

2021:00133 - Åpen

Rapport

Årsaker til korrosjon på fiskefartøy

Delrapport 2

Forfatter(e)

Astrid Bjørgum, Ole Øystein Knudsen, Britt Graver (DNV GL)



Rapport

Årsaker til korrosjon på fiskefartøy

Delrapport 2

EMNEORD:
Materialteknologi;
Korrosjon;
Sjøvann;
Fiskefartøy

VERSJON
2.0

DATO
2021-02-02

FORFATTER(E)

Astrid Bjørgum, Ole Øystein Knudsen, Britt Graver (DNV GL)

OPPDRAGSGIVER(E)

FHF – Prosjektnummer 901578

OPPDRAGSGIVERS REF.

Roar Pedersen

PROSJEKTNR

102020631

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

29

SAMMENDRAG

Tradisjonelt er karbonstål det viktigste konstruksjonsmaterialet i fiskefartøy. I tillegg har fartøya utstyr i rustfritt stål, aluminium og kobberholdige (gule) materialer. Undersøkelsene i dette prosjektet viser at korrosjon først og fremst skjer i områder der forskjellige materialer er blandet sammen. Korrosjon skjer også som følge av feil materialvalg og utilfredsstillende korrosjonsbeskyttelse. Korrosjonsskader er hovedsakelig rapportert i følgende områder

- Fabrikkdekk
- Dragerbrønn (moonpool)
- Kjølesystem – Sjøkister med bokskjølere
- Ror og propell
- Skrog med katodisk beskyttelse

Den viktigste årsaken til korrosjon på fiskefartøy er galvanisk korrosjon

UTARBEIDET AV

Astrid Bjørgum

Bjørgum Astrid

SIGNATUR
Digitally signed by Bjørgum Astrid
DN: cn=Bjørgum Astrid
Date: 2021.02.08 17:03:55 +01'00'

KONTROLLERT AV

Ole Øystein Knudsen

Knudsen Ole Øystein

SIGNATUR
Digitally signed by Knudsen Ole Øystein
DN: cn=Knudsen Ole Øystein
Date: 2021.02.03 08:26:40 +01'00'

GODKJENT AV

Ragnar Fagerberg

Ragnar Fagerberg

SIGNATUR**RAPPORTNR**

2021:00133

ISBN

978-82-14-06491-9

GRADERING

Åpen

GRADERING DENNE SIDE

Åpen

Historikk

| VERSJON | DATO | VERSJONSBEKRIVELSE |
|---------|------------|--------------------|
| 0.1 | 2020-05-07 | Rapportutkast |

| | | |
|-----|------------|---------------|
| 1.0 | 2020-05-15 | Første utkast |
|-----|------------|---------------|

| | | |
|-----|------------|----------------|
| 2.0 | 2021-02-02 | Endelig utkast |
|-----|------------|----------------|

Innholdsfortegnelse

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Sammendrag | 4 |
| 2 | Bakgrunn | 5 |
| 3 | Korrosjon i marint miljø | 6 |
| 3.1 | Hva er korrosjon?..... | 6 |
| 3.2 | Generell / uniform korrosjon | 8 |
| 3.3 | Galvanisk korrosjon..... | 9 |
| 3.4 | Lokal korrosjon..... | 11 |
| 3.4.1 | Spaltkorrosjon..... | 11 |
| 3.4.2 | Gropkorrosjon..... | 12 |
| 3.4.3 | Spenningskorrosjon | 13 |
| 3.4.4 | Filiformkorrosjon | 14 |
| 3.4.5 | Mikrobiell korrosjon | 15 |
| 3.5 | Lekkstrømskorrosjon..... | 16 |
| 4 | Korrosjonsbeskyttelse | 17 |
| 4.1 | Belegg..... | 17 |
| 4.1.1 | Organiske belegg | 17 |
| 4.1.2 | Metalliske belegg..... | 17 |
| 4.1.3 | Dupleksbelegg..... | 18 |
| 4.2 | Katodisk beskyttelse | 18 |
| 5 | Årsaker til korrosjon på fiskefartøy | 21 |
| 5.1 | Fabrikkdekk | 21 |
| 5.2 | Fabrikkdekk i karbonstål | 21 |
| 5.2.1 | Rustfrie fabrikkdekk..... | 23 |
| 5.3 | Dragerbrønn (moonpool)..... | 24 |
| 5.4 | Kjølesystem – Sjøkister med bokskjølere..... | 25 |
| 5.5 | Ror og propell..... | 27 |
| 5.6 | Skrog med katodisk beskyttelse..... | 28 |

BILAG/VEDLEGG

[Skriv inn ønsket bilag/vedlegg]

1 Sammendrag

Tradisjonelt er karbonstål det viktigste konstruksjonsmaterialet i fiskefartøy. I tillegg har fartøya utstyr i rustfritt stål, aluminium og kobberholdige (gule) materialer. Undersøkelsene i dette prosjektet viser at korrosjon først og fremst skjer i områder der forskjellige materialer er blandet sammen. Korrosjon skjer også som følge av feil materialvalg og utilfredsstillende korrosjonsbeskyttelse. Korrosjonsskader er hovedsakelig rapportert i følgende områder:

- Fabrikkdekk
- Dragerbrønn (moonpool)
- Kjølesystem – Sjøkister med bokskjølere
- Ror og propell
- Skrog med katodisk beskyttelse

Den viktigste årsaken til korrosjon på fiskefartøy er *galvanisk korrosjon*:

- Galvaniske korrosjon oppstår ved at uedelt karbonstål kobles sammen med et edlere materiale, som rustfritt stål eller kobberholdige materialer. Koblinga må stå i et aggressivt miljø som sjøvann, sjøsprøyt eller inntørka saltvann. Arealforholdet mellom de to materialene vil påvirke korrosjonshastigheten. Et stort areal av edelt materiale vil forårsake høy korrosjonshastighet på et lite areal uedelt materiale, for eksempel i en skade i malingsbelegg.
- Lokale korrosjonsceller dannes ved direkte kontakt mellom to ulike metaller under en væskefilm, som for eksempel under en rustfri bolt i en aluminiumstruktur
- I sjøkister der bokskjølere i kobbermateriale er koblet sammen med skroget
- I trange gjennomføringer på en katodisk beskytta struktur vil man miste den katodiske beskyttelsen som følge av økt elektrolyttmotstand og spenningsfall. Et typisk eksempel er foringer/hylser i bronse montert i karbonstål på roret. Siden den katodiske beskyttelsen ikke når fram oppstår det galvanisk korrosjon på stålet som er i kontakt med bronzen.

Korrosjon er dessuten typisk for områder med utilfredsstillende katodisk beskyttelse eller ved skade på CP-systemet.

Basert på denne undersøkelsen anbefaler vi følgende:

- å overvåke områder som er spesielt utsatt for korrosjon, typisk der ulike materialer er koblet sammen
- å montere offeranoder i områder der katodisk beskyttelse fra skroget ikke når fram, som for eksempel:
 - De områder av fabrikkdekk som ofte står med sjøvann
 - Dragerbrønnen
 - Sjøkista
 - Ved bronseforinger på roret

2 Bakgrunn

Fiskeribransjen har erfart en økende tendens til korrosjon på moderne fiskefartøy. Korrosjon er forbundet med store reparasjonskostnader og operasjonelle konsekvenser for fiskeflåten, og på bakgrunn av dette utlyste FHF våren 2019 midler for å dokumentere årsaker og tiltak mot korrosjon på slike fartøy.¹ Et konsortium bestående av H. P. Holmeset AS, Skipsteknisk AS, Optimar AS, DNV GL og SINTEF Industri satte høsten 2019 i gang prosjektet der hovedmålsettingen er å:

Identifisere ulike former for korrosjon på fiskefartøy, kartlegge årsakene og foreslå tiltak for å unngå/reducere korrosjon både på nybygg og gjennom utbedringer og periodisk vedlikehold på eksisterende fartøy.

Første leveranse i prosjektet var en rapport² som dokumenterer hvor og hvilke typer korrosjon som forekommer på fiskefartøy. Denne rapporten har som formål å oppdatere og systematisere dokumenterte korrosjonserfaringer med årsaker til og mekanismer for korrosjon. To kapitler innledningsvis gir en oversikt over henholdsvis typer korrosjon som skjer i marint miljø og ulike former for korrosjonsbeskyttelse.

¹ <https://www.fhf.no/nyheter/2019/februar/1902/fhf-lyser-ut-inntil-1.2-mill-nok-for-aa-dokumentere-aarsaker-og-tiltak-mot-korrosjon-paa-fiskefartoeoy/>

² B. Graver, E.K. Natvig, "Dokumentasjon av årsaker til korrosjons på fiskefartøy", Dok. nr 11GQOgVH-1, DNV GL 2019

3 Korrosjon i marint miljø

3.1 Hva er korrosjon?

Korrosjon er en elektrokjemisk reaksjon der det overføres ladning mellom ulike reaktantene. Dette betyr at samtidig som for eksempel jern eller stål løses anodisk skjer det en katodereaksjon. I anodereaksjonen frigjøres elektroner som forbrukes i katodereaksjonen. De viktigste anode og katodereaksjonene i forbindelse med korrosjon av stål i sjøvann er:

Anodisk oksidasjon: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$

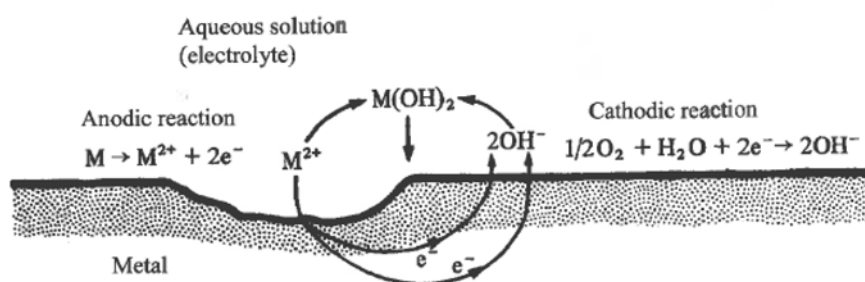
Katodisk reduksjon: $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$

Total korrosjonsreaksjon: $2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_2$

Videre oksidasjon av jern i oksygenholdig miljø: $4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$

Hydrogenutvikling er katodereaksjon i oksygenfritt eller surt miljø: $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$

For å opprettholde elektronøytralitet må anode- og katodereaksjonen foregå med samme hastighet. Dette betyr at alle elektroner som frigjøres i anodereaksjonen forbrukes i katodereaksjonen. Det er en forutsetning at elektroner og ioner kan vandre mellom anode og katode, men reaksjonene behøver ikke skje på samme sted. Dette betyr at det må være både elektrisk og elektrolytisk (væske-) kontakt mellom anode og katode. En prinsippskisse for korrosjon³ er vist i Figur 1.



