



# Herøysund bru, korrosjon av etterspent armering

FoU-programmet Bedre Bruvedlikehold  
2017-2021

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 843



**Tittel**

Herøysund bru, korrosjon av etterspent armering

**Undertittel**

FoU-programmet Bedre Bruvedlikehold 2017-2021

**Forfatter**

Roy Johnsen, NTNU

**Avdeling**

Konstruksjoner

**Seksjon**

Konstruksjonsteknikk

**Prosjektnummer**

L10114

**Rapportnummer**

843

**Prosjektleder**

Bård M. Pedersen

**Godkjent av**

Bård M. Pedersen

**Emneord**

Etterspente betongbruer, korrosjonsskader, årsak til utvikling av korrosjon på etterspent armering

**Sammendrag**

Rapporten omhandler

- 1) teori om korrosjon på spennarmering
- 2) beskrivelse av korrosjonsskadene på Herøysund bru
- 3) resultatene fra undersøkelse av korrosjonstilstanden på spennarmeringen på Herøysund bru 18-1069
- 4) informasjon fra annen publisert litteratur.

Rapporten gir en vurdering av mulige årsaker til korrosjonsskadene funnet på Herøysund bru. Den er på oppdrag skrevet av NTNU og er utarbeidet i delprosjekt 2.4 "Spennarmering". Prosjektet har søkelys på kartlegging av skader og konsekvenser av dette på før- og etteroppent armering.

**Title**

Herøysund bridge  
Corrosion on post-tensioned reinforcement

**Subtitle**

The R&D program Better Bridge Maintenance 2017-2021

**Author**

Roy Johnsen, NTNU

**Department**

Structures

**Section**

Structural Engineering

**Project number**

L10114

**Report number**

843

**Project manager**

Bård M. Pedersen

**Approved by**

Bård M. Pedersen

**Key words**

Post-tensioned concrete bridges, corrosion damage, cause of the development of corrosion on post-tensioned reinforcement

**Summary**

The report deals with

- 1) theory of corrosion on prestressing reinforcement
- 2) description of the corrosion damage on Herøysund bridge
- 3) the results from the investigation of the corrosion condition on the post-tensioned reinforcement at Herøysund 18-1069
- 4) information from other published literature.

The report provides an assessment of possible causes of the corrosion damage found on Herøysund bridge. It has been commissioned by NTNU and has been prepared in subproject 2.4 "Tension reinforcement". The project focuses on mapping damage and the consequences of this on pre- and post-tensioned reinforcement.



## Forord

Denne rapporten er utarbeidet av FoU-programmet Bedre bruvedlikehold (2017–2021). Bedre bruvedlikehold skal gjennom ny kunnskap bidra til at Statens vegvesen kan optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer.

Bedre bruvedlikehold består av fire prosjekter:

Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer

Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong

Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong

Prosjekt 4: Vedlikehold av stålbruer

Bedre bruvedlikehold ledes av Bård Pedersen, Vegdirektoratet.


Denne rapporten tilhører Prosjekt 2: «Armeringskorrosjon i betong» som ledes av Karla Hornbostel. Prosjekt 2 er rettet mot drift og vedlikehold av betongbruer med armeringskorrosjon. Mål for prosjektet er å utarbeide anbefalinger for inspeksjonsmetoder for å utrede omfang av skader på grunn av armeringskorrosjon samt å utvikle verktøy for å kunne bedømme konsekvenser av armeringskorrosjon for bruens levetid. Prosjektet skal også utarbeide et beslutningsgrunnlag for valg av reparasjonstiltak og anbefalinger for gjennomføring av tekniske gode og økonomisk effektive reparasjonstiltak.

Rapporten er skrevet av NTNU og er utarbeidet i delprosjekt 2.4 «Spennarmering», som ledes av Lise Bathen. Prosjektet har søkelys på kartlegging av skader og konsekvenser av dette på både førroppsant og etterroppsant armering. Rapporten omhandler teori om korrosjon på spennarmering, resultater og beskrivelse av korrosjonsskadene på spennarmeringen på Herøysund samt informasjon fra publisert litteratur. Rapporten gir også en vurdering av mulige årsaker til korrosjonsskadene på Herøysund bru.



 <p><b>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</b></p> <p>Adresse: Richard Birkelands vei 2b NO-7491 Trondheim NORWAY</p> <p>Telephone: +47 93 02 12 73 Fax: +47 73 59 41 29</p> <p>Enterprise No.: NO 974 767880 MVA</p>		<h1>NTNU/MTP RAPPORT</h1>		
		<p>TITEL:</p> <h2 style="text-align: center;">HERØYSUND BRU</h2> <h3 style="text-align: center;">Korrosjon av spennarmering i betongbruer</h3>		
		<p>FORFATTER(E):</p> <p style="text-align: center;">Roy Johnsen</p>		
		<p>KUNDE:</p> <p style="text-align: center;">Statens Vegvesen</p>		
<p>RAPPORT NO.:</p> <p>90599200-01</p>	<p>KLASSEFISERING:</p>	<p>PROSJEKT NO.:</p> <p>90599200</p>	<p>ANTALL SIDER/VEDLEGG:</p> <p style="text-align: center;">46/14</p>	
<p><b>ABSTRAKT</b></p> <p>Denne rapporten er skrevet på oppdrag fra Statens Vegvesen (SVV) og er en del av prosjektet «FoU samarbeid Bedre Bruvedlikehold DP2 – Armeringskorrosjon i betong». Bakgrunnen for rapporten er korrosjonsskader på spennarmeringen på Herøysund bru som ble oppdaget og dokumentert i 2019.</p> <p>Rapporten inneholder i) en teoretisk beskrivelse av korrosjon på armering i betong og injeksjonsmasse, ii) resultater fra innhenting av informasjon og beskrivelse av korrosjonsskadene på spennarmeringen på Herøysund bru - inkludert biter av korroderte spennarmering og kabelrør samt prøver av injeksjonsmassen (analysert av SINTEF), og iii) informasjon fra publisert litteratur innenfor temaet «Korrosjon av spennarmering i betong». Rapporten gir til slutt en vurdering av mulige årsaker til korrosjonsskadene på Herøysund bru.</p> <p><b>KONKLUSJONER</b></p> <p><u>Laboratorieundersøkelser</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Tråd som var gått til brudd</i> – groplignende korrosjonsangrep rund bruddet med gjenværende tverrsnitt tilsvarende 2.9 mm høyde. Gjenværende tverrsnitt ved bruddtidspunktet ble anslått til å være 30-35% av opprinnelig tverrsnittsareal.</li> <li>○ <i>Trådbiter uten brudd</i> - dype korrosjonsgroper med elliptisk form med lengde 5-15 mm, dybde opp til 1.5 mm mm og bredde 3-4 mm på en del av omkretsen. På andre deler av omkretsen var det ingen korrosjonsangrep.</li> <li>○ Ved analyse av korrosjonsprodukt og injeksjonsmasse ble det påvist at klorid og svovel var tilstede.</li> <li>○ En pH verdi på 13 ble målt i porevannet.</li> <li>○ Korrosjon ble observert på kabelkanal – i hovedsak var dette korrosjon på innsiden av kabelkanalene.</li> </ul> <p><u>Litteraturundersøkelsen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alkalisik sementmiljø uten klorid i injeksjonsmasse fører til passivering av stålet med meget lav korrosjonshastighet.</li> <li>○ Alvorlige korrosjonsangrep i områder med mangelfull injeksjonsmasse var karakterisert ved; i) høyt fuktinnhold, ii) lavt totalt klorid (Cl<sup>-</sup>) innhold, iii) høyt fritt sulfat innhold, og iv) høy pH i porevannet.</li> <li>○ Kritisk klorid- og/eller sulfatinnhold for nedbryting av passivfilmen avhenger av pH - [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] og [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] er viktige forholdstall.</li> <li>○ Sammenhengen mellom kloridinnhold, pH og fritt sulfat i porevannet og effekt på nedbryting av passivfilmen og etterfølgende korrosjon på stålet i strekkarmeringen, er ikke kartlagt i tilstrekkelig grad.</li> </ul>				
01	26.06.2022	For bruk	Roy Johnsen	
00	17.06.2021	For kommentarer	Roy Johnsen	
<b>REV.</b>	<b>DATO</b>	<b>STATUS</b>	<b>SKREVET AV</b>	<b>GODKJENT AV</b>




	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	3 av 61

## INNHOLDSFORTEGNELSE


Side

<b>FORKORTELSER</b> .....	<b>4</b>
<b>1 INTRODUKSJON</b> .....	<b>5</b>
<b>2 TEORETISK BAKGRUNN</b> .....	<b>5</b>
2.1 Spennarmering i betong.....	5
2.1.1 Generell informasjon.....	5
2.1.2 Informasjon om Herøysund bru .....	6
2.2 Korrosjon av stål og spennarmering i betong og injeksjonsmasse.....	7
2.2.1 Pourbaix diagram for Fe-H <sub>2</sub> O .....	7
2.2.2 Korrosjon av stål i betong .....	8
2.3 Korrosjon av spennarmering.....	9
2.3.1 Innledning .....	9
2.3.2 Porer og porevann .....	9
2.3.3 Hulrom og fuktighet.....	9
2.3.4 Effekt av klorid ioner .....	10
2.3.5 Oksygeninnhold .....	11
2.3.6 Karbonatisering.....	12
2.3.7 Galvanisk celle.....	12
2.3.8 Spenningskorrosjon og hydrogensprøhet <sup>20</sup> .....	13
<b>3 BAKGRUNN HERØYSUND BRU</b> .....	<b>14</b>
3.1 Informasjon fra byggefasen .....	14
3.2 Informasjon fra relevante inspeksjoner og undersøkelser .....	15
3.2.1 Inspeksjoner utført av Multiconsult (2017) og Dekra (2020) .....	15
3.2.2 Analyse av injiseringsmasse utført av SINTEF etter inspeksjonen i oktober 2019 .....	16
3.2.3 Inspeksjon og prøveuttak utført av SVV i august 2020 .....	17
<b>4 RESULTATER FRA UNDERSØKELSER</b> .....	<b>22</b>
4.1 Karakterisering av korrosjonsangrep og trådbrudd på spenetråd fra Herøysund bru .....	22
4.2 Analyse av injeksjonsmasse – oppsummering .....	25
<b>5 INFORMASJON FRA PUBLISERT LITTERATUR</b> .....	<b>26</b>
5.1 Innledning.....	26
5.2 Sulfat i alkalisk miljø (sement og injeksjonsmasse) <sup>30, 31</sup> .....	27
5.3 Effekt av kloridinnhold.....	33
5.4 Effekt av stål – betong/sement grenseflaten <sup>47, 48</sup> .....	36
5.5 Effekt av fuktighet i betong.....	39
5.6 Effekt av vann/sement forholdet .....	39
5.7 Oppsummering av observasjoner fra litteraturen.....	39
<b>6 INFORMASJON FRA FEDA BRU ETTER RIVING</b> .....	<b>40</b>
<b>7 DISKUSJON</b> .....	<b>41</b>
7.1 Oppsummering av resultater fra inspeksjon og laboratorieundersøkelser .....	41
7.2 Vurdering av årsak til korrosjon på spenetråd .....	42
7.3 Vurdering av årsak til brudd i spenetråd .....	44
<b>8 KONKLUSJONER</b> .....	<b>44</b>
<b>9 VIDERE TESTING</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERANSER</b> .....	<b>45</b>
<b>VEDLEGG 1 – Kabelplassering i hovebrugar på Herøysund bru (tegn.nr. 64-4604-1/07.07.1964)...</b>	<b>48</b>
<b>VEDLEGG 2 – Bilder fra Prøvefelt 1</b> .....	<b>49</b>
<b>VEDLEGG 3 – Bilder fra Prøvefelt 2</b> .....	<b>51</b>
<b>VEDLEGG 4 – Bilder fra Prøvefelt 3</b> .....	<b>53</b>
<b>VEDLEGG 5 – Beskrivelse av bildene</b> .....	<b>56</b>
<b>VEDLEGG 6 Utdrag fra «Spennarmeringssystemer» av Einar Noremark</b> .....	<b>60</b>

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	4 av 61

## FORKORTELSER

Ag/AgCl	Sølv/Sølvklorid Elektrode
EIS	Electrochemical Impedence Spectroscopy
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
$E_{korr}/E_{corr}$	Korrosjonspotensialet
HE	Hydrogensprøhet (Hydrogen Embrittlement)
HIC	Hydrogen induert sprekking (Hydrogen Induced Cracking)
ICP-OES	Plasma Emission Spectroscopy
MICV	Microsscopical Interfacial Concrete Voids
NHE	Standard Hydrogen Elektrode
LPR	Lineærpolarisering resistance (Linear Polarisation Resistance)
OCP	Korrosjonspotensial (Open Circuit Potential)
OM	Optisk Mikroskop
RH	Relativ fuktighet (Relative Humidity)
SCC	Spenningskorrosjon (Stress Corrosion Cracking)
SCE	Mettet Calomel elektrode (Saturated Calomel Electrode)
SCI	Stål-betong grenseflaten (Steel-Concrete Interface)
SEM	Scanning Electron Microscope
SVV	Statens Vegvesen
XPS	X-ray spectroscopy
XRD	X-ray diffraction
XRF	X-ray fluorescence
$A_A$	Anodearealet ( $m^2$ )
$A_K$	Katodearealet ( $m^2$ )
$CR_K$	Grenseverdi for forholdet $[Cl^-]/[OH^-]$
$E_{Pit}$	Pittingpotensial (mV vs. Ref.)
$E_{Rep}$	Repassiveringspotensial (mV vs. Ref.)
$i_{AA}$	Anodisk strømtetthet ( $mA/m^2$ ) på areal $A_A$
$i_{KA}$	Katodisk strømtetthet ( $mA/m^2$ ) på areal $A_A$
$i_{AK}$	Anodisk strømtetthet ( $mA/m^2$ ) på areal $A_K$
$i_{KK}$	Katodisk strømtetthet ( $mA/m^2$ ) på areal $A_K$
$i_{Pass}$	Passivstrømtettheten ( $mA/m^2$ )
M	Molar (mol/l)
$v_{korr}$	Korrosjonshastighet (mm/år)
$\Delta V$	Drivende spenning (mV)
$Cl^-$	Klorid ioner
$K^+$	Kalium ioner
$Na^+$	Natrium ioner
$SO_4^{2-}$	Sulfat ioner

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	5 av 61

## 1 INTRODUKSJON

Denne rapporten er skrevet på oppdrag fra Statens Vegvesen (SVV) og er en del av prosjektet «FoU samarbeid Bedre Bruvedlikehold DP2 – Armeringskorrosjon i betong». Bakgrunnen for rapporten er korrosjonsskader på spennarmeringen på Herøysund bru som ble oppdaget og dokumentert i 2019. Siden SVV har mange bruer med tilsvarende spennarmering som har nådd en alder hvor det er omfattende behov for vedlikehold, er *målsettingen med arbeidet å fremskaffe dokumentasjon på hva som kan være årsaken(e) til at korrosjon av spennarmeringen starter og fortsetter innvendig i de tynnveggede kabelrørene de er montert i.*

Rapporten inneholder i) en teoretisk beskrivelse av korrosjon på armering i betong og injeksjonsmasse, ii) resultater fra innhenting av informasjon og beskrivelse av korrosjonsskadene på spennarmeringen på Herøysund bru - inkludert biter av korroderte spennarmering og kabelrør samt prøver av injeksjonsmassen (analysert av SINTEF), og iii) informasjon fra publisert litteratur innenfor temaet «Korrosjon av spennarmering i betong». Rapporten gir til slutt en vurdering av mulige årsaker til korrosjonsskadene på Herøysund bru.

## 2 TEORETISK BAKGRUNN

### 2.1 Spennarmering i betong

#### 2.1.1 Generell informasjon

Spennarmert betong er betong hvor deler av armeringen påføres en forspenning. Spennarmeringen påføres en strekkraft, som overføres som en trykkraft i betongen.

Spennarmering kan spennes opp på to måter; før- og etteroppspenning. Ved *etteroppspenning* spennes konstruksjonen først opp etter at betongen er ferdig støpt og tilstrekkelig herdet. Spennarmeringen tres gjennom *kabelkanaler* i den støpte konstruksjonen. I hver ende monteres det forankringer; anker. Det finnes to typer; passivt og aktivt anker. Det er vanlig å sette et passivt anker i den ene enden og et aktivt anker i den andre, men det er også mulig med to aktive ankere. Forankringene er like i utførelsen, men spennarmeringen spennes opp med en jekk i det aktive ankeret. Ved oppspenning brukes betongkonstruksjonen selv som mothold, og betongen påføres en trykktøyning samtidig som spennarmeringen strekkes. Etter oppspenningen låses armeringen til innstøpte forankringsplater, og spennkreftene overføres til betongen via disse. For å skape heft mellom spennarmeringen og betongen injiseres en sementbasert mørtel (kalt *injiseringsmasse*) inn i hulrommet i kabelkanalene.

BBRV<sup>1</sup> systemet var det dominerende systemet for spennarmering på 1960-tallet.<sup>1-3</sup> Selve kabelen var satt sammen av enkeltstående spennråder. Kabelen ble så trukket inn i innstøpte kabelkanaler. Dette var normalt korrugerte kanaler med liten stivhet. For Herøysund bru ble imidlertid hver kabelkanal med spennarmering levert som en enhet i kveilet rull. Hver hele kabelkanal lengde var sveist sammen av individuelle kabelkanaler og ble rullet ut som en enhet mellom oppspenningspunktene. Hulrommet mellom kabel/spennråder og kabelkanalen skal være fylt opp med injiseringsmasse. Denne injiseringsmassen skal oppfylle to viktige krav:


1. Fylle opp «ledig» volum innvendig i kabelrørene og sikre heft mellom kabel/spennråd og kabelkanal.
2. Virke som korrosjonsbeskyttelse av spennrådene.

Dette betyr at injiseringsmassen må ha en slik konsistens at den «flyter» gjennom kabelkanalens lengde og fyller opp alle hulrom. Den må samtidig størkne og være stabil under konstruksjonens levetid med variasjon i miljøbetingelsene inkludert temperatur. Samtidig må den inneholde elementer som gjør at den hindrer korrosjon på trådene (f.eks.: lav diffusjon av klorid og oksygen, tett slik at vann ikke når overflaten på spennråden). Injeksjonsmassen består av sement, vann og tilsetningsstoffer som sikrer nødvendige ekspansjon-, flyte- og korrosjonsegenskaper.

Figur 2.1 viser en typisk konstruksjon med spennråder montert i en kabelkanal fylt med injeksjonsmasse. Bildet er tatt fra Farris eidet bru i FV302, Larvik under fjerningsprosessen av brua 10. august 2018.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sveitsisk spennsystem utviklet på slutten av 1940-tallet av ingeniørene Birkenmaier, Brandestini, Ros og Vogt.



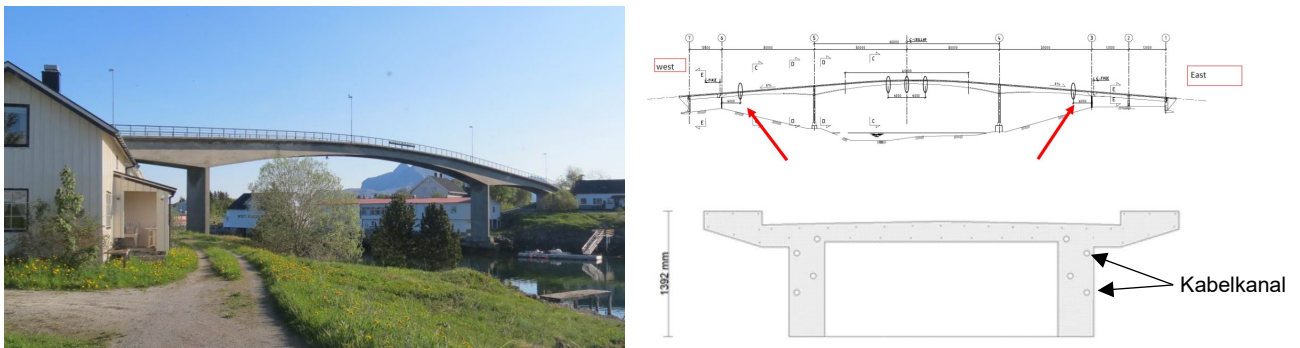
	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	6 av 61



Figur 2.1 Bilde av spenntråder i en kabelkanal fylt med injiseringsmasse (Farriseidet bru, Larvik).<sup>4</sup>

### 2.1.2 Informasjon om Herøysund bru

Herøysundet bru med bru nr. 18-1069, ligger i Herøy kommune i Nordland fylke. Brua er forbindelsen mellom Sør- og Nord-Herøy. Brua inngår i FV828 og ligger på HP3/5991 m - 6145 m og ble bygget i 1966. Det er en plassprodusert bjelkebru med varierende høyde. Brua har 7 akser bestående av 5 pilarer og to landkar og har en samlet lengde på 154 meter, et kjørefelt, samt fortau på begge sider og største totalbredde er 5.30 meter. Største spenn er 60 meter. Pilarer samt landkar er fundamentert på fjell. De to hovedbjelkene er hver forsynt med fire kabelkanaler med *etteroppspente tråder* omgitt av injeksjonsmasse. Figur 2.2 viser et bilde av brua og en skisse av brua med kabelkanaler inntegnet.<sup>5</sup>



Figur 2.2 Bilde av Herøysund bru med skisse av brua med kabelkanaler inntegnet.<sup>5</sup>

Kabelkanalene for Herøysund bru er langsveiste stålører med godstykkelse 0.3 mm og ytterdiameter 60 mm (bestemt av tråd/kabeldimensjon).<sup>2</sup> Som nevnt tidligere, ble kabelkanaler med spennarmering levert som en lengde på rull, benyttet på denne brua. Siden kabelkanallengder var sveist sammen til total lengden, var det liten sannsynlighet for lekkasje inn i kabelkanalen i sveiseområdene (koplingspunktene mellom hver kabellengde).

Spenntrådene hadde diameter 6 mm og var kaldtrukket, rettet og anløpt.<sup>2</sup> Kravet til mekaniske egenskaper for materialet var:


- Flytegrense:  $\sigma_{0.2} > 1570$  MPa
- Bruddgrense:  $\sigma_B = 1770$  MPa
- Duktilitet/forlengelse: 3.5%

Kjemisk sammensetning av trådmaterialet er vist i Tabell 2.1. Kjemisk sammensetning kan påvirke korrosjonsegenskapene til tråden.<sup>6</sup> Dette er imidlertid lite undersøkt i litteraturen.

Tabell 2.1 Kjemisk sammensetning av trådmaterialet (i wt%).<sup>2</sup>

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.75-0.87	0.15-0.35	0.5-0.8	0.03	0.03	0.10	0.10	0.15

Når det gjelder injeksjonsmassen som ble benyttet for Herøysund bru, er følgende informasjon funnet:<sup>3</sup>

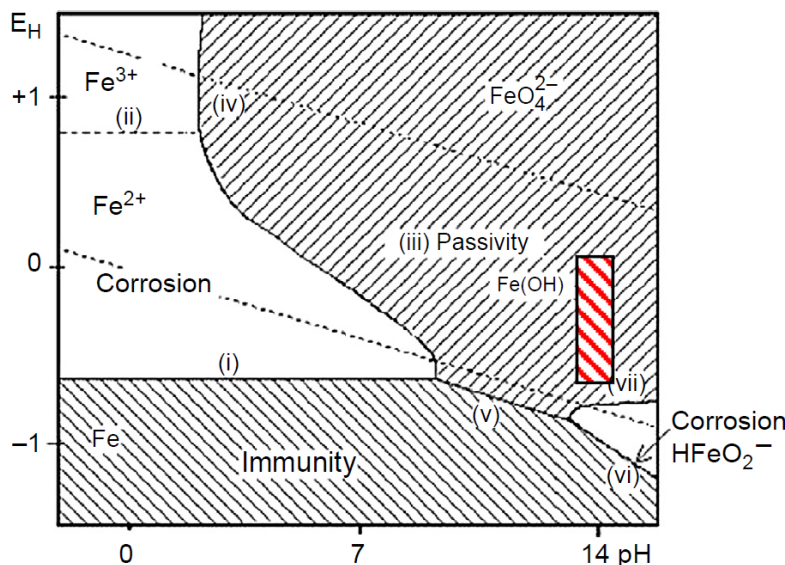
	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	7 av 61

Den vanlige metoden for produksjon av injeksjonsmasse var porsjonering av vann, sement og tilsetningsstoff for ekspansjon og pumpbarhet. I en samtale med Tommy Lindstrand, KB Spenneteknikk AS nevner han tilsetningsstoffene Intrusion Aid og Betokem IN. Intrusion Aid kunne en bruke med vann/semnt (v/c) forhold 0.4 mens Betokem In måtte ha 0.45. Resultatet var svært avhengig av kvaliteten på sementen. Det ble gjerne benyttet større vannmengder. Sementsekkene på den tiden hadde ikke plastbelegg og sementen klumpet seg lett om den ble lagret på byggeplassen noen dager. Rutinen var at det ble brukt vann som smøring før injeksjon. I praksis ga heller ikke blandeutstyret tilstrekkelig utblanding slik at massen separerte lett under injeksjon og førte til propp i systemet. Dette er en sannsynlig årsak til hulrommene som er registrert på Herøysund bru (se Dekra inspeksjonen<sup>5</sup>, Kapittel 3.2.1).

## 2.2 Korrosjon av stål og spennarmering i betong og injeksjonsmasse

### 2.2.1 Pourbaix diagram for Fe-H<sub>2</sub>O


I en betongkonstruksjon er armeringen ikke direkte eksponert mot atmosfæren. Dette betyr at korrosjonsforholdet er bestemt av innvendig forhold i betongmiljøet og utveksling mot omkringliggende atmosfære (eventuelt mot utvendig væskemiljø dersom konstruksjonen er direkte eksponert mot væske). En viktig parameter er pH som i betong normalt ligger i området 12.5-13.5. Figur 2.3 viser Pourbaix diagram for Fe-H<sub>2</sub>O systemet. Figuren viser også typisk potensial-pH område for stål i betong (rødt skravert område<sup>7</sup>). Som det fremgår av Pourbaix diagrammet, befinner stålet seg i det passive området. Passiviteten skyldes utviklingen av et tynt (< 10 nm) beskyttende oksid eller hydroksid belegg (film) på overflaten. Belegget kalles normalt *passivfilm*. Passivfilmen stopper ikke korrosjonen, men filmen reduserer korrosjonshastigheten til typisk 0.1 µm/år.<sup>7</sup> Så lenge denne filmen er intakt, kan korrosjonshastigheten neglisjerer. Dersom passivfilmen helt eller delvis forsvinner – kalles «depassivation» - vil aktiv korrosjon oppstå på stål i betong når stålet er i kontakt med fuktighet (både med og uten oksygen tilstede).



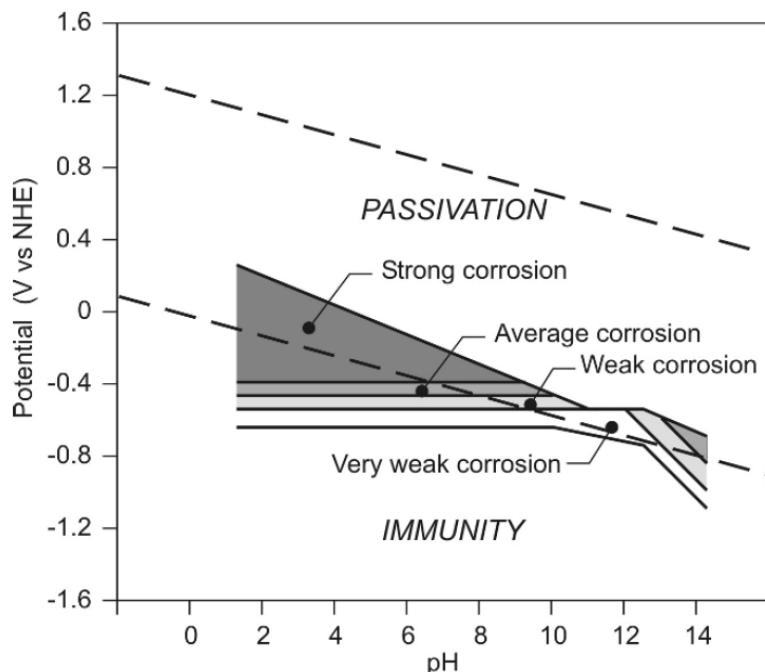
**Figur 2.3 Pourbaix diagram for Fe-H<sub>2</sub>O ved 25°C. Skravert rødt område viser normalt pH og potensial-område for stål i betong.<sup>6</sup>**

Sammensetningen av passivfilmen varierer over tykkelsen på sjiktet. Normalt består ytre sjikt i hovedsak av et Fe<sup>3+</sup> rikt oksid eller hydroksid som har relativt dårlig korrosjonsbeskyttelse (tykkelse 5-10 nm), mens det innerste sjiktet er Fe<sup>2+</sup> rikt oksid/hydroksid (tykkelse 1-3 nm). Med økt eksponeringstid vil det ytre Fe<sup>3+</sup> sjiktet øke i tykkelse, mens det indre Fe<sup>2+</sup> sjiktet vil være relativt konstant. Endringen av forholdet Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> er potensialavhengig og et mer positivt korrosjonspotensial (Open Circuit Potential – OCP) vil gi en økning av Fe<sup>3+</sup> innholdet og en mer robust/bestandig passivfilm.<sup>7</sup> Det må bemerkes at Pourbaix diagrammet vist i Figur 2.3 gjelder for jern (Fe) uten andre legeringselementer. For stål (Fe pluss legeringselementer) vil det være små endringer i overgangen mellom korrosjon/immunitet og korrosjon/passivitet i diagrammet.

