



## I dette nummer

Nye udstyr til målinger af armeringskorrosion .....1

Brug af overvågning af korrosionsprocessen i initieringsfasen....2

Monitering af korrosion i propageringsfasen .....3

### Leder

Kære læser,

Denne gang skriver vi om overvågning inden korrosion initieres og overvågning i propageringsfasen. Korrosionsovervågning i initieringsfasen er en anerkendt fremgangsmåde, som oftest anvendes på nye konstruktioner udsat for ekstrem miljøpåvirkning, f.eks. Storebælts- og Øresundsforbindelsen. Overvågning i propageringsfasen er derimod ikke ret udbredt.

Vi foretog overvågning i propageringsfasen af Skovdiget bro ved København og den viste, at konstruktionens levetid kunne forlænges betydeligt med samfundsmæssige og økonomiske fordele til følge.

Vi introducerer to nye måleudstyr, det første måler lave korrosionsstrømme baseret på et **zero-ohm** amperemeter princip, deraf navnet CorroZoa. Det andet udstyr, CorroMap, er udviklet til Elektrokemisk Potentiale (EKP) målinger.

God fornøjelse med læsningen.

Oskar Klinghoffer  
Redaktør

## Nye udstyr til målinger af armeringskorrosion

FORCE Technology har udviklet to nye udstyr til måling af armeringskorrosion.

### CorroZoa

Det første af disse udstyr er et batteridrevet og let betjent instrument til måling af lave korrosionsstrømme baseret på et såkaldt **zero-ohm** amperemeter-princip, deraf navnet CorroZoa. Udstyret er specielt designet til at måle korrosionsstrøm fra overvågningssonder, som CorroWatch eller lignende. Disse sonder indstøbes i dæklaget for at registrere tiden til korrosionsinitiering i forskellige niveauer under betonoverfladen, og dermed kan man estimere, hvornår korrosion forventes at være initieret på selve armeringen. Der kan logges på op til 6 kanaler efter selvvalgte tidsintervaller, hvor der ud over korrosionsstrømmen også registreres samhörrende værdier for potentiale og temperatur. Målinger kan overføres til bærbar PC via USB interface.



CorroZoa udstyr

### CorroMap

Det andet udstyr er udviklet til Elektrokemisk Potentiale (EKP)-målinger, som benyttes i felten for hurtigt at vurdere korrosionstilstanden af den indstøbte armering. Udstyret er baseret på

Psion Work About PC med Windows CE 5.0 med farve "touch screen", hvilket giver unikke muligheder for et hurtigt overblik og umiddelbar behandling af data i felten. Det nye udstyr registrerer samhörrende værdier af elektrokemiske potentialer og elektriske modstande i et forudbestemt målefelt. Der kan frit vælges om målinger skal gennemføres manuelt eller ved hjælp af indbyggede funktioner for "automatisk accept". Der kan gemmes op til 1024 målinger, og alle målinger kan øjeblikkeligt vises på skærmen i farver. Hver farve repræsenterer et måleinterval for potentiale og modstand. Derudover indeholder udstyret en zoomfunktion af detailområde med visning af de enkelte måleværdier. Måleresultater overføres nemt til PC for videre bearbejdning og præsentation.



CorroMap udstyr

### Yderligere information

Oskar Klinghoffer  
43 26 72 55 • concrete@force.dk

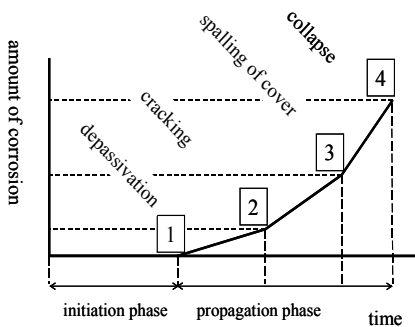
Brían Kofoed  
43 26 73 43 • concrete@force.dk

# Brug af overvågning af korrosionsprocessen i initieringsfasen

FORCE Technology har udviklet og sælger sonder og måleudstyr til overvågning af begyndende korrosion.

## Princip for overvågning i initieringsfasen

Den korrosion, der med tiden sker i betonkonstruktioner, ses generelt som en proces, der foregår i flere trin som vist i figur 1. I den første fase gennemtrænges belægningen af aggressive stoffer såsom kloridioner eller kuldioxid, og til slut når de stålet, hvilket forårsager korrosionsangreb (mærket 1), kaldet depassivering eller korrosionsinitiering.



Figur 1: Forskellige udviklingsstadier af korrosion i armeringsbeton.

Perioden indtil mærket 1 kaldes initieringsfasen. Perioden fra mærket 1 indtil mærket 4 kaldes propagering. Korrosionsovervågning gør det muligt at efterprøve kloridgennemtrængningen på et tidligt stadie i propageringsfasen samt muligvis gøre en vurdering af fasen indtil mærke 1.

