

# Corrosiepreventie en antifouling in de jachtbouw

Workshop NHL kenniscentrum  
Jachtbouw & Lichtgewicht Constructies

**TNO** | Knowledge for business



Ed Reddering

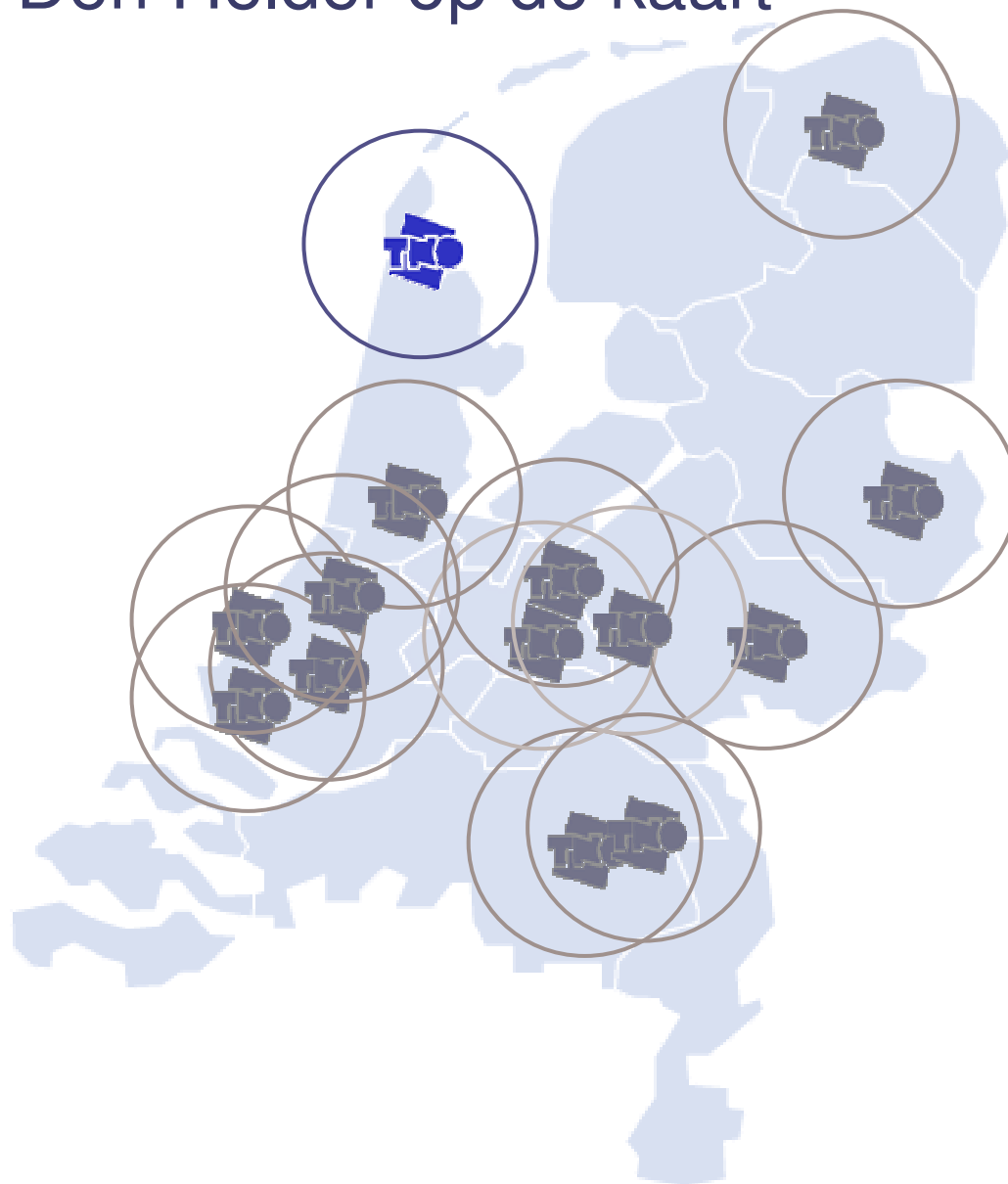


# Corrosiepreventie en antifouling in jachtbouw

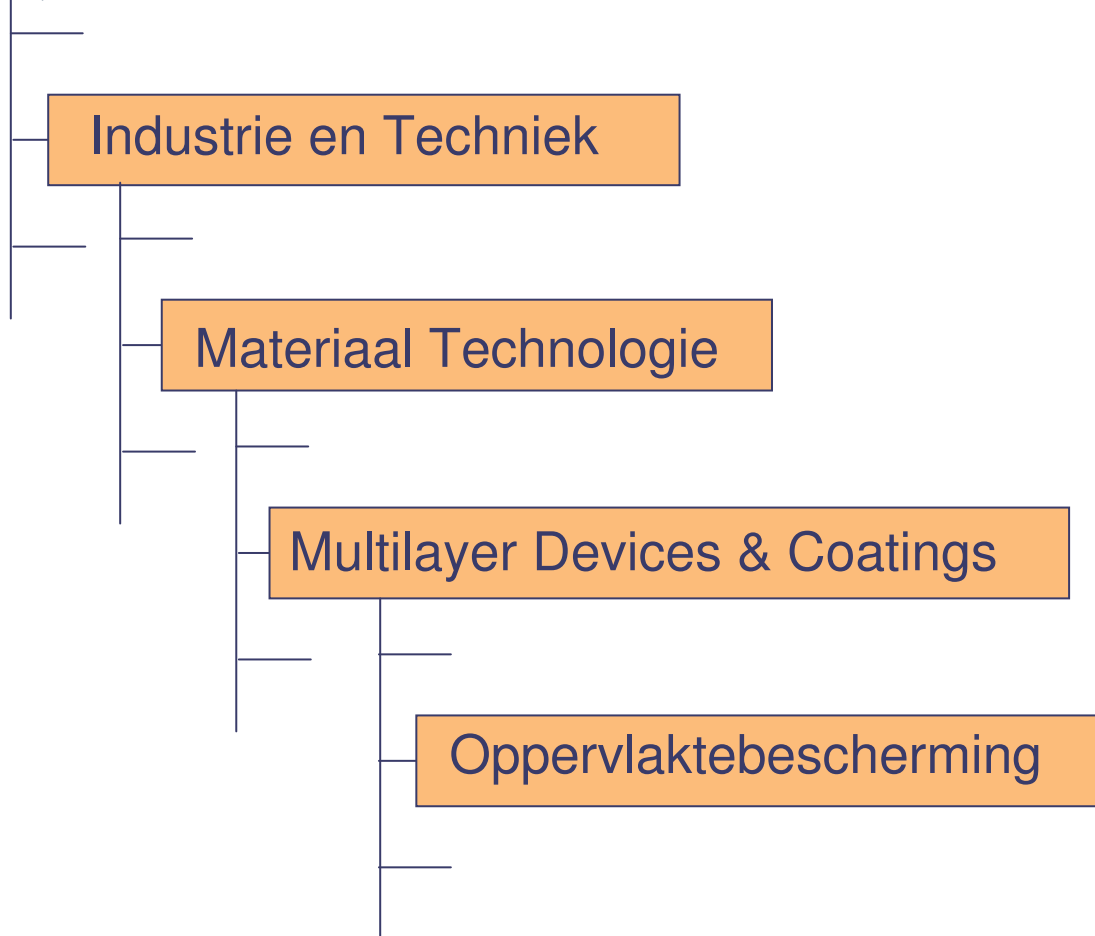
- Dag 1. Corrosie en materiaalkennis voor de jachtbouw
  - Introductie TNO Industrie en Techniek Den Helder
  - Wat is corrosie?
  - Materiaalkeuze en corrosiepreventie
  - Praktijkgevallen
- Dag 2. Workshop corrosie
  - Elektrochemische testmethoden
  - Microscopisch onderzoek
  - Coatingonderzoek



# TNO Den Helder op de kaart



# TNO Den Helder in de organisatie



Organisatie

Kerngebied

Business Unit

Afdeling

Groep





# TNO – Corrosie en Materiaalkunde



Proefstuk voorbereiding

Elektrochemische analyse

Mechanische beproeving

Optische microscopie

Elektronenmicroscopie

Röntgen analyse

# TNO – Biocontact en Aangroeiwering



Biologische beproevingen

Microbiologische analyse

Aangroei / verwijdering tests

Kunstmatige veroudering

Fluorescentie microscopie

Vlot expositie

# TNO Den Helder - samengevat

- Team  
(15 medewerkers)
- Kerncompetenties  
(biologie, materiaalkunde, corrosie)
- Strategie  
(Corrsense, Biosense)
- Faciliteiten

# Definitie corrosie

Corrosie kan worden gedefinieerd als:

**De ongewenste aantasting van een materiaal ten gevolge van chemische of elektrochemische reacties met componenten uit de omgeving.**



# Waarom is bestrijding van corrosie belangrijk?

## Veiligheid

Chemische installaties, civiele constructies, transportmiddelen etc.

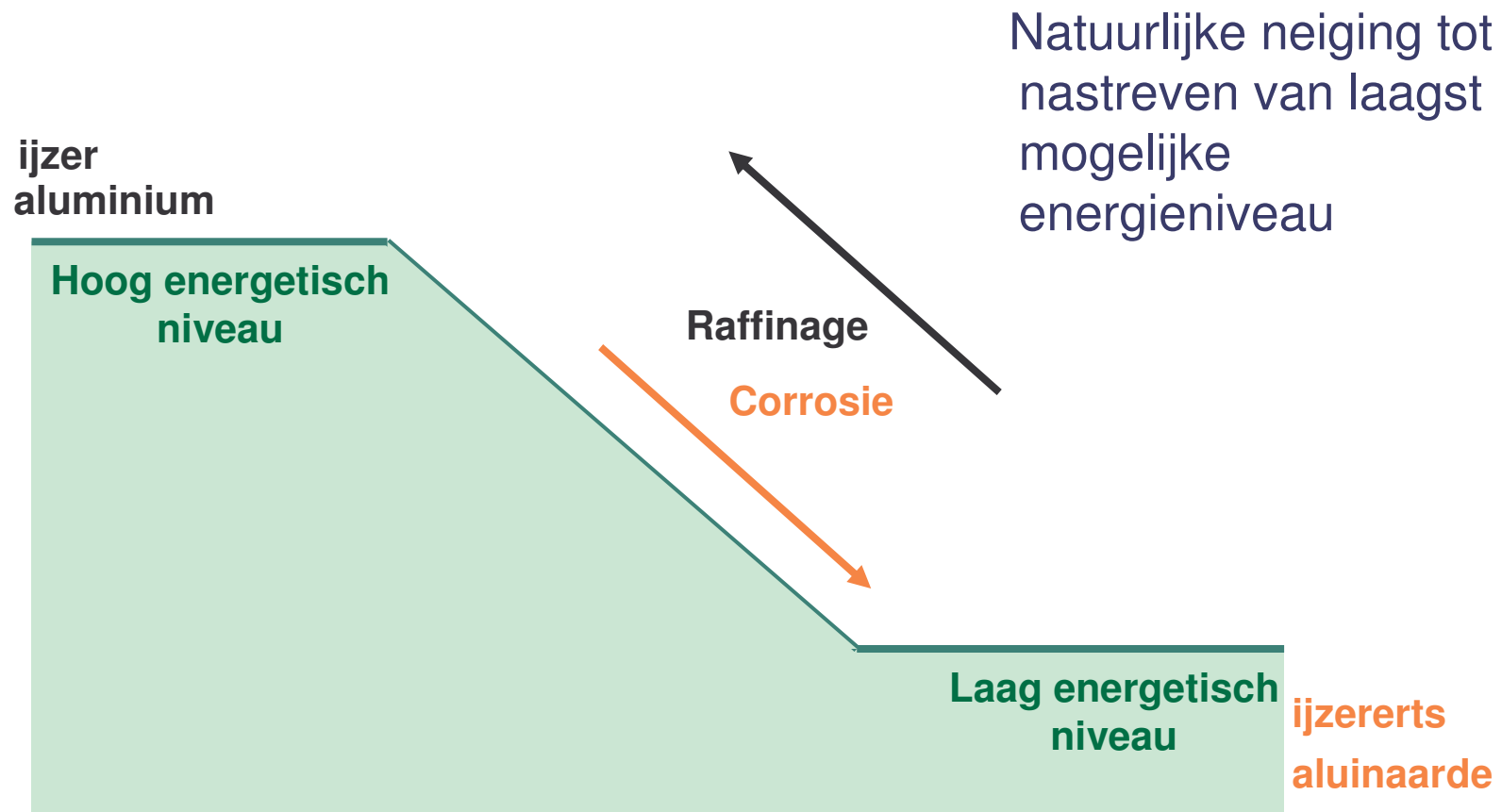
## Milieu

Grondstoffen/energie besparing

## Economische motieven

Toepassen duurdere materialen. Maatregelen om corrosie te bestrijden bedragen 3 tot 4% van BNP (hiervan 20 à 30 % te besparen met huidige kennis). Voor NL is dit in 2006 naar schatting 17 miljard Euro. Productieverlies.

# Waarom treedt corrosie op?



## Voorbeeld corrosie stalen schip (1)



Perforatie (buitenzijde)

## Voorbeeld corrosie stalen schip (1)



Detail van perforatie (buitenzijde)



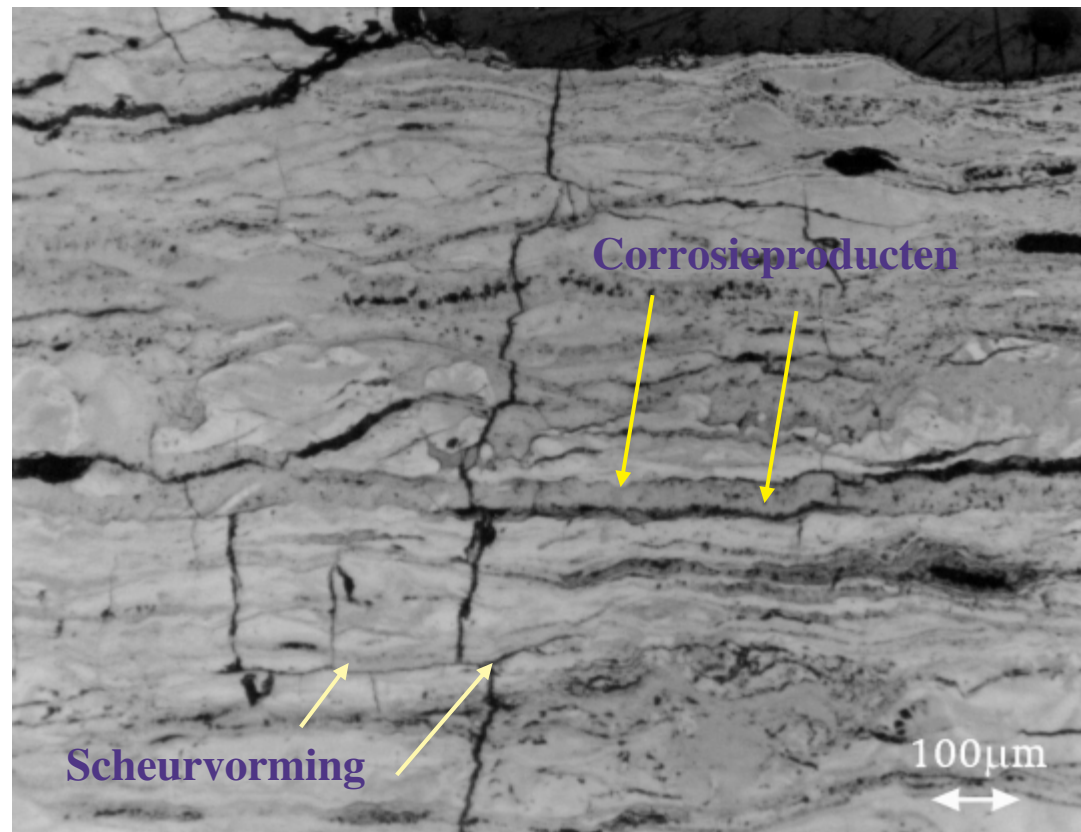
## Voorbeeld corrosie stalen schip (1)



Perforatie (binnenzijde)



## Voorbeeld corrosie stalen schip (1)



Perforatie (buitenzijde)

## Voorbeeld corrosie stalen schip (1)



## Voorbeeld corrosie stalen schip (2)

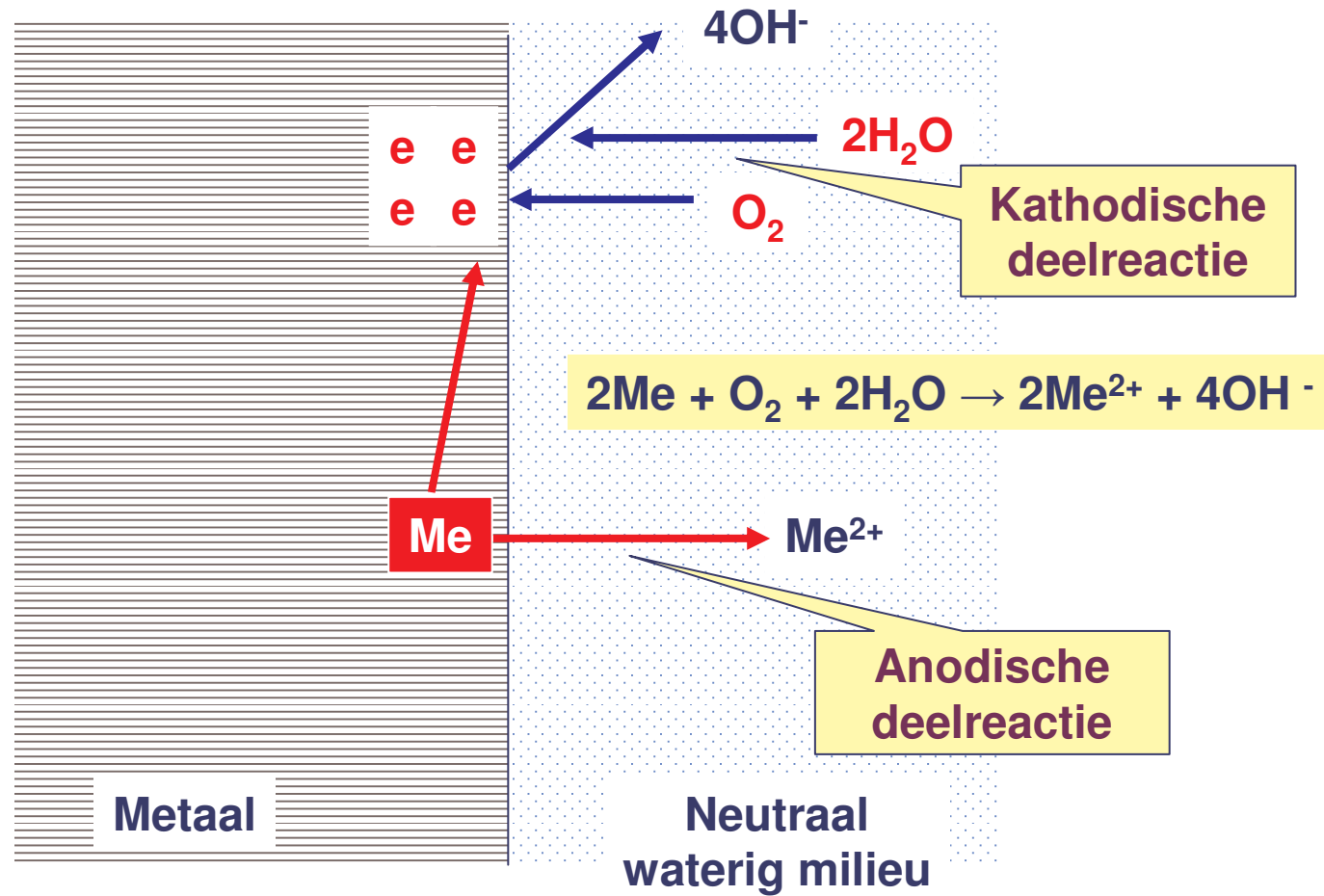


## Voorbeeld corrosie stalen schip (2)





# Elektrochemisch corrosiemechanisme in waterig neutraal milieu

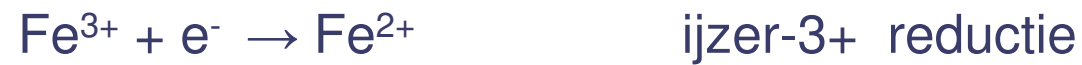




## Voorbeelden van anodische reacties



# Voorbeelden van kathodische reacties



# Materiaalgebruik jachtbouw

- Typen materialen
  - Ferro materialen
    - Staal
    - RVS
  - Non ferro materialen
    - Aluminium
    - Titanium
    - Koper (brons, messing, kopernikkel etc)
  - Kunststoffen
    - Composieten (GVK, koolstofvezel, kevlarvezel etc)
    - Thermoharders (Epoxy, Polyesther etc)
    - Polymeren (polyetheen, Nylon, Mylar etc)
- Verbindingstechnieken
  - Lassen
  - Klinken
  - Lijmen
  - Schroeven
  - Solderen
  - Klemmen

# Milieu

- Zoetwater
- Zoutwater
- Biologische activiteit
- Zuurstofgehalte
- Inhibitoren
- Temperatuur
- Vloeistofsnelheid (romp / schroef / leiding)
- Relatieve vochtigheid (douwpoint)
- Aerosolen, zoutkristallen
- Zwaveloxiden (uitlaatgassen)
- Zee: getijdezone, splash zone

# Corrosievormen

- Typen corrosie
  - Uniforme corrosie (staal - romp)
  - Galvanische corrosie (Staal, alu, RVS, carbon – romp, verbindingen)
  - Putvormige corrosie (RVS, beslag)
  - Spleetcorrosie (RVS – beslag, verstaging)
  - MIC (staal – brandstof / septic tank / koelwatersystemen)
  - Interkristallijne corrosie (aluminium – scheepshuid/coating)
  - SCC (RVS, messing – fittingen, lasverbindingen)
  - Cavitatiecorrosie (alubrons – schroef)
  - Erosiecorrosie (cupronickel - warmtewisselaar)
  - Zwerfstroomcorrosie (staal - KB)
  - Corrosievermoeiing (alubronzen schroefbladen)
  - Selectieve aantasting (messing/alubrons – zeewater)



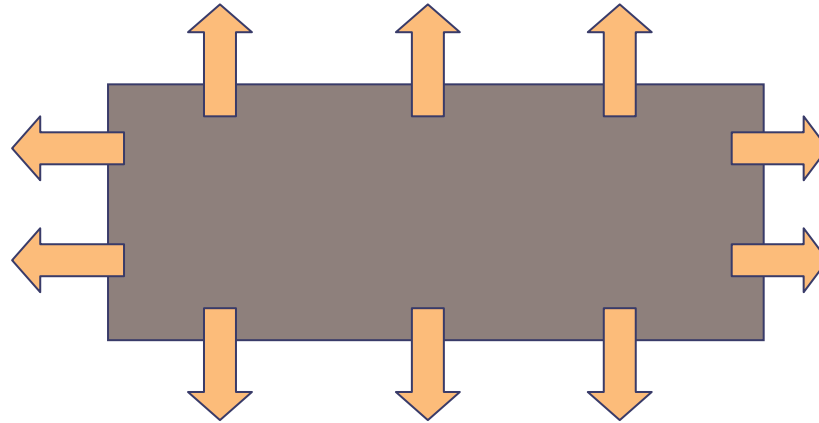
# Corrosiepreventie

- Galvanische deklagen (verzinken, chroomanodiseren etc.)
- Metallische deklagen (aludeklagen)
- Coating (organische coating)
- KB (opofferingsanode, impressed current)
- Ontwerpaspecten (spleten, galv. kopp., hoeken, gaten)
- Materiaalkeuze (RVS, titanium etc)
- Onderhoud en reparatie (coatingreparatie, lassen etc)
- Corrosiemonitoring en detectie (early warning)
- Self healing materials (coatings)
- Inhibitoren (koelvloeistoffen, ballasttanks)
- Schoonmaakmiddelen (neerslagproducten, biociden)
- Anodiseren (aluminum, titanium)
- Warmtebehandeling (vb tegen SCC of prec harden alu-leg)
- Cavitatiebestendige coatings (neopreen coating etc)

# Ontwerpaspecten

- Spleten
- Coating
- Galvanische koppelingen vermijden
- Stilstaand water / slib vermijden
- etc

# Algemene corrosie



‘Algemene aantasting’ of ‘uniforme aantasting’

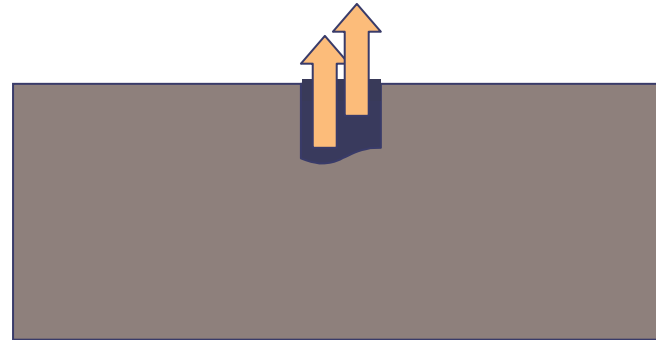
- gelijkmatig over oppervlak verdeeld
  - stadium goed in te schatten
- beschermingsmaatregelen minder complex
  - proces goed te volgen

# Maatregelen tegen algemene corrosie

- keuze metaal
- aanbrengen coating (isolatie tussen metaal en medium)
- kathodische bescherming

Denk aan gebruik van corrosietoeslag!

# Lokale corrosie

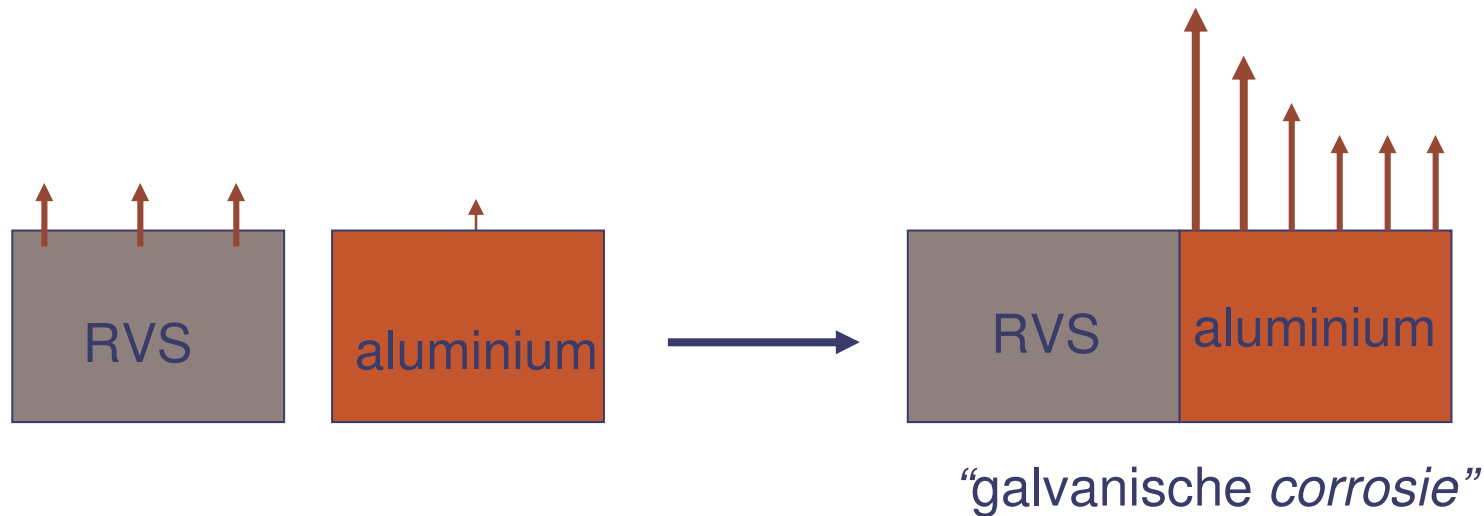


‘Lokale aantasting’

- aantasting op specifieke plekken
  - moeilijk in te schatten
  - veel invloedsfactoren
- beschermingsmaatregelen veelal complex
  - inspecties moeilijk en kostbaar
  - technisch gevaarlijk

# Galvanische corrosie (contact-corrosie)

Aluminium is een onedel metaal. Door koppeling met een edelere legering zal het aluminium versneld in oplossing gaan, terwijl de edele legering beschermd wordt.

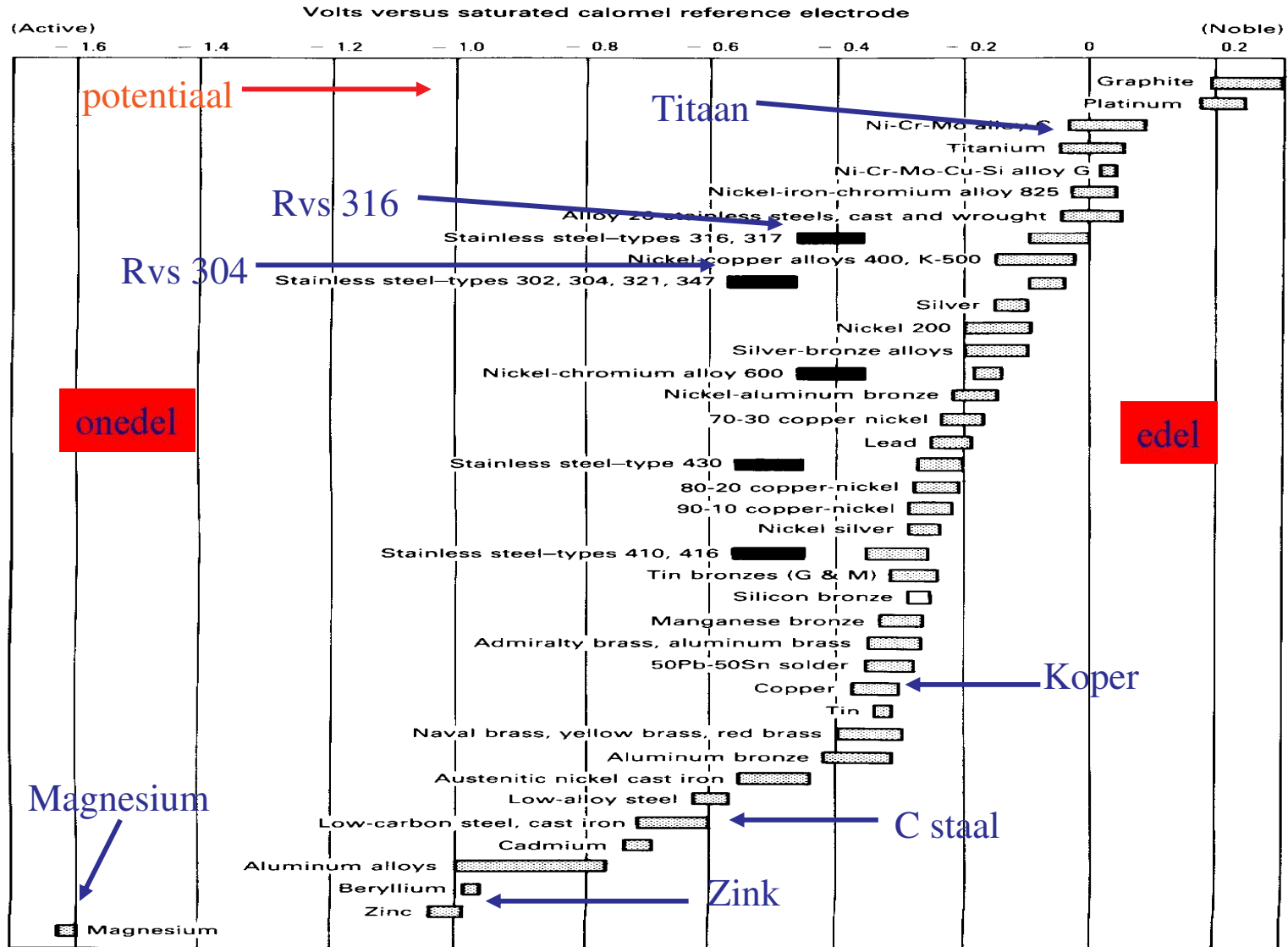




# EMF-reeks en galvanische reeks (in zeewater)

| Table 1                          | Standard emf series               | Table 2                | Galvanic Series in Seawater                           |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---|
| Reaction                         | $E^\circ$ at 25 °C,<br>(V vs NHE) |                        |   |
| Au-Au <sup>3+</sup>              | +1.498                            | -                      | Platinum  |
| Pt-Pt <sup>2+</sup>              | +1.2                              | Noble or<br>cathodic   | Gold  |
| Ag-Ag <sup>+</sup>               | +0.799                            |                        | Silver  |
| Hg-Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> | +0.788                            |                        | 18-8 Mo stainless steel (passive)                     |
| Cu-Cu <sup>2+</sup>              | +0.337                            |                        | Nickel (passive)<br>Cupronickels (60-90 Cu, 40-10 Ni) |
| H <sub>2</sub> -H <sup>+</sup>   | 0.000                             |                        | Copper<br>Nickel (active)                             |
| Ni-Ni <sup>2+</sup>              | -0.250                            |                        | 18-8 Mo stainless steel (active)                      |
| Fe-Fe <sup>2+</sup>              | -0.440                            |                        | Steel or iron   |
| Cr-Cr <sub>2</sub> <sup>3+</sup> | -0.744                            |                        | 2024 aluminium (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)               |
| Zn-Zn <sup>2+</sup>              | -0.763                            |                        | Cadmium   |
| Al-Al <sup>3+</sup>              | -1.662                            | Active or<br>anodic    | Commercially pure aluminium (1100)                    |
| Mg-Mg <sup>2+</sup>              | -2.363                            |                        | Zinc  |
| Na-Na <sup>+</sup>               | -2.714                            |                        | Magnesium and magnesium alloys                        |
| After de                         | Bethune and Loud                  | from INCO test results |   |

# Galvanische reeks voor zeewater



# Voorwaarden voor galvanische corrosie

- edel en onedel metaal zijn elektrisch geleidend gekoppeld
- een geleidend milieu is met beide legeringen in contact
- het “potentiaalverschil” is voldoende groot

## Belangrijk:

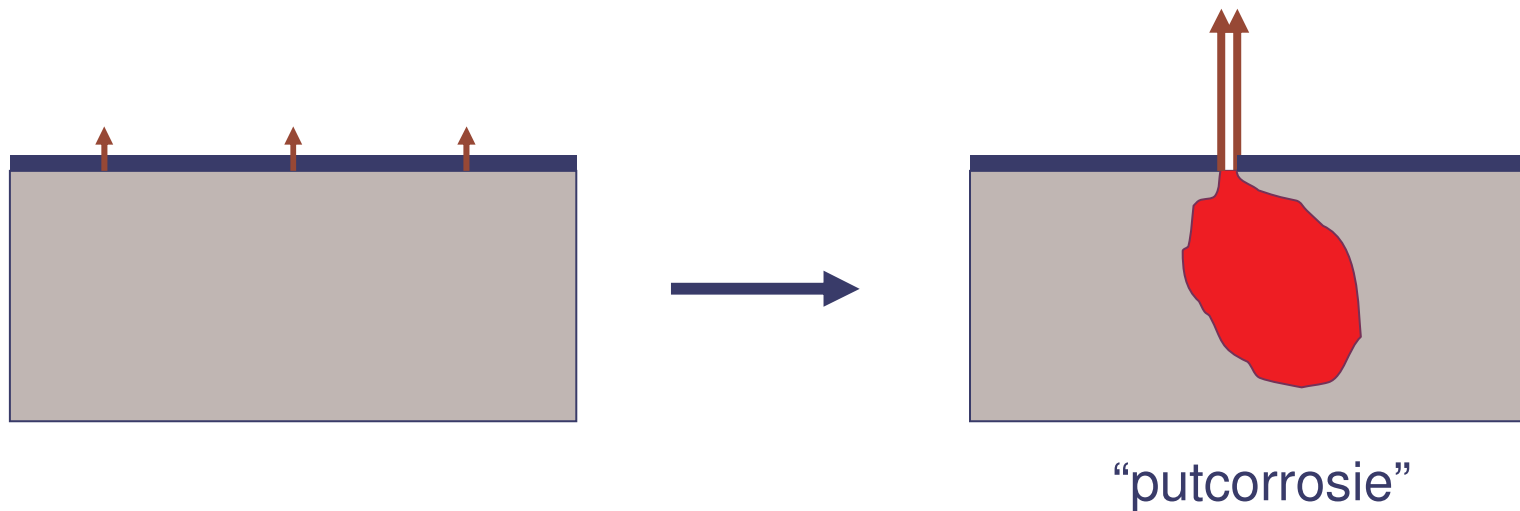
- galvanische reeks
- zelfde mechanisme als bij kathodische bescherming
- versnellende factor: oppervlak onedel metaal klein t.o.v. oppervlak edel metaal (kleine anode, grote kathode)

# Maatregelen tegen galvanische corrosie

- metaalcombinaties voorkomen
- metalen van elkaar isoleren
- oppervlak dat nat wordt coaten (minstens één van de metalen)

# Putcorrosie

Het plaatselijk doorbreken van het passieve oxide leidt plaatselijk tot sterke aantasting, resulterend in putvorming.



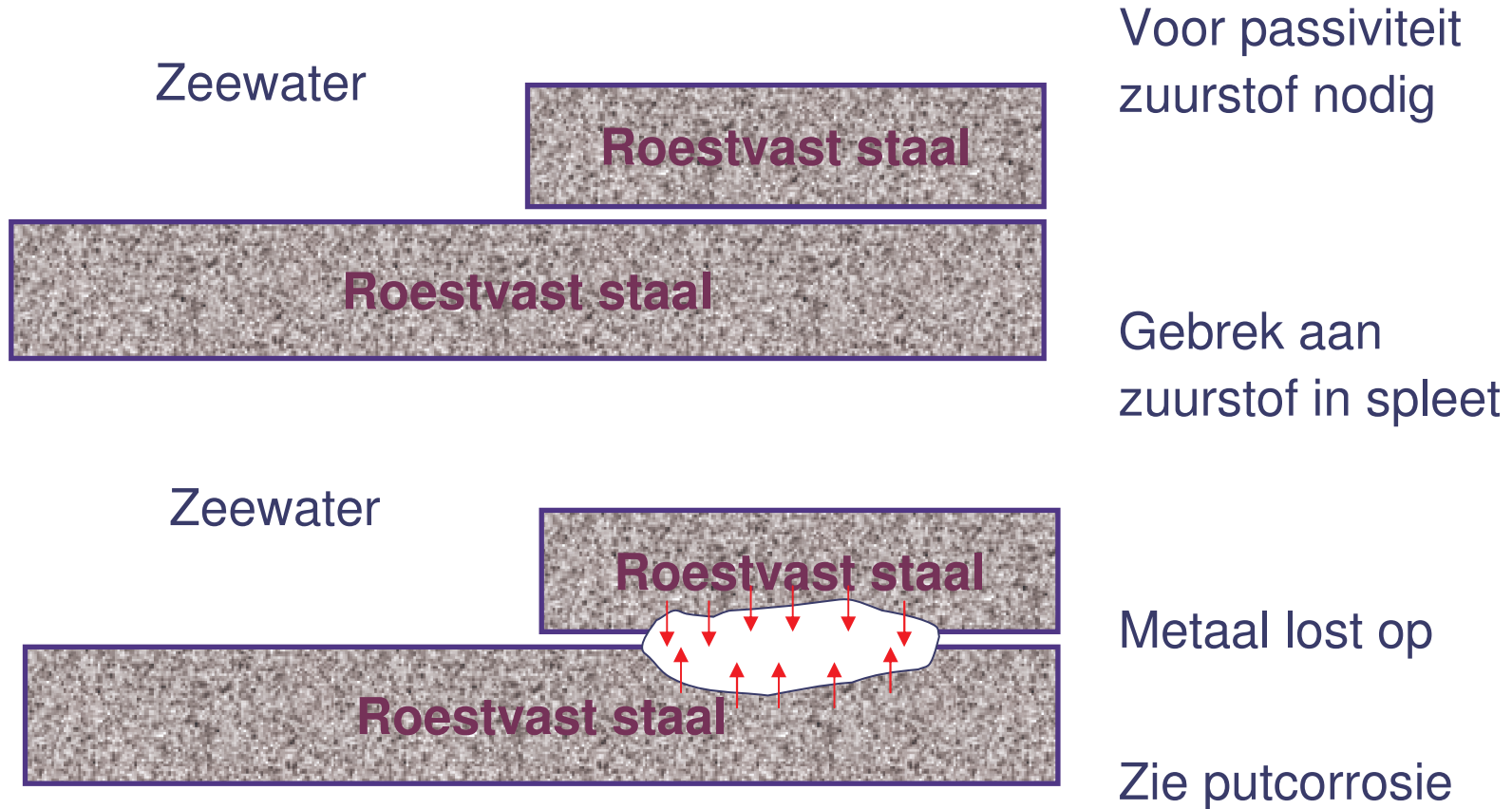
Door het in oplossing gaan van het betreffende metaal verzuurt het milieu in de put, hierdoor kan de passieve oxidelaag niet herstellen.

# Maatregelen tegen putcorrosie

- metaalkeuze (legeringskeuze) in afhankelijkheid van milieu
- kathodische bescherming
- coaten
- verhoging pH
- verlaging temperatuur
- gebruik passivatoren



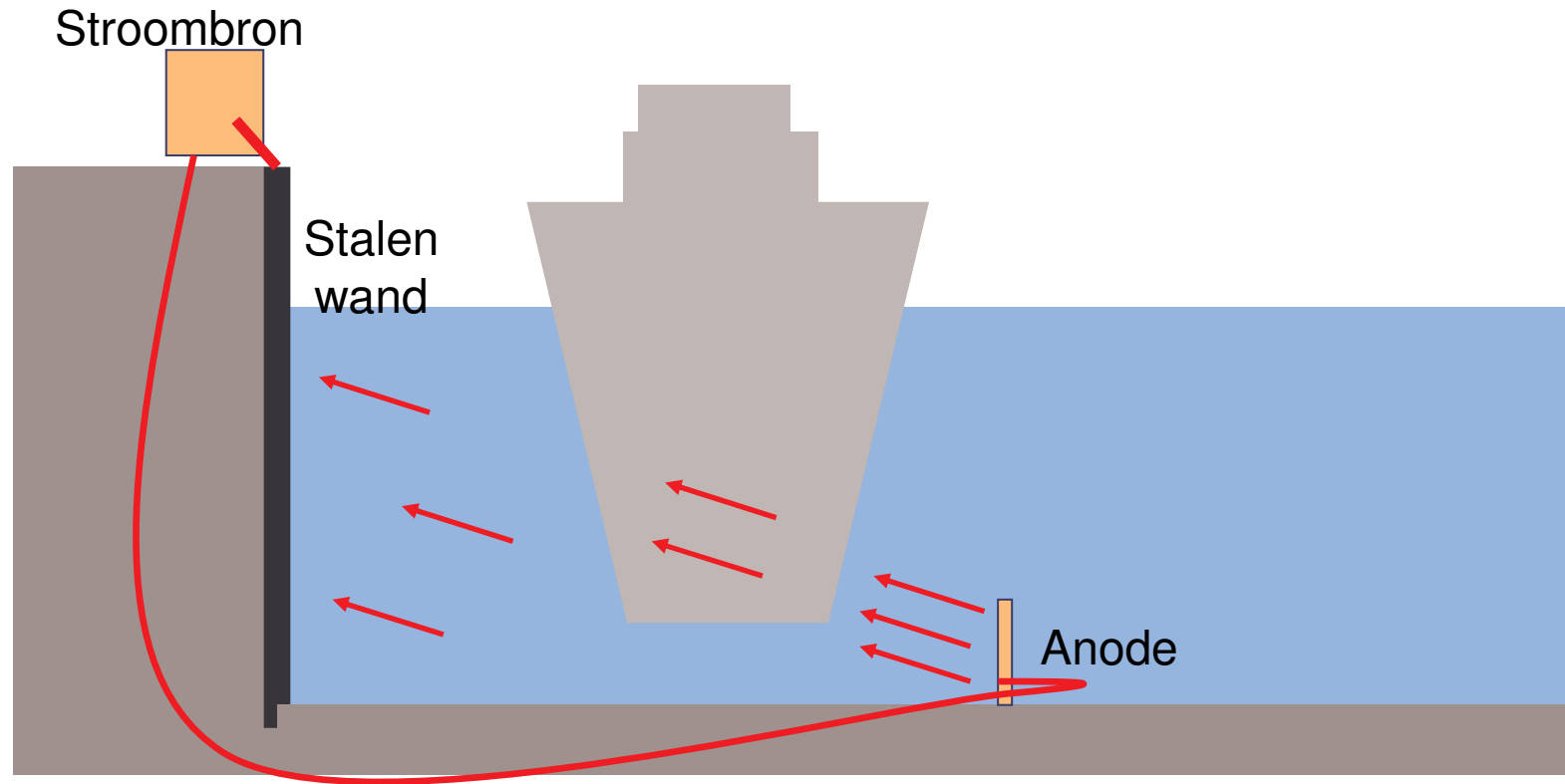
# Spleetcorrosie



# Maatregelen tegen spleetcorrosie

- spleten vermijden bij passieve metalen
- kathodische bescherming
- spleten dichtkitten
- verder identieke maatregelen als bij putcorrosie
- afzettingen voorkomen (corrosie onder afzettingen is een vorm van spleetcorrosie!)

# Zwerfstroomcorrosie

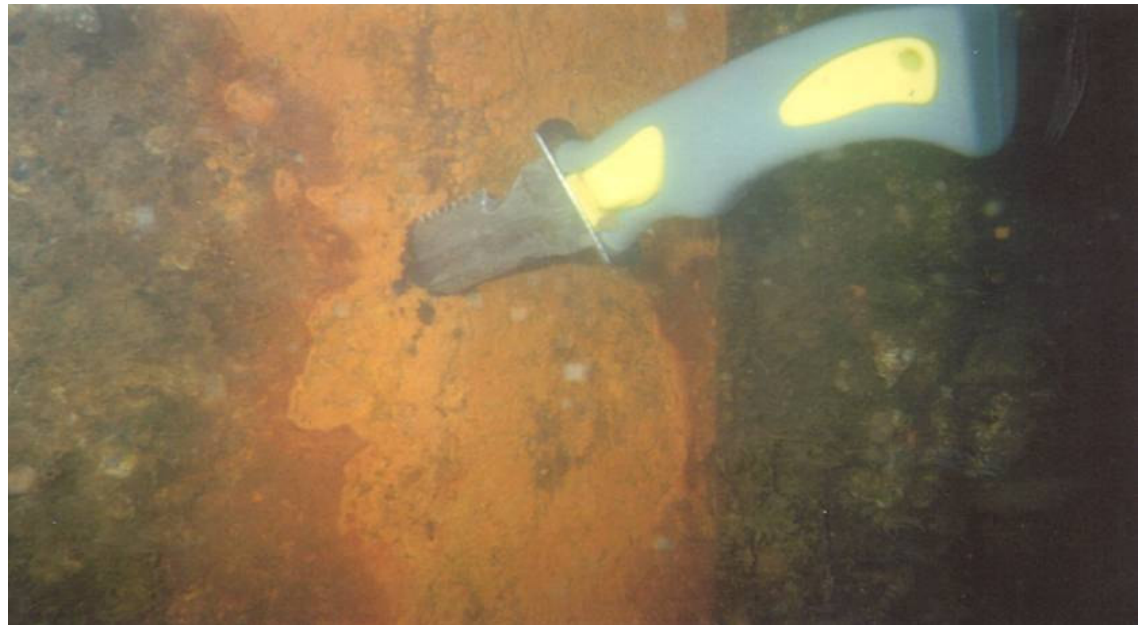


Corrosie op de plaats waar de stroom de scheepswand verlaat.

# Microbiologisch geïnduceerde corrosie (MIC)

Door micro-organismen onder biofilm

- Belangrijke groep: Sulfaat reducerende bacteriën  
SRB (anaëroob)
- Water verontreinigd met sulfaten
- Stilstaand water
- Weinig zuurstof
- Gevolg:putten
- Corrosieproduct:  
sulfides



# Erosie-corrosie, cavitatie-corrosie, impingement attack



Samenwerking corrosie en mechanische invloeden

# Selectief oplossen

Van legeringen gaat hierbij de minst edele component selectief in oplossing.

Komt voor met name in spleten en onder afzettingen.

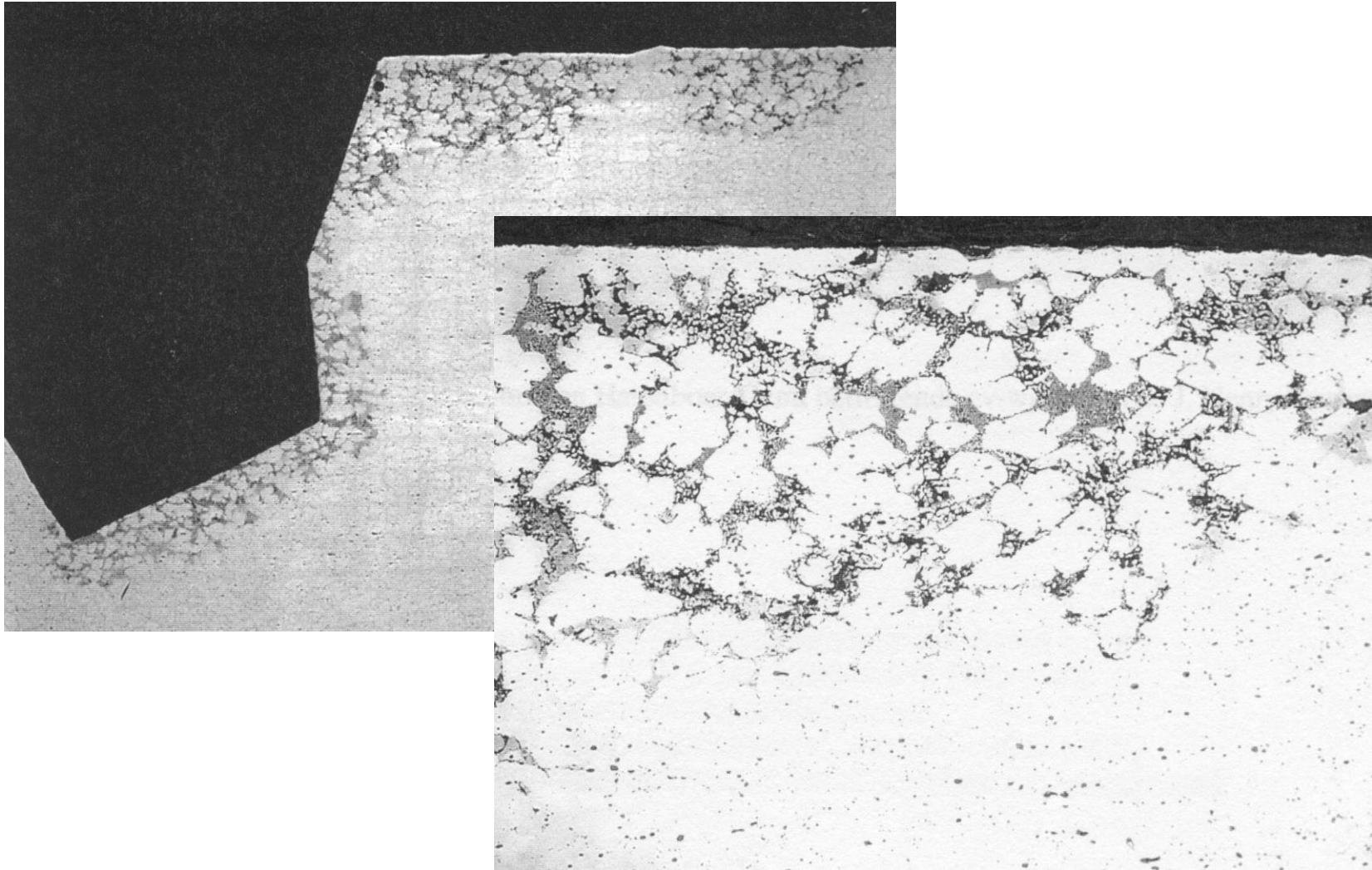
Bekendste voorbeeld: **ontzinking van messing**.

Gevolg: de meest edele component blijft achter als poreuze, mechanisch zeer zwakke massa.

Preventie: voorkomen van slib en pH-verhoging.

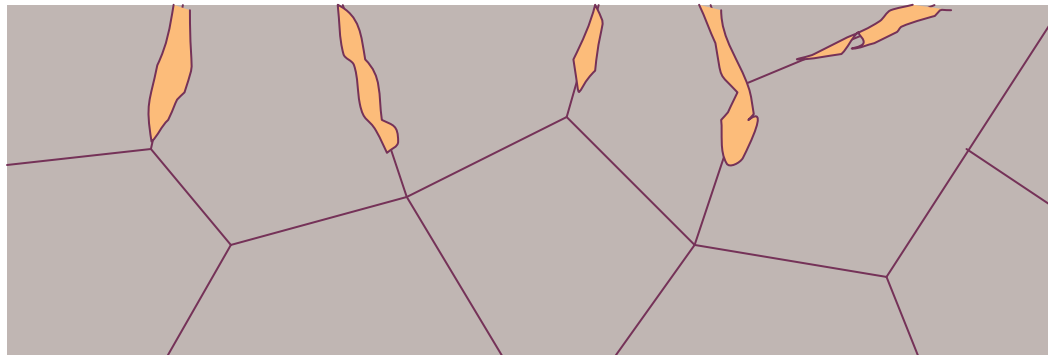


## Voorbeeld laagvormige ontzinking



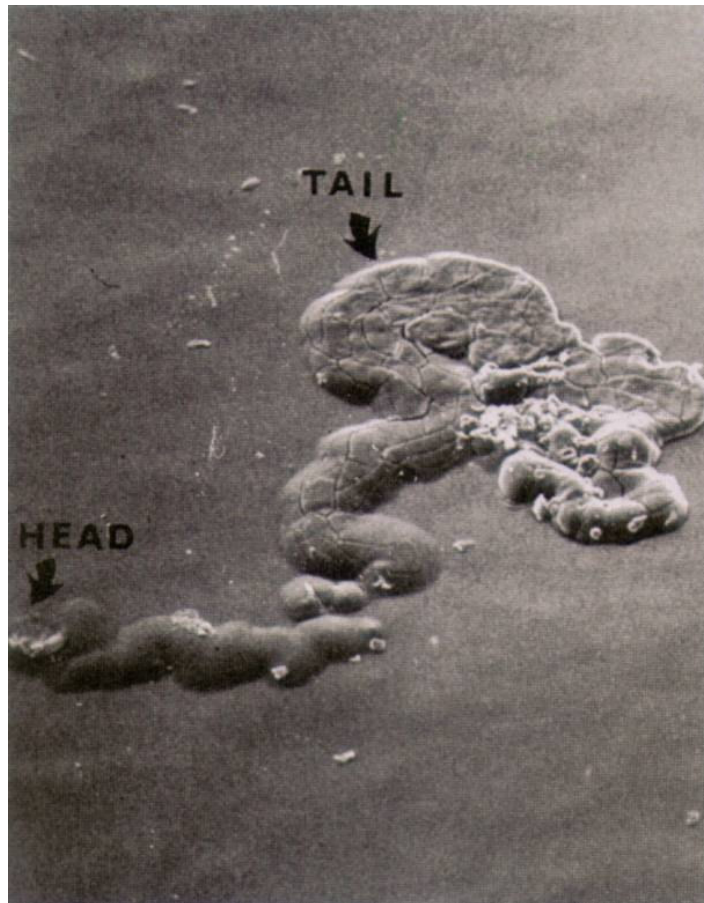
# Interkristallijne corrosie

Een verschil in “edelheid” tussen de kristallen en korrelgrenzen leidt tot versnelde aantasting op de korrelgrenzen.



Vorming van chroomcarbiden  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  direct na het lassen, tijdens afkoeling in het gebied 500 - 800 °C (gesensiteerd rvs), lasbederf. Remedie: oplosgloeien bij ca. 1050 °C, gebruik laag C rvs of Ti cq. Nb gestabiliseerd rvs.

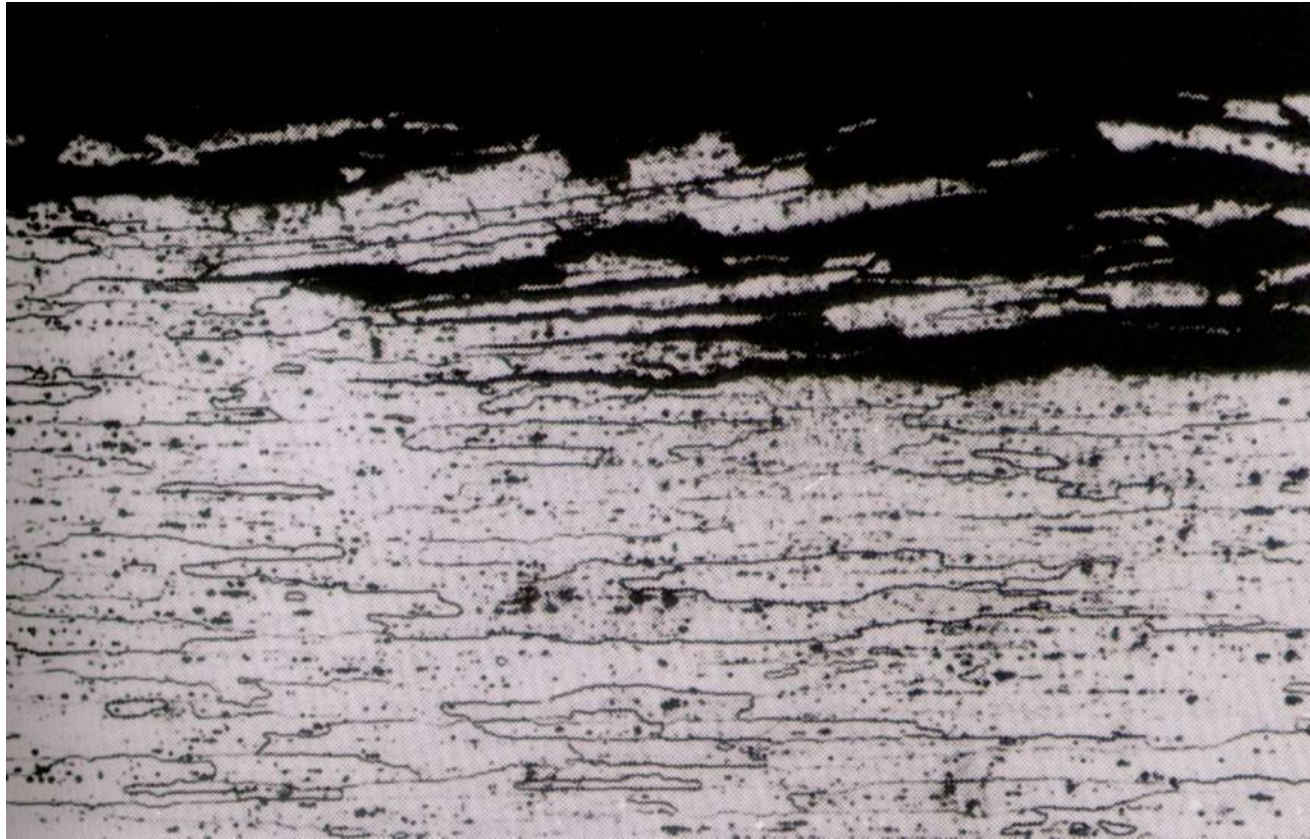
# Filiforme corrosie



- Onder coatings
- Start t.p.v. coatingdefecten
- Rups-achtig uiterlijk
- O.i.v. agressieve ionen (chloriden)
- Mechanisme:  
“spleetcorrosie onder coatings”



# Exfoliatie



Een specifieke vorm van interkristallijne aantasting.  
Komt met name voor bij aluminium en zijn legeringen.

# Spanningscorrosie en corrosievermoeiing

- Beide scheurvormende processen
- Samenspel tussen spanningen en corrosief milieu
- Scheurvorming loodrecht op de spanningsrichting
- Er treedt vrijwel geen materiaalvervorming op
- Spanningscorrosie: permanente statische trekspanning
- Corrosievermoeiing: wisselende dynamische belasting
- Spanningscorrosie komt zowel interkristallijn als transkristallijn voor en is vertakt, corrosievermoeiing vrijwel altijd transkristallijn en niet vertakt

# Spanningscorrosie

Bron van spanningen bij spanningscorrosie:

- bedrijfsspanningen als inwendige en uitwendige druk
- gewicht van apparatuur en inhoud
- bewerkingsspanningen na lassen, buigen, koudvervormen, e.d.

Bron van spanningen bij corrosievermoeiing:

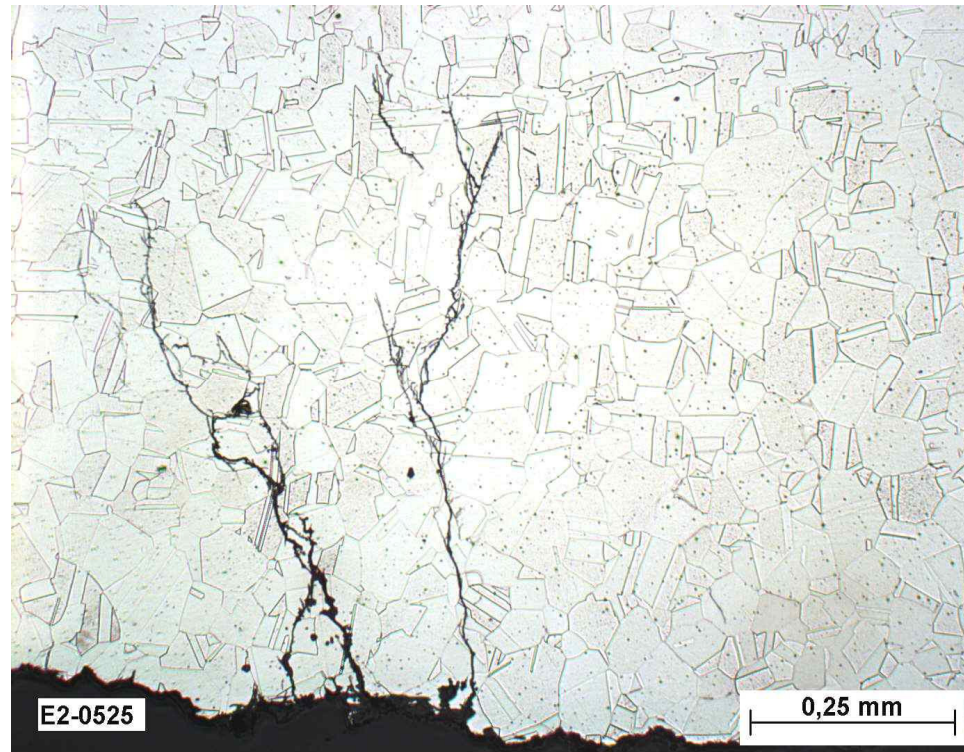
- wisselingen in belasting door variatie in bedrijfsvoering



# Spanningscorrosie in austenitisch rvs

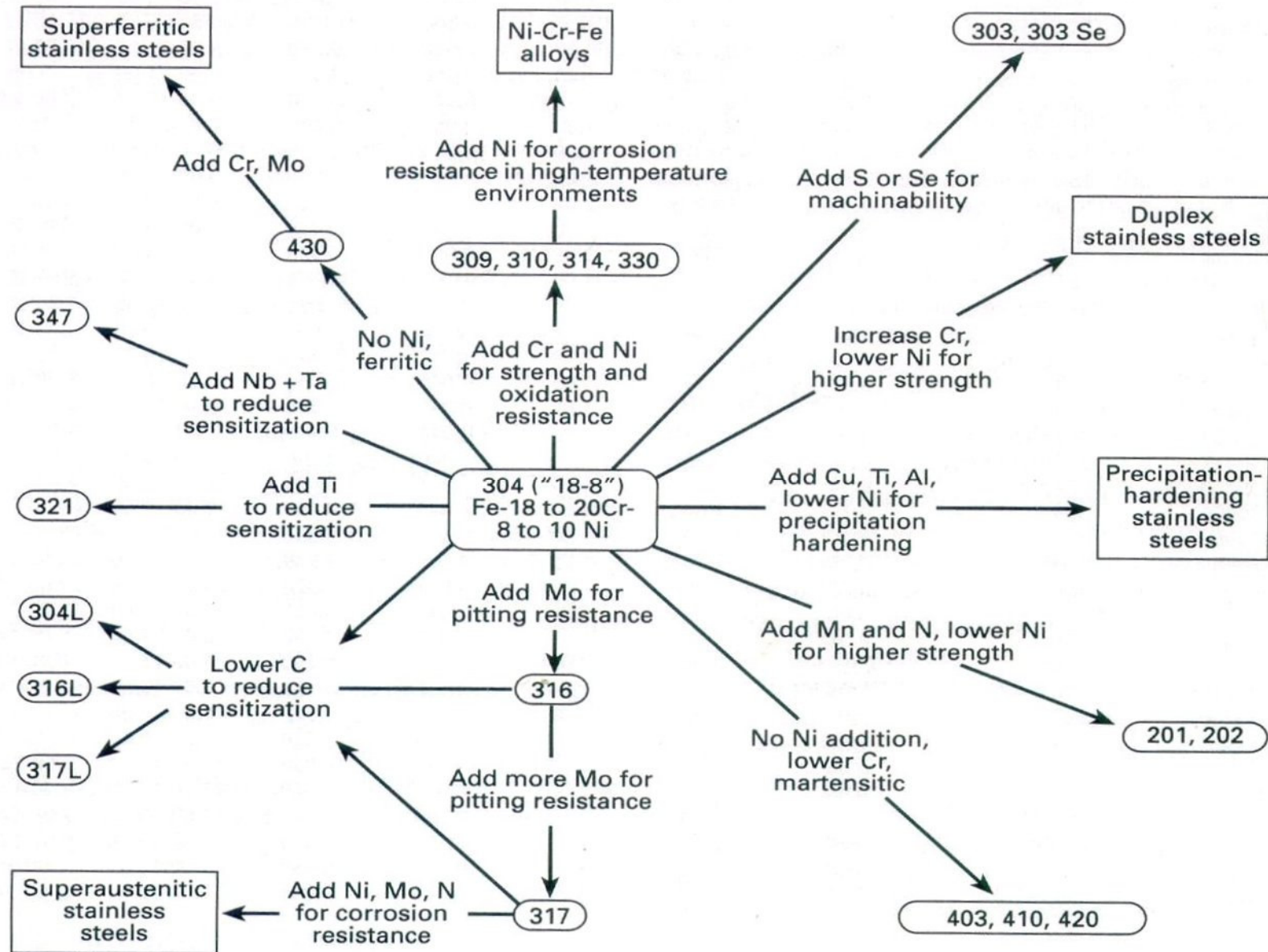
Meest van belang: transkristallijne spanningscorrosie in austenitisch rvs. Treedt op bij gelijktijdig vervullen van de volgende voorwaarden:

- gevoelig rvs als type 304 en 316
- aanwezigheid trekspanningen
- aanwezigheid chloriden
- Temperatuur boven ca. 60 °C



# Wat is roestvast staal (RVS)?

**Een legering met ijzer als basiselement, waaraan minimaal 13 gew.% chroom is toegevoegd ter verbetering van de weerstand tegen corrosie.**



# RVS veilig toepassen?

RVS is (zeer) gevoelig voor lokale corrosie  
met name  
spleet- en putcorrosie

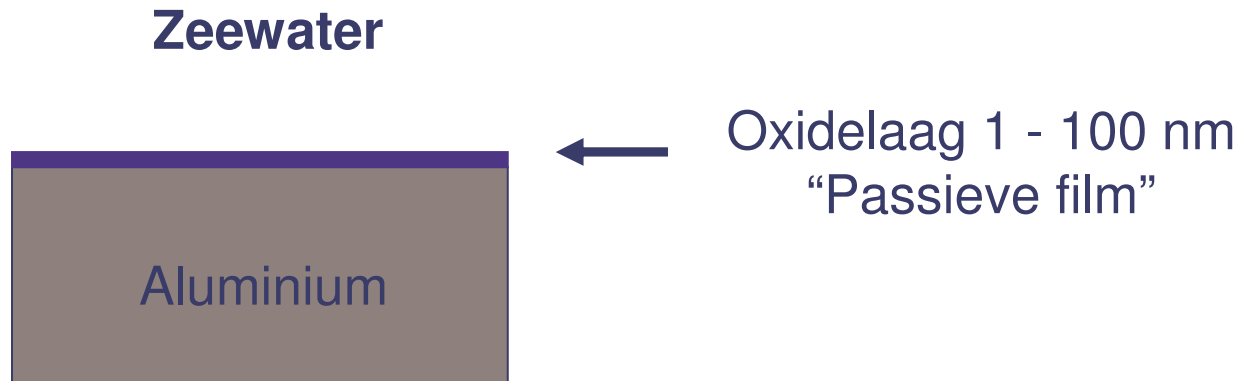
Letten op:

- het type RVS
- constructieve aspecten
- verbindingstechnieken
- omgevingsparameters
- oppervlaktebehandeling

# Invloedsfactoren corrosiebestendigheid rvs in waterig chloridehoudend milieu

- Type rvs legering
- Concentratie chloride-ionen
- Zuurgraad pH
- Temperatuur
- Stromingssnelheid vloeistof
- Lokale geometrie
- Oppervlaktegesteldheid (passief / actief)
- Eventuele aanwezigheid vervuiling
- Aanwezigheid zuurstof
- Spanningen

# Corrosie van aluminium

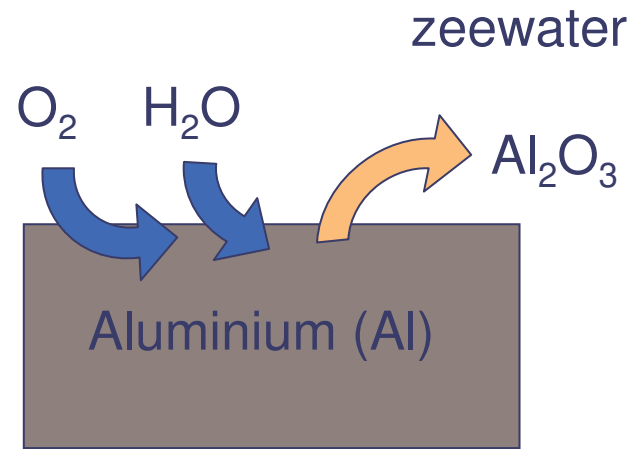


Door de beschermende werking van de passieve film wordt het aluminium 'afgesloten' van het agressieve milieu. Hierdoor stopt het corrosieproces nagenoeg volledig.

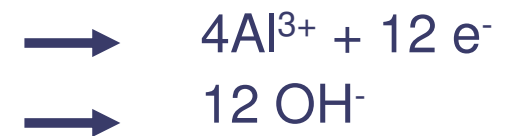
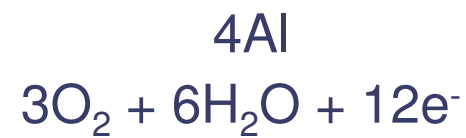
Nadelen:

- Juiste legering kiezen (zeewaterbestendig)
- Galvanische corrosie
- Spannings- en vermoeiingscorrosie (bij lassen!)

# Corrosie aluminium

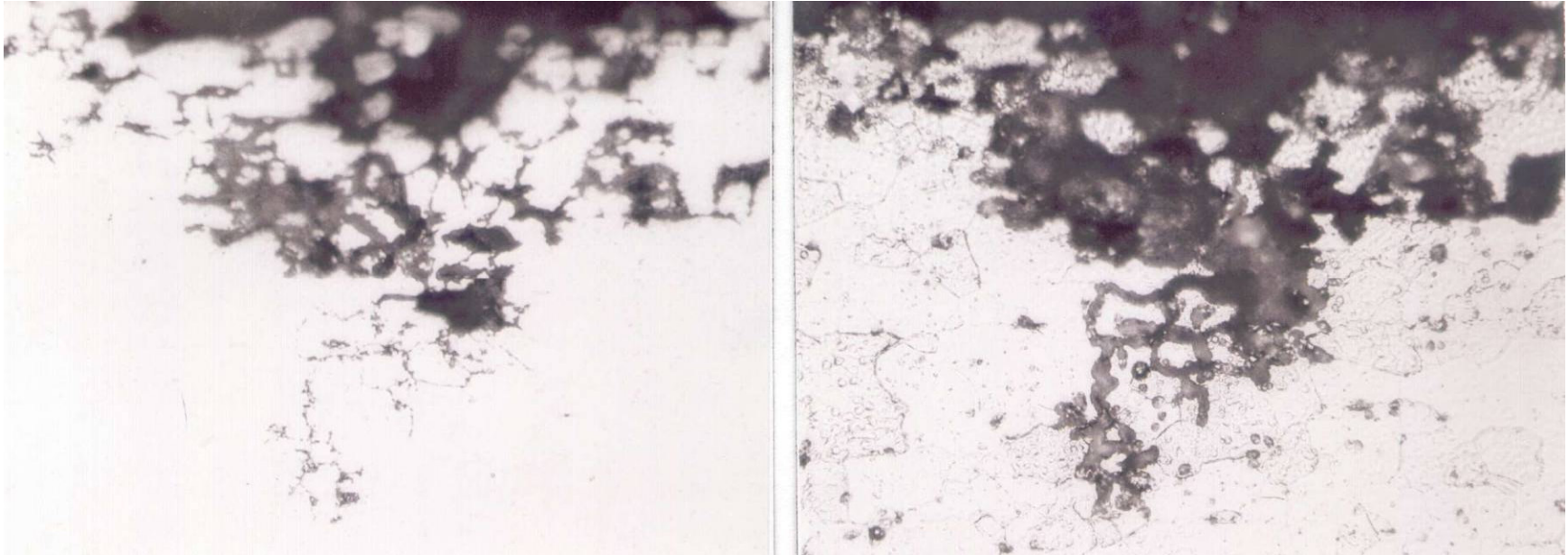


Metaaloplosreactie  
Zuurstofreductie





## Corrosie op aluminium drukhouder



De microstructuur laat interkristallijne aantasting zien.



# Spanningscorrosie



Door een combinatie van trekspanningen en een corrosief milieu ontstaat scheurvorming bij een relatief lage mechanische belasting.

# Corrosiebestrijding: type legering

- In zeewater bij voorkeur de de Al-Mg legeringen toepassen van de 5xxx-serie. (5083, 5754, 5059)
- Legeringen van de 6xxx-serie zijn geschikt voor extrusie-werk in zeewater. (6060, 6005)
- Andere legeringen alleen indien aanvullende beschermingsmaatregelen
- De toestand beïnvloedt de corrosieweerstand (Microstructuur / warmtebehandelingen)
- Anodiseren
  - verbeteren oxidehuid (verdikken en versterken) en daarmee verbeteren van corrosiebestendigheid
  - produceren van een goed hechtende ondergrond voor laksystemen

# Koper en koperlegeringen

- Koper is relatief edel.
- Koper en koperlegeringen zijn goed bestendig in niet al te sterk oxiderende milieus.
- Koper en koperlegeringen vertonen aangroeiwerende eigenschappen
- Nadeel: koper gevoelig voor erosie-corrosie.

## Legeringen:

- Brons: met Sn 10 %, Zn, Pb (pomphuizen e.d.)
- Messing: met 22 à 29 % Zn tot watersnelheden van 1,5 m/s
- CuNi10: met 10 % Ni geschikt voor watersnelheden tot 2,5 m/s
- CuNi30: met 30 % Ni tot 3,5 m/s

# Cases corrosie

- Corrosie stalen scheepshuid klassiek zeiljacht
- Corrosie dekrailing
- MIC bilgewater tank
- Erosie corrosie zeewater warmtewisselaar
- Galvanische corrosie staal in carbonvezelversterkte kunststof
- Cavitatiecorrosie schroefblad
- Corrosievermoeiing schroefblad
- Interkristallijne corrosie RVS schroefasloopbus
- SCC – RVS uitlaatspruitstuk speedboot
- Selectieve aantasting – messing brandblusleiding