Pourbaix har i sitt store verk «Atlas of Electrochemical Equilibria in - Aqueous Solutions» – Kapittel IV, seksjon 12.1, side 316 – vist et mer detaljert Pourbaix diagram for Fe.<sup>8</sup> Her vises en kvalitativ sammenheng mellom korrosjonshastighet ved ulike pH og potensial kombinasjoner i en elektrolytt uten oksygen, se Figur

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	8 av 61

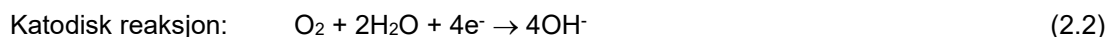
2.4. Det fremgår at ved  $\text{pH} > \approx 13$  og korrosjonspotensial mer negativt enn  $\approx -950 \text{ mV}_{\text{SCE}}$  ( $-700 \text{ mV}_{\text{NHE}}$ ) er det et område som defineres som «strong corrosion» på samme nivå som  $\text{pH} < 9$  og korrosjonspotensial  $> -650 \text{ mV}_{\text{SCE}}$  ( $-400 \text{ mV}_{\text{NHE}}$ )<sup>11</sup>. For å nå dette området i Pourbaix diagrammet, hevdes det i litteraturen at miljøet må være oksygenfritt.<sup>9</sup> Dersom spennarmeringen er eksponert under slike betingelser i det aktuelle potensial-pH område, kan man forvente aktiv korrosjon på stålet og høy korrosjonshastighet. Det er imidlertid viktig å poengtere at Pourbaix diagrammet kun indikerer hvilke tilstand et metall befinner seg i og ikke sier noe om korrosjonshastigheten (eller kinetikken). Denne må dokumenteres med testing i aktuelt pH/potensialområde i en vandig løsning.



Figur 2.4 Pourbaix diagram for stål i en oksygenfri vannholdig løsning.<sup>8,9</sup>

## 2.2.2 Korrosjon av stål i betong

For at stål skal korrodere må det være vann/fuktighet til stede og i kontakt med stålet. I betong finnes normalt vann i betongens porer og dette vannet benevnes *porevann* – se Kapittel 2.3.2. Som for alle korrosjonsprosesser vil det være (minst) to elektrokjemiske reaksjoner som virker samtidig (stål representeres ved jern (Fe)):




Reaksjon (2.1) og (2.2) er første steg i dannelsen av korrosjonsprodukt. Flere etterfølgende steg kan/vil skje for å ende opp med ulike «rust» former:

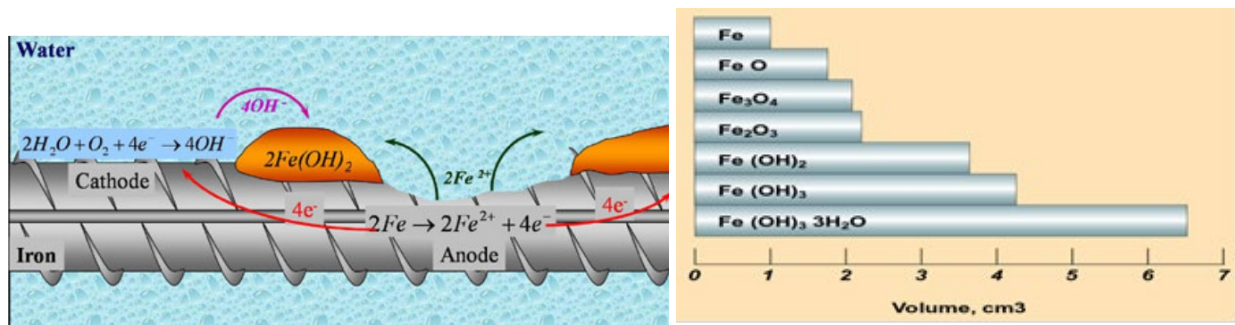


En viktig effekt som følge av korrosjon av jern, er at dannelsen av  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gir en volumøkning i forhold til korrodert stål. Volumøkningen kan føre til sprekkdannelser og avskalling av betong. Se Figur 2.5 som viser skisse av en korrosjonscelle og volumøkning i avhengighet av type korrosjonsprodukt. Korrosjonsproduktene som er vist i Figur 2.5, forutsetter at det er oksygen tilstede. Dersom oksygentilgangen er begrenset, vil korrosjonsproduktet i hovedsak bestå av  $\text{FeOOH}$  faser og/eller  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetitt). En magnetitt rik passivfilm vil være relativt tynn (størrelsesorden  $< 2-5 \text{ mm}$  etter noen år).<sup>52</sup>

<sup>11</sup> SCE: Saturated Calomel Electrode og NHE: Standard Hydrogen Electrode –  $[\text{SCE}] = [\text{NHE}] - 250 \text{ mV}$



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	9 av 61



Figur 2.5 **Venstre:** Skisse av en elektrokjemisk celle med oksygentilgang med anodisk og katodisk område. **Høyre:** Volumøkning i avhengighet av type korrosjons-produkt.<sup>10,11</sup>

## 2.3 Korrosjon av spennarmering

### 2.3.1 Innledning

Korrosjonshastigheten av stål i betong/injeksjonsmasse avhenger av flere faktorer. De viktigste er:

- Mengde og sammensetning av porevann/fuktighet i kontakt med stål.
- pH, kloridinnhold og oksygeninnhold
- Andre kjemiske elementer som bidrar til korrosjon (sulfid, ..)
- Karbonatisering

Elektrisk ledningsevne i porevann/fuktighet som omslutter stålet – påvirker også evnen til å etablere galvaniske element og effekten av disse.


### 2.3.2 Porer og porevann

Injeksjonsmasse og betong har en viss porøsitet. Størrelsen på en pore varierer i området < 100 nm – 1 cm. Porøsiteten bestemmes i stor grad av vann/semest forholdet som normalt ligger i området 0.4-0.5. Den vannmengden som trengs for fullstendig hydratisering av sementen, er imidlertid mye mindre. Vann er derfor vanligvis tilstede i overskudd selv i velherdet betong og injeksjonsmasse. Ved herdeprosessen går porene (der vannet er) over fra å være et åpent gjennomgående system til å bli et diskontinuerlig system etter hvert som porene fylles med nydannede hydratiseringsprodukter. God hydratisering reduserer dermed porøsiteten og kontinuiteten i poresystemet.

Vannet som eksisterer i porer kalles *porevann*. Dette vannet vil ta opp elementer fra sementen og aktuelle tilsatsstoffer under utstøping og herding. Siden flere av elementene i betong er alkaliske (e.g. CaO, K<sub>2</sub>O og Na<sub>2</sub>O), vil frigivelse av OH<sup>-</sup> ioner i porevannet normalt gi en pH verdi i området 12.5 – 13.5. Som det fremgår av Figur 2.1-2.2, vil både slakk- og spennarmeringen da normalt være i passivområdet og være dekket av en passivfilm. Figurene viser imidlertid et potensial/pH område ved pH > ca. 12 hvor passivfilmen er ustabil og hvor aktiv korrosjon kan starte. Dersom oksygen ikke er tilstede, vil reduksjon av hydrogen ifølge ligning 2.11 bli katodereaksjon. Dette vil gi et lavere korrosjonspotensial på stål sammenlignet med forholdene med oksygen tilstede. Dette fremgår også av Figur 2.7.

### 2.3.3 Hulrom og fuktighet

Hulrom kan oppstå i injiseringsmassen og er knyttet til utfelling av vann under utstøpingen og tilhørende reabsorpsjon og/eller fordampning fra injiseringsmasse. Volumet på disse hulrommene er normalt større enn porevolumene. Større hulrom kan også oppstå innvendig i kabelkanaler på grunn av dårlig fylling av volumet. Etter at et hulrom er dannet, vil bl.a. fuktighet, oksygen og forurensningselementer som klorid ioner og sulfat ioner fylle hulrommene. Dette betyr at man ofte antar at eksponert stål i hulrom er/kan være utsatt for atmosfærisk korrosjon. Under slike betingelser vil derfor relativ fuktighet (RH) og temperatur også ha stor betydning. Det må utfelles/kondenseres en fuktig film på stålflaten for at de elektrokjemiske reaksjonene skal starte. Det betyr at stabiliteten av denne fuktige filmen er viktig noe som igjen er avhengig av parametere som relativ fuktighet (RH>75%) og temperatur. En annen mulighet er at utfelt vann under utstøpingen

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	10 av 61

(«bleed water») samles i hulrom og forblir der over lang tid. Dette kan også føre til korrosjon av stålet. Flere korrosjonsskader i strekkarmering på bruer skyldes alvorlig korrosjon på stål i områder med hulrom.<sup>12,13</sup>

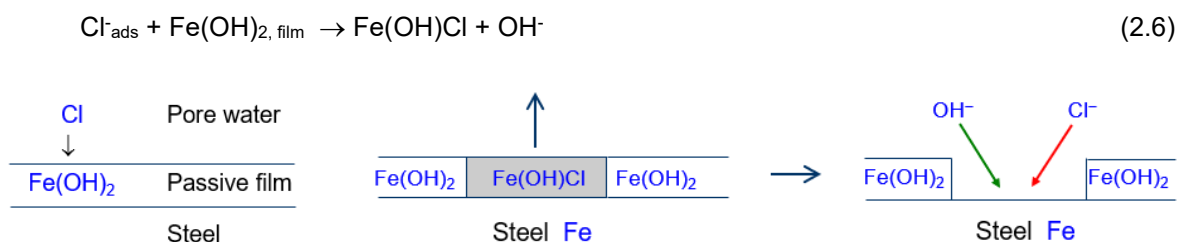
Man bruker ofte betegnelsen «voids» på slike hulrom. Det er viktig å være klar over størrelsesforskjellen på «voids» i betong (små) og i injeksjonsmassen som kan være store dersom manglende fylling er årsaken.

Referanse er også gitt til Kapittel 5.4.

### 2.3.4 Effekt av klorid ioner

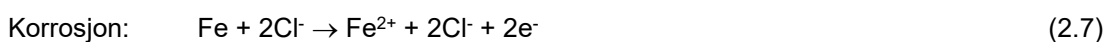
Klorid ioner ( $\text{Cl}^-$ ) – normalt fra salter som  $\text{NaCl}$  og  $\text{CaCl}_2$  - påvirker stabiliteten til den beskyttende passivfilmen på stålet. I tidligere tider benyttet man vann med høyt kloridinnhold ved utstøping noe som førte til høyt kloridinnhold i porevannet. Dette gjør man ikke i dag slik at kloridinnholdet etter utstøping i henhold til spesifikasjoner skal være mindre enn 0.4 vekt% av sement for å hindre armeringskorrosjon.<sup>14</sup> SVV's håndbok sier at  $\text{CaCl}_2/\text{Cl}_2$  forholdet maks. skal være 0.1 vekt% av sement.<sup>16</sup> Et høyere (eller økende) kloridinnhold må derfor skyldes at klorider trenger inn i betongen fra omgivelsene. Når klorider trenger inn i betong ved hjelp av diffusjon og/eller kapillærsug, vil betongen selv kunne binde opp en andel av kloridene, mens resten finnes som kloridioner i poreløsningen.

Tilgang til  $\text{Cl}^-$  ioner som adsorberes på passivfilmen kan føre til at denne nedbrytes lokalt dersom konsentrasjonen er høy nok. Ligning 2.6 viser en aktuell kjemisk reaksjon. I denne reaksjonen er  $\text{Fe}(\text{OH})\text{Cl}$  løselig (*soluble*), mens  $\text{Fe}(\text{OH})_{2, \text{film}}$  ikke er løselig (*insoluble*). Figur 2.6 viser skjematisk hva som skjer på stålfaten når passivfilmen brytes ned.



**Figur 2.6 Skjematisk fremstilling av hvordan tilgang av klorid ioner bryter ned passivfilmen på stål.**

Når passivfilmen er ødelagt og det er  $\text{Cl}^-$  ioner tilgjengelig, vil det være to mulige elektrokjemiske reaksjoner på stålet:

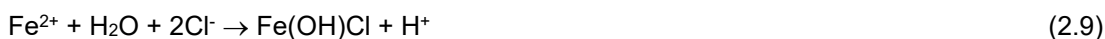


I tillegg må reaksjonene i lign. (2.7) og (2.8) balanseres med en katodereaksjon hvor frigitte elektroner forbrukes. Hvilken reaksjon som dominerer, bestemmes av forholdet gitt av  $[\text{Cl}^-/\text{OH}^-]$ . Forenklet kan man si følgende:


Lavt  $[\text{Cl}^-/\text{OH}^-]$  forhold  $\rightarrow$  filmdannelse

Høyt  $[\text{Cl}^-/\text{OH}^-]$  forhold  $\rightarrow$  korrosjon

Et problem med lokal nedbrytning av passivfilm pga. klorid er etableringen av gropkorrosjon (*pitting*) med elektrokjemisk reaksjon ifølge lign. (2.7). Siden kloridioner ikke forbrukes i denne reaksjonen, vil  $\text{Cl}^-$  - ioner i en grop kunne reagere med vann og danne  $\text{HCl}$  (saltsyre) ifølge lign. (2.9) – (2.10).



Siden pH i en grop kan bli lav som følge av dannelse av  $\text{H}^+$  ioner (lign. 2.9) vil en ekstra katodereaksjon i tillegg til oksygenreduksjonsreaksjonen i lign. (2.2) være aktuell; nemlig reduksjon av hydrogen ifølge lign. (2.11). Dette betyr at korrosjon i en grop vil kunne fortsette å vokse selv om oksygenet i gropa er oppbrukt.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	11 av 61



Kloridioner kan tilføres betong og injeksjonsmasse under produksjonsprosessen gjennom tilsats av ulike kjemikalier og/eller i blandevannet som benyttes. En viktigere kilde i dag er fra salter ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) som brukes for salting av veier og for konstruksjoner eksponert mot sjøvann er sjøvannet også en stor kilde for inntrengning av klorider. Kritisk mengde  $\text{Cl}^-$  ioner for nedbryting av passivfilmen er bl.a. avhengig av pH i elektrolytten i kontakt med stål. Tabell 2.1 viser en sammenheng for armeringsstål publisert av SINTEF.<sup>16</sup> Det må imidlertid kommenteres at dette er en forenkling som kun kan benyttes for overslagsvurderinger.

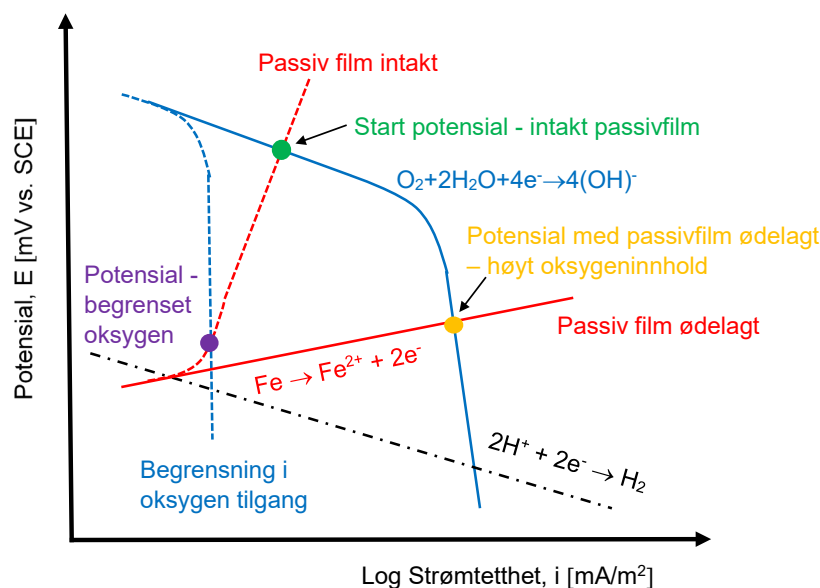
**Tabell 2.1 Sammenhengen mellom kloridinnhold og sannsynligheten for armeringskorrosjon av vanlig armeringsstål.<sup>16</sup>**

Kloridinnhold (vekt% av sement)	Sannsynlighet for armeringskorrosjon
< 0.4	Svært liten
0.4-1.0	Liten
1.0-2.0	Stor
> 2.0	Svært stor

Når vi snakker om kloridinnholdet i en betong (eller injeksjonsmasse) er det viktig å være klar over at vi snakker om både bundet og frie  $\text{Cl}^-$  ioner. Det er kun frie  $\text{Cl}^-$  ioner som kan bryte ned passivsjikt og gi økt korrosjon på stål.

### 2.3.5 Oksygeninnhold


Oksygen er et viktig element i katodereaksjonen ifølge lign. (2.2). Siden betong og injeksjonsmasse inneholder porer og sprekker vil oksygen diffundere inn og normalt være tilstede. Mengden oksygen vil variere. Siden katodereaksjonen er nødvendig for å balansere anodereaksjonen samtidig som reduksjon av oksygen er den viktigste katodereaksjonen - unntatt i groper med lav pH og i områder med innestengt vann (spalter) - vil tilgjengelig mengde oksygen løst i porevann i kontakt med stål eller i fuktig atmosfære i porer/hulrom ha stor betydning for korrosjonshastigheten. Ifølge lign. (2.2) vil oksygen forbrukes under korrosjonsprosessen. Dersom ikke nytt oksygen tilføres, vil normalt dette føre til reduksjon av korrosjonshastigheten over tid. Dette avhenger av om katodereaksjonen er aktiverings- eller diffusjonskontrollert og mengden gjenværende oksygen. Figur 2.7 viser et skjematisk Evans diagram (Potensial – Log Strømtetthet) for korrosjon av stål.



**Figur 2.7 Evans diagram for stål i en væske hvor oksygeninnholdet varierer. På figuren er indikert ulike potensialnivå i avhengighet av passivfilm og oksygen.**

Figuren viser hvordan anodiske og katodiske overspenningskurver endres når passivfilmen nedbrytes (anodisk kurve) og når oksygeninnholdet endres (katodisk kurve). Resultatet er at korrosjonspotensialet ( $E$ )



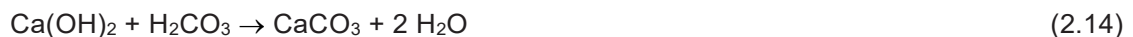
	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	12 av 61

på flaten vil endres. I utgangspunktet med en intakt passivfilm vil man ha et relativt høyt korrosjonspotensial (•). Når passivfilmen brytes ned, vil korrosjonspotensialet blir mer negativt (◐). Tilsvarende effekt vil en få ved redusert oksygeninnhold (◐) hvor man også kan se at korrosjonsstrømtettheten (og dermed korrosjonshastigheten, se lign. (2.16)) reduseres med redusert oksygeninnhold.

Ved eksponeringsforsøk ser man ofte at OCP blir mer positivt etter eksponeringsstart (se Figur 5.13) for å så å stabiliseres på et høyere potensial. Dette skyldes normalt en endring av passivfilmen på overflaten (se Kapittel 2.2.1). Dersom kritiske betingelser er tilstede (f.eks. kloridinnhold), vil økningen i korrosjonspotensial etter en stund føre til at groppkorrosjonspotensialet,  $E_{Pit}$ , nås. Det betyr at passivfilmen nedbrytes og groppkorrosjon starter. Resultatet er at OCP synker til et lavere potensial.

### 2.3.6 Karbonatisering

Luft inneholder ca. 0.038%  $CO_2$ . Når betong kommer i kontakt med luft starter en aldriingsprosess som kalles karbonatisering. Under denne prosessen løses  $CO_2$  fra luften i porevannet i betongen. Karbonatet som dannes fra karbonsyren ( $H_2CO_3/HCO_3^-/CO_3^{2-}$ ), reagerer med oppløst kalsium ( $Ca^{2+}$ ), slik at  $CaCO_3$  felles ut i porevannet, se lign. (2.12-2.14).



Karbonatiseringsprosessen binder på den måten  $CO_2$  fra lufta kjemisk ved at stabilt  $CaCO_3$  dannes sammen med økt  $H^+$ -ion konsentrasjon i porevannet. Resultatet er at pH i porevannet ofte synker til under 10. Karbonatiseringsdybden øker med tiden og er sterkt avhengig av relativ fuktighet (RH). Ifølge litteratur er hastigheten høyest i området 50-70% RH.<sup>18</sup> Når karbonatiseringsprosessen når stålet i betongen vil den beskyttende passivfilmen på flaten brytes ned pga. redusert pH i vannet og aktiv korrosjon starter. I motsetning til klorid induert korrosjon hvor angrepet ofte har form av groppkorrosjon, vil det her være mer uniform korrosjon som skjer på flaten. Korrosjonshastigheten (mm/år) er også lavere enn korrosjon pga. klorider. Men over en lang levetid kan også korrosjonsangrepet forårsaket av karbonatisering bli stort og påvirke integriteten av konstruksjonen. Siden spenntrådene er montert inne i et tett kabelrør, er det liten sannsynlighet for at karbonatisering har foregått i injeksjonsmassen i kabelrørene.

### 2.3.7 Galvanisk celle

Makrocelle (galvanisk) korrosjon er en korrosjonsform som oppstår når anodisk og katodisk reaksjon skjer på ulike steder på en metalloverflate.<sup>19</sup> Figur 2.8 viser et eksempel på armeringskorrosjon av stål i betong. I praksis vil alltid anodisk og katodisk reaksjon foregå på ulike steder, men ved uniform korrosjon flytter ofte de to reaksjonene seg over hele flaten. Om det etableres effektive makroceller på armering i betong avhenger i sterk grad av elektrisk ledningsevne i elektrolytten som omslutter stålet. Kravet til å etablere en makrocelle er metallisk kontakt og elektrolytisk ledningsevne i miljøet (betong/injeksjonsmasse) rundt stålet mellom anodisk og katodisk område.


En makrocelle vil etablere en form for galvanisk korrosjon hvor anodereaksjonen (aktiv korrosjon) med anodisk strømtett,  $i_{AA}$ , vil foregå i et lite lokalt område (areal  $A_A$ ), mens katodereaksjonen med katodisk strømtett,  $i_{KK}$ , (passivt område) foregår i området omkring (areal  $A_K$ ). Effektivt katodeareal avhenger av elektrisk ledningsevne i miljøet som omslutter stålet. Jo, høyere elektrisk ledningsevne, desto større effektivt katodeareal relativt til anodearealet. Dersom  $A_K \gg A_A$  etableres en galvanisk celle som kan gi meget høy lokal korrosjonshastighet,  $v_{korr}$ , i  $A_A$ . Dersom vi forutsetter at all anodisk aktivitet skjer i området  $A_A$  uten oksygen, mens all katodisk aktivitet skjer på  $A_K$ , kan lign. (2.15) benyttes for strømbalansen i den galvaniske koplingen.

$$i_{AA} \cdot A_A = i_{KK} \cdot A_K \rightarrow i_{AA} = i_{KK} \cdot [A_K/A_A] \quad (2.15)$$

Denne ligningen er en forenkling siden den forutsetter at anodisk strømtetthet,  $i_{AK}$ , på katodeflaten og katodisk strømtetthet,  $i_{KA}$ , på anodeflaten kan neglisjeres.

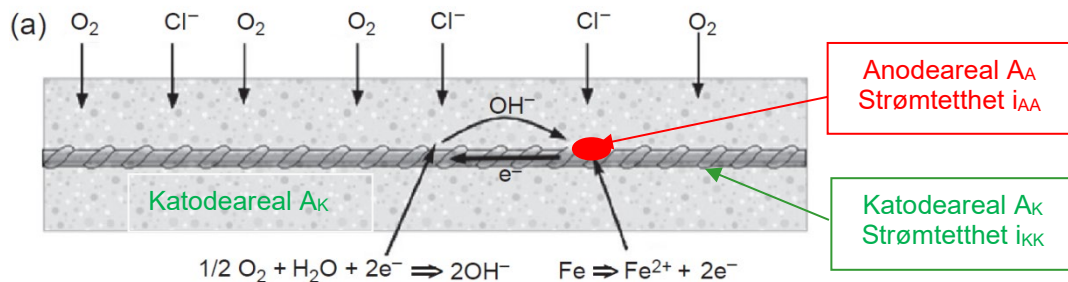
Korrosjonshastigheten (mm/år) i det aktive området kan bestemmes ut fra Faradays lov. For korrosjon av stål gjelder lign. (2.16).

$$v_{korr} = 0.00116 \cdot i_{AA} \quad (2.16)$$

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	13 av 61

når:  $[i_{AA}] = \text{mA/m}^2$

Oksygeninnholdet vil påvirke katodestrømtettheten  $i_{KK}$  på katodearealet som vist i Figur 2.7. Tilgangen på  $\text{Cl}^-$  og spesielt  $\text{OH}^-$ -ioner er viktig for elektrisk ledningsevne og dermed hvor stort effektivt katodeareal man har.



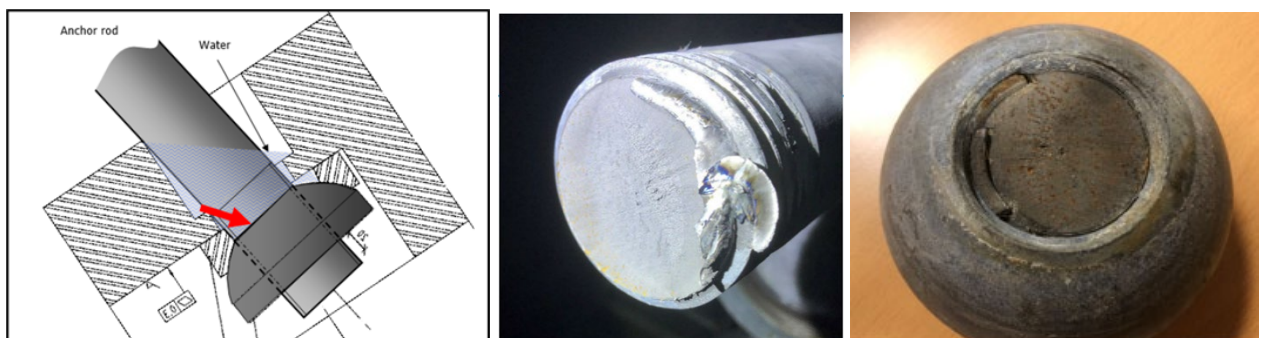
Figur 2.8 Skisse av galvanisk celle (makro celle) for korrosjon på armeringsstål i betong.<sup>19</sup>

### 2.3.8 Spenningskorrosjon og hydrogensprøhet<sup>20</sup>


Spenningskorrosjon (engelsk: Stress Corrosion Cracking (SCC)) kan skje når tre betingelser er oppfylt samtidig: et materiale som i) er utsatt for spenningskorrosjon, ii) har strekkspenninger, og iii) lokal korrosjon er initiert på metallet. Spenningskorrosjon vil etter en initieringsperiode, ofte resultere i rask sprekkvekst gjennom materialet – enten intergranulært (langs korngrensene) eller transgranulært (gjennom korn). Spenningen hvor spenningskorrosjon skjer, er normalt vesentlig lavere enn bruddspenningen til materialet.

Hydrogensprøhet (Hydrogen embrittlement (HE)) fører også til sprekker i materialet og krever på samme måte som for SCC tilstedeværelse av tre samtidige betingelser: et materiale som i) er utsatt for hydrogensprøhet, ii) har strekkspenninger, og iii) hydrogen er til stede i materialet. For denne nedbrytingsformen – som ofte også kalles hydrogenindusert sprekkning HSC - er lokal korrosjon erstattet med hydrogen. Hydrogen kan være et resultat av korrosjon (katodereaksjonen lign. (2.11) i miljø uten oksygen) eller hydrogen kan f.eks. bli introdusert i materialet under produksjonsprosessen. Katodisk beskyttelse kan også føre til hydrogensprøhet og vil på samme måte som SCC resultere i rask inter- og/eller transgranulær sprekkvekst i materiale etter at en sprekk har startet. Figur 2.9 viser brudd i en forankringsbolt fra Hålogaland bru. Skadene skjedde på en galvanisert bolt og årsaken til bruddet var sannsynligvis hydrogen indusert sprekkning som følge av atomært hydrogen generert under korrosjon mellom stål og sink (fra galvaniseringen).

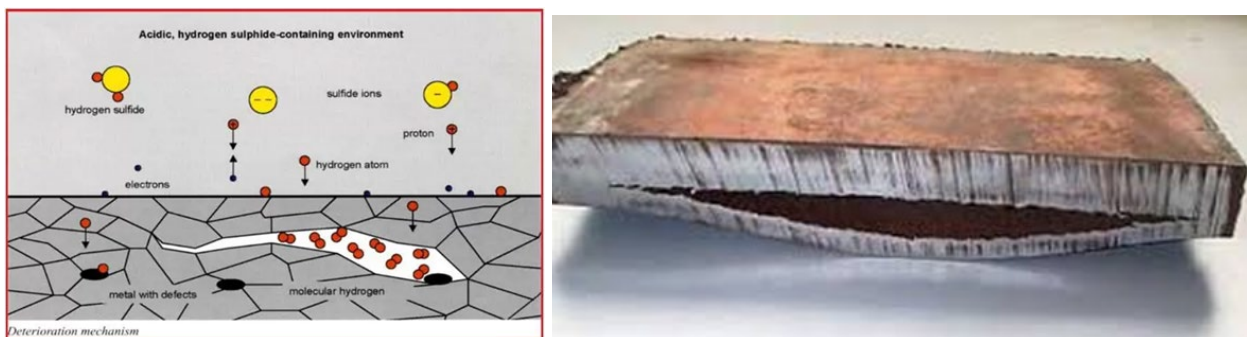
Forskjellen mellom SCC og HE er mekanismene ved sprekkutvikling. Mens utviklingen av en sprekk for SCC skyldes samvirkningen mellom lokal korrosjon i sprekkfronten og lokal spenning, skyldes utviklingen av sprekkene ved HE at atomært hydrogen svekker de mekaniske bindingene i metallgitteret. Dette kombinert med strekkspenningen fører til at en sprekk kan utvikles og vokse. Begge sprekkformene gir sprø brudd og lite sammentrekning («nekking») i bruddområdet. SCC og HE er kun aktuelle nedbrytingsformer for spennarmering.



