

Evaluering af rustbeskyttende maling under barske maritime forhold

Ny viden og avanceret testning skal sikre mere holdbare og bæredygtige beskyttelsessystemer til fremtidens infrastruktur.

Af Ziyou Li, Joshua Onyango, Claus Erik Weinell og Kim Dam-Johansen, CoaST, DTU Kemiteknik

Korrosion er en af de største udfordringer for levetiden af kritisk infrastruktur og medfører hvert år betydelige økonomiske og klimamæssige omkostninger. For at udvikle mere holdbare rustbeskyttende malingsystemer har en forskningsgruppe på DTU udvidet sit feltlaboratorium ved Hundested Havn, hvor antikorrosive coatings nu kan testes i endnu større skala under nogle af Danmarks mest barske marine forhold. Ved at kombinere langvarig felteksponering med avanceret overvågning og digital dataanalyse arbejder DTU's CoaST Maritime Test Centre (CMTC) på at skabe mere præcise levetidsforudsigelser og fremtidens korrosionstestning.

Korrosion – en usynlig fjende

Den 14. august 2018 kollapsede en 210 meter lang sektion af Morandi-broen i

den italienske havneby Genova under et kraftigt regnvejr og kostede 43 mennesker livet. Broen, der var åbnet i 1967, udgjorde en central strækning af motorvejen A10 mellem Italien og Frankrig. Inde i en af pylonernes skrånede var de bærende stålkabler indstøbt i beton – en konstruktion, der skulle beskytte dem, men i stedet gjorde det umuligt at inspicere dem visuelt. Over årtier havde fugt og klorider trængt ind gennem revner i betonen og gradvist tæret kablerne op, indtil de brast, og pylon 9 styrtede sammen.

Ulykken er et af historiens tydeligste eksempler på, at korrosion er vanskelig at opdage, før det er for sent. Korrosion angriber stort set alt, vi bygger – broer, rørledninger, havvindmøller, atomkraftværker og de utallige metalliske forbindelser i datacentre, som enhver onlinesøgning eller AI-forespørgsel i sidste ende afhænger af.

Ifølge Association for Materials Protection and Performance, AMPP koster korrosion verden omkring 2500 milliarder



Figur 2. Katastrofen ved Morandi-broen, 2018.

der USD årligt, svarende til 3,4 procent af det globale BNP [1] Application, and Economics of Corrosion Technologies (IMPACT i reparation, produktionstab og sikkerhedsudgifter. Hertil kommer et betydeligt klimaaftryk fra udskiftning af korroderede materialer, som ifølge nyere studier kan sammenlignes med de samlede udledninger fra international luftfart og skibsfart [2]. Bedre korrosionsbeskyttelse har derfor stor sikkerheds-, økonomi- og klimamæssig betydning.

Beskyttende coatings er den første forsvarslinje: nogle virker som en regnfrakke, der holder vand og salt ude; andre, som zinkrige coatings, ofrer sig selv og korroderer i stedet for stålet; en tredje type frigiver korrosionsinhibitorer, når fugt trænger ind. I praksis kombineres principperne i et lagdelt system – primer, mellemlag og topcoat – der samlet er blot en kvart til en halv millimeter tykt, men skal holde stålkonstruktioner intakte i 15-25 år eller mere.

Det rejser et oplagt spørgsmål: Hvordan ved vi, om en coating kan holde i årtier uden faktisk at teste i årtier? Det spørgsmål driver meget af nutidens forskning i accelererede holdbarhedstest.

CoaST

På DTU Kemiteknik har forskere i flere



Figur 1. CoaST Maritime Test Centre (CMTC) på Hundested Havn. Forrest i billedet ses den flydende platform, som især anvendes til test af antibegroningsmaling, midt i billedet ses den nyetablerede platform med skrå stativer til test af rustbeskyttende malinger og bagest i billedet ses tre sorte småhuse fungerende som værksteder og kontor.

Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7
UV/condensation — ISO 16474-3			Neutral salt spray — ISO 9227			Low-temp. exposure at $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
						

Figur 3. Cyklisk ældningstest i henhold til ISO 12944-9. Testpaneler eksponeres i 25 cyklusser eller 4200 timer [3].

år arbejdet med netop dette, primært i regi af Hempel Foundation Coating Science and Technology Centre (CoaST), et tværvidenskabeligt center etableret i 2017. Siden 2020 har flere ph.d.-projekter under CoaST beskæftiget sig med antikorrosive coatings, og centret arbejder fortsat på at styrke Danmarks position inden for coatingvidenskab og korrosionsbeskyttelse.

