

Examensarbete, Högskolan på Åland, Utbildningsprogrammet för Maskinteknik

UNDERSÖKNING FÖR TILLÄMPNING AV KATODISKA SKYDD

Beräkningar, tillämpningar och designkriterier

Tommy Eklöw, Patrik Rosenqvist



2021:01

Datum för godkännande: 23.09.2021

Handledare: Göran Henriksson

EXAMENSARBETE

Högskolan på Åland

Utbildningsprogram:	Maskinteknik
Författare:	Tommy Eklöw, Patrik Rosenqvist
Arbetets namn:	Undersökning för tillämpning av katodiska skydd – Beräkningar, tillämpningar och designkriterier
Handledare:	Göran Henriksson
Uppdragsgivare:	Göran Henriksson, Ove Westerlund

Abstrakt

Detta slutarbete behandlar området för katodiska skydd och allt som krävs för att kunna beräkna och bestämma vilken typ av system som lämpar sig vid olika typer av användningsområden. Vi kommer beräkna katodiskt korrosionsskydd för en speciellt utvald anläggning i form av en inomhus laborationsbassäng med ståldetaljer som ligger i en elektrolyt (tappvatten). Vi kommer även att visa vilka tillvägagångssätt och data som används i beräkningarna för att följa regelverken. (ABS, NACE, DNV-GL).

Nyckelord (sökord)

Anod, Katod, Katodiskt skydd (CP), Katodiskt skydd med offeranoder (SCP), Katodiskt skydd med påtryckt ström (ICCP), Referenselektrod (RE), Dielektrisk sköld, Korrosion.

Högskolans serienummer:	ISSN:	Språk:	Sidantal:
2021:01	1458-1531	Svenska	74 sidor

Inlämningsdatum:	Presentationsdatum:	Datum för godkännande:
03.02.2021	17.12.2020	23.09.2021

DEGREE THESIS

Åland University of Applied Sciences

Study program:	Marine engineering
Author:	Tommy Eklöw, Patrik Rosenqvist
Title:	Investigation for the Application of Cathodic Protection – Calculations, applications and design criteria
Academic Supervisor:	Göran Henriksson
Technical Supervisor:	Göran Henriksson, Ove Westerlund

Abstract

This degree thesis project deals with cathodic protection and everything required to be able to calculate and determine the type of system that is suitable for different types of applications. We will calculate cathodic corrosion protection for a specially selected plant in the form of an indoor laboratory pool with steel parts located in an electrolyte (tap water). We will also show which procedures and data are used in the calculations to comply with the regulations. (ABS, NACE, DNV-GL).

Keywords

Anode, Cathode, Cathodic protection (CP), Sacrificial cathodic protection (SCP), Impressed current cathodic protection (ICCP), Reference electrode (RE), Dielectric shield, Corrosion.

Serial number:	ISSN:	Language:	Number of pages:
2021:01	1458-1531	Swedish	74 pages

Handed in:	Date of presentation:	Approved on:
03.02.2021	17.12.2020	23.09.2021

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INTRODUKTION	7
1.1	Motiv	7
1.2	Syfte.....	7
1.3	Avgränsningar.....	7
1.4	Frågeställningar och hypoteser	8
1.5	Teoretisk referensram	8
2	BAKGRUNDSINFORMATION	9
2.1	Korrosion	9
2.2	Bassäng.....	10
3	INTODUKTION TILL KATODISKA SKYDD	12
3.1	För- och nackdelar för de två olika katodiska skydden	12
3.2	Tillvägagångssätt katodiska skydd.....	13
4	KORROSIONSSKYDD MED PÅTRYCKT STRÖM (ICCP)	15
4.1	Allmänt	16
4.2	Referenselektrod (RE)	17
4.2.1	Olika typer och användningsområden.....	18
4.3	ICCP-Anoder	21
4.3.1	Platinum-anoder.....	23
4.3.2	<i>Mixed metal oxide</i> MMO-anoder	23
4.3.3	Bly-anoder.....	23
4.3.4	<i>High-silicon-cast-iron</i> -anoder (HSCI).....	24
4.3.5	Anoddesign och livslängd.....	24
4.4	Dielektrisk sköld	25
4.5	Strömkälla/likriktare och kontrollsystem	27
4.6	Anslutningssystem (kablar, kontakter, jordning mm.).....	28
4.6.1	Jordning av propelleraxel och roder	28
4.7	Montering.....	30
4.7.1	Kofferdam.....	31
5	DESIGNKRITERIER, TILLVÄGAGÅNGSSÄTT OCH FORMLER	34
5.1	Areamätningar.....	34
5.2	Potentialmätningar.....	34
5.2.1	Polaritetsalternativ 1	35
5.2.2	Polaritetsalternativ 2.....	35

5.3	Design av strömtäthet och anodströmmar	35
5.3.1	Design av strömtäthet för obehandlat stål	36
5.3.2	Färg och skyddsbelägningars påverkan på strömtätheten	36
5.3.3	Beräkning av strömbehovet	36
5.4	Val av anod	39
5.5	Anod resistans (R_a)	39
6	MÄTNINGAR	41
7	TEST SAMT MÄTNINGAR MED EGEN ANOD.....	45
7.1	Utrustning.....	45
7.2	Upplägg.....	45
7.3	Utförande	45
7.4	Resultat.....	46
8	TEORETISKA BERÄKNINGAR FÖR KATODISKT SDYDD.....	48
8.1	Beräkning av strömbehov.....	48
8.1.1	Test över strömdensitet	48
8.2	Val av anod	50
8.2.1	Dielektriska skölden.....	50
8.2.2	Anod resistans.....	52
8.2.3	Anodens livslängd.....	52
8.3	Beräkning av transformator	53
9	KATODISKT SKYDD MED OFFERANODER (SCP).....	54
9.1	Användningsområden	54
9.2	Komponenter	54
9.3	Anodens elektrokemi	54
9.4	Potential	55
9.5	Elektrokemisk laddning	55
9.6	Anodens förbrukningshastighet	55
9.7	Anodmaterial.....	55
9.7.1	Zink-anod	56
9.7.2	Aluminium-anod	56
9.7.3	Magnesium-anod	57
9.8	Design	57
9.8.1	Anodmontering.....	58
9.8.2	Anoddistribution	59

9.8.3	Anoder i fören.....	59
9.8.4	Anoder i aktern.....	60
9.8.5	Skydd av propeller och roder.....	60
9.8.6	Skydd av bogpropeller-tunnel och sjövattnintag.....	61
9.9	Val av anodens typ och vikt.....	61
9.9.1	Antal anoder samt resistans.....	62
10	BERÄKNINGAR.....	63
10.1	Beräkningar för offeranodsystem.....	63
10.1.1	Netto anodmassa.....	63
10.1.2	Anodantal och resistans.....	63
10.1.3	Anodens design.....	64
10.2	Diskussion.....	64
11	ICCP-LABORATION FÖR UTBILDNINGSSYFTE.....	65
11.1	Krav och önskemål.....	65
11.2	Designen av systemet.....	65
11.2.1	Fack 1 (Färskvatten).....	66
11.2.2	Fack 2 (Brackvatten).....	66
11.2.3	Fack 3 (Saltvatten).....	66
11.3	Beräkningar av storlek på bassäng samt ICCP-system.....	66
11.4	Hur stor yta skall skyddas?.....	66
11.5	Skyddsströmmen som krävs.....	67
11.5.1	Skyddsström fack 1 (Färskvatten).....	67
11.5.2	Skyddsström fack 2 (Brackvatten).....	67
11.5.3	Skyddsström fack 3 (Saltvatten).....	67
11.6	Bestämma anodmaterial.....	67
11.7	Minimistorlek på anod.....	68
11.8	Anodresistansen.....	68
11.9	Slutlig anodstorlek.....	68
11.10	Dielektrisk sköld.....	69
11.11	Sammanställning av resultat.....	70
11.12	Diskussion.....	70
12	SLUTSATS.....	71
	LITTERATURFÖRTECKNING.....	72

1 INTRODUKTION

1.1 Motiv

Vi blev intresserade av detta examensarbete då vi fick höra att det finns möjlighet att undersöka om ett korrosionsskydd skulle vara lämpligt för skolans laborationsbassäng och i så fall vilket system som skulle passa bäst för denna typ av konstruktion.

Eftersom korrosion i olika former är ett vanligt förekommande problem världen över tycker vi att detta examensarbete verkar som ett intressant område att studera lite djupare. Något slags system för korrosionsskydd används nästan på alla farkoster inom sjöfarten så är detta ett viktigt ämne att ha goda kunskaper i. Om man inte har en förståelse för korrosion och korrosionsskydd så kan detta leda till att man förvärrar korrosionsgraden, utan att vara medveten om varför eller vad man gjort fel.

1.2 Syfte

Det huvudsakliga syftet med detta slutarbete är att designa och utföra beräkningar för ett katodiskt system för att se vilket eller vilka system som lämpar sig för skydd av vår laborationsbassäng som vi kommer berätta mera om i ett senare skede. Dessa beräkningar kommer att användas på samma sätt som inom design av katodiska system för fartyg.

För att klara av detta så kommer vi förklara vad som krävs, så som hur systemen är uppbyggda och fungerar samt att vi kommer gå igenom vilka material och komponenter som finns och till vilka områden dessa lämpar sig. Vi kommer även att behandla övrig viktig information som vi måste känna till om katodiska korrosionsskydd så som vanliga fel och åtgärder för att kunna designa ett system som är effektivt enligt de regler och bestämmelser som finns i bland annat DNV-GL, ABS, NACE och Norsok.

1.3 Avgränsningar

Arbetet kommer att begränsas till de två vanligaste använda katodiska korrosionsskydden som används i dagens sjöfart (ICCP och SCP). Vi kommer inte ta upp skydden som kan komplettera dessa skydd, så som tillexempel ytbehandlingar, legeringar och deras vikt. Vi kommer utföra mätningarna och beräkningarna på dessa system i en gjuten bassäng med armering. Det finns skilda system och beräkningar som kan tillämpas för att beräkna och designa ett katodiskt skydd för skyddande av armering(metall) som är ingjuten i betong. Vi

kommer inte att utföra beräkningar för armeringen, utan kommer fokusera på detaljerna som finns inuti bassängen.

1.4 Frågeställningar och hypoteser

Under denna punkt kommer vi att rada upp några av de viktigaste frågeställningarna vi har kring arbetet.

- Hur fungerar systemen?
- Hur är systemen uppbyggda?
- Vilka för och nackdelar har systemen?
- Vilka komponenter och material finns?
- När är dessa system lämpliga att användas?
- Vad behövs för att kunna utföra mätningar och beräkningar?
- Hur utförs mätningar och hur behandlas mätdata?

Till största del kommer arbetet att kretsa kring dessa frågor ovan som kommer att behandlas.

1.5 Teoretisk referensram

I ämnet katodiska skydd finns sen tidigare en hel del forskning och undersökningar samt olika regler och bestämmelser som bör följas. Där de viktigaste inom detta område finns i bland annat DNV-GL, ABS, NACE och Norsok.

Vi kommer i detta slutarbete i huvudsak ta värden, formler, information och övriga data som kommer att kunna tillämpas i vårt arbete från dessa ovannämnda regelverk. Men eftersom dessa regler och bestämmelser är mestadels baserade på t.ex. fartygsskrov och borrhullar så skiljer sig viss information och data från vårt arbete.

Vi har här en lista som definierar vanligt förekommande begrepp i vårt arbete.

- DNV GL – Det Norske Veritas och Germanischer Lloyd
- ABS – American Bureau of Shipping
- NACE – National Association of Corrosion Engineering
- Norsok – Norsk standard
- Anod – Den elektrod som avger elektroner (Oxidation)
- Katod – Den elektrod som mottar elektroner (Reduktion)
- Cathodic Protection (CP) – Katodiskt skydd
- Sacrificial cathodic protection (SCP) – Katodiskt skydd med Offeranoder
- Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) – Katodiskt skydd med påtryckt ström
- Referenselektrod (RE) – Mät punkt med känd potential
- Elektrolyt – Substans som gör ämnet elektriskt ledande
- Redox – Reduktion och oxidation

2 BAKGRUNDSINFORMATION

I detta kapitel kommer vi att ta upp viktig grundläggande information som är av största vikt för att kunna ta oss igenom vårt arbete och kunna utföra våra beräkningar och designa ett katodiskt korrosionsskydd.

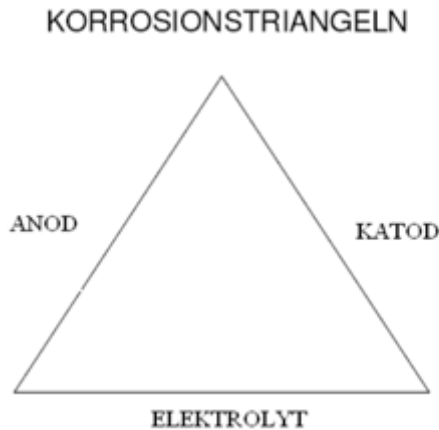
2.1 Korrosion

I detta arbete är det mycket viktigt att förstå sig på grunderna för elektrokemisk korrosion och hur den uppstår, vad som påverkar den och hur man kan förhindra den. Anledningen till att korrosion kommer att uppstå är för att t.ex. en metall i sig inte är elektrokemiskt stabil och kommer att vilja återgå till ett mera stabilt tillstånd så som oxider och slutligen tillbaka till järnmalm (*Chemistry LibreTexts, 2020*).

Den elektrokemiska korrosionen, eller korrosionsprocessen är en så kallad redox reaktion. Detta namn kommer från reduktion och oxidation mellan elektroderna.

En anod är en mindre ädel elektrod som ger ifrån sig negativt laddade elektroner, en så kallad oxidation. När dessa elektroner färdas igenom ett elektriskt ledande medium så kommer dessa elektroner att upptas av en katod, som t.ex. kan vara en ädlare elektrod och detta leder till en så kallad reduktion (*Chemistry LibreTexts, 2020*).

Detta betyder att en eller flera metaller i samma elektrolyt kommer att korrodera. Detta på grund av att elektronerna förflyttar sig mellan elektroderna. Eftersom en metall inte är helt homogen kommer även korrosion att kunna uppstå på ett enda metallstycke, detta sker då vissa områden blir att agera anod och andra katod. För att korrosion skall uppstå behövs en katod en anod och en elektrolyt, se figur 1 nedan. Tar vi bort något av dessa kommer inte korrosion att ske. Eftersom detta oftast inte är uppnåbart finns olika typer av korrosionsskydd, varav de vanligaste katodiska skydden använda inom sjöfarten är offeranodsystem samt strömsatta katodsystem (*Chemistry LibreTexts, 2020*).



Figur 1. De tre beståndsdelarna för att korrosion skall uppstå (Axelsson & Ringborg, 2009).

2.2 Bassäng

Anläggningen som vi kommer att utföra våra experiment och beräkningar för katodiska skydd är i form av en bassäng i högskolans maskinlaboratorium som är fylld med vanligt tappvatten med en temperatur på ca 20°C och en konduktivitet (σ) på 500 μ S/cm. Vi kan beräkna om konduktiviteten (σ) till resistivitet (ρ) eftersom vi vet att dessa två är reciproker till varandra (Swain, 1996).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \rightarrow \rho = \frac{1}{0,05 \text{ S/m}}$$

Vi får då att resistiviteten är 20 Ω m

Anläggningen i fråga är en gjuten bassäng i betong med armering. Bassängen mäter 7,5m*10,0m och är 3,1m djup. Bassängen är fylld med ca 1,6m vatten vilket ger oss en vätskevolym på ca 120m³ enligt formeln nedan.

$$\text{volym vatten} = \text{långsida (m)} * \text{kortsida(m)} * \text{höjden på vattnet(m)}$$

I bassängen finns en del stålkonstruktioner, vilka är de konstruktioner som vi kommer att designa dessa skydd för. Bassängen innehåller:

- Hörnplåtar
- Propeller
- Propelleraxel
- Stag för propelleraxel
- Stag-tunnel
- Sjökista
- Rör och tratt för turbinbroms
- Div. rörstumpar mm.

För att kunna göra beräkningar på systemen behöver vi även känna till hur stor yta stål vi har i vattnet, samt om denna yta är behandlad med någon form av korrosionsskyddsfärg. Vi har beräknat den totala stålytan för de olika metalldelarna som finns i bassängen till ca 30m². Vi vet att det inte finns någon skyddande färg på dessa delar och är därför endast intresserade av den yta stål vi har i vattnet. I denna bassäng har inte tidigare funnits något system för korrosionsskydd så vi har inga riktlinjer vi kan gå efter från tidigare system och måste därför beräkna/bestämma ett system från grunden.

Vi har även tappvatten i bassängen och inte saltvatten som finns i de flesta tidigare undersökningarna, så detta kommer vi behöva beakta när vi får olika värden jämfört med saltvatten. Lista över värden för bassäng:

- Temperatur 20°C
- Konduktivitet 500µS/cm
- Resistivitet 20Ωm
- Stålets yta i vattnet 30m²

3 INTODUKTION TILL KATODISKA SKYDD

Som vi tidigare nämnt finns det två olika katodiska skydd i dagsläget som används inom sjöfarten, Dessa två system är ett vanligt traditionellt offeranodsystem (SCP) medan det andra är ett katodiskt system med påtryckt ström (ICCP). De katodiska skyddens uppgift är att ge tillräckliga och väl fördelade strömmar till konstruktionens stålytor, så att ytorna kan polariseras till potentialen inom gränserna enligt skyddskriterierna (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Med polarisation menas det område som påverkas av anodens elektriska fält. Detta elektriska fält skall hållas inom vissa värden för att uppnå en skyddad potential (*Park, 2009*).

Olika värden för metaller och vid vilken potential dessa är skyddade tas upp i ett senare stycke.

Dessa värden varierar ju förstås beroende på vilken referenselektrod man använder och dess kända potential, samt många andra faktorer som t.ex. salthalt i vattnet, temperatur och vattnets flödes hastighet (*American Bureau of Shipping, 2017*) (*Park, 2009*).

Båda dessa system förhindrar den elektrokemiska korrosionen mellan metall och den omgivande elektrolyten genom att utnyttja den elektrokemiska spänningskedjan som finns mellan olika metaller. Den elektrokemiska spänningskedjan är uppbyggd efter hur lätt en metall kan avge elektroner och det är med hjälp av det som metaller oxiderar och har olika potential gentemot varandra vilket kommer leda till att den mer ädla metallen kommer att ta upp dessa elektroner (*Chemistry LibreTexts, 2020*).

Medan offeranodsystemet utnyttjar den elektrokemiska spänningskedjan direkt så utnyttjar katodsystemet med påtryckt ström den elektrokemiska spänningskedjan indirekt genom att ”flytta” den metall som skall skyddas till en ädlare position i spänningskedjan genom att tillföra ström till anoderna som påverkar potentialen och polarisationen hos undervattenskroppen (*Chemistry LibreTexts, 2020*).

3.1 För- och nackdelar för de två olika katodiska skydden

För att få en bättre överblick av de olika katodiska skyddens för och nackdelar så har vi lagt in dem i tabellform, se tabell 1.

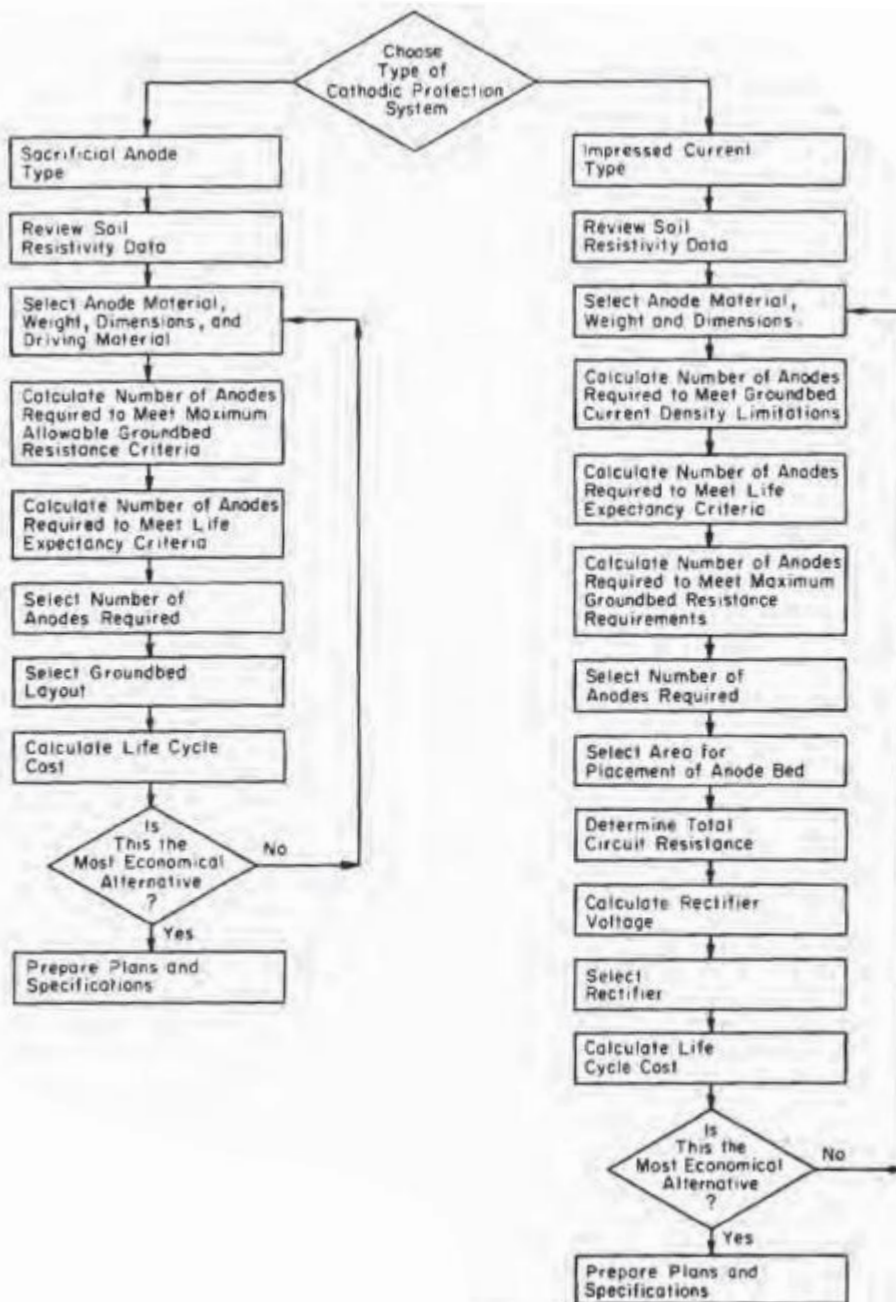
Tabell 1. För- och nackdelar med de olika systemen (American Bureau of Shipping, 2017).