Figur 2.9 Brudd i galvaniserte forankringsbolter på Hålogaland Bru. Bruddene ble oppdaget under installasjonsfasen av brua.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	14 av 61

Det finnes også en form for hydrogensprøhet som ikke krever tilstedeværelse av ytre strekkspenninger – kalles Hydrogenindusert sprekking (HIC). Dersom det eksisterer lokale små hulrom («voids») eller defekter i materialet, kan absorbert atomært hydrogen i materialet diffundere til disse hulrommene og rekombineres til hydrogengass,  $H_2$ . Etter hvert vil det bygges opp et høyt trykk inne i hulrommet. Når lokale spenninger i materialet pga.  $H_2$  trykket overstiger bruddspenningen, vil en sprekke starte å vokse som vist i Figur 2.10. Denne nedbrytingsformen er også aktuell for spennarmeringen innstøpt i kabelrør.



**Figur 2.10** Hydrogen indusert sprekking (HIC) i et materiale. Bilde til venstre viser at et  $H_2S$  holdig miljø kan være kilde til absorpsjon og diffusjon av atomært hydrogen til hulrom/defekter i materialet hvor hydrogenatomene rekombinerer til hydrogengass.

De fleste metalliske materialer er utsatt for hydrogensprøhet når riktige betingelser (se ovenfor) er til stede. Sannsynligheten for initiering av hydrogensprøhet varierer imidlertid med materialtype og mikrostruktur. For stålmaterialer øker sannsynligheten med styrken i materialet. En tommelfingerregel sier at stål med bruddstyrke under 500-700 MPa har stor motstand mot hydrogensprøhet. Ved økende bruddstyrke øker sannsynligheten og når bruddstyrken overstiger 1000 MPa er det meget stor sannsynlighet for hydrogeninduserte sprekker og brudd når stålet inneholder atomært hydrogen i gitter og vakanser. Siden spenntråd i betong normalt har en bruddgrense som er høyere enn 1500 MPa (for Herøysund bru er bruddgrensen 1770 MPa), er det en mulighet for at hydrogeninduserte sprekker og brudd kan oppstå dersom spenningsnivået er over en kritisk grense.

### 3 BAKGRUNN HERØYSUND BRU

#### 3.1 Informasjon fra byggefasen


Kapittel 2.1.2 inneholder informasjon om og bilde/skisse av Herøysund bru. Dette kapittelet inneholder informasjon som kan ha betydning for strukturell integritet av brua. Det er spesielt en hendelse som er kommentert og dokumentert.<sup>21-25</sup> I arkivmaterialet fra Aas-Jacobsen<sup>24</sup> er denne hendelsen beskrevet slik: «Broen ble støpt på fast stillas. Først ble den midterste del av hovedspennet støpt og kablene i bjelkene spent opp. Deretter ble kablene i de øvrige bjelkene og broplaten lagt på plass. .... Planen var å spenne kablene i broplaten først, deretter skulle resterende kabler i bjelken spennes fra landsidene. Kablene i broplaten ved den ene søylen ble spent opp. Tolv (12) timer etter oppspenningen smalt det, og all betongen bak de aktive forankringene ble knust. Det ble store deformasjoner og all spennkraft forsvant.»

Det var vanskelig å finne en entydig årsak til bruddet, men følgende muligheter ble lansert:

1. Kvaliteten på betongen som ble benyttet i forankringssonen, var dårligere enn antatt.
2. På grunn av den store konsentrasjonen av kabler i broplaten ble trykkspenningen for høye i området bak forankringene.
3. Armeringen som skulle dekke spaltstrekket, ble ikke plassert korrekt.

I arkivet har SVV også funnet et bilde av frostskaadet spennarmering på Herøysund bru fra 1992, se Figur 3.1. Bilde viser at kabelkanalen (trekkørret) er frosset i stykker på oversiden av brudekket. Bilde viser at spenntråden dekker kun en liten del av kabelkanalen og at det er lite (ingen) injeksjonsmasse å se inne i kabelkanalen.



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	15 av 61



Figur 3.1 Bilde av frostsprengning av kabelkanal (oversiden) på Herøysund bru – fra 1992.

## 3.2 Informasjon fra relevante inspeksjoner og undersøkelser


### 3.2.1 Inspeksjoner utført av Multiconsult (2017) og Dekra (2020)

I 2017 utførte Multiconsult en inspeksjon av Herøysund bru på oppdrag fra SVV.<sup>25</sup> Formålet med denne inspeksjonen var å kartlegge betongens kloridnivå- og kloridmengder, samt elektrokjemisk korrosjonspotensial på selve armeringen i brua. Undersøkelse av spennsystemet var ikke en del av inspeksjonen. Inspeksjonen viste at det var nødvendig å iverksette tiltak på brua siden det ble registrert forholdsvis høye verdier av klorider (opp til 1.89 wt% Cl<sup>-</sup> i 2-10 mm dybde og min. 19 mm overdekning) i enkelte områder. Dette er viktig bakgrunnsinformasjon for vurderingen av årsaken(e) til korrosjonsangrep på spennarmeringen.

I januar 2020 gjennomførte Dekra en inspeksjon av spennsystemet i brua.<sup>5</sup> Utgangspunktet for inspeksjonen var at SVV under arbeid med å reparere betong på brua hadde avdekket korrosjonsskader og hulrom inne i kabelkanalene på den etteropspente armeringen i oktober 2019 på noen områder hvor injeksjonsmassen ikke fylte hele volumet til kabelkanalen. Oppgaven til Dekra var definert som; *Use Non Destructive Testing (NDT) to determine voids in the cable ducts in selected areas pointed out by the constructor*. Hensikten var å dokumentere tilstanden på spennarmeringen i bruas mest kritiske områder for å beregne bruas bæreevne i dag. Gjennom bruk av ulike NDT teknikker pluss visuell observasjon etter fjerning av betong inn til kabelkanal på fire (4) steder, ble det konkludert med at:

- Mye injeksjonsmasse mangler i deler/områder av kabelkanalene i bruas mest kritiske snitt.
  - Lengder på opptil 6 m med manglende injeksjonsmasse ble registrert.
- Hulrom er en indikasjon på at det kan foregå alvorlig korrosjon.
- Et antatt tråbrudd ble registrert i en kabel.
- Stor variasjon i korrosjonsangrep på spenntråder på ulike steder på brua.
- De benyttede NDT-metodene dokumenterer hulrom, men kan ikke lokalisere korrosjon.
- Ved visuell kontroll ble funn fra bruk av Ultralyd og Impact Echo, bekreftet.

Bildene i Figur 3.2 viser to eksempler på visuell kontroll av kabelkanal og spennspenninger i områder hvor funn ble detektert ved hjelp av Ultralyd og Impact Echo. Området i venstre bilde ble fra NDT undersøkelsen vurdert til å være hulrom (inne i kabelkanalen), mens området i høyre bilde ble vurdert å være uten hulrom. Dette samsvarer godt med det som ble dokumentert med visuell kontroll etter at betongen var fjernet. Den visuelle kontrollen dokumenterte også at både kabelbane og spenntråd var utsatt for korrosjon i området med hulrom (manglende injeksjonsmasse), mens det ikke var tegn til korrosjon (synlig brun rust) i det andre området hvor injeksjonsmassen fylte hulrommet i kabelkanalen.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	16 av 61



**Figur 3.2** Kabelkanal og spenntråd – Venstre: Manglende injeksjonsmasse og korrosjon på kabelkanal og spenntråd. Høyre: Fylt med injeksjonsmasse, ingen synlig korrosjon på kabelkanal eller spenntråd.<sup>5</sup>

### 3.2.2 Analyse av injiseringsmasse utført av SINTEF etter inspeksjonen i oktober 2019

SINTEF mottok injiseringsmasse (65 gram) fra innsiden av kabelkanalen (Prøvefelt 3, Figur 3.3) etter en inspeksjon utført av SVV i oktober 2019.<sup>26</sup> Etter homogenisering, ble følgende undersøkelser gjennomført:

- Klordanalyser
- Elementbestemmelse (XRF-analyse)
- Tynnslipanalyse - mikroanalyse av et fluorescensimpregnert, polert tynnslip undersøkt i polarisasjonsmikroskop påmontert UV-filtre.

De viktigste resultatene fra rapporten kan oppsummeres som følger:

#### Kloridinnhold i % Cl av tørr masse

- Prøve 1: 0.036
- Prøve 2: 0.026

*Kommentar gitt i rapporten:<sup>26</sup>*

*Uten at vi kjenner kloridinnholdet til sementen som ble benyttet, vil vi anta at denne verdien er ubetydelig høyere enn bakgrunnsnivået for injiseringsmassen. Det er derfor ingenting som indikerer bruk av sjøvann eller at klorider er tilført i ettertid.*

#### Elementanalyse (Tabell 3.1)

**Tabell 3.1** Elementanalyse av injiseringsmasse.<sup>26</sup>


PRØVE MERKET	ELEMENT (vekt%)									
	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Biter av injiseringsmasse	31.7	19.6	10.3	2.71	0.86	0.86	0.436	0.220	0.122	0.042
«Grusaktig» masse	23.2	24.4	16.5	4.22	0.97	0.90	0.548	0.233	0.114	0.051

*Kommentar gitt i rapporten:<sup>26</sup>*

*Forholdet mellom kalsium (Ca) og silisium (Si) i prøven av bitene av injiseringsmassen er i et område som er naturlig for sement. Jerninnholdet er høyt, og da spesielt i den «grusaktige» massen. Jernspon i prøven har trolig bidratt her. Det kan heller ikke utelukkes at korrosjonsprodukter fra spennkablene har «vandret» inn i injiseringsmassen, og på den måten bidratt til det høye jerninnholdet.*

#### Tynnslipanalyse

*Kommentarer gitt i rapporten:<sup>26</sup>*

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	17 av 61

- Analysen av bitene av injiseringsmassen viser at portlandtinnholdet er svært høyt.
- Forskjell i porøsitet og kornstørrelse mellom injiseringsmassen i den antatte kontaktsonen mot spennkablene i forhold til lenger ut kan skyldes separasjon i massen, eventuelt at injiseringsmassen er sprøytet inn på ulike tidspunkt, og da med litt forskjellig sammensetning.
- Injiseringsmassen synes å være svært porøs med meget høyt vann/bindemiddelforhold, og det antas at blandingen har vært svært tyntflytende.

### 3.2.3 Inspeksjon og prøveuttak utført av SVV i august 2020

En viktig del av dette oppdraget var å gjennomføre en inspeksjon på Herøysund bru og foreta prøveuttak på tre forhåndsbestemte prøvefeld. Prøvefeltene var i områder som tidligere var undersøkt og dokumentert i Dekra rapporten.<sup>5</sup> Figur 3.3 viser en skisse av Herøysund bru med angivelse av de tre aktuelle områdene merket 1, 2 og 3 (senere kalt Prøvefelt 1, 2 og 3) – se også Figur 2.2. Prøvefelt 1 og 3 var på vestsiden av brua med en avstand på ca. 1 meter. Selv om betongen i områdene tidligere var fjernet for å komme inn til kabelbane/spennråd, var områdene nå dekket til med betong. I Vedlegg 1 er originaltegninger av kabelplassering i hovedbrokar på Herøysund bru vist. Prøvefeltene er alle på kabelbane 2 (Kabelitt 2N, 2S), men alle er ikke på samme kabelkanal. Kabelbane 2 er gjennomgående fra vestre pilar til østre pilar, men består av tre (3) individuelle pre-fabrikerte kabelkanaler med spennarmering innstøpt i injeksjonsmasse (referanse til Kapittel 2.1.2). De to kabelkanalene på hver side av brua er såkalte RS-kanaler som betyr at de har et aktivt anker og et passivt anker (midtre bilde i Vedlegg 1, Figur 1-1). Kabelkanalen i midten har betegnelsen RR som betyr at den har et aktivt anker i hver ende. Spenntrådene i de tre kabelkanalene har ikke direkte kontakt, men de er montert slik at samme kraft overføres gjennom alle tre kabelkanalene. Følgende ble lagt til grunn for utvelgelse av prøvefeldene:<sup>27</sup>

#### Prøvefelt 1

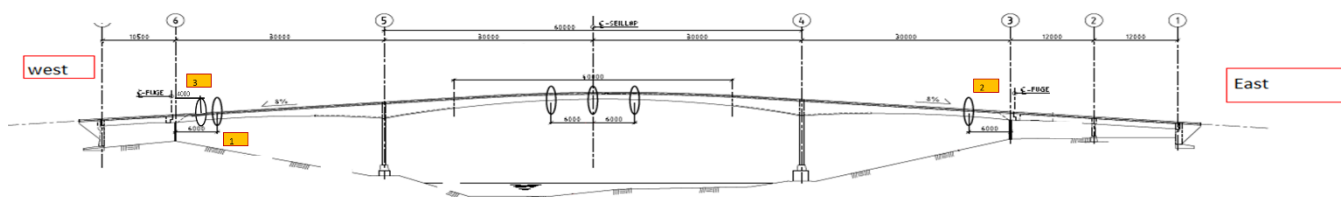
Antatt sted for oppdaget skade ved rehabiliteringsarbeidene i oktober 2019.

#### Prøvefelt 2

Sted hvor det i oktober 2019 ble registrert og antatt brudd i spenntråder som med letthet kunne bevegtes med skrujern.

#### Prøvefelt 3

Stedet hvor det ble registrert stor korrosjonsskade på kabel i oktober 2019.




**Figur 3.3 Skisse av Herøysund bru hvor områdene for uttak av injiseringsmasse og prøver av tråd og kabelbane er tatt ut. Avstanden mellom Prøvefelt 1 og 3 er ca. 1 meter.**

Planleggingen av inspeksjonen ble gjennomført i et samarbeid mellom MTP/NTNU og SVV. Dette inkluderte både forarbeidet som ble utført av en entreprenør engasjert av SVV, og etterfølgende inspeksjon og prøveuttak. SVV hadde ansvaret for at nødvendig stillas var på plass og at betongen ble fjernet i de tre utvalgte områdene slik at kabelbane/spennråd ble tilgjengelig for inspeksjon og uttak.

Følgende oppgaver ble på forhånd avtalt gjennomført under inspeksjon/prøveuttaket:

1. Foto/video/endoskopi dokumentasjon av de tre aktuelle områdene med fokus på å dokumentere tilstand på kabelbane, spennråd og injeksjonsmasse.
2. Skriftlig dokumentasjon/beskrivelse av spesielle observasjoner for kabelbane, spennråd og injeksjonsmasse (sammen med pkt. 1).
3. Uttak av biter av spennråd og kabelbane for nærmere analyse i laboratoriet – i alle 3 områdene hvis mulig.
4. Uttak av injeksjonsmasse for senere analyse.



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	18 av 61

Samtidig ble det etablert en prosedyre for merking, lagring, transport og lagring av prøvemateriale etter uttak.

- A. Prøvebiter av kabelbane, spenntråd og injeksjonsmasse skal tas direkte ut og konserveres/lagres uten noen form for rengjøring.
- B. Biter av spenntråd og kabelbane, legges i plastposer som lukkes igjen/forsegles og merkes med aktuelt prøvefelt. Hver pose skal kun inneholde en type prøveuttak (kabelbane, spenntråd eller injeksjonsmasse).
- C. En ståloverflate som eksponeres mot luft vil oksidere siden luft alltid inneholder fuktighet. Dette vil/kan endre sammensetningen av passivfilmen/oksidlaget på eksponert ståloverflate straks betongen ble fjernet. Dette aksepteres og «silica gel» (tørkemiddel) vil ikke bli benyttet i lagringsposene.
- D. Prøveposene transporteres til NTNU hvor de lagres i kjøleskap før de undersøkes nærmere.

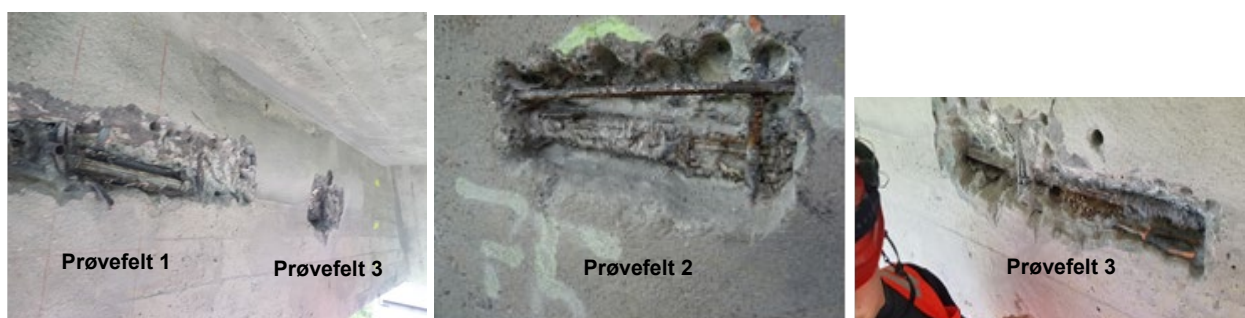
Inspeksjonen og prøveuttaket skulle i utgangspunktet gjennomføres 11.-12.08.2020 av Roy Johnsen (MTP/NTNU), Øystein Antonsen (student NTNU) og Lise Bathen (SVV). På grunn av Covid-19 situasjonen og begrensninger i reiseaktiviteten for NTNU ansatte i denne perioden, ble inspeksjonen og prøveuttaket gjennomført uten at Roy Johnsen deltok.

Arbeidet ble gjennomført i henhold til utarbeidet plan (punkt 1 – 4 over) og arbeidsprosedyre (punkt A – D over). Figur 3.4 viser deler av forarbeidet med boring/meisling av betong for å komme inn til kabelbane og spenntråd. Figuren viser også en plastpose (med lynlås) som ble benyttet til lagring av injeksjonsmasse eller metallprøve for senere undersøkelse i laboratoriet.




**Figur 3.4** Venstre: Eksempel på søm-boring etterfulgt av meisling i områder for uttak. Høyre: Plastpose for lagring av injiseringsmasse eller metallprøver.

Figur 3.5 viser en oversikt over de tre prøvefeltene som ble inspisert etter at betong var fjernet og kabelkanal/spenntråd var eksponert. Figur 3.3 viser den globale plasseringen av Prøvefeltene 1, 2 og 3.



**Figur 3.5** Foto av prøvefeltene som ble inspisert.



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	19 av 61

Alle bildehenvisningene i det etterfølgende er relatert til Vedlegg 2 - 5 og hvor henvisningen er beskrevet som: (bilde nummer).

### **Prøvefelt 1**

Noen bilder fra denne lokasjonen er vist i Vedlegg 2. I denne lokasjonen er det registrert korrosjonsangrep i form av brun rust på trådene (1-15). Ut fra bildene er det en tendens til at det er mer alvorlige korrosjonsangrep inkludert groper på spenntråder nær bunnen av kabelkanalen (1-3, 1-10, 1-16). Dybden og utstrekningen på gropene er det vanskelig å kvantifisere siden det ikke ble tatt med noen prøver av korrodert tråd fra dette området. Men angrepet på en av trådene (1-10) antyder en dyp grop med en utstrekning (lengde) på ca. 2 X trådens diameter. På enkelte bilder fremgår det at noen spenntråder er dekket av fastsittende injiseringsmasse og at det har hindret initiering av korrosjon på tråden (1-9). Nå må det imidlertid tilføyes at siden belegget dekker overflaten er det ikke mulig å si noe om tilstanden på stålet under belegget. På et av bildene er det gjennom bruk av endoskop dokumentert korrosjonsprodukt i form av «sorte perler» (1-12). Prøver av dette spesielle korrosjonsproduktet ble tatt med for senere analyser.

Det er få bilder som dokumenterer status på kabelkanalen – både utvendig og innvendig. Enkelte bilder (1-6, 1-7, 1-8) viser at injeksjonsmasse er festet innvendig i kabelkanalen i hele rørets omkrets. I noen områder er imidlertid injeksjonsmassen borte og brun rust kan observeres i disse områdene. I et annet bilde (1-5) vises også kabelkanalen, men her ser røret ut til å ha en blank overflate innvendig. Utvendig overflate på kabelkanalen vises på et bilde (1-15). Dette bilde indikerer at utvendig overflate er blank.



**Figur 3.6 Injiseringsmasse fra Prøvefelt 1.**


Inspeksjonen viser at deler av hulrommet innvendig i kabelkanalen ikke er fylt opp med injiseringsmasse (1-6, 1-7, 1-8, 1-9, 1-11). Lise Bathen peker i sin rapport fra inspeksjonen (Vedlegg 5) på at selv om det mangler injiseringsmasse i deler av hulrommet enkelte steder, virker det som om det er tørt (1-8). Samtidig dokumenteres det at konsistensen på injiseringsmassen varierer innenfor det inspiserte området – fra normal tørr injiseringsmasse til frostsprengt/ikke frostsprengt masse. Figur 3.6 viser bilde av injiseringsmasse fra Prøvefelt 1.

Det er lite informasjon om innstøpingen av kabelkanalen i betongen. Et bilde (1-15) viser imidlertid at det i øvre kant er en glippe mellom kabelkanal og betong. Muligens har dette skjedd under utmeislingen av betongen.

### **Prøvefelt 2**

Noen bilder fra denne lokasjonen er vist i Vedlegg 3. Etter meislingen ble det observert (2-2) at kabelkanalen var trykt sammen noe som indikerer at hulrommet ikke var fylt opp med injiseringsmasse. Etter at kabelkanalen var brukket opp, viste det seg at områder på enkelte spenntråder var dekket av korrosjonsprodukt (2-4), mens andre deler var dekket av fastsittende injiseringsmasse (2-7). Spesielt i et område på toppen av kabelen var spenntråden utsatt for større korrosjonsangrep (2-4, 2-16). Her var også kabelkanalen utsatt for mye korrosjon – både fra utsiden og innsiden.

Bildene tyder på at innvendig korrosjon på kabelkanalen varierte lokalt. Dette dokumenteres ved å sammenligne bildene 2-4 og 2-16. Spesielt 2-2 viser store områder hvor kabelkanalen er blankt innvendig.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	20 av 61

Som nevnt ovenfor, viser bilder (2-16) at utvendig korrosjon også er detektert på lokale områder utenpå kabelkanalen, mens andre områder er matte/blanke (2-5).

På denne lokasjonen ble det avdekket et armeringsstål (slakkarmering) foran kabelkanalen (2-7, 2-13). Områder av dette armeringsstålet var også utsatt for noe korrosjon. Stålet var i hovedsak intakt og kun lokale overflateangrep inkludert noen små groper ble registrert.

En spenntråd ble kappet for undersøkelse i laboratoriet. Etter at den ble kappet i en ende, trakk den seg tilbake ca. 20 mm (2-8). Deretter ble en lengde på 350 mm av spenntråden kappet av for transport til NTNU for nærmere analyser av korrosjonsprodukt og korrosjonsangrep (2-19). I dette området ble det også oppdaget løse spenntråder (2-15, 2-16) som kunne beveges med et skrujern.

Sammentrykningen av kabelkanalen etter meisling dokumenterte at injiseringsmassen ikke fylte hele volumet (2-2). Samtidig viste inspeksjonen at injiseringsmassen var OK på noen steder og at den beskyttet tråden mot korrosjon, men at overflater som ikke var dekket av injiseringsmasse var utsatt for korrosjon (2-5). Figur 3.7 viser et bilde av injeksjonsmassen fra to områder ved Prøvefelt 2.




**Figur 3.7** Injeksjonsmasse fra to steder ved Prøvefelt 2.

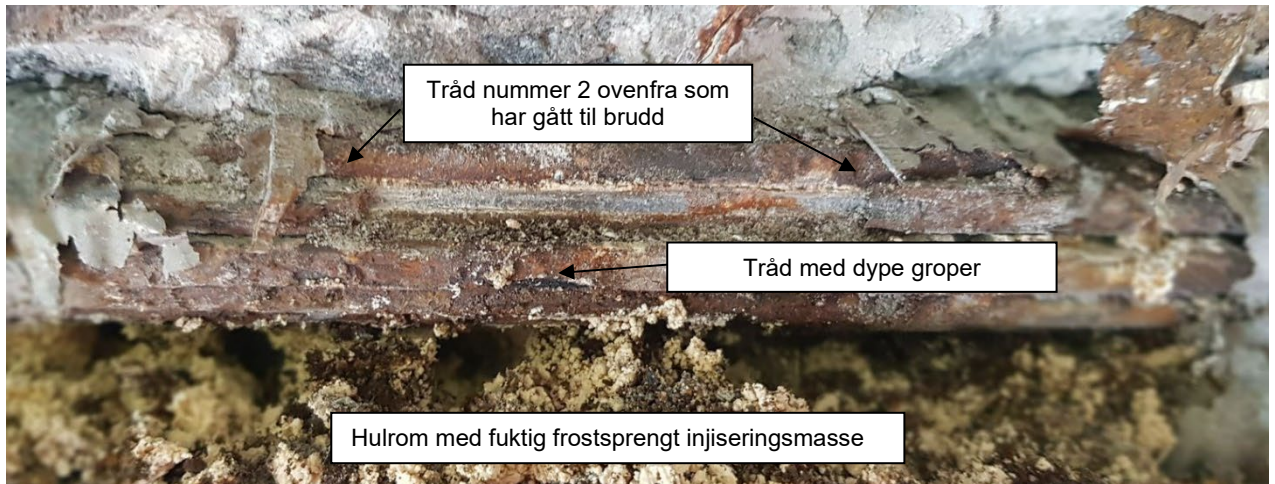
### **Prøvefelt 3**

Noen bilder fra denne lokasjonen er vist i Vedlegg 4. For denne lokasjonen ble det valgt å foreta en nærmere undersøkelse siden det i dette området ble registrert alvorlige korrosjonsangrep på spenntråden ved inspeksjonen i oktober 2019. Disse funnene ble også dokumentert ved denne inspeksjonen. Her ble også en spenntråd som hadde gått til brudd (3-2, 3-8, 3-22, 3-23), oppdaget. Dette bruddet var i tråd nummer 2 ovenfra. Figur 3.8 viser et bilde av dette området. Som det fremgår av bildet, førte trådbruddet til en avstand på 80-90 mm mellom bruddflatene (ut fra bildet). Biter av tråden med brudd ble kappet – begge ender – sammen med en bit av nærmeste spenntråd. Disse bitene vil bli undersøkt nærmere for karakterisering av korrosjonsangrep, sammensetning av korrosjonsprodukt og analyse av bruddflater/-områdene (se Kapittel 4.1). Bildene fra lokasjonen viste overflatekorrosjon på trådene noe som fremgår av Figur 3.8. Det var også en tendens til mer korrosjon på tråd i bunnen av kabelen. Men, det er likevel viktig å merke seg at tråden med brudd var plassert mot toppen av kabelkanalen og ikke i bunnen.

For kabelkanalen ble det dokumentert at innvendig overflate var utsatt for alvorlige korrosjonsangrep (3-4, 3-6), mens utvendig overflate var blank/grå uten spesielle tegn til korrosjon (3-5, 3-6, 3-7). Likevel var kabelkanalen ødelagt/i biter (3-6, 3-7).

Også på denne lokasjonen ble det avdekket et armeringsstål foran kabelkanalen (3-3). På dette armeringsstålet kunne en ikke observere noe brun rust.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	21 av 61



**Figur 3.8 Spenntråd med brudd og andre spenntråder med dype korrosjonsgroper (3-2).**


Prøver av injiseringsmasse 20 cm mot øst for denne lokasjonen ble tatt ut under inspeksjonen i oktober 2019 og sendt til SINTEF for analyse<sup>26</sup> – se også Kapittel 4.2. Det var tydelig at konsistensen av injeksjonsmassen i dette området varierte; i) fra tørr til fuktig, og ii) godt fungerende til frostskaadet. Fuktig frostskaadet injiseringsmørtel ble funnet i området hvor en spenntråd var gått til brudd, se Figur 3.8. Prøver av fuktig injeksjonsmasse fra dette området ble tatt med for nærmere analyse hos SINTEF. Inspeksjonen dokumenterte også dårlig fyllingsgrad (3-6, 3-7). Samtidig ble det dokumentert at i enkelte deler av denne lokasjonen var det liten heft mellom ytre spenntråder og injeksjonsmassen (3-8), mens det på et annet bilde (3-12) fremgår at det var bedre heft i et annet område. Dette tyder på varierende virkning/kvalitet innvendig i kabelkanalen. De samme bildene indikerer bedre heft mellom spenntråder inne i kabelkanalen.