## Sensorer til overvågning af korrosionsinitiering

Sensorer til overvågning af korrosionsinitiering bygger ofte på det såkaldte "makrocelle"-princip.

Typisk består sådanne sensorer af et antal stænger af kulstofstål; såkaldte anoder (typisk fire eller seks) placeret i betondæklaget i forskellig dybde. Derudover placeres et andet metal med større korrosionsbestandighed i beton end kulstofstål; typisk titanium eller rustfrit stål, også kaldet katoder, tæt ved kulstofstålanoderne. Den elektriske strøm måles mellem hver enkelt anode og katode. I begyndelsen, når hverken anode eller katode endnu korroderer, er denne strøm ubetydelig. Efter nogen tid overstiger den elektriske strøm triggerværdien i den yderste anode, når det kritiske

niveau af aggressive substanser, primært klorider, har nået denne anode. På dette tidspunkt starter korrosionen. Når den elektriske strøm overstiger den næst-yderste anodes triggerværdi, har et kritisk niveau af aggressive substanser nået denne anode, og korrosion initieres i en dybde, der svarer til dæklaget, etc. På denne måde kan "korrosionsfrontens" indtrængning i betondæklaget følges.

Et eksempel på et sådant produkt, der anvendes i initieringsfasen, er CorroWatch-sensoren, der er udviklet af FORCE Technology. Yderligere oplysninger om CorroWatch-sensoren og dens anvendelsesmuligheder kan ses på vores [hjemmeside](#).

CorroWatch er kun af nytte i nye betonkonstruktioner, fordi installation af den kun er mulig, før betonen støbes. Når overvågning af tid-til-korrosionsinitiering er ønskelig i eksisterende konstruktioner, kan en sensor (baseret på et tilsvarende "makrocelle"-princip som CorroWatch kaldet CorroRisk) anvendes. Yderligere oplysninger om CorroRisk-sensoren kan ses på vores [hjemmeside](#).

Aflæsningerne fra CorroWatch- og/eller CorroRisk-sensorerne - kan enten registreres ved hjælp af målinger med et håndholdt instrument eller indsamles automatisk ved brug af en datalogger. Som eksempel på et formålstjenligt, håndholdt instrument kan nævnes det nyligt udviklede Zero Ohm Amperemeter med handelsbetegnelsen "CorroZoa". Yderligere oplysninger er tilgængelige på side 1 og på vores [hjemmeside](#).

Dataloggersystemet, som anbefales af FORCE Technology til brug med CorroWatch- og CorroRisk-sensorerne, er udviklet af det norske selskab Protector og har handelsbetegnelsen "CAMUR II".

## Praktisk opgave med brug af CorroWatch-sensorer

En stor feltopgave, hvor CorroWatch-sensorer er anvendt, er Øresundstunnelen, der forbinder Danmark og Sverige, og hvor 189 sensorer blev installeret i 1998 med det formål at overvåge korrosionsinitiering. Tolv år efter installationen



Figur 2: Foto af en CorroWatch-sensor



Figur 3: Typisk installation af en CorroWatch-sensor og en ERE 20-referenceelektrode

fungerer alle sensorerne stadig fuldt ud, hvilket bekræftes ved årlige målinger i tunnelen.

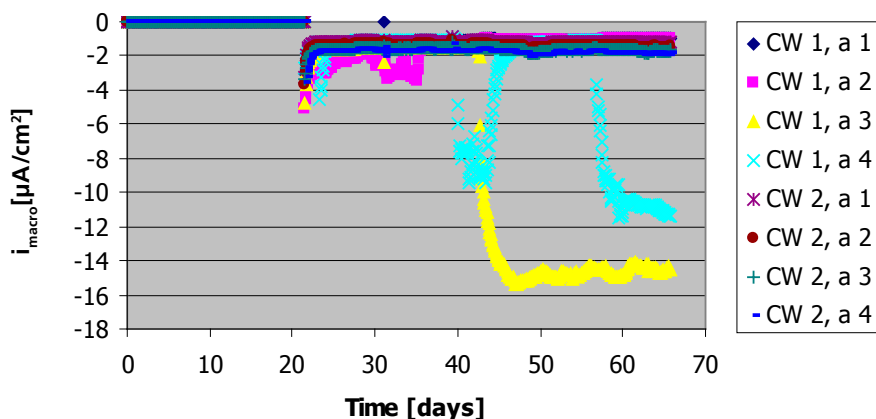
Senere blev CorroWatch-sensorerne installeret med samme formål for øje i forskellige andre bygningsværker. Et af de sidste er Xiangan-tunnelen i Kina, som det allerede er beskrevet i en tidligere udgave af "Concrete News"; nr. 9 fra april 2009. Foto i figur 3 viser en CorroWatch-sensor monteret i armeringen i Xiangan-tunnelen.

