

Aalborg Universitet



## Træ og Stål i Havvand

Jensen, Jens Kristian Jehrbo

*Publication date:*  
1989

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Jensen, J. K. J. (1989). *Træ og Stål i Havvand*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. U / Inst. for Bygningsteknik, Aalborg Universitet Nr. 8902

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

---

**INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK**

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER • AUC • AALBORG • DANMARK

---

# **TRÆ OG STÅL I HAVVAND**

---

JENS KR. JEHRBO JENSEN  
TRÆ OG STÅL I HAVVAND  
MARTS 1989

ISSN 0902-8005 U8902

---



---

**INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK**

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK

---

# **TRÆ OG STÅL I HAVVAND**

---

**JENS KR. JEHRBO JENSEN**

**TRÆ OG STÅL I HAVVAND**

**MARTS 1989**

**ISSN 0902-8005 U8902**

---



# INDHOLD

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| FORORD . . . . .                | 1  |
| INDLEDNING . . . . .            | 2  |
| HAVVAND . . . . .               | 3  |
| Salte . . . . .                 | 3  |
| Gasser . . . . .                | 3  |
| Organismer . . . . .            | 5  |
| Marine skadedyr . . . . .       | 5  |
| KONSTRUKTIONSTRÆ . . . . .      | 7  |
| Europæiske træsorter . . . . .  | 7  |
| Tropiske træsorter . . . . .    | 7  |
| Levering . . . . .              | 7  |
| Sorter . . . . .                | 9  |
| Azobé . . . . .                 | 9  |
| Basralocus . . . . .            | 9  |
| Greenheart . . . . .            | 9  |
| Andre træsorter . . . . .       | 10 |
| STÅL . . . . .                  | 11 |
| Konstruktioner . . . . .        | 11 |
| Stålmaterialer . . . . .        | 11 |
| Korrosion . . . . .             | 12 |
| Korrosionsbeskyttelse . . . . . | 16 |
| Beskyttelsesmetoder . . . . .   | 17 |
| Katodisk beskyttelse . . . . .  | 17 |
| Teori . . . . .                 | 18 |
| Pourbaix diagram . . . . .      | 20 |
| Beskyttelseskriterier . . . . . | 21 |
| Dimensionering . . . . .        | 22 |
| Interferens . . . . .           | 25 |
| Overfladebehandling . . . . .   | 25 |
| Krav . . . . .                  | 25 |
| Malingssystemer . . . . .       | 26 |
| Beklædninger . . . . .          | 27 |
| Valg af materiale . . . . .     | 27 |
| Havanlæg . . . . .              | 28 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| Kystanlæg . . . . .  | 28 |
| Røranlæg . . . . .   | 28 |
| AFSLUTNING . . . . . | 28 |
| LITTERATUR . . . . . | 29 |

**FORORD**

Dette kompendium behandler træ- og stålkonstruktioners holdbarhed i marint miljø. Materialerne bliver udsat for kraftige påvirkninger i form af bølgeslag, strømninger, slid, nedbrydning og korrosion. Relevante mekanismer og beskyttelsessystemer behandles.

Hæftet tænkes anvendt ved undervisningen, specielt på anlægssektorens 6. semester, men andre interesserede er velkomne til at benytte det.

Renskrivningen er foretaget af Tove Jensen, og Ingrid Christensen og Poul Skørbæk Sørensen har udført tegnearbejdet.

Tak for veludført arbejde!

Jens Kr. Jehrbo Jensen



## INDLEDNING

I marine omgivelser findes der i dag en lang række anlægskonstruktioner. Det drejer sig om egentlige havanlæg, dvs. anlæg, som ikke er forbundet med landjorden i modsætning til kystanlæg. Røranlæg indtager en mellemstilling. Påvirkningerne på sådanne konstruktioner er ofte voldsomme og stærkt nedbrydende. Træ kan nedbrydes af organismer, og stål kan korrodere med alvorlige skader til følge.

I dette kompendium behandles træs og ståls egenskaber i relation til denne nedbrydning, og der anvises nogle eksempler på, hvordan man vælger materialer eller beskyttelsessystemer til disse konstruktioner.

## HAVVAND

Havvand kan betragtes som vand, hvori der er opløst en række salte og luftarter af forskellig art. Herudover findes der i havvand levende organismer, som omfatter både dyr og planter i form af plankton, bakterier, alger, svampe, muslinger, orme, fisk, planter, pattedyr og meget mere.

### Salte

Analyser af havvand forskellige steder på jordkloden viser, at den relative sammensætning af de opløste salte er ret konstant, men at det totale saltindhold kan variere en del. Tabel 1 viser oceanernes middelsammensætning af salte, og det fremgår heraf, at ca. 3/4 udgøres af almindelig salt, NaCl, og ca. 15% af magnesiumsalte,  $MgCl_2$  og  $MgSO_4$ .

| Salte                     | Indhold |       |
|---------------------------|---------|-------|
|                           | mg/l    | vægt% |
| Natriumklorid, NaCl       | 26900   | 78,4  |
| Magnesiumklorid, $MgCl_2$ | 3200    | 9,4   |
| Magnesiumsulfat, $MgSO_4$ | 2200    | 6,4   |
| Calciumsulfat, $CaSO_4$   | 1300    | 3,4   |
| Calciumklorid, $CaCl_2$   | 600     | 1,7   |
| Andre salte               | 100     | 0,2   |
| I alt                     | 34300   | 100,0 |

Tabel 1. Oceaners middelsammensætning.

Tabel 2 viser, hvorledes det samlede indhold af de enkelte ioner fordeler sig i udvalgte havområder. Endvidere er tallene fra tabel 1 indregnet. Alle tal er angivet i mg/kg.

### Gasser

I havvand er der foruden salte opløst en række luftarter såsom ilt, kvælstof, kuldioxid og svovlforbindelser. Tabel 3 viser en oversigt over opløseligheden af en række gasser i vand i ml/l vand ved den anførte temperatur (indeks).

| Ion                           | Baltiske Bugt | Vesterhavet | Atlantehavet | Tabel 1 |
|-------------------------------|---------------|-------------|--------------|---------|
| Na <sup>+</sup>               | 2190          | 12200       | 11100        | 10580   |
| Mg <sup>++</sup>              | 260           | 1110        | 1410         | 1260    |
| Ca <sup>++</sup>              | 50            | 430         | 480          | 600     |
| Cl <sup>-</sup>               | 3960          | 16850       | 20000        | 19060   |
| SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | 580           | 2220        | 2810         | 2670    |
| Andre, K <sup>+</sup>         | 70            | 550         | 400          | -       |
| I alt                         | 7110          | 33360       | 36240        | 34170   |

Tabel 2. Ionsammensætning af havområder.

| Luftart                       | Opløselighed ml/l vand                                                    | Densitet ved 0°C i g/l |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Ilt, O <sub>2</sub>           | 49 <sub>0</sub> - 32 <sub>25</sub> - 25 <sub>50</sub> - 23 <sub>100</sub> | 1,43                   |
| Kuldioxid, CO <sub>2</sub>    | 1700 <sub>0</sub> - 900 <sub>20</sub> -                                   | 1,98                   |
| Kvælstof, N <sub>2</sub>      | 23 <sub>0</sub> - 14 <sub>40</sub> - 13 <sub>60</sub>                     | 1,25                   |
| Svovlbrinte, H <sub>2</sub> S | 4370 <sub>0</sub> - 1860 <sub>40</sub>                                    | 1,54                   |
| Svovldioxid, SO <sub>2</sub>  | 78 <sub>0</sub> - 3 <sub>90</sub>                                         | 2,93                   |

Tabel 3. Opløselighed af gasser i vand.