Udfordringen ved at vurdere rustbeskyttende malings ydeevne

En coatings ydeevne afhænger af et komplekst samspil mellem materiale, miljø og eksponeringstid. Et system, der fungerer upåklageligt ét sted, kan svigte for tidligt et andet sted på grund af forskelle i fugtighed, temperatur, salt og mekanisk belastning.

ISO 12944-2 klassificerer korrosive miljøer i atmosfæriske kategorier (C1-CX) og nedsænkings-/jordkategorier (Im1-Im4) [4], mens ISO 12944-5 angiver, hvilke coatingsystemer der bør bruges for at opnå holdbarhed fra lav (op til syv år) til meget høj (over 25 år) [5]. Men hvordan vurderer man et nyt systems langsigtede holdbarhed, før data fra årtiers felttest eksponering er tilgængelig? Det spørgsmål har drevet udviklingen af accelererede ældningstest (ALT), som forsøger at genskabe centrale nedbrydningsmekanismer – via saltaflejring, kondens, temperatursving og UV-stråling – inden for en kortere tidsramme.

ALT giver dog ikke holdbarhed direkte, men specifikke indikatorer som rustunderkryb, blæredannelse og tab af vedhæftning. Fordi nedbrydning i praksis skyldes samspillet mellem mange miljøfaktorer på én gang, er der ingen universel sammenhæng mellem testvarighed og reel levetid. Selv de mest udbredte standarder som ISO 9227 (saltspray) og ISO 12944-9 anerkender, at deres resultater ikke direkte kan bruges til at forudsige den praktiske holdbarhed i felten. ALT bruges derfor primært til at sammenligne systemer og identificere nedbrydningsmekanismer – ikke til at forudsige levetid.

I nogle tilfælde kan ALT ligefrem fremkalde nedbrydning, der adskiller sig fra det, der sker i praktisk drift. I et CoaST-ledet studie [6] af termisk sprøjtede metalliske (TSM) duplex-coatings – som ellers har vist fremragende langtidsholdbarhed på for eksempel Vilsundbroen og Vindeby havvindmøllepark – skallede belægningen fuldstændig af under en cyklisk ISO 12944-9-test, mens de samme formuleringer kun viste begrænset skade efter reel offshore-eksponering (figur 4). Det rejser en vigtig bekymring: Hvis laboratorietest ikke afspejler virkeligheden, risikerer man at kassere holdbare systemer og vælge dårligere i stedet. Der er derfor brug for en dybere forståelse af, hvordan coatings reagerer på klima for at kunne udvikle testmetoder, der nedbryder coatings på samme måde, som naturen gør.

CoaST Maritime Test Centre (CMTC) i Hundested

Naturlig marin korrosionstest går helt tilbage til 1930'erne, hvor metallurgen Francis L. LaQue startede langtidsstudier ved Kure Beach, North Carolina, USA på grund af stedets barske miljø [7] – et sted, der senere blev brugt til at teste rustfri stål til reparation af "Friedsgudinden", New York City, USA. I

dag katalogiserer European Federation of Corrosion 44 tilsvarende eksponeringsstationer i 11 europæiske lande.

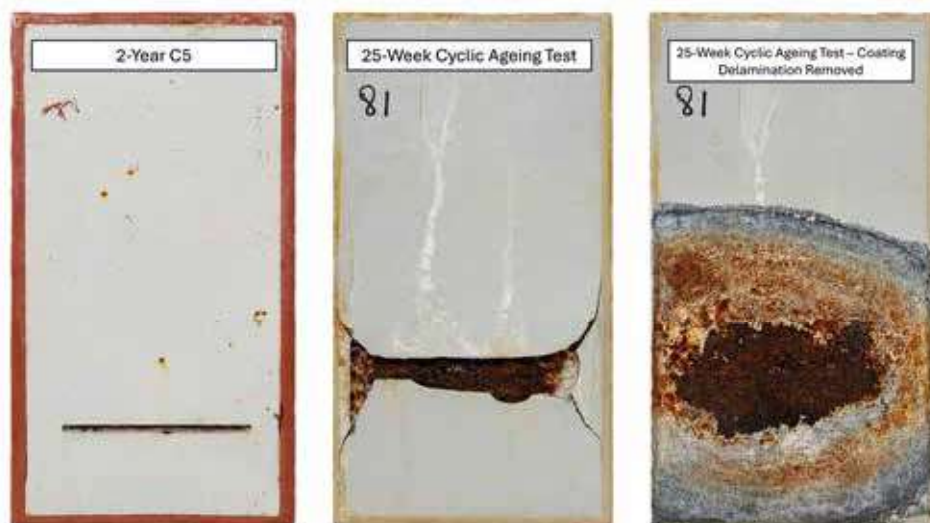
CMTC blev etableret i 2020 på Hundested Havn og bestod oprindeligt af en flydende testplatform primært til undersøgelse af begroingshindrende malinger. For at imødekomme den stigende efterspørgsel omkring korrosionsbeskyttende malinger blev en ny, cirka 120 kvadratmeter stor atmosfærisk eksponeringsplatform sat i drift i november 2025 med plads til nær 2000 testpaneler (150 × 75 mm) til korrosionstests.

