

WINDTURBINES IN ZEE

Deel V:

Corrosie bij buitengaatse  
constructies

Rapport Nr.: R en D 79216

mei 1979



## SAMENVATTING

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de omgevingsinvloeden op de windturbine-installaties, met name m.b.t. de corrosie van het staal en het beton.

Nadat in hoofdstuk 2 een overzicht is gegeven van de corrosiemechanismen in het algemeen, wordt in hoofdstuk 3 dieper ingegaan op de corrosie van staal t.g.v. het zeewater en de zoute atmosfeer. In hoofdstuk 4 worden deze aspecten t.a.v. beton nader uitgewerkt. Tot slot worden in hoofdstuk 5 de conclusies van dit onderzoek weergegeven.

INHOUD

|   | <u>Pagina</u> |
|---|---------------|
| <u>SAMENVATTING</u> . . . . .                             | i             |
| <u>1.0. INLEIDING</u> . . . . .                           | 1             |
| <u>2.0. CORROSIE-MECHANISMEN</u>                          |               |
| 2.1. Definitie van corrosie . . . . .                     | 2             |
| 2.2. Het corrosie-mechanisme voor staal in zeewater . . . | 2             |
| 2.3. Het corrosie-mechanisme voor beton in zeewater . . . | 2             |
| <u>3.0. CORROSIE VAN STAAL IN ZEEWATER</u>                |               |
| 3.1. Verloop van het corrosieproces . . . . .             | 3             |
| 3.2. Gevolgen voor de constructie . . . . .               | 5             |
| 3.3. Specifieke invloeden van het zeewatermilieu . . . .  | 7             |
| 3.4. Corrosiebescherming van staal in zeewater . . . . .  | 13            |
| <u>4.0. CORROSIE VAN BETON IN ZEEWATER</u>                |               |
| 4.1. Verloop van het corrosieproces . . . . .             | 22            |
| 4.2. Gevolgen voor de constructie . . . . .               | 24            |
| 4.3. Specifieke invloeden van het zeewatermilieu . . . .  | 25            |
| 4.4. Corrosiebescherming van beton in zeewater . . . . .  | 25            |
| <u>5.0. CONCLUSIES</u> . . . . .                          | 27            |

## 1.0. INLEIDING

In het kader van de 2<sup>e</sup> fase van het Nationaal Onderzoekprogramma Windenergie worden door Rijn-Schelde-Verolme N.V. in samenwerking met Hydronamic B.V. de mogelijkheden bestudeerd van de plaatsing van grote aantallen windturbines in zee.

Als onderdeel van deze studie moet worden nagegaan welke invloeden van het zeemilieu op de constructie een negatief effect kunnen hebben. Hiertoe behoort de corrosie van de draagconstructie als gevolg van de werking van het zeewater als corroderend medium, versterkt door een aantal bijkomende mechanismen.

In het rapport wordt een overzicht gegeven van de van toepassing zijnde corrosie-mechanismen, gericht op de in het onderzoekprogramma betrokken materialen van de draagconstructie, t.w. staal en beton. Uitgaande hiervan worden de mogelijke maatregelen ter bescherming van de constructie geïnventariseerd. Deze zullen dienen als basis voor de beschouwingen over het onderhoud van de constructies.

## 2.0. CORROSIE-MECHANISMEN

### 2.1. Definitie van corrosie

In de literatuur wordt corrosie meestal omschreven door de volgende definitie:

'Corrosie is een ongewilde aantasting van constructiemateriaal, meestal uitgaande van het oppervlak, onder invloed van de chemische inwerking van het milieu'

Hierbij is de aanduiding 'chemisch' in de ruimste zin van het woord op te vatten; de corrosie wordt dan niet beperkt tot de electro-chemische corrosie, zoals deze voor metalen veelal geldt, maar wordt dan wel beperkt voor wat betreft de wijze van aantasting.

### 2.2. Het corrosie-mechanisme voor staal in zeewater

Van de verschillende voor staal mogelijke corrosie-mechanismen is, voor de omstandigheden waaronder de constructie in zeewater aan corroderende invloeden onderhevig is, voornamelijk de electro-chemische corrosie van belang.

Voor staal in zeewater zal daarom alleen de electro-chemische corrosie worden beschouwd. Dit geldt ook voor het wapeningsstaal in beton.

### 2.3. Het corrosie-mechanisme voor beton in zeewater

Beton kan in zeewater worden aangetast door een aantal chemische reacties met de cementsteen, welke afzonderlijk zullen worden besproken. De aantasting van het wapeningsstaal is een bijzonder aspect dat bij de corrosie van staal wordt behandeld.

### 3.0. CORROSIE VAN STAAL IN ZEEWATER

#### 3.1. Verloop van het corrosieproces

Bij electro-chemische corrosie is het waarneembare optreden van een elektrische stroom een kenmerkend verschijnsel. Hiertoe moet aan 2 voorwaarden worden voldaan, t.w.:

- er moet een potentiaalverschil zijn tussen enige delen van het constructiemateriaaloppervlak,
- het milieu moet een electrolyt zijn waarbij electriciteits-transport kan plaatsvinden via het milieu.

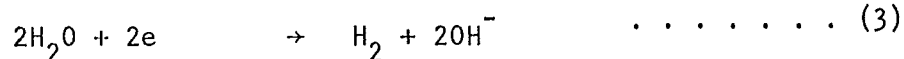
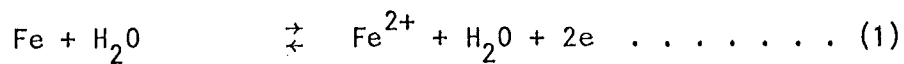
Alleen dan kan er sprake zijn van een anodisch deel en een kathodisch deel van de constructie.

Een potentiaalverschil kan ontstaan indien de samenstelling van het staal aan het oppervlak, dat in contact is met zeewater, verschillen vertoont. Dit kan het geval zijn indien de constructie uit delen is opgebouwd waarbij verschillende staalsoorten zijn toegepast; als zodanig moet ook het verschil tussen lasmateriaal en basismateriaal worden beschouwd.

Een potentiaalverschil kan ook ontstaan indien het milieu van samenstelling verschilt. Bij zeewater in de omgeving van de constructie heeft dit hoofdzakelijk betrekking op het verschil in zuurstofgehalte in de door de golven sterk beroerde bovenlaag van de zee; ook in het dieper gelegen zeewater kunnen echter lokale verschillen optreden bij beschouwing van het water in spleten zoals bv. bij losliggende of gescheurde deklagen ('coatings').

Aan de anode gaat het metaal in oplossing als ijzerionen; hierbij komen elektronen vrij. Aan de kathode reageren zuurstof en water met de elektronen waardoor hydroxylionen worden gevormd.

Eén en ander wordt verduidelijkt door de volgende chemische reacties:



De zuurstofreductie (reactie 2) vindt plaats aan het metaaloppervlak. De reagerende zuurstof moet dus eerst naar dat oppervlak diffunderen. Door de geringe concentratie van dit gas in het water gaat de diffusie langzaam.

Het corrosieverloop hangt dus af van de diffusiesnelheid van de zuurstof en deze is afhankelijk van de volgende factoren:

\* De zuurstof concentratie.

Deze wordt bepaald door het zoutgehalte en de temperatuur van het zeewater. Met toenemend zoutgehalte en stijgende temperatuur daalt de zuurstof concentratie.

\* De stromingsomstandigheden.

De dikte van de diffusiegrenslaag neemt af als de stromingssnelheid van het water toeneemt hetgeen de corrosie bevordert.

\* De oppervlakte toestand van het metaal.

Een bedekking van het oppervlak beïnvloedt de bereikbaarheid van het metaal voor zuurstof. Op onbeschermd staal in zeewater kan een bedekking ontstaan van zee-organismen en van lagen vaste corrosieproducten.

De zee-organismen kunnen verdeeld worden in macro- en micro-organismen. Een macro-organisme, bijvoorbeeld de mossel, kan de corrosie bevorderen door scheurtjes te maken hetgeen bijvoorbeeld in roestvast staal een versnelde aantasting kan veroorzaken.

Micro-organismen, en wel in het bijzonder de anaerobe sulfaatreducerende bacteriën kunnen de corrosiesnelheid verhogen doordat de corrosie kan voortgaan in afwezigheid van zuurstof, hetgeen bijvoorbeeld het geval is onder macro-biologische aangroeiingen.

### 3.2. Gevolgen voor de constructie

De gevolgen van het corrosiemechanisme voor de constructie kunnen worden onderscheiden naar de verschijningsvormen, tw.:

- a. gelijkmatige corrosie
- b. putvormige corrosie
- c. interkristallijne corrosie
- d. spleetcorrosie

Ad a. De meest voorkomende vorm van corrosie is de gelijkmatige aantasting van het gehele oppervlak.