<i>ICCP-system</i>	<i>Offeranod-system</i>
Fördelar	Fördelar
Variabel kontroll av ström och potential Kan automatiseras Lång livstid Mindre vikt och färre anoder krävs	Ingen extern strömkälla krävs Enkel installation Ingen systemövervakning krävs Billigare installation
Nackdelar	Nackdelar
Mer komplex installation Kräver extern strömkälla Anoderna behöver dielektriska-sköldar Risk för kryptströmmar Anoderna kan ta skada vid felinställning	Ingen variabel kontroll av ström och potential Många anoder och stor vikt Anoderna har kort/begränsad livstid Mer beroende av salinitet Dyr metod att framställa elektricitet

3.2 Tillvägagångssätt katodiska skydd

Vid design av ett nytt katodiskt skydd så väljer man först om man vill ha ICCP eller SCP.

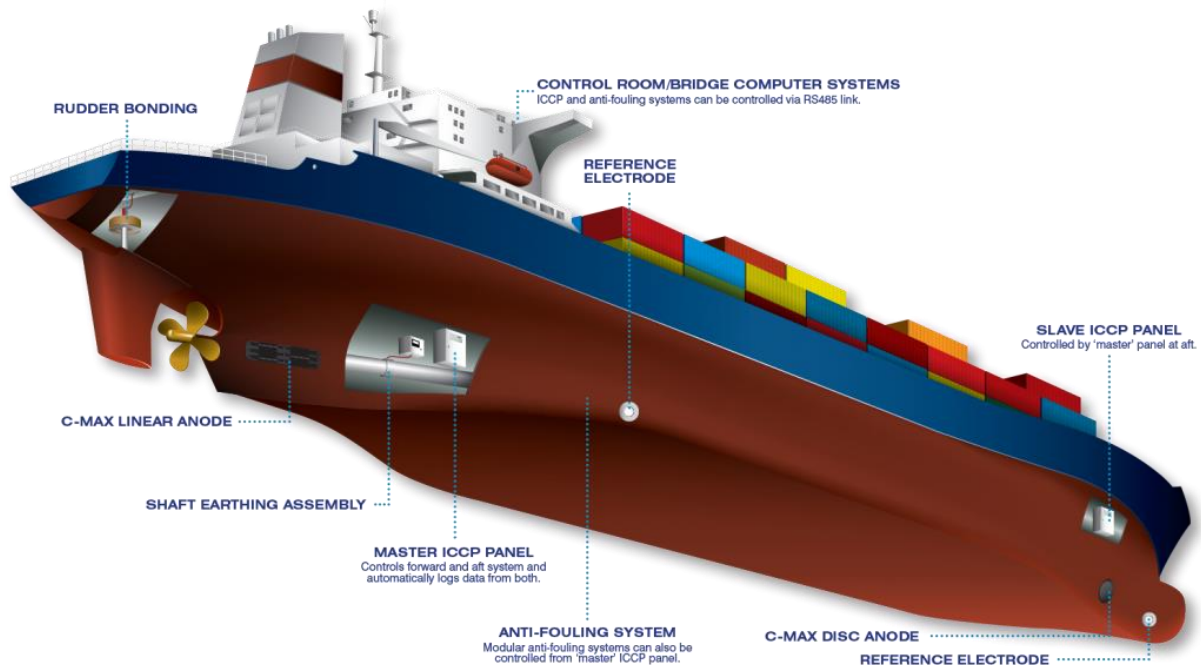
Man väljer även hurdana anoder man vill ha och sedan börjar beräkningarna. Bilden på följande sida förklarar hur processen kan se ut, se Figur 2 (Ezekiel Enterprises, 2015).



Figur 2. Bild över tillvägagångssätt för att välja ett katodiskt system (Ezekiel Enterprises, 2015).

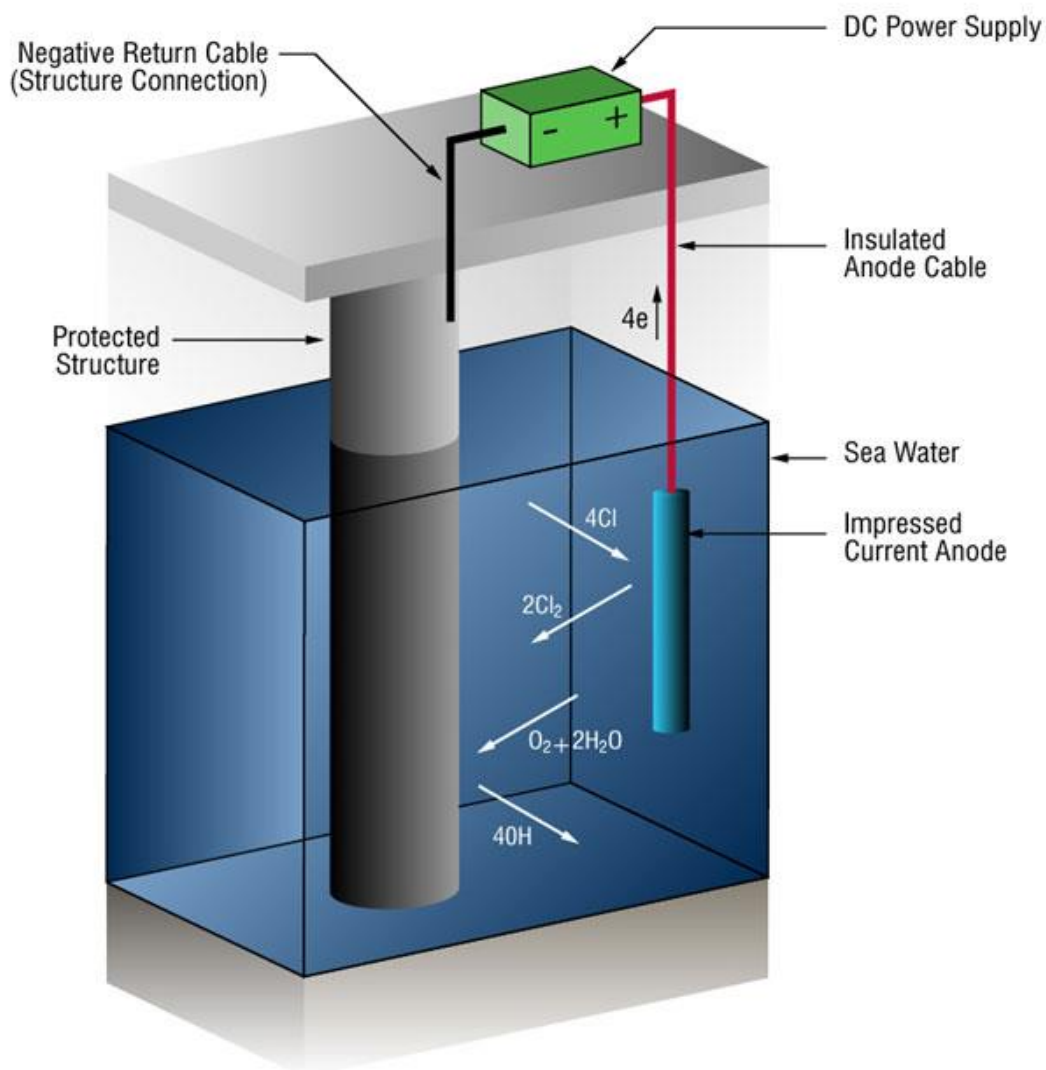
4 KORROSIONSSKYDD MED PÅTRYCKT STRÖM (ICCP)

För att lättare få en förståelse hur dessa system ser ut inom sjöfarten har vi infogat figur 3 som visar ett fartygsskrov med alla komponenter som ingår i ett ICCP-system.



Figur 3. Komponenter över ICCP-system (Galaxy, 2019).

Om vi istället tar en lite mer beskrivande bild på hur ett ICCP-system fungerar i sin enklaste form, så kan vi kolla på bilden nedan. Bilden beskriver ICCP-systemet i sin enklaste form och därför finns ingen referenselektrod för mätning av potentialen med i bilden heller. Det som figur 4 beskriver är en ICCP-anod som matas med ström från en strömkälla och konstruktionen som skall skyddas är jordad, vilket leder till att elektroner fylls på ”bakvägen” samtidigt som strömmen färdas genom elektrolyten. Detta får konstruktionen att bli skyddad genom att de elektroner som matas in i stålet får konstruktionen att stiga i den elektrokemiska spänningskedjan och bete sig som ett ädlare material.



Figur 4. Skyddsfunktionen från en ICCP-anod (Baxter & Britton, u.d.).

4.1 Allmänt

Grundfunktionen hos ett ICCP-system är att man har en extern likströmskälla vars positiva pol är kopplad till anoden och den negativa polen är kopplad till metallen man vill skydda. Strömmen kommer att vilja gå från den positiva polen till anoden och via elektrolyten till metallen som skall skyddas, medan elektronerna kommer att röra sig i motsatt riktning. Detta kommer leda till att metallen man vill skydda kommer få ett överskott av elektroner och bli negativt laddad, vilket i sin tur leder till att metallen slutar korrodera och ge ifrån sig sina ”egna” elektroner (American Bureau of Shipping, 2017) (Baxter & Britton).

ICCP-systemet innehåller följande komponenter (American Bureau of Shipping, 2017):

- Referenselektrod
- Anod

- Dielektrisk sköld
- Strömkälla/likriktare och kontrollsystem
- Anslutningssystem (kablar kontakter mm.)

Man vill behålla potentialen på en viss nivå och därmed är det strömmen från anoden som regleras. Strömmen som man skickar ut kan variera mycket beroende på hurdan elektrolyt föremålet befinner sig i. T.ex saltvatten behöver mycket ström och sötvatten lite då konduktiviteten ändras beroende hur mycket joner elektrolyten innehåller.

Tabell 2 nedan visar de olika grader av skydd jämfört mot en referenselektrod av typen Ag/AgCl-seawater (Silver/silverklorid-sjövatten). Det finns olika tabeller för vad skyddspotentialen skall vara jämfört mot de andra typer av referenselektroder som finns.

Tabell 2. Skyddspotential för olika metaller (American Bureau of Shipping, 2017).

Material	Minimum Negative Potential volts	Maximum Negative Potential volts
Iron and steel	-0.80 for aerobic environment	-1.10
	-0.90 for anaerobic environment (with active sulfate reducing bacteria)	-1.10
High-strength steels (yield strength > 690 MPa or hardness > 350 HV)	-0.80	-0.83 to -0.95 ⁽¹⁾
Austenitic stainless steel for aerobic and anaerobic conditions N _{PRE} = % Cr + 3.3% (Mo + 0.5W) + 16% N	-0.30 for N _{PRE} ≥ 40 ⁽²⁾	-1.10
	-0.60 N _{PRE} < 40 ⁽²⁾	-1.10
Duplex stainless steel for aerobic and anaerobic conditions	-0.60 ⁽²⁾	See Note 3
Martensitic stainless steel (13%Cr) for aerobic and anaerobic conditions	-0.50	See Note 5
Nickel-based alloys	-0.20	See Note 4
Copper alloys	-0.45 to -0.60 for alloys with aluminum	-1.10
	-0.45 to -0.60 for alloys without aluminum	No limit

Om man skickar ut för mycket ström så kommer den ytan man skall skydda att få för negativ potential och detta leder till att stålet kommer bli sprött/försvagat på grund av att metallens kristallstruktur ändras genom att vätgas frigörs, detta leder även till att eventuell ytbehandling också försvagas. Om metallen får för hög potential leder detta till rost och materialförlust (American Bureau of Shipping, 2017) (DNV-GL, 2017).

4.2 Referenselektrod (RE)

En referenselektrod fungerar som en mätpunkt med en känd potential som man använder för att mäta spänningspotentialen mellan elektroden och konstruktionen som skall skyddas. Den uppmätta potentialen kan sedan användas för att bestämma hur mycket ström som måste

skickas ut av ICCP-systemet för att uppnå tillfredsställande skydd av konstruktionen (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Det finns vissa saker som kommer att ha stor inverkan på det avlästa värdet som man får mellan referenselektroden och konstruktionen som skall skyddas. De två vanligaste som har störst inverkan på dessa avläsningsvärden är temperatur och salthalt (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Temperaturen har direkta och indirekta effekter på referenselektroden. Den direkta effekten är en linjär variation av potential med temperatur. Den indirekta effekten är en funktion av den ökade mängden salt som kan lösas vid högre temperaturer. Mängden salt i elektrolyten kommer påverka potentialen med en logaritmisk funktion. Dessa temperatureffekter är stora nog att producera ett signifikant fel i potentialen som fås vid mätningar och måste därför kompenseras (*Ansuini & Dimond, 1994*)(*American Bureau of Shipping, 2017*).

Vanligen i de flesta större ICCP-system måste ett flertal referenselektroder användas för att kunna avläsa att man har en jämn distribution av potentialen och därmed en bättre polarisation av konstruktionen som skall skyddas. Flera referenselektroder kommer även att underlätta för att kunna hitta och identifiera om någon av referenselektroderna inte fungerar. Eftersom flera referenselektroder används kommer systemet fortsättningsvis vara aktivt och fungerande fast en referenselektrod slutar fungera (*Baete, Purcar, Bortels, Van Den Bossche, & Dewilde, 2012*) (*Surkein, 2004*).

4.2.1 Olika typer och användningsområden

Det finns i huvudsak två olika huvudgrupper av referenselektroder. Ena är så kallad torr referenselektrod och denna har fått sitt namn på grund av att den inte innehåller någon färdig känd blandning av salter, utan den får sin potential genom kontakt med elektrolyten den sänks ned i (*Ansuini & Dimond, 1994*).

Dessa elektroder används i huvudsak inom sjöfarten och på fartygsskrov mm. Eftersom dessa inte innehåller någon färdig blandning av salter som med tiden kommer att försvinna så har dessa en mycket längre livstid men en sämre stabilitet i potential jämfört med den våta just på grund av att salterna i havsvattnet varierar (*Ansuini & Dimond, 1994*).

Den andra huvudtypen av referenselektroder är den så kallade våta referenselektroden och är en så kallad halvcell som betyder att den har en känd saltlösning inbyggd intill elementet och får på så vis en känd potential (*Ansuini & Dimond, 1994*).

Dessa elektroder används i vanliga fall endast i laboratorier och forskningssyfte för att livslängden är mycket kortare än för en torr referenselektrod. Dock så har dessa elektroder en mycket stabilare potential och visar därför ett mera stabilt värde och noggrannare mätningar kan utföras (*Ansuini & Dimond, 1994*).

Av den våta referenselektroden så finns i sin tur en rad olika utföranden på utformning och uppbyggnad av halvcellen och vilka lösningar av salter dessa innehåller. Tabell 3 visar de vanligast använda referenselektrodena och vilka potentialer dessa har samt temperaturkoefficienter och i vilka miljöer dessa används. Dessa värden är jämförda mot Standard väteelektrod (SHE).

Tabell 3. Tabell över de vanliga referenselektrodena (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Electrode	Potential Relative to SHE [at 25°C (77°F)] mV	Protection Potential Reading [at 25°C (77°F)] mV	Temperature Coefficient k_t mV/°C (mV/°F)	Typical Usage
CSE (Cu/CuSO ₄ /Saturated CuSO ₄)	+316	-860	+0.90 (+0.5)	Soil, fresh water
SSC (SJ Ag/AgCl/0.6M (3.5%) NaCl)	+256	-800	-0.33 (-0.18)	Seawater, brackish
SSC (LJ Ag/AgCl/0.5M KCl)	+256	-800	---	---
SSC (LJ Ag/AgCl/KCl saturated)	+199	-743	-0.70 (-0.39)	---
SCE (Saturated Calomel Electrode)	+0.244	-788	-0.70 (-0.39)	Water, laboratory
Steel protection potential	-544	---	---	---
ZRE (Zinc Reference Electrode)	-780	+244	---	Seawater

Vi kommer i rubriken under att nämna några av de vanligaste använda referenselektrodena och till vilka olika användningsområden dessa lämpar sig att använda. Valet av referenselektrod är av största vikt för att ICCP-systemet skall fungera korrekt.

4.2.1.1 Silver/silverklorid-elektrod (Ag/AgCl)

Silver/silverklorid-referenselektroden är en av de vanligast använda referenselektrodena inom sjöfarten. Den referenselektrod som används inom sjöfart är av typen torr referenselektrod och kan användas i framför allt förhållanden där salthalten i sjövattnet är relativt hög. Denna referenselektrod kallas Ag/AgCl seawater (*Kahlert, 2010*).

För att denna skall fungera korrekt och ge rätt mätvärden så skall denna typ av referenselektrod endast användas i havsvatten där salthalten är nära 3,5%. Om mätningar skall utföras i brackvatten eller färskvatten så skall en referenselektrod av typen halvcell användas, alltså en så kallad våt referenselektrod. Denna typ av referenselektrod används vanligen inte inom sjöfart (*Popov, 2015*).

Det finns många olika typer av Ag/AgCl-referenselektroder som har en viss känd koncentration av salter i halvcellen. Men den vanligaste använda referenselektroden med halvcell är oftast av typen Ag/AgCl (KCl). KCl är kaliumklorid som är en typ av salt. Saltlösningar av denna typ i sin tur har många olika koncentrationer. Exempelvis så har vi utfört våra mätningar med en Ag/AgCl (3mol KCl) referenselektrod. Det betyder att vi har en saltlösning av kaliumklorid med koncentrationen av 3mol/liter. De olika koncentrationerna av salt som finner sig i halvcellen tillsammans med elektroden bestämmer vilken potential referenselektroden kommer att ha (*Kahlert, 2010*) (*American Bureau of Shipping, 2017*) (*Popov, 2015*).

4.2.1.2 Koppar/kopparsulfat-elektrod (Cu/CuSO₄)

Dessa referenselektroder används främst i brackvatten och färskvatten där det är brist på klorider. Eftersom färskvatten och brackvatten innehåller väldigt små mängder klorider/salter så kommer inte vanliga torra referenselektroder att fungera korrekt. Eftersom den elektrokemiska reaktionen som bildas mellan torra elektroden och elektrolyten kräver en viss mängd salt för att fungera korrekt och ge elektroden en stabil potential (*Popov, 2015*).

Koppar/koppar-sulfat elektroder är vanligast som halvcell där elektroden är gjord i koppar medan saltlösningen består av koppar-sulfat. Dessa referenselektroder används oftast i portabel form och syftet med detta är att man skall kunna använda dem vid utvärdering för att kunna bestämma om ett ICCP-system kan monteras/tillämpas för en konstruktion (*Korrosions Gruppen, 2019*).

Koppar elektroderna finns både som torra och halvcell. Det går att använda koppar elektroder stationära men de är inte lika vanliga som zink- och silver-elektroder (*Korrosions Gruppen, 2019*) (*Tecnoselaindustry*).

4.2.1.3 Zink-elektrod (Zn)

Zink-referenselektroden är även kallad *high-purity zinc reference electrode*, detta på grund av att man behöver rent zink för att få en stabil referenselektrod. De används även bara som torra referenselektroder. Dessa referenselektroder är tillverkade främst för att användas på stålkonstruktioner i saltvatten, exempel en oljeplattform, men de finns även i mindre storlekar för att passa fritidsbåtar (Surkein, 2004) (Cescor, 2017).