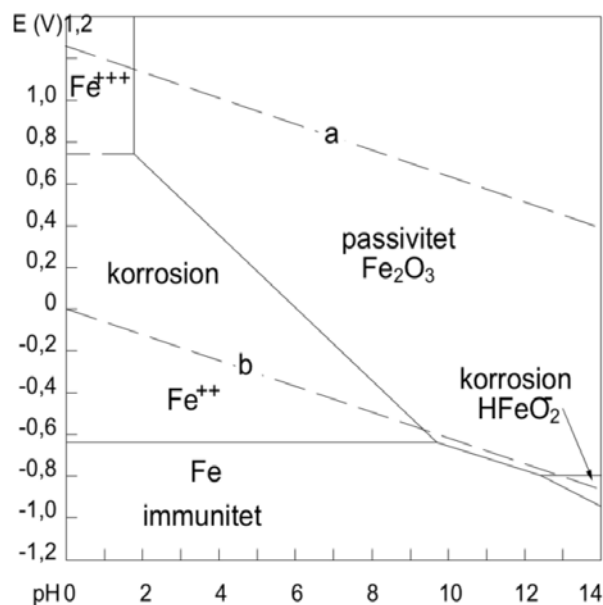
Figur 1. Prinsippskisse for korrosjon

Metaller kan ha ulike overflatetilstander som gjør det mer eller mindre utsatt for korrosjon:

- *Aktivt* som betyr at metallet er utsatt for korrosjon
- *Passivt* som betyr at metallet har en beskyttende overflatefilm
- *Immunt* som betyr at metallet er termodynamisk stabilt og ikke kan reager med omliggende miljøet

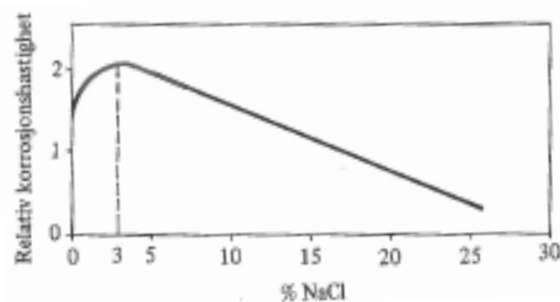
³ E. Bardal, Corrosion and Protection. Springer, London, 2003

Pourbaix-diagram viser disse tilstandene for et metall som funksjon av pH og potensial. Ved gitte betingelser kan Pourbaix-diagram fortelle oss om metallet korroderer eller ikke, men diagrammene som er basert på termodynamiske beregninger, kan ikke si oss hvor raskt metallet vil korrodere. Som eksempel er Pourbaix-diagrammet for jern vist i Figur 2. De heltrukne linjene i diagrammet viser reaksjonene til jern, det vil si overgang mellom ulike oksidasjonstilstander (som oksidasjon av Fe til Fe^{2+} og fra Fe^{2+} til Fe^{3+}), mens de to stiplede linjene viser oksygenreduksjon (a) og hydrogenutvikling (b). Stor avstand mellom oksidasjonsreaksjonen for Fe og reduksjon av O_2 (a) viser at jern korroderer i oksygenrikt miljø. Diagrammet viser at i oksygenfritt miljø bidrar hydrogenreduksjon (b) lite til korrosjon i alkaliske løsninger ved pH 9,5 – 12,5, som betyr at stål ikke vil korrodere i slike miljø. Diagrammet viser at jern korroderer både i ferskvann og sjøvann, som normalt har pH på henholdsvis omtrent 6 og 8,2.



Figur 2. Pourbaix-diagram for jern. Potensial E(V) mot en standard hydrogenelektrode er plottet mot pH. Stiplede linjer (a) og (b) gjelder henholdsvis oksygen- og hydrogenreaksjon

Korrosiviteten av vann øker normalt ved tilsats av salt. Som vist i Figur 3 når korrosjonshastigheten for jern et maksimum i vann med et kloridinnhold som tilsvarer naturlig sjøvann, om lag 3,5 vekt% NaCl.



Figur 3. Effekt av saltinnhold på korrosjonshastighet av jern i løsninger mettet med luft og romtemperatur [2]

Korrosjonshastigheten er i tillegg til innhold av salt avhengig av vannets ledningsevne, tilgangen på oksygen og temperaturen. I sjøvann vil salter av kalsium (Ca^{2+}) og magnesium (Mg^{2+}) gi utfellinger på metalloverflaten som til en viss grad hindrer at oksygen diffunderer inn til metalloverflaten og dermed reduserer korrosjonshastigheten over tid. I skvalpesonen vaskes slike utfellinger periodevis ut samtidig som tilgangen på oksygen er stor. Dette fører til høyere korrosjonshastighet i plaskesonen enn ved kontinuerlig neddykking i sjøvann. I marin atmosfære avsettes salt på overflaten som kombinert med fuktig luft også kan gi høy korrosjonshastighet.

For å hindre eller redusere omfanget av korrosjon i marint miljø må lavlegerte stål beskyttes. Hva slags korrosjonsbeskyttelse som kan eller bør benyttes på stål i fiskefartøy avhenger generelt av miljøet stålet skal eksponeres mot. ISO 12944-2⁴ klassifiserer korrosiviteten i ulike korrosive miljø. Deler av fiskefartøy som er nedsenket i sjøvann hører normalt til korrosjonsklassene I4, mens korrosiviteten i atmosfæren over vann normalt vil være C5 eller CX. Belegg er normalt den mest kostnadseffektive korrosjonsbeskyttelsen for stål i marin atmosfære, mens katodisk beskyttelse er mer effektivt for stål som er permanent neddykket i sjøvann. En kombinasjon av belegg og katodisk beskyttelse gir den beste beskyttelsen for skipsskrog og andre marine konstruksjonsdeler nedsenket i sjøen.

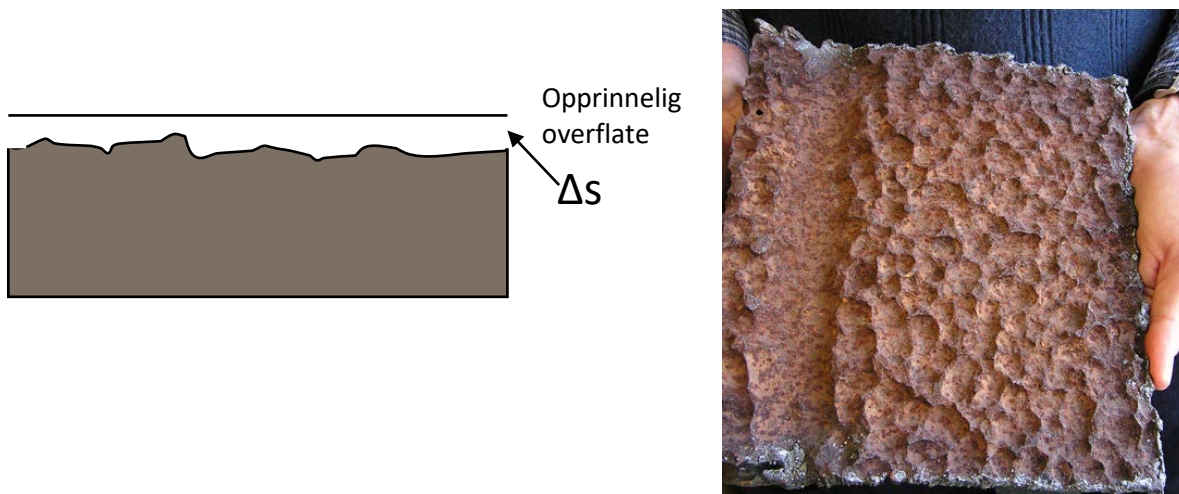
3.2 Generell / uniform korrosjon

Generell korrosjon, også kalt uniform korrosjon, er den vanligste formen for korrosjon, og er typisk for mange metaller uten noen form for overflatebeskyttelse. Korrosjonsformen utvikler seg relativt sakte og relativt jevnt over hele metalloverflata. Uniform korrosjon betraktes normalt som ufarlig, er typisk for jern og lavlegerte stål. Ett eksempel på korrosjon av stål er vist i Figur 4. For jern og stål som skal eksponeres ubehandlet gis et korrosjonstillegg som oppveier for forventet tykkelsestap på grunn av korrosjon.

Andre metall som for eksempel sink utsettes også normalt for uniform korrosjon, men utfelling av en beskyttende karbonatfilm kan føre til at sinken passiverer. Metaller som rustfrie stål og aluminium har derimot en beskyttende oksidfilm på overflaten, og er av den grunn mer utsatt for lokale korrosjonsangrep som gropkorrosjon og spaltkorrosjon.

Kobberholdige materialer som messing, bronse, "gunmetals" (eller "rødmetall") og kobber-nikkel er tradisjonelt brukt i marine miljø. Disse er generelt korrosjonsbestandige og også lite utsatt for generell korrosjon. Noen av disse materialene kan midlertidig være utsatt for stømnings (flow) akselerert korrosjon (FAC) som betyr at høy hastighet i vannet vil fjerne det beskyttende oksidet på overflaten og øke korrosjonshastigheten. Eksempelvis er CuNi som er et vanlig materiale i sjøvannsystemer, utsatt for dette. God kontroll på strømningshastighet i sjøvann er derfor viktig. I tillegg er det viktig å få etablert et godt oksidsjikt under innkjøring av systemet, da forurenset havnevann som inneholder sulfider kan ødelegge det passive sjiktet. Derfor stilles det høye krav til vannkvaliteten i oppstart av slike anlegg.

⁴ ISO 12944-2, Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems in Part 2: Classification of environments. 2017.