På grund af de forskellige gassers opløselighed vil det procentiske indhold i vand afvige fra forholdene i luft. Atmosfæren indeholder ca. 78 volumenprocent N<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub> og ca. 0,03% CO<sub>2</sub>, mens vand vil indeholde ca. 60% N<sub>2</sub>, 30% O<sub>2</sub> og 10% CO<sub>2</sub>. På grund af den større opløselighed ved lavere temperatur er indholdet af gasser mindst i de varme have.

I havneområder kan der p.g.a. industrispildevand og lignende ske en tilførsel af kvælstof- og svovlforbindelser, og det betyder, at miljøet kan ændre karakter lokalt.

De opløste salte og gasser bevirker, at vandet får en bestemt surhedsgrad kaldet pH-værdien. En neutral opløsning har pH = 7, mens havvand er svagt alkalisk svarende til pH = 7,5 til 8,5. Det er det store indhold af frit og bundet CO<sub>2</sub>, som er ansvarlig for havvands alkalitet.

En tilførsel af sure komponenter fra spildevand kan bevirke, at vandet bliver surt, dvs.  $\text{pH} < 7$ , og det kan få betydning for materialernes holdbarhed.

### Organismer

Som bekendt indeholder havet en mængde organismer i alle størrelser og arter. I forbindelse med materialernes opførsel i havvand vil kun nogle af de organismer, som har betydning herfor, blive behandlet.

Alle materialer vil ved nedsænkning i havvand blive udsat for begroning. Fænomenet er velkendt på skibe, havneanlæg og lignende. Det drejer sig her om, at alger i flere udgaver, rurer og langhalse, som er krebsdyr, samt andre organismer sætter sig på overfladen og udvikler sig til tætte lag på konstruktionen. I nogle tilfælde har en sådan begroning stor betydning, f.eks. kan brændstofforbruget stige 10% eller mere for et begroet skib. I andre tilfælde "pakkes" konstruktionen ind, således at indtrængning af ilt fra vandet sker langsommere. Dette fænomen kendes ved havnekonstruktioner. Begroningens betydning for materialernes holdbarhed afhænger i høj grad af konstruktionstype og øvrig påvirkning. Det kan nævnes, at der indirekte tages hensyn til begroning ved angivelsen af gennemsnitlige korrosionshastigheder for ubeskyttet stål i havvand (DS/R 464). Begroningen er et stort problem mange steder, specielt på skibe, og det er meget arbejdskrævende at fjerne begroning mekanisk. For at hindre at organismerne sætter sig på skibe m.m. gøres der udstrakt brug af antibegroningsmalinger, som indeholder stoffer, der er tilpas giftige for disse organismer.

### Marine skadedyr

Udover svampe, insekter og bakterier kan marine skadedyr nedbryde træ. Som bekendt kan træpæle over daglig vande blive angrebet af tømmer svampe. Insekter angriber kun lidt, fordi træet er for fugtigt. Under vand kan træet angribes af overfladeråd stammende fra svampe, der er i stand til at leve med den iltmængde, der er i vandet. Hvis iltindholdet stiger på grund af vind og bølger, fortsætter angrebet. Bakterier findes ofte sammen med svampe.

Træ neddyppet i saltvand angribes ofte af pælekrebs (*limnoria lignorum*) og pæleorm (*teredo navalis*). Disse angreb medfører store skader på træet, og man er derfor nødt til at anvende træsorter, som er egnede til formålet.

Pælekrebsen er et 4-8 mm langt krebsdyr, som ligner en bænkebider, og som graver sig gange i overfladen af træet. Dette porøse træ slides let af ved bølgeslag og andre påvirkninger, og det medfører, at nyt træ bliver udsat for angreb. Pælekrebsen er speciel farlig, fordi det stærkeste angreb sker i området mellem højvande og lavvande. Pælekrebsen kan kun leve, hvis saltindholdet er over 1,5%.

Pæleormen er en ormelignende musling, som starter sin tilværelse som larve (0,25 mm) sammen med tusindvis af andre larver. Den følger strømmen i 1-3 uger og sætter sig herefter på træ for derefter at blive omdannet til en egentlig pæleorm. For at larven kan få fat, er det nødvendigt, at træets ydre lag er vandmættet og delvis nedbrudt af svampe. Det er næsten altid tilfældet med drivtømmer, bundgarnspæle, træskibe og bolværker.

Når pæleormen har sat sig på træet, begynder den at bore. I første omgang 10-20 mm ind og senere på langs, hvor modstanden er mindst, dvs. forbi knaster. Hver pæleorm har sin gang, således at der altid er en tynd trælamel imellem 2 gange, selvom der er mange pæleorm samtidig. På et stykke træ ser man kun det første hul, som er  $\frac{1}{2}$ -2 mm i diameter. Pæleormen sætter sig fast med bagenden lige inden for dette hul, og den vokser sig længere, efterhånden som den borer sig ind i træet. Den bliver også tykkere, maksimalt 8-10 mm; denne tykkelse opnås ved en længde på ca. 100 mm. Herefter bliver den kun længere, op til 250-350 mm.

Pæleormen vokser og borer, når temperaturen er mere end +5°C, dvs. fra midt i april til først i oktober. Frostgrader bevirker, at pæleormen dør øjeblikkelig. De optimale forhold afhænger af saltindholdet, idet de bedste betingelser fås ved 1,2-1,4% salt. Normal vækst kan stadig ses ved ca. 0,9% salt, ved 0,7% salt nedsættes pæleormens reaktioner og ved 0,5% salt lukkes borerøret, hvorved pæleormen nu kan overleve i ca. 6 uger. Alle pæleorme dør, når der er mindre end 0,5% salt i vandet.

Pæleormen angriber træet under den laveste vandstand og mest i nærheden af bunden. Man kan dog opleve, at træet ikke angribes, fordi vandets forurening er for stor, eller træet er belagt med slam. Pæleormen kræver en passende surhedsgrad i vandet, dvs. pH ~ 6-9, og det betyder, at træværk i kalkholdige bassiner samt i råddent vand (humussyre) ikke angribes.

## KONSTRUKTIONSTRÆ

Ved valg af en egnet træsort til brug ved konstruktioner, som udsættes for havvand, må man tage hensyn til de konstruktive påvirkninger, temperaturen, saltindholdet, lokale forhold, pris, leveringsmuligheder og meget andet.

Uanset træsort kan man inddele veddet i det yderste splintved, hvor træets livsprocesser foregår, og kerneved/hjerteved, som er den inderste del af veddet bestående af døde celler. Splinten betragtes som mindre anvendelig til konstruktive formål i forhold til kernen, fordi denne ofte indeholder farvestoffer, giftstoffer eller kiselforbindelser, som giver veddet en god holdbarhed.

### Europæiske træsorter

Af de sædvanlige løvtræer har eg en rimelig holdbarhed i marine miljøer. Efter eg følger asp, ask, bøg og birk. Nåletræerne er mindst modstandsdygtige, idet dog lærk er holdbart i neddykket tilstand. Fyr (splint og kerne) anvendes kun i imprægneret tilstand svarende til fuld indtrængning i splintveddet efter DS 2122, klasse M, dvs. mindst 24 kg/m<sup>3</sup> saltimprægneringsmiddel. Gran, som er imprægneret efter saftfortrængningsmetoden svarende til nævnte klasse M, er tilstrækkelig holdbart.

