betongkulverten är orsakad kloridinitierad korrosion där kalciumklorid (CaCl_2) har använts vid tillverkningen (platsgjuten) av betongkulverten för att accelerera härdningstiden på betongen eftersom gjutningen utfördes vintertid.

Mätningar av det katodisk skyddets skyddsförmåga visade att ett fullständigt katodiskt skydd erhöles vid 17 av 24 mätpunkter. Vid sju av mätpunkter uppnåddes inte ett fullständigt skydd enligt svenska standarden SS-EN 12696:2022 – Katodiskt skydd av betongkonstruktioner i atmosfär.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