Figur 4. Uniform korrosjon på en ståloverflata. Endring i metalltykkelse er illustrert til venstre

3.3 Galvanisk korrosjon

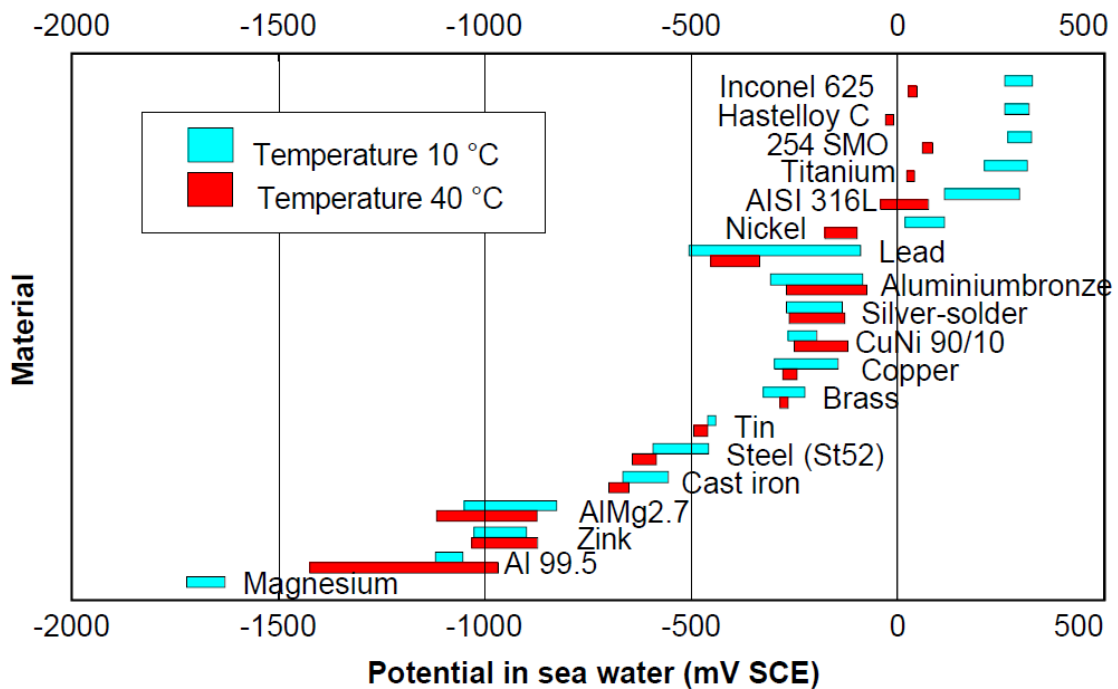
Galvanisk korrosjon kan skje dersom to ulike metall er i direkte kontakt i en ledende væska (elektrolytt). Dette kan skje enten når metallene er neddykket i væska eller bare dekket av en væskefilm. Sammenlignet med fri eksponering av de to metallene gir dette økt korrosjon for det minst edle metallet mens korrosjonshastigheten for det edleste metallet avtar, det vil si at det minst edle metallet fungerer som anode mens det edleste metallet er katode for korrosjonsprosessen.

Figur 5 viser en galvanisk spenningsrekke basert på måling av korrosjonspotensial for ulike metall i naturlig sjøvann. Potensialforskjellen mellom to materialer i spenningsrekka kan fortelle oss om galvanisk korrosjon kan skje. De viktigste faktorene avgjørende for galvanisk korrosjon er:

- *Potensialforskjellen mellom to materialer er drivende kraft for korrosjonsreaksjonen.* Denne øker med økende potensialforskjell mellom materialene, og normalt er det antatt at det må være minst 50 mV forskjell for at galvanisk korrosjon skal oppstå. Potensialforskjellen er avhengig av miljø, og må også variere over tid for eksempel på grunn av utfelling av korrosjonsprodukter på metalloverflaten.
- *Katodeeffektivitet for det edle metallet.* Reaksjonshastigheten for reduksjon av oksygen som normalt er katodereaksjonen (se kapittel 2.1), avhenger av katodematerialet. Selv om rustfritt stål er edlere enn kobber i den galvaniske spenningsrekka i Figur 5, er katodereaksjonshastigheten normalt høyere på kobber. Galvaniske koblinger med kobber fører derfor ofte til høyere korrosjonshastighet enn rustfritt stål på et uedelt metall som for eksempel aluminium.
- *Arealforhold mellom anode og katode.* Galvanisk korrosjonshastighet øker med økende arealforhold mellom katode og anode. Stor anode og en liten katode gir normalt en begrenset økning i korrosjonshastighet for det minst edle materialet. I marin atmosfære behøver dette ikke nødvendigvis ha så mye å si, siden den galvaniske korrosjonen uansett bare strekker seg noen få cm til siden for overgangen mellom de to materialene.
- *Korrosivitet og elektrolytisk ledningsevne for elektrolytten.* I en elektrolytt med lav ledningsevne (som ferskvann) vil galvanisk strøm være lav, og korrosjon vil bli mer lokal sammenlignet med korrosjonsangrepet i en elektrolytt med høg ledningsevne (som sjøvann). Dette er illustrert for en

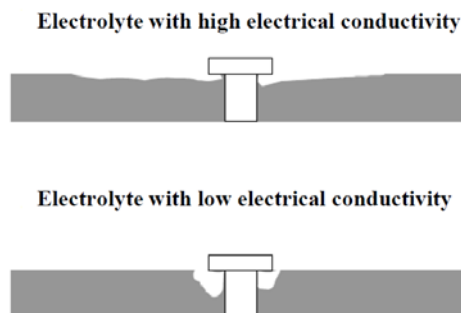
edel bolt i et mindre edelt materiale i Figur 6. I godt ledende vann som sjøvann spres den galvaniske korrosjonen på et stort areal, mens i dårlig ledende vann som ferskvann vil korrosjonen konsentreres umiddelbart rundt bolten. Rustfrie skruer/bolter kan for eksempel benyttes for konstruksjoner i lavlegert stål uten større problemer så lenge det står i en godt ledende elektrolytt som sjøvann.

- *Atmosfæriske forhold.* I marin atmosfære kan kontakten mellom en edel bolt og et mindre edelt materiale (som i Figur 6) føre til galvanisk korrosjon ved avsetning av fuktighet/salt rundt sammenkoblingspunktet.



S.Valen, E.Bardal, T.Rogne, J.M. Drugli: "New Galvanic Series Based upon Long Duration Testing in Flowing Sea Water." 11 Scan. Corr. Congr. Stavanger 1989
 E.Bardal, J.M.Drugli and P.O.Gartland: "The Behaviour of Corrosion Resistant Steels in Sea Water. A Review" Advances in Corrosion And Protection, 1992; Corros. Sci. Vol. 35, 1993

Figur 5. Galvanisk spenningsrekke i sjøvann



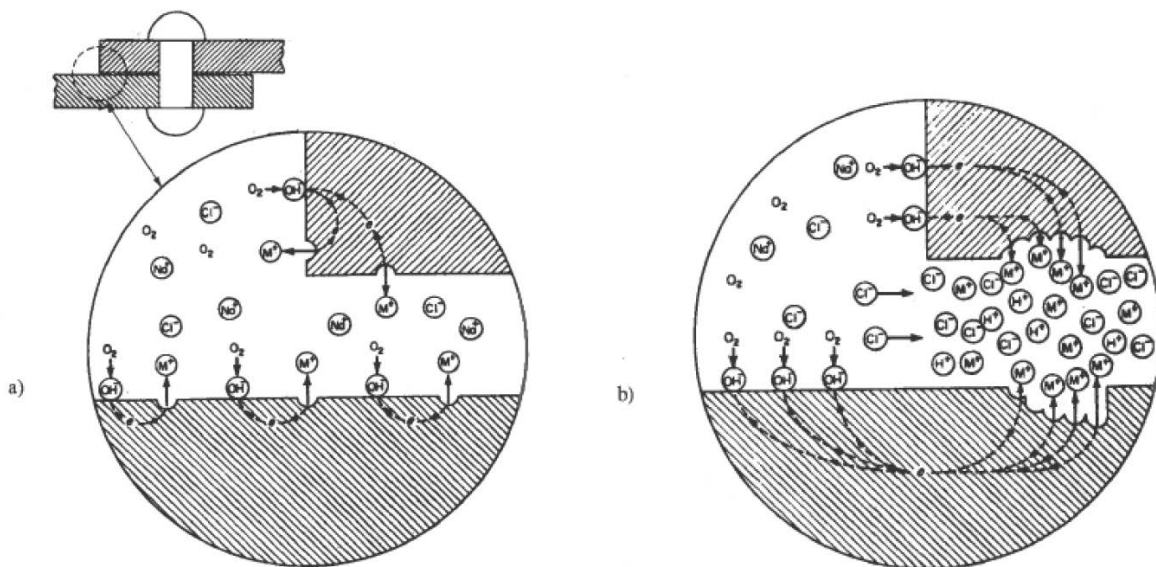
Figur 6. Sammenkobling av en edel bolt i et mindre edelt materiale. Omfanget av korrosjon i en elektrolytt med henholdsvis god og dårlig ledningsevne er illustrert

3.4 Lokal korrosjon

3.4.1 Spaltkorrosjon

Spaltkorrosjon skjer typisk på passive materialer som rustfrie stål. Som navnet sier skjer dette i spalter som dannes for eksempel i overlappede skjøter, under boltehoder og mutere eller i gjengene mellom bolt og mutter. Spaltkorrosjon oppstår og utvikler seg som følger:

- Initiering skjer ved at kloridholdig elektrolytt (som sjøvann) trenger inn i spalten. Rustfritt stål har en lav, passiv korrosjonshastighet i elektrolytten, noe som fører til at mengden løst oksygen inne spalten avtar, se Figur 7a.
- Så lenge det er oksygen til stede felles jernoksid og andre oksider ut inne i spalten. Oksygenet brukes etter hvert opp som betyr at katodereaksjonen inne i spalten stopper opp. Katodereaksjonen kan imidlertid fortsette utenfor spalten der det er rik tilgang på oksygen, og på den måten opprettholdes anodisk oppløsning av jern inne i spalten.
- Siden det ikke kan være et overskudd av positive joner (løst jern) inne i spalten vil negative kloridioner (Cl^-) transporteres inn fra elektrolytten utenfor spalten. Dette fører til et aggressivt jernkloridmiljø inne i spalten, se Figur 7b.
- Jernklorid reagerer med vann og danner saltsyre. Dette fører til at pH i elektrolytten avtar, og at stålet etter hvert korroderer aktivt inne i spalten.



Figur 7. Spaltkorrosjon forklart av Fontana and Green⁵

⁵ M.G. Fontana and N.D. Greene, *Corrosion Engineering*. Mc Graw-Hill, New York (1986)

Spaltkorrosjon kan på en måte sammenlignes med galvanisk korrosjon. Korrosjon i den lille spalten forsyner metallet med elektroner og sørger for at katodereaksjonen opprettholdes på den store metalloverflaten på utsiden. Rik tilgang på luft/oksygen kan gi veldig høy korrosjonshastighet inne i spalten.