Placeringen ved Isefjordens munding gør CMTC til et aggressivt testmiljø: vestlige og sydvestlige vinde fører marine aerosoler ind over stedet efter at have bevæget sig uhindret over Kattegat. Kombineret med en relativ luftfugtighed, der ofte overstiger 80 procent ved temperaturer over 0°C, giver det en forlænget "fugttid" (Time of Wetness) som defineret i ISO 9223 [8]. Det sikrer, at en koncentreret saltelektrolyt bliver liggende på overfladen i stedet for at fordampe, hvilket samtidigt driver vand og ilt ind gennem coatingen og accelererer nedbrydning ved enhver defekt.

Fra felttesteksponering til højopløselige data

Traditionelle eksponeringsstationer viser den langsigtede ydeevne, men fortæller lidt om, hvordan og hvornår nedbrydningen sker undervejs. CMTC lukker det hul ved at kombinere langtidseksponering med kontinuerlig miljøovervågning, ikke-destruktiv karakterisering og digital datastyring.

Hos CoaST samles al information om hver prøve i det egenudviklede system Coast-lab, hvor en unik QR-kode giver ▶



Figur 4. TSM-duplex-coatingsystemer efter to års eksponering i Hundested (C5) (venstre billede) sammenlignet med 25 uger i cyklisk ældningstest i henhold til ISO 12944-9 (billeder i midten og til højre).

forskerne adgang til prøvens historik direkte fra felten. Samtidig registrerer stationen temperatur, luftfugtighed, nedbør, vind og solstråling hvert 15. minut, samt klorid- og SO₂-aflejring i henhold til ISO 9225 [9] – data, der lægger grunden til at koble klima og nedbrydning statistisk sammen.

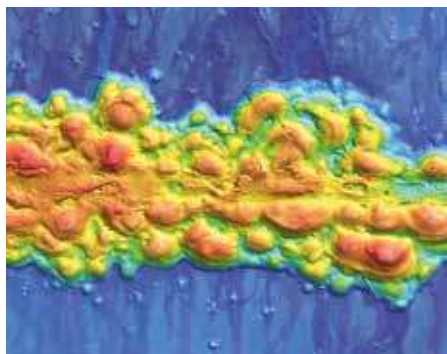
Et andet fokusområde er elektro-kemisk impedansspektroskopi (EIS); et helbredstjek af coatingen, hvor en lille vekselspænding afslører nedbrydning, længe før skader bliver synlige. Traditionel EIS kræver dog, at panelet tages ind i et laboratorium og monteres i en væskefyldt testcelle – upraktisk for langtidsforsøg udendørs. I samarbejde med Zagrebs Universitet og ReCorrTech har CoaST derfor taget et overflademonteret EIS-system i brug, hvor sensoren sidder direkte på panelet i felten og løbende afslører begyndende nedbrydning måneder eller år, før den bliver synlig.

Rustunderkryb – hvor langt korrosion breder sig under coatingen fra en ridse i malingen ned til stålet (en kunstig skade) – måles traditionelt ved at skrabe coatingen af og aflæse rustens udbredelse med en lineal (ISO 4628-8 [10]). En destruktiv metode, der kun giver ét datapunkt per prøve. CoaST erstatter den med ikke-destruktive teknikker som 3D-profilometri og infrarød termografi samt en maskinlæringsbaseret billedanalyse, der automatisk måler korrosionen – og giver objektive, reproducerbare data på tværs af mange prøver uden manuelt arbejde.

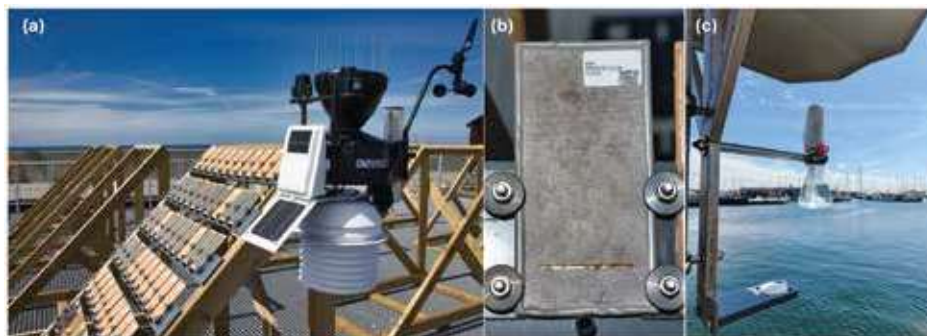
Fremtiden for korrosionstestning ved CMTC

Krav til korrosionsbeskyttelse skærpes: infrastruktur skal holde længere under hårdere forhold, samtidig med at vedligeholdelsesudgifter og miljøpåvirkning skal ned. Det kræver ikke kun nye coatings, men mere pålidelige metoder til at vurdere deres langsigtede holdbarhed.