4.2.1.4 Standard väteelektrod (SHE)

Denna referenselektrod används ofta som nollpunkt för potential och har således potentialen noll vid 25°C. Noggrannheten på denna elektrod är såpass hög att den enbart används i laboratorium och därför finns det enklare referenselektroder som man använder ute på fältet (Park, 2009) (Popov, 2015) (Kahlert, 2010).

4.3 ICCP-Anoder

Anoder är de komponenter som distribuerar likriktarens ström till konstruktionen så att en tillfredsställande potential uppnås. Anoderna är tillverkade i olika former och material för att anpassas och ge så bra skydd som möjligt till olika konstruktioner. Till skillnad från vanliga galvaniska anoder skall dessa ha en hög resistans mot korrosion. Några av de önskvärda egenskaper som anoderna för ICCP-systemet som skall uppfyllas är låg konsumtionshastighet av anoden, lågt strömningsmotstånd samt relativt låga produktionskostnader och förstås kunna distribuera en tillräcklig ström för skyddandet av konstruktionen (American Bureau of Shipping, 2017).

Nedan i tabell 4 visas de vanligaste materialen som förekommer i anoder inom ICCP-skydd för sjöfarten. I tabellen behandlas viktiga egenskaper för anoderna.

Tabell 4. Tabell över vanliga material för anoder (American Bureau of Shipping, 2017).

<i>Anode Materials</i>	<i>Consumption Rate g/A-Y (oz/A-Y)</i>	<i>Maximum Current Density A/m² (A/ft²)</i>	<i>Maximum Voltage V</i>
Platinized titanium	0.004- 0.012 (0.00014-0.00042) ⁽¹⁾	500-3,000 (46-279)	8
Platinized niobium	0.004- 0.012 (0.00014-0.00042) ⁽¹⁾	500-3,000 (46-279)	50
Platinized tantalum	0.004- 0.012 (0.00014-0.00042) ⁽¹⁾	500-3,000 (46-279)	100
High-silicon cast iron (HSCI)	250 – 1000 (8.82 - 35.27)	30-50 (2.8-4.6)	—
Mixed metal oxide (MMO) on titanium substrate	0.0005- 0.001 (0.000018 - 0.000035)	400-1,000 (37-93) ⁽³⁾	8 ⁽²⁾
Lead silver ⁽⁴⁾	25-100 (0.88-3.53)	250-300 (23-28)	24

Platinafilmens livslängd kan påverkas av elektrolyt resistiviteten. Konsumtions hastigheten ökar med resistivitet. Platinafilmens livslängd kan också påverkas av storleken och frekvensen som blir efter att AC strömmen gått via likriktare och olika filter för att få DC. En storlek lägre än 100 mV (RMS) och en frekvens inte lägre än 100 Hz rekommenderas (American Bureau of Shipping, 2017).

I havsvatten kan oxidfilmen på titan brytas ner om anodpotentialen överstiger 8 V med avseende mot Ag/AgCl/havsvattenelektroden. Högre spänningar kan användas med helt platinerade eller MMO-belagda anoder eller i mindre salina miljöer (American Bureau of Shipping, 2017).

I kallt havsvatten bör maximal strömdensitet på MMO-titan anoden begränsas till 100A/m² mellan 0°C och 5°C. Mellan 5°C och 10°C skall strömmen begränsas till 300A/m² (American Bureau of Shipping, 2017).

PbO₂-filmen måste bildas och bibehållas av en tillräckligt stor strömdensitet (typiskt 100 A/m² för syrefattigt vatten och 40A/m² i vatten med hög syrehalt.) Genom att använda platinastift i anoder med bly/silverlegeringen kan man minska dessa minimivärden (typiskt 50A/m² för syrefattigt vatten och 20A/m² för vatten med hög syrehalt.) (American Bureau of Shipping, 2017).

Den maximala spänning som anoderna klarar av är satt för att vid högre spänning kommer kristallgittret och strukturen i metallen att brytas ner alternativt sönderfalla vilket leder till att anodens livslängd minskar drastiskt. Konsumtions hastigheten som är given för de olika

anoderna och materialen förutsätter därför att man håller sig inom ramarna för den givna spänningen samt den givna strömdensiteten för att uppnå en så liten konsumtion som möjligt. Den givna strömdensiteten är i sin tur beroende på många faktorer, så som vilken spänning och ström som används, vilken typ av elektrolyt anoden befinner sig i och förstås vilka kompositioner av metaller som anoden är uppbyggd av. Eftersom olika elektrolyter har olika salthalter som påverkar resistiviteten alternativt konduktiviteten på elektrolyten så kommer detta ha en stor inverkan på hur mycket ström anoden klarar av att distribuera (*American Bureau of Shipping, 2017*).

4.3.1 Platinum-anoder

För att uppnå en hög resistans mot korrosion är platina ett bra materialval för dessa anoder, men eftersom detta material är mycket dyrt används i många fall anoder gjorda av titan, tantal och niob som i sin tur plätteras med platina för att hålla kostnaderna nere. Nackdelen med titan är att den bryts ner vid relativt små strömstyrkor i jämförelse med tantal eller niob (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Platinerade anoder som överskrider nedbrytningsspänningen som är given kommer att utsättas för en snabb försämring av anoden. En annan stor påverkan är om anoden kommer i kontakt med växelström som har frekvenser under 50Hz då dessa upprepade oxidations/reduktionsprocesserna resulterar i bildningen av ett brunt lager av platinaoxid (*American Bureau of Shipping, 2017*).

4.3.2 Mixed metal oxide MMO-anoder

Mixed metal oxide MMO-anoder är en mer avancerad blandning av olika sällsynta jordartsmetalloxider som används vid plättering av anoden. Även i detta fall används oftast titan, tantal och niob som bas för anoden (*American Bureau of Shipping, 2017*).

4.3.3 Bly-anoder

Bly-silverlegeringar har använts i havsvattenapplikationer. Blyet som blir utsatt för påtryckt ström utvecklar en blydioxidfilm (PbO_2 film) som leder ström och förhindrar försämring av blyet. Bly-platinalegering har också använts i havsvattenapplikationer. Syftet med platinan är att främja bildandet av blyoxidfilmen. För både bly-silver och bly-platina gäller att spänningen som tillsätts till anoden inte bör överskrida det maximala acceptabla värdet (*American Bureau of Shipping, 2017*).

4.3.4 High-silicon-cast-iron-anoder (HSCI)

HSCI-anoder har använts under en längre tid och fungerar i alla typer av vatten. Kislet i anoden bildar en kiseldioxidfilm (SiO_2 -film) som skyddar anoden från att korrodera. En fördel med kisel är att den inte reagerar med eventuella syror som kan finnas i haven (*Tecnosealindustry*).

4.3.5 Anoddesign och livslängd

Det finns i stort sett tre vanliga former på ICCP-anoder som används inom sjöfarten. Dessa tre omfattar elliptisk anod, olika typer av stavanoder samt cirkulära anoder.

Anodens livslängd är mycket beroende av vilken typ av elektrolyt man har den i, samt vilken strömstyrka och spänning man kör igenom anoden. Det katodiska skyddssystemet bör väljas och utformas antingen för fartygets konstruktionsliv eller enligt förväntade torrdockningsintervaller, som normalt anges av ägaren. Designtiden bör även ta hänsyn till hur många timmar det katodiska skyddssystemet är aktivt, inklusive fartygets byggnadsperiod (*American Bureau of Shipping, 2017*) (*Farwestcorrosion*).

4.3.5.1 Elliptisk anod

Den elliptiska anoden är anpassad för att lättare kunna distribuera strömmar och passar därför att användas där komplexa stålkonstruktioner finns. Figur 6 är ett exempel hur en elliptisk anod kan se ut. Dessa modeller är oftast lite robustare varianter som klarar av att stå emot högre slitage (*Evac*).



Figur 5. Elliptisk anod (*Cathelco, u.d.*).

4.3.5.2 Stavanod

Stavanoden ger ut en relativt stor ström i förhållande till storleken på stavarna. Dessa därför i många fall i de aktra delarna på ett fartyg, nära roder och propeller där strömningshastigheterna är stora och kräver en större mängd ström för att bli skyddade. Dessa är även relativt billiga och enkla att montera samt byta ut (*Cathelco*). Ett typiskt utseende för stavanoder visas i figur 7.



Figur 6. Stavanoder (Cathelco).

4.3.5.3 Cirkulär anod

Cirkulära anoder har lågt strömningsmotstånd tack vare sin platta form, vilket kan ses i figur 8. Denna form av anod används därför oftast i fören på fartyg där man vill ha så litet strömningsmotstånd som möjligt. Genom att montera dessa anoder slätt med skrovet så bibehålls skrovprofilen och strömningsmotståndet samt att anoden är bättre skyddad. Dessa kan monteras in i konstruktionen med hjälp av en kofferdam eller så kan man ha dem monterade direkt på konstruktionen utan att sänka in dem om strömningsmotståndet inte har någon större betydelse (American Bureau of Shipping, 2017).



Figur 7. Cirkulära anoder (Cathelco).

4.4 Dielektrisk sköld

Den ström vid vilken anoderna arbetar kommer att resultera i orimligt negativa potentialer direkt intill anoden. För högt negativ potential kan leda till att ytbeläggningar tar skada samt att väteinducerad sprickbildning av stålet försvagar konstruktionen. Det är därför av högsta vikt att den dielektriska skölden är intakt (American Bureau of Shipping, 2017).

Den dielektriska skölden monteras direkt på skrovet, under och runtom anoden. Detta för att skydda skrovet från direkta kortslutningsströmmar och för att hjälpa till med fördelningen av skyddsströmmarna. Materialet som används i dessa dielektriska sköldar skall vara av icke-elektriskt ledande material för att kunna motstå skyddsströmmarna som anoden skickar ut samt att de måste klara av eventuella korrosiva och frätande ämnen som frigörs av anoden när denna är påslagen (DNV-GL, 2015) (*Corrosionpedia, 2013*).

Eftersom man vill ha en så lång livslängd som möjligt på dessa sköldar krävs att materialet är stabilt (bibehåller sin struktur) vid varierande potentialer och inte sönderfaller. De material som vanligen används för dielektriska sköldar är av glasfiberförstärkt polyester / epoxi eller värmehärdad plast. Dielektriska sköldar är tillgängliga för stora plana områden för att undvika behovet av regelbundet underhåll av ytbeläggningen. När avståndet från anoden ökar och potentialen minskar, tillhandahåller material som högbyggnadsbeläggningar ett kostnadseffektivt sekundärt skyddsområde. I figur 10 ser man hur en dielektrisk sköld ser ut när den är färdigmonterad (*American Bureau of Shipping, 2017*) (*Corrosionpedia, 2013*).



Figur 8. Bild över hur en dielektrisk sköld och högbyggnadsbeläggning ser ut på ett skrov (Cathelco).

Normalt kan standarden BS 7361 användas för att bestämma skölldimensionerna. Storleken på den dielektriska skölden bestäms av formen på anoden, katodskyddets elektriska potentialer, maximal strömutmatning och vattnets resistivitet. Tabell 5 nedan visar minsta storleken på den dielektriska skölden beroende på vilken strömstyrka som skickas ut av anoden. Storleken på skölden mäts mellan kanten på anoden och var den sekundära dielektriska skölden skall sluta (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Tabell 5. Typiska mått för avstånd mellan anod och skyddsfärg (American Bureau of Shipping, 2017).

Anode current output, in A	< 20	20 and < 50	50 and < 150	150 and < 300
Distance, m (in.)	0.5 (19.7)	10 (39.4)	1.5 (59.1)	2.0 (78.7)

4.5 Strömkälla/likriktare och kontrollsystem

Anoderna i ett ICCP-system får sin strömförsörjning via en likriktar/transformator enhet.

Likriktar/transformator enheten kan variera strömmen och spänningen som ges ut till vardera anoden. Strömstyrkan kan kontrolleras och styras automatiskt eller manuellt genom de värden som kontrollsystemet avläser. Kontrollsystemet får sin feedback genom att mäta spänningspotentialen mellan konstruktionen och referenselektroden, och justerar därefter spänningen till en lämplig nivå. För större ICCP-system delas systemet upp i olika sektioner som i sin tur betyder att ett flertal kontrollenheter och likriktar/transformator enheter behövs (American Bureau of Shipping, 2017).

Transformator/likriktar enheten ska kunna leverera den nödvändiga skyddsströmmen till anoderna och till katodskyddsområdet. Likriktaren behöver därför dimensioneras och klara av att ge ut minst 25% mer än beräknade max strömmen för systemet. Utgångsspänningen för transformator/likriktar enheten bör ta hänsyn till spänningsfallet från resistansen hos den elektriska kretsen och anodens rekommenderade driftspänning (American Bureau of Shipping, 2017).

För att lättare få en överblick av vad som behövs till ett kontrollsystem så har vi lagt en punktlista nedan (American Bureau of Shipping, 2017).

- En voltmätare och en amperemätare för att visa likspänningens utgångsspänning och ström.
- En anordning som tillåter mätning av den elektriska strömutförelsen hos varje anod.
- Skyddsanordningar mot överspänning och kortslutning. Möjligheten att begränsa utströmmen och anodspänningen till ett maximalt värde bör tillhandahållas.
- Vid ett sådant fall att kablarna går av eller kortsluts skall skyddsströmmen stängas av automatiskt eller regleras ner till noll när systemet är i auto-läge.
- Ett automatiserat system för att klara av att bibehålla en vald potential.
- Utrustningen ska vara utformad så att den kan stängas av manuellt vid behov.
- En brytare som tillåter antingen automatisk eller manuell drift.
- Ett övervakningssystem som möjliggör mätning av potentialer med var och en av referenselektroden individuellt, samt att spänning och ström skall kunna regleras individuellt för vardera anoden.
- Regulatorn för skyddsströmmen skall hålla potentialen inom ett spann på 10mV.

- Ett grupplarm för ICCP-systemet bör finnas i kontrollrummet så att man kan upptäcka eventuella fel i systemet.

Ett kontrollsystem är till för att man skall kunna övervaka vad som händer, detta görs med en kontrollpanel och på den så behöver följande information finnas (*American Bureau of Shipping, 2017*).

- Indikatorlampa som visar att ICCP-systemet är påkopplat.
- Indikatorlampa som visar att manuell styrning av systemet är påkopplat.
- Indikatorlampa för gruppalarm
- Indikatorlampa för ”anod fel” eller ”gruppanod fel”
- Mätenheter för Anodström, Anodspänning och Potentiell (ingångsimpedans för mätkretsen: $\geq 1 \text{ M}\Omega$)
- Tillgänglighet för automatisk eller manuell inspelning av systemparametrar, inklusive utspänning, total utgångsström, individuell anodström och skrov eller referenselektrodpotential ska tillhandahållas. Kontrollenheten kan också ha förmåga att lagra inspelnings-data och självdiagnostisera systemkomponenterna.
- Mätning av spänning till anoden. Spänningen får inte pendla med mera än 100mV.

4.6 Anslutningssystem (kablar, kontakter, jordning mm.)

I strömsatta katodiska system ska alla ledningar och anslutningar vara helt isolerade från elektrolyten. Det finns även godkänd dielektriskt isolerad kabel som är avsedd att användas vid montering av dessa system. Det är mycket viktigt att ingen kabel är skadad eller i kontakt med konstruktionen som skall skyddas eftersom det då kan leda till kortslutning eller att konstruktionen blir att agera anod i kontakt med elektrolyten. Den elektriska anslutningen mellan anodkabeln och anoden bör vara vattentät, kemiskt resistent och mekaniskt robust. Kablar för anoder och mätelektroder ska läggas i rör eller kabelbanor. Anodkablarna ska ha tillräckligt låg resistans med maximal strömstyrka. Det tillåtna spänningsfallet ligger vanligtvis mellan 1 och 2 volt (*American Bureau of Shipping, 2017*).

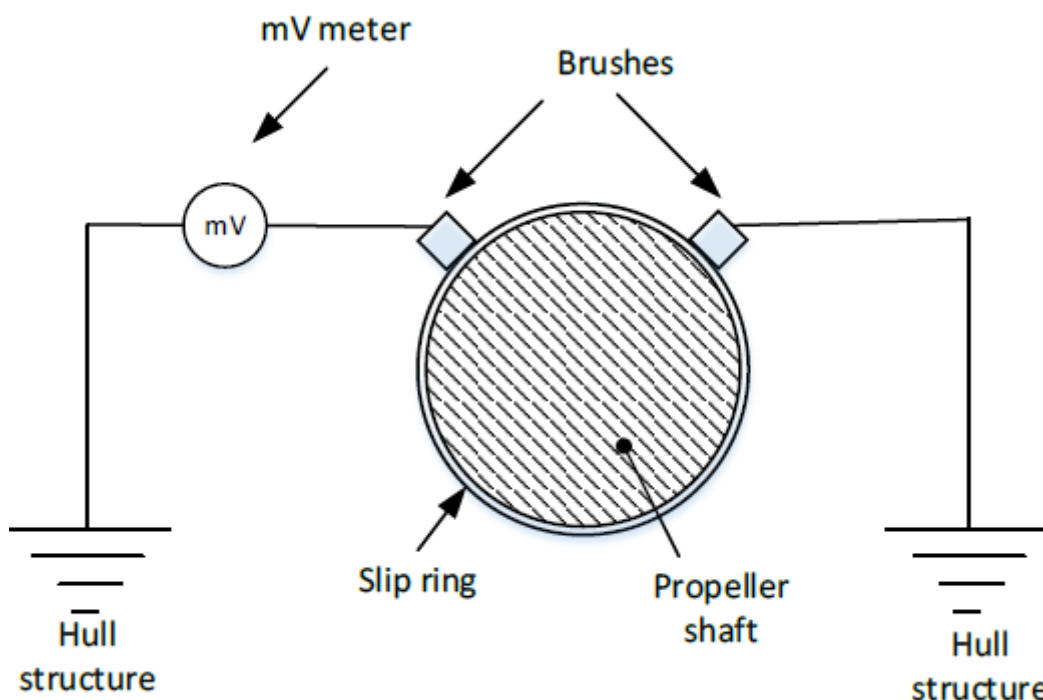
4.6.1 Jordning av propelleraxel och roder

Propelleraxeln på ett fartyg är elektriskt isolerat från skrovet på grund av att axeln hålls på plats och roterar med hjälp av lager. Dessa lager i sin tur innehåller en tun oljefilm som kommer att separera propelleraxeln från stålskrovet och axeln måste därför jordas. Det finns i sin tur många lager som har lagermaterial som är icke-metalliska vilket också gör att extra jordning behövs. Om axeln inte jordas så kommer det leda till att propelleraxeln inte är en del av ICCP-systemet och detta kommer leda till att en relativt stor potentialskillnad mellan skrov

och propelleraxel kommer uppstå, vilket får axeln att korrodera (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Vare sig man använder ett ICCP-system eller SCP kommer en ojordad axel att leda till att strömmen från systemet går in i axeln och sedan vidare till det jordade skrovet via elektrolyten vilket i sin tur kommer leda till att de material som finns i propellrar och lager kommer offra sig till skrovet och en ökad korrosionshastighet uppstår. För jordning av propelleraxel ska inte motstånd på högre än 0,001 ohm uppmätas mellan axel och skrovet för vattenfyllda lager. Detta för att förhindra att strömmarna går igenom lagren. För oljefyllda lager gäller i sin tur att det maximala motståndet inte skall överstiga 0,01 ohm. Man utför även mätning av potentialen mellan skrovet och axeln för att kunna kontrollera att potentialskillnaden hålls under 40 mV (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Figur 10 nedan illustrerar ett typiskt arrangemang för axeljordning och övervakning.

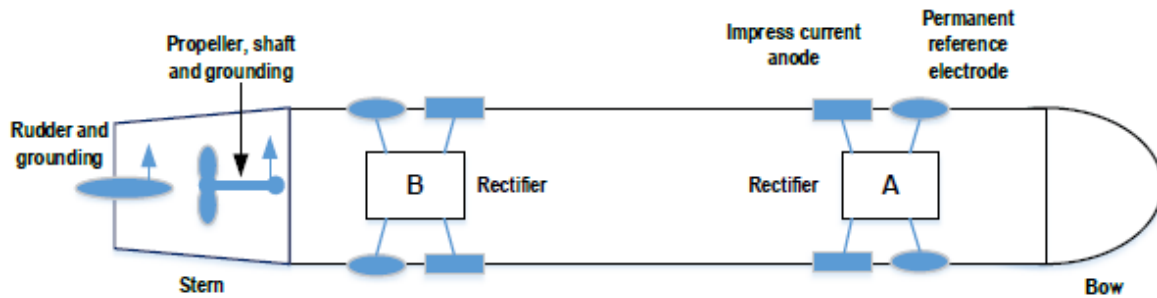


Figur 9. Bild över en korrekt jordad propelleraxel (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Övriga delar som inte är jordade mot skrovet så som hjärtstock, roder och stabilisatorer skall även de jordas mot skrovet. För de flesta fall av ojordade rörliga delar så monteras någon form av flexibel jordkabel direkt mellan komponenten och skrovet. Det man givetvis måste tänka på är att rätt längd och utförande av kabel används vid rörliga delar (*DNV-GL, 2017*).