Erfaringer viser at aluminium normalt er lite utsatt for spaltkorrosjon. Det er erfart at korrosjonsprodukter kan tette spalten mellom bolt og aluminium, og derved hindre galvanisk korrosjon. For galvaniske koblinger i marint miljø er det imidlertid anbefalt⁶ å unngå konstruksjoner som kan føre til galvanisk korrosjon og/eller spaltkorrosjon.

Kobberholdige materialer kan også utsettes for spaltkorrosjon, men dette opptrer annerledes enn på rustfritt stål. Korrosjonsangrepene vil skje på utsiden, siden mekanismen er en "metallionkonsentrasjonscelle" (og ikke oksygenkonsentrasjonscelle) der området inne i spalten vil bli mer edel. Det blir derfor ingen forsuring. Unntaket er aluminium messing, der angrepene skjer inne i spalten på grunn av mikrostrukturen. Som regel er ikke spaltkorrosjon på aluminium messing et problem da dette som regel er katodisk beskyttet.

Spaltkorrosjon kan hindres ved å unngå overlappede skjøter, ved å åpne opp spalter slik at oksygen kommer inn, eller forsegle spalten ved bruk av for eksempel maling eller voks.

3.4.2 Gropkorrosjon

Gropkorrosjon skjer også først og fremst på passive metalloverflater som rustfritt stål og aluminium. Groper initieres gjerne midt på en metalloverflate, helst i tilknytning til feil eller svake punkt i den beskyttende oksidfilmen ved tilstedeværelse av aggressive ioner som klorid (Cl^-) i sjøvann. I rustfrie materialer kan inneslutninger i stålet, spesielt mangansulfid (MnS) danne svake punkt. Korrosjon kan her utvikle seg på en tilsvarende måte som spaltkorrosjon. Erfaringer har vist at sveiser og den varmepåvirka sona langs sveisen er spesielt utsatt for gropkorrosjon, noe som skyldes at sveising gir en mikrostruktur som er mindre korrosjonsbestandig enn grunnmaterialet. Beising av sveisen, det vil si kontrollert etsing med syre, etter sveising vil forbedre korrosjonsmotstanden til sveisen.

For rustfrie stål i sjøvann har det vist seg at gropkorrosjon avhenger av dannelsen av en biofilm på overflata av metallet^{7,8}. Biofilmen består av bakterier som øker hastigheten på oksygenreaksjonen dramatisk. Dette gjør at det elektrokjemiske potensialet til materialet stiger. Som spenningsrekka i Figur 5 viser, har de rustfrie materialene (øverst i diagrammet) høye potensial ved 10°C, typisk 200-300 mV (SCE). Når sjøvannet varmes opp til 40 °C dør bakteriene og potensialet faller til omkring 0 mV (SCE). Gropkorrosjon starter ved et kritisk potensial som for de fleste rustfrie stål ligger et sted mellom 0 og 300 mV (SCE). Dette viser at biofilmen ofte kan være årsaken til gropkorrosjon på disse materialene. Rustfritt AISI 316L stål (EN 1.4404) er et typisk eksempel på dette, og derfor ikke bestandig når det står kontinuerlig eksponert i sjøvann.

Den beskyttende filmen på aluminium (aluminiumoksid) er stabil mellom pH ca. 4 og ca. 9, men ustabil ved lavere og høyere pH. Selv om oksidfilmen er beskyttende i det nøytrale pH-området kan gropkorrosjon initieres på aluminiumslegeringer i tilknytning til intermetalliske forbindelser. Legeringselement og

⁶ C. Vargel., *Corrosion of aluminium*. 1st Ed. Elsevier Ltd, Paris (2004).

⁷ R. Johnsen and E. Bardal, *Cathodic Properties of Different Stainless Steels in Natural Seawater*. CORROSION, **41**(5): p. 13-18 (1986).

⁸ R. Holte, *The cathodic and anodic properties of stainless steels in sea water*, NTH: Trondheim (1988)

forurensninger med lav løselighet i aluminium utfelles som små, aluminiumbaserte intermetalliske forbindelser. Disse inneholder typisk element som jern og silisium. Edle utfellinger kan føre til mikrogalvanisk korrosjon i omliggende aluminium matriks. Katodereaksjonen som foregår på den edle utfellingen, fører til lokal pH økning i elektrolytten og derved destabilisering av den beskyttende oksidfilmen og dermed initiering av alkalisk gropkorrosjon. Høg pH kan gi selektiv oppløsning av aluminium i utfellingen som derved får en edlere overflate som igjen vil øke korrosjonshastigheten. Hydrolyse av oppløst aluminium fører til en forsuring (som for stål i Figur 7) og økt korrosjon inne i gropa.

Normalt avtar imidlertid gropkorrosjonshastigheten for aluminium i nøytrale kloridløsninger på grunn av underminering av intermetalliske utfellingene i metalloverflata fører til at de løsner og ramler ut. Initiering av gropkorrosjon som kan utvikle seg og gi alvorlig gropkorrosjon er sjelden. Hvis potensialet for aluminiumslegeringen forskyves over det kritiske potensialet for gropkorrosjon som for aluminium normalt er om lag -750 mV (SCE) kan imidlertid gropkorrosjon oppstå. Dette kan for eksempel skje på aluminium i direkte kontakt med stål. Dermed oppstår det gropkorrosjon som akselereres av den galvaniske koblingen.

Kopperholdige materialer utsettes ikke for gropkorrosjon i kloridholdige miljø. Derimot kan de utsettes for groptæring hvis sulfider avsettes på overflaten.

3.4.3 Spenningskorrosjon

Spenningskorrosjon skyldes samtidig påvirkning av mekanisk spenning og korrosjon³ som fører til brudd/sprekkdannelse i et materiale (Stress Corrosion Cracking - SCC). Materialet sprekker/knekker ved en lavere mekanisk spenning enn det ville gjort uten korrosjon. Dette er en farlig korrosjonsform siden bruddet gjerne kommer plutselig og uten forvarsel.

For at spenningskorrosjon skal skje må materialet være eksponert i et miljø der det er utsatt for denne formen for korrosjon og samtidig være påvirket av en eller annen form for mekanisk spenning, enten indre spenninger (fra sveising og kaldforming) eller ytre spenninger (fra mekanisk belastning).

Følgende kombinasjoner av miljø og materiale er typiske eksempler som kan føre til spenningskorrosjon:

- *Høyfaste stål i miljø der vi har hydrogenutvikling.* Dette kan skje ved kjemisk forbehandling (etsing i syre), sveising i fuktig miljø, eksponering i surt miljø eller ved bruk av katodisk beskyttelse (også på høyfaste galvaniserte bolter).
- *Rustfrie stål i kloridholdige miljø.* Kloridspenningskorrosjon kan oppstå på rustfrie stål som AISI 316L (EN 1.4404) og AISI 304L (EN 1.4306), men dette skjer først og fremst ved høy temperatur, over 50°C . For AISI 304L er det imidlertid rapportert oppsprekking helt ned til 30°C .
- *Kobberholdige legeringer i ammoniakkholdige miljø.* Den første kombinasjonen av material-miljø som ble rapportert var britene som erfarte at messinghylser sprakk i monsunesongen i India rundt 1. verdenskrig. Ammoniakken kom fra hesturin.

Hydrogen-indusert spenningskorrosjon (Hydrogen Induced Stress Corrosion - HISC) skyldes at hydrogen som dannes ved korrosjon eller katodisk beskyttelse trenger inn i materialet. Det meste av hydrogenatomene som dannes går sammen to og to og danner hydrogengass (H_2) som deretter forsvinner ut i miljøet omkring uten å skape problemer. Noen hydrogenatomer vil imidlertid gå inn i metallet. H-atomene er små slik at de

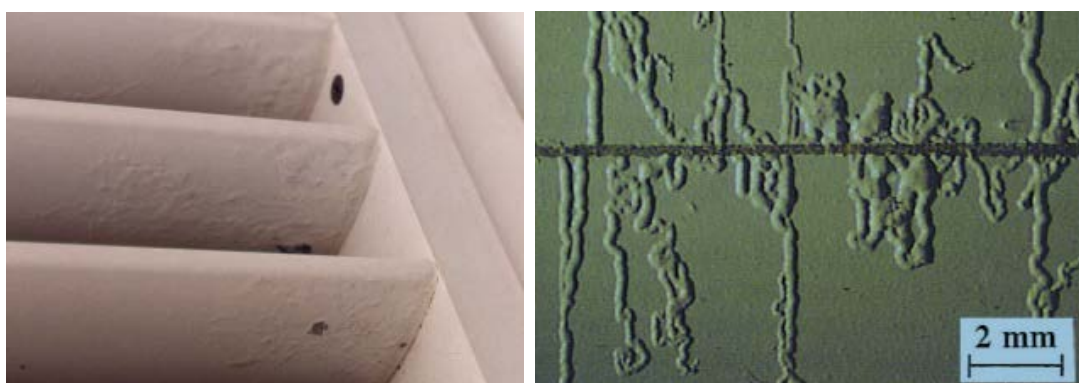
får plass mellom metallatomene. Der vil H-atomene hindre plastisk deformasjon av metallet, slik at det blir sprøtt. Dermed vil metallet heller sprekke enn å deformeres under belastning.

Spenningskorrosjon i aluminium er observert som sprekkdannelse langs korngrenser i materialet. Legeringer som inneholder tilstrekkelig mengde av løste elementer som magnesium, kobber, silisium og sink kan være utsatt for spenningskorrosjon. Høgfaste aluminiumslegeringer i 2000- og 7000-serien er mest utsatt. I marine miljø kan spenningskorrosjon også skje for 5000-legeringer⁶ med Mg-innhold over 3%. For 5000-legeringer med Mg-innhold over 4% er det utviklet spesielle varmebehandlingstilstander som gir økt motstand mot spenningskorrosjon. Legeringer i seriene 1000, 3000 og 6000 er ikke utsatt for spenningskorrosjon.

3.4.4 Filiformkorrosjon

Filiformkorrosjon (FFK) er en korrosjonsform som er mest vanlig på lakkert aluminium, men den kan også forekomme på lakkert stål og rustfritt stål. FFK på aluminium skjer på lakkerte aluminiumoverflater i marin atmosfære, og initieres fra bare kanter og/eller skader i belegget. Som Figur 8 viser utvikler FFK seg som trådforma angrep (filament) i grenseflata aluminium/belegg. Grunne filament indikerer at FFK hovedsakelig er et visuelt problem. I noen tilfeller kan imidlertid FFK føre til omfattende blæring og videre delaminering av belegget.