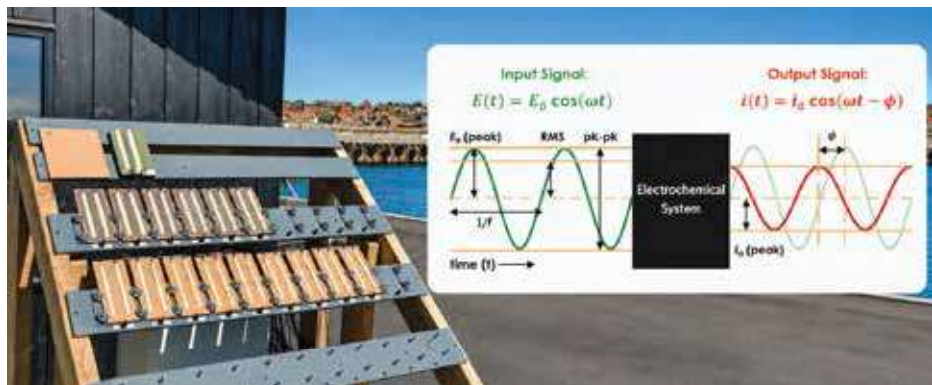
Ved at koble langtidseksponering med kontinuerlig overvågning og digital



Figur 7. 3D-profilometri af rustunderkryb omkring en ridse (kunstig skade).



Figur 5. (a) Vejrstation ved eksponeringsstativ. (b) Coatingprøve med QR-kodemærkat. (c) "Våd væge" og sulfateringsplade til måling af klorid- og SO₂-aflejring.



Figur 6. Overflademonteret EIS-måling på CMTC med den grundlæggende virkemåde.

datastyring gør CMTC hvert coating-panel til en del af et voksende datasæt, der forbinder klima, nedbrydning og ydeevne – og skaber grundlag for bedre præstationsforudsigelser og mere retvisende accelererede testmetoder. Betydningen rækker ud over forskningen: faciliteten uddanner fremtidens korrosionsingeniører, giver industrien en uafhængig testplatform, og styrker Danmarks internationale position inden for marin eksponeringstestning.

Kampen mod korrosion stopper aldrig, men med CMTC er ambitionen at gøre korrosionstestning til en prædiktiv videnskab frem for en bagudskuende vurdering – og dermed bane vejen for mere holdbare og bæredygtige beskyttelsessystemer til fremtidens infrastruktur.

E-mail:

Ziyou Li: ziyilia@kt.dtu.dk

Claus Weinell: cwei@kt.dtu.dk

Referencer

1. E. Bowman, G. Koch, J. Varney, N. Thompson, O. Moghissi, M. Gould, J. Payer, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study, NACE Int. (2016) 1–216. <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf?0Apapers3://publication/uuid/9784056A-47E3-4988-8D70-B6763CF35EBF>.
2. M. Iannuzzi, G.S. Frankel, The carbon footprint of steel corrosion, Npj Mater. Degrad. 6 (2022) 1–4. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00318-1>.
3. ISO 12944-9:2018 Paints and varnishes –
- Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures, in: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2018.
4. ISO 12944-2:2017 Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 2: Classification of environments, in: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
5. ISO 12944-5:2018 Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 5: Protective paint systems, in: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2018.
6. Z. Li, H. Bi, S. Gunnarsson, C.E. Weinell, K. Dam-Johansen, Delamination of thermally sprayed ZnAl15/organic duplex coating systems on structural steel for offshore wind applications, Surf. Coatings Technol. 485 (2024) 130796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130796>.
7. F.L. LaQue, Marine Corrosion: Causes and Prevention, John Wiley & Sons Inc, 1975.
8. ISO 9223: 2012 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation, in: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2012.
9. ISO 9225:2012 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres, in: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2012.
10. ISO 4628-8:2012 Paints and varnishes – Evaluation of degradation of coatings – Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance – Part 8: Assessment of degree of delamination and corrosion around a scribe or o, in: International Organization for Standardization, 2012.