



KRÜGER A/S & Københavns kommune
KATODISK BESKYTTELSE

Dansk Brodag 2024
Langebrogade - Ramperum Sjælland



KRÜGER  **VEOLIA**

KATODISK BESKYTTELSE I BETON

HVEM ER VI?

Københavns kommune

Karsten Brisell

Projektleder - Bro og Tunnel

Akademiingeniør DIA-B 1987

2212 0801

p95i@kk.dk



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

HVEM ER VI?

Krüger A/S - Glostrup

Peter S. Westermann

Projektingeniør

cand.polyt - Materiale- & Procesteknologi
5213 0449

pwe@kruger.dk

Thomas H. Remil

Afdelingsleder

cand.polyt - Materiale- & Procesteknologi
4212 0869

tej@kruger.dk



KRÜGER  **VEOLIA**



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

AGENDA

Københavns kommune

- Generelt om Langebro
- Forarbejde
- Projekt reovering
- Entrepriseopdeling
- Katodisk beskyttelse Ramperum Sjælland

Krüger A/S

- Hvorfor katodisk beskyttelse?
- Hvordan virker katodisk beskyttelse?
- Typiske betonkonstruktioner som beskyttes
- Forundersøgelser korrosion
- Langebro - COWI forundersøgelser og vurd.
- Langebro Ramperum Sjælland -
Hvordan gik det?
- Levetidsforlængelse og bæredygtighed
- Hvad koster driften?

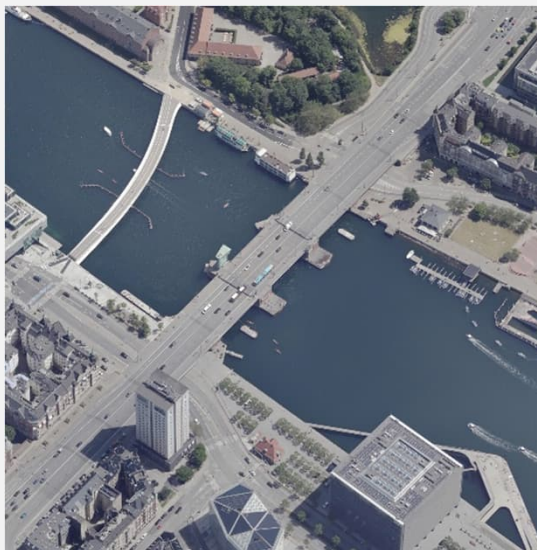


KATODISK BESKYTTELSE I BETON

GENERELT OM LANGEBRO



- › Forbinder Sjælland (HC Andersens Boulevard) og Amager (Amager Boulevard)
- › Indviet 27. juni 1954
- › Årsdøgntrafik 2022: 49.000 motorkøretøjer. 20.000 cyklister. 3.300 gående
- › Broen (ekskl. ramperum) har været fredet siden 2009
- › Ejerskab og drift overført fra By og Havn til Københavns kommune i 2012
- › Broen er senest omisoleret i 1996. Udskiftning af fuger i 2018. Nyt slidlag i 2020



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

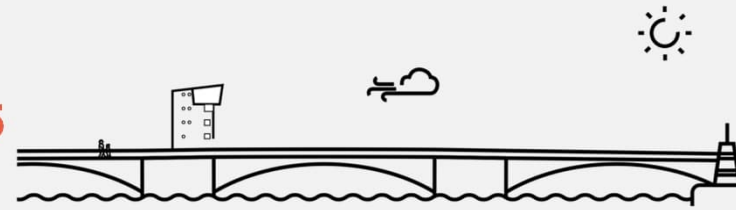
FORARBEJDE FOR PROJEKTET

- › P-kælderprojekt i Ramperum Sjælland
 - › Miljøsanering 2019
 - › Betydelige betonskader
 - › P-kælderprojekt på pause
- › Akutte reparationer i 2020 – 2021
 - › Slidlag på vej, cykelsti og fortov
 - › Afvandingssystem for broklapper
 - › Dæk over maskinrum
 - › Belysningsmaster
 - › Rækværk

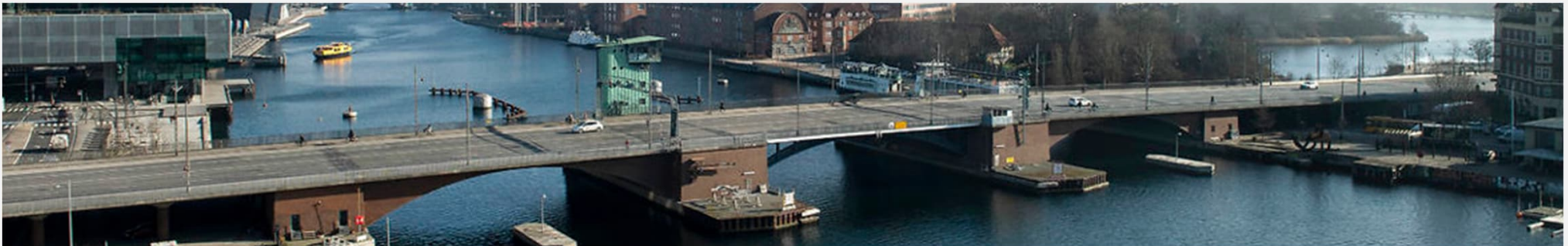


KATODISK BESKYTTELSE I BETON

PROJEKT RENOVERING AF LANGEBRO, 2021-2025



- › Bevilling på 258 mDKK for at renovere:
 - › Alle betonkonstruktioner
 - › Murværk
 - › Trapper
 - › Thorshavnsgade tunnel

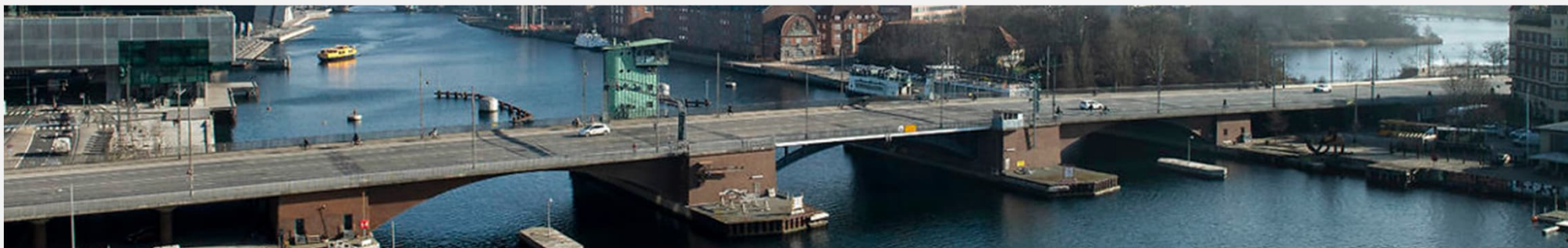


KATODISK BESKYTTELSE I BETON

ENTREPRISEOPDELING



- › Seks entrepriser udbydes løbende. Langebro-klinker er bygherrelevance.
- › De igangværende entrepriser er udført af C. G. Jensen A/S, JORTON A/S samt Christiansen & Essenbæk A/S
- › Sjællandssiden færdiggøres foråret 2024
- › Amagersiden og klappillerne færdiggøres ultimo 2025