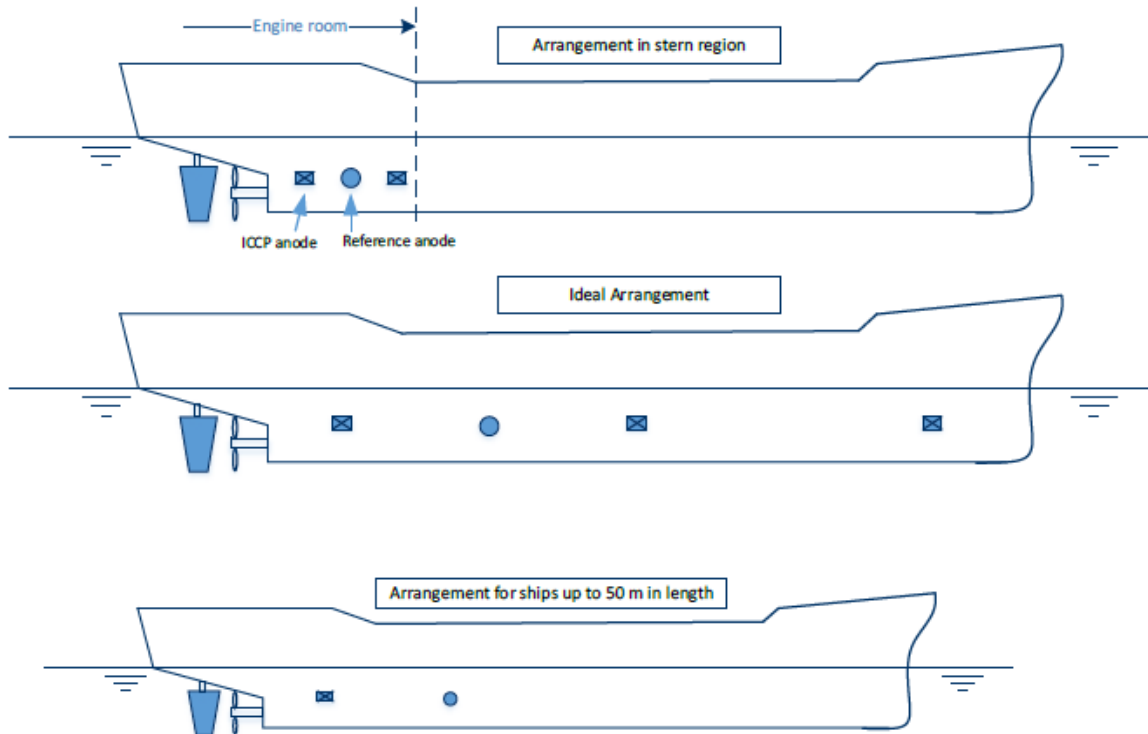
4.7 Montering

Anoderna monteras parvis på varsin sida av skrovet och bör vara av samma typ av anod vad gäller storlek form och material för att kunna uppnå jämna och pålitliga avläsningsvärden för skyddsgraden av skrovet. Figur 11 nedan visar hur ett ICCP-system på ett större fartyg med två system skall vara uppbyggt.



Figur 10. Fördelning av anoder och referensanoder (American Bureau of Shipping, 2017).

Anoderna kan monteras på många olika sätt, men som regel gäller att de monteras minst 1,5m under vattenytan samt att de skall vara minst 4,5m från närmaste sjökista, vattenintag eller systemintag. En bra regel för monteringen av dessa anoder är att de skall monteras på höjden av cirka halva undervattenskroppen. Figur 12 nedan visar hur ett system för ett mindre fartyg med endast ett system skall se ut (American Bureau of Shipping, 2017).



Figur 11. Tre enkla system för mindre fartyg (American Bureau of Shipping, 2017).

Runt de delar av konstruktionen som utsätts för höga strömningshastigheter i elektrolyten, så behöver man placera anoderna tätare eller ha större anoder som kan skicka ut mera ström för att klara av kraven för en skyddad potential. Till skillnad från SCP så finns ingen direkt fast regel på vilka avstånd anoderna skall monteras på eftersom att strömmen och spänningen som skickas ut kan regleras till optimala förhållandet som i sin tur ger en tillräcklig polarisering.

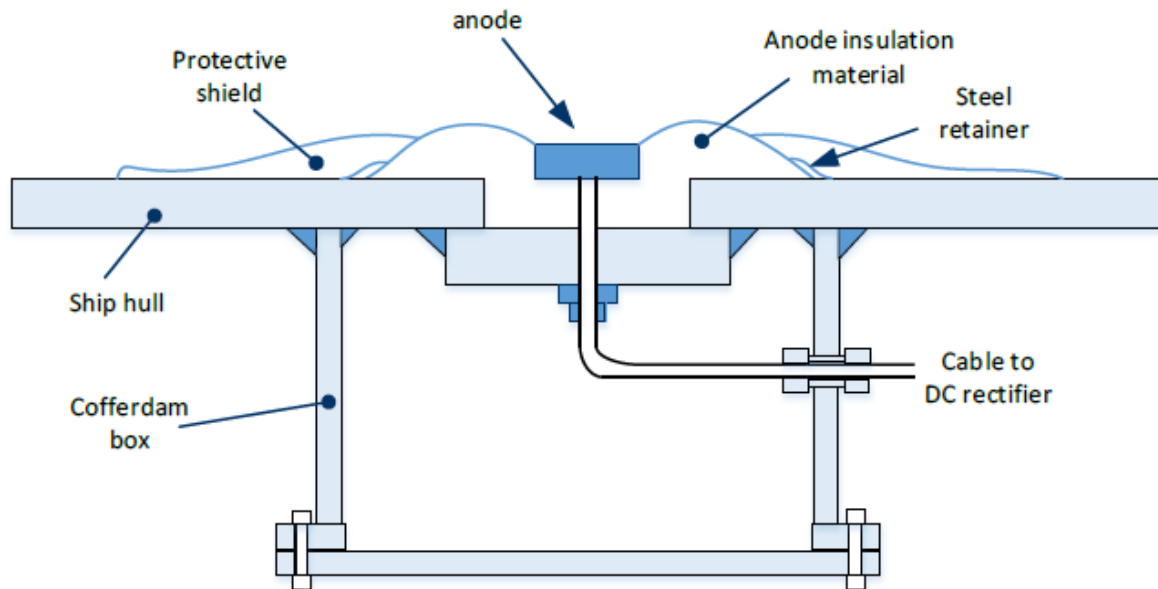
Vad gäller monteringen av anoden i skrovet så finns även här en del olika sätt som detta kan utföras på och beror mycket på vilka typer av anoder som finns tillgängliga eller vilka typer av anoder man väljer att använda. Kabelanslutningen till anoderna under vattenlinjen är vanligtvis ansluten via en kofferdam. Vi har nedan samlat en lista över vad man bör tänka på vid montering av ett ICCP-system på ett fartyg (*American Bureau of Shipping, 2017*).

- För större fartyg med en längd av 150m eller mer skall de aktra anoderna monteras på ett avstånd av 15m eller mera från propellern. För små fartyg kan detta avstånd minskas till 5m.
- Referenselektroden bör vara placerade där lägsta potentialen väntas vara, mätt från anoden. För större fartyg bör referenselektroden vara minst 15 till 20m från anoderna och proportionellt närmare på små fartyg.
- Galvaniskt isolerade komponenter skall jordas till systemet
- Bogpropeller, roder och hjärtstock, sjövattnintag mm. skyddas med galvaniska anoder
- ICCP-systemet skall vara symmetriskt monterat. Dvs. Styrbord och babord sida skall ha samma antal anoder och referenselektroder av samma modell, material och storlek för att undvika skador på skrov.
- Vid maskinrummets sektion skall åtminstone en anod finnas på vardera sida om fartyget (kräver stora strömstyrkor runt propelleraxlar, propeller mm.)
- Minst en referenselektrod bör finnas för vardera sida av fartyget.
- För fartyg som är längre än 175m bör det finnas 2 ICCP-system monterade, ett för den aktra delen av fartyget och ett för den förliga delen av fartyget.
- Om ett förligt ICCP-system finns/är monterat så skall referenselektroden monteras mellan anoden och fören.
- En skyddssköld runt anoderna (dielektrisk sköld) behövs för att skydda stålet och ge en gynnsam fördelning av strömmen.

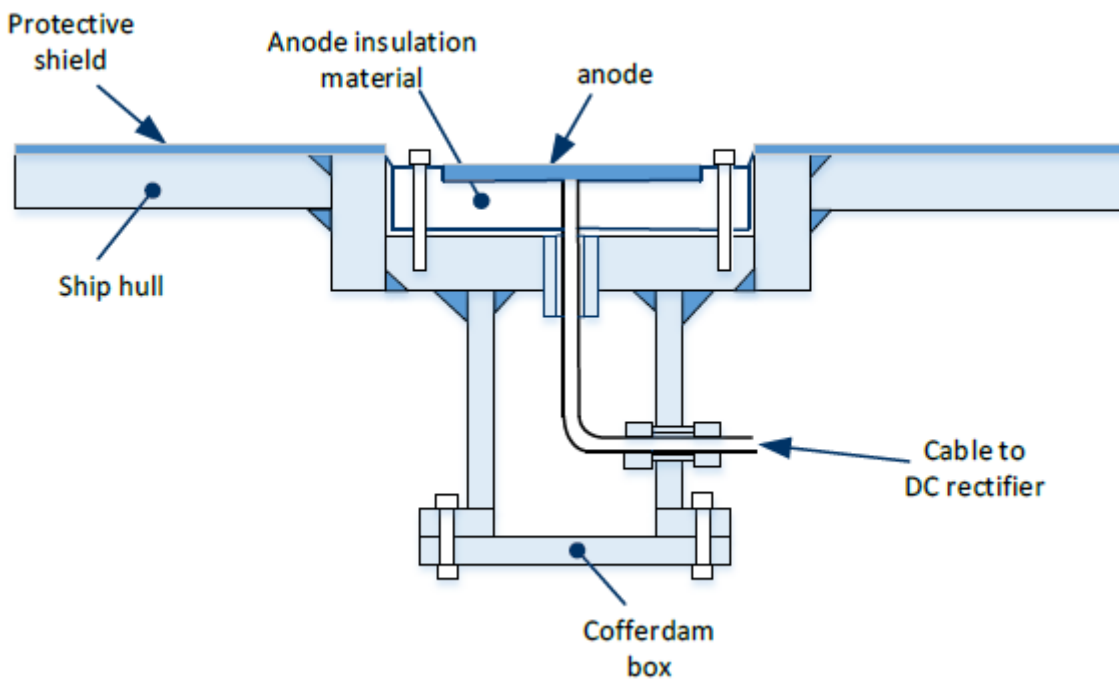
4.7.1 Kofferdam

För fartygsskrov som har genomgående ICCP-komponenter som befinner sig under vattenlinjen så som anoder och referenselektroder skall förses med kofferdammar. Dessa konstrueras och installeras så att fartygets mekaniska integritet och vattentätthet behålls.

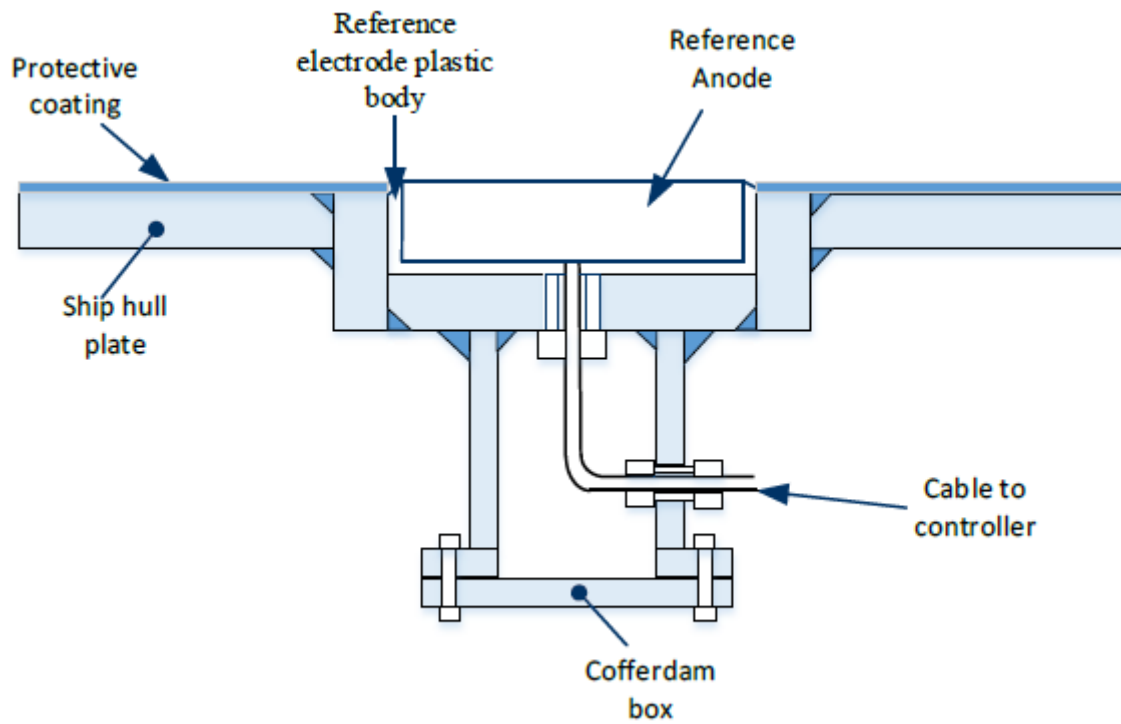
Byggmaterialen som används för kofferdammarna ska vara metallurgiskt kompatibla med skrovet och stältjocklek på dessa kofferdam-lådor bör motsvara fartygets skrovtjocklek. Nedan ser vi figur 13, figur 14 och figur 15 som är bilder på olika monteringsätt för anoder och referenselektroder i kofferdammar (*American Bureau of Shipping, 2017*).



Figur 12. Anod monterad utanpå skrovet, med kofferdam (*American Bureau of Shipping, 2017*).



Figur 13. Anod infälld i skrovet, med kofferdam (*American Bureau of Shipping, 2017*).



Figur 14. Referenselektrod infälld i skrovet, med kofferdam (American Bureau of Shipping, 2017).

5 DESIGNKRITERIER, TILLVÄGAGÅNGSSÄTT OCH FORMLER

Under denna rubrik kommer vi att gå igenom och behandla den information och de beräkningar/formler som behövs för att kunna bestämma ett katodiskt skydd i teorin.

5.1 Areamätningar

För att kunna bestämma strömmar, anoder och allt som tillhör det katodiska skyddet så måste man ha noggrann koll på hur stor yta det är man vill skydda. Den yta man vill veta är undervattenskroppens yta, alltså den mängd/yta som är nedsänkt i elektrolyten. Exempelvis för fartyg och de flesta konstruktioner finns redan de flesta ritningar och areor som behövs givna, eller så kan de beräknas med hjälp av tillexempel blockkoefficienter mm (*NACE International, 2012*).

5.2 Potentialmätningar

Skyddskriterierna och effektiviteten hos katodsystem bör bekräftas genom direkt mätning av strukturpotentialen. Visuella observationer av skyddsfärg och eventuell synlig korrosion på stålytor är indikatorer på ett eventuellt otillräckligt skydd. För att noggrant kunna mäta struktur-till-elektrolytpotentialen måste en digital voltmeter ha en hög ingångsimpedans (hög internt motstånd) jämfört med mätkretsens totala motstånd. En ingångsimpedans på 10 M Ω är ofta tillräcklig för att en digital mätare under normala förhållanden och eliminerar signifikant fel från spänningsfall (*American Bureau of Shipping, 2017*).

För att minimera spänningsfall så skall övrig utrustning som är igång stängas av för att uppnå ett så pålitligt värde som möjligt vid konstruktion till elektrolytmätningar, på grund av att läckströmmar påverkar avläsningsvärdet för potentialen. Potentialmätningar bör göras med referenselektroden och en hög impedans multimeter. Referenselektroden ska placeras i elektrolyten så nära konstruktionen som möjligt för att minimera eventuella spänningsfall (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Följande bör beaktas vid mätningar av skyddspotentialen. Noggrannheten för potentiella mätningar bör verifieras med hjälp av ett instrument som har två eller flera ingående impedanser (intern resistans, för analoga instrument) och jämför potentiella värden som mäts mellan de olika ingångarna. Om de uppmätta värdena är i stort sett samma, är noggrannheten acceptabel. Alternativt kan detta verifieras genom att använda flera multimetrar för att bekräfta att värdena är samma. Före mätningarna påbörjas skall mätinstrumentets noggrannhet

kontrolleras genom att anslutas till en spänningscell som man har en given känd potential för att se att mätinstrumentet är rätt kalibrerat (*NACE International, 2012*).

Spänningsmätningar bör göras med hjälp av lägsta möjliga inställning på instrumentet. En spänningsmätning är mer exakt när den mäts i de övre två tredjedelarna av ett område som är valt för ett visst instrument. Fel kan uppstå så som till exempel när ett instrument med 2 V-intervall används för mätning av en spänning på 15 mV. Ett sådant värde kan vara ett spänningsfall som orsakas av strömmar som flyter genom metallföremål. En mycket mer noggrann mätning skulle uppnås med hjälp av ett instrument med 20 mV intervall (*NACE International, 2012*).

5.2.1 Polaritetsalternativ 1

Struktur-till-elektrolytpotentialen mäts genom att ansluta instrumentets negativa terminal till konstruktionen och den positiva anslutningen till referenselektroden, vilken är i kontakt med elektrolyten. Genom att ansluta kablarna på detta sätt så får mätinstrumentet ett positivt värde, detta indikera på att konstruktionen är negativ jämfört med referenselektroden. Den negativa konstruktion-elektrolytpotentialen kan sedan jämföras sedan med en NACE-standard (*NACE International, 2012*).

5.2.2 Polaritetsalternativ 2

Man kan mäta konstruktion-till-elektrolytpotentialen genom att koppla den negativa kabeln till en referenselektrod och den positiva till konstruktionen och på så vis visar multimetern konstruktionens potential jämfört med referenselektroden. Denna potential går sedan att direkt jämföras med en NACE-standard (*NACE International, 2012*).

5.3 Design av strömtäthet och anodströmmar

För att bestämma strömtätheten använder man sig av tidigare erfarenheter från liknande konstruktioner i liknande miljöer eller mätningar och tester. Den totala strömmängd som skall skickas ut räknas från stålkomponenternas area. strömtätheten som krävs om någon skyddsbeläggning används så måste även den räknas med genom att man multiplicerar med en bestämd beläggningsfaktor (*DNV-GL, 2015*).

På större konstruktioner kan man använda olika ICCP-områden där man sedan kan bestämma dessa områdens skyddsströmmar oberoende av varandra. Ett vanligt sätt att dela upp skyddsområden på större fartyg är att man har ett område i aktern och ett i fören. Det aktra området kommer få betydligt större strömmar än fören på grund av propeller, roder mm.

Skyddsområdena kan sedan brytas ned i mindre beståndsdelar så som sjökistor, propellrar, roder mm. För dessa komponenter behöver det finnas information om material, skyddsbeläggning samt ytans area. För tankar gäller samma kriterier, man måste även här beakta material, ytbeläggning och area (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Sjökistor kan även ha kontakt med kylare och annan utrustning som kan vara elektriskt isolerade från skrovet och därför behöver dessa betraktas extra noga för att inte ICCP-systemet skall öka korrosionshastigheten hos komponenterna. Det kan finnas elektrokemiska anti-fouling system i sjökistorna och dessa system kan börja reagera tillsammans med ICCP-systemet så även detta behöver iaktas (*DNV-GL, 2017*) (*DNV-GL, 2017*).

5.3.1 Design av strömtäthet för obehandlat stål

Strömtätheten över konstruktionen beror på hurdana legeringar metallen är uppbyggd av, flödes hastigheten på vattnet, temperatur samt salt- och syre-halt. Om miljön eller serviceintervallen skall ändras så behöver nya utvärderingar över skyddet att göras. När själva stålets yta och skydd har beräknats behöver man beräkna de mindre skyddsområdena som beräknas var för sig, så som propellrar, axlar, roder mm (*American Bureau of Shipping, 2017*).

5.3.2 Färg och skyddsbeläggningars påverkan på strömtätheten

Så gått som alla stålkonstruktioner har en skyddsbeläggning i form av färg som skyddar mot korrosion, på så vis krävs det inte lika stora skyddsströmmar. Färgen har en liknande egenskap som dielektriska sköldar men är betydligt mindre motståndskraftig mot höga potentialskillnader. Färgen hjälper även att fördela skyddsströmmen över ytan. Med tiden kan denna beläggning försämrans av slitskador och föråldring och tappa sin skyddande förmåga var efter den skyddande strömmen måste ökas (*American Bureau of Shipping, 2017*).