Levering af imprægneret træ sker fra godkendte imprægneringsfirmaer (NTR-godkendelse). Prisen vil typisk være 2800 kr./m<sup>3</sup>.

### Tropiske træsorter

Der findes i dag et utal af tropiske træsorter, som er meget holdbare. Også for disse sorter gælder det, at splintveddet er mindre holdbart end kerneveddet. I det følgende regnes der med kernetræ.

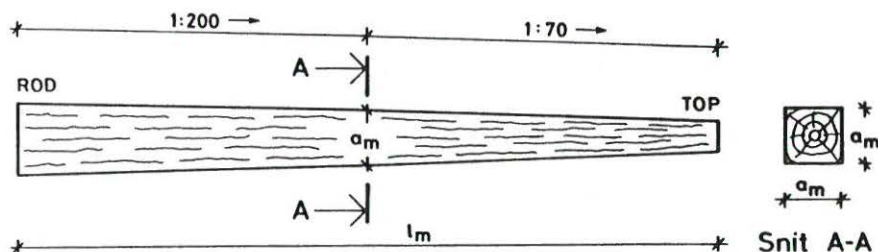
### Levering

De enkelte træsorter er ofte meget hårde, og det betyder, at man som regel ikke kan få leveret tropisk træ i dimensioner, som man kender fra andet træ.

Ønsker man at anvende firhuggede pæle, dvs. pæle med et kvadratisk tværsnit, skal man være opmærksom på, at sådanne ikke kan leveres i vilkårlig længde.

Et typisk træs pæledimension,  $a_m$  (figur 1) måles midt på pælen, og sammenhængen mellem pælelængde,  $l_m$  og pæledimension,  $a_m$  vil være

$$a_m = 0,012 \times l_m + 0,17$$



Figur 1. Pæledimension,  $a_m$  og pælelængde,  $l_m$ .

hvor alle mål indsættes i meter. Det skyldes, at træet udviser en beskeden afsmalning fra rod til midte på ca. 1:200 og fra midte til top på ca. 1:70.

Det betyder, at hvis man stiller krav om, at pælen skal være 20 m lang, må man finde sig i, at dimensionen bliver

$$a_m = 0,012 \times 20 + 0,17 = \underline{0,41 \text{ m}}$$

I praksis vil det betyde levering af en 0,45 m pæl svarende til spring på 0,05 m.

Levering af pæle med mindre tværsnit end 0,30 x 0,30 m er ofte vanskelig og altid dyrere. Det skyldes, at man først fælder træerne, når de - for alle parter - giver det største udbytte.

Det er endvidere vigtigt at være klar over, at på samme parti træ må man påregne en dimensionstolerance på  $\pm 0,03 \text{ m}$  og længdetolerance på  $\pm 0,50 \text{ m}$ .

Hvis man bestiller den førnævnte pæl på  $0,45 \times 0,45 \times 20 \text{ m}^3 = 4,05 \text{ m}^3$  og får den leveret som en pæl på  $0,48 \times 0,48 \times 20,5 \text{ m}^3 = 4,72 \text{ m}^3$ , skal merleverancen på 16,5% betales ved den endelige afregning. Pæle leveres også med undermål, og i praksis anbefales det, at man altid regner med et ekstra forbrug på minimum 5% af den beregnede mængde.

For savskåret tropisk træ gælder det, at dimensionerne ikke kan blive vilkårlig store, fordi træet ofte krummer og vrider sig ved tørring. Snit i nærheden af marven vil bevirke mindre krumning og vridning. Det er normalt at finde en krumning på 1:100. Selv om et træ bliver 30-50 m højt og 1-2 m i diameter, er savskårne planker typisk mindre end 5 m. Ved firsavning kan tømmer op til 10 meters længde leveres i dimensionen 0,3 x 0,3 m.



I praksis er der ofte en del leveringsproblemer p.g.a. afskibningsforholdene. Det har medført, at der bl.a. i Holland er opbygget store lagre af tropisk træ, således at leveringen kan ske hurtigere.

#### Sorter

Til konstruktioner i marine omgivelser anvendes fortrinsvis følgende sorter: azobé, basralocus og greenheart.

#### Azobé (*Lophira procera*) (Vestafrika)

Azobé er et tæt, tungt, slidfast og stærkt konstruktionstræ, som fortrinsvis anvendes som savskåret tømmer til bolværkshamre, fenderværker, brodæk, sluseporte, stemmewærker og spunsvægge. Udover anvendelsen som tømmer og planker anvendes azobé også som fletværk til bundbeskyttelse. I litteraturen er det anført, at azobé ikke er helt så holdbart over for pæleorm og pælekrebs (30 år) som basralocus (60 år) og greenheart (50 år). Erfaringerne viser dog, at azobé i praksis ikke står tilbage for disse to træsorter. Prisen vil typisk være 4500 kr./m<sup>3</sup>.

#### Basralocus (*Dicorynia paraensis*) (Fransk Guyana og Surinam)

Basralocus er en hård, tung, elastisk og stærk træsort, som dog kan flække ved ramning. Træet anvendes fortrinsvis som firhuggede pæle til dus d'Alber, stormpæle, bærepæle i broprierer, moler, lederværker samt til skibsbygning, dæk, gulve etc. Basralocus har en fremragende bestandighed over for pæleorm og pælekrebs, og det skyldes dels et ret stort indhold (1%) kisel, dels et indhold af giften tryptamin. Prisen vil være ca. 3700 kr./m<sup>3</sup>.

#### Greenheart (*Ocotea radioei*) (Britisk Guyana)

Greenheart er et meget tungt og hårdt konstruktionstræ, som anvendes både som runde og firhuggede, fritstående pæle i moler, broer lederværker, dus d'Alber samt som savet tømmer i spunsvægge, bæretømmer, fenderværker m.m. Træet indeholder giftstoffet berberine, og det angribes næsten ikke af svampe. Holdbarheden over for pæleorm og pælekrebs er stor. Prisen vil være ca. 4000 kr./m<sup>3</sup>.

Tabel 4 viser en række data for de tre typiske træsorter. I DS 413, Normer for trækonstruktioner, er karakteristiske styrketal for tropiske træsorter angivet.



| TRÆSORT<br>EGENSKAB                    |                    | AZOBÉ                     | BASRALOCUS                | GREENHEART                |
|----------------------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Densitet - g/cm <sup>3</sup>           | r <sub>0</sub>     | 0,95 - <u>1,05</u> - 1,14 |                           | ~ <u>1,05</u>             |
|                                        | r <sub>15</sub>    | 0,97 - <u>1,10</u> - 1,15 | 0,70 - <u>0,77</u> - 0,85 | 1,00 - <u>1,12</u> - 1,25 |
|                                        | r <sub>g</sub>     | 1,10 - <u>1,25</u> - 1,40 | ~ <u>1,00</u>             | ~ <u>1,35</u>             |
| Enhedsdeformation                      | b <sub>t</sub> %/% | 0,31                      | ~ (0,3)                   | 0,32                      |
|                                        | b <sub>l</sub> %/% | 0,40                      | ~ (0,4)                   | 0,40                      |
| Styrker - N/mm <sup>2</sup>            | σ <sub>c0,15</sub> | 93                        | 58                        | 92                        |
|                                        | σ <sub>c0,g</sub>  | 63                        | 42                        | 73                        |
|                                        | σ <sub>b0,15</sub> | 184                       | 114                       | 181                       |
|                                        | σ <sub>b0,g</sub>  | 133                       | 85                        | 140                       |
|                                        | σ <sub>t0,15</sub> | 217                       | -                         | 269                       |
|                                        | σ <sub>t0,g</sub>  | -                         | -                         | -                         |
|                                        | τ <sub>0,15</sub>  | 15                        | 10                        | 13                        |
|                                        | τ <sub>0,g</sub>   | 11                        | 7                         | 12                        |
| Elasticitetsmodul<br>N/mm <sup>2</sup> | E <sub>0,15</sub>  | 21000                     | 14500                     | 24000                     |
|                                        | E <sub>0,g</sub>   | 16500                     | 13500                     | 19000                     |

Tabel 4. Data for tropiske træsorter.