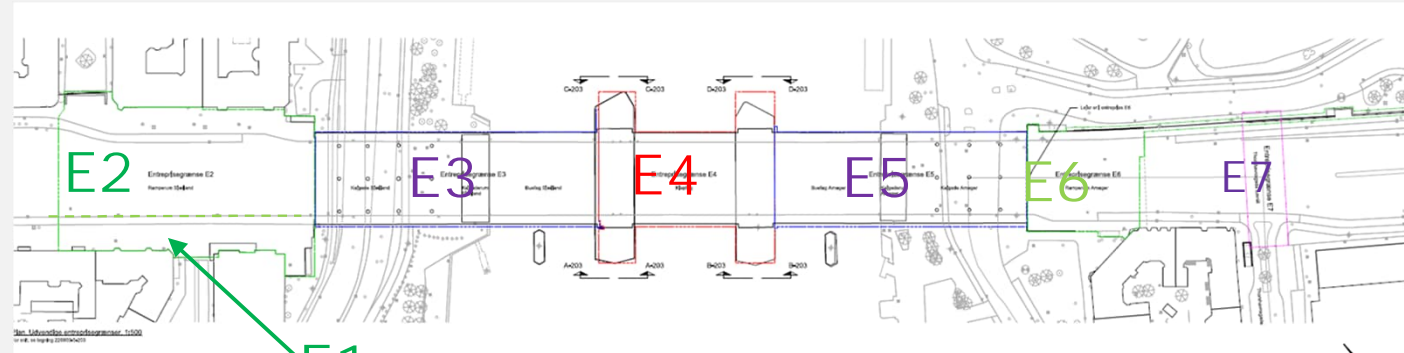


KATODISK BESKYTTELSE I BETON

PROJEKTES STATUS



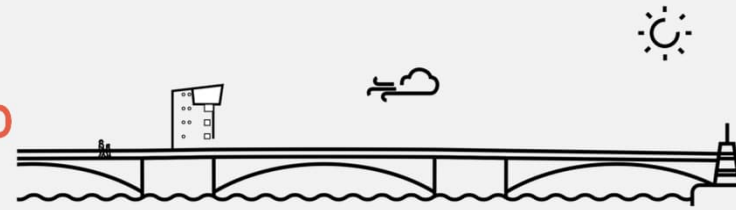
- › Opdeling efter:
 - › Geografi/konstruktionstype
 - › Adgangsforhold
 - › Indgreb i byen
- › Successiv opstart
 - › Vidensoverførelse
 - › Ressourceudjævning
 - › Samme projektorganisation
- › Tidlige entreprise E1:
 - › Fokus på væsentlig vidensopsamling



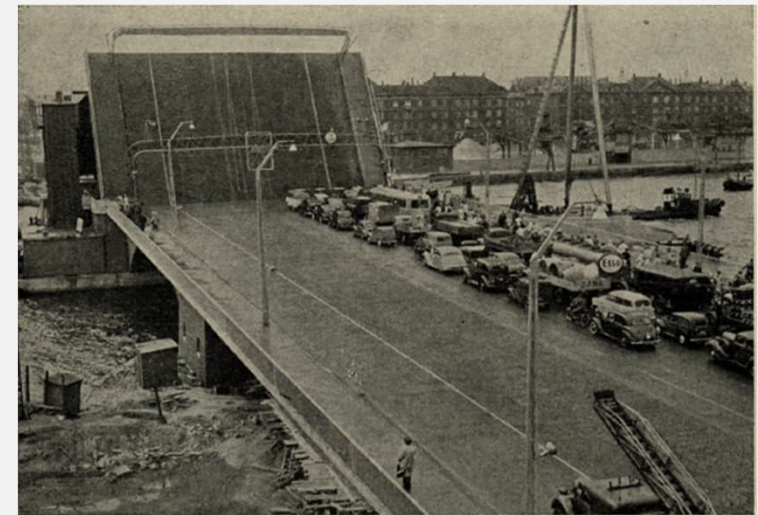
- E1: Omisolering v. Danhostel
- E2: Ramperum Sjælland (P-kælder-Sikringsrum)
- E3: Kajgade Sj. samt vestlige buefag
- E4: Klappiller
- E5: Kajgade Amager samt østlige buefag
- E6: Ramperum Amager
- E7: Stitunnel ved Thorshavnsgade

KATODISK BESKYTTELSE I BETON

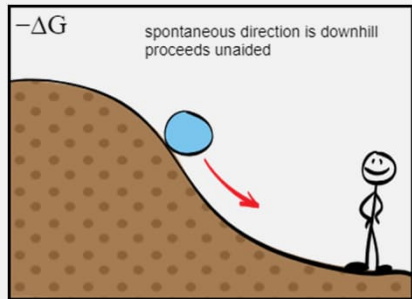
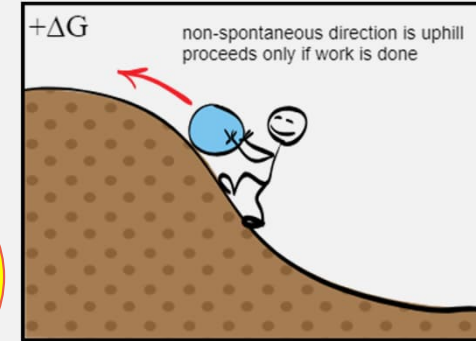
KATODISK BESKYTTELSE RAMPERUM SJÆLLAND



- › Miljøsanering i 2019 afslørende betydelige betonskader
- › Eftersyn viste stort indhold af klorider og aktiv korrosion på armering i op til en meter fra de tværgående dilatationsfuger i brodækket (vejbanen)
- › Tilstrækkelig bæreevne, men korrosionen skal stoppes
- › Traditionel betonreparation vil kræve understøtning af hele brodækket samt voldsom indgriben trafikken på Langebro
- › Med katodisk beskyttelse påvirkes trafikken ikke på Langebro
- › Traditionel betonreparation kan udføres ifbm. en efterfølgende omisolering



KATODISK BESKYTTELSE I BETON FRA JERNOXID TIL JERNOXID



Naturen er doven!
Lavest mulige energiniveau....