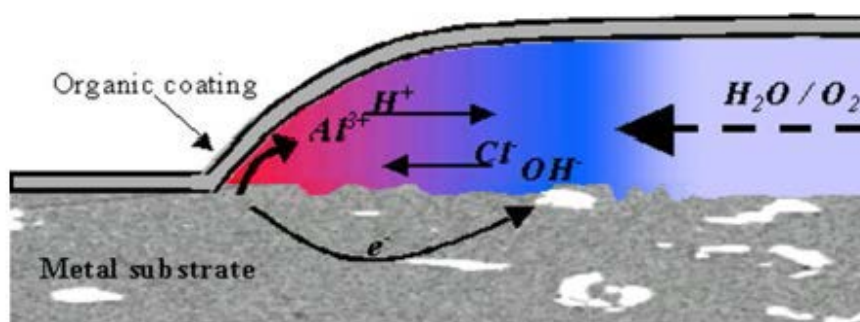
Fundamentale studier ved NTNU^{9,10} har bidratt spesielt til økt forståelse av initiering og utvikling av FFK på aluminium. I tillegg til høy relativ fuktighet og salt er FFK avhengig av legeringsmaterialet, og da spesielt den ytre overflata som har en annen sammensetning enn bulkmaterialet. Aktiv korrosjon skjer i spissen av filamentet der forsuring (lav pH) skjer og anodisk oppløsning av aluminium kan fortsette. Samtidig skjer katodereaksjonen i halen av filamentet der det er rik tilgang på oksygen. Dette betyr at pH nøytraliseres og aluminium passiverer her. Prinsippkisse for FFK er vist i Figur 9.



Figur 8. Filiformkorrosjon på lakkert aluminium (a): i bygg og på laborietesta prøve

⁹ H. Leth-Olsen, *Filiform corrosion of painted aluminium coil materials*, in *Department of Electrochemistry*. NTNU, Trondheim (1996)

¹⁰ A. Afseth, *Metallurgical control of filiform corrosion of aluminium alloys*, in *Department of Materials Technology and Electrochemistry*, NTNU (1999). Trondheim.



Figur 9. Prinsippskisse for filiformkorrosjon på aluminium. Korrosjon skjer i det sure miljøet som dannes i fronten, mens reduksjon av oksygen bak fronten fører til at pH nøytraliseres og metallet passiverer igjen.

3.4.5 Mikrobiell korrosjon

Mikrobiell korrosjon (Microbial Influenced Corrosion - MIC) er korrosjonsformer som er påvirket av eller utløses i nærvær av mikroorganismer [5, 6]. Det er viktig å presisere at mikroorganismene ikke spiser metall, men at de skaper et miljø der metallet korroderer lettere eller raskere. Korrosjonsangrepet kan akselereres galvanisk ved at stålet omkring fungerer som katode. Hastigheten på angrepet er avhengig av en rekke faktorer og er vanskelig å forutsi, men kan bli høy.

Det er flere typer bakterier som forårsaker denne typen korrosjon, men angrep forårsaket av sulfatreduserende bakterier (SRB) er hyppigst. Sulfatreduserende bakterier reduserer sulfat til sulfid. De danner en såkalt tuberkel for å beskytte seg mot oksygen, der de lever under et skall som består av blant annet korrosjonsprodukter. De kan overleve i oksygenholdig miljø, men ikke formere seg. Korrosjonen er et resultat av at bakteriene skaper et svakt surt sulfidholdig miljø i tuberkelen som angriper stål, samtidig som bakteriene katalyserer hydrogenreaksjonen. Problemet oppstår oftest på stål eksponert i sulfatholdig grunn, sjøbunn eller det som har vært sjøbunn.

Kobberholdige materialer kan også være utsatt for bakteriell korrosjon i form av SRB¹¹. Det er viktig at vannet er rent spesielt for kobbernikkel rør.

En annen type bakterier som ofte forårsaker korrosjon er jernoksiderende bakterier, for eksempel gallionella. Disse bakteriene får energi ved å oksidere toverdig jern til treverdig. De danner også tuberkler for å beskytte seg mot oksygen, på samme måte som SRB. Både karbonstål og rustfrie stål kan angripes. Disse bakteriene skaper oftest problemer i ferskvannsystemer, som for eksempel drikkevannsrør og turbinrør i kraftverk.

¹¹ The Mineralogy of Microbiologically Influenced Corrosion, B. J. Little, T. L. Gerke, R. I. Ray and J.S. Lee Mineral Scales and Deposits 2015 Pages 107-122

3.5 Lekkstrømskorrosjon

Korrosjon som skyldes lekkstrømmer fra elektriske anlegg av forskjellig slag, kan inntreffe på alle konstruksjonsmaterialer som er neddykket i vann (eller nedgravd i fuktig grunn). For at lekkstrømskorrosjon skal oppstå må strømmen gå gjennom kontaktflata mellom metall og vann. Selv om det historisk sett er registrert få skader på båter som skyldes lekkstrømmer, kan denne korrosjonsformen forekomme i tilfeller der det er forbindelse med elektriske anlegg på land eller ved feil på det elektriske anlegget ombord. Generelt er likestrøm mye farligere enn vekselstrøm når det gjelder lekkstrømskorrosjon. Virkningen av vekselstrøm utgjør bare noen få prosent i forhold til virkningen av en tilsvarende positiv likestrøm.

Et klassisk eksempel på lekkstrømskorrosjon er ved sveisearbeid ombord i fartøy som ligger til kai og der man kun trekker den positive sveisekabelen ombord mens jordingen befinner seg på land:

- Der positiv strøm går gjennom skroget og passerer overgangen mellom skrog og sjøvann på vei inn til land vil det kunne bli veldig høy korrosjonshastighet på grunn av store strømstyrker.
- Fartøy som ligger ved kai kan i prinsippet også fange opp lekkstrømmer forårsaket av nærliggende båter med elektrisk forbindelse til land. Skroget blir da ”katodisk beskyttet” der positiv strømretning går inn i metallskroget og økt korrosjon skjer der strømmen går ut.

I senere tid er det også rapportert om lekkstrømskorrosjon i forbindelse med landstrømsanlegg. For å få denne typen korrosjon på båter må det være metallisk forbindelse mellom båtskroget og kaianlegget samtidig som det går lekkstrøm fra landstrømsanlegget ut i havet ved kaien. Selv om landstrømsanlegg er basert på vekselstrøm, som ikke skaper like alvorlig korrosjon som likestrømkilder, kan det over tid gi store korrosjonsproblemer. Etersom landstrøm er relativt nytt i Norge, jobbes det fremdeles med å utarbeide standarder for installasjon og drift av slike anlegg der det tas hensyn til korrosjonsutfordringene. En annen faktor som er viktig å ta hensyn til når man kobler et skipsskrog til kaianlegg, både med og uten landstrøm, er de ulike systemene som er brukt på henholdsvis skip og kai for katodisk beskyttelse. De aller fleste skip har ICCP anlegg, som vil justere mengden påtrykt strøm etter behov, men dette kan også medføre unødvendig bruk av strøm om kaianlegget båten ligger ved ikke er katodisk beskyttet. I tillegg kan lekkstrøm fra landstrømsanlegg føre til enda større belastning for båtenes ICCP anlegg.

Tegn på lekkstrømskorrosjon kan være unormalt mye tæring på skrog og offeranoder spesielt, samt en uvanlig blank eller svart propell. Generelle tiltak for å forebygge mot lekkstrømskorrosjon omfatter blant annet.:

- Generelt god elektrisk installasjon med godt isolerte ledninger og kontaktpunkter
- Godt dimensjonerte kabler i el-anlegg
- Installasjon av skilletransformator på båter utstyrt med landbasert vekselstrømsystem
- Automatisk varsling av overlednings- og jordingsfeil

4 Korrosjonsbeskyttelse

4.1 Belegg

Den mest vanlige korrosjonsbeskyttelsen for ulike metall er belegg. Organiske (maling og lakk) og metalliske (varmforsinking, galvanisering, termisk sprøyta sink og aluminium) belegg er de viktigste typene.

4.1.1 Organiske belegg

Organiske belegg beskytter overflata ved å hindre at det dannes en vannfilm på metallet. Hvis vannet fortrenghes helt, blir korrosjon umulig. De fleste belegg tar imidlertid opp både vann og oksygen. Konsentrasjonen av vann i belegg er typisk 1-3% ved eksponering i et fuktig miljø, mens konsentrasjonen av oksygen i belegget er ca 10% av konsentrasjonen i luft. Dette er egentlig mer enn nok til at det underliggende metallet kan korrodere, men det skjer ikke fordi vi ikke har en vannfase der. Overflata er i stedet dekket av en polymer. Korrosjon starter igjen når belegget på en eller annen måte skades slik at metallet eksponeres mot vann. Ifølge dette skulle man forvente at filmtykkelsen på belegget ikke har noe å si, siden en tynn film også kan forhindre dannelse av en vannfase på metalloverflata. Filmtykkelsen er imidlertid svært viktig fordi det kreves en viss filmtykkelse for å hindre at ioner transporteres gjennom belegget. Hvis ioner slipper gjennom, vil det ved osmose dannes en vannfase på metalloverflata, og dermed kan korrosjon starte. Osmose er diffusjon av vann gjennom en membran som følge av ulike konsentrasjoner av salt. Vann må slippe gjennom membranen, men ikke salt. Organiske belegg har denne egenskapen og oppfører seg som en membran.

Belegget kan feile på mange ulike måter, med påfølgende korrosjon. Her er noen eksempel på vanlige feilmekanismer:

- Mekaniske skader som fjerner belegget i et lite område (slag, transportskader osv)
- Påføringsfeil som svekker beleggets egenskaper:
 - Nålestikk, det vil si små hull i belegget der metallet er eksponert og korrosjon kan starte
 - Dårlig dekning over kanter eller sveiser.
 - Overflatespenning i våt maling gjør at filmen blir tynnere over skarpe kanter. Det er derfor viktig å runde av kanter og slipe sveiser før malingen påføres.
 - Generelt for lav filmtykkelse (dårlig kvalitetskontroll eller feil spesifikasjon)
 - Dårlig rengjøring eller forurensning av metalloverflata etter rengjøring. Påføring av belegg på en forurenset overflate kan gi redusert vedheft eller osmose (hvis salt er til stede)
- Indre spenninger i malinga som gjør at den sprekker. Skjer gjerne i indre hjørner hvis et strøk av belegget påføres altfor tykt.
- Generell aldring av belegget.