5.3.3 Beräkning av strömbehovet

För att uppnå den valda potentialen för konstruktionen så behöver man ha rätt strömtäthet för varje område i konstruktionen. I detta skede behöver man även ta hänsyn till hurdan miljö konstruktionen skall användas i samt det bestämda serviceintervallet Strömmen för varje zon av ICCP-systemet kan bestämmas när strömtätheter och komponenternas area är känd. Utformningen av ICCP-system baseras på den maximala strömstorleken tillsammans med skyddsfärgens beläggningfaktor (*DNV-GL, 2015*) (*DNV-GL, 2017*).

Den maximala strömstorleken i sin tur beräknas med hjälp av de kommande tabeller för strömtätheter och formeln nedan (DNV-GL, 2017).

$$I_c = A_c * i_c * f_c$$

- I_c = Strömbehovet (A)
- A_c = Areal som skall skyddas (m^2)
- i_c = Strömtätheten (A/m^2)
- f_c = skyddsfärgens nedbrytningsfaktor

Tabell 6 nedan visar maximivärden för strömtäthet i_{ci} och i_{cf} (A/m^2) beroende på temperatur och vilket djup konstruktionen befinner sig på samt att en salinitet på 3–4% är inräknad.

Initialt är maximumströmtäthet för omålat och finalt är maximum strömtäthet för målat stål i havsvatten.

Tabell 6. Tabell över maximiströmmar beroende på miljö (DNV-GL, 2017).

Depth (m)	Tropical (> 20 °C)		Sub-tropical (12- 20 °C)		Temperate (7-11 °C)		Arctic (< 7 °C)	
	initial	final	initial	final	initial	final	initial	final
0-30	0.150	0.100	0.170	0.110	0.200	0.130	0.250	0.170
>30-100	0.120	0.080	0.140	0.090	0.170	0.110	0.200	0.130
>100-300	0.140	0.090	0.160	0.110	0.190	0.140	0.220	0.170
>300	0.180	0.130	0.200	0.150	0.220	0.170	0.220	0.170

Tabell 7 nedan visar den genomsnittliga strömtätheten i_{cm} (A/m^2) beroende på temperatur och vilket djup konstruktionen befinner sig på samt att en salinitet på 3–4% är inräknad.

Tabell 7. Tabell över genomsnittliga strömbehovet i olika miljöer (DNV-GL, 2017).

Depth (m)	Tropical (> 20 °C)	Sub-tropical (12- 20 °C)	Temperate (7-12 °C)	Arctic (< 7 °C)
0-30	0.070	0.080	0.100	0.120
>30-100	0.060	0.070	0.080	0.100
>100-300	0.070	0.080	0.090	0.110
>300	0.090	0.100	0.110	0.110

5.3.3.1 Maximala strömstorleken ($I_{c,Max}$)

Den maximala strömstorleken ($I_{c,Max}$) kommer att för olika konstruktioner ske vid olika tillfällen. Exempelvis så kommer den maximala strömstyrkan för en obehandlad stålkonstruktion krävas i början (I_{ci}), men vart eftersom mer marin tillväxt och kalkavlagringar kommer uppstå så kommer strömbehovet minska för att dessa ”föroreningar” kommer bidra med ett visst skydd. Därför kommer strömbehovet vara minst i slutet av sin

beräknade livslängd (I_{cf}). Den maximala strömstorleken ($I_{c,Max}$) för en konstruktion med skyddsfärg kommer att uppstå i slutskedet av sin livslängd (I_{cf}) då den största delen av färgen kommer att ha nöjts bort. Då blir förstås den minsta strömstorleken (I_{ci}). Den maximala strömmen som uppstår kommer användas i ett senare skede för att bestämma storleken på anoden (*DNV-GL, 2017*).

5.3.3.2 Genomsnittsströmmen (I_{cm})

Genomsnittsströmmen är den strömstyrka som konstruktionen i medeltal kräver kontinuerligt för att uppfylla skyddsgraden. Genomsnittsströmmen för skyddat eller oskyddat stål är även här olika. För konstruktioner räknar man med att en viss procent av skyddsfärgen kommer försvinna med tiden. Denna genomsnittsström används för att bestämma anodens livslängd (*DNV-GL, 2017*) (*American Bureau of Shipping, 2017*).

5.3.3.3 Skyddsfärgens beläggingsfaktor (f_c)

Skyddsfärgens beläggingsfaktor beskriver skicket på skyddsfärgen som är applicerad på konstruktionen. För optimala förhållanden när färgen är ny och hel så kommer faktorn $f_c=0$ och vid ett sådant fall att färgen är så sliten så att inget skydd uppnås kommer $f_c=1$.

Det som faktorn beskriver är alltså hur skyddsfärgens egenskaper och skick kommer att minska strömtätheten för att uppnå skyddspotentialen (*DNV-GL, 2017*).

Tabell 8 nedan visar de rekommenderade faktorerna a och b för att kunna beräkna skyddsfärgens Beläggingsfaktor med avseende på djup och vilken tjocklek man har på färgen.

- Kategori 1: Ett lager av marin skyddsfärg (Epoxi baserad) minst 20 μ m nominell tjocklek på den torra färgen (DFT)
- Kategori 2: Ett eller flera lager marin skyddsfärg (epoxi, polyuretan eller vinyl baserad) minst 250 μ m nominell tjocklek på den torra färgen (DFT)
- Kategori 3: Två eller fler lager marin skyddsfärg (epoxi, polyuretan eller vinyl baserad) minst 350 μ m nominell tjocklek på den torra färgen (DFT)

Tabell 8. Tabell över nedbrytningsfaktorer (DNV-GL, 2017).

Depth (m)	Recommended a and b values for Coating categories I, II and III (see [6.4.7])		
	I (a = 0.10)	II (a = 0.05)	III (a = 0.02)
0-30	b = 0.10	b = 0.025	b = 0.012
>30	b = 0.05	b = 0.015	b = 0.008

Beläggningens faktorn är en funktion av beläggningsegenskaper, driftsparametrar och tid. Som ett tekniskt tillvägagångssätt kan f_c uttryckas som (DNV-GL, 2017):

$$f_c = a + b * t$$

Där:

- a = initial nedbrytningsfaktor (vid ny applicerad färg ($f_{ci} = a$))
- b = årlig nedbrytningsfaktor (förslitning av färg)
- t = beläggningens ålder (år)

För beräkning av f_{cf} , alltså när man räknar med att förnya färgen (exempelvis dockningsintervall) och f_{cm} som berättar det genomsnittliga ”förbrukningen” av skyddsfärgen.

Dessa kan beräknas enligt formlerna (DNV-GL, 2017):

$$f_{cf} = a + b * t_f$$

$$f_{cm} = a + b * \frac{t_f}{2}$$

Anledningen till att t_f för f_{cm} är delat på 2 är för att den hastighet vid vilken färgen försämras antas vara en linjär funktion.

5.4 Val av anod

När strömbehovet för ICCP-systemet är bestämt kan typ av anod väljas. Anoden väljs så att den klarar av att uppfylla den maximala ström som behövs samt att man måste räkna med en säkerhetsfaktor. Säkerhetsfaktorn är 1,25 till 1,5 som multipliceras med det maximala strömbehovet (DNV-GL, 2015).

$$I_{c,anod} = (1,25 \text{ till } 1,5) * I_{c,max}$$

5.5 Anod resistans (R_a)

För beräkning av anodresistansen så behöver man veta vattnets resistivitet. Vattnets resistivitet antas ofta ligga mellan 0.3 och 1.3 Ωm för havsvatten med en yttemperatur på 7–12°C och en salthalt mellan 3–4% (American Bureau of Shipping, 2017).

Resistiviteten i havsvattnet ökar när temperaturen eller salthalten sjunker och minskar när temperaturen eller salthalten ökar. Storleken och formen på anoderna har även de en betydelse för resistansen. Anodresistansen beräknas enligt nedanstående formler från (DNV-GL, 2017).

Stavanoder (monterad minst 0,3 m från skrovets).

Om $L \geq 4r$:

$$R_a = \frac{\rho}{2 * \pi * L} * \left(\ln \frac{4 * L}{r} - 1 \right)$$

Om $L < 4r$:

$$R_a = \frac{\rho}{2 * \pi * L} * \left[\ln \left[\frac{2L}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right]$$

För stavanoder monterade 0,15m till 0,3m från skrovets yta $R_a * 1,3$.

För icke-cylindriska anoder gäller att $r = \frac{c}{2\pi}$ Där c = tvärsnitts omkrets(m)

Långa anoder monterade slätt med skrovets yta

Där $L > 4 * \text{bredd}$:

$$R_a = \frac{\rho}{2S}$$

Korta anoder monterade slätt med skrovets yta

För cirkulära, elliptiska samt korta stavanoder:

$$R_a = \frac{0,315 * \rho}{\sqrt{A}}$$

Där:

- R_a = anodresistans (Ω)
- ρ = elektrolytens resistivitet (Ωm)
- L = anodens längd (m)
- r = radie på stavanoden (m)
- $S = \frac{\text{Längd} + \text{Bredd}}{2}$ (m)

6 MÄTNINGAR

För att kunna utvärdera ifall något slags katodiskt skydd skulle kunna användas för maskinlaboratoriets bassäng har vi använt oss av en referenselektrod som är av modellen Silver/silver-klorid med en känd saltlösning på 3mol KCl (Kaliumklorid) för att utföra våra potentialmätningar. Eftersom vi vet att skyddskriterierna för stål uppmätt med en Silver/silver-klorid *seawater* referenselektrod skall vara mellan -800mV och -1100mV kan vi beräkna skyddspotentialen för vår referenselektrod.

- Potentialen för Ag/AgCl-*Seawater* = 256mV@25°C
- Potentialen för Ag/AgCl 3mol KCl = 210mV@25°C

Som vi ser så har vi en potentialskillnad mellan dessa två referenselektroder på 46mV@25°C och vi får då att vi skall ha en skyddspotential mellan -846mV och -1146mV vid 25°C elektrolyt. Dessa skyddskriterier är nu angivna för en elektrolyt med en temperatur på 25 grader Celsius och måste då beräknas om till den faktiska temperatur som mätningarna utförts i, detta med en bestämd temperaturkoefficient som finns för varje sorts referenselektrod. Vi använder oss av vår medeltemperatur som är 21,5°C och temperaturkoefficienten som är given till -0,73mV, vi måste då räkna om potentialen enligt formeln nedan (*American Bureau of Shipping, 2017*).

$$E_t = E_{SHE@25^\circ C} + k_t(T - 25^\circ C)$$

Där:

E_t = Referenselektrodens potential vid faktisk temperatur T (mV)

$E_{SHE@25^\circ C}$ = Referenselektrodens potential vid 25°C (mV)

k_t = Temperaturkoefficient för referenselektroden (mV/°C)

T = Faktisk temperatur som mätningar utförts i (°C)

Vi får då en skyddspotential som skall ligga mellan -858mV och -1158mV vid en temperatur på 21,5°C.

Nedan har vi infogat våra mätresultat som vi fått från bassängen. Dessa mätningar är utförda enligt tidigare kapitel för potentialmätningar. Vi har alltså använt oss av en referenselektrod (Ag/AgCl 3mol KCl) som vi sänkt ner i vår testbassäng på ett avstånd av ca 10cm från metallobjektet som skall skyddas. Temperaturen kommer ha en relativt stor inverkan på skyddspotentialen som kommer få en lägre negativ potential se tabell 9. Efter att körningarna med Bolnes motorn avslutats kommer vi även kunna konstatera att potentialen påverkas av

det syre som nu blandats i vattnet. När man sedan låter bassängen stå ett tag så temperaturen och syrehalten sjunker kommer potentialen återgå till det ursprungliga.

Tabell 9. Egna mätvärden över anläggningen.

Mätvärden						
Referens Elektrod (Ag/AgCl) 3M KCL				Potential +210mV@ 25°C		
Datum	Tid	Potentialskillnad [-mV]	Cellens ström [-μ A]	Konduktivitet [μ S/cm]	Vattentemp [°C]	Anm.
17.10.2018	09:30	360	34	475	21,6	
17.10.2018	10:00	357	30	512	21,6	
17.10.2018	10:30	355	30	505	21,6	
17.10.2018	11:30	340	20	498	21,6	
22.10.2018	10:00	390	21	496	19,6	Måndag, Legat still över helg
22.10.2018	10:30	395	21	506	19,6	Måndag, Legat still över helg
22.10.2018	11:00	400	31	510	19,6	Måndag, Legat still över helg
22.10.2018	11:30	400	22	505	19,6	Måndag, Legat still över helg
23.10.2018	09:15	395	35	501	19,7	
23.10.2018	09:45	395	32	514	19,7	
23.10.2018	10:15	395	28	513	19,7	
23.10.2018	10:45	395	26	504	19,7	
24.10.2018	09:30	390	25	498	19,4	
24.10.2018	10:00	386	27	502	19,4	
24.10.2018	10:30	388	25	507	19,4	
24.10.2018	10:00	390	25	516	19,4	
24.10.2018	16:10	314	17	503	20,5	Efter avslutad körning Bollnes
24.10.2018	16:20	330	18	513	20,5	Efter avslutad körning Bollnes
24.10.2018	16:30	337	19	505	20,5	Efter avslutad körning Bollnes
24.10.2018	16:40	343	20	506	20,5	Efter avslutad körning Bollnes
25.10.2018	09:00	346	24	500	20,1	
25.10.2018	09:30	349	27	502	20,1	
25.10.2018	10:00	352	24	507	20,1	
25.10.2018	10:30	333	16	512	20,3	Bottenblåsning panna
25.10.2018	11:00	349	25	511	20,4	Bottenblåsning panna
25.10.2018	13:00	350	17	516	20,3	Körning ångpanna + Turbin
25.10.2018	13:30	340	18	502	22,6	Körning ångpanna + Turbin
25.10.2018	14:00	338	19	515	24,5	Körning ångpanna + Turbin
25.10.2018	14:30	345	21	530	27,0	Körning ångpanna + Turbin
25.10.2018	14:45	355	23	530	27,1	Körning ångpanna + Turbin
26.10.2018	09:30	353	21	531	25,5	
26.10.2018	10:00	357	20	520	25,5	
26.10.2018	10:30	357	20	520	25,5	
26.10.2018	11:00	365	21	519	25,5	
29.10.2018	09:30	377	14	502	22,3	Måndag, Legat still över helg
29.10.2018	10:00	383	14	502	22,3	Måndag, Legat still över helg
29.10.2018	10:30	388	14	514	22,3	Måndag, Legat still över helg
29.10.2018	11:00	383	15	514	22,3	Måndag, Legat still över helg
Medeltal		365,13	22,61	508,84	21,50	

Tabell 10 nedan är värden som är tagna under tiden man haft igång Bolnesen för att få en bättre syn över hur strömningshastigheten påverkar potentialen. Vi kan här se att potentialen påverkas mycket ju högre strömningshastighet elektrolyten har.

Tabell 10. Egna mätvärden med huvudmotor igång.

Mätvärden						
Referens Elektrod (Ag/AgCl) 3M KCL				Potential +210mV@ 25°C		
Datum	Tid	Potentialskillnad [-mV]	Cellens ström [-μ A]	Konduktivitet [μ S/cm]	Vattentemp [°C]	Anm.
31.10.2018	13:30	345	17,0		20,1	
31.10.2018	13:45	320	13,1		20,1	Startat Bolnes körning
31.10.2018	13:55	308	12,7		20,1	
31.10.2018	14:05	304	12,5		20,1	
31.10.2018	14:15	306	12,8		20,1	
31.10.2018	14:25	300	12,6		20,1	
31.10.2018	14:35	294	12,4		20,1	
31.10.2018	14:45	292	12,3		20,1	
31.10.2018	14:55	292	12,2		20,2	
31.10.2018	15:05	292	12,0		20,2	Pitch 22 deg.
31.10.2018	15:15	325	13,3		20,2	
31.10.2018	15:25	325	13,3		20,2	
31.10.2018	15:35	320	13,3		20,2	
31.10.2018	15:45	320	13,2		20,2	
31.10.2018	15:55	320	13,0		20,2	
31.10.2018	16:05	325	13,4		20,2	
31.10.2018	16:15	325	13,2		20,2	Avslutat Bolnes körn
31.10.2018	16:30	340	15,0		20,2	Efter Bolnes körning

7 TEST SAMT MÄTNINGAR MED EGEN ANOD

För att få en förståelse hur ICCP-system fungerar så valde vi att tillverka en egen anod för att testa hurdana skyddsströmmar vi kunde skicka ut samt hur dessa strömmar påverkar potentialen hos stålet. Genom testerna var det möjligt att se hur strömningshastigheter på elektrolyten påverkar kravet på strömtäthet, detta gjordes för att konstatera vilken storlek på strömtäthet som bör tillämpas just i vårt fall, samt att de flesta riktlinjer för vilka strömtätheter som skall tillämpas i olika miljöer och strömningshastigheter ej behandlar färskvatten.

7.1 Utrustning

För att kunna göra tester och mätningar så användes följande instrument.

- Egentillverkad anod av känd storlek
- Likriktare
- Tångamperemätare
- Multimeter med hög impedans
- Referenselektrod av typen Ag/AgCl
- Kablar för inkoppling av instrument

7.2 Upplägg

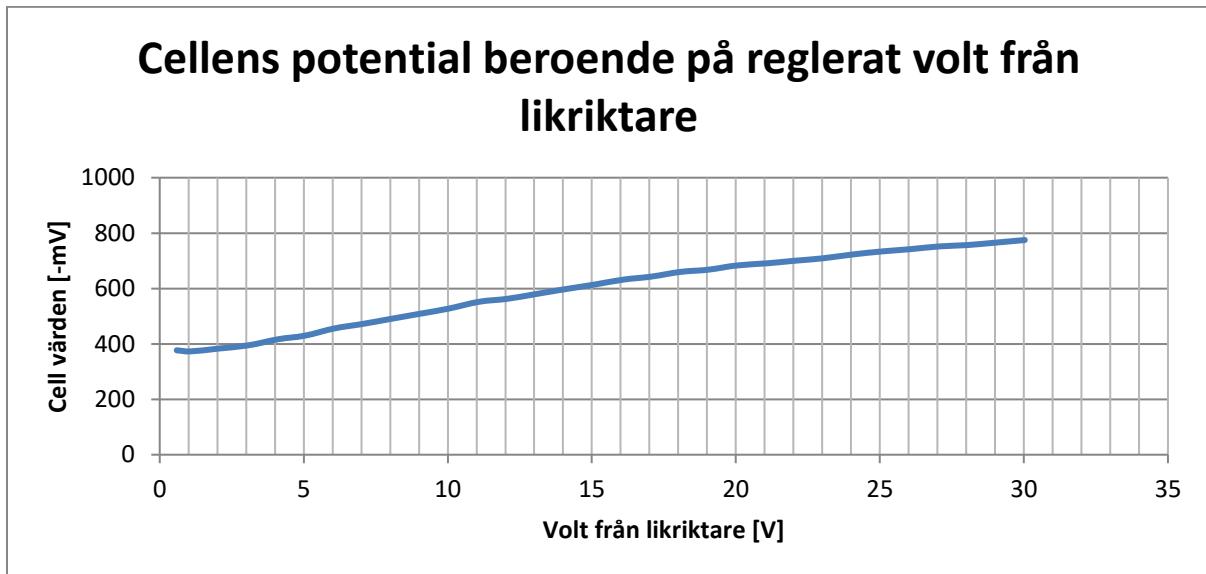
Transformatorlikriktarens pluskabel kopplades till anoden samt att minuskabeln kopplades som jord till konstruktionen som befann sig i elektrolyten. Detta gjordes för att få en prototyp av en ICCP-krets. För att kunna mäta potentialen som vårt ICCP-system skapa så användes referenscellen som placerades nära konstruktionen i elektrolyten, vi använde oss av en multimeter som kopplades till referenscellen samt konstruktionen.