### **Oppsummering av resultater etter de visuelle undersøkelsene på brua**

Med utgangspunkt i de visuelle undersøkelsene kan følgende konklusjoner trekkes:

1. Spenntråden er utsatt for korrosjon dersom injeksjonsmassen ikke fungerer iht. spesifikasjon og ikke fyller hulrommet mellom kabel og kabelkanal.
2. Til dels alvorlige korrosjonsangrep er funnet på spenntråder i alle de tre undersøkte Prøvefeltene. Både generell korrosjon og gropkorrosjon er funnet. Visuelle observasjoner tyder på mer korrosjon nær bunnen av kableen enn på toppen. Prøver av spenntråd er tatt ut på to lokasjoner. Disse vil bli undersøkt i laboratoriet for bedre dokumentasjon av korrosjonsangrepene (se Kapittel 4.1).
3. I en lokasjon ble det funnet en spenntråd som var gått til brudd. Årsaken kan være korrosjon noe som vil bli undersøkt i laboratoriet.
4. Injiseringmassen hadde ulik konsistens både innad i lokasjonene og mellom lokasjonene. I den lokasjonen hvor de mest alvorlige korrosjonsangrepene ble observert (inkludert trådbrudd), var injiseringsmassen fuktigere (visuelt vurdert) og med en annen konsistens enn i de øvrige områdene. Denne massen vil bli analysert nærmere av SINTEF (se Kapittel 4.2).
5. Fyllingsgraden av injeksjonsmasse varierte og enkelte steder ble det observert store hulrom med manglende injeksjonsmasse. I enkelte områder uten injeksjonsmasse ble det likevel observert at området var tørt.
6. Frostsprengt injeksjonsmasse ble observert.
7. En hovedtendens for kabelkanalen var at;
  - Innvendig flate var angrepet av korrosjon.
  - Utvendig overflate var matt/blank uten korrosjonsangrep.
 Dette er en spesielt viktig observasjon siden det indikerer et korrosivt miljø innvendig i kabelkanalen, men ikke utvendig.
8. I Prøvefelt 2 og 3 ble det avdekket et armeringsstål (slakkarmering) foran kabelkanalen. I den ene lokasjonen (2) ble det observert noe korrosjon på armeringsstålet, mens det på den andre lokasjonen (3) ikke ble observert noe korrosjon. Disse observasjonene samsvarer godt med Punkt 7 siden det utvendig på kabelkanalen for Prøvefelt 2 ble observert korrosjon, mens dette ikke var tilfelle for Prøvefelt 3.



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	22 av 61

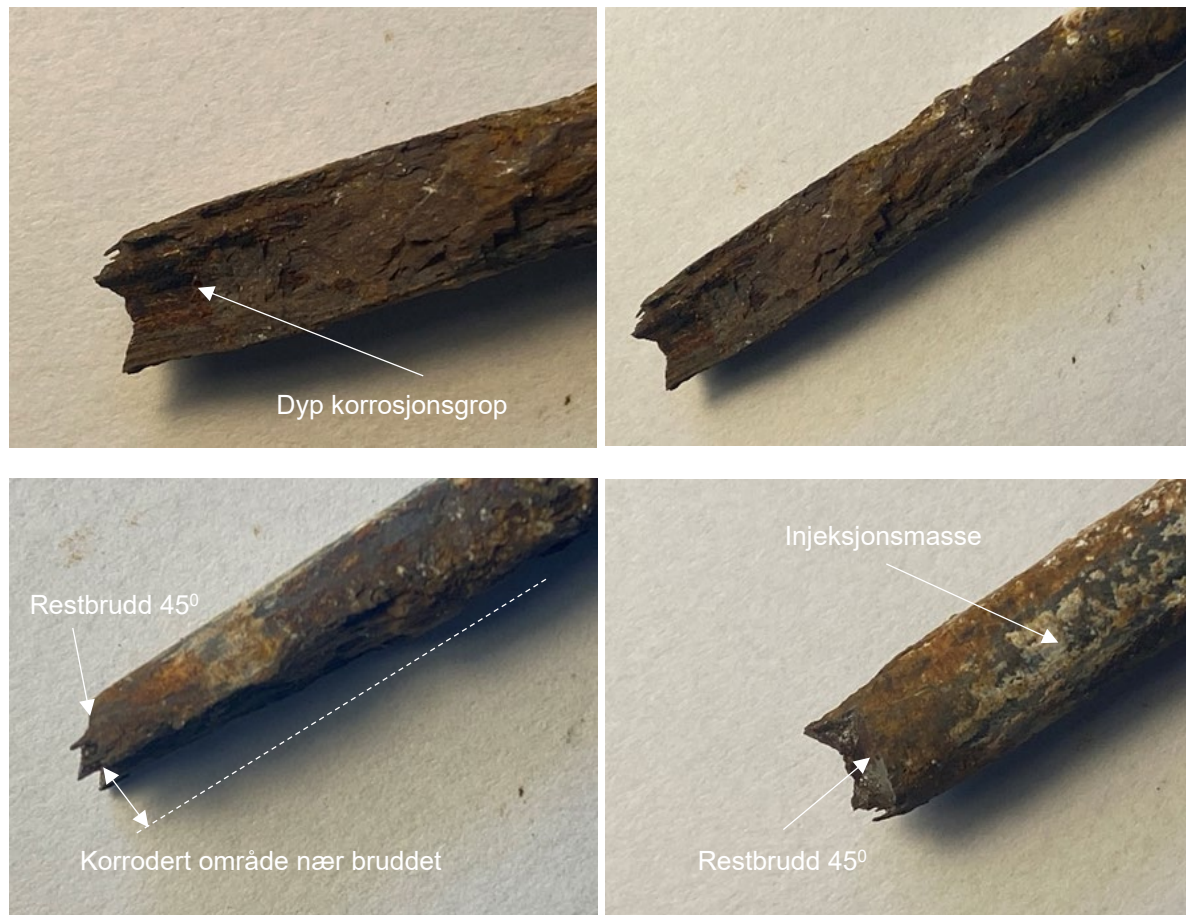
## 4 RESULTATER FRA UNDERSØKELSER

### 4.1 Karakterisering av korrosjonsangrep og trådbrudd på spenntråd fra Herøysund bru

Under inspeksjonen på Herøysund bru i august 2020, ble det tatt ut noen prøver av korrodert spenntråd. Prøvebitene har vært gjenstand for ulike undersøkelser i laboratoriet på NTNU. En del av undersøkelsene ble utført av student Øystein Antonsen i hans spesialiseringsprosjekt. I det etter følgende er gjort en oppsummering av de viktigste observasjonene og resultatene.

#### Spenntråd som var gått til brudd (Prøvefelt 3)


Tråden som var gått til brudd, er beskrevet i Kapittel 3.2.3. Som det fremgår av Figur 3.8 skjedde bruddet i tråd no. 2 ovenfra i kabelkanalen. Begge tråddendene var kappet ut for nærmere analyse. Figur 4.1 viser bilder av spenntråd i nærheten av området der bruddet gikk.



**Figur 4.1** Foto av bruddområde på armeringstråd. Bildene viser alvorlige korrosjonsangrep på tråden i nærheten av bruddområdet.

Tråddeler fra begge sider av bruddet ble undersøkt og følgende observasjoner ble gjort:

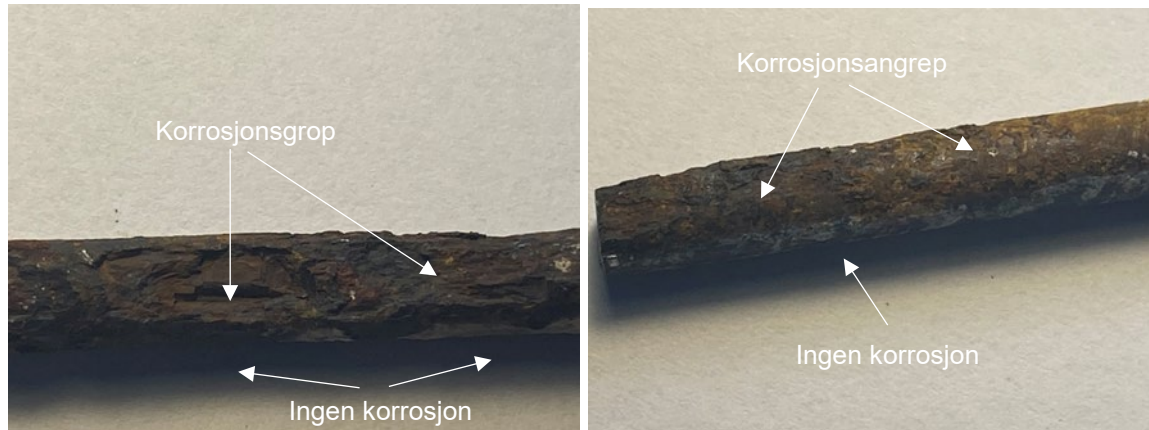
- Korrosjonsangrep på deler av tråd på begge sider av bruddet.
- I en lengde på ca. 20 mm ble det observert groplignende korrosjonsangrep på deler av tverrsnittet – minimum gjenværende tverrsnitt tilsvarende 2.9 mm høyde.
- Mindre angrep lenger unna bruddet, men gjenværende høyde i området 4.7-5.5 mm målt.
- Kun en del av omkretsen var angrepet av korrosjon, mens en av bitene hadde et stort område som ikke var angrepet av korrosjon på noen del av omkretsen og hvor det var gjenværende injeksjonsmasse.
- Restbrudd 45°
- Gjenværende tverrsnitt ved bruttidspunktet ble anslått til å være i størrelsesorden 30-35% av opprinnelig tverrsnitt.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	23 av 61

#### Biter av spenntråd som var kuttet ut – ikke brudd (Prøvefelt 2)

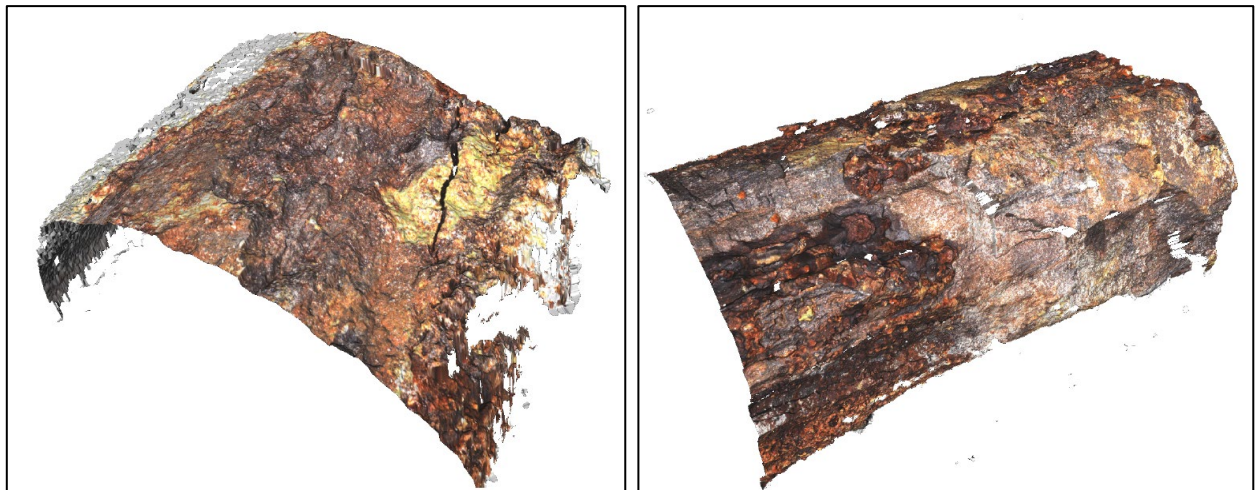
Korrodert spenntråd uten brudd, ble kuttet ut fra to ulike posisjoner og tatt med for undersøkelser. Figur 4.2 viser bilder av to trådbiter. Følgende observasjoner ble gjort:

- På en av bitene som var 90 mm lang, var det dype korrosjonsgroper over hele lengden på 50 mm. Gropene hadde en elliptisk form med lengde 5-15 mm, dybde opp til 1.5 mm og bredde 3-4 mm. Alle gropene var på samme del av omkretsen, mens resten av omkretsen var uten korrosjon.
- På en annen bit med lengde 70 mm, ble det observert korrosjon – i form av ujevn uniform korrosjon - på halve omkretsen med diameter i området 5.9 – 6.1 mm langs hele prøvebiten. På resten av omkretsen ble det ikke registrert noe korrosjonsangrep.



**Figur 4.2** Foto av korrosjonsangrep på to trådbiter. På den ene delen er det typiske ellipseformede groper, mens det på den andre er mer «uniform» korrosjon på en del av omkretsen.

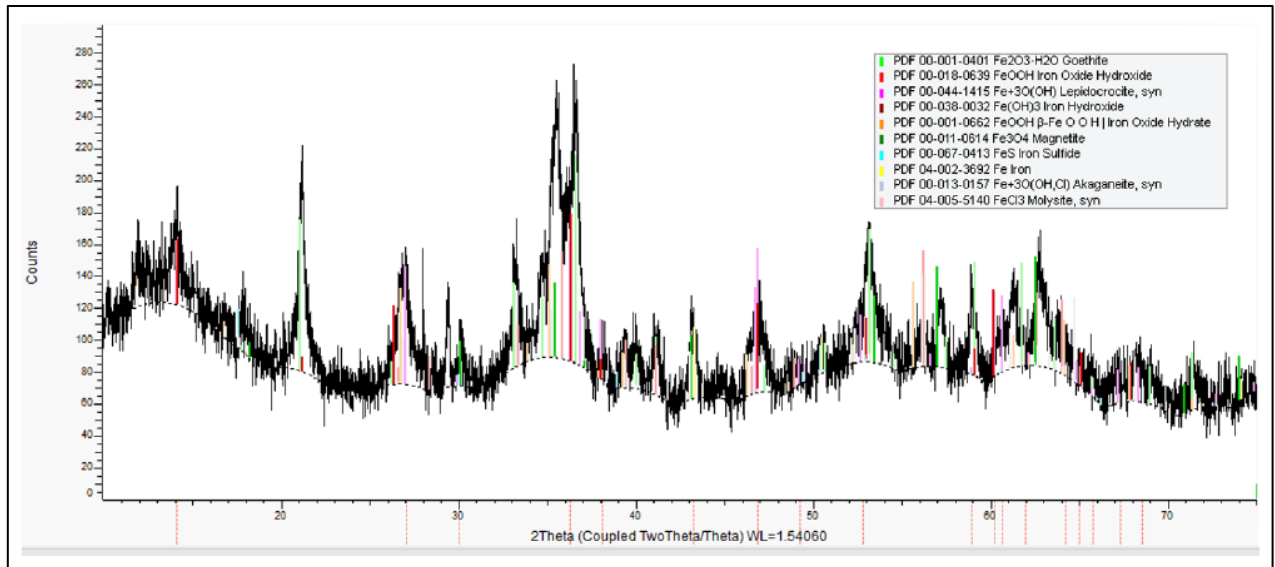
Trådbitene ble også undersøkt i 3D mikroskop hvor deler av flaten ble skannet for å dokumentere overflatene. Figur 4.3 viser to skannede bilder av korroderte overflater på en tråd.



**Figur 4.3** 3D modeller av to ulike områder på en spenntråd.

I utgangspunktet var tanken å gjennomføre X-Ray Diffraction (XRD) analyse av korrosjonsproduktene direkte på prøvebitene. Vurderinger av egnethet, resulterte i at man skrapet av korrosjonsproduktet fra prøvene. Dette ble så pulverisert, montert i en spesiell holder og så montert inn i analyseutstyret. Figur 4.4 viser resultatet fra XRD analysen i form av et såkalt «Diffractogram». Dette viser mange mulige kjemiske elementer/forbindelser, selv om noen utslag også sannsynligvis skyldes støy. Det er imidlertid viktig å peke på at jernforbindelser med svovel (sulfid) og klorid er dokumentert i tillegg til flere Fe-O forbindelser.

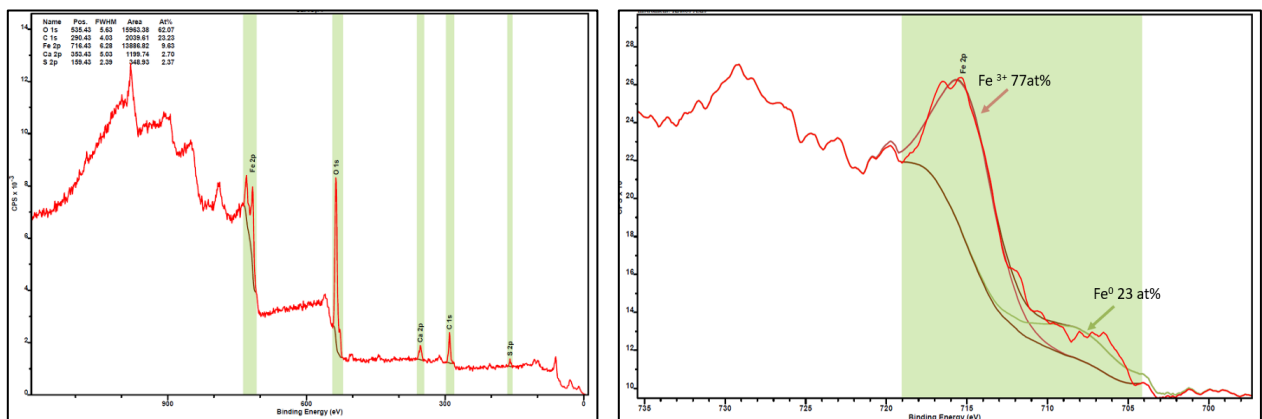




**Figur 4.4** Resultatet fra XRD analyse av korrosjonsprodukt fra korrodert tråd.

Korroderte spenntråder ble også undersøkt i Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS). På den måten var man istand til å dokumentere kjemiske elementer på overflaten. Også disse analysene dokumenterer tilstedeværelse av både svovel og klorid på flaten.<sup>28</sup>


Med X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) har man mulighet til å analysere overflatekjemien på en metallflate. XPS analyser ble derfor gjennomført på en korrodert spenntråd. Resultatet som er vist i Figur 4.5, indikere at det analyserte overflatesjiktet bestod av O, C, Fe, Ca og S. En stor mengde treverdig jern (Fe<sup>3+</sup>) ble detektert som vist på høyre figur. Dette kommer sannsynligvis fra FeOOH og/eller Fe(OH)<sub>3</sub> forbindelser. En liten mengde svovel (2.37 at. %) ble også detektert, mens det ikke ble funnet noe klorid.



**Figur 4.5** Resultatet fra XPS undersøkelse av korrodert tråd fra Prøvefelt 3.

### Konklusjoner fra undersøkelsen

1. Tråd fra Herøysund bru er utsatt for korrosjon på deler av undersøkt tråd. Angrepene er både «ujevn» uniform korrosjon og groppkorrosjon.
2. Groper hadde elliptisk form med lengde 5-15 mm, dybde opp til 1.5 mm og bredde 3-4 mm.
3. På deler av trådene ble det observert «ujevn» generell korrosjon med dybde opp til 0.3 mm på deler av omkretsen, mens resten av omkretsen viste ingen tegn til korrosjonsangrep.
4. På deler av spenntråden uten korrosjonsangrep var det gjenværende injeksjonsmasse.
5. Tråden som var utsatt for brudd, viste kraftig korrosjonsangrep i området rundt bruddet. Gjenværende tverrsnittsareal ved bruddtidspunktet er anslått å være 30-35% av opprinnelig tverrsnittsareal.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	25 av 61

6. Restbruddet har form av å være et typisk restbrudd pga. at bruddstyrken i materialet overskrides som følge av redusert tverrsnittsareal pga. korrosjon.
7. Undersøkelse av korrosjonsprodukt ved bruk av SEM/EDS, XRD and XPS gav følgende resultat:
  - SEM/EDS og XRD: Svovel og klorid
  - XPS: Svovel

## 4.2 Analyse av injeksjonsmasse – oppsummering

Injiseringmassen fra Prøvefelt 1 (kalt «tørr prøve») og fra Prøvefelt 3 (kalt «fuktig prøve») ble analysert av SINTEF. Resultatet er dokumentert i en egen rapport<sup>29</sup>. De viktigste konklusjonene er gjengitt nedenfor.

Fukttinnhold i injiseringsmassen (Tabell 4.1)

**Tabell 4.1** Fukttinnhold i injiseringsmassen fra Prøvefelt 3.<sup>29</sup>

PRØVE	FUKTTINNHOOLD (vekt-%)	FUKTTINNHOOLD KORRIGERT FOR FJERNET MASSE AV METALL OG GUMMI (vekt-%)
Tørr prøve	18	21
Fuktig prøve	39	44

Sammensetningen av porevannet (Tabell 4.2)

**Tabell 4.2** Sammensetning av porevannet i injeksjonsmassen fra Prøvefelt 3.<sup>29</sup>

ELEMENT	FUKTIG PRØVE	TØRR PRØVE	FUKTIG PRØVE	TØRR PRØVE
	(mmol/L)		(mmol/g tørt materiale <sup>1</sup> )	
Na	43.406	1.982	0.130	0.006
K	13.088	1.070	0.039	0.003
Ca	5.729	15.361	0.017	0.046
Al	0.01	0.01	<0.01	<0.01
Si	0.046	0.030	<0.001	<0.001
Fe	0.002	0.001	<0.001	<0.001
Ti	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Mg	0.001	0.001	<0.001	<0.001
S	8.999	1.138	0.027	0.003
Cl	0.677	0.536	0.002	0.002

<sup>1</sup> prøve tørket ved 50°C

Sammensetningen av tørrstoff i injeksjonsmassen vha. TGA analyse (Tabell 5.3)


**Tabell 4.3** Sammensetning av tørrstoff i injeksjonsmassen fra Prøvefelt 3.<sup>29</sup>

PARAMETER	TØRR PRØVE (vekt-%)	FUKTIG PRØVE (vekt-%)
Bundet vann i intervallet 100-350°C	15	23
Totalt bundet vann i intervallet 100-550°C	20	30
Portlanditt	17	23
Kalsitt	18	17
Glødetap ved 900°C	24	29

Kloridinnhold i injeksjonsmassen (Tabell 5.4)

**Tabell 4.4** Kloridinnhold i injeksjonsmassen fra Prøvefelt 3.<sup>29</sup>

PARAMETER	TØRR PRØVE (% Cl)	FUKTIG PRØVE (% Cl)
Kloridinnhold (av tørr masse)	0.035	0.037

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	26 av 61

## pH

En pH verdi på 13 ble målt i porevannet ved bruk av pH papir.

### Konklusjoner i SINTEF rapporten

1. Det er liten sannsynlighet for påvirkning fra ytre miljø (utenfor kabelkanalen) på injeksjonsmassen basert på følgende observasjoner:
  - o Lavt totalt kloridinnhold i faststoff og lavt kloridinnhold i poreløsning (fra CWE-analysen).
  - o Sannsynligvis lite til ingen karbonatisering av prøvene.
  - o Ingen tegn på utlekking av sementpasta i den fuktige prøven (men muligens litt utvasking i den tørre prøven).
2. Observerte forskjeller mellom den tørre og den fuktige prøven og generelt tilstanden til injiseringsmassen, spennkabelen og kabelkanalen skyldes ujevn og delvis utilstrekkelig blanding av injiseringsmassen, samt sannsynlig påkjenning fra vann i kabelkanalen pga. separering og muligens vann som ble brukt til smøring. Det virker mer sannsynlig at frostpåkjenning pga. fritt vann i kabelkanalen og naturlig temperaturvariasjon gjennom året er årsaken til tilstanden til injiseringsmassen og kabelkanalen framfor påvirkning fra det ytre miljø (sjø- eller regnvann).

I Kapittel 3.3 i SINTEF rapporten kommenteres at svovelinnholdet i våt prøve er ~ 8X svovelinnholdet i tørr prøve. Svovelinnholdet i tørr prøve (1.138 mmol/l) er i et forventet område i henhold til rapporten. En mulig forklaring er bidrag fra tilsetningsstoffer i injeksjonsmassen. Den gjennomførte undersøkelsen kan imidlertid ikke verifisere dette.

## 5 INFORMASJON FRA PUBLISERT LITTERATUR


### 5.1 Innledning

I regi av Florida Department of of Transportation ble det i perioden 2012-2016 gjennomført et stort F&U prosjekt.<sup>30</sup> Dette prosjektet er meget sentralt i å fremskaffe kunnskap og informasjon om korrosjon av spennarmering/tråd i betongbroer. Utgangspunktet for arbeidet var korrosjonsskader på strekkarmering innvendig i kabelrør på flere bruer i Florida (og andre steder i USA). Karakteristisk for de alvorlige korrosjonsskadene var kabelrør med ufullstendig injiseringsmasse som hadde høyt fuktinnhold, lavt kloridinnhold, høyt innhold av fritt sulfat og høy pH i porevannet. Målsettingen med prosjektet var: «*To identify criteria of deficient grout that may cause active corrosion of strands in post-tensioned tendons*». Prosjektet inneholdt bl.a. følgende aktiviteter:

1. Klarlegge betydningen av sulfat i alkaliske løsninger og mulig negativ effekt på korrosjon av stål.
2. Undersøkelse av oppførselen til stål i mangelfull injeksjonsmasse med forhøyet sulfat konsentrasjon.
3. Klarlegge den kombinerte effekten av forhøyet kloridinnhold og fritt sulfat innhold i mangelfull injeksjonsmasse på initiering av korrosjon samt å fremskaffe praktiske grenseverdier.

Innenfor F&U programmet ble det først gjennomført en litteraturundersøkelse for å kartlegge publisert litteratur om emnet. Noen viktige erfaringer ble trukket frem fra denne litteraturundersøkelsen:

- a) Mange tilfeller som omhandler korrosjon av spennarmering i kabelrør, er rapportert fra USA og Europa.
- b) Alkalisk sementmiljø uten klorid i injeksjonsmasse fører til passivering av stålet med meget lav korrosjonshastighet.
- c) Tilstedeværelse av hulrom i kabelrør kan gi forhold som fører til korrosjon på spennarmering.
- d) Lokal korrosjon dannet ved mikro-/makroceller pga. utarming av oksygen i områder mellom tråder, er registrert.
- e) Alvorlige korrosjonsangrep er oppdaget i områder med mangelfull injeksjonsmasse som var karakterisert ved; i) høyt fuktinnhold, ii) lavt totalt klorid innhold, iii) høyt fritt sulfat innhold, og iv) høy pH i porevannet.
- f) Sammenhengen mellom kloridinnhold, pH og fritt sulfat i porevannet og effekt på nedbryting av passivsjikt og etterfølgende korrosjon på stålet i strekkarmeringen, er ikke kartlagt i tilstrekkelig grad.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	27 av 61

Det viktigste resultatet fra litteraturundersøkelsen er beskrevet i pkt. e) og f) hvor det framgår at sammenhengen mellom kloridinnhold, pH og fritt sulfat med stor sikkerhet er nøkkelen til å få en bedre forståelse for korrosjon på stål innvendig i kabelrør.

Det ble gjennomført et omfattende testprogram innenfor F&U prosjektet. Mange av resultatene er publisert på internasjonale konferanser og noen er også gjengitt i det etterfølgende.

## 5.2 Sulfat i alkalisk miljø (sement og injeksjonsmasse)<sup>30, 31</sup>

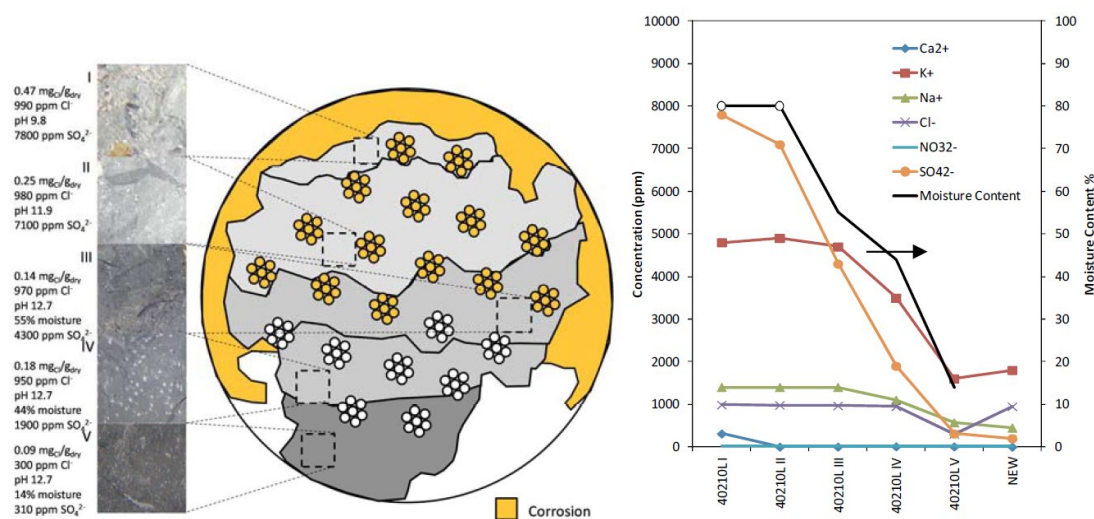
Ifølge ulike kilder gjennomgått i rapporten til Lau<sup>30</sup>, har man ofte gjennom Røntgenfluorescens analyser (X-ray fluorescence (XRF)) registrert betydelige mengder svovel ioner i porevannet i områder med mangelfull injeksjonsmasse. Observasjoner tyder også på at mangelfull injeksjonsmasse har vesentlig høyere innhold av sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) enn områder med fast injeksjonsmasse. Figur 5.1 viser resultatet fra en undersøkelse av variasjonen i kjemiske elementer i tverrsnittet av et kabelrør med armering. Her fremgår det at det er stor variasjon i innholdet av  $\text{Cl}^-$  (totalt og fritt), pH og  $\text{SO}_4^{2-}$  gjennom tverrsnittet.