Eksemplet i figur 4 viser typiske resultater af målinger udført ved hjælp af CorroWatch-sensorer. Disse målinger er foretaget på laboratorieprøver, der har været eksponeret for et korrosivt miljø, og er en del af et ph.d.-studie udført på Danmarks Tekniske Universitet.

I dette eksempel er det meget klart, hvornår den målte strøm ændredes hurtigt, hvilket indikerer tidspunktet for korrosionsinitiering. Under målinger i marken er det ikke altid så let at se en så

fortsættes på side 3

## Slab II - Macro-cell current measurements



Figur 4: Makrocelle strømæthed,  $i_{macro}$ , målt med CorroWatch-sensorer (CW1 og CW2) på en laboratorieprøve. Anoder af CW1 og CW2 er placeret i belægningen i følgende dybder: 18 mm fra betonoverfladen for anode 1 og 2 og 14 mm for anode 3 og 4.

klar tendens, og derfor suppleres aflæsningerne af korrosionsstrøm med målinger af korrosionspotentiale og betonmodstand. Ved at kombinere og analysere disse oplysninger er det muligt at forudsige tidspunktet for korrosionsinitiering med en rimelig stor sandsynlighed.

### Yderligere information

Oskar Klinghoffer  
43 26 72 55 • concrete@force.dk

Brían Kofeod  
43 26 73 43 • concrete@force.dk

## Monitering af korrosion i propageringsfasen

Hvordan kan korrosionsmonitering anvendes til at forlænge betonkonstruktioners levetid?

Normalt renoveres eller udskiftes betonkonstruktioner, før nedbrydningsprocessen er meget fremskreden. Men for at forlænge levetiden er det sædvanligvis nødvendigt at vente, indtil det senere stadium af nedbrydningsprocessen - kaldet propageringsfasen. I løbet af denne fase kan konstruktionens tilstand ændres meget hurtigt, og derfor skal forholdene overvåges nøje. Overvågning af den afgørende korrosionspropageringsfase kan ofte med fordel foretages med korrosionssensorer.

Første anvendelse af specialdesignede korrosionssensorer er beskrevet gennem felterfaring fra en motorvejsbetonbro nær København, som var dømt til nedrivning. Skovdigebroen er 220 m lang og ejes af Vejdirektoratet. Den befærdede bro nord for København transporterer dagligt 65.000 biler i 4 vejbaner. Broen består af 2 parallelle, forspændte betonbroer og blev bygget i 1968. Grundet et design, der forårsagede ringe holdbarhed, og en ringe udførelse af arbejdet blev østbroen allerede renoveret i 1978-84, men renoveringen var så kostbar (mere end en tredjedel af den oprindelige pris), at det blev besluttet ikke at renovere vestbroen; i stedet blev en nøje overvågning af vestbroen igangsat. Det

blev besluttet, at broen skulle erstattes, når bæreevnen var blevet reduceret til et så uacceptabelt niveau, at broen ikke længere kunne moderniseres.

Ud fra detailmålinger af betonkonstruktionens styrke fulgt af omfattende tilstandsovervågning blev nedrivning af broen udsat i 12 år. Denne udsættelse resulterede i en omkostningsbesparelse på ca. 110 mio. DKK. Under nedrivningen af broen i 2010 blev konstruktionens reelle tilstand verificeret og yderligere evalueret ved hjælp af resultater fra sensorerne.

### Monitering med CorroEye (CE) sensorer

Til forskel fra standardsensorer, der registrerer tiden indtil korrosionsinitiering, skulle de nye sensorer fokusere på



Figur 1: Skovdigebroen

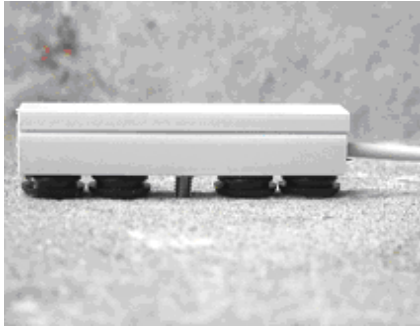
målinger i propageringsfasen for at følge korrosionsskadernes udvikling. Til dette formål udvikledes "CorroEye"-sensoren.

CorroEye-sensorer bygger på målinger af korrosionshastigheden og er i al væsentlighed designet som et tværsnit af sensorhovedet på GalvaPulse-udstyret. Målemetoden baseres på en tilpasset polarisationsmodstandsmåling. Hvis det antages, at korrosionen foregår jævnt fordelt, kan den målte korrosionsstrøm konverteres til omfanget af armeringens tværsnitsreduktion. Korrosionshastigheden og betonens modstand registreres ved at anvende GalvaPulse-udstyr på kabelenderne, som løber fra sensoren og ned til en monitoringsboks, der er placeret på et let tilgængeligt sted.

### Resultater fra målinger med CorroEye-sensorer

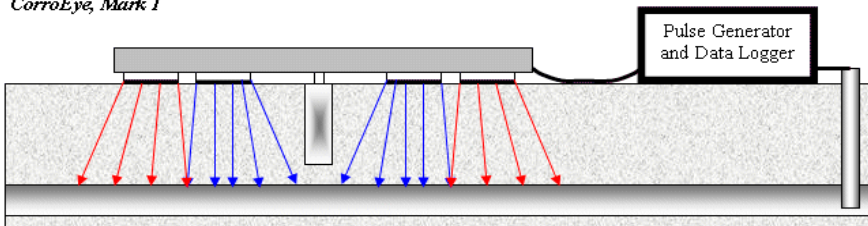
Igennem 2 år er korrosionshastighed, temperatur og elektrisk modstand i betonen blevet målt inde i broens bærebjælker.

Som forventet viser resultaterne, at korrosionshastigheden afhænger meget af temperatur og fugtighed samt varierer med årstiden. Derfor kan korrosionshastigheden kun forudsiges med nogen



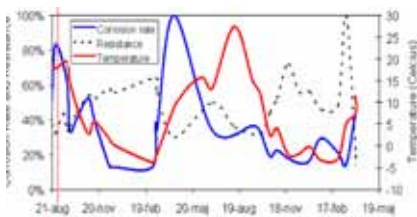
Figur 2: CorroEye-sensor

**CorroEye, Mark I**



Figur 3: Målingsprincip

usikkerhed. Men de opnåede resultater viser meget klare fordele ved at anvende fastmonterede sensorer i korrosionsmoniteringssystemer, og derfor bør korrosionsmonitering opretholdes i hele den forlængede levetid.



Figur 4: Opnåede målingsresultater med CorroEye-sensorer inde i broens bærebjælker

Projektet omkring Skovdigetbroen har vist, at en betydelig forlængelse af den normale levetid er mulig og giver store økonomiske, funktionelle og miljømæssige fordele. I sommeren 2010 blev den gamle bro revet ned og erstattet med en ny stålbro, der blev samlet af præfabrikerede elementer. Alt nedrivnings- og udskiftningsarbejde blev gennemført på 8 uger hen over sommeren, hvor trafikken ikke var så voldsom, og medførte således langt færre gener for trafikken.

**Monitering af Kalvebodbroen**

De bærende søjler på Kalvebodbroen udsættes for havvand med moderat kloridindhold.

Broen er bygget i 1987. I de sidste 5 år er broen blevet undersøgt med GalvaPulse-udstyr, der er egnet til målinger af korrosionshastigheden i betonarmeringer. Yderligere oplysninger om dette udstyr er tilgængelige på vores hjemmeside.

Især de nedre dele af de bærende søjler blev undersøgt, fordi de fleste korrosionsproblemer forventedes at opstå her.

Resultatet af denne undersøgelse var, at korrosionsangreb blev opdaget i nogle små områder; specielt hvor armeringen var tildækket.

Området befandt sig kun 0,2-0,5 m fra normalt vandstands niveau og var kun tilgængeligt fra tømmerflåde. Derfor - af frygt for risikoen for fejlfortolkning af de resultater, der var opnået med GalvaPulse - blev det besluttet at installere CorroRisk-sensorer.

CorroRisk-sensorerne installeres i forskellig men kendt dybde i dæklaget og med varierende afstand til havoverfladen. Resultaterne efter 5 års målinger viser, at næsten alle sensorerne fungerer rigtig godt. Korrosionen er startet på omkring en tredjedel af CorroRisk-sensorerne. Fra 2011 vil målingerne blive indsamlet med kortere interval end tidligere for at få mere detaljerede oplysninger om korrosionsinitieringens udvikling på de allerede korroderede sensorer og for at se,

om der opstår korrosion på de sensorer, som stadig var passive, da de blev undersøgt i 2010.

**Opsummering**

Valget af de korrekte sensorer afhænger af konstruktionen (ny eller eksisterende) og også af formålet med monitering (før og efter korrosionsinitiering). Tabellen herunder giver en kort vejledning i valget af den mest velegnede sensor - afhængigt af de ovennævnte forhold.

**Initieringsfase**

Nye konstruktioner	Eksisterende konstruktioner
CorroWatch	CorroRisk

**Propageringsfase**

Eksisterende konstruktioner	Større reparationer
CorroRisk	CorroWatch
CorroEye	CorroEye
Cut Rebar	Cut Rebar



Figur 5: Nærbillede af installation af CorroRisk-sensorer

**Yderligere information**

Oskar Klinghoffer  
43 26 72 55 • concrete@force.dk  
Brian Kofoed  
43 26 73 43 • concrete@force.dk