7.3 Utförande

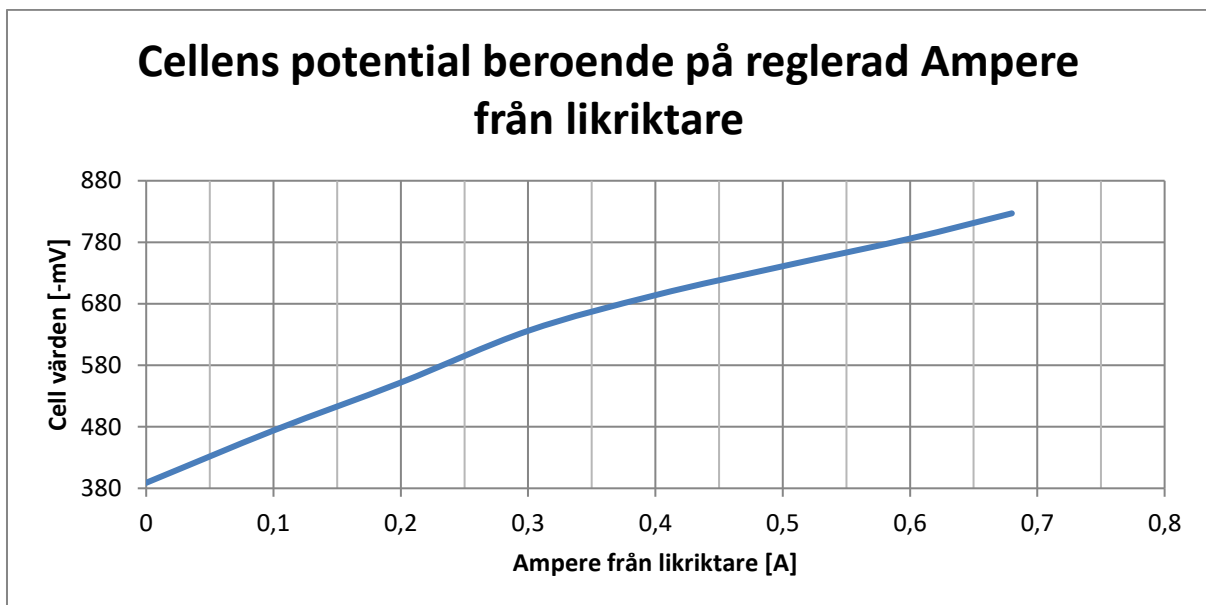
Vi loggade värden för ett visst tidsintervall vid olika förutsättningar. De olika faktorer som justerades var spänning och ström. Detta gjordes för både statiska samt dynamiska förhållanden. Vid undersökning över hur den utmatade spänningen från transformatorlikriktaren påverkar konstruktionen, så lade vi den att skicka ut max ström medan spänningen reglerades med jämna steg från 0 till 30 volt. Undersökningen för hur strömmen påverkade konstruktionen gjordes på motsvarande sätt som för spänningen bortsett från att spänningen var på max och strömmen justerades från 0 till 0,68 ampere. Vid undersökningen över hur dynamiska förhållanden påverkar skyddskravet så justerades matningen från likriktaren på ett sådant sätt att vi behöll ett skyddande potential för konstruktionen.

7.4 Resultat

För våra resultat vid statistiska mätningar kan vi se i bilden nedan att skyddsgraden ökade linjärt när spänning i figur 15 och ström i figur 16 till anoden ökades.

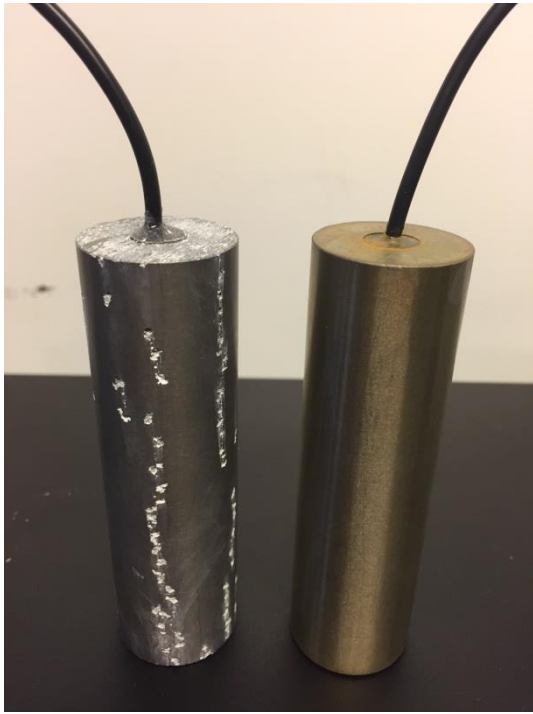


Figur 15. Cellens potential beroende på reglerad spänning från likriktaren.



Figur 16. Cellens potential beroende på reglerad ström från likriktaren.

Figur 17 nedan visar våra testanoder. Den högra är en rostfri anod och den vänstra är en anod gjord i titan.



Figur 17. Test anoder.

Som man kan se på figur 17 ovan så är vår titananod mycket mera skadad på grund av överspänning. Vi har i våra tester varierat strömstyrkan för att uppnå ett tillräckligt skydd.

8 TEORETISKA BERÄKNINGAR FÖR KATODISKT SDYDD

8.1 Beräkning av strömbehov

I bassängen som våra mätningar och beräkningar är utförda så har vi tappvatten och inte havsvatten. Därav kan vi inte använda oss av DNV-GL:s rekommendationer utan får utgå från vår konduktivitet för att ta reda på strömbehovet. Vi har konduktiviteten $508 \mu\text{S/cm}$ och kan således räkna ut resistiviteten med följande formel.

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

- ρ = resistivitet (Ωm)
- σ = konduktivitet (S/m)

Resistiviteten blir då $20 \Omega\text{m}$ och vi kan sedan ta hjälp av tabell 13 nedan för att bestämma strömdensiteten.

Tabell 11. Strömdensiteten för att uppnå tillräcklig skyddsgrad (NORSOK Standard, 1994).

Environment	Resistivity $\Omega\cdot\text{m}$	Initial CD mA/m^2	Mean CD mA/m^2	Final CD mA/m^2
Fresh water (potable)	>20	$\geq 50 \leq 80$	$\geq 50 \leq 80$	$\geq 50 \leq 80$
Brackish water	$\geq 0.3 \leq 20$	$\geq 80 \leq 120$	$\geq 80 \leq 120$	$\geq 80 \leq 120$
Brackish water and sewage	0.5-20	50-100	20-100	20-100
Seawater	<0.3	120	90	90
Seabed mud	----	20	20	20

Tabellen visar att tappvatten skall ha en strömdensitet på $50\text{--}80 \text{ mA}/\text{m}^2$. Eftersom bassängen innehåller en propeller som kommer utgöra turbulens i vattnet så väljs det högre värdet på $80 \text{ mA}/\text{m}^2$ detta blir vårt i_c . Bassängens stål yta som skall skyddas är 30m^2 . Denna yta är obehandlad och skyddsfärgens nedbrytningsfaktor f_c blir då 1. Vi får då den totala strömmen I_c via formeln nedan som vi härledde i stycke 5.3.3.

$$I_c = A_c * i_c * f_c$$

Med ovanstående värden blir $I_c=2400\text{mA}$ i detta fall så är $I_c=I_{c,\text{max}}$, eftersom i_{ci} , i_{cm} och i_{cf} har samma värde.

8.1.1 Test över strömdensitet

För att säkerställa oss om strömdensiteten för just vårt fall så har vi utfört ett småskaligt test i en skild vätskebehållare med en känd stålyta. Experimentet ställdes upp enligt figur 18 nedan.



Figur 18. Testbänk.

Mätutrustning:

- Multimeter
- Likriktare/transformator
- Referenscell
- Test-anod
- Konduktivitetmätare

Information för mätningar:

- Stavanod dimensioner: $r = 15\text{mm}$, $l = 100\text{mm}$
- Plåtens yta: $0,06\text{m}^2$
- Avståndet mellan anod och plåt: $0,5\text{m}$

För att kunna upprätthålla en tillräcklig skyddspotential på -858mV krävdes en skyddsström på $3,1\text{mA}$. Vi har då en stål yta på $0,06\text{m}^2$ som skall skyddas och kan därför bestämma att strömdensiteten som behövs är $51,6\text{ mA/m}^2$. För att uppnå den maximala skyddspotentialen på -1158mV krävs $5,9\text{mA}$ vilket då ger oss en maximal strömdensitet på $98,3\text{ mA/m}^2$. Vi kan av detta experiment/test säkerställa oss om att strömdensiteten som är given i tabellen ovan stämmer relativt bra överens med våra tester och resultat.

8.2 Val av anod

För att välja en passande anod så multipliceras det maximala strömbehovet med en säkerhetsfaktor på 1,25–1,5 för att garantera att anoden klarar strömstyrkan. Detta med hjälp av nedanstående formel.

$$I_{c,anod} = (1,25 \text{ till } 1,5) * I_{c,max}$$

- $I_{c,anod}$ = strömmen anoden bör klara av att skicka ut (mA)
- $I_{c,max}$ = det maximala strömbehovet (mA)

Vi får då att anoden skall klara av att skicka ut 3000mA till 3600mA.

8.2.1 Dielektriska skölden

Efter att vi vet det maximala anodströmmar som krävs för att skydda stålet i bassängen kan vi nu beräkna hur stor den dielektriska skölden kommer att bli. Om vi då använder oss av DNV-GL:s formel för potentialberäkningar vid yttre kanten av den dielektriska skölden nedan kan vi få reda på hur stor sköld som behövs för att strömmarna ej skall överskrida -1,1V (DNV-GL, 2015).

$$E = E_0 - \frac{\rho * I}{D * \pi}$$

E = Potential vid dielektriska sköldens kant [V]

E_0 = Skyddade potentialskillnaden mellan elektrolyt och konstruktion [V]

r = Elektrolytens resistivitet [Ω m]

I = Den maximala anodströmmen [A]

D = Dielektriska sköldens diameter [m]

Eftersom vi vet att den maximala negativa potentialen (E) inte får överskrida -1,1V och vi vet även att den skyddade potentialskillnaden (E_0) för stål skall vara -0,8V så kan vi nu beräkna den dielektriska sköldens storlek med hjälp av tidigare information genom att bryta ut sköldens diameter från ovanstående formel.

$$D = \frac{\rho * I}{\pi * (E_0 - E)}$$

Vi får då en dielektrisk sköld som skulle bli 76,4m, vilket vi snabbt kan konstatera att inte är rimligt med tanke på vår bassäng som är 10m lång. Anledningen till att detta värde blir så högt är till största del vår resistivitet på elektrolyten som är 20 Ω m för färskvatten jämfört med t.ex. havsvatten som har en resistivitet på ca 0.3 Ω m. Om vi då istället beräknade samma sak för havsvatten skulle vi komma fram till att vi behöver en sköld på 1,15m i diameter.

Ett konstaterande kan alltså göras för att ICCP-system i färskvatten/tappvatten med hög resistivitet inte är att föredra. Det vi istället kan prova med är att byta till en viss given diameter för den dielektriska skölden och på så vis får vi istället ett flertal mindre anoder.

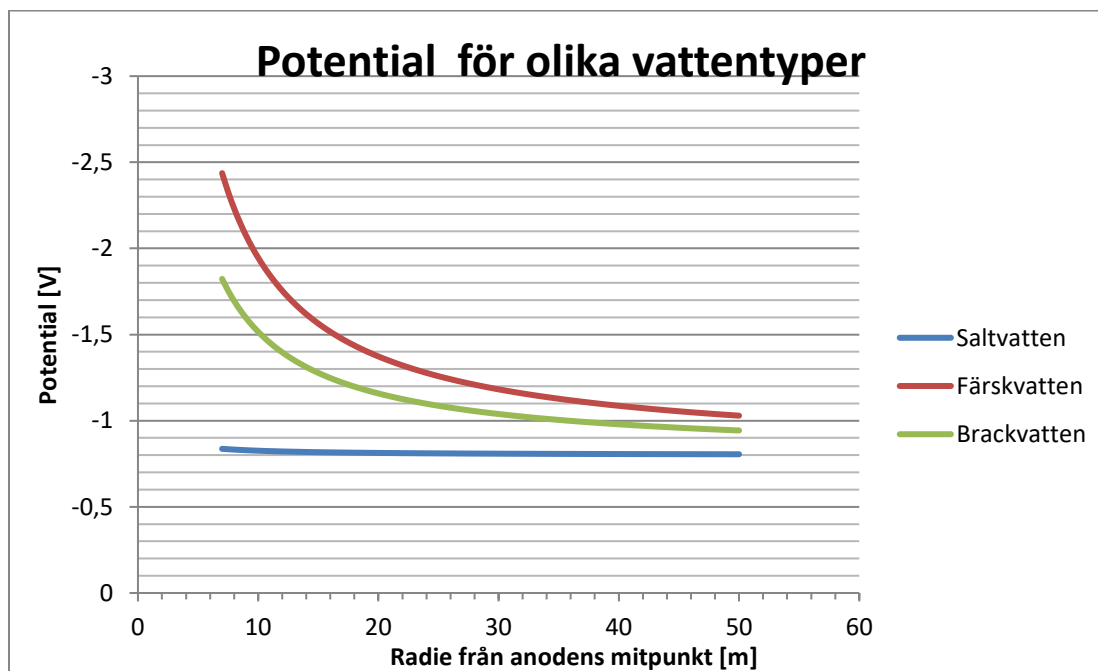
$$I = \frac{D * \pi * (E_0 - E)}{\rho}$$

Om vi väljer diametern för den dielektriska skölden till 1 meter så kommer vi att få den maximala anodströmmen (I) till 47mA vilket i sin tur ger att antalet anoder måste vara:

$$\text{Antal anoder} = \frac{3600mA}{47mA} = 76,6 \approx 77 \text{ st anoder}$$

Vi kan konstatera att hur vi än vrider och vänder på våra värden och uträkningar så finns det inget fall som kommer resultera i att ett ICCP-system skulle kunna monteras och fungera enligt de krav och kriterier vi har. Tabell 14 visar uträkningar för potentialen mellan skrovet och elektrolyten beroende på avståndet från anoden i de olika typer av vatten som kan tänkas finnas runt om i sjöar och hav samt för färskvatten som vi har i vårt fall. Grafen visar tydligt att det är mycket enklare att designa och uppnå de potentialer man vill ha för skydd av konstruktionen i saltvatten jämfört med färsk- och brackvatten då resistiviteten bidrar till för höga potentialer.

Tabell 12. Potential mellan skrov och elektrolyt beroende på avstånd från anoden.



Medan våra beräkningar och resultat enligt de olika regelverk och formler som finns visar på att detta inte kommer att fungera så finns det trots det tillverkare av anoder som påstår att det även går att montera anoder i färskvatten, till exempel tillverkaren DeNora har en disk-anod som är av typen MMO. Figur 19 är en bild på just en sådan anod.



Figur 19. MMO-anod som skall klara färskvatten (Farwestcorrosion, u.d.).

8.2.2 Anod resistans

Om vi då fortsätter våra beräkningar för anodresistansen (R_a) med denna anod som har en diameter på 15,24cm (6 tum) så kan vi använda oss av formeln nedan som gäller för cirkulära anoder (American Bureau of Shipping, 2017).

$$R_a = \frac{0,315 * \rho}{\sqrt{A}}$$

Där:

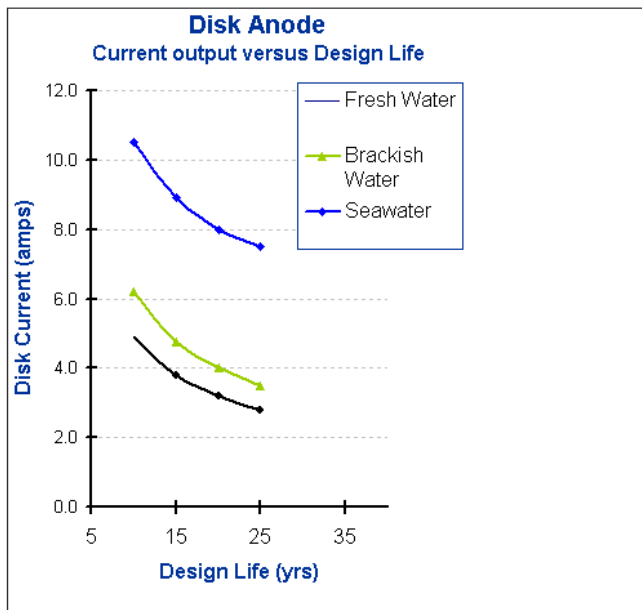
- A = Areal (m^2)
- r = Elektrolytens resistivitet (Ωm)

Vi får då anodresistansen (R_a) = 46,6 Ω

8.2.3 Anodens livslängd

Om vi då till exempel väljer en LIDA diskanod tillverkad av DeNora med en diameter på 6tum och en dielektrisksköld med en diameter på 12 tum betyder detta att anoden i vårt fall kommer att hålla i ca. 16 till 22 år med de uträknade värden för den maximala strömmen på 3000-3600mA i färskvatten. Nedan i tabell 15 har vi Lidas egna graf för livslängd jämfört med strömuttag.

Tabell 13. Diagram över beräknad livslängd (Farwestcorrosion, u.d.).



8.3 Beräkning av transformator

För att slutligen bestämma hurdan transformator som krävs så använder vi oss av det tidigare uträknade maximala strömbehovet på 3600mA. För att nu kunna beräkna spänningen som transformatorn måste klara av att uppfylla använder vi oss av ohms lag som lyder (*DNV-GL, 2017*):

$$U = I * R$$

Där:

- U = spänning (V)
- I = ström (A)
- R = resistans (Ω)

När vi lägger in våra värden i ohms lag får vi således en spänning som skall var 167,8V.

9 KATODISKT SKYDD MED OFFERANODER (SCP)

En galvanisk även kallad offeranod är en metall som har en mer negativ potential med avseende på metallkonstruktionen som skall skyddas. Funktionen hos ett offeranodsystem är att leverera en tillräckligt negativ potential för att skydda konstruktionen under en bestämd tidsperiod (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.1 Användningsområden

Offeranodsystem används till en viss utsträckning inom sjöfarten, speciellt där man vill ha ett billigare och enklare alternativ till ICCP-systemet. Det är vanligt att även använda offeranodsystem som komplement till ICCP-system, speciellt i komplexa konstruktioner där t.ex. strömningshastigheterna är höga (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.2 Komponenter

Ett offeranodsystem är i förhållande till ett ICCP-system ett väldigt enkelt system med få komponenter.

Komponenterna i ett offeranodsystem består av:

- Anoden
- Anslutningssystem
- Konstruktion som skall skyddas

Det finns även i vissa specialfall offeranodsystem med potentialövervakning för den skyddade konstruktionen, som i stort sett fungerar som för ett ICCP-system där man har kopplat in referenselektroder (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.3 Anodens elektrokemi

Med anodens elektrokemi syftar man på bland annat på dess potential, strömkapacitet samt anodens förbrukningshastighet. Dessa egenskaper kan variera betydligt beroende på vad för legeringar den är uppbyggd av samt hur homogent materialet är samt i vilken miljö den befinner sig. Prestandadata för de olika anodmaterialen skall bland annat innehålla följande information (*American Bureau of Shipping, 2017*).

- Anodens ursprungliga potential (Elektrokemiska spänningskedjan) [mV]
- Elektrokemisk laddning [Ah/kg]
- Förbrukningshastighet [kg/Ah]
- Känslighet för passivitet
- Känslighet mot intergranulär korrosion (intern korrosion i anoden)

För specialmaterial som inte har specifika data för de förhållanden man tänker använda materialet i så måste tester utföras för att få reda på dessa värden (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.4 Potential

Vad gäller skyddspotentialen så gäller samma som för ICCP-systemens skyddspotential, alltså en negativ potential på mellan 800 och 1100mV skall uppnås, med vissa mindre felmarginal beroende på användningsmiljö mm. Skyddspotentialen i offeranodsystem uppnås genom att ha en anodlegering med högre negativ potential än skyddspotentialen. Det är även av största vikt att ha en anodlegering som har en stabil potential för att uppnå bästa skyddsgrad (*DNV-GL, 2015*) (*DNV-GL, 2017*).

9.5 Elektrokemisk laddning

Vad som menas med den elektrokemiska laddningen är att en viss sammansättning eller legering av olika material där man vet mängden av de olika materialen kommer resultera i en känd mängd ström som anges i Ah/kg. En stor del av den elektrokemiska laddningen kommer gå åt till skydd av konstruktionen i fråga medan en mindre mängd även kommer att förbrukas ”inne” i anoden genom så kallad intergranulär korrosion. Mängden av den intergranulära korrosionen påverkas mycket av elektrolyten som den befinner sig i. En högre resistivitet kommer leda till en större mängd intergranulär korrosion och vice versa. Med intergranulär korrosion menas att materialet i fråga oftast inte är stabilt och kommer därför vilja börja korrodera (*DNV-GL, 2017*) (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.6 Anodens förbrukningshastighet

Konsumtionshastigheten för en anod är den mängd material som kommer frigöras/förbrukas vartefter den används och offerar sina elektroner till konstruktionen som skall skyddas.

Konsumtionshastigheten mäts i strömförbrukningen av en Ampere under en viss tid, alltså kg/Ah (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.7 Anodmaterial

De vanligaste använda materialen/legeringarna av offeranoder är Zink (Zn), Aluminium (Al) samt Magnesium (Mg). Dessa tre material är vanligen någon form av legering eftersom dessa material i ren form inte är stabila och kommer leda till att intergranulär korrosion uppstår i en allt för stor utsträckning och därför är de komponerade av olika blandningar av metaller för att

minska på den intergranulära korrosionen och även för att uppnå en så lång livstid som möjligt (*American Bureau of Shipping, 2017*) (*DNV-GL, 2017*).