Andre træsorter  
.....

Udover de nævnte træsorter anvendes også andre til formål, hvor de marine omgivelser spiller en rolle.

Manbarklak (Eschiveillera) anvendes næsten kun til runde pæle i de tilfælde, hvor det er formålstjenligt at anvende dimensioner mindre end 0,25 x 0,25 m. Doussié (Afzelia bipindensis) og Merbau (Intsia bakeri) anvendes til mange vandbygningarbejder, og de har begge gode holdbarhedsegenskaber.

## STÅL

### Konstruktioner

Stål anvendes i stor udstrækning til konstruktioner, som er placeret i marine omgivelser, og som derfor skal kunne modstå påvirkninger, bl.a. fra havvand. Man kan opdele konstruktionerne i tre grupper, som det fremgår af tabel 5.

| Gruppe                                              | Eksempler                                                                           |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Havanlæg<br>- offshore                              | Faststående konstruktioner<br>Forankrede konstruktioner<br>Undervandskonstruktioner |
| Kystanlæg<br>- landfaste<br>- placeret tæt ved land | Spunsvægge<br>Pælebårne konstruktioner<br>Forankrede konstruktioner                 |
| Rørsystemer                                         | Rørledninger<br>Stigrør, kapperør<br>Samlinger, svejsninger                         |

Tabel 5. Marine konstruktioner.

### Stålmaterialer

Gældende norm for pælefunderede offshore stålkonstruktioner (DS 449) foreskriver, at materialer skal vælges dokumenteres og behandles i overensstemmelse med kravene i norm for stålkonstruktioner (DS 412), idet dog konstruktionsstål i kvalitetsklasse A ikke må anvendes. Det skyldes, at sikkerheden mod sprødbud ikke er tilstrækkelig for denne klasse.

Konstruktioner i havvand henføres normalt til høj sikkerhedsklasse, mens enkelte dele kan henføres til normal klasse. Det skyldes, at et eventuelt svigt ofte er forbundet med store skader. Endvidere skal man være opmærksom på, at de nævnte konstruktioner ofte udsættes for lave temperaturer.

Det betyder, at den fornødne kvalitetsklasse (B, C, D eller E) for ståltypene Fe 360, Fe 430 eller Fe 510 til svejste konstruktioner fastsættes ud fra kendskabet til

- sikkerhedsklasse (normal-høj)
- laveste driftstemperatur (+ 10 C - ÷ 20 C)
- godstykkelsen (10 mm - 50 mm)
- muligheden for påvirkninger i tykkelsesretningen

Den laveste driftstemperatur fastsættes som

- den laveste temperatur en nedkølet konstruktion udsættes for under drift
- den nedre karakteristiske værdi af døgnmiddeltemperaturen + 10 C, hvis konstruktionen er placeret over vand, så den følger luftens temperatursvingninger
- den nedre karakteristiske værdi af havvandets døgnmiddeltemperatur, hvis konstruktionen er placeret under vand, dvs. dybere end laveste astronomiske tidevandsstand ÷ 1,5 m.

Normen giver også mulighed for at vurdere stålqualiteten ud fra en slagsejhedsprøvning efter Charpymetoden foretaget ved passende lave temperaturer.

For støbte stålemner gælder det, at der stilles de samme krav til stålet som til svejste konstruktioner, og man skal være opmærksom på, at stålstrukturen efter varmebehandlingen skal være homogen og finkornet uden fejl og huller.

Svejsesømme skal udføres med elektroder med et kontrolleret lavt indhold af brint (hydrogen) i tilsatsmaterialet.

Selv om der i dag findes ståltyper, som rustet mindre p.g.a. legeringstilsetninger, kan man ikke sikkert påregne, at disse stål vil holde bedre i marint miljø. Det betyder, at der økonomisk ikke er noget vundet ved at anvende rusttræge stål, da de alligevel skal korrosionsbeskyttes i lighed med normale stål.

### Korrosion

I DS 412 er det anført, at stålkonstruktioner, som udsættes for et korrosivt miljø, skal udformes, korrosionsbeskyttes og vedligeholdes på en sådan måde, at der ikke opstår skader, som kan nedsætte bæreevne eller funktionsdygtighed i forhold til det krævede inden for den ønskede brugstid. Man skal være opmærksom på, at korrosion kan indvirke på udmattelsesstyrken af udmattelsespåvirkede konstruktioner.

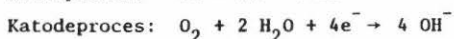
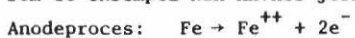
Konstruktionsstål vil ruste mere eller mindre afhængig af miljøet. På kort form kan man definere et antal korrosionsklaser, som karakteriserer miljøet, tabel 6.

| Korrosions-<br>klasse | Miljøets<br>aggressivitet | Miljøeksempler                                                                                     |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0                     | ingen                     | - indendørs i tørre lokaler (< 60% relativ fugt)                                                   |
| 1                     | ubetydelig                | - indendørs i uopvarmede, ventilerede rum                                                          |
| 2                     | middel                    | - indendørs ved skiftende fugtpåvirkning<br>- i landatmosfære langt fra industri og tæt bebyggelse |
| 3                     | stor                      | - ved tæt bebyggelse<br>- i industriområder<br>- over vand og ved kysten                           |
| 4                     | meget stor                | - i konstant fugtigt miljø i vand og jord<br>- ved kemiske fabrikker                               |

Tabel 6. Korrosionsklasser (DS/R 454).

Heraf fremgår det, at stål anvendt til marine konstruktioner udsættes for forhold svarende til korrosionsklasserne 3 og 4. Korrosion betyder, at der altid sker en anodeproces, som resulterer i metalopløsning og en eller flere katodeprocesser, som forbruger de elektroner, der bliver frigivet ved anodeprocessen.

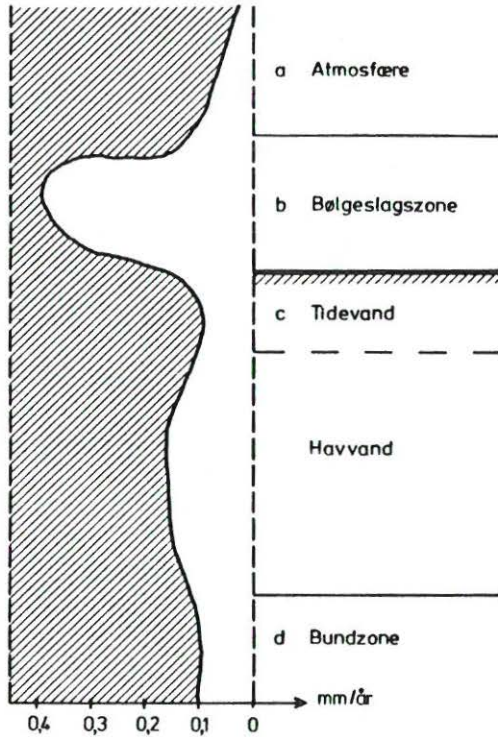
Som et eksempel kan nævnes jerns opløsning under iltforbrug:



I det fugtige miljø, som marine konstruktioner er placeret i, vil der være en stor tilbøjelighed til, at stålet vil korrodere, fordi der er ilt og vand til stede. Samtidig har havvand en stor elektrisk ledningsevne svarende til en resistivitet på mindre end 1  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ . Almindelig vandværks- og regnvand har en resistivitet, der er 100-500  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ . Det store indhold af chlorider i vandet fremmer som bekendt korrosionen af stål.