Gibbs fri energi < 0 = spontan reaktion

Korrosions
Nedbrydning



	$-\Delta G^\circ$
Cu_2O	34.6
PbO	45.0
NiO	51.4
FeO	54.6
ZnO	76.2
MgO	136.5
Al_2O_3	377.6



ENERGI

ENERGI



Miljø

fugt, klorider, CO_2

Stål

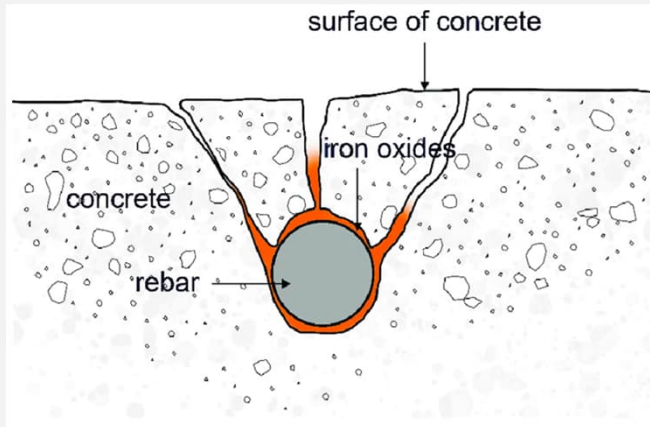
$\text{Fe} (+\text{C})$



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

KORROSION AF ARMERING I BETON

Resultatet? Trykspændinger i betonen



Accelererende proces!

- Eksponering af mere betonoverflade
- Eksponering af armering
- Yderligere nedbrydning
- Reduktion af bærevne



KATODISK BESKYTTELSE I BETON NÅR DET GÅR RIGTIG GALT

Morandi-broen i Genova i 2018

200 meter kollapsede - 49 døde

Skråstagsbro med betonstæg

Korrosion af armeringsjern indlejret i beton

Utilstrækkelig overvågning af jernets tilstand



Åbning af broen i 1967

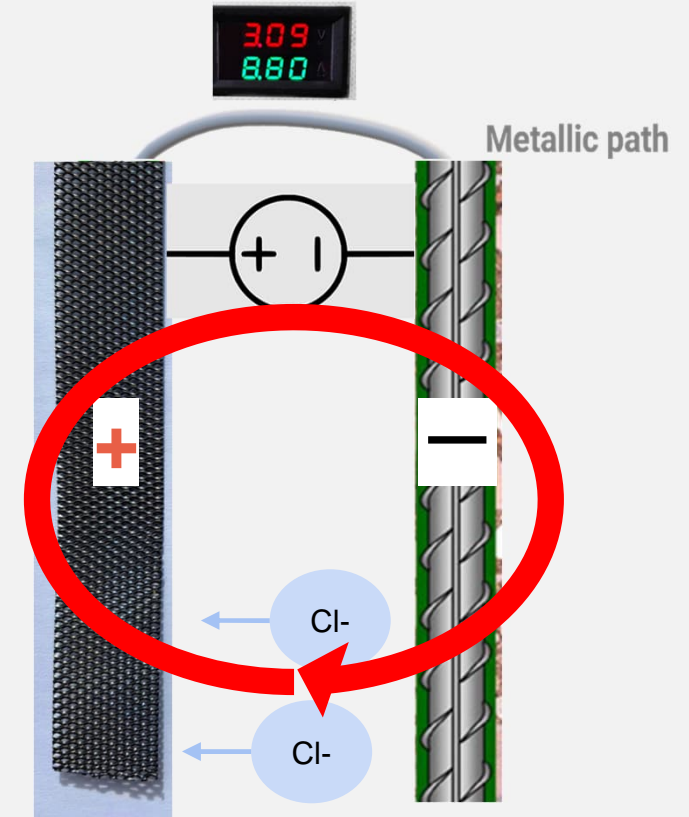
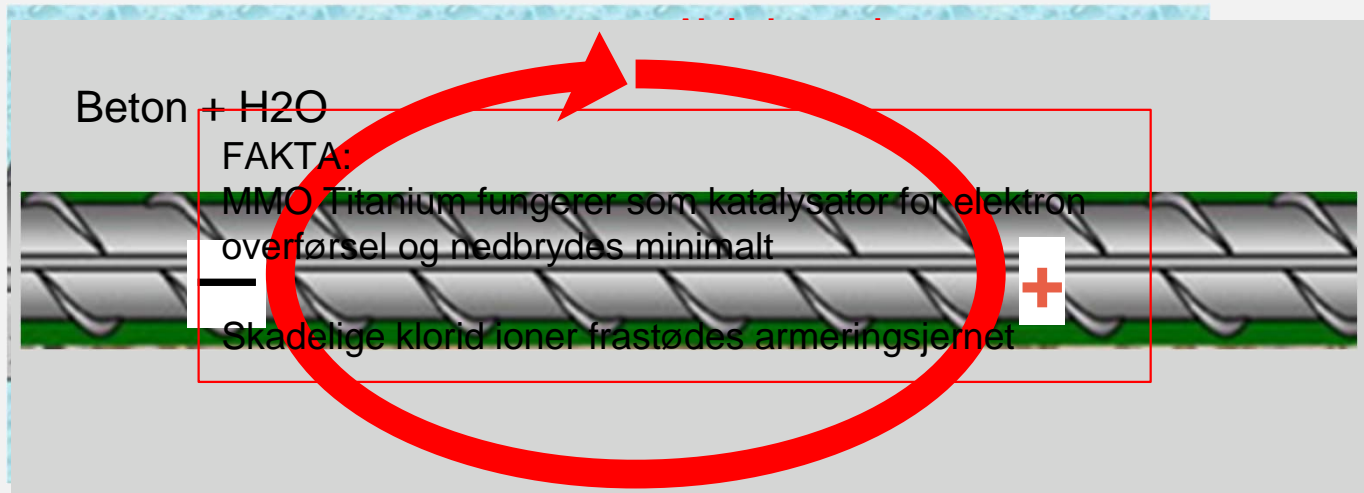
KATODISK BESKYTTELSE I BETON

KORROSIONSCELLE

Korrosion = Naturlig transport af elektrisk ladning (strøm) mellem to områder (elektroder)

Kredsløb med balance - Krav skal være opfyldt

1. Elektrisk leder (armering) - Forskel i elektrisk potentiale (!)
2. **+ Anode Anodisk reaktion** = Elektroner afgives (jern opløses)
3. **- Katode Katodisk reaktion** = Elektroner forbruges (kemisk reaktion)
4. **Medie** til ion transport (beton porevæske) - Lukker kredsløbet og balancerer



MMO belagt Titan er **anode** Armeringsjern er **katode**

Gid vi kunne styre spændingsforskel og kontrollere, hvor de anodiske reaktioner skal forløbe.....

KATODISK BESKYTTELSE I BETON

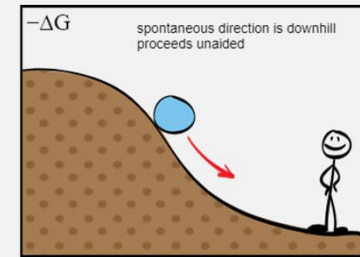
KATODISK BESKYTTELSE

Uden katodisk beskyttelse

Korrosionsceller opstår spontant på armeringsjernet
Uforudsigelig nedbrydning af armeringsjern

Drivkraft = Naturlig spændingsforskelle på overflade = Minimum energi \longrightarrow Bolden triller! RUST!