De olika metallerna har olika laddningar och blir på så vis att fungera bättre eller sämre i olika miljöer. Tabell 16 visar typiska användningsområden för dessa metaller.

Tabell 14. Tabell över användningsområden för olika anodmaterial (*Performance Metals, 2020*).

3. Anodes should be selected based upon location of the boat as follows:

	Salt water	Brackish water	Fresh water
Zn	√		
Al	√	√	√
Mg			√

9.7.1 Zink-anod

Vanligen inom sjöfarten där man har relativt höga halter av salt, vanligen över 3% används anoder av zink, detta för att elektrolytens resistivitet är relativt låg vilket leder till att anodens potential inte behöver vara allt för negativ för att uppnå tillräcklig skyddsgrad. Även fast det är olika typer av zink-legeringar utgör de andra metallerna i blandningen oftast under 1% av vikten. Några vanliga zink-legeringar visas i tabell 17 (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Tabell 15. Typiska Elektrokemiska värden för zink-anoder i havsvatten (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Alloy Type	Operation Temperature °C (°F)	Closed Circuit Potential to Ag/AgCl/Seawater Reference Electrode, V	Practical Current Capacity A-h/kg (A-h/lb)	Practical Anode Consumption Rate kg/A-y (lb/A-y)
Alloy Z 1 or MIL-A-18001K or ASTM B418 Type I	5-25 (41-77)	-1.03	780 (354)	11.2 (24.7)
Alloy Z 2 or ASTM B418 Type II	5-25 (41-77)	-1.00	760 (345)	11.5 (25.4)
Alloy Z 3	5-25 (41-77)	-1.03	780 (354)	11.2 (24.7)
Alloy Z 4	5-25 (41-77)	-1.03	780 (354)	11.2 (24.7)
	60-80 (140-176)	-0.97	690 (313)	12.7 (28.0)

9.7.2 Aluminium-anod

Olika Aluminium-legeringar i anoder är även dessa vanligen använda inom trafikområden med höga salthalter. Dessa kan användas istället för zink-legeringar och detta betyder då att konsumtionshastigheten av anodmaterialet minskar och anoderna får en längre livstid.

Dessa anoder lämpar sig även väl i vatten med en lägre salthalt, så som brackvatten men vid allt för låga salthalter tappar aluminium-anoden sin skyddande effekt på grund av för hög resistivitet. Tabell 18 visar egenskaperna hos några vanligt förekommande aluminium-legeringar (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Tabell 16. Elektrokemiska värden för aluminium-anoder i havsvatten (American Bureau of Shipping, 2017).

Alloy Type	Closed Circuit Potential Ag/AgCl/Seawater Reference Electrode, V	Practical Current Capacity A-h/kg (A-h/lb)	Practical Anode Consumption Rate kg/(A-y) [lb/(A-y)]
Alloy A 1	-1.09	2,500 (1,134)	3.5 (7.7)
Alloy A 2	-1.09	2,500 (1,134)	3.5 (7.7)
Alloy A 3	-1.09	2,500 (1,134)	3.5 (7.7)
Alloy A 4	-0.83	1500 (680)	5.8 (12.8)
MIL-DTL-24779B conventional	-1.05 to -1.15 long term -1.05 to -1.15 short term	2,535 (1,150) long term 2,535 (1,150) short term	
MIL-DTL-24779B low voltage	-0.80 to -0.90 long term -0.78 to -0.83 short term	1,656 (751) long term 1,800 (816) short term	

9.7.3 Magnesium-anod

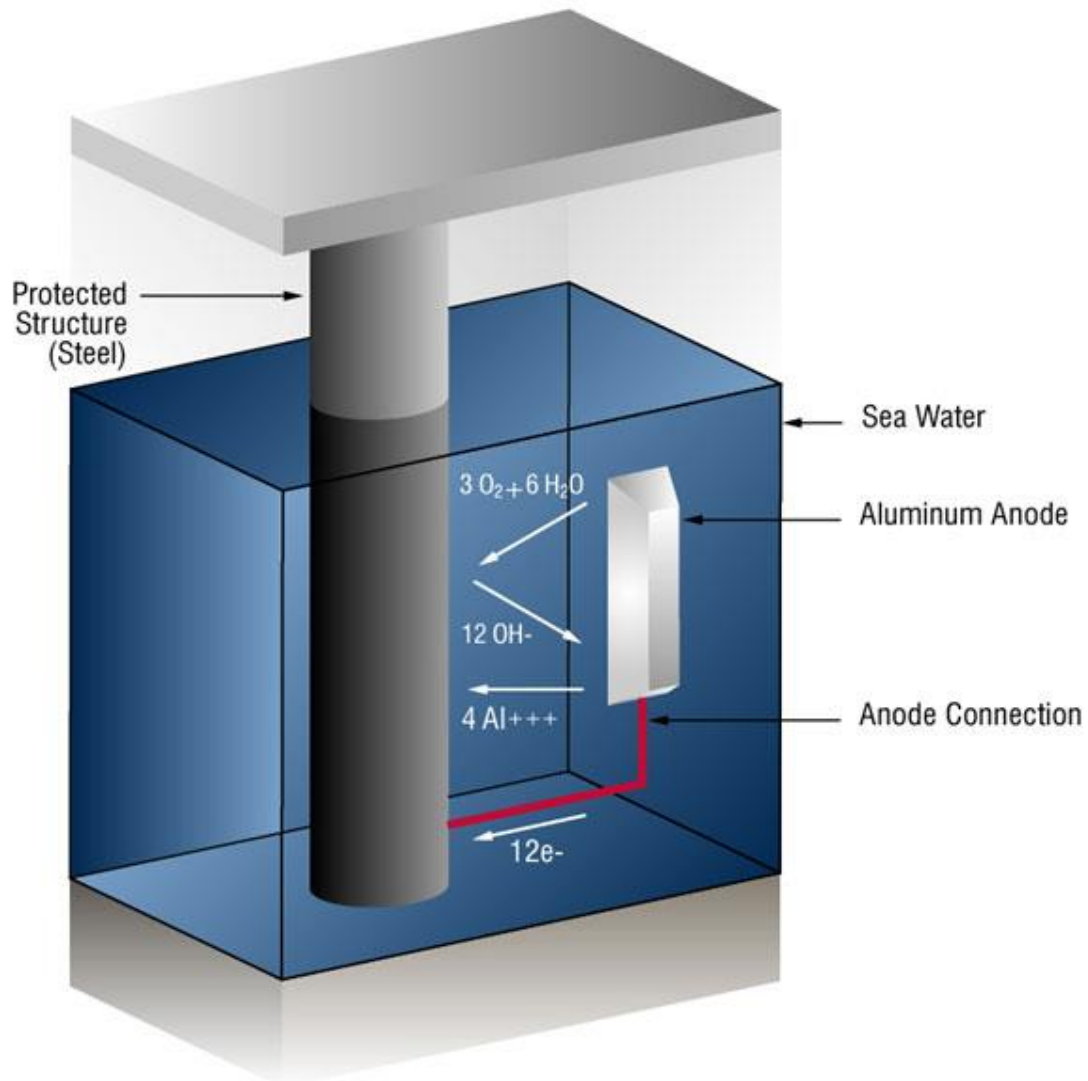
Magnesium legeringar i offeranodsystem används vanligen inte i system där salthalten är hög, detta på grund av att magnesiumanoden har en relativt hög negativ potential och det är lätt att överskydda konstruktionen på grund av den låga resistiviteten. I tabell 19 ser man magnesium-legeringarnas låga potential som sträcker sig till -1,7V mot Ag/AgCl referenselektroden. Magnesiumanoden används därför i vanliga fall där man har en hög resistivitet och en stor elektrokemisk laddning erfordras, så som i färskvattensystem mm. Denna magnesium-legering kan innehålla upp till 7% aluminium och 4% zink (American Bureau of Shipping, 2017).

Tabell 17. Elektrokemiska värden för magnesium-anoder i havsvatten (American Bureau of Shipping, 2017).

Alloy Type	Environment	Closed Circuit Potential to Ag/AgCl/Seawater Reference Electrode, V	Practical Current Capacity A-h/kg (A-h/lb)	Practical Anode Consumption Rate kg/(A-y) [lb/(A-y)]
Alloy M1 or ASTM B843	Seawater	-1.50	1,200 (544)	7.3 (16.1)
Alloy M2	Seawater	-1.70	1,200 (544)	7.3 (16.1)

9.8 Design

Offeranoden i fråga består av en kärna i stål eller annat svetsbart material som har en låg resistivitet för att snabbt och effektivt kunna leda strömmen från det egentliga anodmaterialet som är gjutet på själva stålkärnan. Anoden kommer skicka sina skyddande elektroner genom anodkärnan vidare till konstruktionen som skall skyddas. Detta syns i figur 19. Det är även noga att kärnan är i samma material som konstruktionen för att förhindra inre spänningsskillnader mellan dessa (American Bureau of Shipping, 2017).



Figur 20. Enkel offeranods konstruktion (Baxter & Britton, u.d.).

9.8.1 Anodmontering

Vad gäller fastsättning eller montering till konstruktionen som skall skyddas finns två olika metoder för direkt montering, dessa är antingen att man bultar fast anoden i konstruktionen eller att man svetsar fast anoden i konstruktionen. Det tredje sättet som kan användas är genom en kabelanslutning mellan anoden och konstruktionen. Vid all montering av anoder så är det viktigt att se till att man har tillräcklig kontakt till konstruktionen som skall skyddas, speciellt om man bultar anoden till konstruktionen. Vid fastsvetsning av anoden kommer den nästan garanterat ha tillräcklig galvanisk kontakt med konstruktionen. Vid montering av anod som kopplas samman med kabel är det viktigt att se till att kabeln är tillräckligt grov för att garantera ledningsförmågan. Kabeln skall minst vara 10mm^2 men i större skyddssystem krävs

mätningar för att se till att ledningsförmågan är tillräcklig. För inkoppling av anoder med kabel gäller även att man har minst två kablar per anod för att uppnå en viss redundans vid kabelbrott (*American Bureau of Shipping, 2017*).

Vid montering av anoder på stål med en tunnare ståltjocklek så kan en tjockare plåt svetsas på för lättare kunna montera anoden samt att få en jämnare skyddsström intill anoden. Anoderna kan monteras direkt på konstruktionen utan något dielektriskt skydd, vilket kommer göra så att strömmarna intill anoden kommer blir höga i jämförelse med de strömmar som uppstår en bit ifrån anoden och därför kan man för ett bättre resultat och bättre spridning av skyddsströmmar montera en dielektrisk sköld (*DNV-GL, 2017*) (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.8.2 Anoddistribution

Anoderna skall vara placerade med jämna mellanrum över hela undervattensroppen för att uppnå så god strömfördelning som möjligt över hela ytan, samt att man skall försöka minimera flödesmotståndet till så stor del som möjligt genom att välja rätt typ av anod för just det fall man har. Avståndet mellan anodplaceringen är vanligen runt 6-8meter ifrån varandra men avståndet kan förstås minskas om elektrolytens resistivitet är hög eller om större strömdensiteter krävs. Där högt mekaniskt slitage kan uppstå, så som körning i is, skall anoderna vara ännu tätare placerade (*DNV-GL, 2017*) (*American Bureau of Shipping, 2017*).

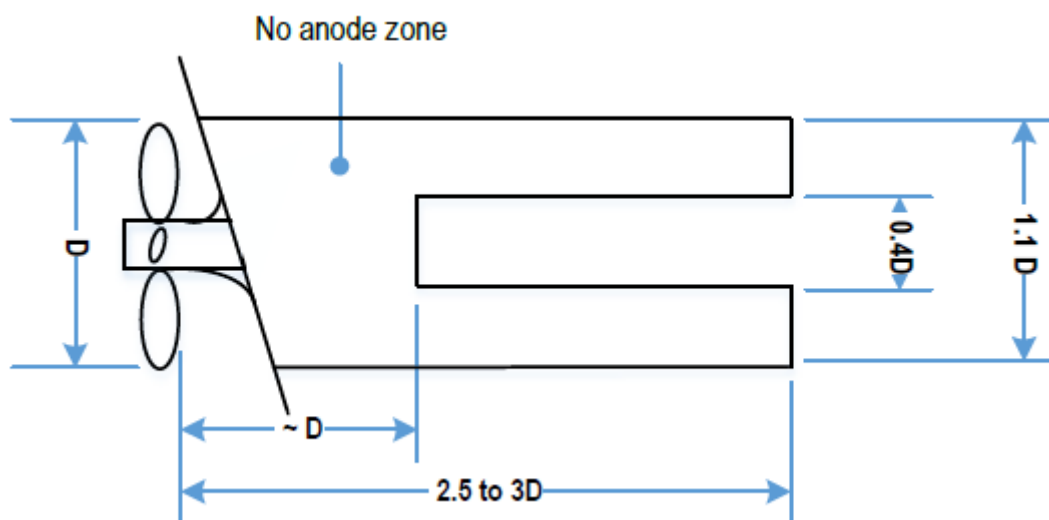
Det är extra viktigt med anodplaceringen runt sjövattnentag och propeller. Om man placerar anoderna för nära eventuella vattenintag eller propellern kan detta leda till att flödet antingen blir felaktigt eller att kavitation kommer uppstå runt vattenintagen samt propellern, vilket leder till att systemet inte kommer att fungera eller hålla så länge som det är planerat/beräknat. Det bästa skyddet med offeranoder får man genom att använda ett flertal mindre anoder som har tätare fördelning mellan varandra (*DNV-GL, 2017*) (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.8.3 Anoder i fören

Att tänka på vid installationer av offeranoder i fören är att dessa behöver monteras i flödesriktningen samt att de inte skall kunna skadas av ankarkättingen (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.8.4 Anoder i aktern

I aktern på ett fartyg skall majoriteten av anoderna vara belägna i närheten av propellerhylsan och propellern, där man har de största strömningshastigheterna. Det är dock viktigt att se till så att dessa anoder inte har en negativ inverkan på vattenflödet till propellern och därför används som tumregel att propellerns diameter är minimimåttet på hur nära framför propellern anoderna får monteras. Anoderna i närheten av propellern skall helst monteras i en linje från propellerns centrumlinje och rakt förut för att minimera turbulensen. Även på skrovets yta ovanför propellern skall anoder monteras på vardera sida för att uppnå en jämnare strömdensitet i dessa turbulenta förhållanden. Figur 20 visar det område där man inte ska montera anoder (*American Bureau of Shipping, 2017*).



Figur 21. Anodarrangemang i aktern, vid propeller och propellerhylsa (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.8.5 Skydd av propeller och roder

Vad gäller propellerns skydd så finns det två olika sätt att lösa detta på. Man kan antingen göra som man gör vid monteringen av ett ICCP-system där man jordar axeln till skrovet med hjälp av släpringar och kol som förbinder propeller och propelleraxeln till skrovet. Det andra alternativet är att montera zinkringar som monteras på propellernavet eller/och på propelleraxeln direkt. Rodret skall ha ett flertal anoder jämnt fördelade över den främre kanten av rodret, eftersom där uppstår större delen av turbulensen som påverkar rodret. Men även här finns en möjlighet att jordra rodret galvaniskt till fartygets skrov om det inte finns möjlighet att montera anoder (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.8.6 Skydd av bogpropeller-tunnel och sjövattenintag

För sjövattenintag och bogpropeller-tunneln gäller samma som för övriga delar av skrovet. Man skall alltså montera anoderna så att de tillför en tillräcklig strömdensitet för att uppnå ett godtyckligt skydd, medan anoderna inte får påverka vattnets flöde genom dessa. Vid skydd av sjökistor och andra vattenintag är det förstås viktigt att se till så att de övriga komponenter som är kopplade till sjövattenintaget inte blir utsatta för krypströmmar, då dessa ofta glöms bort och inte är jordade till systemet korrekt (*American Bureau of Shipping, 2017*).

9.9 Val av anodens typ och vikt

För att kunna bestämma hurdana anoder samt vikten på dessa så bör man göra beräkningar. Till en början beräknas strömbehovet I_{cm} på samma sätt som för ICCP-skydd. Eftersom offeranoder tappar material och minskas med tiden så har man givit dem en utilisationsfaktor som beskriver hur mycket av anoden som kan förbrukas innan den blir för svag för att ge ett tillräckligt skydd. Faktorn är olika beroende på anodens form och tabell 20 visar värdet för några olika anoder (*DNV-GL, 2017*).

Tabell 18. Olika anodtypers utilisationsfaktor (*DNV-GL, 2017*).

Anode type	Anode utilisation factor, u
Long slender stand-off $L \geq 4r$	0.90
Short slender stand-off $L < 4r$	0.85
Long flush mounted $L \geq \text{width and}$ $L \geq \text{thickness}$	0.85
Short flush-mounted, bracelet and other types	0.80

Man behöver även bestämma tiden som anoderna skall vara på plats detta är för fartyg dockningsperioden. Till sist behöver man veta anodens elektrokemiska kapacitet vilket vi har givit för några legeringar i tidigare kapitel. Nu är det färdigt att räkna den totala anodmassan enligt formeln nedan (*DNV-GL, 2015*).

$$M_a = \frac{I_{cm} * t_f * 8760}{u * \epsilon}$$

Där:

- M_a = Totala massan (kg)
- I_{cm} = Underhålls strömmen (A)
- T_f = Docknings perioden (År)
- ϵ = Anodens elektrokemiska kapacitet (Ah/kg)
- u = utilisationsfaktor

9.9.1 Antal anoder samt resistans

När massan av anoderna är bestämda så behöver vikten per anod eller antalet anoder bestämmas, när en av dessa är valda så kan sedan den andra räknas ut med nedanstående formel (*DNV-GL, 2017*).

$$m_a = \frac{M_a}{N}$$

- m_a = anodens massa (kg)
- N = antalet anoder

9.9.1.1 Resistans utgående från bestämt antal anoder

Ifall man valt antal anoder och därefter vill välja vikt och form så behövs först anodströmmen beräknas för att sedan hjälpa till att beräkna resistansen, det är sedan resistansen som bestämmer hurdan form anoderna skall ha. Anodströmmen I_a beräknas enligt följande (*DNV-GL, 2015*).

$$I_a = \frac{I_{cm}}{N}$$

För att beräkna maximiresistansen så används följande (*DNV-GL, 2015*):

$$R_a = \frac{E_c - E_a}{I_a}$$

Där:

- R_a = anodresistansen (Ω)
- E_c = Den skyddade potentialen (V)
- E_a = Anodens kemiska potential (V)

9.9.1.2 Anod resistans beroende på anod typ

Om man utgår ifrån att det är bestämt hurdana anoder som används så behövs resistansen på dessa beräknas, detta görs på samma sätt som för ICCP-anoder och beskrivs närmare i kapitel 5.5. När detta är gjort så behöver man beräkna hur mycket ström anoden kan skicka ut, det görs med följande formel (*DNV-GL, 2015*).

$$I_a = \frac{E_c - E_a}{R_a}$$

När man nu vet hur mycket ström den kan skicka ut så beräknas antalet anoder. Ifall man får många anoder och deras massa överskrider den totala anodmassan M_a så gör detta inget då det bara är ett minimikrav. Antalet beräknas på följande sätt (*DNV-GL, 2015*).

$$N = \frac{I_{cm}}{I_a}$$

10 BERÄKNINGAR

10.1 Beräkningar för offeranodsystem

Detta kapitel kommer innehålla beräkningar över hur ett offeranodsystem skulle kunna anpassas till skolans-laborationsbassäng.

10.1.1 Netto anodmassa

För att kunna beräkna massan av anoderna som skall installeras så behövs strömbehovet, serviceperioden (dockningsperioden) samt anodens elektrokemiska kapacitet.

Från uträkningarna över ICCP-system så fick vi att anoderna bör klara av att skicka ut 2400mA. Vi väljer service perioden på 1 år. Egenskaperna för magnesium-anoder är att de har -1,6 V mot Ag/AgCl samt en elektrokemisk kapacitet på 1200Ah/kg. Vi väljer cirkulära anoder som har $u=0,8$

För massa uträkningar används följande formel:

$$M_a = \frac{I_{cm} * t_f * 8760}{u * \epsilon}$$

- M_a = Totala massan (kg)
- I_{cm} = Underhålls strömmen (A)
- T_f = Docknings perioden (År)
- ϵ = Anodens elektrokemiska kapacitet (Ah/kg)
- U = utilisationsfaktor

W_{total} blir således 22 kg

10.1.2 Anodantal och resistans

Vi väljer att ha 10 anoder, dessa får massan enligt följande formel:

$$m_a = \frac{M_a}{N}$$

- m_a = anodens massa (kg)
- N = antalet anoder

Vardera anoden får då massan 2,2 kg. Vi måste även beräkna vad strömmen från vardera anoden blir och det görs på detta sätt:

$$I_a = \frac{I_{cm}}{N}$$

Strömmen I_c blir då 0,24 A

Vi vill även veta resistansen för att sedan kunna bestämma formen av anoderna. Detta görs genom följande formel:

$$R_a = \frac{E_c - E_a}{I_a}$$

- R_a = anodresistansen (Ω)
- E_c = Den skyddade potentialen (V)
- E_a = Anodens kemiska potential (V)

Resistansen R_a blir således 3,3 Ω

10.1.3 Anodens design

För att få en anod med passande design och storlek väljer vi först att ha en cirkulär anod och kan kontrollera dess area med följande formel:

$$R_a = \frac{0,315 * \rho}{\sqrt{A}}$$

- A = arean (m^2)
- r = vattnets resistivitet (Ωm)

Arean blir då 1,37 m^2 .