De anodische en kathodische gebieden zijn over het gehele oppervlak gelijkmatig verdeeld. Daardoor is deze vorm de minst schadelijke in zijn gevolgen voor de constructie maar vergt niettemin bescherming. Bij constructies in zeewater zal de gelijkmatige verdeling in ieder geval al spoedig zijn verstoord door de aangroeiing van allerlei organismen waardoor andere vormen van corrosie een overwegende rol gaan spelen.

Ad b. Putvormige corrosie treedt op als er een zodanig ongelukkige verdeling van de anodische en kathodische gebieden is dat het totale oppervlak van de anodische gebieden zeer klein is t.o.v. het totale oppervlak van de kathodische gebieden (polarisatie).



De anodische gebieden zullen daardoor in versnelde mate worden aangetast en kunnen dan leiden tot diepe putvormige aantastingen van het oppervlak. In de put zelf wordt het zuurstofgehalte van het zeewater bovendien verlaagd zodat een extra anodiciteit optreedt; de aantasting van de put gaat dan ook door, ook als de oorspronkelijke aanleiding daartoe is verdwenen. De putvormige corrosie behoort dan ook tot de zeer ernstige vormen van corrosie gerekend te worden en kan optreden in die gevallen waarbij een aangebrachte deklaag (coating) plaatselijk is beschadigd; het middel is dan erger dan de kwaal. Bij de keuze van de deklaag moet daarom rekening worden gehouden met deze verschijningsvorm. Ook de aantasting van het wapeningsstaal van betonconstructies ter plaatse van scheuren in het beton wordt gerekend tot deze vorm van corrosie.

Ad c. Onder invloed van mechanische spanningen (eigenlijk vervormingen) kunnen ook anodische gebieden ontstaan. Het is bekend dat plastisch vervormd materiaal aan de positief vervormde zijde (trek) een anodisch gedrag vertoont t.o.v. het onvervormde materiaal en omgekeerd aan de negatief vervormde zijde (druk) een kathodisch gedrag. Dit laatste kan bv. door hameren of kogelen wel speciaal worden bewerkstelligd.

Vooraf bij gelaste constructies zijn echter materiaalspanningen onvermijdelijk. Als gevolg daarvan zullen aan de kristalgrenzen van het materiaal, dus zeer lokaal, anodische gebieden optreden waarbij het totale oppervlak daarvan zeer klein is t.o.v. het gehele oppervlak. Dit effect blijkt bovendien te worden versterkt door kristalsegregatie waardoor, in het geval van staal, het koolstofgehalte bij de kristalgrenzen hoger is dan gemiddeld; dit alleen al werkt de anodiciteit van de kristalgrenzen in de hand.

Het gevolg is dat de kristalgrenzen worden aangetast waarbij dan de verschijningsvorm interkristallijne corrosie ontstaat. Voor statisch belaste constructies is deze vorm reeds zeer schadelijk, maar voor dynamisch belaste constructies leidt dit tot versnelde vermoeiingsverschijnselen zodat bescherming hoogstnoodzakelijk is voor de levensduur van de constructie.

- Ad d. Zoals uit de benaming reeds duidelijk zal zijn, betreft spleetcorrosie de corrosie van het materiaal in spleten. Deze is in hoofdzaak het gevolg van een zuurstofarme omgeving in de spleet waardoor aldaar anodiciteit optreedt. Hiermede dient rekening te worden gehouden bij verbinding van constructiedelen zoals lassen of boutverbindingen. Een eenvoudige oplossing daarbij is volledig rondom lassen dan wel dichtsmen (kitten) van de spleten. Deze vorm treedt echter ook op bij de aangroeiing van allerlei organismen, zoals schelpdieren en weekdieren, of van micro-organismen, zoals algen en anaerobe bacteriën. Bij een goede deklaag zijn de gevolgen voor de constructie niet van ernstige aard, maar onderhoud van de constructie blijft wel noodzakelijk.

### 3.3. Specifieke invloeden van het zeewatermilieu

De corrosie van metalen in zeewater wordt beïnvloed door een aantal milieufactoren, die hierna besproken worden.

- De chemische samenstelling van het zeewater.  
Het zoutgehalte van open zeeën varieert tussen 32 en 36 g/kg. De definitie van het zoutgehalte is de totale hoeveelheid vaste stof in grammen in een kilogram zeewater, wanneer alle carbonaten in oxiden zijn omgezet, broom en jodium vervangen zijn door chloor en alle organische stoffen geheel geoxideerd zijn.

De invloed van het zoutgehalte op de corrosiesnelheid is weergegeven in figuur 1. De corrosiesnelheid neemt eerst toe bij toenemend zoutgehalte door een verhoogd geleidingsvermogen; daarna loopt de corrosiesnelheid terug bij toenemend zoutgehalte tengevolge van een afnemend zuurstofgehalte.

Het geleidingsvermogen van zeewater is maximaal 250 maal hoger dan dat van andere soorten water. Als gevolg hiervan is niet alleen de corrosiesnelheid veel hoger maar zullen ook gebieden bij de corrosie-reacties betrokken kunnen worden op onderling grote afstanden in de constructie.

- De pH van zeewater ligt tussen 8,1 en 8,3 en geeft de balans weer tussen de basische ionen in het water en de kooldioxide van de atmosfeer. Wanneer de concentratie van kooldioxide wordt verlaagd door de processen van fotosynthese van de planten, kan de alkaliteit oplopen tot een pH-waarde van 9. Ontbinding van zee organismen, resulterend in een verlies van zuurstof en vorming van zwavelwaterstof, verlaagt de pH tot beneden 8. Gezien het feit dat deze reacties op verschillende diepten plaatsvinden, kunnen hoge pH-waarden gevonden worden daar waar fotosynthese plaatsvindt, dicht bij het oppervlak, en lage pH-waarden daar waar het zuurstofgehalte minimaal is, op diepten waar ontbinding van organismen plaatsvindt. Het lagere zuurstofgehalte blijkt meer effect te hebben op het verminderen van corrosiesnelheid dan de lagere pH-waarde heeft op het verhogen van de corrosiesnelheid.
- Gezien het feit dat zuurstof een overheersende rol speelt in kathodische reacties en bijdraagt tot het ontwikkelen en instand houden van de passiviteit van roestvast staal en de vorming van beschermende oxidelaagjes op metalen, zoals aluminium en titaan, is het zuurstofgehalte van groot belang bij de corrosie van metalen. Bij de meeste metalen, anders dan bij aluminium, zal het lagere zuurstofgehalte op grote diepten resulteren in lagere corrosiesnelheden.

Het normale profiel van corrosie van onbeschermd staal, zoals in het geval van palen of ondersteunende poten van buitengaats olieboorplatforms, is te zien in fig. 2. De maximale gevoeligheid voor corrosie van metaal in de spatzone, juist boven het waterniveau, wordt veroorzaakt doordat het oppervlak in deze zone in voortdurend contact is met zeewater, dat sterk belucht is.

De mate van maximale corrosie in de spatzone wordt bepaald door de omstandigheden van de zee en de temperatuur van de atmosfeer.

In koudere klimaten zal de corrosiesnelheid ondanks een hoger zuurstofgehalte lager zijn dan in warmere klimaten. Echter wanneer er meer golfslag is met meer opspatten zal de corrosiesnelheid hoger zijn.

- Zand, zout en andere scherpe deeltjes, zwevend in zeewater, kunnen beschadiging door stromend water vergroten. Dit omvat onder andere de mechanische slijtage als ook het vaak grotere effect van het verwijderen of het voorkómen van de vorming van wat anders corrosiebeschermende produkten zouden zijn.
- De meest belangrijke organismen die de corrosiesnelheid in zeewater kunnen beïnvloeden, zijn de sulfaatreducerende bacteriën. Deze organismen gedijen onder anaerobe condities die ontstaan door dichte aangroeiingen en volumineuze corrosieprodukten, die gevormd worden op staal in zeewater. De sulfaatreducerende bacteriën spelen een rol in de kathodische reacties door de reductie van sulfaat tot sulfiet als gevolg van de opname van elektronen die bij de anodische reactie zijn vrijgekomen. Gebleken is bovendien dat deze bacteriën rechtstreeks waterstof kunnen opnemen, dat vrijgekomen is bij de kathodische reactie. Daar het sulfietlaagje dat gevormd is een potentiaal verschil heeft ten opzichte van het basis materiaal, kan er een tweede effect van de bacteriën optreden door putvormige corrosie te bevorderen op plaatsen waar discontinuïteiten in de sulfietlaagjes aanwezig zijn.