Det har stor betydning for korrosionen i en marin konstruktion, hvordan denne er placeret i vandet.

Figur 2 viser ydersiden af en stålpæl, som er placeret i havvand, idet den øverste del rager op i luften. Man vil iagttage, at korrosionsdybden ikke er jævnt fordelt over hele pælens længde.



Figur 2. Ståloverflade i havvand.

- a. I den øverste del er konstruktionen udsat for den fugtige atmosfære, således at korrosionen sker under en fugtfilm af begrænset tykkelse. Større afstand fra overfladen giver mindre korrosion. Typisk vil korrosionshastigheden være mellem 0,1 og 0,2 mm/år svarende til almindelig atmosfærisk korrosion.

- b. I bølgeslagszonens atmosfæriske del, dvs den del der ligger over et eventuelt tidevands øverste vandstand, vil korrosionen forøges kraftigt, således at der nu korroderer mellem 0,2 og 0,5 mm/år. I områder med stærk vind og bølgeaktivitet bliver denne zone bredere, og en temperaturstigning vil bevirke en forøget korrosion.
- c. I det egentlige vandområde kan der opstå korrosion forårsaget af, at der optræder forskelle i iltkoncentrationen i vandet. Et fænomen som er velkendt ved nedramning af pæle i jord af forskellig beskaffenhed. I tidevandsfrie områder ligger det mest udsatte område fra 0,5 til 1,5 m under vandlinien, men er der kraftigt tidevand og vandbevægelser, forøges dybden til 2,0-2,5 m, eventuelt helt ned til bunden i særlige tilfælde.
- d. Bundzonen består overvejende af en mudderzone samt et uorganisk restlag over den egentlige bund. Korrosionen sker overvejende i muddret, idet der her er et stort vandindhold samt i øvrigt anaerobe forhold, dvs forhold hvorunder bakterier, der ikke kræver ilt, kan leve. I mudderzonen korroderer der ca. 0,15-0,25 mm/år.

Man skal være opmærksom på, at korrosionshastigheden er størst i det første år. Tabel 7 viser værdier for den maksimale tæringsdybde i en ubeskyttet stålpæl i havvand i den mest korroderede zone.

Tabel 7. Maksimal tæringsdybde (2).

| År | Dybde<br>mm |
|----|-------------|
| 1  | 1           |
| 2  | 2,5         |
| 5  | 5           |
| 10 | 7,5         |
| 20 | 11          |
| 30 | 14          |

Det betyder, at korrosionshastigheden beregnet på basis af den første gennemgang må sættes højere ved tyndvæggede konstruktioner. Tabel 8 viser værdier for gennemsnitlige og lokale korrosionshastigheder i afhængighed af placeringen i vandet.

I praksis kan der optræde flere forskellige korrosionsformer. Så længe korrosionen foregår fordelt på hele fladen, er situationen knapt så kritisk.

| Placering        | Korrosionshastighed mm/år |                                              |
|------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
|                  | gennemsnitlig             | lokal                                        |
| Vandlinie        | 0,1                       | 0,2                                          |
| Mest koroderende | 0,2                       | 0,6 (tynde, 8-10 mm)<br>0,4 (tykke, > 14 mm) |
| Dybere           | 0,1                       | 0,2                                          |
| Bund             | < 0,1                     | 0,25                                         |

Tabel 8. Korrosionshastigheder (2).

Sker der lokalt en dybere korrosion, f.eks. grubetæring eller som følge af forskelle i iltindholdet i det omgivende miljø, kan det medføre en reduktion af tværsnitsarealet eller måske en egentlig gennemtæring, og det er en farlig situation. Det er derfor vigtigt, at man er i stand til nøje at vurdere konstruktionen i det miljø, den er placeret i for at kunne foreskrive den bedste beskyttelsesmåde.

### Korrosionsbeskyttelse

Korrosionsbeskyttelse af konstruktioner kan ske på flere måder. I princippet har en beskyttelsesmetode til formål at hindre anode- og katodeprocessernes forløb. I praksis betyder det, at man udover en fornuftig konstruktiv udformning kan korrosionsbeskytte ved at adskille stålet fra omgivelserne eller ved at forbinde stålet til et andet materiale, som korroderer lettere. Endelig kunne man acceptere, at korrosionen sker, og i stedet forøge godstykkelsen på udsatte steder.

Marine konstruktioner er ofte komplicerede, og det er derfor vigtigt, at man

- tager hensyn til korrosionsforløbet
- tager hensyn til beskyttelsens udformning
- tilgodeser mulighederne for vedligehold.

I det omfang man kan undgå vand og luft formindskes korrosionen. På udvendige flader gælder det, at der skal være så få vandrette flader som muligt for at hindre vandsamlinger.

Marine konstruktioner udføres ofte med hulprofiler, som i praksis ikke kan gøres lufttætte. Derfor bør man sikre afløbsmuligheder og i øvrigt beskytte profilerne. Det er vigtigt at sikre sig, at de stærkest påvirkede zoner skal være tilgængelige for beskyttelse og egentlig vedligehold. Udmattelsespåvirkede konstruktioner er betydeligt mere udsatte i marint miljø end i normale omgivelser.

### Beskyttelsesmetoder

Det endelige valg af beskyttelsesmetode afhænger af faktorer som

- overordnede krav
- konstruktionens levetid og udformning
- geografisk placering
- miljøforhold
- særlige forhold (rørsystemer)
- beskyttelsens levetid

I praksis vil man koncentrere sig om at anvende metoder som

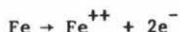
- katodisk beskyttelse
- organiske belægninger
- metalliske beklædninger

Efter omtalen af de forskellige metoder gives der eksempler på metodevalg.

### Katodisk beskyttelse

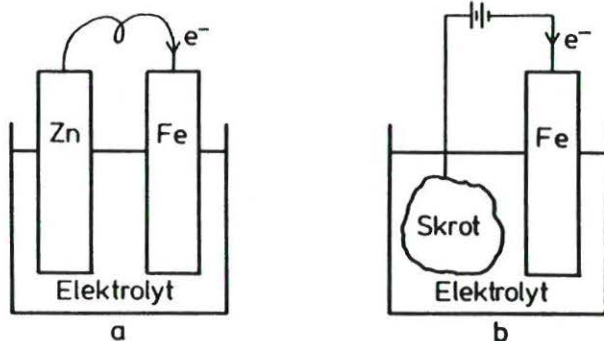
Et metal neddyppet i en elektrolyt har tilbøjelighed til at gå i opløsning ved at danne metalioner og elektroner. Der indstiller sig med tiden ligevægt, således at der udadtil er balance i systemet.