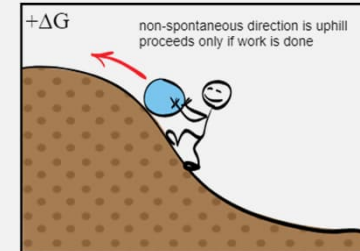
Armeringsjernet er BÅDE + Anode og - Katode - Tæring opstår i forskellige områder!



Med katodisk beskyttelse

Opdeling af korrosionscelle i to elektroder - Anode & Katode
Kontrolleret transport af elektroner fra anode til armeringsjernet

Drivkraft = Påtrykt ekstern spændingsforskel = Høj kemisk energi
skubbes! JERN! \longrightarrow Bolden

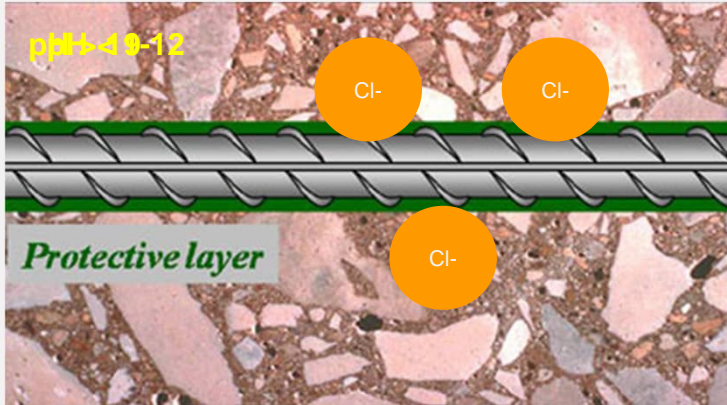


Armeringsjernet er KUN KATODE og nedbrydes ikke! **"KATODISK BESKYTTELSE!"**

KATODISK BESKYTTELSE I BETON

PASSIVLAG I FRISK BETON

Passiv = anoderet eller korrosion



FAKTA:

Klorid induceret korrosion skaber LOKALE tæring - Pitting! Risiko for pludseligt brud

CO2 induceret korrosion mere jævn tæring over større områder

Lokale forhold på overfladen ændres

CO2 diffusion gennem dæklag = pH ↓

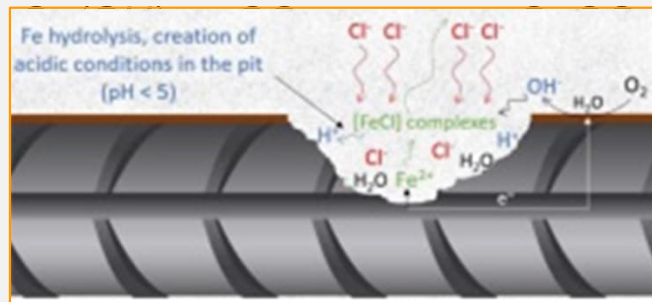
Klorider der konkurrerer om Fe-ioner... eller... danner saltsyre med H+ = pH ↓

Resultat:

Passivlag nedbrydes i områder....

Lokale forskelle = Korrosion!

Karbonatisering
Pitting



Miljøtiltag

Reduktion af cement i beton? = pH ↓

Større krav til dæklag! Så ingen gevinst?



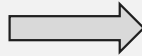
KATODISK BESKYTTELSE I BETON

OFFERANODER OG ICCP (IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION)

Galvanisk beskyttelse - Offeranoder - Spændingsrækken

Drives af spændingsforskellen mellem metallerne

Kan ikke justeres



Påtrykt strøm anlæg (ICCP)

Spænding og strøm reguleres via en strømforsyning

Kan justeres efter mængde af armeringsjern, samt miljøpåvirkninger, og behov for højere strøm - Driften!



Electrode	Electrode reaction	E^0/V	
Au	Gold	$Au^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Au$	+1.43
Ag	Silver	$Ag^+ + e^- \rightleftharpoons Ag$	+0.80
Cu	Copper	$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	+0.34
H	Hydrogen	$H^+ + e^- \rightleftharpoons H$	0
Pb	Lead	$Pb^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb$	-0.13
Sn	Tin	$Sn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Sn$	-0.14
Ni	Nickel	$Ni^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ni$	-0.25
Cd	Cadmium	$Cd^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cd$	-0.40
Fe	Iron	$Fe^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Fe$	-0.44
Zn	Zinc	$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Zn$	-0.76
Ti	Titanium	$Ti^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ti$	-1.63
Al	Aluminium	$Al^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Al$	-1.66
Mg	Magnesium	$Mg^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Mg$	-2.37
Na	Sodium	$Na^+ + e^- \rightleftharpoons Na$	-2.71
K	Potassium	$K^+ + e^- \rightleftharpoons K$	-2.93
Li	Lithium	$Li^+ + e^- \rightleftharpoons Li$	-3.05



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

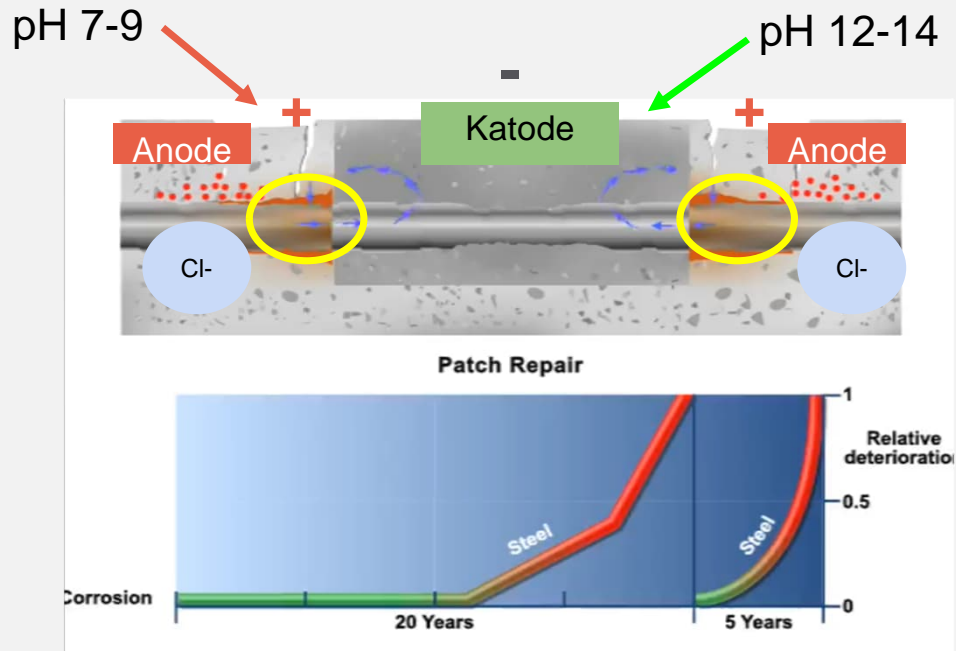
PAS PÅ MED LAPPELØSNINGER - 'PATCH REPAIRS'!