Et viktig spørsmål i denne forbindelse er: Hvor kommer sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) fra? To mulige kilder er:

<u>Gypsum:</u>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
<u>Ettringite:</u>	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$

XRF og Røntgenkrystallografi analyser (X-Ray Diffraction (XRD)) av porevann i makroporer fra områder med utilstrekkelig injeksjonsmasse hvor det ble dokumentert store mengder ettringite, viste at disse områdene også inneholdt svovel.

Rapporten<sup>30</sup> inneholder også en gjennomgang av tilgjengelig litteratur på emnet effekt av sulfat i alkaliske løsninger og injeksjonsmasse på korrosjon av stål (ikke spesifikt for spennarmering). Nedenfor er gitt noen referanser med viktig informasjon fra denne gjennomgangen.



Figur 5.1 Kjemisk karakterisering av injeksjonsmasse i et kabelrør.<sup>13</sup>

### Gauda<sup>32</sup> (generelt stål i betong)


Denne artikkelen inkluderer undersøkelse av korrosjon på stål i alkaliske løsninger med spesiell fokus på effekt av  $\text{SO}_4^{2-}$ -ioner i mettede løsninger med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  som basisløsning og med pH 12.1.  $\text{SO}_4^{2-}$  konsentrasjonen var i området 0-2 vekt%. Ved en konsentrasjon som oversteg 0.2 vekt%  $\text{SO}_4^{2-}$  - som tilsvarer  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{OH}^-] > 1.1$  - ble det observert at korrosjonspotensialet ble mer negativt. Dette samsvarte med at passivsjiktet ble brutt ned.

### Acha et al. (from 30) (generelt stål i betong)

Artikkelen beskriver eksponering av stål i mettet  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  løsning med 0.2M kaliumsulfat ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), pH 12.85 og  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{OH}^-]$  på 5. Arbeidet konkluderer med at alkaliske løsninger med pH høyere enn 12.6 og  $\text{SO}_4^{2-}$  innhold over 0.01M, vil hindre dannelse av passivsjikt på stål i lokale områder. Dette kan gi høy lokal korrosjon ved dannelse av mikro-/makro celler.

### Al-Tayyib et al.<sup>33</sup> (generelt stål i betong)



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	28 av 61

Artikkelen beskriver eksponering av stål i simulert porevann med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  og 0.1 – 1%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  og pH på 12.5. Resultatene tyder på at korrosjonen øker når innholdet av  $\text{NaSO}_4$  øker fra 0.1-0.5%.

Dehwah et al.<sup>34</sup> (generelt stål i betong)

Artikkelen beskriver eksponering av stål i ulike sementblandinger med 5%  $\text{NaCl}$  og 1 til 4%  $\text{SO}_4^{2-}$  ved bruk av  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  eller  $\text{MgSO}_4$ . Innholdet av  $\text{SO}_4^{2-}$  påvirket ikke tid til initiering av korrosjon, men korrosjonshastigheten økte med økende innhold av  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Vigneshwaran et al.<sup>35, 36</sup> (strekkarmering)

Hensikten med det gjennomførte testprogrammet var å undersøke om  $\text{SO}_4^{2-}$  i alkaliske porevann løsninger kan: i) bryte ned utfelte passivsjikt på stål, og ii) om tilstedeværelse av  $\text{SO}_4^{2-}$  fra eksponeringsstart kan påvirke utviklingen av et stabilt passivsjikt. I dette testprogrammet ble løsninger med  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$  og  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  med pH i området 12.5 til 13.3 benyttet. *Det betyr at effekt av klorid ikke ble undersøkt.*

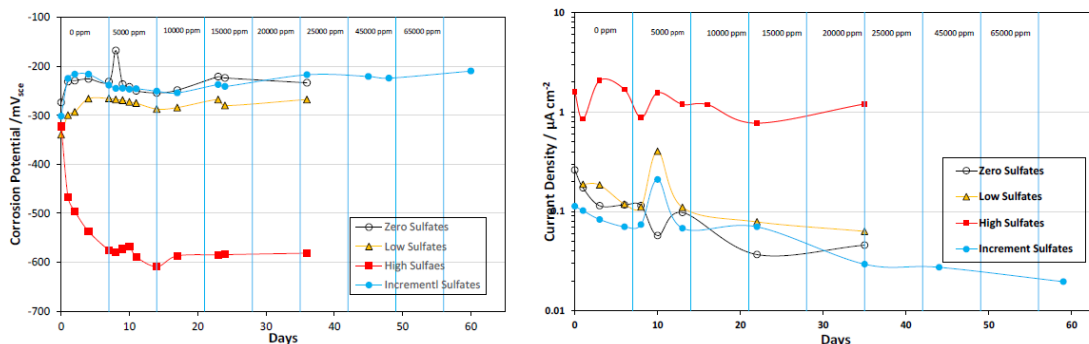
Test 1 ble gjennomført med to ulike basisløsninger og med tre ulike innhold av  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 0, 2.000 og 20.000 ppm. Etter en tids eksponering ble det tilsatt 5.000 ppm  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en gang per uke. Under denne testen ble OCP målt i tillegg til at det ble gjennomført Lineær Polarisasjons Resistance (LPR) målinger.

Test 2 var en korttidstest for å undersøke anodisk oppførsel i alkaliske løsninger med  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i tilsvarende løsninger som beskrevet i Test 1.

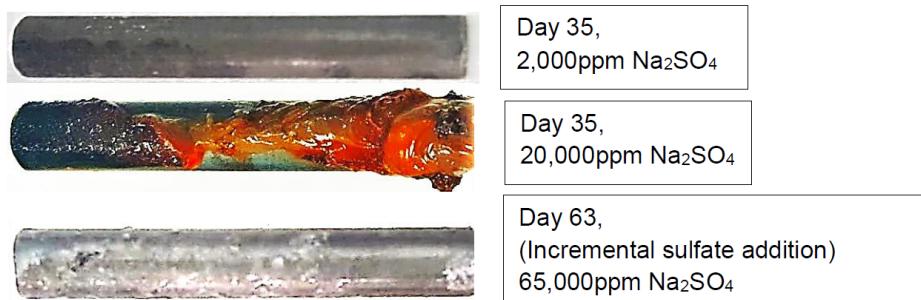
Følgende konklusjoner ble trukket:

1. pH 13 og  $\leq$  20.000 ppm  $\text{NaSO}_4$  → ingen indikasjon på at passivfilmen blir ødelagt
2. pH 12.5 og 20.000 ppm  $\text{NaSO}_4$  fra start → nedbryting av passivfilm → alvorlig gropkorrosjon

Figur 5.2 viser utviklingen av OCP (Corrosion Potential) og utviklingen av korrosjonsstrømtettheten fra LPR målingene ved ulike  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  verdier (sort/gul/rød: 0/2.000/20.000 ppm, blå: økning 5.000 ppm pr. uke). Figur 5.3 viser bilde av utviklingen av korrosjon på stålprøvene i løsningen med pH 12.5.




**Figur 5.2** Utviklingen av korrosjonspotensialet og korrosjonsstrømtetthet på prøver eksponert ved pH 12.5 med varierende innhold av  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . (sort/gul/rød: 0/2.000/20.000 ppm, blå: økning 5.000 ppm pr. uke).<sup>35</sup> Testene ble gjennomført uten klorid i løsningen.



**Figur 5.3** Utvikling av korrosjon på stål i løsning med pH 12.5 og varierende innhold av  $\text{NaSO}_4$ .<sup>35</sup> Testene ble gjennomført uten klorid i løsningen.

Lau et al.<sup>37</sup> (strekkarmering)

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	29 av 61

Kingsley Lau var en del av forskningsteamet innenfor prosjektet som er gjennomført av FDOT Research Center.<sup>13</sup> Forfatteren har sammen med kollegaer publisert en rekke artikler basert på arbeidet som ble utført i det aktuelle forskningsprosjektet. I denne artikkelen ble det laget korrosjons test celler som var kuttet ut av virkelige kabelrør fra en bru i Florida. Målsettingen med det eksperimentelle arbeidet var å undersøke hvordan utbedring av kabelrør med ulik (ny) injeksjonsmasse påvirket korrosjonsbestandigheten til strekkarmeringen. Det eksperimentelle arbeidet inkluderte OCP målinger, LPR, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) og anodiske/katodiske polarisasjonskurver. *Områder uten injeksjonsmasse (voids) var fylt med alkaliske løsninger eller eksponert mot luft med høy relativ fuktighet.* Porevann var en blanding av NaOH, KOH og Ca(OH)<sub>2</sub>. Effekt av endringer i kloridinnhold (0 til 2.000 ppm NaCl) og sulfatinnholdet (0 – 85.000 ppm Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ble undersøkt. Følgende konklusjoner ble trukket:

- Under en 2 måneders eksponeringsperiode med porevann bestående av 3.7 g/l NaOH, 10.5 g/l KOH, 2.1 g/l Ca(OH)<sub>2</sub> med pH 13.3 uten klorid eller sulfat ioner, ble det utviklet passivsikt på stålprøvene. Dette ble dokumentert med konstante og høye OCP verdier. (pH ikke oppgitt, men antas å være ≥ 13.3.)
- Etter 2 måneder ble NaCl (opp til 2.000 ppm) og/eller Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (opp til 85.000 ppm) tilsatt porevannet med pH 13.3. Målingene tydet på at stålprøvene fortsatt var passive uten tegn til korrosjonsangrep etter eksponering opp til 300 dager (med varierende sammensetning av porevannet).
- Prøver som fra start var eksponert mot atmosfære med 100% RH, ble etter 150 dager eksponert mot en porevæske bestående av 2.1 g/l Ca(OH)<sub>2</sub> med pH 12.6 og tilsatt 2.000 ppm Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.014M SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 0.13% SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Etter tilsatsen av Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sank OCP raskt fra ca. -200 mV<sub>SCE</sub> til -500 mV<sub>SCE</sub>. Samtidig ble stålflaten dekket av et relativt tykt sjikt med korrosjonsprodukter.
- Følgende konklusjoner ble trukket:
  - pH 12.6 og [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] = 0.35 → *nedbryting av passiverende sjikt etterfulgt av korrosjon*
  - pH 13.3 og [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] = 0.7 → *oppbygging/vedlikehold av passivsikt, neglisjerbar korrosjon*

#### Bertolini et al.<sup>38</sup> (*strekkarmering*)

Denne artikkelen tar utgangspunkt i korrosjonsskader på strekkarmering i en Italiensk bro som ble oppdaget kun 2 år etter installasjon. Figur 5.4 viser korrosjonsangrep (og brudd) i en kabeltråd. I en etterfølgende skadeundersøkelse ble det utført kjemisk analyse av injeksjonsmassen med bl.a. plasma emission spectrometry (ICP-OES) og korrosjonstester av strekkarmeringstråder. Korrosjonstesting ble utført i spesielle celler med og uten oksygen. NaOH løsninger med pH i området 13.8-14.3 ble benyttet for å simulere kjemisk sammensetning av miljøet i kontakt med armeringstrådene. I tillegg ble 74 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tilsatt i noen forsøk. Dette tilsvarer 5 wt% sulfat ioner (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Under forsøkene ble OCP målt, korrosjonshastigheten målt med LPR i tillegg til at anodiske polarisasjonskurver ble tatt opp.




**Figur 5.4 Korrosjonsangrep på kabeltråd etter 2 års drift.<sup>24</sup>**

Følgende resultater fremkom fra undersøkelsene:

#### 1. Kjemisk analyse

Kjemisk sammensetningen av injeksjonsmassen ifølge analysen med ICP-OES viste følgende innhold av K<sub>2</sub>O og Na<sub>2</sub>O:

- Ikke segregert
  - K<sub>2</sub>O: 0.29-0.99 tørr vekt% (For info. - Herøysund bru<sup>7</sup>: 0.44-0.55%)
  - Na<sub>2</sub>O: 0.27-0.63 tørr vekt% (For info. - Herøysund bru<sup>7</sup>: 0.86-0.90%)
  - SO<sub>3</sub>: 1.75-4.15 tørr vekt%
- Segregert
  - K<sub>2</sub>O: 0.66-4 tørr vekt%
  - Na<sub>2</sub>O: 0.47-2.4 tørr vekt%
  - SO<sub>3</sub>: 3.58-7.88 tørr vekt%

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	30 av 61

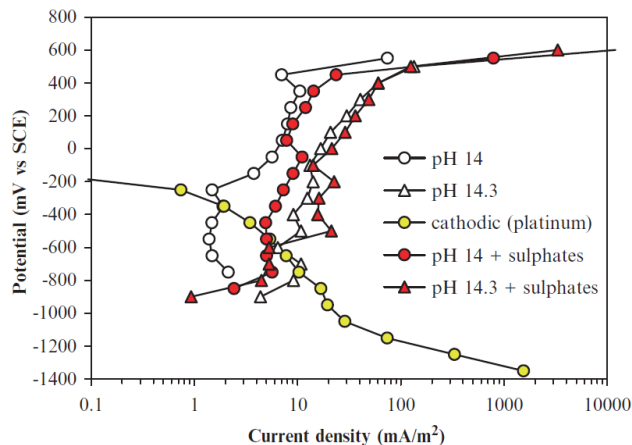
Med utgangspunkt i kjemisk sammensetning av injeksjonsmassen og nødvendig vannmengde for å gi plastisk konsistens, ble en pH verdi på 14.2 estimert i vann (liquid) fasen. En annen viktig ting å legge merke til er mangelen på klorid ioner i injeksjonsmassen.

## 2. Korrosjonstesting

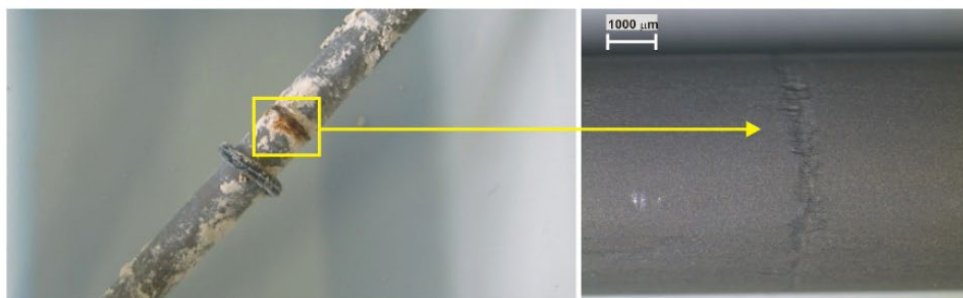
- På fritt eksponerte prøver med tilgang på oksygen ble OCP målt i området  $-500 \text{ mV}_{\text{SCE}}$  etter et par dagers eksponering.
- På prøver som var polarisert til  $-1000 \text{ mV}_{\text{SCE}}$  ble det registrert noe generell/uniform korrosjon.
- Lokale korrosjonsangrep ble observert i spalter hvor oksygentilførsel ble hindret.
- Anodisk polarisasjonskurve i oksygenfritt miljø ble påvirket av pH og tilsats av 5 wt%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (sulfat), se Figur 5.5.
- Tester på stål wire med en eller flere polymer (plast) ringer (for å lage kunstige spalter med begrenset tilgang på oksygen), viste at korrosjon initierte i disse områdene (dvs. spaltkorrosjon). Figur 5.6 viser eksempel på et slikt korrosjonsangrep, mens Figur 5.7 viser hvordan polarisasjonskurvene og korrosjonspotensialet  $E_{\text{kor}}_{\text{pass}}$  endres i a) en løsning uten oksygen (i spalten) og b) en løsning med oksygen (utenfor spalten). Resultatet er at det etableres en galvanisk celle (makrocelle) med en drivende spenning  $\Delta V$  ifølge lign. 5.1. Korrosjonshastigheten i spalten vil bl.a. være avhengig av  $\Delta V$ , ledningsevnen i elektrolytten rundt stål wiren, effektiv tykkelse av elektrolytten og aktuell geometri.

$$\Delta V = I(E_{\text{kor}, \text{spalt}} - E_{\text{kor}, \text{pass}}) \quad (5.1)$$


Målingene referert foran indikerer at potensialet på passiv flate  $E_{\text{kor}, \text{pass}} \approx -500 \text{ mV}_{\text{SCE}}$  mens potensialet for å nå aktiv korrosjon  $E_{\text{kor}, \text{spalt}} \approx -1000 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ . Figur 5.8 viser en skematisk skisse av en slik makrocelle mellom to stål wire.

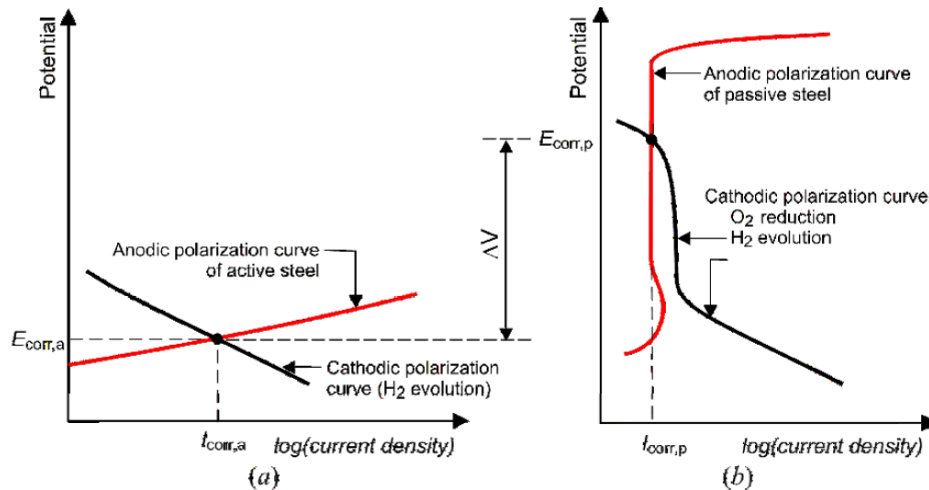


**Figur 5.5** Anodiske polarisasjonskurver for strekkarmerings stål i ulike alkaliske løsninger. Sulfatinnholdet tilsvarer 5 wt%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .<sup>38</sup>

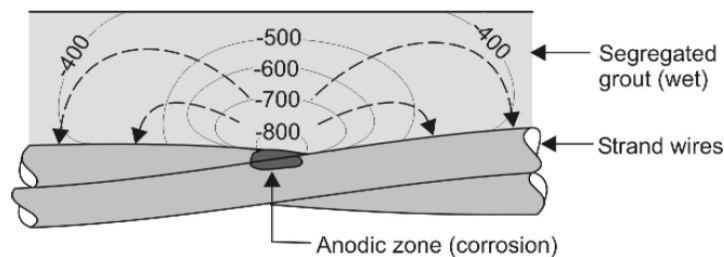


**Figur 5.6** Korrosjonsangrep på stål under en polymer ring etter eksponering i alkalisk løsning med oksygen.<sup>38</sup>

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	31 av 61



**Figur 5.7** Skjematisk fremstilling av polarisasjonskurver i en a) alkalisk løsning uten oksygen, og b) en løsning med oksygen.<sup>38</sup>



**Figur 5.8** Skjematisk fremstilling av en makrocelle etablert mellom to stålwire.<sup>24</sup>

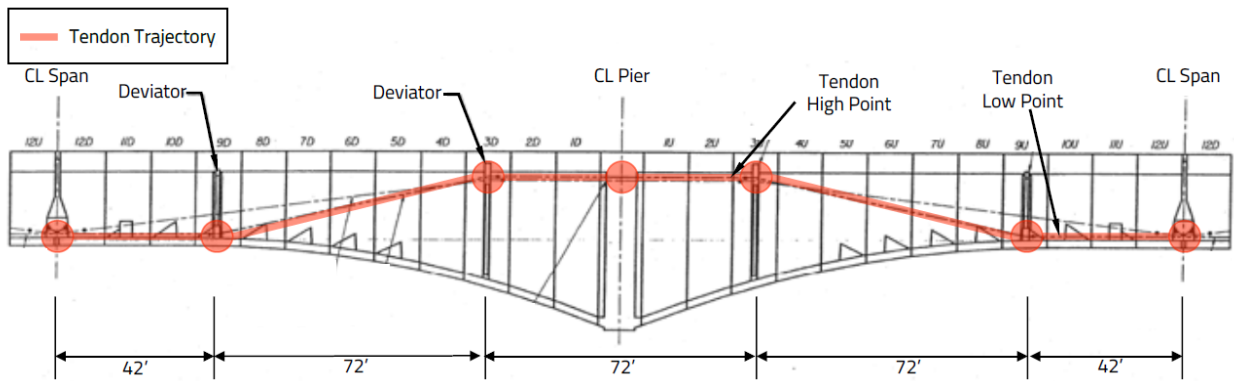
### Konklusjon

Artikkelen konkluderer med at segregering av injeksjonsmasse for spennarmerings tråder kan føre til dannelsen av en hvit fase med plastisk konsistens som er karakterisert ved høy pH ( $\text{pH} > 14$ ) og sulfat ioner. Hypotesen var at årsaken til de store korrosjonsangrepene var nedbryting av passiv sjiktet i spaltområder utarmet på oksygen med tilhørende stor katodisk polarisering ( $-1 \text{ V}_{\text{SCE}}$ ). Dermed etableres det makroceller<sup>39</sup> mellom små aktive områder i spalten (lavt potensial, utarmet på oksygen) og store passive områder med oksygenholdig miljø. Dette kan gi stor korrosjonshastighet lokalt i de aktive områdene. Tester utført ved pH 14.3 i en løsning med 74 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  løsning (5%) viste meget høy anodisk strømtetthet (dvs. høy lokal korrosjonshastighet, se Figur 5.5). Konklusjonene i denne rapporten er i samsvar med det aktive område i Pourbaix diagrammet i Figur 2.3.

### Ahern et al.<sup>40</sup> (strekkarmering)

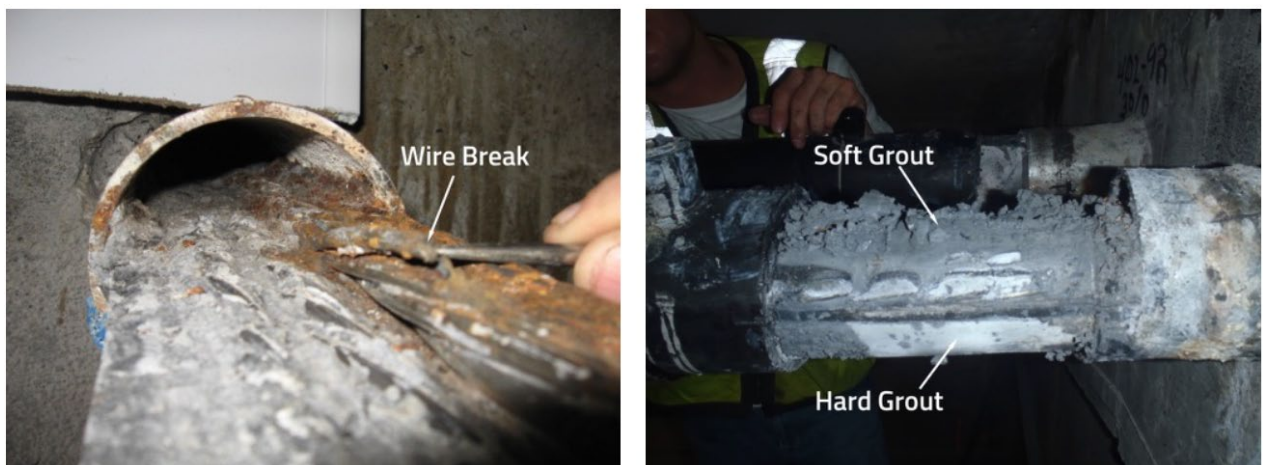
Denne artikkelen tar utgangspunkt i korrosjonsskader på strekkarmeringen på «Ringling Causeway Bridge», Florida tidlig på 2000-tallet. Broen har eksterne kabelrør med strekkarmering som vist i Figur 5.9. Feltundersøkelser dokumenterte at strekkarmeringen i kabelrørene var utsatt for alvorlige korrosjonsangrep. Undersøkelsene avdekket videre bløt/fuktig og segregert/myk injeksjonsmassen mot øvre del av tverrsnittets arealet for kabelrørene, men resten av injeksjonsmassen i kabelrøret var tørt og hard, se Figur 5.10. Korrosjonsangrepene var konsentrert i «høy punkt» i kabelrør banen, som samsvarte med områder med bløt og myk injeksjonsmasse. Områdene med hard injeksjonsmasse viste ingen tegn til korrosjon på strekktrådene.





**Figur 5.9** Typisk profil for kabelrørene på Ringling Causeway Bridge.<sup>40</sup>

Et stort omfattende laborietestprogram ble initiert for å; i) dokumentere eksponerings-betingelsene, og ii) undersøke årsaken til korrosjonsangrepene. Laborietesting avdekket stor forskjell i kjemisk sammensetning og fysiske egenskaper mellom de to injeksjonsmassene. Tabell 5.1 viser noen viktige verdier.




**Figur 5.10** Venstre: Korrosjon av wire i topp av kabelrør. Høyre: Fuktig myk injeksjonsmasse på toppen og hard i bunnen.<sup>40</sup>

EDS og XRD analyser dokumenterte at korrosjonsproduktene i hovedsak bestod av jernoksider i tillegg til høye svovel innhold (form og valens kunne ikke bestemmes). Klorid ble ikke funnet som del av korrosjonsproduktet.

**Tabell 5.1** Oppsummering av resultater fra testing av injeksjonsmasse.<sup>40</sup>

PARAMETER	MYK INJEKSJONSMASSE	HARD INJEKSJONSMASSE
Fritt vann (wt%)	47	25
Totalt svovel (wt%)	5.1	2.4
Løst Klorid (wt%)	0.014	0.005
pH	12.78	12.95

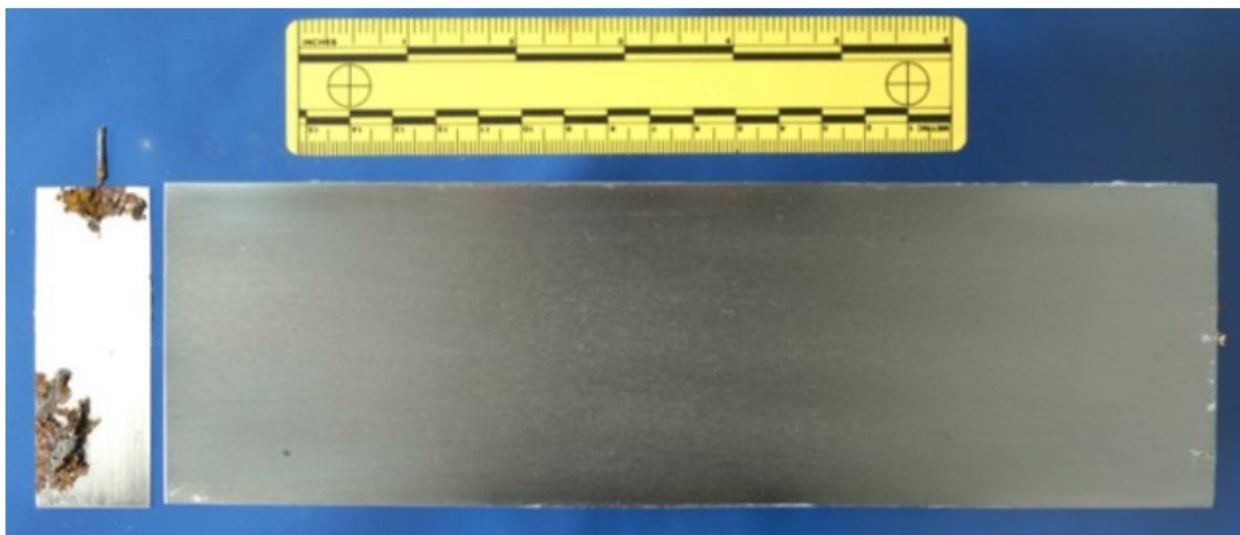
For å simulere makrocelle korrosjon ble det bygget en modell bestående av en plate dekket med myk injeksjonsmasse (25 mm lang) og en plate med hard injeksjonsmasse (250 mm lang). Platene var i utgangspunktet isolert fra hverandre, men koplet sammen via et Voltmeter med høy impedans. Begge massene var fuktet med vann før sammenkoplingen. Testingen viste at makrocellen etablerte en potensialforskjell på ca. 220 mV mellom de to platene. Som det fremgår av Figur 5.11, oppstod det lokale korrosjonsangrep på platen dekket med myk injeksjonsmasse, mens platen dekket med hard injeksjonsmasse viste ingen tegn til korrosjonsangrep. Resultatet fra denne laborietesten ble sammenlignet med potensialmålinger utført på strekkarmering i et kabelrør med korrosjonsskader. Målingene viste en potensialforskjell i området 200 – 250 mV mellom armering eksponert i myk/tørr injeksjonsmasse (mer negativt potensial) og armering eksponert i tørr/hard injeksjonsmasse (mer positivt

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	33 av 61

potensial). Samsvaret mellom felteksponering og laboratorietesten indikerer at makrocelle korrosjon var en viktig årsak til de alvorlige korrosjonsskadene som ble oppdaget.

### Konklusjon

Undersøkelsene konkluderer med at årsaken til korrosjonsskadene på strekkarmeringen på Ringling Causeway Bridge er segregering av injeksjonsmassen – hvor sulfat/svovel innholdet er en medvirkende årsak til segregeringen. Segregering av injeksjonsmassen førte til etableringen av en makrocelle hvor et anodisk område ble etablert i området med høyere klorid og sulfat innhold enn det katodiske området som ble etablert under hard injeksjonsmasse. Resultatet var høy korrosjonshastighet på stålet som var eksponert i våt/myk injeksjonsmasse pga. galvanisk kopling mot stålet i tørr/hard injeksjonsmasse.