Denne ligevægt, som f.eks. kan være



vil ved tilførsel af elektroner udefra blive forskudt til venstre, således at jernet nu forbliver i fast tilstand. Dette ekstra tilskud af elektroner kan fremkomme ved, at jernet forbindes med et andet metal, som er mere villig til at afgive elektroner, f.eks. zink. En anden mulighed er at tilføre elektronerne fra en ydre strømkilde.



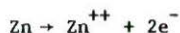


Figur 3. Katodisk beskyttelse.

- a) Offeranode. Zn: anode, Fe: katode  
 b) Påtrykt strøm. Skrot: anode, Fe: katode.

Man taler her om, at jernet er katodisk beskyttet, og katodisk beskyttelse bygger på dette princip.

Figur 3. viser de to udformninger. I det første tilfælde (a) anvendes zinken som offeranode og bliver derfor brugt med tiden, idet de fornødne elektroner opstår ved, at



I praksis betyder det, at man ved inspektion skal sikre sig, at der hele tiden er anode nok.

I det andet tilfælde (b) anvendes ofte "skrot" eller permanente elektroder som anode. I praksis skal man sikre sig, at strømkilde og tilledninger er intakte under brug.

### Teori

De forskellige metaller tilbøjelighed til at gå i opløsning og danne metalioner afspejler sig i den elektrokemiske spændingsrække. Tabel 9 viser uddrag af denne spændingsrække ved 25°C.

Et metal vil i ligevægt med en opløsning indeholdende metalioner antage et bestemt potential målt i forhold til standardhydrogenelektroden, som tillægges potentialet 0 Volt. Det angivne normalpotential er potentialet af metallet i en opløsning, hvor koncentrationen af metalioner er  $1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ .

| Elektrodereaktion |                                                                                   | Normalpotentialer, V   |                                   |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
|                   |                                                                                   | Hydrogen-<br>elektrode | Cu/CuSO <sub>4</sub><br>elektrode |
| Guld              | $\text{Au} \rightleftharpoons \text{Au}^{+++} + 3\text{e}^-$                      | + 1,42                 | + 1,08                            |
| Chlorid           | $2 \text{Cl}^- \rightleftharpoons \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$                      | + 1,36                 | + 1,02                            |
| Vand              | $2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4\text{e}^-$ | + 1,23                 | + 0,89                            |
| Kobber            | $\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{++} + 2\text{e}^-$                       | + 0,34                 | 0                                 |
| Hydrogen          | $\text{H}_2 \rightleftharpoons 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^-$                        | 0                      | - 0,34                            |
| Bly               | $\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{++} + 2\text{e}^-$                       | - 0,13                 | - 0,47                            |
| Nikkel            | $\text{Ni} \rightleftharpoons \text{Ni}^{++} + 2\text{e}^-$                       | - 0,23                 | - 0,57                            |
| Cadmium           | $\text{Cd} \rightleftharpoons \text{Cd}^{++} + 2\text{e}^-$                       | - 0,40                 | - 0,74                            |
| Jern              | $\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$                       | - 0,44                 | - 0,78                            |
| Zink              | $\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{++} + 2\text{e}^-$                       | - 0,76                 | - 1,10                            |
| Aluminium         | $\text{Al} \rightleftharpoons \text{Al}^{+++} + 3\text{e}^-$                      | - 1,66                 | - 2,00                            |
| Natrium           | $\text{Na} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{e}^-$                           | - 2,71                 | - 3,05                            |
| Kalium            | $\text{K} \rightleftharpoons \text{K}^+ + \text{e}^-$                             | - 2,92                 | - 3,26                            |

Tabel 9. Elektrokemisk spændingsrække ved 25°C.

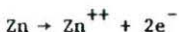
I praksis vil den galvaniske spændingsrække i havvand omfatte følgende materialer:

Guld (Au)  
 Sølv (Ag)  
 18/8 Rustfast stål i passiveret tilstand  
 Kobber (Cu)  
 Messing  
 Bly (Pb)  
 18/8 rustfast stål i aktiveret tilstand  
 Støbejern  
 Stål  
 Aluminiumlegeringer  
 Cadmium (Cd)  
 Aluminium (Al)

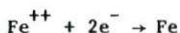
Zink (Zn)

Magnesium (Mg)

Af tabellen fremgår det, at jo mere positivt normalpotential er, jo ædlere er metallet. Det betyder, at hvis man forbinder to forskellige metaller med hinanden, og de er anbragt i en tilsvarende elektrolyt, vil det mindst ædle metal gå hurtigere i opløsning, og det mest ædle opløses langsommere. Hvis man forbinder zink med jern vil anodeprocessen være



og katodeprocessen

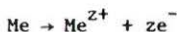


#### Pourbaix diagram

Et Pourbaix diagram for et metal og tilsvarende elektrolyt viser en sammenhæng mellem

- de kemiske forbindelser metallet kan optræde i
- metallets potential i forhold til elektrolytten
- elektrolyttens surhedsgrad, pH-værdi

Figur 4 viser et Pourbaix diagram for jern i vand, og man kan se, at hvis jernet tillægges et potential mindre end værdien svarende til linie a, vil jernet ikke gå i opløsning inden for et stort pH-område. Et Pourbaix diagram eksisterer kun ved en bestemt koncentration af metalioner. For et metal, der opløses efter



gælder Nernsts ligning

$$E_{\text{Me}} = E_{0,\text{Me}} + \frac{RT}{zF} \ln [\text{Me}^{++}]$$

hvor  $E_{\text{Me}}$  = metallets potential, mV

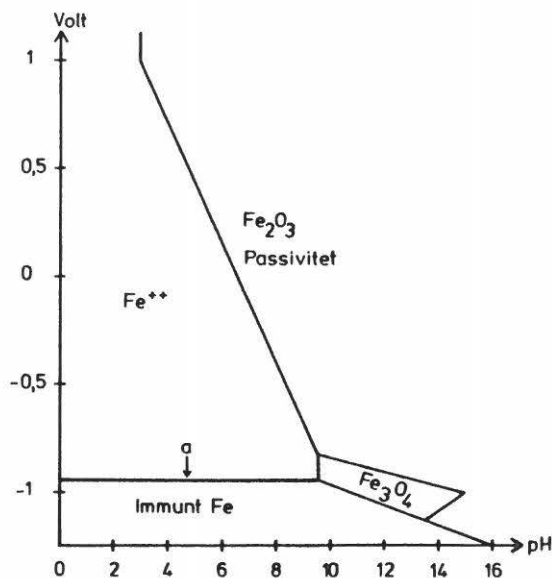
$E_{0,\text{Me}}$  = metallets normalpotential, mV

$R$  = gaskonstanten =  $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$T$  = absolutte temperatur, K

$z$  = antal ladninger

$F$  = Faradays konstant =  $96484 \text{ Coulomb mol}^{-1}$



Figur 4. Pourbaix diagram for jern i vand (skematisk).

Det betyder, at

$$E_{\text{Me}} = E_{0,\text{Me}} + \frac{8,314 \times 298 \times 2,303 \times 1000}{z \times 96484} \log [\text{Me}^{++}]$$

eller 
$$E_{\text{Me}} = E_{0,\text{Me}} + \frac{59}{z} \log [\text{Me}^{++}]$$

Et Pourbaix diagram optegnes ofte for en bestemt metalion koncentration =  $10^{-6} \text{ mol l}^{-1}$ . Det betyder, at

$$E_{\text{Fe}} = -440 + \frac{59}{2} (-6) = \underline{-620 \text{ mV}}$$

målt overfor en standardelektrode. I praksis anvendes en mættet kobber/kobbersulfatelektrode, som har et potential, der er +340 mV større. Linien a i figur 4 har derfor værdien  $E = \underline{-950 \text{ mV}}$ .