- Een verhoging van de zeewatertemperatuur bevordert de corrosie, ondanks het lagere zuurstofgehalte, door de versterkende effecten die de temperatuur heeft op andere reacties. Figuur 3 laat dit effect op de corrosiesnelheid van staal zien.
- Afhankelijk van de materiaalklasse kan een toename in de stromings-snelheid of turbulentie de corrosiesnelheid doen toenemen dan wel afnemen. Het effect van de snelheid wordt voor staal gegeven in fig. 4. Zo zal bijvoorbeeld roestvast staal corroderen bij lage en niet bij hoge snelheden. Het tegengestelde is het geval bij admiraliteitskoper. Materialen, zoals NiCrMo, hebben wezenlijk volledige weerstand tegen zowel gelijkmatige corrosie als putvormige corrosie in het gehele snelheidsgebied. De nikkel-roestvaste staalsoorten zijn bevredigend bij hogere snelheden, maar moeten beschermd worden tegen putvormige corrosie in stilstaand water.
- De corrosieproblemen bij voorgespannen beton constructies doen zich in de meeste gevallen voor in de delen juist boven het vloedniveau en wel in die zone waarin het beton en het ingebedde staal gescheiden liggen. Dit gebied van het materiaal is grotendeels opgebouwd uit een laag gesegregeerde kalk; deze laag zal de elektrodekaracteristiek van het metaal bepalen.  
Het effect op de kathodische reductie van zuurstof is duidelijk daar een groot gedeelte van het metaaloppervlak gevrijwaard is van de directe aanwezigheid van zuurstof. De invloed op het anodisch gedrag van het staal is eveneens duidelijk daar de omgevende kalk voorziet in een reservoir aan  $\text{OH}^-$  ionen in de directe omgeving van het metaal. Met andere woorden de neiging tot hydrolyse van de anodische reductieprodukten om de lokale pH-waarde te verlagen zal de aanwezige kalk ontbinden, daarbij vormend een lokale buffer rond de anodische gebieden. Het staat vast dat de anodische passivering van staal sterk wordt vergemakkelijkt in de aanwezigheid van basische buffers.

Corrosie wordt normaal waargenomen alleen onder condities waarbij het materiaal onderworpen is aan afwisselend bevochtigen en drogen en door verdamping een hoog lokaal zoutgehalte in het met zeewater verzadigde beton is ontstaan. Als het directe contact tussen kalklaag en metaal plaatselijk kan afbreken bestaat de mogelijkheid dat putcorrosie zal optreden.

Uitgevoerde proeven op gebogen betonbalken en onbelaste vlakke betonplaten, waarbij de voornaamste variabelen waren de dikte van de beton deklaag, het spanningsniveau van het staal, de aan- of afwezigheid van scheuren, de water/cement verhouding, de staafdiameter en de voorspanning van het wapeningsstaal, leidden na 2 jaar expositie tot de volgende conclusies:

- Belangrijk voor de corrosieweerstand is de water/cement verhouding van de beton deklaag.
- De nominale dikte van de beton deklaag is afhankelijk van de staafdiameter.
- Het spanningsniveau draagt enigszins bij tot de verhoging van de corrosiegevoeligheid.

Beproevingen aan St52 en roestvaste staalsoorten hebben geleid tot de volgende conclusies:

- voor St52 (0,18% C, 1,4% Mn 0,35% Si) na 2 jaar beproeving:
  - a. in de getijde zone, onbeschermd: dikteafname 0,33 mm/jaar.
  - b. op 50 m diepte, onbeschermd: dikteafname 0,15 mm/jaar.
  - c. kathodisch beschermd: vrijwel geen aantasting.
- voor RVS (2 ferritische chroomstalen, 5 austenitische chroomnikkelstalen, 1 austenitisch mangaanstaal) na 1 jaar beproevingen in de getijdezone, op 50 m diepte en in de omgeving van de kust:
  - a. gedrag van CrNi-stalen is beter dan de overige staalsoorten.
  - b. toevoeging van 2% Mo aan CrNi-stalen is voldoende om corrosie te onderdrukken (uitgezonderd spleetcorrosie).

- c. toevoeging van 4,7% Mo gaf geen spleetcorrosie.
- d. mangaanstaal wordt ernstig aangetast op 50 m diepte, echter minder in de getijdezone.

De invloed van de legeringselementen bij immersieproeven is onderzocht waarbij bleek dat:

- Mn - geringe gunstige uitwerking; de gangbare percentages van 1 à 1,5% lijken niet schadelijk.
- Si - idem als Mn.
- P - ongunstige werking neemt op de lange duur toe.
- S - mogelijk dezelfde trend als P.
- Cr - bij korte expositietijden gunstig; omslag na 4 à 5 jaar.
- Mo - aanvankelijk ongunstig, bij lange expositietijden, meer dan 4 à 5 jaar sterk gunstige werking.
- Cu - kan beter niet opzettelijk toegevoegd worden.
- Ni - geen verbetering of verslechtering van de corrosiesnelheid.

terwijl van de elementen Sb, As, Be, Bi, Pb, Nb, W, Ta, Sn en V alleen Be (0,4%) een veelbelovend resultaat te zien gaf.

Een ander onderzoek geeft aan dat de grootste corrosiestabiliteit van constructiestaal in zeewater ligt bij 3% Cr en dat met een verdere toename van het chroomgehalte de stabiliteit weer afneemt.

Het legeren van 2% Cr staal met titaan is tot een gehalte van 0,3% Ti zinvol. Daarentegen geeft dit onderzoek aan dat P een duidelijk positieve invloed heeft op de verlaging van de corrosiesnelheid van staal in zeewater en in de spatzone en dat de werking versterkt wordt door de toevoeging van Cu.

Uit het bovenstaande is wellicht de conclusie te trekken dat, om een bepaalde materiaalkeuze te maken, eerst langdurige proeven genomen dienen te worden op die plaatsen, waar de constructies gesitueerd zullen worden.

### 3.4. Corrosiebescherming van staal in zeewater

De electrochemische aard van de in het voorgaande beschouwde corrosieprocessen legt de grondslag om corrosie te voorkomen door elektrische stromen van buitenaf op te leggen om de normale electrochemische corrosiereacties tegen te werken.

Voor iedere legering of metaal kan, ten opzichte van een referentie-elektrode, de potentiaal bepaald worden (fig. 5).

Vanuit een praktisch oogpunt is de waarde van  $-0,85V$  (geaccepteerd als criterium voor de kathodische bescherming van staal) ongeveer dezelfde als die welke zou resulteren uit een potentiaalverschil van  $-0,2V$  ten opzichte van het open circuitpotentiaal van staal in belucht zeewater, te weten  $-0,62V$ .

De potentiaal van anodische oppervlakken van staal, dat in zeewater corrodeert, is  $-0,78V$ . Deze waarde is belangrijk daar de bron van de beschermende stroom een potentiaal niveau moet hebben dat mogelijk maakt, dat de stroom loopt van de bron naar het staal met een anodische potentiaal van  $-0,78V$ .

Zonder kathodische bescherming moeten de elektronen die met zuurstof reageren aan de kathodische oppervlakken, geleverd worden door corrosie aan de anodische oppervlakken. Daar extra elektronen toegevoegd worden door een externe bron wordt de zuurstof-reductiereactie voorzien van deze extra elektronen en hierdoor worden minder elektronen gevraagd van de oorspronkelijk anodes, waarvan er sommige veranderen in kathodes. De stroom die de kathodische oppervlakken bereikt van de resterende anodes, vermindert als de externe stroom wordt verhoogd, zodat de totale kathodische stroomdichtheid niet wezenlijk verandert tot dat alle anodes opgeheven zijn waarna de stroomdichtheid op het gehele metaal oppervlak zal toenemen.



Het is echter theoretisch mogelijk dat, wanneer de toegepaste stroomdichtheid niet voldoende is voor totale kathodische bescherming en het kathodisch gebied vergroot wordt van 50 tot 90% van het totale oppervlak, een toestand gecreëerd is waarbij onderbreking van de kathodische bescherming tot een versnelde corrosie kan leiden van de resterende anodes.

Daar de corrosiviteit van het water wordt vergroot door hogere snelheden en zuurstofconcentraties, en hogere temperaturen tot hogere corrosiesnelheden leiden, zal de stroom, nodig voor kathodische bescherming, ook toenemen.

Als referentie elektrode kan puur zink fungeren. Van zink mag verwacht worden dat het een potentiaal kan handhaven van  $-1,03V$ . Deze potentiaal wordt nauwelijks beïnvloed door veranderingen in watersnelheid, temperatuur, zuurstofgehalte enz. Op basis van wat wordt beschouwd als een kritische potentiaal voor kathodische bescherming, nl.  $-0,85V$  minimaal, ten opzichte van een vaste referentie elektrode, zal de kritische potentiaal met zink als referentie elektrode  $\approx +0,2V$  zijn.

Er zijn twee principiële bronnen van beschermende stromen, te weten:

- a. opofferingsanode
- b. anodes die stroom leveren van een externe bron zoals een batterij, een generator etc.

Opofferingsanodes kunnen gebruikt worden daar waar geen stroomvoorziening aanwezig is. Echter de stroom is afhankelijk van het anode oppervlak; indien dit erg groot is kan dit problemen opleveren.

Bij anodes die stroom leveren, de zgn. opgedrukte stroomsystemen, kan de beschermende stroom, als voldoende spanning aanwezig is, opgevoerd worden tot iedere gewenste waarde zolang het anodemateriaal intact blijft. Ten opzichte van de opofferingsanodes is voor de opgedrukte stroomsystemen meer technisch en geoefend personeel nodig voor het toezicht.

Een opofferingsanode kan van ieder metaal zijn, zolang het maar voldoende anodisch is ten opzichte van het te beschermen metaal. Vanuit praktisch oogpunt zijn opofferingsanodes van zuiver zink of van magnesium- en aluminiumlegeringen.

De keus is gebaseerd op economische gronden; de geleidbaarheid van het zeewater, de benodigde potentiaal voor de stroomverdeling en mogelijk bijkomende gevolgen zoals het gevaar van polarisatie tot potentiaal waarden die kunnen leiden tot alkalische aantasting, waterstofverbrossing of schade aan organische coating. De bijkomende effecten kunnen optreden met magnesium- en bepaalde aluminiumlegeringen, die ontworpen zijn om te werken op een lager potentiaalniveau dan zink als de beschermende stroombron. Wanneer zink als opofferingsanode gebruikt wordt, dient het een hoge zuiverheidsgraad te hebben. Onderzoek heeft aangetoond dat het ijzergehalte in het zink niet hoger mag zijn dan 0,001% daar hierdoor de stroomlevering omlaag gaat omdat een hoger gehalte een corrosielaagje op het zink doet ontstaan waarvan de weerstand hoog is.

Echter door toevoeging van bepaalde legeringselementen, zoals cadmium en aluminium, kan de marge van het ijzergehalte verhoogd worden. Het benodigde zinkoppervlak om het staal te beschermen is afhankelijk van een aantal omgevingsfactoren, die de corrosie van staal beïnvloeden, en van de werkzaamheid van beschermende lagen, die het oppervlak van het staal dat in aanmerking komt voor bescherming, reduceren.

Van een maximaal werkende zinkanode mag verwacht worden dat deze zich opoffert met een waarde van 20 mm per jaar van ieder oppervlak.

De anodes, die gebruikt worden bij opgedrukte stroomsystemen, kunnen van gewoon staal zijn; deze corroderen echter en moeten periodiek vervangen worden. Meer gebruikelijk is dan ook om min of meer permanente anodes te gebruiken zoals platina, met platina bekleed titaan, tantaal of niobium, lood-zilver legeringen, silicium-ijzer legeringen en grafiet.

Platina wordt uitgebreid gebruikt als anode voor opgedrukte stroomsystemen; het gewichtsverlies is namelijk niet noemenswaardig tot stroomdichtheden van  $0,5 \text{ A/cm}^2$ . Het platina kan gebruikt worden in de vorm van een folieschijf ondersteund door een glasvezel-versterkte polyester drager. Men dient echter rekening te houden met het feit, dat platina wel corrodeert indien gebruik wordt gemaakt van wisselstroom.

Lood, gelegeerd met ongeveer 2% zilver, kan dienen als een effectieve anode en kan worden gebruikt bij hoge anodische stroomdichtheden.

Silicium-ijzer anodes functioneren eveneens goed; echter deze legering is bros waardoor het beschermd dient te worden tegen stoten en dergelijke, hetgeen eveneens het geval is bij grafiet anodes. Bij de grafiet anode is echter de stroomdichtheidslimiet voor een bepaalde levensduur lager.

Bij de opgedrukte stroomsystemen moet voorts de omgeving van de anode worden beschermd om te hoge kathodische stroomdichtheden te vermijden. Hoge stroomdichtheden kunnen namelijk beschermende coatings, bijvoorbeeld verf, beschadigen.

Naast de kathodische bescherming is de bescherming van het staal mogelijk door het te bedekken met een deklaag die bestand is tegen de invloeden van de zee. Deze laag kan zowel een verflaag zijn als ook een synthetische harslaag. Uiteraard dient deze deklaag te voldoen aan een aantal eisen. Deze kunnen als volgt worden samengevat:

1. Bestendigheid tegen zeewater.

De bestendigheid tegen zeewater geldt zowel voor de deklaag zelf als ook de hechting op de ondergrond. De deklaag mag niet zwellen, verweken of geleidelijk oplossen, niet scheuren of bladderen en loslaten. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met in het zeewater voorkomende zouten, zuren, basen en olieproducten.

2. Bestendigheid tegen weersinvloeden.

Bestendigheid tegen weersinvloeden is uitermate belangrijk omdat de deklaag continu wordt blootgesteld aan weer en wind in een zeeklimaat. De deklaag moet bestand zijn tegen de afwisselende opwarming door de zon en afkoeling door water gedurende vele seizoenen. Daarbij dient de deklaag zijn beschermende eigenschappen te behouden zonder te verbrossen of te scheuren.

3. Weerstand tegen ionendoorgang.

De deklaag dient een lage waterabsorptie te hebben en vrijwel geen waterdoorlaatbaarheid. Daarnaast is van belang dat de deklaag een grote weerstand biedt tegen doorlating van ionen van de in het zeewater aanwezige zouten. Dit houdt ook in dat de weerstand tegen osmose en electro-endosmose groot moet zijn omdat zich anders op de hechtvlakken een concentratie vormt van de zouten waardoor bladders van de deklaag ontstaat.

4. Weerstand tegen elektronendoorgang.

De deklaag dient een hoge diëlectrische weerstand te bezitten om de doorgang van vrije elektronen te verhinderen.

5. Weerstand tegen bacterie-aangroeiingen.

Bacteriën kunnen de harsachtige deklaag vernielen door deze als voedsel te gebruiken of als een plaats waar door neerslag van verontreinigingen in het water condities ontstaan die hun groei bevorderen. Zij kunnen op hun beurt als voedsel dienen voor macro-organismen die de deklaag kunnen aantasten.

6. Bestendigheid tegen erosie.

De deklaag moet enerzijds slijtvast zijn om bestand te zijn tegen schurende werking van zand in het zeewater; anderzijds wordt voldoende elasticiteit vereist en schokbestendigheid om bestand te zijn tegen aanspoelende voorwerpen en tegen cavitatie door de stromingen.

## 7. Overige eigenschappen.

Van algemene aard zijn de eisen t.a.v. de eenvoud om deklagen aan te brengen en te onderhouden. Dit betekent ook dat beschadigingen afdoende gerepareerd kunnen worden.

Tenslotte dient de levensduur voldoende lang te kunnen worden gegarandeerd.

Momenteel worden synthetische deklagen het meest gebruikt voor de bescherming van corrodeerbare oppervlakken. Zij worden primair gemaakt met harsen of bindmiddelen.

Er zijn twee principiële denkwijzen over de manier waarop deklagen het oppervlak beschermen; de methode wordt vaak bepaald door het deklaagmateriaal. De eerste methode is gebaseerd op het concept van ondoordringbaarheid en de tweede methode op het gebruik van corrosiewerende pigmenten (z.g. inhibitors) in de grondlaag of in de deklaag zelf. Bij de eerste methode moet de deklaag niet alleen ondoordringbaar zijn voor lucht, zuurstof, water en kooldioxide maar ook het doorlaten van ionen, elektronen of electriciteit tegengaan. Zo'n deklaag moet inert zijn en niet reageren met chemicaliën, basen, zuren en zouten. Bovendien moet de laag een zeer lage waterdampdoorlaatbaarheid hebben en een zeer goede hechting met de onderlaag opdat vocht, geabsorbeerd door de laag, in evenwicht blijft met de waterdamp aan de buitenzijde. Er zal geen corrosie kunnen plaatsvinden gezien het feit dat zuurstof en water niet in contact kunnen komen met het staal, er geen vorming van anodes of kathodes is omdat er geen vrije vochtlaag aanwezig kan zijn en bovendien een elektronenstroom voorkomen wordt door de diëlectrische eigenschappen van de deklaag. Een belangrijke voorwaarde voor de levensduur van de deklaag is dat een zeer goede hechting op het staaloppervlak aanwezig is omdat anders onder de deklaag oppervlakken ontstaan waar waterdamp kan condenseren of omdat de dampdruk in kleine ruimten hoger is dan de waterdruk, waardoor blaren en eventueel scheuren in de deklaag kunnen ontstaan.

In het geval van corrosiewerende pigmenten in de deklaag of de grondlaag wordt corrosie tegengegaan doordat de pigmenten onder invloed van de vochtigheid of de waterdamp, voldoende ioniseren om met het staal een reactie aan te gaan en het staal passief te houden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat het water geabsorbeerd wordt en door de harslaag dringt, waarbij passiverende ionen voor het staal worden vrijgemaakt.

De pigmenten zijn meestal metaalzouten op basis van chromaten, zoals zinkchromaat, loodchromaat, loodsiliciumchromaat of strontiumchromaat. Het mechanisme van het tegengaan van corrosie is daarbij gebaseerd op verscheidene van elkaar te onderscheiden principes:

- a. Bij het gebruik van chromaat pigmenten dringt het door de deklaag geabsorbeerde water door tot de grondlaag die de chromaten bevat. De chromaten worden verspreid en vastgehouden in de grondlaag. Aan het metaaloppervlak is een dunne laag chromaten. Door de absorptie van water wordt een zeer kleine hoeveelheid van het chromaatpigment opgelost zodat enkele ionen worden gevormd. Deze reageren met het staal. De ijzeroxide en chromaat zijn voldoende inert om een verdere reactie met water aan te gaan, hiermee een passieve toestand op het ijzeroppervlak scheppend. De ijzerchromaat laag is sterk hechtend daar het een chemisch reactieprodukt van het ijzer zelf is.
- b. Het loodpigment wordt gebruikt als een grondlaagpigment. De corrosiewerende werking kan tweërlei zijn. De eerste lijkt op die als bij de chromaten terwijl de tweede geschiedt door de vorming van kleine basische hoeveelheden op het metaal-oppervlak hetgeen op zichzelf corrosie onmogelijk maakt.

c. Metallisch zink in grondlagen is een van de meest toegepaste methoden om corrosie te voorkomen. Het mechanisme in dit geval is die van de opofferingselektrode. Zink is ten opzichte van staal of ijzer anodisch. Als er in de deklaag een scheur is en water aanwezig is, gaat het zink in de vaste grondlaag in oplossing i.p.v. het ijzer, met andere woorden kathodische bescherming met weinig of geen corrosie.

De beide systemen, het inerte ondoordringbare systeem en het corrosiewerende systeem, zijn voor een lange tijd (15 - 20 jaar) effectief.

Het inerte ondoordringbare systeem gedraagt zich het beste in gebieden waar de deklaag continu onderworpen is aan vocht, of onderdompeling met weinig of geen afschuring. Het corrosiewerende systeem voldoet het beste daar waar de deklaag onderworpen wordt aan het weer, atmosferische invloeden en hoge vochtigheid, alsook aan afslijting en schade.

In fig. 6 worden de gebieden aangegeven waar de beide systemen gebruikt worden bij buitengaatse constructies. De spatzone en de getijdezone zijn zowel onderworpen aan onderdompeling als aan weersinvloeden.

Dit gebied is zeer gevoelig voor corrosie en dient een zeer goede bescherming te hebben. Een combinatie van een anorganisch zinkbevattend middel als grondlaag en een aantal doorlaatvaste lagen als deklagen geeft een goede bescherming van dit gebied.

Een middel dat bijzonder veel gebruikt wordt bij schepen, kustinstallaties en buitengaatse constructies is een vinyl deklaag daar het toepasbaar is in gebieden met ernstige corrosie inclusief atmosferische condities en continue onderdompeling.

Daarnaast zijn er nog altijd harsen, epoxyharsen, kool-teer-epoxyharsen, gechloreerde rubbers en anorganische zinkbevattende middelen en poly-urethaan.

In de tabellen 1 t/m 7 worden de eigenschappen hiervan gegeven. Een voordeel van de anorganische zinkbevattende middelen is dat zij kunnen dienen als een corrosiewerende basislaag voor organische deklagen, hetgeen de levensduur van een vinyl, gechloreerde rubber of epoxyhars met vele jaren verlengt.



#### 4.0. CORROSIE VAN BETON IN ZEEWATER

##### 4.1. Verloop van het corrosieproces

Beton kan in zeewater worden aangetast door een aantal chemische reacties met de cementsteen, naast invloeden van fysische en van mechanische aard.

Bij de chemische aantasting van beton gaat het voornamelijk om de aantasting van de cementsteen omdat de bestanddelen zand en grind in chemisch opzicht nagenoeg inert zijn.

Bij de verhouding van de cement is een deel van de calciumsilicaten door hydratatie omgezet in calciumhydroxide waardoor o.m. in het beton een sterk alkalisch milieu heerst wat van voordeel is voor het wapeningsstaal.

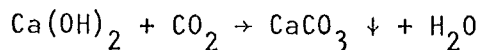
De aantasting van beton door chemische reacties uit zich in hoofdzaak door de reacties met het calciumhydroxide.

In de spatzone van de constructie vindt z.g. carbonatatie het sterkste plaats. Hieronder wordt het proces verstaan waarbij het calciumhydroxide reageert met het zuurvormende kooldioxide.

Dit is in de lucht altijd wel aanwezig in een concentratie van ongeveer  $60 \text{ mg/m}^3$ . De reactie is maximaal bij een relatieve vochtigheid van ca 55%. In de spatzone wordt aan beide voorwaarden voldaan.

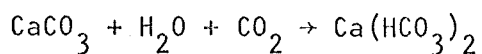
Het carbonatatieproces verloopt nu als volgt:

Het calciumhydroxide in de cementsteen wordt door het in de lucht aanwezige kooldioxide omgezet in het onoplosbare calciumcarbonaat volgens de reactie:



Door de optredende volumevermeerdering van 17% worden de poriën in het beton gevuld waardoor de reactie vanaf het betonoppervlak wordt afgeremd. Bij dichte beton komt deze inwerking van de kooldioxide op het beton zelfs tot stilstand. Dit proces veroorzaakt overigens een afname van de alkaliteit wat van nadeel kan zijn voor de staalwapening als dit zich dicht bij het betonoppervlak bevindt.

Bij een voortgaande inwerking van het kooldioxide bestaat de mogelijkheid dat de gevormde calciumcarbonaat wordt omgezet in een oplosbaar bicarbonaat volgens de reactie:

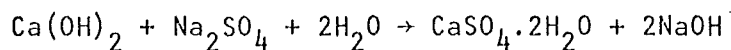


Het aldus gevormde bicarbonaat wordt dan door het zeewater weggespoeld zodat dan sprake is van corrosie van het beton.

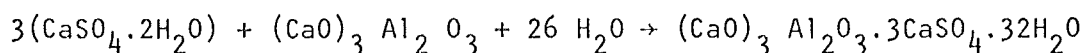
Naast het corrosieproces door carbonatatie zijn nog een aantal andere stoffen schadelijk voor beton. Hiertoe behoren vooral de sulfaatvormende stoffen voor het beton te worden gerekend en de chloriden voor het wapeningsstaal.

Vooraf door de verbranding van zwavelhoudende steenkolen en zware olieën kan in de bovenlaag van de zee en in regenwater het zuurvormende zwaveldioxide worden aangetroffen, al of niet omgezet tot natriumsulfaat of zwavelzuur.

Dit reageert met het calciumhydroxide van de cementsteen volgens de reacties:



Dit wordt gevolgd door een reactie met het in de cement aanwezige tricalciumaluminaat volgens:



De gevormde complexe verbinding wordt ettringiet (of cementbacil) genoemd; in het algemeen wordt gesproken over sulfaataantasting.

Chloriden hebben een specifieke eigenschap de electro-chemische corrosie te bevorderen. Het is daardoor van belang voor de mogelijke aantasting van het wapeningsstaal zoals in het vorige hoofdstuk reeds is besproken.

#### 4.2. Gevolgen voor de constructie

De corrosie als gevolg van de inwerking van kooldioxide in de lucht, in de bovenlaag van de zee en in regenwater op het beton heeft weinig invloed op de sterkte van de betonconstructie zolang de staalwapening niet wordt aangetast door de verlaagde alkaliteit. Bij gebruik van een goede kwaliteit beton en een grote dichtheid van het oppervlak bedraagt de indringdiepte van de carbonatatie niet meer dan 1 à 2 cm na 2 à 3 jaar blootstelling in de spatzone.

De corrosie als gevolg van de sulfaataantasting kan zeer ernstige gevolgen hebben voor de constructie. Bij de vorming van de complexe verbinding ettringiet treedt een zwelling op dat met zeer grote inwendige spanningen in het beton gepaard gaat zodat zelfs volledig uitgehard beton van binnenuit zal scheuren.

De integriteit van de betonconstructie wordt daarvoor wezenlijk ongunstig beïnvloed. Een positieve invloed op de sulfaataantasting is overigens gebleken van de chloriden bij gelijktijdige aanwezigheid zolang althans het wapeningsstaal buiten de invloed daarvan blijft.

#### 4.3. Specifieke invloeden van het zeewatermilieu

Uit het voorgaande valt reeds af te leiden dat juist de spatzone van de betonconstructie het meest onderhevig is aan corrosie door zowel de carbonatatie als de sulfaataantasting. Naast de chemische belasting van het beton door de aanwezigheid van kooldioxide en zwaveldioxide uit de lucht vindt hier tevens een voortdurende mechanische belasting plaats door het zeewater dat in zijn gevolg lijkt op cavitatie-erosie.

Van belang is dat het hoge chloridegehalte van zeewater remmend blijkt te werken op de sulfaataantasting.

#### 4.4. Corrosiebescherming van beton in zeewater

De beste bescherming van het beton tegen corrosie in zeewater wordt bereikt door de volgende maatregelen:

1. Toepassing van een goede kwaliteit beton met een hoge dichtheid.  
Dit kan worden bereikt door de gradering van de toeslagstoffen zeer nauwkeurig vast te leggen, een lagere water-cement verhouding dan 0,4 toe te passen en te zorgen voor een zeer goede verdichting van het beton.
2. Toepassing van cement met een laag tricalciumaluminaatgehalte zoals b.v. Hoogovencement met een goede cementklinker-slak verhouding.

3. Beperking van de kans op scheurvorming door constructieve maatregelen te treffen.

Hiermede wordt beoogd het betonoppervlak te vrijwaren van trekspanningen door de op trek belaste delen voor te spannen en door een zodanige vormgeving dat de constructie vrijwel overal op druk belast wordt.

4. Bescherming van het wapeningsstaal door verzinken.

Vele andere deklagen verminderen de hechting met het beton zodat zink wordt aanbevolen.

5. Vermijden van voorspanning-zonder-aanhechting om bij eventuele scheurvorming de scheurwijdte tot een minimum te beperken.

## 5.0 CONCLUSIES

Op de Noordzee kunnen, zoals blijkt uit eerdere onderzoeken, grote aantallen windturbines geplaatst worden. De onderbouw van deze constructies kan van staal zijn als ook van voorgespannen beton. In beide gevallen dient het constructie materiaal beschermd te worden tegen de invloeden van de zee en de atmosfeer.

De invloeden van de zee kunnen bestaan uit corrosie en erosie tengevolge van het zoutgehalte en de stromingssnelheid en aangroeiingen zoals algen, mosselen, e.d. De atmosferische invloed is bijvoorbeeld corrosie tengevolge van de luchtvochtigheid, het zoutgehalte van de lucht en het gehalte aan kooldioxide en zwaveldioxide.

In het overgangsgebied, de zogenaamde getijde- en spatzone, dient het constructie materiaal evenwel tegen zowel de invloeden van de zee als van de atmosfeer beschermd te zijn.

Een staalconstructie kan tegen corrosie in zeewater beschermd worden door kathodische bescherming al dan niet gecombineerd met opgedrukte stroomsystemen. De bescherming kan ook geschieden door het aanbrengen van één of meerdere deklagen. Combinaties van genoemde beschermingsmaatregelen zijn eveneens mogelijk.

Onder atmosferische omstandigheden kan de constructie alleen beschermd worden door het aanbrengen van deklagen, daar de kathodische bescherming tengevolge van het ontbreken van een elektrisch geleidende oplossing niet kan werken. Het aanbrengen van deklagen verdient in het geval van de windturbine-installaties echter de voorkeur boven de kathodische bescherming, daar de kathodische bescherming om de ongeveer 5 jaar onderhoud noodzakelijk maakt en de deklagen pas na 15 à 20 jaar.

Bij kathodische bescherming met opgedrukte stroom dient echter de stroom met behulp van een regelsysteem bewaakt te worden, daar de mogelijkheid zich kan voordoen dat de stroom uitvalt, waardoor een zodanig potentiaalverschil kan ontstaan dat corrosie optreedt. In dit geval zou dan per constructie een regelsysteem aangebracht dienen te worden.

Een voordeel is, dat voor het systeem met opgedrukte stroom een stroombron aanwezig is.

De deklagen voor de onderbouw, de bovenbouw en het gedeelte dat zich in de spat- en getijdezone bevindt, zijn in géén geval dezelfde daar zij aan verschillende eisen dienen te voldoen.

De bescherming van de staalwapening in beton constructies kan met behulp van kathodische bescherming plaatsvinden. Dit wordt echter pas essentieel na 1 à 2 jaar waarna het beton met zeewater verzadigd raakt en het betonstaal kan corroderen ondanks de verzinklaag.

De pH-waarde rondom het staal zal echter zover omhoog gaan dat uiteindelijk het staal immuun wordt voor corrosie, tengevolge van het proces dat zich afspeelt in de kalklagen. Wel dient rekening te worden gehouden met het feit dat andere staalconstructies niet in contact mogen komen met het betonstaal, daar door het aanbrengen van stroom op die constructies, om deze te beschermen, de potentiaal van het betonstaal kan veranderen, waardoor juist het betonstaal kan gaan corroderen. Het aanbrengen van isolatie tussen die constructiedelen en het betonstaal kan dit voorkomen.

De betonconstructie zelf kan worden beschermd tegen corrosie door zeewater door constructieve maatregelen bij het ontwerp en door een vakbekwame uitvoering.

Een goede kwaliteit van de betonsamenstelling garandeert de bescherming van zowel het beton als het wapeningsstaal. Een deklaag op het beton is niet nodig tenzij een groeiremmende laag wordt vereist i.v.m. biologische aantasting.

## LITERATUURLIJST

Early Chloride corrosion of reinforced concrete  
Ergin Atimtay, Phil M. Ferguson  
Materials Performance Dec. 1974, pp. 18-21

Survey of the results of exposure of a number of materials  
under various conditions  
Studiegroep deklagen SMOZ  
SMOZ-rapport jaargang 1 no. 8

Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine  
structures  
C.L. Page  
Nature 258 (1975) Dec. 11, pp. 514-515

Corrosie van laaggelegeerd staal  
Dr. Ir. W.A. Schultze  
SMOZ-rapport jaargang 3 no. 3, p. 33

Das Verhalten von Grossbaustählen in Meerwasser  
J. Petersen  
Werkstoffe und Korrosion 28 (1977), p. 748-754

Marine Corrosion  
Francis L. LaQue



TABELLEN

| Eigenschappen            | Samenstelling deklaag |                   |                 |                 |
|--------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                          | Magere alkyde hars    | Vette alkyde hars | Silicone alkyde | Vinyl alkyde    |
| Fysische eigenschappen   | Sterk                 | Flexibel          | Taai            | Taai            |
| Waterbestendigheid       | Redelijk              | Redelijk          | Goed            | Goed            |
| Zuurbestendigheid        | Redelijk              | Zwak              | Redelijk        | Beste van groep |
| Alkalibestendigheid      | Zwak                  | Zwak              | Zwak            | Zwak            |
| Bestendig tegen oplossen | Redelijk              | Zwak              | Redelijk        | Redelijk        |
| Temperatuurbestendigheid | Goed                  | Goed              | Beste van groep | Redelijk        |
| Verwerking               | Redelijk              | Goed              | Heel goed       | Heel goed       |
| Overschilderen           | Eenvoudig             | Eenvoudig         | Redelijk        | Moeilijk        |

Tabel 1: Type deklaag: Alkyde

| Eigenschappen            | Samenstelling deklaag                     |                              |
|--------------------------|---|------------------------------|
|                          | Polyvinyl chloride<br>acetaat Copolymeren | Vinyl acrylic<br>Copolymeren |
| Fysische eigenschappen   | Taai                                      | Taai                         |
| Waterbestendigheid       | Heel goed                                 | Goed                         |
| Zuurbestendigheid        | Uitstekend                                | Heel goed                    |
| Alkalibestendigheid      | Uitstekend                                | Heel goed                    |
| Bestendig tegen oplossen | Alifatisch                                |                              |
|                          | Hydrocarbonaat - goed                     | Goed                         |
|                          | Aromatisch of geoxideerd                  |                              |
|                          | Hydrocarbonaat - zwak                     | Zwak                         |
| Temperatuurbestendigheid | Redelijk - 150° F                         | Redelijk - 150° F            |
| Verwerking               | Heel goed                                 | Uitstekend                   |
| Overschilderen           | Eenvoudig                                 | Eenvoudig                    |