10.2 Diskussion

På grund av den höga resistiviteten samt att vi har väldigt mycket bart stål så får vi orimligt stora anoder och det är inte möjligt att montera 10 anoder med arean 1,37 m^2 i bassängen.

11 ICCP-LABORATION FÖR UTBILDNINGSSYFTE

Den här delen av slutarbetet blev tillagt eftersom ICCP-systemet som skulle monteras i skolans laborationsbassäng inte var möjligt att genomföra. Tanken med första delen som innefattar ICCP-systemet var till stor del för utbildning men även att det skulle finnas ett fungerande korrosionsskydd. Vi har diskuterat med beställaren av arbetet och kommit överens om att vi istället skulle beräkna och designa ett fristående system som man i sin tur skulle förse med ett nerskalat ICCP-system, fast förstås med samma funktioner och avsikter som för ett fullskaligt ICCP-system.

11.1 Krav och önskemål

Vi har i designandet av detta system fått till stor del fria händer. Dock finns en del krav som beställaren ville att skulle finnas i samband med denna fristående ICCP-laboration. Eftersom detta kommer bli som en laboration för skolans elever så önskas att de parametrar och faktorer som påverkar ett ICCP-system till största del skall finnas med och gå att ändra på. Som vi vet från tidigare del så är stora faktorer som påverkar ett ICCP-systems funktion bland annat:

- Elektrolytens temperatur
- Elektrolytens resistivitet
- Elektrolytens flödes hastighet
- Vilken typ av materialet som skall skyddas (p.g.a. dess elektrokemiska ursprungs potential)

Tanken med inställningsparametrarna är att man skall kunna testa sig fram och ändra på de olika parametrar som finns för att ställa in ett ICCP-system och den vägen kunna se vad som påverkas och på vilket sätt det påverkas. De parametrar som kan ställas in är de som ges ut av transformator/ likriktar-enheten och det omfattar till exempel ström och spänning.

11.2 Designen av systemet

Eftersom vi nu vill kunna ändra resistivitet, temperatur, flöde och materialet som skall skyddas har vi tänkt oss en bassäng där vi har tre olika ”fack”. Vi måste ha dessa tre fack dels för att de olika systemen skall kunna testas individuellt, dels att vi måste ha dessa system galvaniskt isolerade från varandra för att kunna veta vad som ingår i systemet. Anledningen till att vi just valt tre olika fack är för att vi skall fylla dessa med vatten som har olika resistivitet. Tanken var att i ett fack ha saltvatten, det andra skulle fyllas med brackvatten som påminner om östersjön samt ett med vanligt färskvatten.

11.2.1 Fack 1 (Färskvatten)

Eftersom vi från våra tidigare experiment vet att det är väldigt svårt att uppnå en tillräcklig skyddsgrad i färskvatten så kommer vi i detta fack inte att försvåra detta ytterligare genom att blanda in temperatur eller vattenflöde.

11.2.2 Fack 2 (Brackvatten)

Fack två kommer vi fylla med brackvatten. Brackvatten har en lägre resistivitet än färskvatten eftersom den innehåller salter. Vi hade tänkt att i detta fack skulle man montera någon sort av uppvärmning (Ex. värmeslinga i botten) för att se hur just elektrolytens värme påverkar ICCP-systemets parametrar och dess skyddsströmmar.

11.2.3 Fack 3 (Saltvatten)

I det tredje facket kommer vi använda oss av vanligt saltvatten (havsvatten) med en salthalt på omkring 3%. Detta fack skulle även förses med värmning, men även någon sort av pumpsystem för att simulera vattenflöde. Detta för att se hur flödet och temperaturen påverkar ett ICCP-system som till exempel är monterat på något fartyg som går i havsvatten.

11.3 Beräkningar av storlek på bassäng samt ICCP-system

Eftersom vi inte har några givna mått på testbänkens storlek så bestämmer vi att storleken för ett fack skall vara 500mm*800mm med en höjd på 400mm. Vi har valt dessa mått för att facken skall vara fyllda med vatten som kommer leda till att testbänken kommer bli väldigt tung om man gör den större. Med dessa mått på bassängen får vi då att volymen per fack blir $0,16\text{m}^3$ som motsvarar ungefär 160kg per fack. Vi får då en testbänk som blir att väga 480kg plus materialet som krävs för att bygga testbänken.

11.4 Hur stor yta skall skyddas?

Om vi nu utgår från måtten vi gett för facken så anser vi att man skulle kunna montera fyra plåtskivor med vardera måttet på 500mm*300mm med ett centrumcentrummått på 100mm så att de är jämnt fördelade över fackets bredd. Vi har då en total plåtyta på $1,2\text{m}^2$ som skall skyddas.

Storleken på plåtarna har vi valt till så stora som möjligt för att få så mycket plåt som möjligt att skydda, men dessa plåtar får ej heller vara så stora så att de blir för nära anoden.

Anledningen till att vi vill lägga in så mycket plåtyta som möjligt är för att det är lättare att avläsa värden på ett större system samt att systemet blir stabilare.

11.5 Skyddsströmmen som krävs

Vi har nu den information vi behöver för att kunna beräkna skyddsströmmen. Samma formel som tidigare används där man måste veta strömdensiteten för konstruktionen för en viss elektrolyt. Eftersom våra tidigare mätningar visa på att NORSOK:s strömdensiteter var väldigt nära våra egna uppmätta värden kommer vi att använda oss av tabell 13 kapitel 8. Eftersom vi har tre olika fack med tre elektrolyter med tre olika egenskaper kommer det krävas att vi utför beräkningar för alla dessa, så att vi kan konstatera vad minimikraven för en anod skulle vara.

$$I_c = A_c * i_c$$

- I_c = Strömbehovet (A)
- A_c = Areal som skall skyddas (m^2)
- i_c = Strömtätheten (A/m^2)

11.5.1 Skyddsström fack 1 (Färskvatten)

Om vi nu använder oss av NORSOK:s tabell för skyddsdensitet så har vi en skyddsdensitet på $50mA/m^2$ samt en resistivitet på $20\Omega m$ som är vanligt för färskvatten och vi vet sen tidigare ytan plåt som skall skyddas får vi en skyddsström på $60mA$ med hjälp av formeln för strömbehov. Vi måste även komma ihåg att använda skyddsfaktorn på $1.25 * 60mA$ som ger $75mA$. Detta är då minimikrav på anodströmmen för det här fallet.

11.5.2 Skyddsström fack 2 (Brackvatten)

Vi har i detta fall valt en elektrolyt som motsvarar brackvatten och vi har valt brackvatten med en resistivitet på $0,85\Omega m$ som motsvara östersjön och en skyddsdensitet på $100mA/m^2$. Vi får då en skyddsström på $120mA$ och med säkerhetsfaktor får vi en anodström på $150mA$.

11.5.3 Skyddsström fack 3 (Saltvatten)

För denna elektrolyt har vi valt saltvatten med en resistivitet på $0.3\Omega m$ och en skyddsdensitet på $120mA/m^2$. Vi får då en skyddsström på $144mA$ och med säkerhetsfaktor får vi en anodström på $180mA$.

11.6 Bestämna anodmaterial

Från de tidigare beräkningarna har vi nu bestämt hur stora strömmar anoden måste klara av att skicka ut, så nu måste vi då bestämma ett material för anoden, som i sin tur säger vilken den maximala spänningen som vi kan skicka ut från anoden är. Om vi väljer en av de vanligast förekommande/använda anoderna inom sjöfarten idag så används oftast *mixed- metal-oxide*

(MMO)-anoder. Dessa anoder har då en kärna som är gjord av titan med olika typer av legeringar och har en maximal spänning på 8 volt samt max anodström på 400–1000 A/m².

11.7 Minimistorlek på anod

För att kontrollera att anoden inte skickar ut högre anodströmmar än vad den är designad för så beräknar vi dess minimistorlek och detta sker med följande formel.

$$A = \frac{I_a}{I_{dens}}$$

- A = anodens area (m²)
- I_a = anodströmmen (A)
- I_{dens} = anodens maximala strömdensitet (A/m²)

Vi kom då fram till att en minimistorlek på anoden för färskvattnet i fack ett blir 1,88cm², För anoden i brackvatten blir denna 3,75cm² och för saltvattnet 4,5cm².

11.8 Anodresistansen

Vi har nu beräknat den minimala anod storleken för att skydda den yta stål vi har tänkt använda oss av, oberoende av resistivitet. Så nästa steg blir att beräkna Anodens maximala resistans för att sedan kunna bestämma hur stor anoden skall vara för att den maximala spänningen inte skall överskridas.

Eftersom vi sedan tidigare vet att anodresistansen är den största resistansen och motsvara ungefär hela systemets resistans (R=R_a) så kan vi beräkna resistansen med hjälp av ohms lag.

$$U = I * R_a$$

Där:

- U = spänning (V)
- I = ström (A)
- R_a = resistans (Ω)

Vi kommer då fram till att resistansen för anoden i färskvattnet är 106,67Ω, för brackvatten har vi resistansen 53,33Ω och för saltvattnen har vi 44,44Ω.

11.9 Slutlig anodstorlek

Om vi nu lägger in dessa värden för anodresistansen i formeln nedan kan vi slutligen beräkna den verkliga storleken som krävs.

$$R_a = \frac{0,315 * \rho}{\sqrt{A}}$$

- A = arean (m²)

- $r =$ vattnets resistivitet (Ωm)

Vi får då att den slutliga anodstorleken för montering i färskvatten på $34,88\text{cm}^2$, medan anoden i bräckt vatten får en storlek på $0,24\text{cm}^2$ och anoden i saltvatten blir $0,05\text{cm}^2$. Vi kan nu åter igen konstatera varför det är så svårt att få ett välfungerande ICCP-system i färskvatten om vi kollar på värdena ovan.

11.10 Dielektrisk sköld

För att inte riskera att testbänkens plåtar tar skada av överspänning så måste vi även beräkna en dielektrisk sköld, det görs via följande formel:

$$r = \frac{\rho * I}{\pi * (E_0 - E) * 2}$$

Där:

$E =$ Potential vid dielektriska sköldens kant [V]

$E_0 =$ Skyddade potentialskillnaden mellan elektrolyt och konstruktion [V]

$r =$ Elektrolytens resistivitet [Ωm]

$I =$ Den maximala anodströmmen [A]

$r =$ Dielektriska sköldens radie [m]

Våra sköldar får då radierna $79,6\text{cm}$ för färskvatten, $6,6\text{cm}$ för bräckt vatten och $2,9\text{cm}$ för saltvatten.

11.11 Sammanställning av resultat

Nedan i tabell 21 följer de olika resultat som vi beräknat ut för den laborationsbassäng som vi föreslagit. Som vi kan se så är anodernas storlek relativt små och skulle kunna tillämpas i laborationen. Dock blir det svårt att uppnå en realistisk storlek för den dielektriska skölden i färskvatten. Så tanken är mer att ha det fack med färskvatten som en högst experimentell del av laborationen.

Tabell 19. Sammanställning av resultat.

<i>Data och beräkningar</i>	<i>Färskvatten</i>	<i>Bräcktwater</i>	<i>Saltwater</i>
resistivitet Ωm	20	0,83	0,3
Strömbehov mA	60	120	144
Anodström mA	75	150	180
Anod area efter ström cm^2	1,875	3,75	4,5
Anod maxresistans Ω	106,67	53,33	44,44
Anod area efter spänning cm^2	34,88	0,24	0,05
Anodens radie cm	3,33	1,09	1,20
Radie dielektrisksköld cm	79,6	6,6	2,9

Om man tycker att dessa mått och resultat inte är lämpliga för denna laboration så går det förstås att gå tillbaka till början av detta stycke o ändra på till exempel stål yta som skall skyddas eller resistiviteten på elektrolyten.

11.12 Diskussion

Eftersom vi endast har utfört beräkningar och mätningar för skolans laborationsbassäng som är fylld med vanligt kranvatten(färskvatten) så kan vi inte vara helt säkra på resultaten som blir av våra beräkningar för de olika vattenresistiviteter som vi ämnar använda. Det vi dock kan säga är att resultaten borda stämma relativt bra eftersom de mätningar vi gjort för vårt färskvatten med en resistivitet på $20\Omega\text{m}$ verkar stämma bra överens med de strömdensiteter som anges av olika standarder.

12 SLUTSATS

Vi har med hjälp av detta slutarbete kunnat konstatera att korrosion och katodiska skydd är ett mycket större/mer omfattande ämne och problem än vad vi hade trott från början.

Från början fick vi förfrågan att undersöka om det skulle vara möjligt att montera ett ICCP-system i skolans laborationsbassäng, men vi kunde rätt snabbt med några enklare beräkningar konstatera att detta inte skulle gå utan att bli allt för omfattande. Vi valde då istället att göra detta slutarbete som en liten manual där det mesta inom katodiska skydd skulle ingå, så som beräkningar, material och olika komponenter som behövs.

Slutresultatet vart då ett examensarbete som blev i 3 delar, där vi har ICCP-system, SCP-system och slutligen då vårt förslag till laboration.

Till en början så finns det extremt många olika mättekniker och olika referenselektroder med många olika materialval samt olika kemiska sammansättningar i dess halvceller, vilket gör det extra viktigt att man har koll på vilka/vilken mätutrustning man själv använder sig av för att resultaten skall bli korrekta och återspegla verkligheten. Vi har också kunnat konstatera samma sak för de olika material och olika sammansättningar av material som finns i de anoder som används. Dessa anoder har olika användningsområden som lämpar sig vid olika tillfällen, konstruktioner och elektrolyter.

Vi har även kommit fram till att det i vårt fall är rätt svårt att kunna beräkna och tillämpa ett skydd som kommer att fungera bra i våra förhållanden med bassängen som är fylld med färskvatten och innehåller armering ingjuten i väggarna samt flera olika ädla metaller.

Vi har i vårt examensarbete även byggt/konstruerat en egen testbänk för att kunna kontrollera att våra värden vi fått i mätningarna av bassängen stämmer överens med de värden de olika regelverken har angett.

Eftersom vi inte kunnat designa ett ICCP-system som skulle fungera bra i bassängen har vi även gett förslag på hur man skulle kunna göra en fristående testbänk för utbildningssyfte där man kan studera och ändra de olika parametrar som påverkar ICCP-systemen.

LITTERATURFÖRTECKNING

- American Bureau of Shipping. (2017, December). Cathodic Protection of Ships. Houston, USA.
- Ansuini, F., & Dimond, J. (1994, November). Factors Affecting the Accuracy of Reference Electrodes.
- Axelsson, E., & Ringborg, M. (2009). *diva-portal*. Retrieved from Katodiskt korrosionsskydd:
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:220193/FULLTEXT01.pdf>
- Baete, C., Purcar, M., Bortels, L., Van Den Bossche, B., & Dewilde, J.-M. (2012). CP SYSTEM VALIDATION OF OFFSHORE STRUCTURES THROUGH MODELING. Belgien: NACE.
- Baxter, R., & Britton, J. (n.d.). *Deepwater*. Retrieved from Offshore Cathodic Protection 101:
<http://www.cathodicprotection101.com/>
- Cathelco. (n.d.). *Cathelco*. Retrieved from How does an ICCP system work?:
<http://www.cathelco.com/iccp-overview/how-does-an-iccp-system-work/>
- Cathelco. (n.d.). *Cathelco*. Retrieved from ICCP Hull Corrosion Protection Systems:
<https://www.shipserv.com/ShipServ/pages/attachments/84011/Cathelco%20ICCP%20Systems%20for%20Ships.pdf>
- Cescor. (2017). *Cescor*. Retrieved from Zinc anode for Seawater:
<http://www.cescor.it/pdf/Cescor%20Zn%20Sea.pdf>
- Chemistry LibreTexts. (2020). *Chemistry Libretexts*. Retrieved from Corrosion- Undesirable Redox Reactions:
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_A_Molecular_Approach_\(Tro\)/19%3A_Electrochemistry/19.09%3A_Corrosion-_Undesirable_Redox_Reactions](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_A_Molecular_Approach_(Tro)/19%3A_Electrochemistry/19.09%3A_Corrosion-_Undesirable_Redox_Reactions)
- Chemistry LibreTexts. (2020). *Chemistry LibreTexts*. Retrieved from Electrochemical Corrosion:
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_Chem1_\(Lower\)/16%3A_Electrochemistry/16.08%3A_Electrochemical_Corrosion](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_Chem1_(Lower)/16%3A_Electrochemistry/16.08%3A_Electrochemical_Corrosion)
- consultrsr. (n.d.). *consultrsr*. Retrieved from Resources for Electrochemistry:
<http://www.consultrsr.net/index.htm>
- Corrosionpedia. (2013). *Corrosionpedia*. Retrieved from Dielectric Shield:
<https://www.corrosionpedia.com/definition/391/dielectric-shield>
- CP system BD. (2019). *cpsystembd*. Retrieved from ICCP systems for the marine industry:
<https://cpsystembd.com/product/iccp-systems-for-the-marine-industry/>
- DNV-GL. (2015, Maj). DNVGL-RP-B101.
- DNV-GL. (2017, Maj). DNVGL-CG-0288.
- DNV-GL. (2017, Juni). DNVGL-RP-B401.

- Evac. (n.d.). *Evac*. Retrieved from Cathelco anodes for ICCP solutions:
<https://evac.com/products/cathelco-anodes/>
- Ezekiel Enterprises. (2015, Oktober). Introduction to Electrical Design for Cathodic Protection Systems.
- Farwestcorrosion. (n.d.). *Farwestcorrosion*. Retrieved from LIDA Disk Anode, by DeNora:
<https://www.farwestcorrosion.com/lida-disk-anode-by-denora.html>
- Galaxy, M. (2019, November 16). *marinersgalaxy*. Retrieved from Impressed Current Cathodic Protection On Ship: <https://www.watercorporation.com.au/-/media/files/suppliers/resources/design-standards/ds91-selection-design-and-monitoring-of-cathodic-protection-systems.pdf>
- Kahlert, H. (2010, September). *Researchgate*. Retrieved from Reference Electrodes:
https://www.researchgate.net/publication/226760324_Reference_Electrodes
- Korrosions Gruppen. (2019). *Korrosions Gruppen*. Retrieved from Katodiskt Skydd Referenselektroder: <https://korrosionsgruppen.se/produkter/katodiskt-skydd-referenselektroder/>
- NACE International. (2012, Juni). Standard Test Method TM0497-2012. USA.
- NORSOK Standard. (1994). Common Requirements Cathodic Protection. NORSOK Standard.
- Park, R. (2009). *Farwestcorrosion*. Retrieved from A Guide to Understanding Reference Electrode Readings: <https://www.farwestcorrosion.com/media/pdf/MP-RE-readings.pdf>
- Performance Metals. (2020). *Sacrificial Anodes FAQs*. Retrieved from PerformanceMetalsProducts:
<https://performancemetals.com/pages/sacrificial-anodes-faqs>
- Performance metals. (n.d.). *Performance metals*. Retrieved from Sacrificial Anodes FAQs:
<https://performancemetals.com/pages/sacrificial-anodes-faqs>
- Popov, B. N. (2015). *Corrosion engineering principles and solved problems*.
- Surkein, M. (2004). A Comparison of Impressed Current and Galvanic Anode Cathodic Protection. USA: ExxonMobil Development Company.
- Swain. (1996). CATHODIC PROTECTION DESIGN. Swain Classnotes.
- Swedish Standards Institute. (2003). *Swedish Standards Institute*. Retrieved from Mätmetoder vid katodiskt skydd: <https://www.sis.se/api/document/preview/34411/>
- SXK Båtpärm. (2009). ELEKTROKEMISK KORROSION.
- Tecnosealindustry. (n.d.). *Tecnosealindustry*. Retrieved from High silicon cast iron anodes:
<https://www.tecnosealindustry.com/download/high-silicon-cast-iron-anodes-solid-rod-canister.pdf>

Tecnoselaindustry. (n.d.). *Tecnoselaindustry*. Retrieved from Cu/CuSo4 permanent reference electrodes: <https://www.tecnosealindustry.com/download/cu-cuso4-permanent-reference-electrodes.pdf>

University of Cambridge. (n.d.). *University of Cambridge*. Retrieved from Other reference electrodes: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/pourbaix/other.php>

Watercorporation. (2017). *Watercorporation*. Retrieved from DESIGN STANDARD DS 91: <https://www.watercorporation.com.au/-/media/files/suppliers/resources/design-standards/ds91-selection-design-and-monitoring-of-cathodic-protection-systems.pdf>