#### Beskyttelseskriterier

Af det foregående fremgår det, at hvis jern tillægges et potential, som er mindre end -950 mV, vil der ikke ske galvanisk korrosion inden for et stort

pH-område. I praksis viser det sig, at jern og stål allerede beskyttes ved -850 mV, og det er baggrunden for, at man har valgt denne værdi som grænse.

Det kan i øvrigt nævnes, at man

- skal anvende en grænse på -950 mV eller lavere under anerober forhold
- ikke må underskride værdien -1150 mV af hensyn til eventuel brintskørhed i stålet
- skal anvende værdien -950 mV ved relativ lav vandbevægelse
- skal anvende værdien -850 mV ved store vandbevægelser
- skal anvende værdien -850 mV for udmattelsespåvirkede konstruktioner

I temperaturområdet 25-100°C kan man regne med, at beskyttelsespotentialet falder 1 mV ved en temperaturstigning på 1°C.

Den konstruktive udformning af beskyttelsessystemet skal være sådan, at beskyttelsesstrømmen kan nå uhindret ud til alle konstruktionsdele. Det er også vigtigt, at konstruktionen er elektrisk afgrænset fra omgivelserne, eller at flere dele i stedet forbindes elektrisk f.eks. ved svejsning. Der kan også blive tale om at isolere dele fra hinanden, hvis der er forskellige krav til beskyttelse.

Offeranoderne skal være tilstrækkeligt robuste i driftstiden, og de skal kunne tåle at blive udsat for bølger og mekaniske påvirkninger. Systemer med påtrykt strøm skal tilsvarende være udført således, at ledninger ikke kan skades så forbindelserne brydes.

#### Dimensionering

For at kunne dimensionere et anlæg til katodisk beskyttelse er det nødvendigt at kende udformningen og størrelsen af det, man ønsker at beskytte. Kravene til en spunsvæg er anderledes end til et røranlæg. Det er vigtigt at sikre sig, at der er en tilstrækkelig mængde offeranode i hele levetiden eller i tiden mellem to inspektioner. De vigtigste parametre er derfor det specifikke strømbehov og levetiden.

Tabel 11 viser en oversigt over specifikke strømbehov i en række vandområder, bassiner, sedimenter og jord. Værdierne er gennemsnitlige, fordi temperaturen, iltindholdet samt begroningen kan ændre værdierne. Man ser, at kravet til beskyttelse er størst i starten af levetiden.

| Område                | Strømtætheder i mA/m <sup>2</sup> |        |      |
|-----------------------|-----------------------------------|--------|------|
|                       | Begyndelse                        | Middel | Slut |
| Nordlige Nordsø       | 160                               | 120    | 100  |
| Sydlig Nordsø         | 130                               | 100    | 90   |
| Indre danske farvande | 130                               | 100    | 90   |
| Skærmede bassiner     | 120                               | 90     | 80   |
| Nedgravet rørledning  | 50                                | 40     | 30   |
| Sedimenter            | 25                                | 20     | 15   |

Tabel 11. Vejledende strømtætheder for bart stål.

Det totale strømbehov udregnes som produktet af specificeret behov og bart overfladeareal, idet man medregner alle konstruktionsdele herunder interim-konstruktioner, der ikke fjernes.

Beregning af den nødvendige mængde anode sker efter følgende formel

$$W = \frac{A \times i \times T}{c \times u}$$

hvor  $W$  = anodemassen, kg

$A$  = bart overfladeareal, m<sup>2</sup>

$i$  = specifik strømtæthed, A/m<sup>2</sup>

$T$  = anodens levetid, h

$C$  = anodens kapacitet, A·h·kg<sup>-1</sup>

$u$  = anodefaconens udnyttelsesgrad (= 0,9 for lange, slanke og 0,8 for andre anodeformer)

Der arbejdes i praksis med zinkanoder og aluminiumanoder, som begge er meget rene, men med legeringskomponenter.

Zinkanoder indeholder 0,1-0,5% aluminium, og det anbefales at nedsætte aluminiumindholdet ved temperaturer op til 50°C. Zink må ikke anvendes over denne temperatur, fordi kapaciteten falder, og korrosionspotentiallet stiger. Der kan regnes med en udnyttelse på 95% ved normalt brug svarende til ca. 770 A·h·kg<sup>-1</sup>. Potentiallet vil typisk være -1100 til -1150 mV ved brug.

Aluminiumanoder er legeret enten med grundstoffet indium eller kviksølv. Potentialet vil ligge i området -1050 mV til -1100 mV i det første tilfælde og fra -1100 mV til -1150 mV i det andet. Kapaciteterne vil være ca.  $2600 \text{ A} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$  og  $2800 \text{ A} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Også her gælder det, at kapaciteterne ved stigende temperatur falder, typisk til  $1000 \text{ A} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$  ved  $60^\circ\text{C}$ .

Antallet af anoder, som anodemassen skal fordeles på, kan beregnes som

$$n = \frac{R_a \cdot f \cdot I}{\Delta V}$$

hvor  $n$  = antallet af anoder

$R_a$  = modstanden gennem omgivelserne fra anoden til stålet, ohm

$I$  = anlæggets begyndelsesstrøm, A

$\Delta V$  = potentialdifferensen mellem anode og netop beskyttet stål, V

$f$  = korrektionsfaktor for interferens ( $1 \leq f \leq 2$ )

For lange slanke elektroder er

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

hvor  $\delta$  = elektrolyttens specifikke modstand, ohm m

$L$  = anodelængde, m

$r$  = anoderadius, m

For ringformige elektroder gælder, at

$$R_a = \frac{0,3158}{\sqrt{A}}$$

hvor  $A$  = anodens frit eksponerede areal,  $\text{m}^2$ .

Til anlæg med påtrykt strøm anvendes foruden "skrot" i udstrakt grad permanente elektroder. Som eksempel kan nævnes grafit (C), magnetit og siliciumjern. Et problem i denne forbindelse er, at anoderne ofte er skøre, dvs. at de skal forstærkes ved monteringen. Endvidere må det samlede strømforbrug ikke overskride de i tabel 12 anførte grænser.

| Materiale    | Specifik strømtæthed, $\text{A}/\text{m}^2$ |
|--------------|---------------------------------------------|
| Grafit       | 25                                          |
| Magnetit     | 100                                         |
| Siliciumjern | 25                                          |

Tabel 12. Grænser for strømforbrug.

### Interferens

Ved dimensioneringen og udførelsen af et anlæg til katodisk beskyttelse skal man være opmærksom på, at der kan opstå interferens i nærliggende konstruktioner. Det skyldes, at de strømme, der opstår mellem anoder og konstruktion, kan løbe igennem andre konstruktioner og derved bevirke, at der opstår nye adskilte anode- og katodeområder med korrosion til følge. Det er en uheldig situation, og man bør derfor sikre sig, at dette ikke sker, f.eks. ved at sætte den sekundære konstruktion i elektrisk ledende forbindelse med den primære konstruktion. Fænomenet er ret udtalt ved beskyttelse af rørledninger, kabler etc., mens konstruktioner med anoder, der er anbragt i kort afstand fra stålet ikke påvirker omgivelserne væsentligt.

### Overfladebehandling

Egentlige overfladebehandlinger af stålkonstruktioner må opfattes som barriere-systemer, fordi stålet nu adskilles fra omgivelsernes miljø samtidig med, at man ved valg af et egnet system sørger for, at belægningen hæfter særdeles godt til stålet, og at belægningen udviser en god bestandighed over for mekaniske påvirkninger og nedbrydning fra omgivelserne. Så længe belægningen er intakt, opfylder den næsten altid formålet, men sker der en mekanisk skade i form af afsprængninger og huller i belægningen, mangedobles faren for korrosion, fordi stålet nu er blotlagt med grubetæring til følge. Det skyldes, at anodearealet er meget mindre end katodearealet.

### Krav

Kravene til en belægningsfunktion omsættes i praksis til en behandlings-specifikation, som indeholder

- beskrivelse af og krav til underlaget
- metoder til rensning og forbehandling af overflader samt krav til resultatet
- krav til behandlingssystemet
- en etableringsspecifikation
- krav til arbejdet og tilhørende kontrol.

Specielt i marine konstruktioner er det vigtigt, at man har så megen kontrol over belægningsudførelsen som muligt, fordi det er vanskeligt at reparere skader.



Ved udførelsen af den korrekte overfladebehandling skal man tage stilling til de emner, som fremgår af tabel 13.

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| Underlag  | Grundmateriale                        |
|           | Tidligere belægning: art, alder m.m.  |
|           | Konstruktionsudformning               |
|           | Konstruktionsoverflader               |
|           | Rustgrader i henhold til DS 2019      |
|           | Afrensning: værktøj, maskiner, omfang |
| Udførelse | Grundmaling: flere lag                |
|           | Dækmaling: flere lag                  |
|           | Slutmaling: udseende                  |
|           | Værktøj ved maling                    |
|           | Måling af lagtykkelse                 |
|           | Måling af vedhæftning                 |
|           | Måling af poretæthed                  |

Tabel 13. Overfladebehandling

#### Malingssystemer

Der findes i dag en lang række malingssystemer til brug på marine konstruktioner. Den samlede belægning er typisk opbygget af grundmaling, mellem-maling og slutmaling, hver for sig i flere lag. Tabel 14 viser en oversigt over typiske eksempler malingers anvendelse.

| Anvendelse   | Malingstype               |                    |
|--------------|---------------------------|--------------------|
|              | Fysisk tørrende           | Kemisk hærdnende   |
| Grundmaling  | Blymønje-                 |                    |
|              | Klorkautsjuk-             |                    |
|              | Vinyl-                    |                    |
| Mellemmaling | Klorkautsjuk-             |                    |
|              | Vinyl-                    |                    |
| Slutmaling   | Klorkautsjuk-             | Epoxy/tjære-       |
|              | Vinyl/tjære-              | Polyurethan/tjære- |
|              | Bitumen/tjære-            |                    |
| Andet        | Bitumenbelægninger        | Armeret polyester- |
|              | Ekstruderende belægninger |                    |
|              | Begroningshindrende       |                    |

Tabel 14. Malingers anvendelse.

**Beklædninger**

Der anvendes i dag i svært belastede områder metalbeklædninger, som skal svejses på den egentlige konstruktion for at give den bedste beskyttelse. Der er tale om at anvende et barriersystem af metal, som er korrosionsfast, og det medfører, at den elektriske modstand er lille. Inspektion af den egentlige konstruktion bliver mere besværlig.

Beton kan anvendes som kapper og giver dermed en mekanisk beskyttelse. Beton-armering skal være adskilt fra det øvrige metalliske materiale.

**Valg af metode**

I dette afsnit skal der gives nogle eksempler på valg af beskyttelsesmetoder for marine konstruktioner.

### Havanlæg

Havanlæg omfatter faststående og forankrede konstruktioner samt undervandsanlæg. I bølgeslagssonen bør der anvendes katodisk beskyttelse med offeranoder eller påtrykt strøm kombineret med en overfladebehandling. I særlige tilfælde anvendes en metallisk beklædning. I vandzonen skal der anvendes katodisk beskyttelse med offeranoder evt. sammen med malinger. I bundzonen er det almindeligvis tilstrækkeligt med katodisk beskyttelse med offeranode. Dog kan særlige anerober forhold påvirke valget af beskyttelsessystem.

### Kystanlæg

Kystanlæg omfatter typisk spunsvægge, pælebårne og forankrede konstruktioner. Spunsvægge og pælebårne konstruktioner beskyttes ofte med et korrosionstillæg og katodisk beskyttelse. Man skal være opmærksom på interferensproblemer. Katodisk beskyttelse kombineret med overfladebehandling anvendes til forankrede konstruktioner.

### Røranlæg

Rørsystemer i almindelighed beskyttes fortrinsvis med barriersystemer. Disse kan variere fra simple malingssystemer til egentlige bitumen/tjære/epoxy belægninger. Der anvendes ofte gummibelægninger og metalbeklædninger, og i forbindelse med svejsning skal man sikre sig ved hjælp af beviklinger, svøb etc., at samlingerne er beskyttede. Der suppleres i mange tilfælde med katodisk beskyttelse, og på grund af rørsystemernes store udstrækning er interferensproblemet vitalt.

### Afslutning

Marine konstruktioner omfatter mange eksempler, og der kan ikke gives retningslinier for beskyttelse i alle tilfælde. I det foregående er nogle principielle emner behandlet, og man må herefter i konkrete situationer finde den rigtige løsning sammen med specialister. I den forbindelse skal der gøres opmærksom på, at havnemyndighederne ofte har en stor erafriktion og kendskab til lokale områder. Der findes i dag mange firmaer, som kan tilbyde assistance ved løsning af beskyttelsesopgaver, hvad enten det drejer sig om valg af egnet træsort, valg af beskyttelsessystem eller valg af belægnings- eller beklædningsbehandling.

## LITTERATUR

- 1 Chandler, Kenneth A.: Marine and Offshore Corrosion.  
Butterworths, 1985
- 2 DIF's anvisning for korrosionsbeskyttelse af stålkonstruktioner i marine omgivelser.  
DS/R 464. 1. udgave, juni 1988
- 3 DIF's anvisning for korrosionsbeskyttelse af stålkonstruktioner.  
DS/R 454. 1. udgave, februar 1982
- 4 DIF's norm for stålkonstruktioner.  
DS 412. 2. udgave, april 1983
- 5 DIF's norm for pælefunderede offshorekonstruktioner.  
DS 449. 1. udgave, maj 1983
- 6 Hoffmeyer, Preben: Oversøiske træsorter.  
Teknisk Forlag, marts 1968
- 7 Jensen, Jens Kr. Jehrbo: Træteknologi.  
Instituttet for Bygningsteknik. 4. reviderede udgave, december 1988
- 8 Korrosionscentralen: Korrosionsbeskyttelse af jernspunsvægge.  
Havnekorrosionsudvalget, meddelelse nr. 5, 1974
- 9 Korrosionscentralen: Katodisk beskyttelse, lærebog og regler.  
Korrosionscentralen, 1975
- 10 Rønnow, Carl: Tropisk hårdttræ til vandbygnings- og konstruktionsformål.  
August 1976, 26 sider
- 11 Steenstrup, Else: Pæleorm.  
Naturens verden, januar 1988, p. 1-10
- 12 Steenstrup, Else: Attacks by "Teredo Navalis" in inner Danish waters.  
Videnskabelige meddelelser fra Dansk Naturhistorisk Forening,  
1969:132, p. 199-210

Herudover findes der en righoldig litteratur om korrosion og korrosionsbeskyttelse.