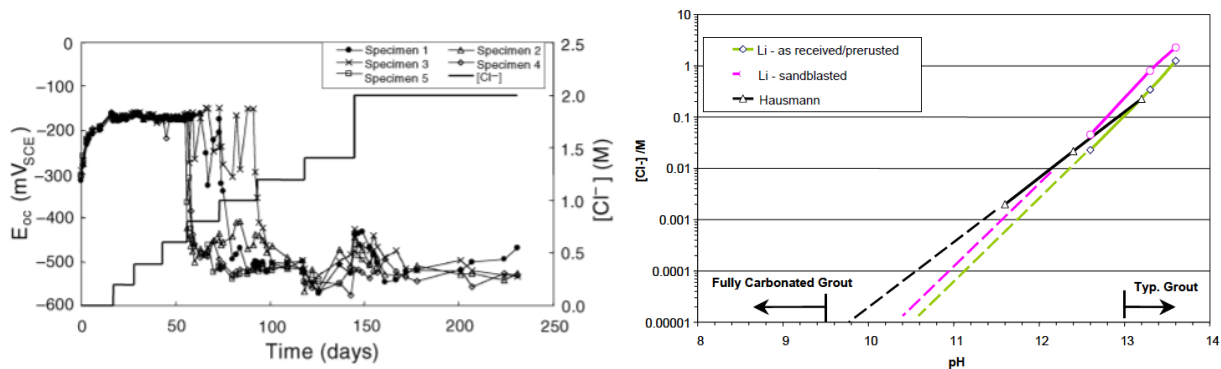
**Figur 5.11 Makrocelle med anode (stål med myk/våt injeksjonsmasse) til venstre og katode (med hard/tørr injeksjonsmasse) til høyre. Injeksjonsmassen er fjernet etter test.<sup>40</sup>**

### **5.3 Effekt av kloridinnhold**

Kapittel 2.3.3 gir en beskrivelse av hvordan Cl<sup>-</sup> - ioner påvirker stabiliteten til passivfilmen uten at dette skyldes en endring av pH. Bestemmelse av kritisk Cl<sup>-</sup> ion konsentrasjon for nedbryting av en passivfilm er utfordrende og en komplisert problemstilling. Dette skyldes flere forhold som: i) kvaliteten på passivfilmen, ii) pH i porevann/fuktighet varierer med sammensetningen, iii) kloridinnholdet kan være bundet i betong/injeksjonsmasse og løst i porevannet, iv) oksygeninnholdet varierer, og v) stålet eksponert mot vannfase eller fuktig luft eller tørr luft. Dette er årsaken til at bestemmelse av kritisk kloridinnhold kan variere mellom ulike laboratorietester utført med forskjellige prosedyrer/betingelser.<sup>18,41</sup> Forholdet [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] er en parameter som ofte blir benyttet for kritisk sammenheng mellom klorid og pH. Ulike grenseverdier er imidlertid beskrevet i litteraturen – avhengig av testbetingelsene.<sup>32, 41, 42</sup>

#### Wang et al.<sup>43</sup> (spennarmering)

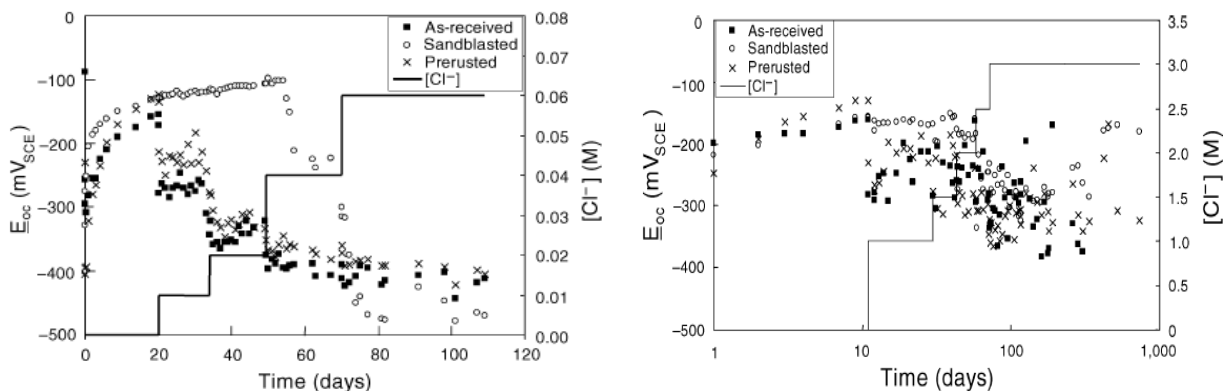
Denne artikkelen ser på effekt av kloridinnhold og pH på initiering av korrosjon på kabeltråd. Ut fra testene konkluderer artikkelen med en grenseverdi på 500 ppm for klorid. Testene ble utført i vann med pH 13. Artikkelen viser også en oppsummering av resultater fra to andre publikasjoner.<sup>41, 44</sup> Figur 5.12 er satt sammen fra disse to publikasjonene og viser sammenhengen mellom kritisk kloridkonsentrasjon og pH for initiering av korrosjon på stål.



**Figur 5.12** Sammenhengen mellom utviklingen av OCP i avhengighet av Cl<sup>-</sup> konsentrasjonen i en løsning med pH 13.3.<sup>41, 43</sup>

Li and Saqües<sup>41</sup> (generelt for stål i betong)

I denne publikasjonen er resultatene fra testing av fritt eksponert armeringsstål i Ca(OH)<sub>2</sub> løsninger ved 3 ulike pH verdier (12.6, 13.3 og 13.6 – pH endret ved tilsats av K<sup>+</sup> og Na<sup>+</sup> ioner) og tre ulike overflater, rapportert. Målsettingen med testene var å bestemme kritisk Cl<sup>-</sup> ion konsentrasjon for nedbryting av passivfilmen. Måling av OCP ble benyttet for å dokumentere hvordan en økning i kloridinnhold påvirket stabiliteten av passivfilmen, se Figur 5.13.



**Figur 5.13** Potensialutviklingen på stålprøver eksponert i en løsning med pH 12.6 (venstre) og 13.6 (høyre) i avhengighet av Cl<sup>-</sup> ion innholdet.<sup>41</sup>

Testresultatene er oppsummert i Tabell 5.2.


**Tabell 5.2** Kritiske grenseverdier for Cl<sup>-</sup> (vekt% av sement) i avhengighet av porevann pH og overflatebeskaffenhet.

OVERFLATE	POREVANN pH		
	12.6	13.3	13.6
Sandblåst	0.10 ~ 0.65	1.25 ~ 2.80	2.70 ~ 6 <sup>1)</sup>
Som mottatt eller for-rustet	0.05 ~ 0.45	0.60 ~ 2.1	1.80 ~ 4.2

<sup>1)</sup> Vanskelig å bestemme nøyaktig klorid mengde

Følgende viktige konklusjoner kan trekkes fra resultatene beskrevet i rapporten:

- Kritisk kloridinnhold for nedbryting av passivfilm på stål avhenger av pH i en alkalisk løsning.
  - pH 12.6 og 13.3 (i aktuell løsning) førte til aktiv korrosjon på stålet når kritisk kloridinnhold var nådd
  - I en løsning med pH 13.6 ble det registrert aktiv korrosjon ved et gitt kloridinnhold. Men ved økende kloridinnhold (utover kritisk verdi) og økt eksponeringstid, ble korrosjonshastigheten redusert.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	35 av 61

- En grenseverdi definert som  $CR_K = [Cl^-]_K/[OH^-]$  var ikke konstant og økte sterkt med økende pH. (Hypotese: Inhiberende effekt av  $[OH^-]$ -ioner.)
- Kritisk kloridinnhold avhenger av *overflatebeskaffenheten* før testingen startet
  - En sandblåst flate har høyere grenseverdi for kloridinnhold enn en mottatt («as-received») eller for-rustet overflate

#### Pepenar<sup>45</sup> (spennarmering)

I denne artikkelen har forfatteren undersøkt effekt av ulike kloridinnhold på to ulike spennarmerings stål eksponert i en portlandsement med pH 12.7. Med utgangspunkt i anodiske polarisasjonskurver ble groppkorrosjonspotensialet,  $E_{pit}$ , (hvor passivsiktet brytes ned) bestemt for ulike kloridinnhold i området 0.0001 – 1.0 M Cl<sup>-</sup>. Dette tilsvarer 0.000355 – 3.55 vekt% Cl<sup>-</sup> (av sement).<sup>15</sup> Andre elektrokjemiske parametere som f.eks. repassiveringspotensialet,  $E_{Rep}$ , og passiv strømtetthet,  $i_{pass}$ , ble også dokumentert.

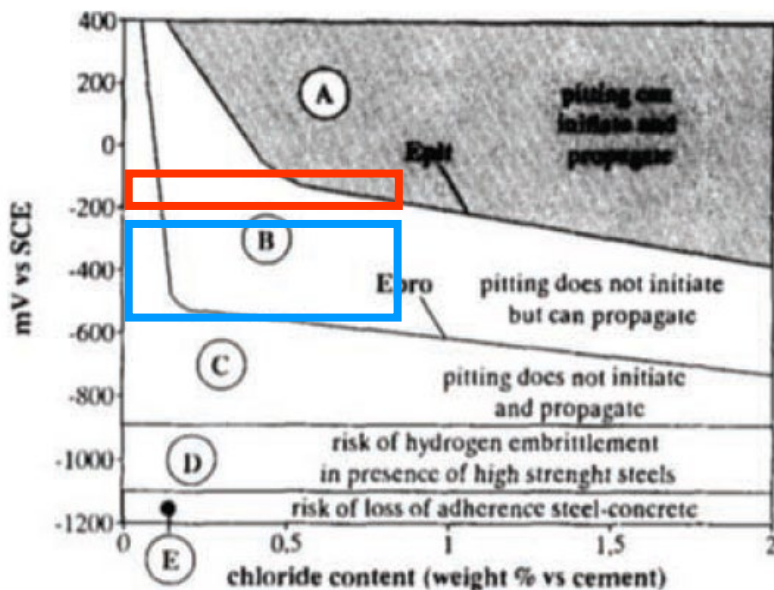
Med utgangspunkt i resultatene fra testene konkluderer artikkelen med:

- Ved 0.01 M (0.0355 vekt%) Cl<sup>-</sup> starter nedbrytingen av passivsiktet på stålet i aktuell løsning med pH 12.7. Dette samsvarer med verdiene i Tabell 5.2.
- $E_{pit}$  reduseres lineært med logaritmen til klorid konsentrasjonen,  $[Cl^-]$ , som vist i ligning 5.2

$$E_{pit} = a - b \log [Cl^-] \quad (5.2)$$

#### Bertolini<sup>42</sup> (generelt for stål i betong)


Denne «key-note» artikkelen omhandler eksponering av armeringsstål i betong med fokus på korrosjon i kloridholdig miljø. Forfatteren har gjennomgått en rekke artikler for å fremskaffe en form for «state-of-the-art» på området. I tillegg fokuserer artikkelen på metoder for å øke levetiden for betongkonstruksjoner. I denne artikkelen blir også kritisk kloridinnhold diskutert og det fokuseres spesielt på hvordan kloridinnholdet påvirker OCP og  $E_{pit}$ . En interessant figur er hentet fra en artikkel av Pedferri.<sup>46</sup> Artikkelen viser sammenhengen mellom kloridinnhold, elektrokjemisk potensial,  $E_{pit}$  og ulike nedbrytingsformer på armeringsstål oppdelt i ulike soner (A-E), se Figur 5.14. Pedferri benyttet figuren til å forklare hvordan kloridinnholdet påvirker  $E_{pit}$  tilsvarende det Pepenar gjør i sin artikkel. Forskjellen var at Pepenar utviklet en sammenheng som vist i lign. (5.2) for en løsning med pH 12.7, mens Pedferri ikke har med pH som en parameter.



**Figur 5.14 Skjematiske fremstillinger av oppførselen til armeringsstål i avhengighet av elektrokjemisk potensial og kloridinnhold.<sup>46</sup> Fra Figur 3.13: Red area –  $E_{pit}$  and Blue area – OCP etter initiering av korrosjon.**

Figur 5.13 viser hvordan OCP blir mer positiv etter eksponering og frem til passivfilmen nedbrytes og groppkorrosjon starter. Som det fremgår av figurene oppnås en maks. OCP verdi i området -150 - -100 mV<sub>SCE</sub>, mens en OCP verdi i området -200 - -450 mV<sub>SCE</sub> ble målt etter initiering av korrosjon. Verdiene avhenger av pH og overflate. Disse verdiene er plottet i Figur 5.14 i form av områder for initiering ( $E_{pit}$  – rødt



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	36 av 61

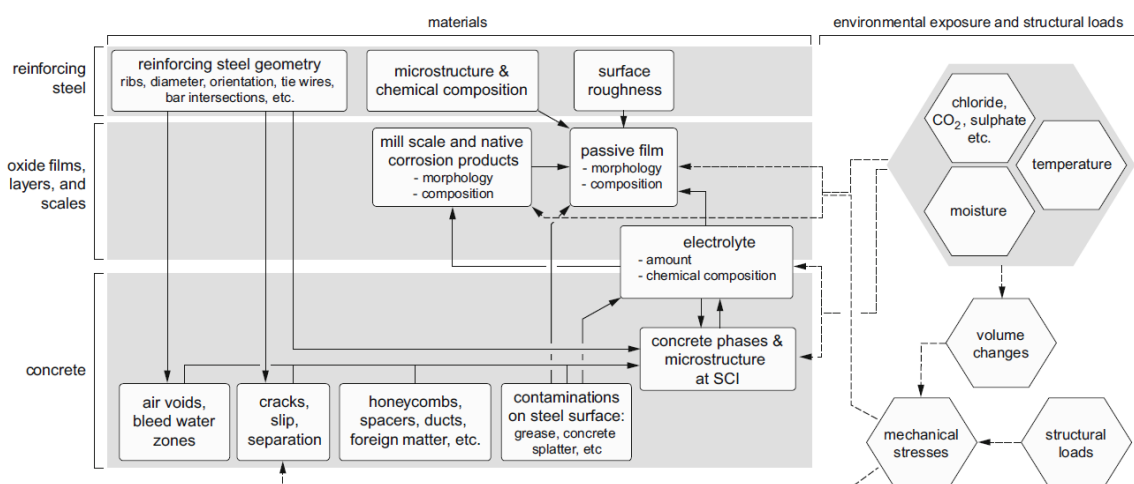
område) og korrosjonspotensial etter initiering (blått område). Ifølge Figur 5.14 tilsvarer de målte  $E_{pit}$  et kloridinnhold i området 0.4 – 0.8 wt%. Dette samsvarer omtrent med verdiene i Tabell 5.2 for pH i området 12.6 – 13.3 og mottatt/pre-rustet flate.

#### 5.4 Effekt av stål – betong/semest gresneflaten<sup>47, 48</sup>

Korrosjon er en nedbrytningsprosess som er sterkt avhengig av kjemisk sammensetning av materialet, mikrostruktur og overflate. Ulike legeringselementer vil bestemme hvor bestandig materialet er mot korrosjon i ulike miljø. Tilsats av krom (Cr), Nikkel (Ni), Molybden (Mo) og Nitrogen (N) er eksempel på hvordan korrosjonsbestandigheten til ulike rustfrie stål kan varieres i avhengighet av eksponeringsmiljø. Tilsats av små mengder legeringselementer vil også påvirke korrosjonsbestandigheten til armeringsstål om enn ikke i samme grad som for rustfrie stål. Overflaten har også stor betydning – parametere som ruhet og ikke minst oksidsjikt (korrosjonsprodukt eller andre passivsjikt) vil være med på å bestemme når sjiktene nedbrytes og dermed sterkt påvirke initiering av korrosjon. Dette er dokumentert i Figur 5.13 som viser hvordan initiering av groppkorrosjon avhenger av overflaten før start av korrosjonsforsøket idet en sandblåst flate viser høyere motstand mot korrosjon enn en mottatt/pre-rustet flate.<sup>41</sup>


De fleste rapporterte tester gjennomføres med stålprøver direkte eksponert mot en elektrolytt (vandig løsning) med definert kjemisk sammensetning – innhold av  $Ca(CO_3)_2/KOH/NaOH$ , pH, kloridinnhold, sulfatinnhold). I virkeligheten er dette en sterk forenkling og grenseflaten stål-betong (engelsk: steel - concrete interface (SCI)) vil variere sterkt og påvirke korrosjon på armeringsstål i betong. Dette skyldes forskjell i porestruktur og hulrom («voids») og innhold av porevann i ulike betongstrukturer. Kravet for at korrosjon skal initieres er imidlertid at stålet må være i kontakt med fuktighet – enten dykket i vann eller en vannfilm på flaten pga. kondensering.

To viktige publikasjoner utarbeidet av en arbeidsgruppe innenfor RILEM TC 262-SCI omhandler denne problemstillingen i detalj.<sup>47,48</sup> Hovedtemaet for arbeidet var «Initiering av kloridindusert korrosjon på armeringsstål i betong». Innholdet i rapportene er basert på vanlig armeringsstål (slakkarmering) og omhandler ikke spennarmering spesielt og er fremskaffet ved gjennomgang av en rekke publikasjoner. Selv om spennarmering ikke er hovedtemaet i rapportene, er noen av resultatene også gyldig for denne type armering i betong eller injiseringsmasse. Figur 5.15 viser en skematisk oversikt over sammenhengen mellom karakteristiske forhold i/ved stål-betong grenseflaten (SCI) og påvirkningen fra eksponeringsbetingelsene. Som det fremgår av denne figuren, er det en mengde elementer knyttet til betong/injeksjonsmasse, sammensetning/mikrostruktur/overflate av armeringsstål, elektrolytt sammensetning og endelig ytre belastninger og miljø som påvirker initiering og vekst av korrosjon på armeringsstål i betongkonstruksjoner.



**Figur 5.15 Skematisk fremstilling av sammenhengen mellom karakteristiske forhold ved stål-betong grenseflaten (SCI) og påvirkningen fra eksponeringsbetingelsene.<sup>47</sup>**

Initiering av korrosjon på armeringsstål krever at stålet er i kontakt med vann – enten neddykket i vann eller med en tynn vannfilm på flaten. Figur 5.16 viser et snitt gjennom en struktur bestående av betong og armeringsstål hvor makroskopiske hulrom i kontakt med stålet er skissert. Disse hulrommene kalles i RILEM rapportene for Macroscopical Interfacial Concrete Voids (MICV).<sup>48</sup>

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	37 av 61

Figur 5.17 viser et mer detaljert utsnitt et slikt hulrom (MICV) hvor ulike muligheter for vannkontakt med eksponert stålareal (i hulrommet) er skissert. Det er viktig å poengtere her at størrelsen på MICV normalt er vesentlig mindre enn hulrom i injeksjonsmassen innvendig i kabelrør. I tillegg er det antydnet hvordan initieringspunktet for korrosjon vil avhenge av de ulike fuktingsforholdene. Fire muligheter for initiering av korrosjon er beskrevet (*forenklet beskrivelse – se rapport<sup>48</sup> for flere detaljer*):

Mulighet 1: Hulrom fylt med vann → stor sannsynlighet for initiering av korrosjon under «ugunstig» kombinasjon av klorid, pH og sulfid (ikke nevnt i RILEM 2019 rapporten<sup>48</sup>, men derimot i RILEM 2017 rapporten<sup>47</sup>).

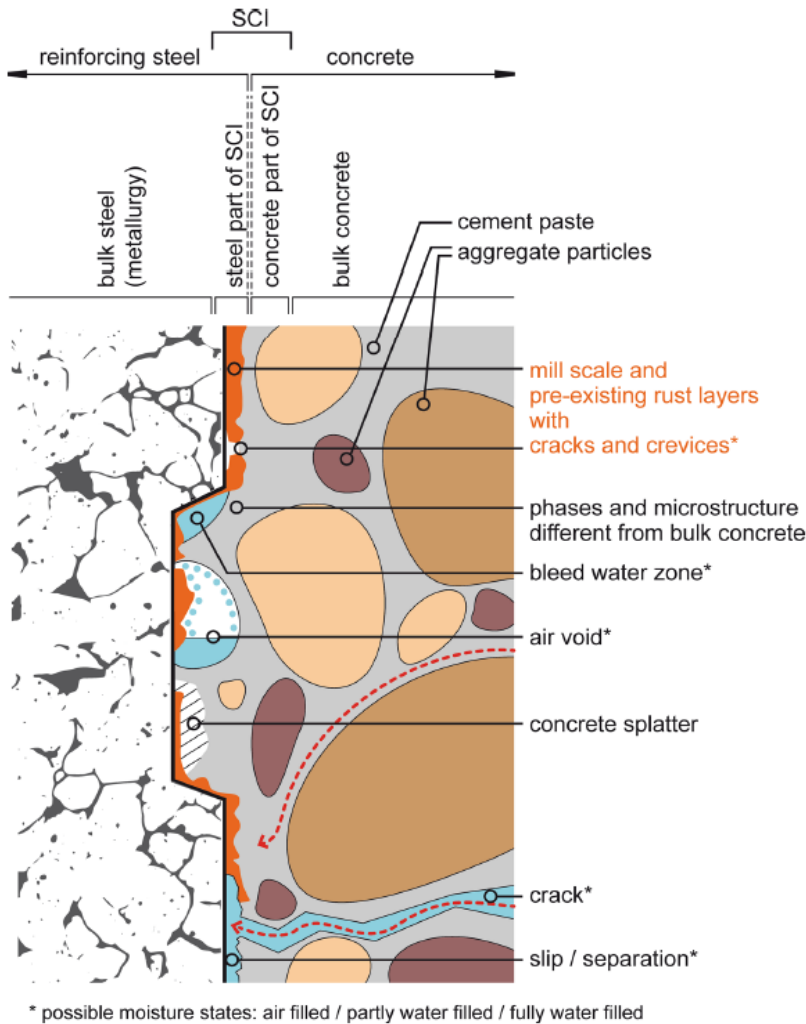
Mulighet 2: Hulrom delvis fylt delvis med vann og delvis med luft (inneholder normalt oksygen) → lokal korrosjon i vannfasen (som i Mulighet 1) i tillegg til tilførsel av oksygen fra luftlaget i kontakt med væsken (vedlikeholder katodereaksjonen, lign. 2.2). Dette gir størst sannsynlighet for initiering av korrosjon.

Mulighet 3: Luftfylt hulrom (virker som oksygen reservoar) med absorbert vann på grenseflaten. Oksygen vil diffundere lett gjennom den adsorberte vannfilmen, men den tynne vannfilmen vil samtidig begrense ionetransporten gjennom filmen → Liten sannsynlighet for initiering av gropkorrosjon på stålfaten med adsorbert vannfilm. Men, etablering av galvanisk element kan gi lokalkorrosjon på stålet som er dekket med sement i nær kontakt med det luftfylte hulrommet.

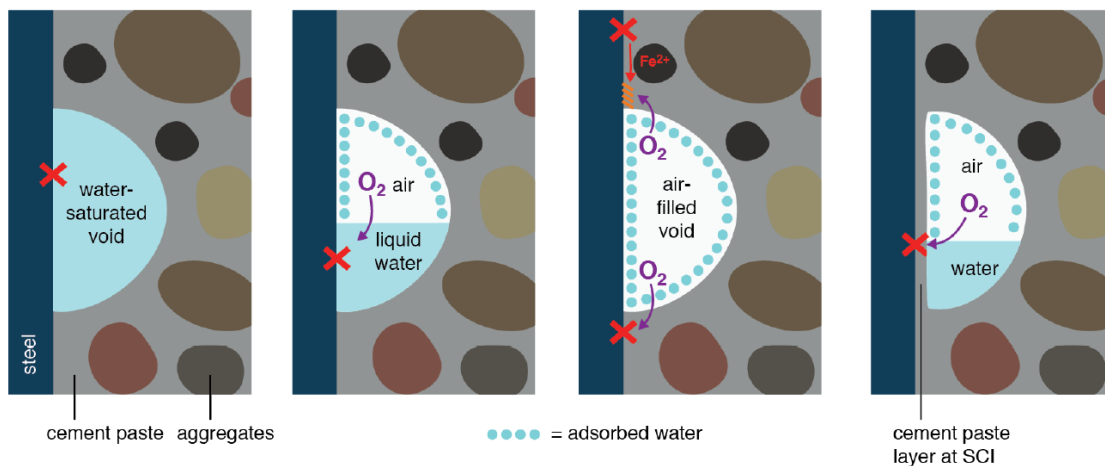
Mulighet 4: Som Mulighet 2, men stålet er dekket med en tynn sementpasta som vil redusere korrosjonsangrepet på stålet sammenlignet med Mulighet 2 pga. pH buffering og barriereeffekt av sement pastaen. Initiering av korrosjon vil bl.a. avhenge av tykkelsen på sementpastaen og sammensetningen av vannet (pH, kloridinnhold, sulfatinnhold, oksygen).

Sannsynligheten for korrosjonsangrep på armeringsstålet vil derfor i stor grad være avhengig av hvilken tilstand (Mulighet 1-4) hulrommet stål – betong/sement har. Ifølge RILEM rapporten<sup>48</sup> gir kombinasjonen «stål eksponert mot vann og luft» (Mulighet 2) størst sannsynlighet for initiering av korrosjon. Dersom hulrom inneholder luft med RH < 65, er sannsynligheten liten for at korrosjon initieres. En annen viktig faktor for å opprettholde en effektiv katodereaksjon (lign. 2.2) som skal balansere anodereaksjonen (lign. 2.1), er oksygeninnholdet i hulrommet – se også Figur 2.7.

Det er samtidig viktig å være klar over at rapporten<sup>48</sup> konkluderer med at i) ståloverflaten, ii) ståltipe/metallurgi, og iii) innhold av fuktighet er det tre parameterne som har størst innvirkning på kloridindusert korrosjon av armering i betong.




**Figur 5.16** Skjematisk fremstilling av grenseflaten mellom armeringsstål og betong med angivelse av typiske bestanddeler i betong. *Rød prikket linje*: Mulig vei for kloridinntrengning. *Blå områder*: Vannansamlinger.<sup>48</sup>



**Figur 5.17** Skjematisk illustrasjon av mulige voids i betong og i kontakt med stål. De røde kryssene indikerer områder hvor korrosjon kan initieres.<sup>48</sup>

Rapportene konkludere videre med at fremtidig testing av korrosjonsegenskapene til stål i betong bør konsentreres om betingelser som er lite testet eller hvor effekten ikke er avklart. Dette betyr testing som simulerer forholdene ved grenseflaten stål-betong (SCI), i grensesjiktet på luft lommer, virkelig armeringsstål inkludert overflateegenskaper/beskaffenhet.<sup>48</sup>

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	39 av 61

## 5.5 Effekt av fuktighet i betong

Kapittel 5.4 beskriver fire mulige voids med tilhørende vannkontakt med armeringsstål i betong. Det konkluderes med at kombinasjonen delvis vannfylt og luftfylt hulrom gir høyest sannsynlighet for initiering av korrosjon. Det bør imidlertid legges til at dette er avhengig av størrelsen på hulrommet. I litteraturen finnes det få studier som ser på effekt av fuktighet i betong på initiering av korrosjon. RILEM rapporten<sup>48</sup> har gjennomgått noen publikasjoner og basert på tilgjengelig informasjon konkluderer de med følgende effekt på initiering av kloridindusert korrosjon:

- $RH < 65\%$  → liten (sannsynlighet for initiering)
- $65\% < RH < 85\%$  → noe
- $RH > 85\%$  → stor

Eksperimentelt arbeid har også dokumentert at kombinasjon mellom våt/tørr eksponering er mer aggressiv enn kontinuerlig våt eksponering.<sup>48</sup> En årsak kan være oppkonsentrering av kloridioner i tørre perioder når vannfilmen fordamper. En annen mulighet er økt tilgang på oksygen på flaten i perioder med tørr flate.

## 5.6 Effekt av vann/semest forholdet


Vann/semest forholdet ( $v/c$  basert på vekt) er en viktig parameter for egenskapene til betong. Hvordan korrosjonsegenskapene til armeringsstål i betong påvirkes av  $w/c$  forholdet er imidlertid mindre undersøkt selv om det finnes noen publikasjoner hvor denne effekten er undersøkt ifm. bestemmelse av kritisk kloridinnhold. RILEM rapporten<sup>48</sup> konkluderer med at «*Effekten av  $w/c$  forholdet på sannsynligheten for initiering av kloridindusert korrosjon på armeringsstål er relativt liten/begrenset og mye mindre enn effekten på mekaniske egenskaper for betong*». Det er imidlertid viktig å være klar over at  $w/c$  forholdet for injeksjonsmasse normalt er høyere enn for betong ( $\sim 0.4$ ).

## 5.7 Oppsummering av observasjoner fra litteraturen

Med utgangspunkt i det som beskrevet i Kapittel 5.1-5.6, kan oppsummering gitt nedenfor gjøres. Oppsummeringen er i hovedsak gjort for spennarmering.