Pas på med lokaliserede betonreparationer..... Billigt nu.... Dyrt senere!

Alt karbonatiseret / kloridholdigt beton skal fjernes ! (praktisk nærmest umuligt)

Forhold i ét område forbedres / ændres - Forholdene i nærliggende beton stadig dårlig - Lokale forskelle!

Korrosionsceller skabes → accelereret korrosionshastighed i omkringliggende armering



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

TYPISKE BETONKONSTRUKTIONER SOM BESKYTTES

SVØMMEHALLER



Bassiner
Promenadedæk
Søjler
Bjælker
Knaste/plinte
Tribuner
Springtårne
Udligningstanke/skylletanke

PARKERINGSHUSE



Dillitationsfuger
Søjler
Dæk
Bjælker



BROER



Dillitationsfuger
Søjler
Kassedragere
Sokler
Brodæk

ANDRE KONSTRUKTIONER

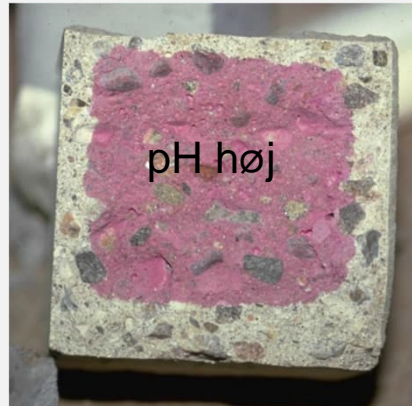
Altaner - Dæk (armering/udliggerjern)
Spildevandstanke
Fredede betonbygninger/-konstruktioner
mfl.

KATODISK BESKYTTELSE I BETON

BETONUNDERSØGELSER KORROSION

Visuel inspektion
EKP-målinger
Kloridprøver
Karbonatiseringsprøver
Destruktiv ophugning

Karbonatisering



Ophugning



EKP målinger - Ekstern elektrode



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

COWI - FORUNDERSØGELSER

COWI

Dilatationsfuger utætte siden
opførelse

Opsat understøtning pga. usikkerhed
omkring bærevnen.

EKP-målinger
Korrosionshastigheds-målinger
Ophugning til armering:
Udtagning af borekerner

**Nedbrydning var inden for
acceptable grænser
Levetidsforlængelse med påtrykt
strøm**



Trapper

Eftersyn af bærende vægge under
trapper viste korrosion på armering
men ingen risiko for bæreevne – endnu.

Svært at udskifte de bærende
vægge – **så her blev valgt at anvende
fusions-anoder** – undgik at skifte hele
trapper.



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

DETAILPROJEKTERING



Dilatationsfuger

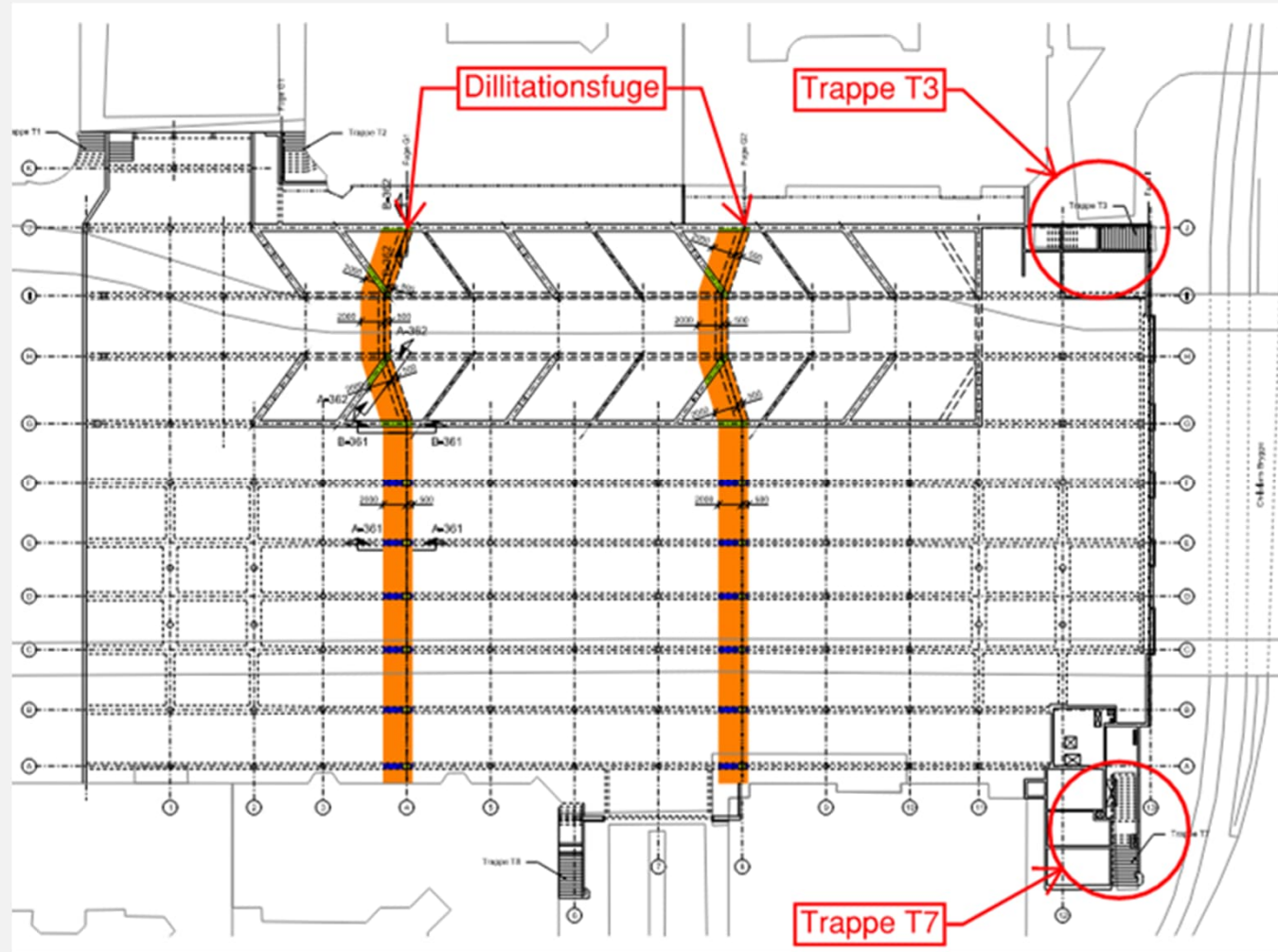
Dæk, søjler, bjælker og vægge
Anodenet
Indborede anoder

Trapper T3 og T7

Vægge
Fusionsanoder

Påtrykt strøm anlæg (ICCP)

Materiale: MMO belagt titanium
MMO = Mixed metal oxide (iridium- eller ruthenium- eller tantalum- eller titaniumoxid)



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

FORUNDERSØGELSER

Dilatationsfuger

Dæk, søjler, bjælker og vægge

Armeringskorrosion

Tværsnitsreduktion armering

Betonskader

Reduktion af bæreevne

Forundersøgelser

Rustpletter, revner,
metal i overflade,
afskalninger

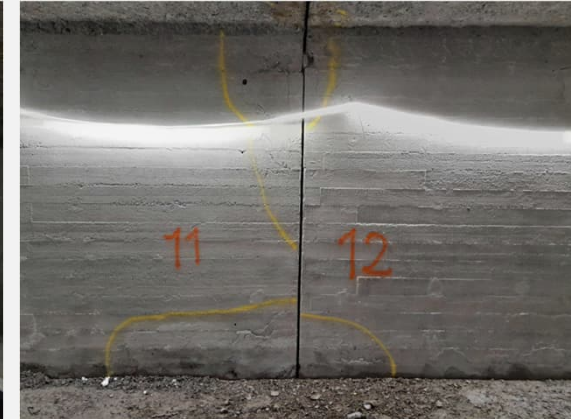
(rød
farve)

Delamineringer

(gul
farve)

Kontrol af dæklag

(grøn
farve)



Skader udbedret af CG Jensen forud
for installation af katodisk beskyttelse

KATODISK BESKYTTELSE I BETON

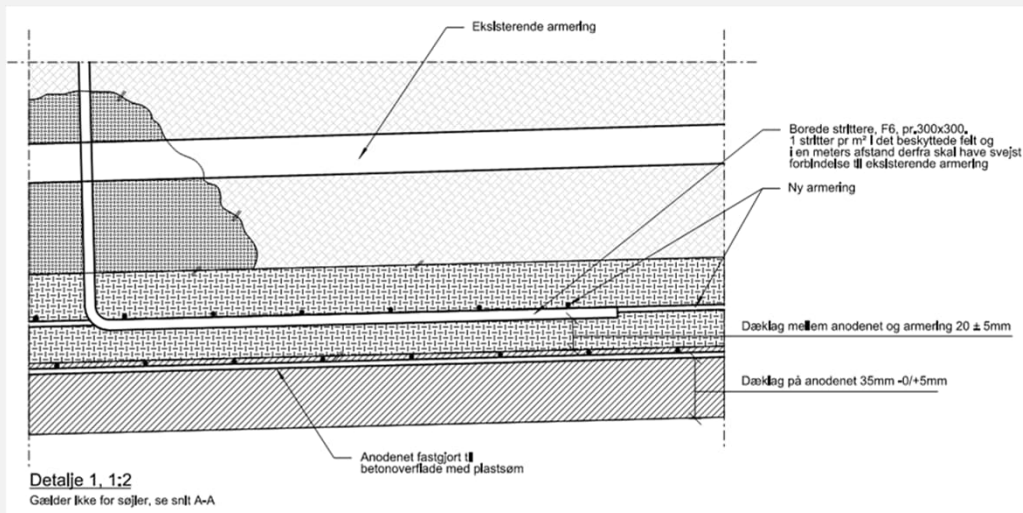
ANODENET OG INDBOREDE ANODER - DÆK

Dilatationsfuger

Dæk

Anodenet

1. Støbning - ny armering til forstærkning (flydestøbt)
2. Støbning - katodisk beskyttelse (sprøjtetstøbt)



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

ANODENET DÆK - ÆNDRING AF DESIGN

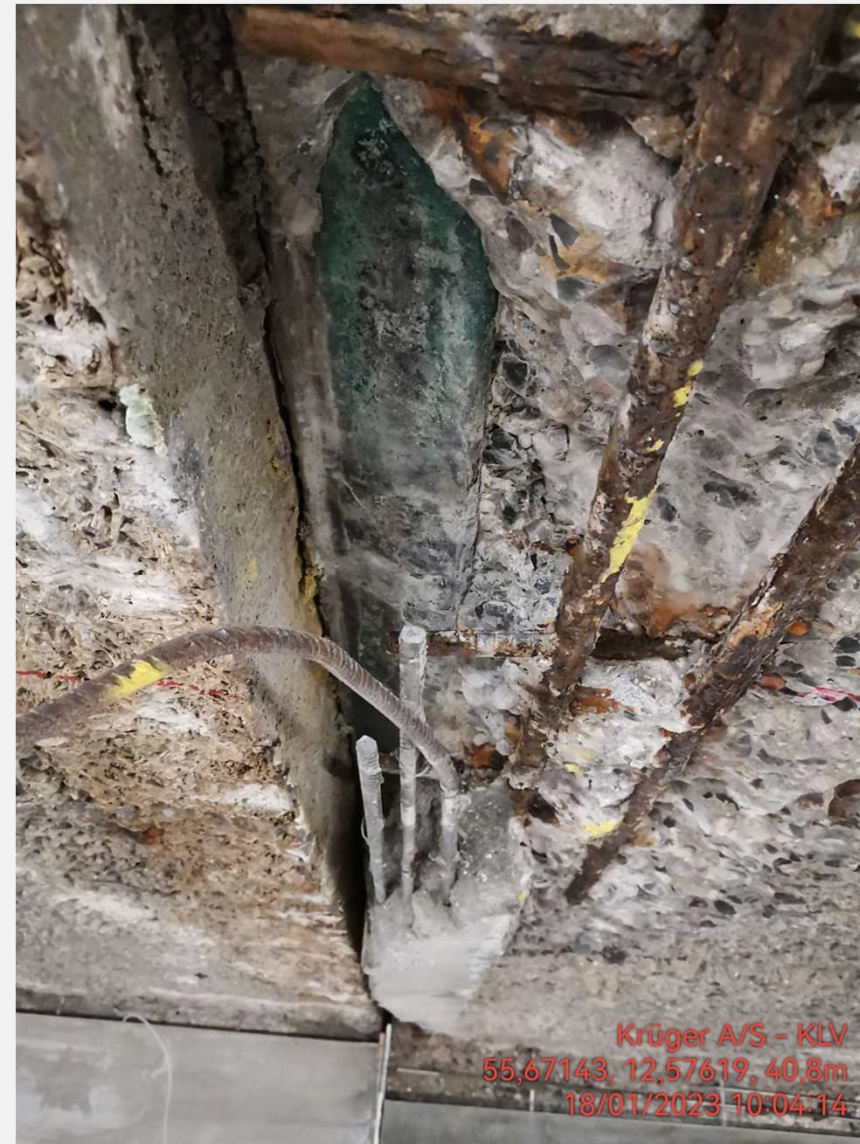
Dilatationsfuger

Dæk

Anodenet

Kobberplade fundet → ændring af design prøvefelt (og resten af anlægget efterfølgende)

Strømspredning og zone indeling



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

ANODENET OG INDBOREDE ANODER - SØJLER

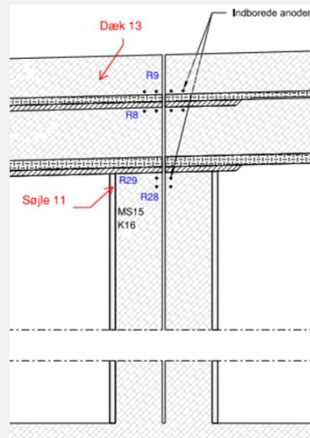
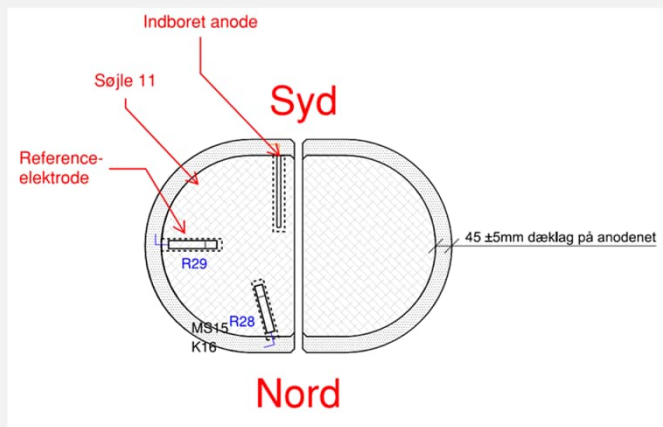
Dilatationsfuger

Søjler

Anodenet + Indborede anoder

Indborede anoder til det dybtliggende jern

Flydestøbning uden på anodenet



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

ANODENET OG INDBOREDE ANODER - DÆK

Dilatationsfuger

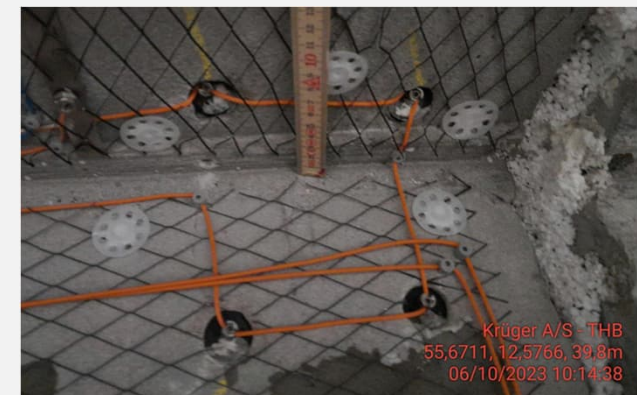
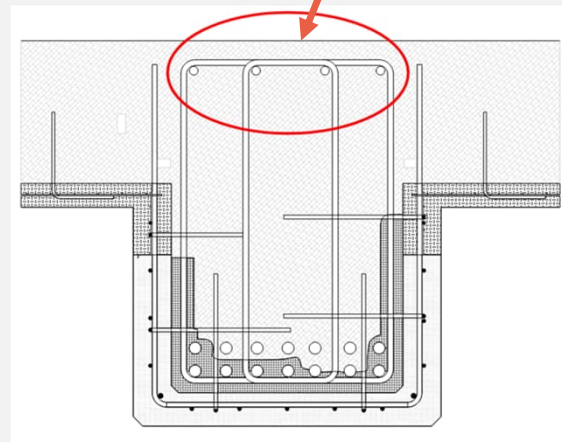
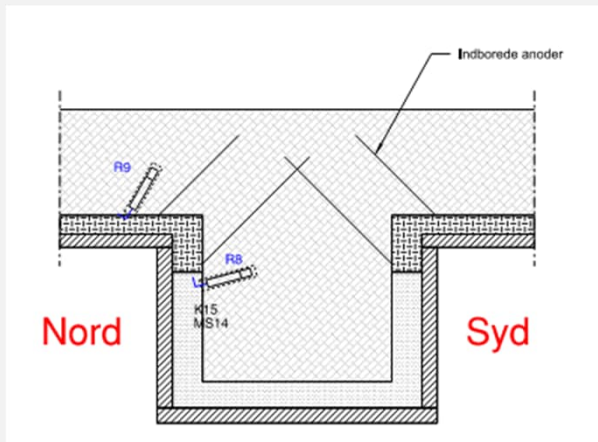
Bjælker

Anodenet + Indborede anoder

Indborede anoder til øverste del af bjælke/dæk

Huller til indborede anoder var en udfordring!
Alle huller udstøbes igen

Område der
ønskes beskyttet af
indborede anoder



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

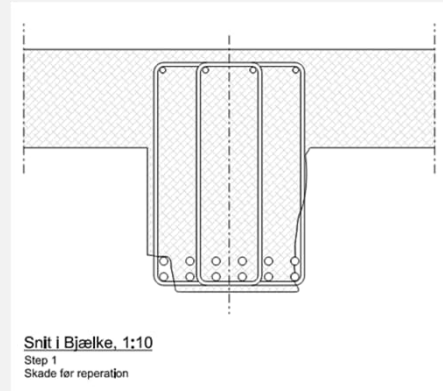
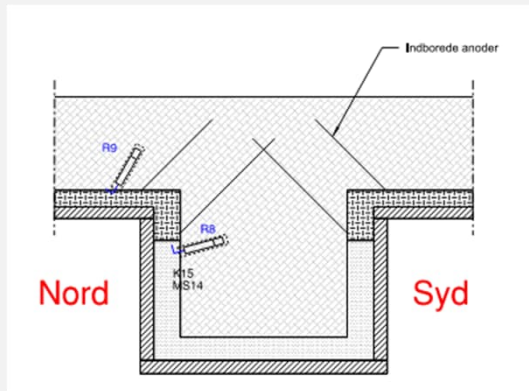
ANODENET OG INDBOREDE ANODER - BJÆLKER

Dilatationsfuger

Bjælker

Anodenet + Indborede anoder

1. Støbning - ny armering til forstærkning (flydestøbt)
2. Støbning - katodisk beskyttelse (sprøjttestøbt)



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

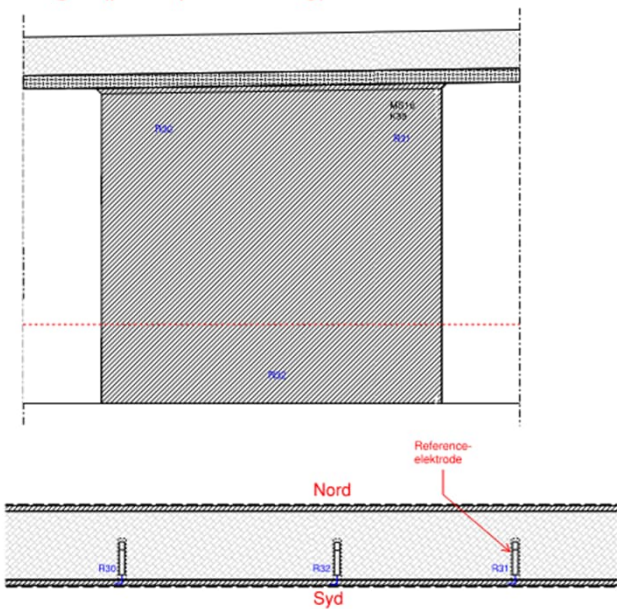
ANODENET - VÆGGE

Dilatationsfuger

Vægge

Anodenet

Væg 1 (prøvepolarisering)



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

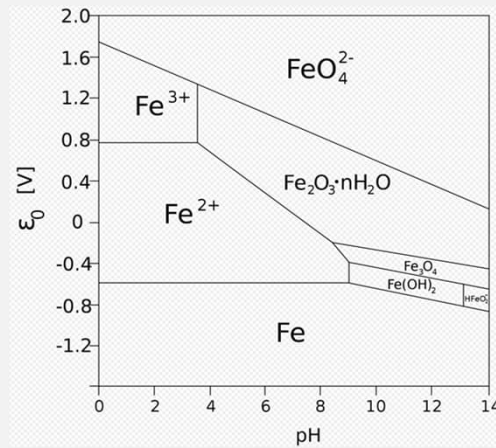
OVERVÅGNING OG KONTROL

MnO₂ referenceelektroder i beton til overvågning og kontrol af beskyttelsen

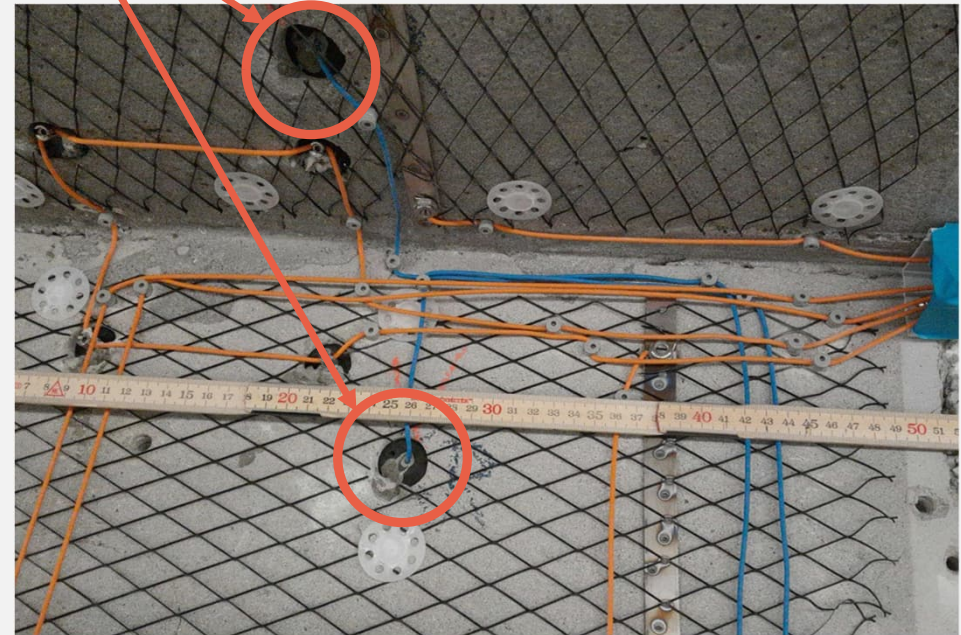
Elektrokemisk potentiale (EKP)

Boret i betonen el. monteret direkte på arm. jern

DS/EN ISO 12 696:2022
NACE SP 0408 & SP 0290



MnO₂ Referenceelektroder installeret



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

FUSIONSANODER - TRAPPER

Beskyttelse udført fra indvendige side

Trapper - T3 og T7

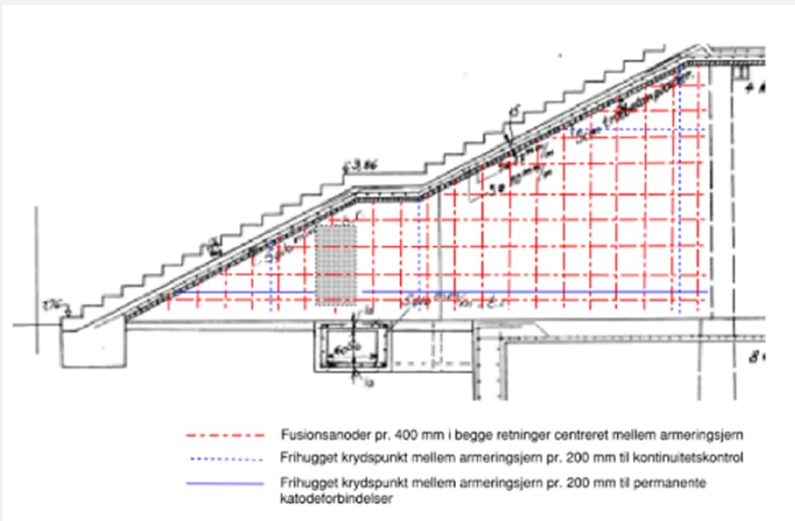
Vægge

Fusionsanoder T2 standard 46x105 mm

Kombination af batteri og zink

Formål:

Opnå re-passivering af stålet → opretholde passiveringen



Fusionsanode



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

ENSRETTERSYSTEM / STYREENHED

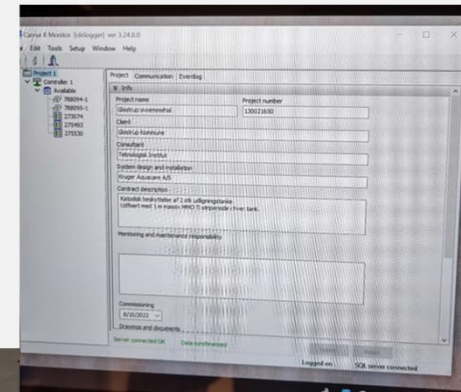
Ensrettersystem



Overvågning og kontrol
m. fjernopkobling

IoT (*internet of things*)
Cloudløsning ikke ønsket af Kbh. kommune

Ensrettersystem ikke
sat op endnu
(foto fra andet anlæg)



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

LEVETIDSFORLÆNGELSE

Hvor længe holder det?

Anoder MMO titanium ~50-100 år (ved korrekt drift)
Fusionsanode T2 ~15-30 år (iht. design)

Referenceelektroder ~20-30 år (kan
erstatte)

Elektronik ~20 år (kan udskiftes)

Reducer CO2 aftryk ved miljøtunge
betonreparationer



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

HVAD KOSTER DRIFTEN?

Drift- og Servicepriser

Dyr EL-regning?

NEJ!



Langebros anlæg:

maks. 19A ved 2-6V
worst case 114 Watt

2,7 kWh/døgn



1.000 kWh/år

~2.500 kr/år

Drifts- og servicekontrakter

Typisk 1 årig kontrol - vurderes iht. DS/EN ISO 12 696:2022

6.000 - 30.000 kr/år



Det kan hurtigt blive meget dyrere ikke at drifte og vedligeholde anlægget



KATODISK BESKYTTELSE I BETON

FÆRDIG OPGAVE - BETON OG KATODISK BESKYTTELSE

Kun maling mangler!





Spørgsmål?