Tabel 2: Type deklaag: Vinyl

| Eigenschappen            | Samenstelling deklaag |                 |                |                 |
|--------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|
|                          | Epoxyamine            | Epoxy polyamide | Epoxy koolteer | Epoxyester      |
| Fysische eigenschappen   | Sterk                 | Taaï            | Sterk          | Flexibel        |
| Waterbestendigheid       | Goed                  | Heel goed       | Uitstekend     | Goed            |
| Zuurbestendigheid        | Goed                  | Redelijk        | Goed           | Redelijk        |
| Alkalibestendigheid      | Goed                  | Uitstekend      | Goed           | Zwak            |
| Bestendig tegen oplossen | Heel goed             | Redelijk        | Zwak           | Redelijk        |
| Temperatuurbestendigheid | Heel goed             | Goed            | Goed           | Goed            |
| Verwering                | Redelijk - verkalkt.  | Goed - verkalkt | Zwak           | Goed - verkalkt |
| Overschilderen           | Moeilijk              | Moeilijk        | Moeilijk       | Redelijk        |

Tabel 3: Type deklaag: Epoxy

| Eigenschappen             | Samenstelling deklaag                |  |
|---------------------------|--------------------------------------|--|
|                           | Hars verbeterd<br>gechloreerd rubber | Alkyde verbeterd<br>gechloreerd rubber |
| Fysische eigenschappen    | Sterk                                | Taaï                                   |
| Waterbestendingheid       | Heel goed                            | Goed                                   |
| Zuurbestendingheid        | Heel goed                            | Redelijk                               |
| Alkalibestendingheid      | Heel goed                            | Redelijk                               |
| Bestendig tegen oplossen  | Alifatisch                           |  |
|                           | Hydrocarbonaat - OK                  | OK                                     |
|                           | Aromatisch - zwak                    | Zwak                                   |
| Temperatuurbestendingheid | Redelijk                             | Redelijk                               |
| Verwerking                | Goed                                 | Heel goed                              |
| Overschilderen            | Eenvoudig                            | Eenvoudig                              |

Tabel 4: Type deklaag: Gechloreerde rubbers

| Eigenschappen            | Samenstelling deklaag             |                                |   |                                    |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|------------------------------------|
|                          | Luchtdrogende polyurethaan vernis | Twee componenten polyurethaan  | Met vocht reagerende polyurethaan         | Lichtbestendig polyurethaan        |
| Fysische eigenschappen   | Heel taai                         | Taai en sterk                  | Heel taai<br>Bestand tegen<br>afschuring  | Tamelijk sterk<br>tot rubberachtig |
| Waterbestendigheid       | Redelijk                          | Goed                           | Redelijk                                  | Goed                               |
| Zuurbestendigheid        | Redelijk                          | Redelijk                       | Redelijk                                  | Redelijk                           |
| Alkalibestendigheid      | Redelijk                          | Redelijk                       | Redelijk                                  | Redelijk                           |
| Bestendig tegen oplossen | Redelijk                          | Goed - hardere<br>laag beter   | Goed                                      | Goed - hardere<br>laag beter       |
| Temperatuurbestendigheid | Goed                              | Goed                           | Goed                                      | Goed                               |
| Verwering                | Vergeling                         | Wat vergeling<br>en verkalking | Verkleurt in licht<br>Vergeelt in schaduw | Heel goed                          |
| Overschilderen           | Behoeft zorg                      | Moeilijk                       | Moeilijk                                  | Moeilijk                           |

Tabel 5: Type deklaag: Polyurethaan

| Eigenschappen            | Samenstelling deklaag     |                           |          |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
|                          | Polyvinylacetaat          | Acrylpolymeren            | Epoxy    |
| Fysische eigenschappen   | Bestand tegen afschrobben | Bestand tegen afschrobben | Taai     |
| Waterbestendigheid       | Zwak                      | Zwak                      | Goed     |
| Zuurbestendigheid        | Zwak                      | Zwak                      | Goed     |
| Alkalibestendigheid      | Zwak                      | Zwak                      | Goed     |
| Bestendig tegen oplossen | Zwak                      | Zwak                      | Goed     |
| Temperatuurbestendigheid | Redelijk                  | Redelijk                  | Goed     |
| Verwerking               | Heel goed                 | Uitstekend                | Redelijk |
| Overschilderen           | Eenvoudig                 | Eenvoudig                 | Moeilijk |

Tabel 6: Type deklaag: Vinyl op waterbasis, acryl, epoxy

| Eigenschappen            | Samenstelling deklaag                         |   |
|--------------------------|---|---|
|                          | Op waterbasis<br>(soda of<br>kalium silicaat) | Op organische basis<br>(ethyl silicaat) |
| Fysische eigenschappen   | Bestand tegen afschuren                       | Taai - sterk                            |
| Hechting aan staal       | Uitstekende chemische verbinding              | Uitstekend                              |
| Waterbestendigheid       | Goed  | Goed                                    |
| Zuurbestendigheid        | Zwak  | Zwak                                    |
| Alkalibestendigheid      | Zwak  | Zwak                                    |
| Bestendig tegen oplossen | Uitstekend                                    | Goed                                    |
| Temperatuurbestendigheid | Uitstekend                                    | Uitstekend                              |
| Verwering                | Uitstekend                                    | Uitstekend                              |
|                          | Wordt niet aangetast                          |   |
| Overschilderen           | Eenvoudig                                     | Eenvoudig                               |

Tabel 7: Type deklaag: Anorganisch zink



F I G U R E N

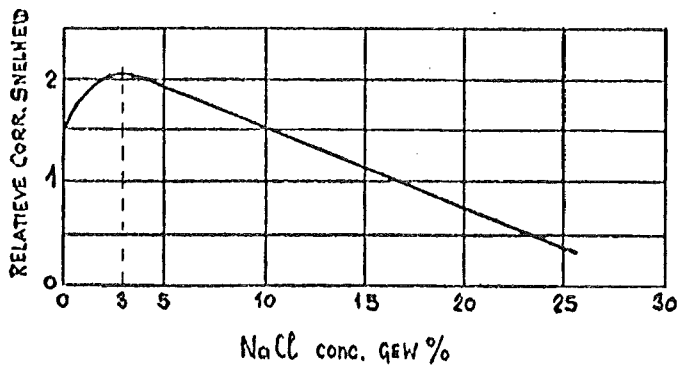


Fig. 1

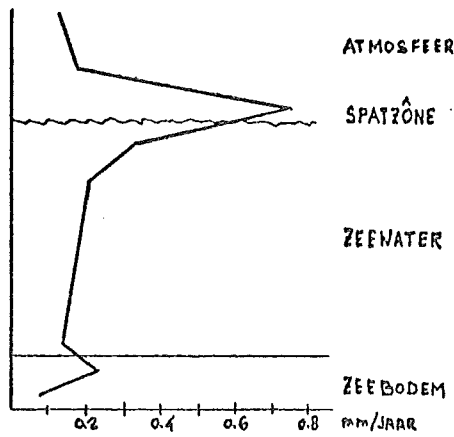


Fig. 2

CORROSIËPROFIEL VOOR DE GOLF VAN MEXICO

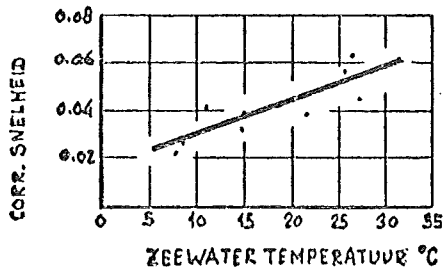


Fig. 3

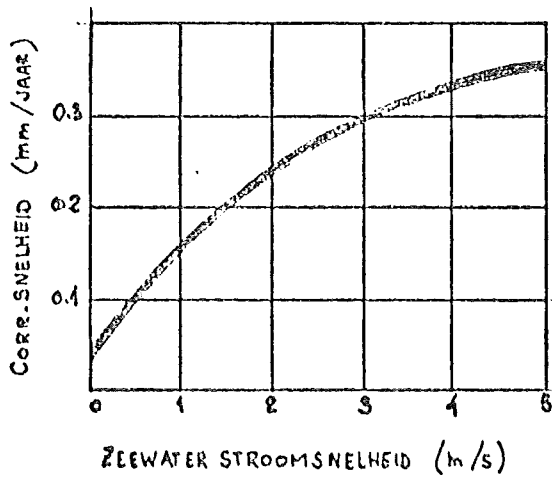


Fig. 4



wind energie onderzoek



datum

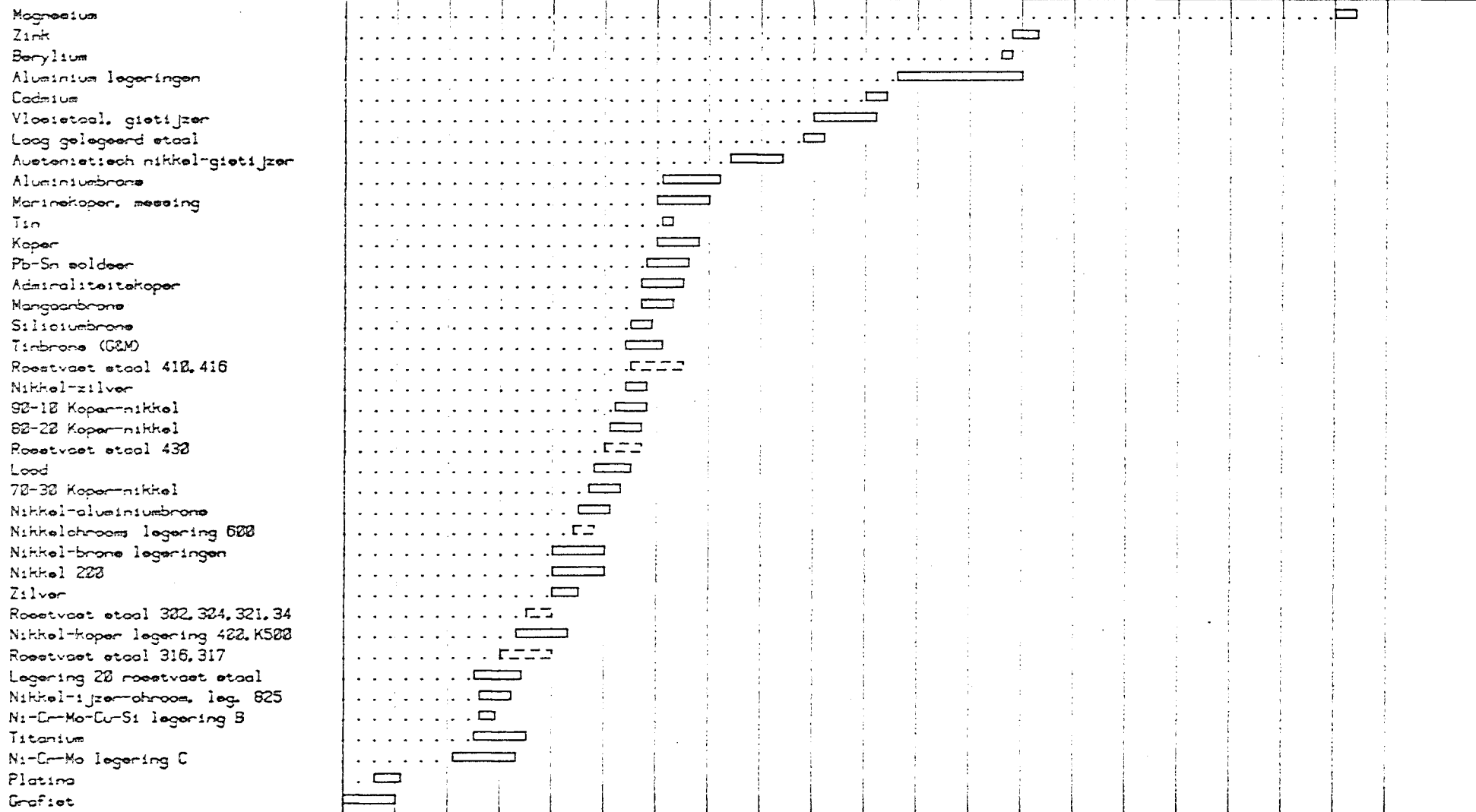
schaal

tek. nr.


LEGERINGEN

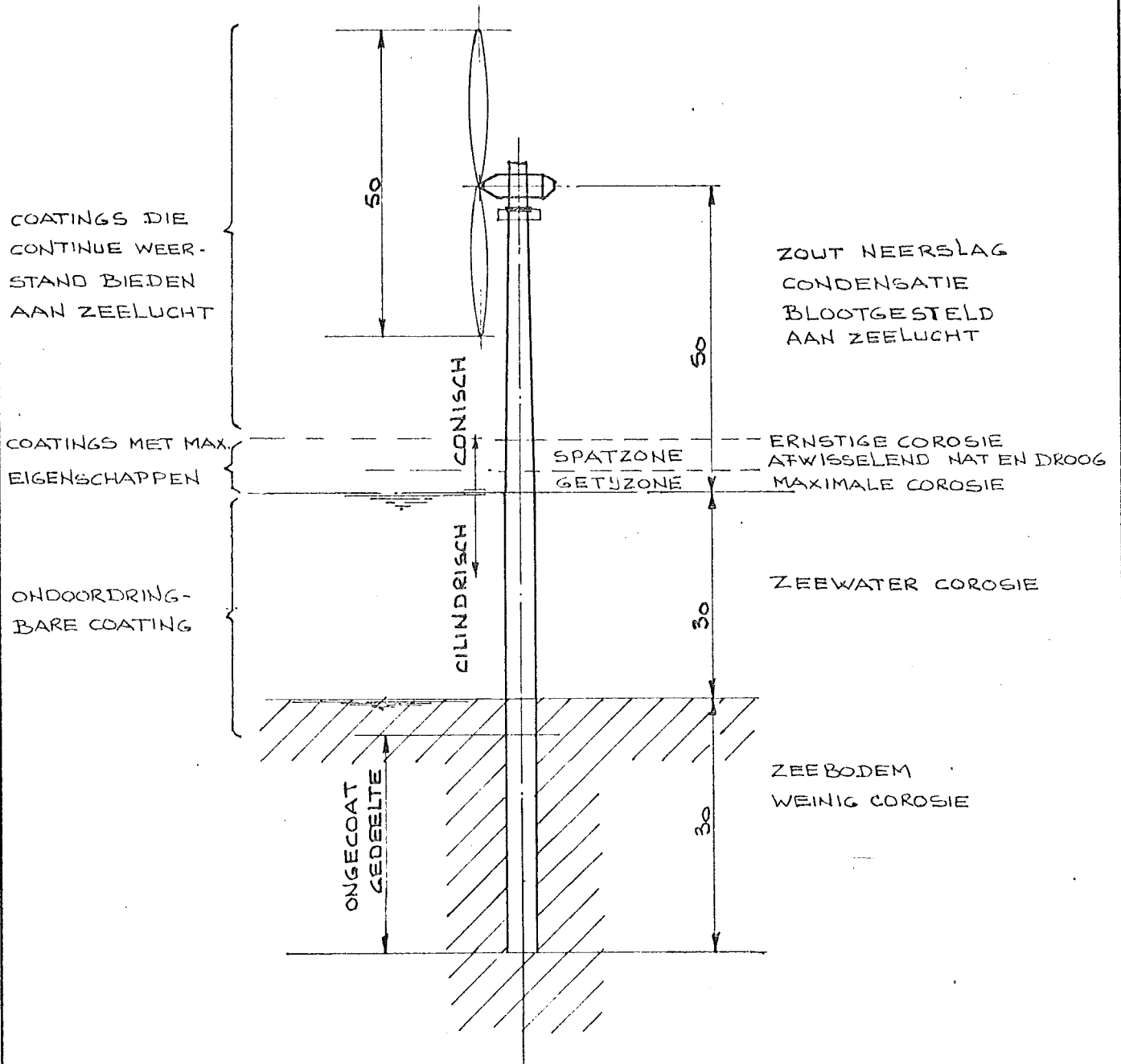
VOLTS

-2 -1 0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9 -10 -11 -12 -13 -14 -15 -16 -17



De gestippelde legeringen kunnen in langzaam stromend of anaeroob water actief worden en een potentiaal van bijna 0.5 V leveren.

|   |                               |         |
|---|-------------------------------|---------|
| RIJN SCHELDE<br>VEROLME   | WIND ENERGIE ONDERZOEK        |         |
| <br>hydrodynamic<br>eliedrecht holland | Galvanische reeks in zeewater |         |
|   | P 324                         | fig.: 5 |



## wind energie onderzoek

VERDELING VAN DE VERSCHILLENDE COATING-SOORTEN



hydrodynamic  
energie oost nederland

datum

schaal

tek. nr. 6