- a) Alkalisk sementmiljø uten klorid i injeksjonsmasse fører til passivering av stålet med meget lav korrosjonshastighet.
- b) Lokal korrosjon kan oppstå ved dannelse av mikro-/makroceller pga. utarming av oksygen i områder mellom armeringstråder.
- c) Alvorlige korrosjonsangrep i områder med mangelfull injeksjonsmasse var karakterisert ved; i) høyt fuktinnhold, ii) lavt totalt klorid ( $Cl^-$ ) innhold, iii) høyt fritt sulfat innhold, og iv) høy pH i porevannet.
- d) Kritisk kloridinnhold for nedbryting av passivfilmen på stål avhenger av pH i vannet, f.eks. for armeringsstål<sup>41</sup>
  - pH 12.6 → kritisk kloridinnhold 0.05-0.45 wt% av sement
  - pH 13.6 → kritisk kloridinnhold 1.8-4.2 wt% av sement
- e) Kritisk innhold av sulfat for nedbryting av passivfilmen avhenger av pH i vannet, f.eks.<sup>37</sup>
  - pH 12.6 og  $[SO_4^{2-}]/[OH^-] = 0.35$  → nedbryting av passiverende sjikt etterfulgt av korrosjon
  - pH 13.3 og  $[SO_4^{2-}]/[OH^-] = 0.7$  → oppbygging/vedlikehold av passivsjikt, neglisjerbar korrosjon
- f) En detaljert undersøkelse av sammenhengen mellom kloridinnhold, pH og fritt sulfat i porevannet og effekt på nedbryting av passivfilmen og etterfølgende korrosjon på stålet i spennarmeringen, er ikke gjennomført i tilstrekkelig grad.
- g) Spennarmering støpt inn i injeksjonsmasse er direkte eksponert mot fuktighet gjennom porer eller hulrom i kontakt med stålet. Den eksponerte ståloverflaten kan fuktes på ulike måter: i) kontakt med porevann, ii) hulrommet er delvis fylt med vann og luft, iii) hulrommet er fylt med fuktig luft som kondenseres på stålfalten. Initiering av korrosjon og korrosjonshastigheten er påvirket av hvilken av disse tre «hulrom betingelsene» som er aktuell.
- h) Stål eksponert mot hulrom som inneholder vann og luft, har størst sannsynlighet for initiering av korrosjon.
- i) På stål eksponert mot
  - hulrom og porer som kun inneholder tørr luft;
  - fastsittende injeksjonsmasse;
 vil korrosjon ikke initieres.



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	40 av 61

## 6 INFORMASJON FRA FEDA BRU ETTER RIVING

Feda bru ble oppført i perioden januar til desember i 1972 og var lokalisert i tettstedet Feda ca. 10 km øst for Flekkefjord hvor den krysset en elv.<sup>51</sup> Brua hadde en lengde på 200 m og var delt opp i 7 spenn med lengder på 15 m til 35 m, hvorav 6 spenn var spennarmert. Kablene var av type BBRV med enkeltspenntråder med diameter 7 mm. Feda bru ble revet i oktober-desember 2007.

Multiconsult gjennomførte i januar 2008 på oppdrag fra SVV, undersøkelse med sikte på å dokumentere tilstand og grad av korrosjon på spennarmering, kabelkanal, ankere, skjøtestykker og slakkarmering. Videre ble utstøping av injeksjonsmørtel omkring spennkablene kontrollert og kloridinnholdet i prøver av injeksjonsmasse og konstruksjonsbetong analysert.

Følgende konklusjoner mhp. korrosjon ble trukket fra undersøkelsene:

- Det ble gjennomgående observert lite korrosjon på spennkablene – kun små brune rustflekker som ikke resulterte i tverrsnittsreduksjon av trådene (Figur 6.1a og 6.1e).
- Det ble flere steder observert korrosjon både innvendig og utvendig på kabelkanalene. Angrepene på innsiden var mest omfattende i høybrekkene (kan skyldes innblanding av luft og vann i injeksjonsmørtelen under injisering (Figur 6.1b).
- Korrosjon ble observert på metallhylsene omkring injeksjonsslengene ved kopling til kabelkanalen (Figur 6.1c).
- Meget god oppfylling av injeksjonsmørtel i kabelkanalen – inntrengning av mørtel mellom enkeltspenntråder og gjennomgående fylling av alle hulrom (Figur 6.1d).
- Ved høybrekkene ble det flere steder observert mangelfull oppfylling av injeksjonsmasse. De minste kabelkanalene var bedre utstøpt (fylt) enn de større rørene.
- På et anker ble det observert omfattende korrosjon på 5 spenntråder med tverrsnittsreduksjon på opptil 1 mm (26%).
- På alle undersøkte trompeter ble det observert korrosjon ved injeksjonshullet (Figur 6.1e).

Det ble også gjennomført kloridanalyser på stykker av injeksjonsmasse og konstruksjonsbetong. Følgende observasjoner ble gjort:


- Alle undersøkte biter av injeksjonsmasse inneholdt klorider. Kloridinnholdet ble målt til 0.08-0.1vekt% av antatt sementinnhold.
- Analyse av kloridinnholdet i 2 prøver av betongen viste 0.18 vekt% (dybde 0-30 mm) og 0.09 vekt% (dybde 30-55 mm).



a)



b)

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	41 av 61



c)



d)



e)



f)

**Figur 6.1** Bilder fra inspeksjonen av spennarmeringen for Feda bru. Bilde f) viser omfattende korrosjonsangrep på spenstråder der hvor injeksjonsslangen var tredd inn i kabelkanalen.<sup>51</sup>

## 7 DISKUSJON


### 7.1 Oppsummering av resultater fra inspeksjon og laboratorieundersøkelser

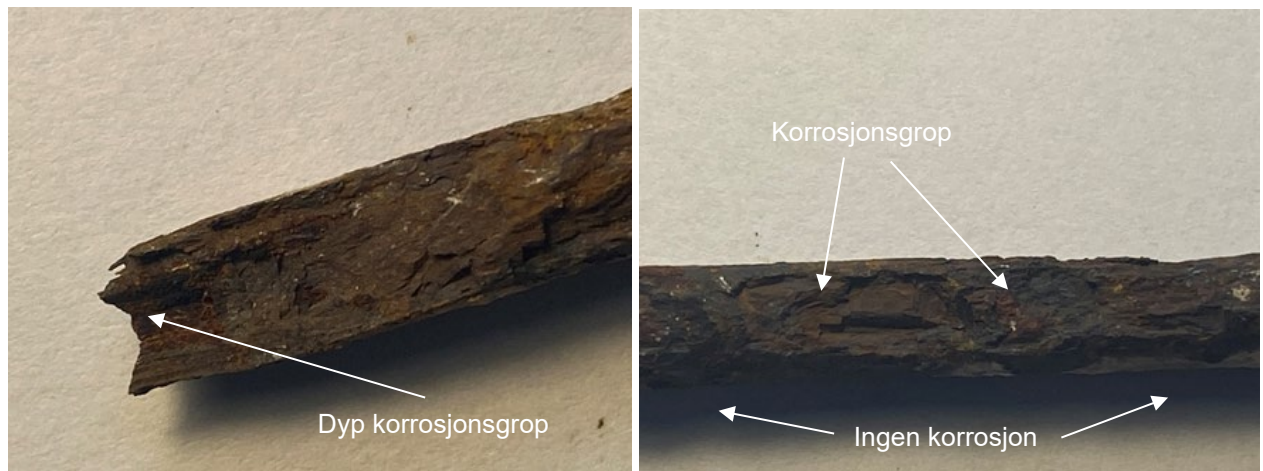
Resultatene fra laboratorieundersøkelse av trådbiter fra Herøysund bru og injeksjonsmasse er beskrevet i Kapittel 4.1-4.2 og konkluderer med:

1. Tråd fra Herøysund bru er utsatt for korrosjon på deler av undersøkt tråd. Angrepene er både «ujevn» uniform korrosjon og gropkorrosjon.
2. Groper hadde elliptisk form med lengde 5-15 mm og bredde 3-4 mm. Dybden på gropa varierte, men dypeste grop var opp til 1.5 mm.
3. På deler av trådene ble det observert «ujevn» generell korrosjon med dybde opp til 0.3 mm på deler av omkretsen, mens resten av omkretsen viste ingen tegn til korrosjonsangrep.
4. På deler av spenstråden uten korrosjonsangrep var det gjenværende injeksjonsmasse.
5. Tråden som var utsatt for brudd, viste kraftig korrosjonsangrep i området rundt bruddet. Gjenværende tverrsnittsareal ved bruddtidspunktet er anslått å være 30-35% av opprinnelig tverrsnittsareal.
6. Restbruddet har form av å være et typisk restbrudd pga. at bruddstyrken i materialet overskrides som følge av redusert tverrsnittsareal pga. korrosjon.
7. Undersøkelse av korrosjonsprodukt ved bruk av SEM/EDS, XRD and XPS gav følgende resultat:
  - SEM/EDS og XRD: Svovel og klorid
  - XPS: Svovel

Figur 7.1 viser bilde av biter av to spenstråder som ble undersøkt i laboratoriet.



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	42 av 61



**Figur 7.1** Venstre: Bilde av tråd som var gått til brudd. Høyre: Tråd med overflate-korrosjon – ikke til brudd.

Undersøkelsene gjort under inspeksjonen på Herøysund bru i august 2020 og etterfølgende vurdering av bildematerialet fra inspeksjon kan oppsummeres som følger:

#### Injeksjonsmassen

- har ulik kvalitet og konsistens;
- sitter godt fast på spenntråden;
- dekker hele kabelkanalen;
- det finnes store hulrom med manglende injeksjonsmasse;
  - noen steder likevel tørt område
  - områdene finnes hovedsakelig i underkant av spennkablene
- fuktinnhold på 21 wt% og 44 wt% i en «tørr» og «våt» prøve (SINTEF rapport)
- den er frostsprengt

#### Kabelkanal

- generell trend: noe korrosjon på innvendig overflate, men lite korrosjon å observere på utvendig flate


SINTEF<sup>29</sup> analyserte to prøver av injeksjonsmasse og målte

- pH 13 i porevann
- 0.037% Cl<sup>-</sup> og 8.99 mmol/l Svovel våt injeksjonsmasse

## 7.2 Vurdering av årsak til korrosjon på spenntråd

Korrosjon av spenntråden krever at den er i direkte kontakt med fuktighet. Dette kan være vann i en vannfylt pore/hulrom eller en absorbert/kondensert vannfilm. Sammensetningen av vannet/vannfilmen vil ha stor betydning for om korrosjon vil initieres og tilhørende korrosjonshastighet. Ifølge Kapittel 5 er pH i tillegg til Cl<sup>-</sup> og SO<sub>4</sub><sup>-</sup> -ioner, viktige elementer. Oksygen er et annen viktig element som vil påvirke forholdene ifølge Kapittel 2.3.5.

På de undersøkte trådene ble det dokumentert ellipseformede groper med dybde opp til ca. 3.2 mm (tråd som var gått til brudd). Mens det ble observert «ujevn» generell korrosjon med dybde ca. 0.3 mm på andre tråder. Herøysund bru var ferdig i 1966 og har derfor vært i bruk i 55 år. Dersom man midler tæringsdybden over levetiden, får man en korrosjonshastighet på henholdsvis 58 µm/år og 6 µm/år for de to ulike korrosjonsangrepene. I litteraturen operere man ofte med en anodisk strømtetthet på 10 mA/m<sup>2</sup> i passivtilstanden (se Figur 5.5 som et eksempel). Ved å bruke lign. (2.16) kan man teoretisk beregne en

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	43 av 61

midlere korrosjonshastighet på 10  $\mu\text{m}/\text{år}$  på stål med denne anodiske strømtettheten. Dette er i samme størrelsesorden som beregnet korrosjonshastighet over levetiden for prøvene med «ujevn» generell korrosjon. Dette indikerer at fuktigheten har vært tilstede i hele levetiden fra byggeprosessen. En annen faktor som understøtter dette er at kabelkanalen for Herøysund bru er langsveiste stålrør som ble levert som en lengde på rull. Siden kabelkanallengdene var sveist sammen til total lengden, er det liten sannsynlighet for lekkasje inn i kabelkanalen forutsatt at denne ikke ble perforert/ødelagt under/etter installasjon. En usikkerhet her er knyttet til observasjonen fra 1992 (Kapittel 3.1) hvor et bilde viser frostsprengning og blottlegging av kabelkanal med manglende injeksjonsmasse i hele tverrsnittet. Dersom det eksisterer flere slike «lekkasjepunkt» for vann/fuktighet, kan dette ha ført til etterfylling av vann/fuktighet over levetiden.

Et annet viktig spørsmål er knyttet til tilgang på oksygen i vannet/vannfilmen. Så lenge det er oksygen til stede og det foregår en korrosjonsreaksjon, vil oksygenreduksjon ifølge lign. (2.2) være den dominerende katodereaksjonen. Dette betyr imidlertid at oksygen forbrukes og dersom det ikke «etterfylles» oksygen vil etter hvert vannet/vannfilmen utarmes på oksygen. Da vil hydrogenreaksjon ifølge lign. (2.11) ta over som katodereaksjon samtidig som korrosjonspotensialet vil bli mer negativt (Figur 2.7). En enkel overslagsberegning med anodisk strømtetthet som angitt ovenfor på 10  $\text{mA}/\text{m}^2$  indikerer at oksygenet vil være forbrukt i løpet noen dager dersom det ikke «etterfylles».


Spørsmålet her er: Vil oksygen fra utsiden i betongen «penetere» kabelkanalen? Dersom kabelkanalen er intakt uten hull, vil dette ikke være mulig. Dermed må eventuell «etterfylling» av oksygen skje innvendig i kabelkanalen. En mulighet er at kabelkanalen selv inneholder nok oksygen til å «etterfylle» områder som blir utarmet pga. anodisk og katodisk reaksjon på flaten. Inspeksjon viser at det kun er enkelte områder som er angrepet av korrosjon, mens store områder har intakt passivfilm og er dermed ikke utsatt for korrosjon. Oksygenet i disse områdene er derfor sannsynligvis ikke forbrukt siden passivfilmen fortsatt er intakt. Andre muligheter er etterfylling fra utsiden gjennom endekoplingene eller injeksjonspunktene for injeksjonsmasse eller gjennom skader i kabelkanalen (som angitt ovenfor).

Inspeksjonen og laboratorieundersøkelsene har dokumentert at spenntråd har vært utsatt for korrosjon med til dels alvorlige korrosjonsangrep. Hva er så årsaken(e) til disse korrosjonsangrepene? Det ble avdekket områder med manglende injeksjonsmasse og frostsprengt injeksjonsmasse i kabelkanalene som ble undersøkt. Samtidig dokumenterte SINTEF gjennom sine undersøkelser av injeksjonsmassen at denne hadde et høyt fuktinnhold på opptil 44 wt% i områder hvor det ble observert korrosjon på spenntråd.<sup>29</sup> Dette betyr at fuktighet (vann) er tilstede i kabelkanalene. Undersøkelsene av korrosjonsprodukt ved NTNU og undersøkelsen av injeksjonsmasse ved SINTEF dokumenterte at klorid og svovel/sulfat var tilstede selv om det er usikkerhet knyttet til de verdiene som ble rapportert. Samtidig ble det målt SINTEF en pH på 13 i porevann fra prøven av injeksjonsmasse.

Den gjennomgåtte litteraturen som er referert i Kapittel 5, konkluderer med at ved eksponering av spennarmering i injeksjonsmasse er pH, Cl<sup>-</sup>-ion og SO<sub>4</sub><sup>-</sup>-ion konsentrasjonen i tillegg til fuktighet de viktigste parametrene for initiering av korrosjon. Litteraturen oppgir noen betingelser hvor korrosjon har initiert og andre hvor passivitet er opprettholdt. For kombinasjonen pH 12.6 og  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{OH}^-] = 0.35$  er det vist at det passive sjiktet nedbrytes og at korrosjon starter tiltros for at løsningen ikke inneholdt noen Cl<sup>-</sup>-ioner. Ved høyere pH og  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{OH}^-]$  forhold, var passivsjiktet intakt og korrosjonen neglisjerbar. På tilsvarende måte ble sammenhengen mellom pH og Cl<sup>-</sup>-ion konsentrasjon på initiering av korrosjon undersøkt. Svakheten med publisert litteratur er at lite arbeid med kombinasjonen av de tre viktige parametrene i liten grad er dokumentert noe som også blir påpekt i flere artikler. SINTEF analysen viser at både kloridinnholdet (0.037%) og svovel innholdet (8.99 mmol/l) i porevann fra injeksjonsmassen er lavt. Analysene påviser imidlertid tilstedeværelse av begge elementene. Spørsmålet er hvor nøyaktige og/eller representative disse verdiene er for innholdet i ulike deler av kabelkanalene med korrodert strekkarmering.

Med bakgrunn i tilgjengelig informasjon fra laboratorieundersøkelser av spenntråd fra Herøysund bru og informasjon fra litteraturen konkluderes det med at årsaken til korrosjonsangrepene på spennarmeringen skyldes eksponering til vann/vannholdig atmosfære/våt sementpasta som inneholder Cl<sup>-</sup>-ioner og SO<sub>4</sub><sup>-</sup>-ioner og med en pH som fører til at passivfilmen brytes ned. Det er vanskelig å påpeke andre forhold som kan være årsaken til at passivsjiktet brytes ned og korrosjon starter. Årsaken til at korrosjonshastigheten i enkelte områder er meget høy – som for tråden som gikk til brudd – kan være at det oppstår galvaniske makroceller.



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	44 av 61

### 7.3 Vurdering av årsak til brudd i spenstråd

Spenstråden som var gått til brudd, var spesielt interessant siden et brudd ikke nødvendigvis er forårsaket av bare korrosjon, men også kan være forårsaket av spenningskorrosjon. Undersøkelsene av tråden som var gått til brudd, viste imidlertid at tverrsnittet ved bruddstedet var kraftig redusert pga. groppkorrosjon. Det ble anslått at gjenstående tverrsnittsareal av tråden var i størrelsesorden 30-35% ved bruddtidspunktet. Det betyr at kraften som kan overføres reduseres med 65-70% av maks. kraft ifølge design. Sannsynligvis har trekraften i tråden gitt en spenning i tråden som overskrider bruddspenningen noe som har gitt et normalt brudd i tråden uten at spenningskorrosjon er mekanismen for brudd. Restbruddet som var ca. 45° på kraftretningen, styrker også denne teorien. Dette utelukker likevel ikke muligheten for at det kan forekomme spenningskorrosjon på spennarmeringen i omgivelsene undersøkt på Herøysund bru, noe som bør undersøkes nærmere.


## 8 KONKLUSJONER

Fra undersøkelsene på Herøysund bru (se Kapittel 4.1):

1. Spenstråder montert innvendig i kabelkanal på Herøysund bru er utsatt for korrosjon når «riktige» betingelser er tilstede.
2. Betingelser for korrosjon innebærer:
  - Utilstrekkelig fylling av injeksjonsmasse og/eller frostsprengt injeksjonsmasse.
  - Porevann, fuktig luft og/eller fuktig injeksjonsmasse er i kontakt med spennarmering.
  - Tilstedeværelse av elementer som øker korrosiviteten ved å i) redusere pH, og/eller ii) bryte ned/hindre oppbygging av passivsjiktet, og/eller iii) påvirker polariseringen av stålet.
3. Laboratorieundersøkelser av tråd fra Herøysund bru viste:
  - Tråd som var gått til brudd – groplignende korrosjonsangrep rund bruddet med gjenværende tverrsnitt tilsvarende 2.9 mm høyde. Gjenværende tverrsnitt ved bruddtidspunktet ble anslått til å være 30-35% av opprinnelig tverrsnittsareal.
  - Trådbiter uten brudd - dype korrosjonsgroper med elliptisk form med lengde 5-15 mm, dybde opp til 1.5 mm mm og bredde 3-4 mm på en del av omkretsen. På andre deler av omkretsen var det ingen korrosjonsangrep.
4. Ved analyse av korrosjonsprodukt og injeksjonsmasse er det påvist at klorid og svovel er tilstede. Kloridinnholdet i fuktig injeksjonsmasse ble målt til 0.037 wt% (av tørr masse). I tillegg ble det registrert klorid i korrosjonsproduktet på tråden.
5. En pH verdi på 13 ble målt i porevannet.
6. Korrosjon er observert på kabelkanal – i hovedsak er dette korrosjon på innsiden av kabelkanalene.
7. Den innsamlede informasjonen tyder på at korrosjon av spenstråd skyldes lokale forhold innvendig i kabelkanalen med liten (eller ingen) påvirkning utenfra. Det betyr verken kloridinntrengning gjennom utvendig betong eller karbonatisering av denne er årsaken.
8. I områder hvor injeksjonsmassen fyller opp hulrommet innvendig i kabelkanalen, og hefter godt både til tråd og kabelkanal, er det ingen tegn til korrosjon på verken tråd eller innvendig i kabelkanal.

Fra litteraturundersøkelsen (se Kapittel 5.7):

1. Alkalisk sementmiljø uten klorid i injeksjonsmasse fører til passivering av stålet med meget lav korrosjonshastighet.
2. Alvorlige korrosjonsangrep i områder med mangelfull injeksjonsmasse var karakterisert ved; i) høyt fuktinnhold, ii) lavt totalt klorid (Cl<sup>-</sup>) innhold, iii) høyt fritt sulfat innhold, og iv) høy pH i porevannet.
3. Kritisk klorid- og/eller sulfatinnhold for nedbryting av passivfilmen avhenger av pH - [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] og [SO<sub>4</sub><sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] er viktige forholdstall som delvis er undersøkt i litteraturen.
4. Sammenhengen mellom kloridinnhold, pH og fritt sulfat i porevannet og effekt på nedbryting av passivfilmen og etterfølgende korrosjon på stålet i strekkarmeringen, er ikke kartlagt i tilstrekkelig grad.
5. Spennarmering støpt inn i injeksjonsmasse er direkte eksponert mot fuktighet gjennom porer eller hulrom i kontakt med stålet. Den eksponerte ståloverflaten kan fuktes på ulike måter: i) kontakt med porevann, ii) hulrommet er delvis fylt med vann og luft, iii) hulrommet er fylt med fuktig luft som kondenseres på stålflaten.

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	45 av 61

## 9 VIDERE TESTING

Kapittel 5.4 inneholder en viktig problemstilling: Hvordan kan man være sikker på at det eksperimentelle arbeidet kan gjenskape forholdene/betingelsene man har rundt armeringsjern i betong og/eller strekkarmering eksponert mot en injeksjonsmasse i et kabelrør? Følgende utsagn i rapporten til Angst et al.<sup>48</sup> indikerer hvor vanskelig dette er i praksis:


*Corrosion initiation in concrete is a stochastic process. Even when steel surface is in pristine condition and most confounding factors at the SCI (steel-concrete interface) that affect corrosion initiation are eliminated, corrosion may initiate at random sites on the steel surface when sufficient amount of chloride is present in the electrolyte. Where and how corrosion might initiate in these idealized conditions would depend mainly on the local imperfections of the passive film. Beyond this well-accepted stochastic nature of localized corrosion, the most significant factors affecting corrosion initiation of steel in concrete are related to the characteristics of the SCI.*

I tillegg til SCI, er det en rekke andre forhold knyttet til bl.a. type stål, overflate beskaffenhet, sammensetning av betong/injeksjonsmasse, eksponeringsbetingelser (miljø, temperatur, ...) og design, som har betydning for initiering og vekst av korrosjon på armeringsstål. Dette betyr at det er meget vanskelig (umulig) å gjenskape virkelige forhold i laboratoriet. Samtidig er korrosjon en tidsavhengig degraderingsprosess – både fordi betingelsene innvendig i betong/injeksjonsmasse vil variere med tiden slik at initiering av korrosjon kan ta kort eller lang tid samtidig som korrosjonshastigheten (etter initiering) også vil variere med tiden. Dette er også årsaken til at de fleste publiserte testprogram er konsentrert om å undersøke effekt av utvalgte parametere – ofte under vandige omgivelser.


Korrosjonstesting av armeringsstål i betong foregår i utstrakt grad. Dessverre finnes det få standarder med spesielt fokus på korrosjonstesting.<sup>49</sup> Dette gjenspeiler seg i referanselisten til de to RILEM rapportene forfattet av Angst<sup>47,48</sup> hvor det ikke er referanse til en slik standard. ASTM C876-15 er en standard som benyttes for å undersøke korrosjonstilstanden (-aktiviteten) på armeringsstål innstøpt i betong.<sup>50</sup> Denne standarden er imidlertid ikke egnet for testingen som foreslås gjennomført i dette prosjektet siden formålet med testen er å undersøke potensialutviklingen på stålarmoring innstøpt i betong for på den måten å bestemme korrosjonsforholdene på stålet. I dette prosjektet er målsettingen å direkte undersøke effekten av ulike parametere som pH, klorid- og sulfatinnhold på korrosjon av strekkarmering O.Burkan Isgor et al.<sup>51</sup> har publisert en artikkel som gir et viktig bidrag i etableringen av et testprogram og dokumentasjonen av programmet og tilhørende resultater. Et viktig punkt i denne artikkelen er kravet om en nøyaktig beskrivelse av alle parametere som har betydning for initiering og vekst av korrosjon.

## REFERANSER

- /1/ Einar Noremark «Erfaringer Armeringssystemer» - mangler dato
- /2/ BBRV-systemet grunnlagsdata og funksjon - pdf fra SVV
- /3/ Notat fra Lise Bathen «Spennarmerte bruer i Norge – historisk utvikling» - mangler dato
- /4/ Presentasjon fra SVV - Tunnel og betongseksjonen, VEG-avdelingen VD – Fjerning av Farriseidet Brua. Presentert på Fagsamling Bruseksjon Vest 04.12.2018.
- /5/ Dekra AB, Herøysund Bru «Locating voids in grouted tendon ducts with NDT», Report: Ref. 7204-R-584522-Ver., 2020-02-18.
- /6/ Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 61 - Corrosion of Steel in Concrete Structures. Edited by Amir Poursaee.
- /7/ Sanchez M, Gregori J, Alonso C, Garcia-Jareno JJ, Takenouti H, Vicente F. Electrochemical impedance spectroscopy for studying passive layers on steel rebars immersed in alkaline solutions simulating concrete pores. *Electrochim Acta* 52 (2007) 7634–7641.
- /8/ Pourbaix, M. "Atlas of Electrochemical Equilibria in - Aqueous Solutions". National Association of Corrosion Engineers 1440 South Creek Drive, Houston, Texas 77084 (1974). <http://sunlight.caltech.edu/aic/pourbaix.pdf>
- /9/ Bertolini, L., and Carsana, M. "High pH Corrosion of Prestressing Steel in Segregated Grout." Modeling of Corroding Concrete Structures. RILEM Book series 5. Rilem, 2011.
- /10/ <https://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability/corrosion-of-embedded-materials>
- /11/ <https://www.slideshare.net/abdulrasi/1corrosionandprotectionofsteelreinforcedconcrete120620110136phpapp021>