4.1.2 Metalliske belegg

De vanligste metallbeleggene som påføres stål, er:

- Varmforsinking
- Termisk sprøyting
- Elektrokjemisk (plettering)

Anodiske belegg som sink eller aluminium, er mindre edle enn underlaget og kan gi god beskyttelse på stål. Katodiske belegg som krom eller nikkel er edlere enn underlaget. Skader i et katodisk belegg kan føre til hurtig korrosjon på det underliggende stålet.

Varmforsinka bolter og skruer benyttes i mange tilfeller i marine miljø. Ved varmforsinking er det viktig å velge et stål som er egnet, det vil si unngå stål med silisiuminnhold mellom 0,03 og 0,14 %, se Håndbok i varmforsinking¹².

Varmforsinking beskytter stålet mot korrosjon på flere måter:

- Når belegget er heldekkende vil det være sinkbeleggets korrosjonsegenskaper som avgjør korrosjonshastigheten. Sink har lav korrosjonshastighet i atmosfærisk miljø og gir følgelig lang levetid her.
- Ved skader i belegget der stålet eksponeres vil sinken beskytte stålet katodisk. Potensialet på stålet trekkes ned i det immune området. I atmosfæriske forhold vil det være begrenset hvor store skader som kan beskyttes. Det er snakk om noen mm, maksimalt noen få cm.
- Når sinken belegges med pulverlakk vil lakken også få lengre levetid enn hvis den legges rett på stålet. Dette fordi korrosjon brer seg langsommere på sink enn stål omkring lakkskader.

4.1.3 Dupleksbelegg

Et dupleksbelegg er et belegg som består av både et metallbelegg og et organisk belegg. Med dupleksbelegg får vi en synergieffekt som gjør at levetiden er lengre enn summen av levetiden for metallbelegget og det organiske belegget.

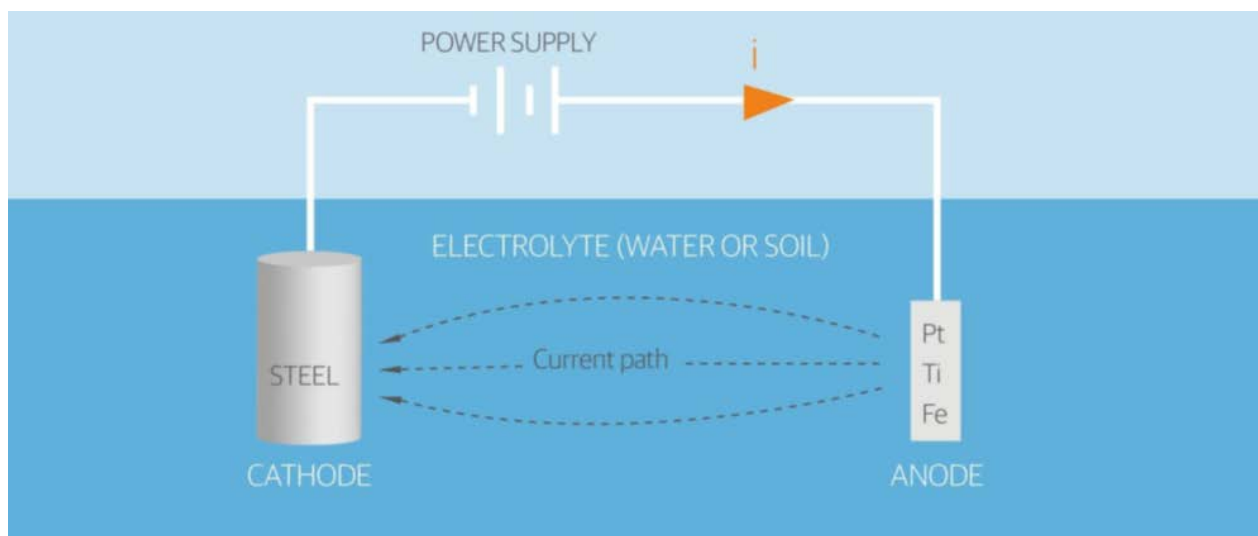
- Varmforsinket og pulverlakkert gods benyttes typisk brukt i bolter og festematerialer
- Termisk sprøyta sink (TSZ) med et malingsystem over

Det er viktig å velge riktig metallbelegg. I offshoreindustrien har de i noen tilfeller malt over termisk sprøyta aluminium (TSA), det vil si et dupleksbelegg der det korrosjonsbeskyttende metallbelegget er av aluminium. Det har ikke vært heldig, og de har erfart massiv nedbrytning av belegget etter kort tid, og levetiden til TSA dupleksbelegg er kortere enn summen av levetiden til metallbelegget og det organiske belegget. TSA uten overmaling gir lang levetid i marint miljø så lenge pH er mellom 4 og 9.

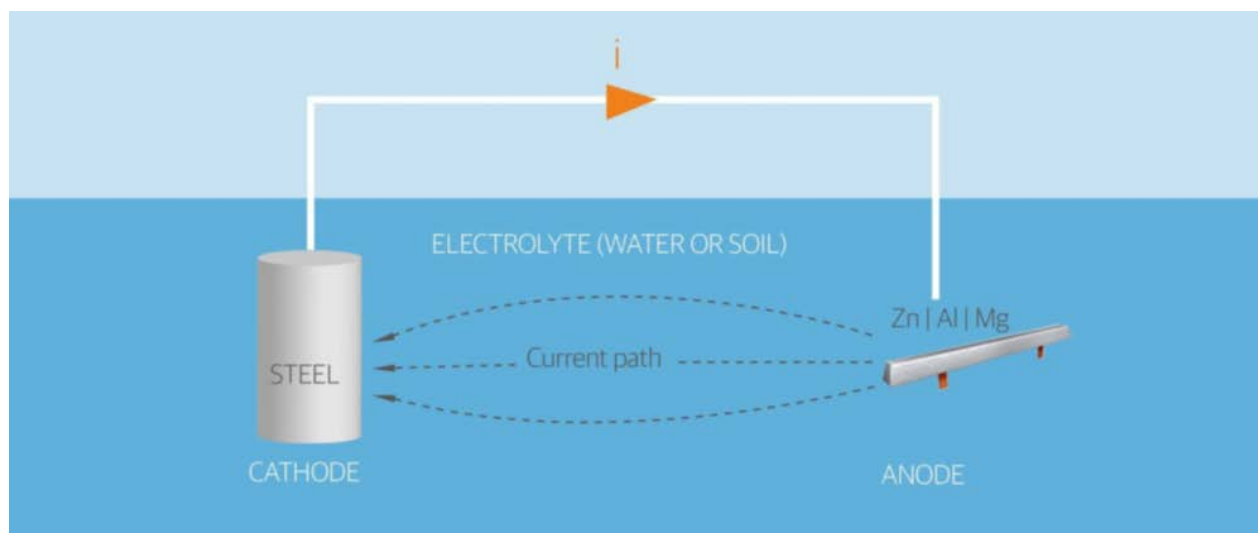
4.2 Katodisk beskyttelse

Katodisk beskyttelse (Cathodic Protection – CP) er beskrevet i den første rapporten i prosjektet². Dette avsnittet gjengir denne beskrivelsen med noen mindre endringer. Ved CP av stål forskyves elektrokjemisk potensial (polariseres) til et potensial der stålet ikke korroderer (potensial i det immune området i Pourbaix diagrammet i Figur 2, kapittel 3.1). To ulike former for CP kan benyttes, enten påtrykt strøm (Impressed Current Cathodic Protection – ICCP) som vist i Figur 10 eller ved bruk av offeranoder galvanisk koblet til stålet som vist i Figur 11.

¹² R. Thomas, Håndbok i varmforsinking, 2010, Nordic Galvanizers: Stockholm



Figur 10. Katodisk beskyttelse ved bruk av påtrykt strøm (tatt fra www.cathwell.com)



Figur 11. Katodisk beskyttelse ved bruk av offeranode (tatt fra www.cathwell.com)

I et påtrykt strømanlegg – ICCP påtrykkes en beskyttelsesstrøm på stålkonstruksjonen ved bruk av en justerbar likestrømkilde. Strømmen leveres ved å koble strukturen til den negative terminalen på strømkilden og den positive terminalen til anodene. De påtrykte strømanodene er vanligvis laget av titan, niob eller tantal med et tynt platinalag eller med et blandet oksidsjikt (Mixed Metal Oxide - MMO). Referanseelektroder brukes for å måle potensialet på strukturen (stålet). Potensialverdien brukes til å kontrollere den elektriske strømmen som leveres av ICCP-systemet. Forskjellige referanseelektroder kan benyttes:

- Sink (robust, men mindre nøyaktig enn en sølv / sølvkloridelektrode)
- Sølv / sølvklorid / sjøvann (nøyaktig, men mindre robust enn sink og med kortere levetid).

I et galvaniske system med offeranoder, vil anodene «ofre seg» for å beskytte stålet. Dette er fordi anodematerialet er mindre edelt enn stålet. Typiske anodematerialer er aluminium eller sink. Prinsippet er det samme som ved galvanisk korrosjon, men her kobles stålet til et uedelt materiale som korroderer i stedet for

stålet. Aluminiumanoder er spesielt levert med sink og indium for at de skal korrodere, i motsetning til aluminiumslegeringer som brukes som konstruksjonsmateriale, som er levert for at de ikke skal korrodere.

En forutsetning for at dette skal fungere er at det er både elektrisk kontakt og elektrolytisk kontakt mellom stål og offeranode. For stål som står eksponert i sjøvann kan man da montere på anoder rundt omkring på konstruksjonen og oppnå full beskyttelse mot korrosjon. Det er utviklet flere standarder for hvordan man skal designe katodisk beskyttelse, for eksempel DNV GL RP-B-401 [10].

5 Årsaker til korrosjon på fiskefartøy

Det fokuseres her på områder der omfattende korrosjonsskader er dokumentert i den første rapporten i prosjektet².

5.1 Fabrikkdekk

5.2 Fabrikkdekk i karbonstål

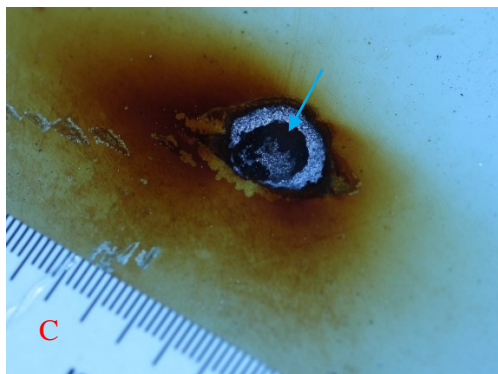
Tradisjonelt er fabrikkdekk i fiskefartøy konstruert i karbonstål. Slike dekk er ofte dekket med sjøvann når fabrikken er i drift eller ved vasking. Det er observert korrosjonsskader både omkring doblingsplater i rustfritt stål og i skader i dekkbelegget, se bilder i Figur 13. Bildene viser groper relativt jevnt fordelt over hele dekket. Som bildet i Figur 13 viser, kan korrosjon initiert i små beleggs-kader føre til dype groper. Det er også observert mange korrosjonsskader i forbindelse med sveiser på doblingsplatene, se Figur 14. Kvaliteten på sveisene er varierende, og enkelte sveiser har åpninger inn i hulrommet mellom doblingsplata og karbonståldekket slik at vann kan trenge inn og forårsake korrosjon. Det er videre observert korrosjonsskader i sveiser og i overgang mellom karbonståldekk og rustfritt skott, se bilder i Figur 15. Observasjoner har vist at korrosjon er mer omfattende bak i fabrikken (kappeområder) enn det er i front (som rundt platefrysere). Dette er forklart ved betydelig flere kontaktpunkter (doblingsplater) i dekket i fabrikken kombinert med mer sjøvann til stede. Tilsvarende observasjoner er gjort i forbindelse med innfesting av rustfrie utstyrsenheter på karbonståldekk i dragerom og setterom på linefartøy.

Korrosjonsmekanismen er *galvanisk korrosjon*:

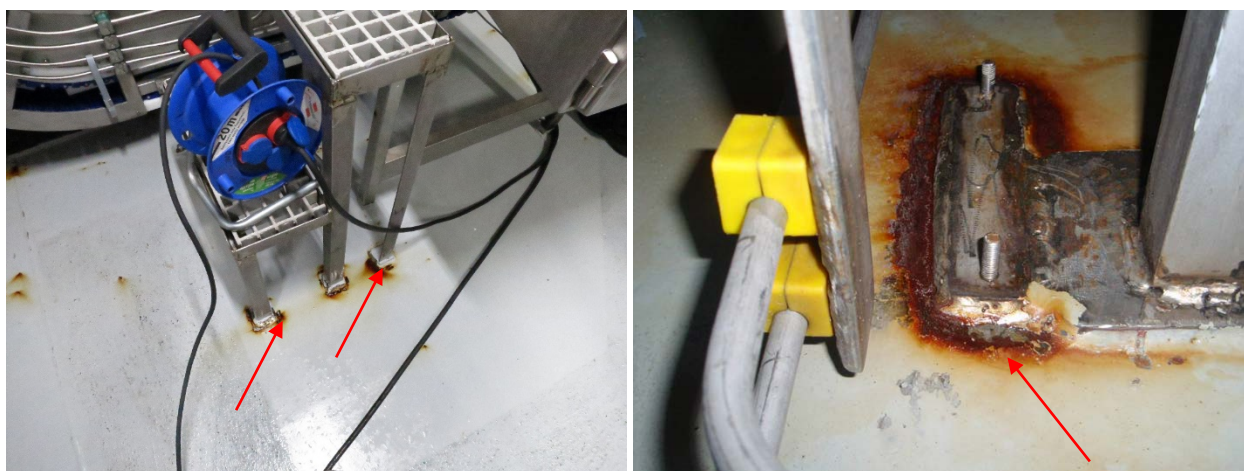
- Skader i dekkbelegg som blottlegger små areal av karbonstål koblet sammen med edle rustfrie deler med større overflateareal og sjøvann med god elektrisk ledningsevne som elektrolytt
- Oppsamling av sjøvann under sveiser som danner lokale korrosjonsceller mellom edle rustfrie doblingsplater og bart karbonstål



Figur 12. Korrosjonsangrep i vått område på malt karbonståldekk nær rustfrie doblingsplater (→) og i skader i belegget (↔)



Figur 13. Eksempel på dype korrosjonsangrep i vått område på malt fabrikkdekk i karbonstål



Figur 14. Korrosjonsangrep i karbonståldekket rundt doblingsplater under støtteben (→)



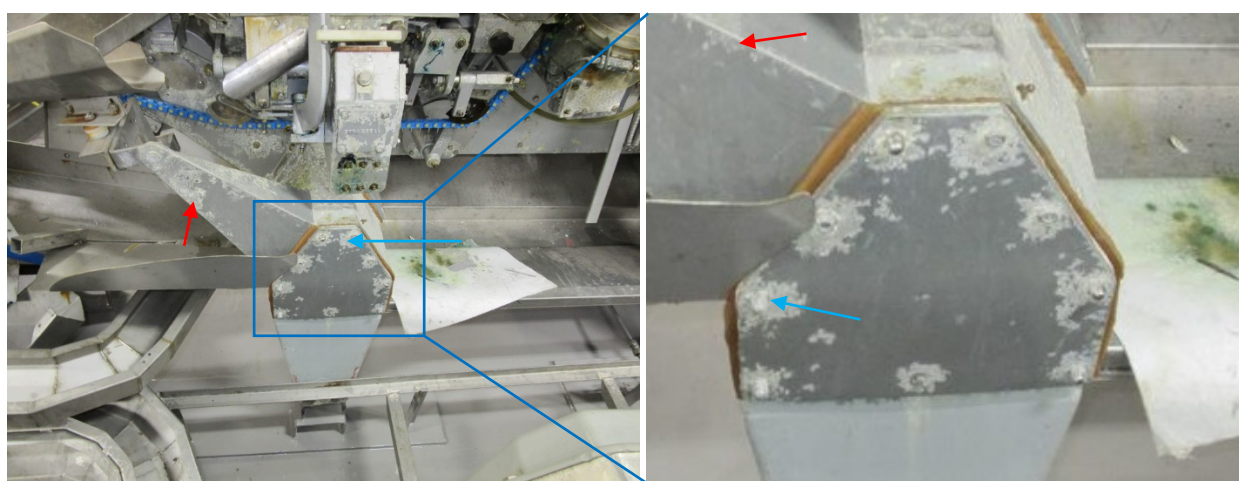
Figur 15. Korrosjonsangrep i overgang mellom karbonståldekk og rustfritt skott (→)

Øvrig utstyr i fabrikk, som platefryser, Baadermaskiner (fiskebearbeidingsmaskiner), vekter og lignende, har ingen påvirkning på korrosjonsskader på dekket da de ikke er nedsenket i sjøvann, men eksponert mot luft. Observasjoner tyder på at korrosjon på utstyr i luft skyldes primært feil materialvalg, feil påføring av malingsystem og uheldig sammenstilling som kan gi galvanisk korrosjon i koblingspunkter mellom ulike metall.

Figur 16 viser et eksempel på korrosjon på en filteringsmaskin. Bildene viser både korrosjon rundt rustfrie bolter og fra kant på lakkerte aluminiumsplater. Årsaken til korrosjon er todelt:

- *Galvanisk korrosjon* øker korrosjonstendensen der rustfrie bolter kommer i direkte kontakt med bart aluminium
- *Filiformkorrosjon* på lakkert aluminium initieres i skader (som bare kanter og skruehull) der bart metall kommer i kontakt med marin atmosfære

Filiformkorrosjon med grunne korrosjonsangrep under lakken på aluminium er normalt et visuelt problem. Bruk av ulakkert aluminium ville ha gitt et bedre visuelt uttrykk i dette miljøet.



Figur 16. Korrosjon på filteringsmaskin rundt rustfrie bolter (→) og fra kant (→) på lakkerte aluminiumsplater

5.2.1 Rustfrie fabrikkdekk

Installasjon av fabrikkdekk i rustfritt stål kan være en løsning for å unngå korrosjon og medfølgende store reparasjonskostnader. I dette prosjektet skal vi følge Holmeset AS sitt nye fartøy Geir som har fabrikkdekk i rustfritt AISI 316 (EN 1.4404). Geir skal settes på sjøen medio mai 2020. Inspeksjon av den uferdige båten ble utført 28. november 2019 etter at den kom fra Polen til Vaagland Båtbyggeri for ferdigstillelse. For å unngå galvanisk kontakt med karbonstål i skroget, er det rustfrie fabrikkdekket forlenget med en brystning omtrent 1 m opp langs skutesida, se bilder i Figur 17.

Kledningen på skutesida vil deretter trekkes et lite stykke ned over den rustfrie brystningen. På baksiden av brystningen blir det et rom mot skutesiden som blir vanskelig/umulig å inspisere. Det ble ved inspeksjon poengtert at inntrenging av vann her må unngås da dette vil det kunne forårsake alvorlige korrosjonsskader. Et rør som går opp langs skutesiden midt i brystningen kan utsettes for galvanisk korrosjon. Røret blir godt synlig i fabrikken, slik at eventuell korrosjon vil være lett synlig og tiltak kan gjøres.



Figur 17. Langs skutesida er det rustfrie dekket på nye Geir forlenget med en omtrent 1 m brystning for å unngå galvanisk kontakt med karbonstålet i skutesida. Et rør (→) som går opp langs skutesiden midt i brystningen kan utsettes for galvanisk

Prosjektgruppa hadde 26. februar i år en befaring på et fiskefartøy med rustfritt fabrikkdekk. Båten ble tatt i bruk i august 2015, og etter ett års drift ble det observert tendens til korrosjon i dragerbrønnen. Anoder ble da installert, og utviklingen av korrosjon stoppet opp. Konklusjon fra vår inspeksjon var at 4,5 års med rustfritt dekk i fabrikkområdet viste ingen tegn til korrosjonskader.

Dekket ble produsert i 8 mm tykke rustfrie plater. Langs skuteveggen var det også på dette fartøyet en omtrent 1 m høy rustfri brystning. Mellom skroget og denne brystning er det skum. En gang i året passiveres det rustfrie dekket på verksted med et rensmiddel fra Avesta¹³. Avesta 401 er et fosfatholdig produkt, og passiveringen har gitt det rustfrie stålet en matt overflatefinish. Etter et års drift observeres små brune flekker på dekket i tilknytning til sveiser og innfestninger av fabrikkutstyr. Dette er av en mer estetisk karakter, og rustflekkene forsvinner etter passivering.

5.3 Dragerbrønn (moonpool)

Det er rapportert om korrosjon i området i og rundt dragerbrønn (moonpool) på autolinefartøy. Dragerbrønnen er en del av skipsskroget og dermed i karbonstål. I dragerbrønnen på bilder i Figur 18 ble det installert ei umalt rustfri plate/skjold som førte til korrosjon i sveis og beleggs-kader på karbonstål. Trinn i den malte stigen i dragerbrønnen er helt eller delvis ødelagte på grunn av korrosjon. Det var ikke installert katodisk beskyttelse i denne dragerbrønnen.

Årsaken til korrosjon er *galvanisk korrosjon*:

¹³ Avesta 401: <http://www.euroshl.com/project/avesta-cleaner-401/>

- Skader i belegget fører til dannelse av ei galvanisk celle mellom små areal av bart karbonstål koblet direkte mot en stor rustfri plate i nedsenket i sjøvann



Figur 18. Korrosjon på malt karbonstål i dragerbrønn (→) med ei rustfri plate/skjold (→) . Trinn i stigen (→) i dragerbrønneren er delvis korrodert bort

5.4 Kjøllesystem – Sjøkister med bokskjølere

Fiskefartøy kan ha enten lukket eller åpent kjølesystem, som beskrevet i første rapport².

Et lukket system kan bestå av en bokskjøler, som er en rørvarmeveksler montert i sjøkista på skipsskroget. Kjølemediet (ferskvann/glykol) pumpes rundt i varmeveksleren og avkjøles av sjøvann som strømmer gjennom sjøkisten på utsiden av rørene. For å sikre god varmeoverføring blir ikke bokskjølere malt. Bokskjølere bygget i et kobberholdig (gult) materiale, som regel kobbernikkel (CuNi), er boltet fast til det malte karbonstålskroget.

Eget antigroesystem og offeranoder plasseres normalt i sjøkista. Antigroesystemet er basert på frigjøring av kobberioner fra kobberanoder for å hindre begroing i kjølesystemet. Slike kobberanoder må ikke forveksles med offeranoder (sink eller aluminium) montert for å beskytte mot korrosjon.

Bilder i Figur 19 (A og B) viser korrosjon på karbonstål i en sjøkiste der bokskjøler var installert. Det var i dette tilfellet ikke installert offeranoder i sjøkista, og CP-anlegget for skroget var ikke i stand til å beskytte stålet i sjøkista mot korrosjon. Dette førte til et stort edelt overflateareal på bokskjøleren var i direkte kontakt med karbonstål i sjøkista, som dermed ble utsatt for korrosjon.

Årsakene til korrosjon:

- *Galvanisk korrosjon:* Karbonstål i sjøkista i direkte kontakt med en stor edel overflate på bokskjøleren (Cu-Ni legering) nedsenket i sjøvann. Korrosjonen startet i skader i malingsbelegget.
- *Atmosfærisk korrosjon:* Luft/gass har fortrent sjøvann i øverste delen inne i sjøkista. Rik tilgang av fuktighet/sprut av sjøvann gir høg korrosjonshastighet på ramma i karbonstål, som vist i Figur 19(A).



Figur 19. Demontering av bokskjøler fra sjøkiste viser korrosjon og marin begroing (→) og korrosjon (→), korrosjon på ramme i karbonstål (→) sett fra (A): undersiden og (B): oversiden, (C): Demontert bokskjøler, (D): Korroderte hull i varmevekslerrørene

Bildene i Figur 19 viser dessuten begroing i form av skjell og muslinger både på bokskjøleren og på veggene i sjøkista. Det er i tillegg observert hull på CuNi-rørene i bokskjøleren, se bildet i Figur 19(D).

Kobberholdige materialer er normalt korrosjonsbestandige i sjøvann og lite utsatt for begroing på grunn av den toksiske effekten kobberioner har på levende organismer. Det er antatt² at CP på skroget kan ha påvirket kobbermaterialet og hindret frigjøring av kobberioner. En undersøkelse¹⁴ der korrosjonskontroll av CuNi-bokskjølere i sjøvann er diskutert bekrefter denne antagelsen:

- God korrosjonsbestandighet for CuNi-materialer i sjøvann skyldes utfelling av en beskyttende kobberoksidfilm på overflata.
- Samtidig hindres begroing ved at kobberioner løses i overflata i en langsom korrosjonsprosess som også opprettholder oksidfilmen

¹⁴ D.G. John et al, "Corrosion Control Issues for Marine Vessel Copper-Nickel Boxcooler", Paper No 3818, CORROSION, NACE International, 2014

- Dersom CuNi kobles til et CP-system stoppes korrosjonsprosessen. Det frigjøres ikke kobberioner og det starter å gro på Cu-Ni.

Siden bare bilder av CuNi-rør med hull i bokskjølere, se Figur 19(D), kan vi ikke si om hullene skyldes korrosjon initiert fra utsiden eller innsiden av rørene. Mulige årsaker for korrosjon på CuNi-rør kan være:

- *Høy strømningshastighet* for kjølemediet kan skade den beskyttende oksidfilmen på CuNi-overflaten kan føre til gropkorrosjon, eventuelt også erosjonskorrosjon fra innsiden
- *Lekkstrømskorrosjon* ved sveising om bord på fartøyet (DC strøm)
- *Korrosjon under utvendig begroing*

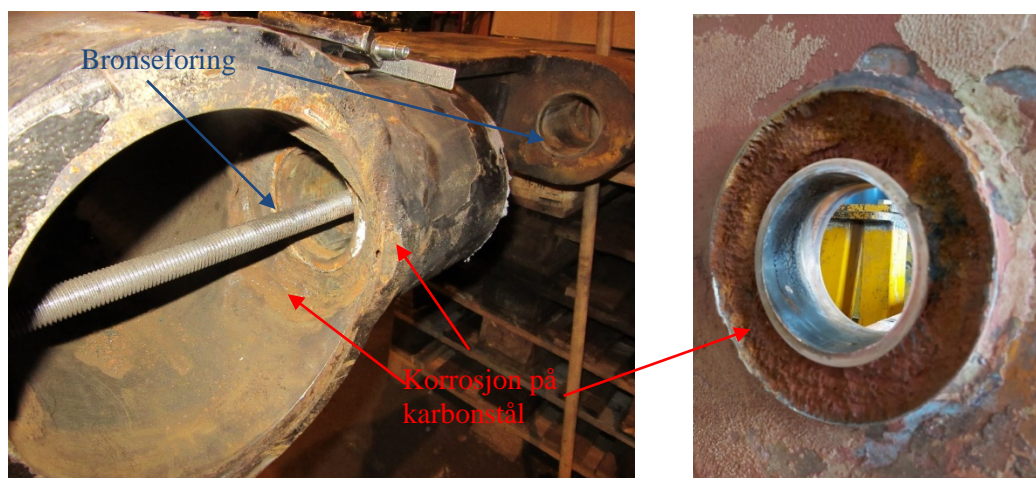
5.5 Ror og propell

Korrosjon på rorsystem av typen flapsror (for eksempel Becker) er beskrevet i delrapport 1². Roret består gjerne av malt karbonstål, med foring/lager (gjennomføringshylser) i bronse. Det er installert egne anoder for katodisk beskyttelse av roret. Akslingen som går gjennom flapsen er i karbonstål. Figur 20 viser korrosjonsskader på karbonstål nær/rundt lager og gjennomføringer i bronse.

Det er også rapportert om korrosjonsskader i forbindelse med hylsetetninger (hylsepakkbokser) mellom skrog og propellaksling. Materialer som er brukt er modifisert karbonstål og støpejern. Korrosjonen har ført til reduksjon i veggtykkelse på støpejern, som vist på bildet i Figur 21.

Korrosjonsmekanismen er *galvanisk korrosjon*:

- I utgangspunktet skal anodene sørge for at stålet/støpejernet er beskyttet mot korrosjon. De korroderte områdene befinner seg imidlertid i trange spalter slik at strømmen fra anodene ikke kommer fram. Når strømmen tvinges til å gå gjennom et lite tverrsnitt med sjøvann øker motstanden og det oppstår et ohmsk spenningsfall i sjøvannet. Dermed er ikke stålet/støpejernet lenger katodisk beskyttet.
- I tillegg trekker kobbermaterialet også strøm, slik at den katodiske strømmen øker. Høy strøm og høy motstand gir høyt spenningsfall som fører til at anodene ikke klarer å beskytte i angitte områder. Dermed oppstår det galvanisk korrosjon på stålet/støpejernet drevet av katodereaksjonen på omliggende kobbermateriale.



Figur 20. Korrosjonsskader på karbonstål rundt foring og gjennomføringshylse i bronse



Figur 21. Korrosjon på hylsetetning i støpejern med liner i modifisert karbonstål

5.6 Skrog med katodisk beskyttelse

For å unngå korrosjon må malte skipsskrog beskyttes katodisk. Typisk beskyttes fiskefartøy med en kombinasjon av ICCP og galvaniske offeranoder. På fiskefartøy er det observert korrosjonsskader på skrog der blant annet referanseelektrodene for ICCP-anlegget er ødelagt, som vist i Figur 22. Årsaker til korrosjon kan være:

- *Manglende katodisk beskyttelse:* Når referanseelektroden er ødelagt måler ikke anlegget lenger riktig potensial på skroget. Det er derfor ikke lenger i stand til å levere riktig beskyttelsesstrøm. Det at sveisene ser ut til å være spesielt utsatt skyldes trolig at disse stikker ut fra overflata ellers, og at belegget derfor lettere skades her. Korrosjon vil derfor starte her først, mens områder med intakt belegg er beskyttet til tross for manglende CP.
- *Galvanisk korrosjon:* Korrosjon i tilknytning til defekte referanseelektroder kan også skyldes at materialer i elektrodene er edlere enn karbonstål. Siden CP ikke fungerer, vil skroget utsettes for

galvanisk korrosjon. Sveisene rundt referansen vil være ekstra utsatt både på grunn av den korte avstanden til edle materialer i referansen, at belegget på sveiser er mer utsatt for skade og at mikrostrukturen i sveis og varmepåvirka sone nær sveisen er mer disponert for korrosjon enn resten av stålet.



Figur 22. Korrosjon på skrog (A) nær sveis og (B): rundt ødelagt referanseelektrode



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no