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	46 av 61

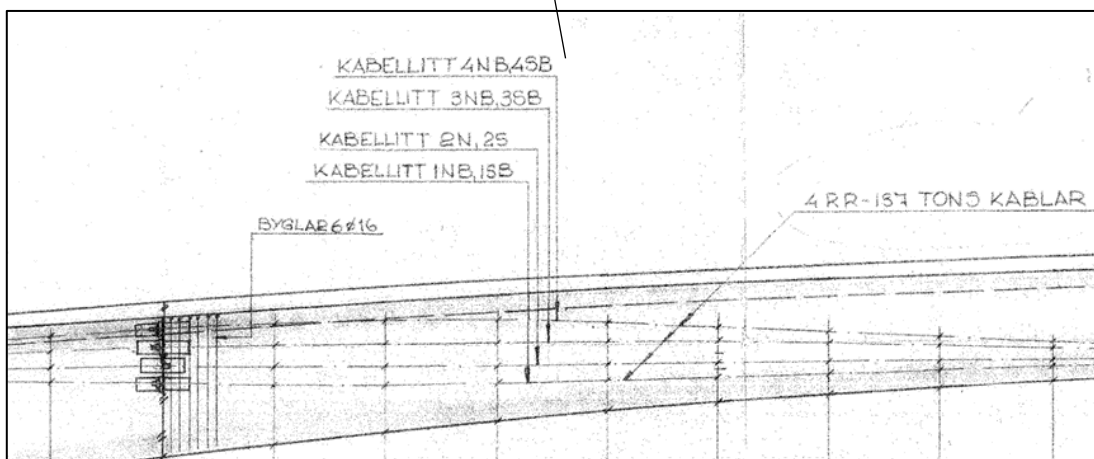
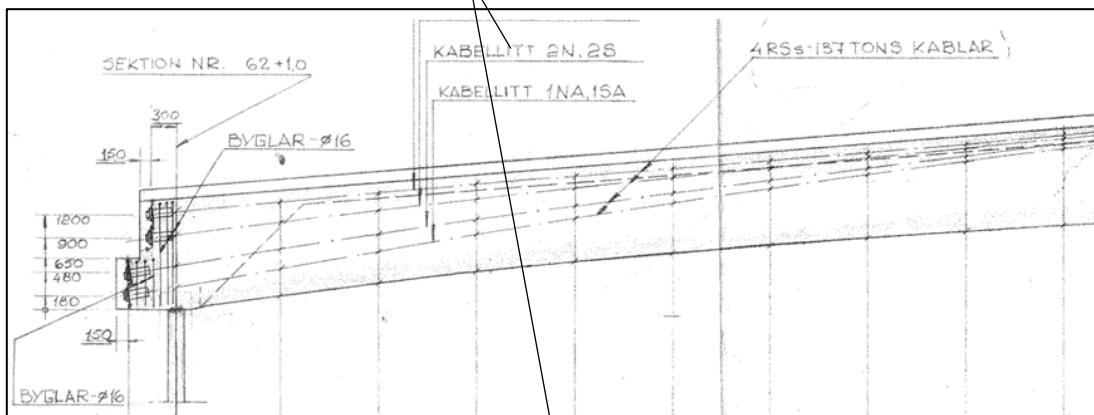
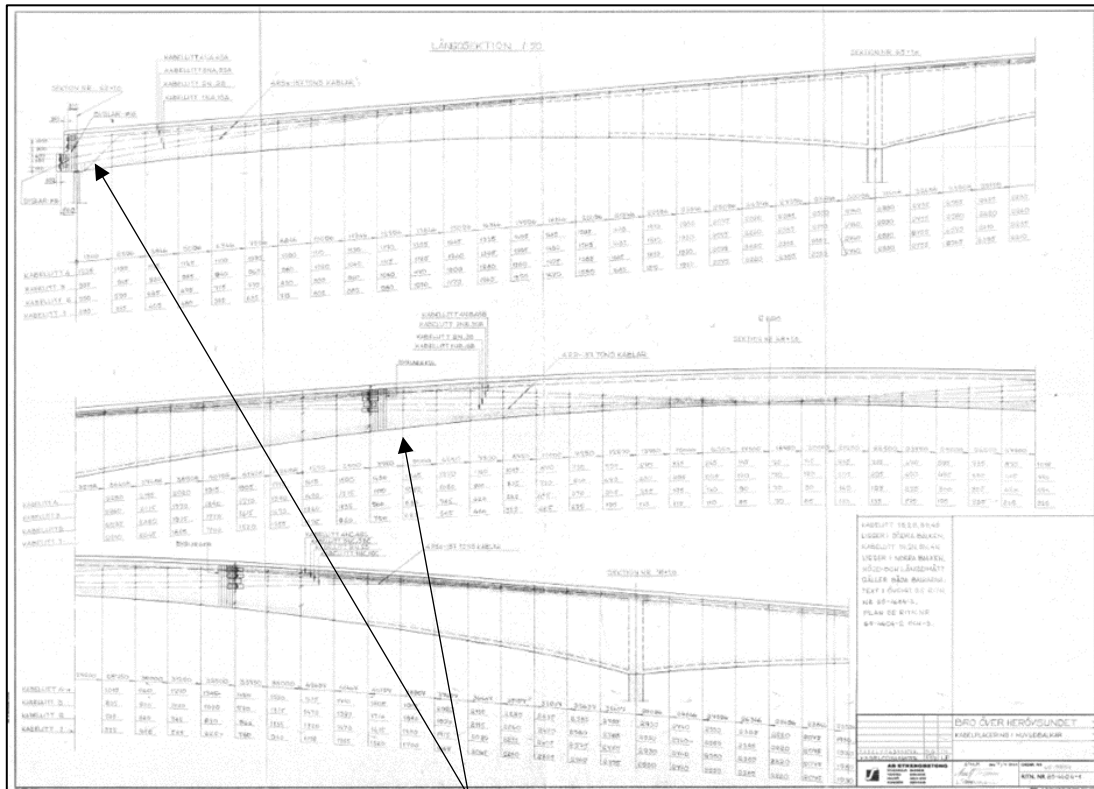
- /12/ K.Lau, M.Paredes, J.C.Rafols, Corrosion Evaluation of Post-tensioned tendons with dissimilar grout. Paper no. C2012-0001738, NACE Corrosion International 2012.
- /13/ A.Sagües, R.G.Powers, H.Wang, Mechanism of corrosion of steel strands in post tensioned grouted assemblies. Paper no. 03312, NACE Corrosion International 2003.
- /14/ [https://www.vegvesen.no/s/vegnormaler/hb/014/Gamle\\_filer/14.64/014-641.pdf](https://www.vegvesen.no/s/vegnormaler/hb/014/Gamle_filer/14.64/014-641.pdf)
- /15/ SVV håndbok 026 / R762
- /16/ SINTEF, 2009. Sintef byggforskning 520.061 armeringskorrosjon byggforskserien 2009
- /17/ U.Angst, B.Elsener, C.K.Larsen, Ø.Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete — A review. Cement and Concrete Research. Volume 39, Issue 12, December 2009, pages 1122-1138 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>.
- /18/ Tutti, K., 1982. Corrosion of Steel in Concrete. CBI Research Report No. 4.82. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- /19/ C.M.Hansson, A.Poursaee, A.Laurent, Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes. Cement and Concrete Research 36 (2006) 2098–2102.
- /20/ Corrosion of Prestressing Steels. Reported by ACI Committee 222 – ACI 222.2R-01 (2001).
- /21/ Brev fra Overingeniøren, Statens Vegvesen - Helgeland Vegavdeling – Mosjøen, datert 25.aug. 1966 Tittel: Bru over Herøysundet. Avlevering – sluttoppgjør.
- /22/ Brev fra Nils M. Pedersen, Bruavdelingen – Vegdirektoratet til Vegsjefen i Nordland, datert 29.november 1965 Tittel: Herøysund Bru – Rapport
- /22/ Brev fra Vegsjefen i Nordland til Ingeniør Per Gulbrandsen A/S, Bodø, datert 4.1.1966 Tittel: Herøysund Bru
- /24/ Arkivmateriale fra AAS-Jacobsen Herøysund bru – Fra Byggefasen
- /25/ 18-1069 Herøysund Bru – Spesialinspeksjon, Dokumentkode: 713789-18-1069-RAP-01, 23.10.2017.
- /26/ SINTEF Prøvningsrapport - Laboratorieundersøkelser av injiseringsmasse fra innsiden av kabelkanal for spennarmering på Herøysund bru. 2020-03-20.
- /27/ Informasjon fra Lise Bathen – Veiledning til bilder fra inspeksjonen 11.-12.08.2020.
- /28/ Øystein Antonsen: Tension thread corrosion on Herøysund Bridge. Rapport fra Fordypningsprosjekt, ved Institutt for Materialteknologi/NTNU. Desember 2020.
- /29/ SINTEF Prøvningsrapport – Undersøkelser av injiseringsmasse fra kabelbane til Herøysund bru. 2020-11-25.
- /30/ Kingsley Lau, Corrosion of Post-Tensioned Tendons with deficient grout – Final report Project BDV29-977-04. FDOT Research Center, Tallahassee, FL 32399, October 2016.
- /31/ Lau, K., Lasa, L., Peredes "Update on Corrosion of Post-Tensioned Tendons with Deficient Grout in Florida". Paper no. 4225, NACE Corrosion International 2014.
- /32/ Gouda, V.K., (1970). "Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: I. Immersed in alkaline solution." British Corrosion Journal, V.5. pp. 198-203.
- /33/ Al-Tayyib, A.J., Somuah, S.K., Boah, J.K., Leblanc, P., and Al-Mana, A.I., (1982). Cement and Concrete Research, V. 18. pp. 774-782.
- /34/ Dehwah, H.A.F., Maslehuddin, M., and Austin, S.A., (2002) "Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concrete." Cement and Concrete Composites, V. 24. pp. 17-225.
- /35/ Vigneshwaran, K., Lasa, I. "Anodic behavior of Steel in Enhanced Sulfate Solutions". Paper no. 7712, NACE International 2016.
- /36/ Vigneshwaran, K.K.K., Permeh, S., Echeverria, M., Lau, K. and Lasa, I. "Corrosion of Post-Tensioned Tendons with Deficient Grout, Part 1: Electrochemical Behavior of Steel in Alkaline Sulfate Solutions." Corrosion, Vol. 74, No. 3 (2018).
- /37/ Lau, K., Lasa, L., Peredes, M., Rafols, J. "Laboratory Corrosion Assessment of Post-Tensioned Tendons Repaired with dissimilar Grout". Paper no. 2602, NACE Corrosion International 2013.
- /38/ Bertolini, L., and Carsana, M. "High pH Corrosion of Prestressing Steel in Segregated Grout." Modeling of Corroding Concrete Structures. RILEM Book series 5. Rilem, 2011.
- /39/ Maddalena Carsana and Luca Bertolini. Corrosion failure of post-tensioning tendons in alkaline and chloride-free segregated grout: a case study. Structure and Infrastructure Engineering, 11(3), 402-411, 2015. ISSN: 1573-2479 (Print) 1744-8980 (Online).
- /40/ Ahern M., Yousef A., Xia Z., Lewis R., Poston R. Anatomy of grouted post-tension tendon failure. In Proc. of the 5th fib Congress. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale du beton (fib), 2018.
- /41/ Li, L. Sagues, A.A., "Chloride Corrosion Threshold of Reinforcing Steel in Alkaline Solutions—Open-Circuit Immersion Tests". CORROSION—Vol. 57, No. 1, p. 19 (2001).

 <b>NTNU</b>	<i>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</i>		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	47 av 61


- /42/ Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Matteo Gastaldi, Federica Lollini, and Elena Redaelli. "Corrosion of Steel in Concrete and Its Prevention in Aggressive Chloride-Bearing Environments". 5th International conference on Durability of Concrete Structures Jun 30–Jul 1, 2016 Shenzhen University, P.R.China.
- /43/ Wang, H., Sagues, A.A., Powers, R. "Corrosion of the Strand-Anchorage System in Post-Tensioned Grouted Assemblies". Paper no. 05266, NACE Corrosion International 2005.
- /44/ Hausmann, D.A., Materials Protection, 6(10), 1967 p.19.
- /45/ Pepenar, I. "Electrochemical Behaviour of the Prestressing Steel in Alkaline Electrolytes: Influence of Chloride ions." Paper no. 9708, NACE Corrosion International 2017.
- /46/ P.Pedferri, Cathodic protection and cathodic prevention. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, pp. 391-402, 1996.
- /47/ Ueli M. Angst et al., The Steel-concrete interface. Materials and Structures (2017) 50:143. DOI 10.1617/s11527-017-1010-1
- /48/ U.M.Angst et al., The effect of the steel-concrete interface on chloride- induced corrosion initiation in concrete: a critical review by RILEM TC 262-SCI. Materials and Structures 52 (2019) 88. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-019-1387-0>
- /49/ O.Burkan Isgor et al., Recommended practice for reporting expeeimental data produced from studies on corrosion of steel in cementitious systems. RILEM Technical Letters (2019) 4:22-32 DOI: <http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.90>
- /50/ ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States
- /51/ Feda bru – Kontroll av armeringskorrosjon på spennkabler. Rapport no. 117138/01, Mulitconsult, datert 2.juli 2008.
- /52/ Philippe Refait et al., Corrosion of Carbon Steel in Marine Environments: Role of the Corrosion Product Layer. Corros. Mater. Degrad. 2020, 1, 198–218, <http://dx.doi.org/10.3390/cmd1010010>.



**VEDLEGG 1 – Kabelplassering i hovedbrakar på Herøysund bru (tegn.nr. 64-4604-1/07.07.1964).**



**Figur 1-1 Originaltegninger av kabelplassering i hovedbrakar på Herøysund bru.**

 <b>NTNU</b>	<i>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</i>		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	49 av 61


## VEDLEGG 2 – Bilder fra Prøvefelt 1

Fokus på korrosjonsangrep



**Figur 2-1** Bilder tatt under inspeksjonen 11.-12.08.2020 (tilsvarer bilde 1-15, 1-16, 1-17, 1-10, 1-9 og 1-12 i Vedlegg 5).




 <b>NTNU</b>	<i>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</i>		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	50 av 61

### Injeksjonsmasse



**Figur 2-2** Bilder tatt under inspeksjonen 11.-12.08.2020 (tilsvarer bilde 1-6, 1-7, 1-11,1-3 i Vedlegg 5).



	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	51 av 61


## VEDLEGG 3 – Bilder fra Prøvefelt 2

Fokus på korrosjon



**Figur 3-1** Bilder tatt under inspeksjonen 11.-12.08.2020 (tilsvarer bilde 2-14, 2-10, 2-15, 2-16, 2-18 i Vedlegg 5).




	<i>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</i>		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	52 av 61

### Injiseringsmasse



Figur 3-2 Bilder tatt under inspeksjonen 11.-12.08.2020 (tilsvarer bilde 2-11, 2-12, 2-2, 2-5 og 2-6).




	<i>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</i>		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	53 av 61

## VEDLEGG 4 – Bilder fra Prøvefelt 3

Fokus på korrosjonsangrep






 <b>NTNU</b>	<i>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</i>		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	54 av 61



**Figur 4-1** Bilder tatt under inspeksjonen 11.-12.08.2020 (tilsvarer bilde 3-3, 3-16, 3-19, 3-20, 3-21, 3-22, 3-25, 3-2, 3-9 i Vedlegg 5).


	<i>Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)</i>		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	55 av 61

### Injeksjonsmasse



**Figur 4-2** Bilder tatt under inspeksjonen 11.-12.08.2020 (tilsvarer bilde 3-18, 3-2, 3-10, 3-12 og 3-13 i Vedlegg 5).




	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	56 av 61


## VEDLEGG 5 – Beskrivelse av bildene

Beskrivelsene nedenfor referer til flere bilder enn de som er vist i Vedlegg 2-4. I billedteksten i Vedlegg 2-4 henvises det til «Bilde nummer» i tabellen.


Bilde nummer	Kamera	Motiv	Begrunnelse for lokasjon
A	Mobil (bilde 0)	Oppsett av stillas med entreprenør som bemanner en slagbor. Uttaksområdet ble først drillet flere hull i med omtrent 5cm avstand, så ble slagboret utstyrt med en pigger som slo ut brubetongen mellom hullene.	
B	Mobil (bilde 1)	Lynlåsposer som ble brukt til å oppbevare prøvene	
C	Mobil (bilde 18)	Oversiktsbilde uttakssted 1 og 3.	
1-1	Sony	Søm-boring for avgrensning av meisling av område (tidligere reparert område med skade på spenntråder)	1; Antatt sted for oppdaget skade ved rehabiliteringsarbeider oktober 2019. Begrunnelse; Innstøpt injiseringslange for utbedring ved injisering av kanal. Hensikten var å injisere skadeområdet for å sørge for konservering av skaden. Slangen var plassert feil i forhold til det som var hensikten. Hvorfor vet jeg ikke, har ikke fått en begrunnelse på det.
1-2	Sony	Sømboring for avgrensning av meisling av område	
1-3	Mobil	Bildet viser undersiden av kabel i åpent kanal.	
1-4	Mobil	Meisling etter sømboring	
1-5	Endoskop	Retning øst. Frostsprengt injiseringsmasse	
1-6	Endoskop	Retning vest ca 50 cm fra lokasjon 3. Overside av kabelen. Ikke frostsprengt injiseringsmasse. Viser stor variasjon av forholdene lokalt i kabelkanalen. Her er det tørt, selv om kabelkanalen langt fra er tilfredsstillende fylt med injiseringsmasse.	
1-7	Endoskop	Retning øst - Underside av kabelen. Tom for injiseringsmasse. Viser stor variasjon av forholdene lokalt i kabelkanalen. Vi ser inn mot korrosjonsprodukter og injiseringsmasse som fyller opp undersiden av kabelen.	
1-8	Endoskop	Retning vest ca 50 cm fra lokasjon 3. Overside av kabelen. Ikke frostsprengt injiseringsmasse. Viser stor variasjon av forholdene lokalt i kabelkanalen. Her er det tørt, selv om kabelkanalen langt fra er tilfredsstillende fylt med injiseringsmasse.	
1-9	Endoskop	Retning øst. Korrosjon på spenntråd. Ser noe frostsprengt injiseringsmasse mot bunn. Viser stor variasjon av forholdene lokalt i kabelkanalen. Det er stor forskjell i overflatetilstanden på de enkelte trådene. Tendensen er at de som ligger mot bunn er mer angrepet enn de som ligger mot øvre del av kabelkanalen.	
1-10	Endoskop	Nærbilde undersiden av skaden som vises på oversiktsbilde nr. 1-3. Viser groptæring lokalt	
1-11	Endoskop	Nærbilde av spennkabelen vist på oversiktsbilde 1-3, retning øst. Viser forholdene som kabelen ligger i mht injiseringsmasse. Fullstendig oppløst og lite fyllingsgrad.	
1-12	Endoskop	Svarte "perler" av korrosjonsprodukter retning øst	
1-13	Mobil (bilde 2)	Spenntrådene blir forsøkt bøyd med skrujern for å bestemme om tråden er løs.	
1-14	Mobil (bilde 3)	Samme som 1-13	
1-15	Mobil (bilde 4)	Første opphugging, overflatekorrosjon over alle spenntrådene, noen tegn på tverrsnittsreduksjon.	
1-16	Mobil (bilde 5)	Samme som 1-15	

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	57 av 61

Bilde nummer	Kamera	Motiv	Begrunnelse for lokasjon
1-17	Mobil (bilde 19)	Bilde innover i kabelkanalen mot A3.	
1-18	Mobil (bilde 20)	Samme som 1-17 men med flash	
2-1	Sony	Stillas, ved skaden med antatt løse kabeltråder	2; Sted hvor det ble registrert og antatt brudd i spenntråder. Her kunne trådene med letthet beveges med skrujern. Ved åpning av samme sted kunne det ikke fastslås brudd i trådene, tvert i mot hadde de fremdeles spenning i seg, noe som indikerer fastholding i begge ender. Tråden ble valgt kuttet og trakk seg tilbake ca 3 cm ved kapping. Ingen bilder med endoskop her, for tett med spenntråder ut mot kabelkanalen til at den kom seg innover for å se nærmere på forholdene.
2-2	Sony	Etter meisling, kabelkanal, tydelig tom fordi den er svært bulkete etter møte med meisel. Det hadde ikke vært likt om kabelkanalen hadde vært fylt med injiseringsmasse.	
2-3	Sony	Klart for kapping av enkeltråd. Liten vinkelkutter med svært tynn skive. Spenntråd dratt noe frem med skrutrekker for å hindre større skade på øvrige spenntråder.	
2-4	Mobil	Tilbaketrekking av spenntråd etter kapping. Utseende innenfor kabelkanal. Lett overflatekorrosjon på spennarmering. Pitting på slakkarmering. Mer korrosjon rett bak slakkarmering. Her var kabelkanalen rustet på utsiden og spennkablene var mer korrodert rett bak enn ut til sidene. Kabelkanalen har vært fylt med injiseringsmasse under trykk ved utførelsen, tydelige spor helt opp på kanalen. Mengden injiseringsmasse har vært for lite til å fylle kanalen permanent.	
2-5	Mobil	Hel injiseringsmasse slik den skulle vært i hele tverrsnittet. Noe frostskaidd og oppløst injiseringsmasse. Mer spor av korrosjon på innsiden av kabelkanal enn på utsiden.	
2-6	Mobil	Foto inn i kabelkanal retning mot landkar og forankring. Ca 6 m fra injiseringspunkt (Ankersone) Her burde det i hvert fall vært full kabelkanal, svært nær injiseringspunktet. Flere spor etter injiseringsmasse i toppen av kanalen. Ustabil separert masse - vann er fordampnet. Noe frostskaidd på gjenværende injiseringsmasse.	
2-7	Mobil	Oversiktsbilde av kappet tråd ved lokalitet 2. Begge endene sees i bildet	
2-8	Mobil	Nærbilde av tilbaketrekking av spenntråd etter kapping.	
2-9	Mobil (bilde 7)	Oversiktsbilde av uttak 3 og overgangen til Pilar A2	
2-10	Mobil (bilde 8)	Åpnet kabelkanal på den andre siden av bruene.	
2-11	Mobil (bilde 9)	Frostsprengt injiseringsmasse (gulhvitt pulver) og solid injiseringsmasse (grå klumper).	
2-12	Mobil (bilde 10)	Solid injiseringsmasse som sitter tett på spenntrådene.	
2-13	Mobil (bilde 11)	Oversiktsbilde	
2-14	Mobil (bilde 12)	Korroderte armeringsjern.	
2-15	Mobil (bilde 13)	Løse spenntråder blir bøyd med skrujern.	
2-16	Mobil (bilde 14)	Samme som 13	
2-17	Mobil (bilde 15)	Korrodert armeringsjern og generelt korroderte kabelkanal og spenntråder.	
2-18	Mobil (bilde 16)	Bilde rett etter spenntråden fra uttak 2 ble skjært med vinkelsliper. En sammentrekning på omtrent 3 cm kan skues.	
2-19	Mobil (bilde 17)	Den avskårne spenntråden.	


	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	58 av 61

Bilde nummer	Kamera	Motiv	Begrunnelse for lokasjon
3-1	Mobil	Oversiktsbilde - Lokalitet 1 og 3. Lokalitet 1 til venstre i bilde, lokalitet 3 til høyre i bilde. Lokalitet 1 ble åpnet fordi det ble antatt at det var stedet for funn i okt. 2019. V/ lokalitet 3 er det tidligere registrert grov korrosjon på armering og foretatt prøveuttak av mørtel. Stor tverrsnittsreduksjon på spenntråd. Analysert injiseringsmasse av Sintef, ref. rapport 102003040-163. Ved lokalitet 3 ble det nå også funnet brudd i spenntråd pga korrosjon ca 20cm bortenfor funn fra okt. 2019. Prøveuttak er foretatt av mørtel og spenntråd.	3; Stedet hvor det ble registrert stor korrosjonsskade på spennkabel i oktober 2019. Det dukket opp en verre situasjon enn det som ble registrert første gang. 20 cm retning vest forbi opprinnelig registrert skade ble det nå funnet brudd i spenntråd, men ikke den samme som hadde de groveste skadene registrert i oktober. Det er grov korrosjon på flere av trådene i underkant av denne spennkabelen, hvor vi nå med sikkerhet vet at en har gått til brudd pga korrosjon.
3-2	Mobil	Brudd i spenntråd pga korrosjon. Kraftig korrosjon på nærliggende spenntråder. Fuktig frostskaidd injiseringsmørtel med korrosjonsprodukter på undersiden av spennkabelen. Kabelkanalen har ikke korrosjon på utsiden, men på innsiden.	
3-3	Mobil	Oversiktsbilde - Prøveuttaket i oktober til venstre, registrert avkorrodert tråd til høyre i bilde. Kabelkanal med flere små hull til høyre, virker "tynn". Slakkarmering ikke korrodert.	
3-4	Mobil	Korrosjon på innsiden av kabelkanal - overflate	
3-5	Mobil	Utsiden av samme bit fra kabelkanalen. Ikke spor av korrosjon på utsiden av kanalen	
3-6	Mobil	Fortsatt samme tilstand på kabelkanal, spenntråder og injiseringsmasse i retning mot forankring. Ikke åpnet videre for ytterligere undersøkelser.	
3-7	Mobil	Tydelig spor av at kabelkanalen er i dårlig forfatning	
3-8	Mobil	Kapp av spenntråder. Begge ender fra tråden med brudd ble tatt ut i tillegg til den nærmeste tråden rett under som også viste grove korrosjonsskader og betydelig tverrsnittsreduksjon.	
3-9	Mobil	Uttak av spenntråd. Ikke gått til brudd, men med betydelig tverrsnittsreduksjon.	
3-10	Mobil	Bildet viser omgivelsene rundt kabelkanalen hvor spenntråd har gått til brudd. Frostskaidd injiseringsmørtel liggende i bunn av kabelkanal. Dårlig fyllingsgrad. Ingen korrosjon på nærmeste slakkarmering. Tett betong.	
3-11	Endoskop	Svarte "perler" av korrosjonsprodukter retning øst	
3-12	Endoskop	Forholdene for spennkabelen i kabelkanalen. Denne mørtelen som ligger på spennkabelen, er fuktig. Retning vest	
3-13	Endoskop	Forholdene for spennkabelen i kabelkanalen. Denne mørtelen som ligger på spennkabelen, er fuktig. Retning øst.	
3-14	Mobil (bilde 21)	Nylig utvidet	
3-15	Mobil (bilde 22)	Etter at spirorøret har blitt brettet av	
3-16	Mobil (bilde 23)	Synlig groptæring på spenntrådene, en av trådene er brutt	

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	59 av 61

Bilde nummer	Kamera	Motiv	Begrunnelse for lokasjon
3-17	Mobil (bilde 24)	Samme som 23	
3-18	Mobil (bilde 25)	Våt injiseringsmasse	
3-19	Mobil (bilde 26)	Undersiden av kabelkanalen etter at injiseringsmassen har blitt gravd ut.	
3-20	Mobil (bilde 27)	Innsiden av kabelkanal	
3-21	Mobil (bilde 28)	Utsiden av kabelkanal	
3-22	Mobil (bilde 29)	Løs tråd, ikke skjært av oss. Antageligvis korrodert helt til brudd.	
3-23	Mobil (bilde 30)	Avstand mellom brutt tråd omtrent 5-6 cm	
3-24	Mobil (bilde 31)	Oversiktsbilde	
3-25	Mobil (bilde 32)	Avskjærte spenntråder.	
3-26	Mobil (bilde 6)	Første uttak av korrosjonsprodukter	




	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	60 av 61

## VEDLEGG 6 Utdrag fra «Spennarmeringssystemer» av Einar Noremark

Kopi av informasjon som gjelder for perioden 1960-80.<sup>1</sup>

Periode	System og oppgave	Kommentarar
1960 - 80	<p>BBRV systemet var dominerande i første del av perioden. Spenneteknikk gjekk over til liner for det meste låst med kiler både i aktiv og passiv ende. VSL hadde tilsvarende system</p> <p>Linelås med kilar kom i slutten av denne bolken.</p> <p>Injeksjon, mørtel, drenering og lufting.</p>	<p>I byrjinga av denne tidsbolken vart spennarmeringa tredd inn i innstøpte trekkerøyr. Dette var korrugerte blekkrøyr med liten stivheit. For fritt frambygg (FF) konstruksjonar var det krav om at desse skulle plasserast midt i tverrsnittet Eit ønskje frå entreprenørane var å feste dei til unkarmeringa for å gi ei solid festing. Dette vart ikkje akseptert av VDR. Det måtte derfor monterast eit eige monteringsnett. I dei største bruene var det knapt plass til både slakkarmering, utsparingar til forskalingsvogn og injeksjonsslanger.</p> <p>Under støyping vart dei mjuke trekkerrøyra pressa ut av stilling. Det vart også ei stor oppdrift som førte til vertikal oppbøying mellom endestenga.</p> <p>Resultatet av det heile vart gjennombråt sidevegs til nabokablar laminering av brudekket.</p> <p>I ein rapport frå Krossnessundet bru i Hordaland er dette gjort greie for. I same rapport er også beskreve injeksjonsproblematikken, frostsprenging, laminering og feilplassert spaltarmering. Sneinare vart det oppdaga at kurva kassetverrsnitt fekk omfattande torosjonsspenningar som det ikkje var dimensjonert for.</p> <p>Ein undersøkelse av ei rekke bruer i Øygaren vest for Bergen. Viste omfattande manglar ved injisering. Fleire kablar var ikkje injisert i det heileteke. Reserverrøyr som var vanleg i den tida, var mangelfult drenert og hadde ført til frostsprenging.</p> <p>På ein konferanse vart desse problema og underteikna fekk mange førespurnader frå andre fylke som hadde gjort dei same observasjonane utan å vite heilt kva som var årsaka. Det er all grunn til å sjå nærare på FF- bruer frå den tida</p> <p>Liner hadde den fordel at desse vart skubba inn enkeltvis. Forankringsplatene (trompetane) var mindre og lettare og plassere. Systemet var følsamt for korrosjon på kiler og konus. Dette førte til fleire kileglipp. Det var tilfelle der feil fett vart nytta kiler og konus for å hindre korrosjon noko som førte til kileklipp av lina.</p> <p>Liner hadde mange klare fordeler framfor BBRV.</p> <p>Med bakgrunn røynsler frå Krossnessundet bru vart det sett fokus på injeksjonsrutiner, mørtel og sikring av lufteslanger. Sistnemde vart kapp jamt med brudekker. Avstanden ned til kabelen var ikkje stort meir enn 10cm. Utanfor sterkt trafikkerte områder var det ikkje vanleg å legge asfalt på bruene. Kompensasjon for dette var nokre cm auking av overdekninga. Injeksjons og lufteslanganeslangane var vanlegvis ei 1/2tom PEH. Den hadde ingen god vedheft til betong og mørtel. Lekkasje ned til kablane var overhengande. (I Hordaland vart det utvikla metode for reparasjon og etterfylling.)</p> <p>Den vanlege metoden for produksjon av injeksjonsmasse var porsjonering av vatn, sement og tilsetningsstoff for ekspansjon og pumpbarheit. I praksis viste det seg at blandeutstyret ikkje gav tilstrekkeleg utblanding og at masse separerte lett under</p>

	Institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP)		Dato:	26.06.2022
	Kunde:	Statens Vegvesen	Rev.:	01
	Tittel:	Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering i betongbruer	Side:	61 av 61

Periode	System og oppgave	Kommentarar
	Skjøyteanker	<p>injeksjon og førte til propp i systemet. I denne tidsbolken vart det gjort ein stor innsats frå alle aktørar for å få betre resultat. Under bygging av Selbjørn bbru, Utarbeidde Arnt Wendelbo og underteikna ei rettleiing til dette arbeidet. Eg meiner Bruavdelinga innarbeide denne i sine prosedyrar.</p> <p>Det vart fokusert på drenering av lavpunkt og forankringar for å unngå frostsprenging som var eit omfattande problem. Problemet var at desse dreneringane ikkje var så lett tilgjengeleg på injeksjonstidspunktet. Dei vert stengde for tidleg med påfølgjande skader som ikkje vart lokalisert. (Frostsprengning i ei voute artar seg annleis enn i ei plate)</p> <p>Er ikkje kjent med problem med skjøyteanker av BBRV typen. I skjøyteanker for liner var uoppspente lineender låst med påkrympa stopphylser eller endestuka liner.</p> <p>Frost og injeksjonsproblema var dei same.</p> <p>Skjøyte anker med kiler sjå neste bolk</p>



Statens vegvesen  
Pb. 1010 Nordre Ål  
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

[firmapost@vegvesen.no](mailto:firmapost@vegvesen.no)

ISSN: 1893-1162

[vegvesen.no](http://vegvesen.no)

**Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag**