

SUMMARY

Theoretical aspects of the cathodic protection of underground pipelines; practical difficulties in realizing this condition.

The electrochemical base of corrosion in an aqueous solution is mentioned. Special attention is given to the importance of the potential shifts present at the metal solution phase boundary. The influence of polarisation on these shifts is given and the fundamental character of cathodic protection, viz. minimizing the detrimental action of the corrosion cells by polarizing their cathodes, is explained. The potential decrease along cathodically protected (coated) pipelines is dealt with and the influence of coating defects on this decrease is discussed.

The potential shift in steel and asbest-cement casing around cathodically protected pipelines is given and the difficulties that arise in properly protecting the pipeline in these casing, are mentioned.

Theoretische beschouwingen over kathodische bescherming van ondergrondse buisleidingen;

moelijkheden bij het verwezenlijken van deze toestand in de praktijk

De toepassing van kathodische bescherming berust op een grondige kennis van het corrosieproces; men bereidt het corroderende metaal a.h.w. een koekje van eigen deeg en brengt op die wijze de corrosie tot stilstand.

Corrosie van metalen in waterige vloeistoffen is een gevolg van de werkzaamheid van galvanische elementen, de zgn. corrosie-elementen. Deze elementen ontstaan, omdat op het grensvlak tussen metaal (of metaalcomplex) en vloeistof plaatsen van verschillende potentiaal aanwezig zijn als gevolg van inhomogeniteiten in dat grensvlak. Deze inhomogeniteiten kunnen in het metaal aanwezig zijn en (of) in de vloeistof. De afmetingen van de homogene delen, die tezamen de inhomogeniteiten vormen, kunnen verschillend zijn: van duidelijk meetbare grootte tot zeer klein. Twee aaneengevoegde metalen (bijv. staal aan zink) vormen een galvanisch element, waarvan men de elektroden (kathode en anode) duidelijk kan herkennen. Een enkel metaal (bijv. zink met onzuiverheden van koper, lood, etc.; staal met insluitsels) bevat aan zijn oppervlak zeer kleine „edele” plekje, die als kathode kunnen optreden voor de rest (micro-elementen). Verschil in zuurstofgehalte van de contactvloeistof op verschillende plaatsen van het metaaloppervlak is de belangrijkste inhomogeniteit in de vloeistof, die kan leiden tot het ontstaan van corrosie-elementen. Hierbij wordt het metaaloppervlak kathodisch op de plaats met het hoogste zuurstofgehalte.

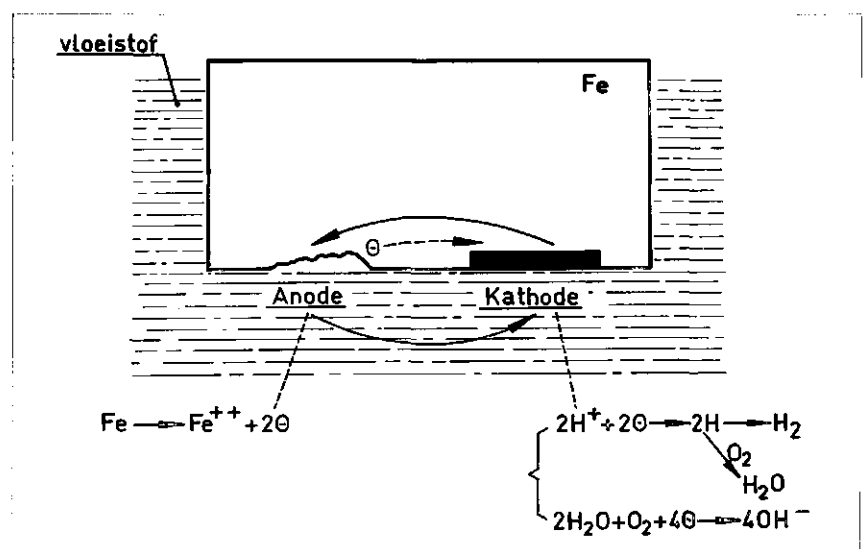
Door het potentiaalverschil tussen kathode en anode gaat in metaal en vloeistof stroom lopen.

In de vloeistof komt de stroomgeleiding tot stand door het bewegen van positieve en negatieve ionen in resp. de positieve en de negatieve stroomrichting. De positieve ionen gaan naar plaatsen met lagere potentiaal; de negatieve naar plaatsen met hogere. Wij zullen in de vloeistof gemakshalve over het algemeen alleen de positieve ionen in onze beschouwingen betrekken. In het metaal zijn alleen negatief geladen elektronen vrij bewegelijk. Deze bewegen zich in de negatieve richting.

In afb. 1 zijn de stromen van een corrosie-element getekend voor staal. Aan de

anode gaat de positieve stroom de vloeistof in, aan de kathode verlaat hij de vloeistof. In het metaal gaat de (hypothetische) positieve stroom van kathode naar anode; in werkelijkheid gaat er een stroom elektronen (\ominus) van anode naar kathode (zie gestippelde lijn). Daar de elektronen slechts in het metaal vrij voorkomen, moeten aan de grensvlakken metaal-vloeistof reacties plaatshebben, waaraan elektronen deelnemen. Hierbij vindt ladingtransport plaats door deze grensvlakken. Aan de anode lost ijzer op, waarbij elektronen vrijkomen. Deze verplaatsen zich door het staal naar de kathode, waar zij aan de kathodische reactie (ontwikkeling van waterstof of reductie van zuurstof) deelnemen (zie reacties in afb. 1). De anode wordt dus

Afb. 1 - Corrosie-element.



*) Lezing gehouden in een bijeenkomst van Corrosie Commissie II te Den Haag op 16 januari 1968.

aangetast, de kathode wordt beschermd. Een metaaloppervlak dat corrodeert, kan een groot aantal anodische en kathodische punten bezitten op het oppervlak, die eventueel tijdens het corrosieproces van plaats kunnen verwisselen. Ieder stukje oppervlak is in dat geval nu eens anode en dan weer kathode. Een dergelijk verloop leidt tot gelijkmatige corrosie aan het oppervlak.

Wij zullen nu het potentiaalverloop nagaan in een werkend galvanisch element. Daartoe moeten wij eerst de toestand beschouwen bij evenwicht (zie afb. 2).

Hebben wij twee onverbonden metalen (Fe en Zn) in een waterige oplossing, dan stelt zich een evenwicht in, doordat een aantal metaalionen in oplossing gaan, waarbij de vrije elektronen in het metaal achter blijven; hierbij wordt het metaal negatief geladen t.o.v. de vloeistof en bij evenwicht gaan er geen verdere metaalionen in oplossing¹⁾. Er is bij evenwicht dus een potentiaalsprong aanwezig in het grensvlak metaal-vloeistof.

De grootte van die sprong kunnen wij niet meten; wij kunnen echter wel een nulpunt aannemen en alle andere potentialen hierop betrekken. Meestal neemt men de normaal waterstof-electrode als nulpunt aan en meet de potentialen in de waterstofschaal.

De grootte van de evenwichtspotentialen hangt af van de aard van het metaal en van de concentratie aan eigen ionen in de omringende vloeistof. De grootte wordt gegeven door de wet van Nernst:

$$E_M = E_M^0 + \frac{0,059}{n} \log (M^{n+}) \text{ (bij } 25^\circ \text{ C).}$$

E_M = de evenwichtspotentiaal voor metaal M met de n-waardige ionen M^{n+} ;

(M^{n+}) = concentratie (eigenlijk activiteit) van de ionen M^{n+} in de vloeistof;

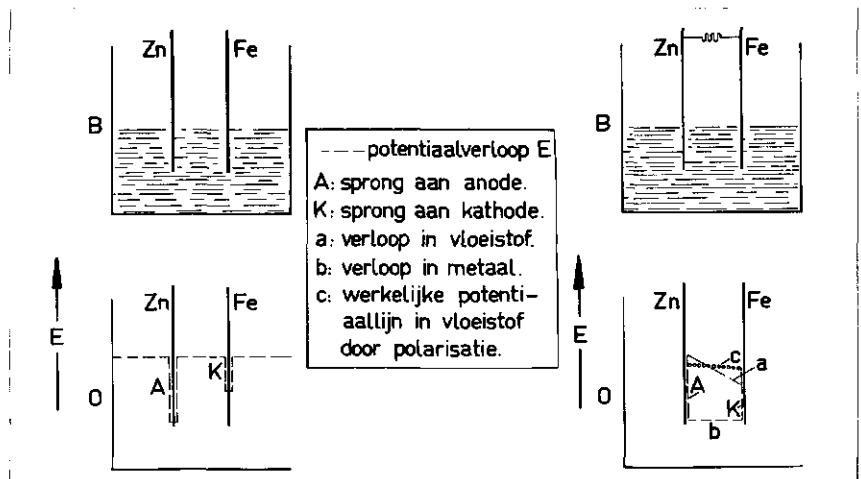
E_M^0 = de zgn. normaalpotentiaal, d.w.z. evenwichtspotentiaal bij concentratie 1 van de ionen M^{n+} in de vloeistof.

Wij zien, dat naarmate (M^{n+}) lager is de evenwichtspotentiaal meer negatief wordt.

Voor de verschillende metalen liggen de potentialen verschillend. Zo ligt de potentiaal van zink lager dan die van ijzer, wanneer men beide metalen in leidingwater dompelt. Dit is getekend in afb. 2.

Afb. 2B (Boven) geeft de situatie weer; afb. 2O (Onder) de potentialen, zoals men die kan meten. Wij zien, dat in de

1) De evenwichten, die optreden, zijn dynamisch van aard en niet statisch. Er is dus geen stilstand, maar er gaan evenveel ionen van het metaal in de vloeistof als andersom. Voor de onderhavige uiteenzetting is deze dynamische beschouwingswijze niet van belang. Wij gaan er daarom niet verder op in.



Afb. 2 - Evenwicht (open keten) links. Afb. 3 - Corrosie-element (gesloten keten) rechts.

vloeistof overal dezelfde potentiaal heerst, maar dat in het zink de potentiaal lager is dan in het staal.

Verbindt men het zink aan het staal via een zeer kleine weerstand, dan gaat stroom lopen. Dit komt, omdat de potentialen in de met elkaar verbonden metalen zich praktisch vereffen. In afb. 3B is de verbonden toestand getekend. Afb. 3O geeft het potentiaalverloop weer. De vereffende toestand in het metaal is aangegeven door de stippellijn b.

De kathode heeft nog net iets hogere potentiaal dan de anode, maar het scheidt maar weinig. Aan de anode is de potentiaalsprong naar de vloeistof groot, in de vloeistof vermindert de potentiaal van anode naar kathode.

De gestippelde lijnen AaKb geven de toestand weer, zoals die volgt uit de in afb. 2 weergegeven potentiaalsprongen.

Dat is niet de werkelijke toestand. Deze wordt in de vloeistof gegeven door lijn c. Deze afwijking is een gevolg van polarisatie. Hierover moet nu eerst een nadere uiteenzetting volgen.

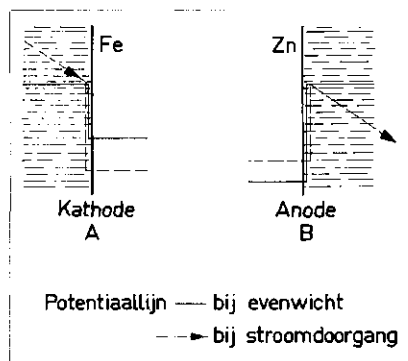
Bij evenwicht gaat er geen stroom door het grensvlak metaal-vloeistof en is de potentiaalsprong aan dat grensvlak gelijk aan de evenwichtspotentiaal. Als er stroom door het grensvlak gaat (en er dus reacties aan het grensvlak plaats

hebben), dan kan dit proces alleen op gang worden gehouden, als er een afwijking is van de evenwichtstoestand.

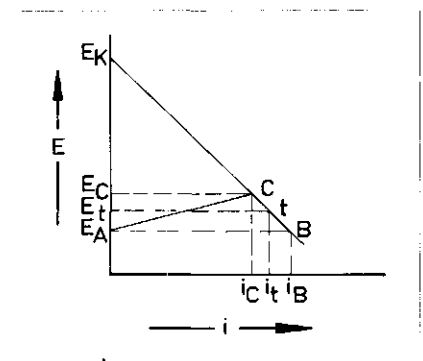
Als een kathodische stroom door het grensvlak gaat (en het metaal dus als kathode optreedt), dan bewegen de positieve ionen in de vloeistof zich met de positieve stroom mee naar het metaal toe. Dit kan alleen, als het metaal negatiever is dan bij evenwicht d.w.z. de evenwichtspotentiaal moet in negatieve zin verschuiven. Is het metaal dus bij evenwicht negatief t.o.v. de vloeistof, dan moet dit bij stroomdoorgang sterker negatief worden, m.a.w. de potentiaalsprong aan het grensvlak vloeistof-metaal neemt toe. Dit is getekend in afb. 4A.

Als een anodische stroom door het grensvlak metaal-vloeistof gaat, dan bewegen de positieve ionen in de vloeistof zich met de positieve stroom mee van het metaal af. Dit kan alleen als het metaal positiever is dan bij evenwicht, hetgeen betekent, dat de evenwichtspotentiaal in positieve zin moet verschuiven. Als het metaal dus bij evenwicht negatief is t.o.v. de vloeistof, dan moet dit bij stroomdoorgang minder negatief worden, m.a.w. de potentiaalsprong aan het grensvlak metaal-vloeistof neemt af. Men ziet dit getekend in afb. 4B.

Afb. 4 - Polarisation.



Afb. 5 - Polarisation. E-i-diagram.



De potentiaalverschuivingen, die door de stroomdoorgang aan de elektroden optreden, worden polarisatie genoemd.

De polarisatie aan de anode heet anodische polarisatie en omvat een meer positief worden van het metaal (t.o.v. de vloeistof) ten gevolge van de stroomdoorgang; de polarisatie aan de kathode heet kathodische polarisatie en omvat een meer negatief worden van het metaal (t.o.v. de vloeistof) ten gevolge van de stroomdoorgang. In afb. 4 zijn de polarisaties ingetekend.

De grootte van de polarisatie hangt af van de intensiteit van de stroomdoorgang, dus de stroomdoorgang per oppervlakte-eenheid oftewel stroomdichtheid. Naarmate de stroomdichtheid toeneemt, neemt ook de polarisatie toe. Het juiste verband heeft *Tafel* gevonden.

In afb. 5 is uitgebeeld wat zich in een corrosie-element afspeelt. De potentiaal E is uitgezet tegen de stroom i . Deze i wordt aldoor betrokken op hetzelfde oppervlak; in wezen stelt i dus een stroomdichtheid voor. Men ziet de potentialen van kathode en anode bij open keten (E_K resp. E_A), dus wanneer de uitwendige stroom i gelijk is aan nul.

Naarmate de stroomdoorgang en dus i toeneemt, daalt de potentiaal aan de kathode en stijgt zij aan de anode. In punt C ontmoeten de lijnen elkaar. In dit punt zijn de kathode- en de anodestroom gelijk en ook de potentialen van beide elektroden (in een goed geleidende vloeistof althans). Dit punt geeft de omstandigheden aan, waaronder de corrosie plaats heeft als de kathode en de anode metallisch contact met elkaar hebben.

De corrosie-stroom is dan i_C .

De uiteenzetting over polarisatie verschafft ons direct de mogelijkheid om duidelijk aan te geven wat er geschiedt bij kathodische bescherming. Kathodische bescherming wordt toegepast om corrosie te bestrijden. Dit wordt in de praktijk verwezenlijkt door aan het te

beschermen object (bijv. een buisleiding) (positieve) stroom toe te voeren via het omringende agressieve medium. De toevoer kan geschieden door het gebruik van zgn. galvanische anoden d.w.z. anoden van een metaalsoort of legering, die anodisch zijn t.o.v. het te beschermen metaal. Daar de te beschermen objecten meestal uit staal bestaan, komen als galvanische anoden vrijwel alleen magnesium, zink en aluminium (of legeringen van deze metalen) in aanmerking. De stroomtoevoer kan ook geschieden door gelijkstroom via hulpanoden naar het te beschermen object te voeren. De hulpanoden kunnen hierbij bestaan uit aantastbaar materiaal (in hoofdzaak staal in de vorm van schroot) of onaantastbaar materiaal als siliciumijzer, koolstof, grafiet, geplatineerd titanium, etc.; de gelijkstroom kan afkomstig zijn van een gelijkstroombron (accu, etc.) of van een op het wisselstroomnet aangesloten gelijkrichter.

Men wil bij toepassen van kathodische bescherming in feite bereiken, dat geen anodische stromen het te beschermen object verlaten. In afb. 6 is afgebeeld hoe dat in principe mogelijk is. In afb. 5 betekent de afwezigheid van anodische stroom, dat men op punt E_A ligt van de anodische stroomspanningslijn $E-C$. De extra stroom, die naar het te beschermen voorwerp wordt toegevoerd, is kathodisch van aard; men moet zich daarom bewegen langs de kathodische stroomspanningslijn $E-C$ en wel totdat punt B is bereikt. Dan heerst over het gehele oppervlak van het te beschermen object de potentiaal E_A (de anodische potentiaal bij open keten), zodat geen anodische stromen het te beschermen metaal kunnen verlaten; er is dus geen aantasting. Uit afb. 5 blijkt, dat hiervoor nodig is de beschermingsstroom i_C . De corrosiestroom bedraagt i_C . De beschermingsstroom is in afb. 5 dus groter dan de corrosiestroom. Dit is altijd het geval,

behalve als de anodische stroomspanningslijn $E-C$ horizontaal loopt, d.w.z. als er geen anodische polarisatie optreedt.

Het criterium, dat hier is gegeven, is in de praktijk niet hanteerbaar. Men zou over het gehele oppervlak de potentiaal punt voor punt moeten afmeten en daarna zoveel stroom toevoeren, dat overal de meest anodische potentiaal zou heersen. In de praktijk verlaagt men de potentiaal over het gehele oppervlak tot een zo lage waarde, dat praktisch gesproken geen anodische en kathodische plaatsen meer op het oppervlak kunnen optreden. De gezochte waarde is thermodynamisch bepaald en kan uit de formule van *Nernst* worden afgeleid. Voor staal bedraagt zij -925 mV of lager, gemeten met de koper-kopersulfaat elektrode. In de praktijk is gebleken, dat reeds bij -850 mV geen corrosie meer waarneembaar is (in aerobe gronden).

Deze praktische waarde wordt altijd als beschermingspotentiaal aangehouden.

Het is niet de bedoeling om bij dit beoogt uitvoerig in te gaan op de manier, waarop kathodische bescherming in de praktijk wordt verwezenlijkt. Slechts enige aspecten van kathodisch beschermde buisleidingen zullen nader worden beschouwd, en wel voornamelijk het potentiaalverloop langs een beschermde buisleiding en verder de potentialen, die kunnen optreden op die delen van een beschermde buisleiding, die in mantelbuizen zijn gelegen.

Bij een kathodisch beschermde, ondergrondse, beklede (= gebitumineerde) buisleiding zijn op bepaalde punten langs de leiding grondbedden geplaatst, die worden aangesloten op met de leiding verbonden gelijkrichters. (Men kan in speciale gevallen ook galvanische anoden toepassen, maar daarop gaan wij niet in). De grondbedden voeren beschermingsstroom toe aan de leiding.

Men wil om economische redenen zo weinig mogelijk stroom gebruiken en verlangt dus naar een zodanig potentiaalverloop langs de leiding, dat overal de beschermingspotentiaal wel is bereikt, maar deze in negatieve richting zo min mogelijk wordt overschreden.

Voor de stroomkring (leiding-gelijkrichter-grondbed-bodem) geldt de wet van Ohm: $E = I \times R$, waarbij $E = E_0 - E^1$ en $R = R_A + R_K + R_V$.

E = electromotorische kracht (EMK) die in de stroomkring werkzaam is;

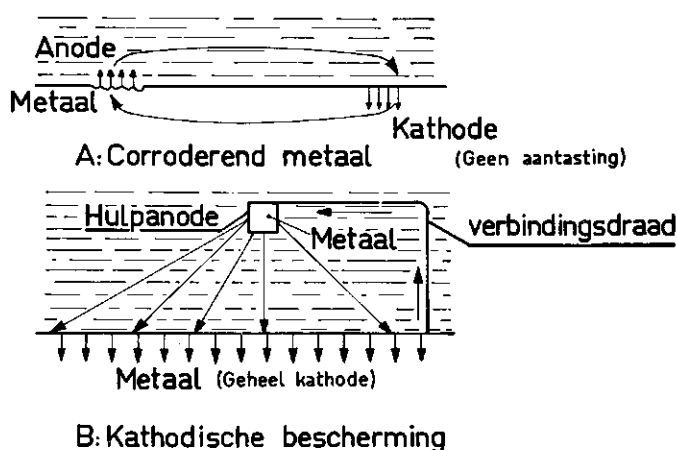
E_0 = EMK van de stroomkring bij open keten;

E^1 = polarisatie;

I = de stroom in de stroomkring;

R = de totale weerstand in de stroomkring;

Afb. 6 - Principe van de kathodische bescherming.



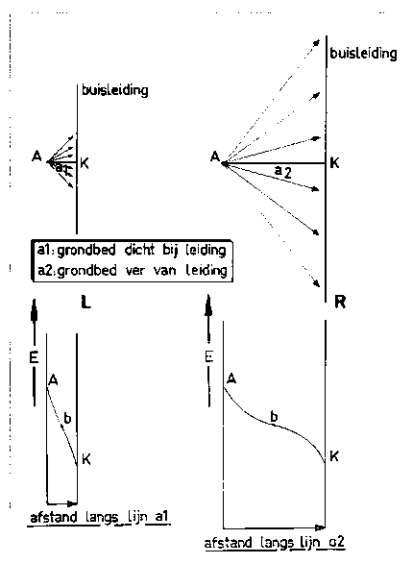
R_A = de (overgangs)weerstand, die de stroom ondervindt in de bodem rondom het grondbed (= anode);

R_K = de (overgangs)weerstand, die de stroom ondervindt in de bodem rondom de buisleiding (= kathode);

R_V = de weerstand in de verbindingen (draden, gelijkrichters, anode, buis).

De waarde van R_A en R_K hangt af van de afstand tussen anode en kathode.

Indien het grondbed zeer dicht bij de leiding staat, dan is het potentiaalverloop langs de loodlijn, die vanaf het grondbed op de leiding kan worden ge-



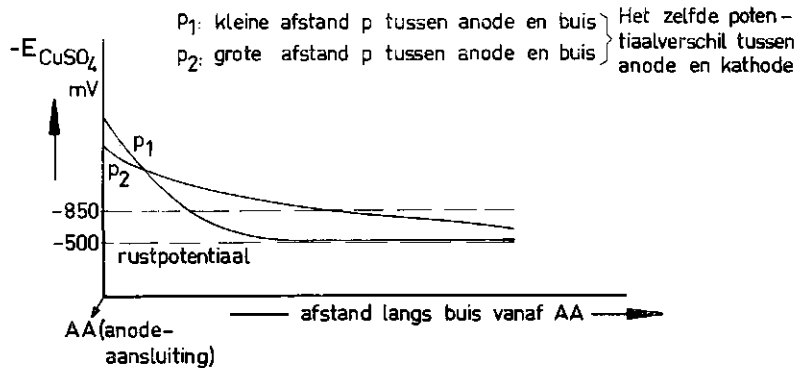
Afb. 7 - Potentiaalverloop langs loodlijn a vanuit grondbed A.

trokken, steil en de stroomspreiding is gering, zodat slechts een klein deel van de leiding aan weerszijden van het grondbed wordt bereikt. Bij grote afstand tussen grondbed en leiding is het potentiaalverloop langs bovengenoemde loodlijn minder steil en de stroomspreiding is beter.

In afb. 7 is het potentiaalverloop afgebeeld, dat optreedt langs de loodlijn a, die men vanuit het grondbed op de leiding kan neerlaten. In 7L ziet men de toestand bij kleine afstand a_1 , in 7R de toestand bij grotere afstand a_2 . De potentiaalcurve is in 7L duidelijk steiler dan in 7R. In het ideale geval loopt de raaklijn aan de potentiaalcurve in het buigpunt b horizontaal. Dit treedt in werkelijkheid alleen op als de afstand AK oneindig groot is. In de praktijk wordt de horizontale ligging van de raaklijn al spoedig voldoende benaderd.

Bij een goed beklede buisleiding behoeft daartoe de afstand tussen A en K slechts enkele meters te zijn.

Het potentiaalverloop langs de leiding



Afb. 8 - Potentiaalverloop langs beschermde leiding bij kleine en grote p. Homogene bekleding.

wordt gegeven in afb. 8. In de afb. is het potentiaalverloop weergegeven langs de leiding voor kleine en grote afstand p tussen buisleiding en aangesloten anode (grondbed). Horizontaal is afgezet de afstand van de anode-aansluiting AA, verticaal de negatieve buis-bodempotentiaal (t.o.v. de verzadigde kopersulfaat-electrode). Slechts de helft rechts van de aansluiting is getekend, de andere helft is identiek.

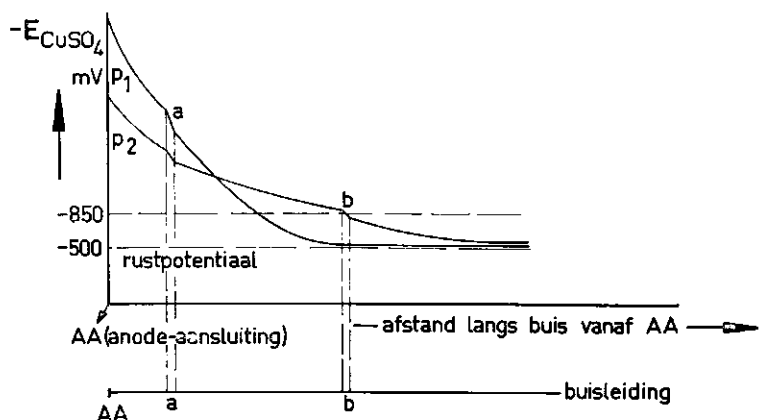
Men ziet, dat de potentiaal nabij de anode-aansluiting het meest negatief is en dat deze langzaam afneemt als de afstand tot de anode-aansluiting toeneemt. Bij kleine afstand p_1 is er een klein spreidingsgebied van de stroom, bij grote afstand p_2 een groot spreidingsgebied, maar met minder negatieve potentiaalwaarden vlak bij AA. De lijn -0,850 V geeft aan, welk deel van de leiding beschermd is, nl. het deel, dat meer negatief is dan deze waarde. De lijn -0,500 V geeft aan de zgn. rustpotentiaal van de corroderende niet-beschermde buis. Deze waarde ligt niet volkomen vast, maar is verschillend voor de verschillende gevallen. De waarde wordt in hoofdzaak bepaald door de agressiviteit van de grond en ook enigszins door de soort staal en de

oppervlakte-toestand van de buis en andere, minder bekende factoren. In sterk agressieve grond kan de waarde ongeveer -0,400 V bedragen, in weinig of niet-agressieve gronden van 0,650 tot -0,750 V.

In het in afb. 8 getekende geval gaat het om een buisleiding met een homogene bekleding zonder fouten of met vele, statistisch gesproken homogeen over het oppervlak verdeelde, kleine fouten, waarbij de potentiaal langs de leiding exponentieel afneemt. In de praktijk kunnen in de bekleding plaatselijk grote fouten voorkomen. Wil men op die plaatsen de buis kathodisch beschermen, dan vraagt dit relatief gesproken veel stroom (per oppervlakte-eenheid). Daarom blijft er voor de naastgelegen plaatsen minder stroom over, d.w.z. deze worden minder goed beschermd, d.w.z. minder negatief.

In afb. 9 ziet men het potentiaalverloop op een buisleiding met fouten in de bekleding; de buis is onder de horizontale als schetsmatig aangegeven. Op de plaats waar de fouten zijn, neemt de potentiaal sprongsgewijze toe. Uit de afb. blijkt bijv., dat ter plaatse van fout b de buis tengevolge van de potentiaalsprong niet meer kathodisch is beschermd.

Afb. 9 - Potentiaalverloop langs beschermde leiding. Homogene bekleding met fouten a en b. Verder als afb. 8.

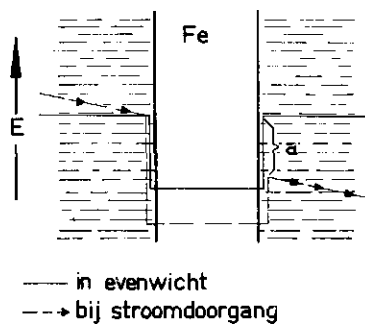


Uit de hier vermelde feiten volgt, dat om een lange buisleiding kathodisch te beschermen op bepaalde afstanden van elkaar langs de leiding anoden of grondbedden geplaatst moeten worden, waaruit zoveel stroom aan de leiding moet worden toegevoerd, dat langs het gehele oppervlak de kathodische beschermings-toestand is bereikt, bij voorkeur door een langs het gehele oppervlak heersende zo gelijkmatig mogelijke potentiaal. Hoe men dit ook probeert, ter plaatse van de anode-aansluitingen zullen steeds negatieve pieken aanwezig zijn (zie afb. 8 en 9). Deze pieken moeten niet te diep worden en daarom is het gewenst niet te weinig anoden of grondbedden te gebruiken. Het is overigens zo, dat bij goed beklede leidingen de stroomspreiding zeer goed is, zodat dan relatief weinig grondbedden nodig zijn. Een goede bekleding is dus voor het installeren van de kathodische bescherming steeds gunstig, omdat de stroombehoefte voor dergelijke leidingen relatief laag is en daardoor de stroomspreiding bijzonder goed.

Hierna volgt een korte uiteenzetting over de moeilijkheden die zich kunnen voordoen bij het gebruik van mantelbuizen. Wij spreken hier over onbektele mantelbuizen. Door beklede mantelbuizen (en wel speciaal door mantelbuizen met een inwendige bekleding) gaat geen stroom en men zou daarom in dit geval kunnen spreken van isolerende mantelbuizen. In een isolerende mantelbuis kan men kathodische bescherming van de binnenbuis alleen tot stand brengen door speciale voorzieningen aan te brengen in de (kleine) ruimte tussen mantelbuis en binnenbuis. Hierop gaan wij verder niet in.

In onbektele mantelbuizen kan men de binnenbuis van buitenaf kathodisch beschermen, maar de mantelbuizen vormen in principe wel een handicap. Er zijn twee soorten mantelbuizen in gebruik: stalen mantelbuizen en mantelbuizen van asbestcement. Zij vormen fundamenteel gesproken hetzelfde soort obstakel voor de stroomdoorgang (nl. een extra weerstand), ondanks het feit, dat de stroomdoorgang in de twee genoemde substanties geheel verschillend is. Zoals wij weten, vindt de stroomgeleiding in metalen plaats door bewegende elektronen (zie afb. 1). In beton verloopt de stroomgeleiding op dezelfde wijze als in vloeistoffen dus via bewegende ionen.

Als in een mantelbuis de binnenbuis kathodisch moet worden beschermd door een stroombron die buiten de mantelbuis ligt, dan moet de stroom de mantelbuiswand passeren. De stroom gaat aan de buitenzijde deze wand binnen en verlaat deze aan de binnenzijde. Bij een stalen mantelbuis ondervindt de stroom in het staal vrijwel geen weerstand, want staal geleidt de stroom zeer goed. Echter, de polarisatieverschijnselen, die optreden als de stroom het staal binnen-

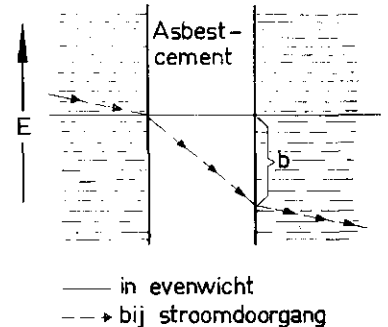


Afb. 10 - Potentiaalverloop E bij stroomdoorgang door stalen mantelbuis, die zich in vloeistof (grondwater) bevindt. Potentiaaldaling: a.

treedt of verlaat, vormen voor de stroomdoorgang een belemmering (zie afb. 4). In afb. 10 is het potentiaalverloop afgebeeld bij stroomdoorgang door een stalen wand. Zonder stroomdoorgang geeft de getrokken lijn het potentiaalverloop weer, bij stroomdoorgang geldt de gestippelde lijn. Links ziet men een vergroting van de potentiaalsprong aan het grensvlak vloeistof-metaal (kathodische polarisatie) en rechts een verkleining (anodische polarisatie). In het metaal treedt praktisch geen potentiaalverloop op, wel in de vloeistof. Het resultaat van alles is, dat in de metalen wand de potentiaaldaling a optreedt.

Deze potentiaaldaling kan men beschouwen als het resultaat van een extra weerstand, die (hypothetisch) in het staal aanwezig kan worden gedacht. Alleen in deze zin kan men zeggen, dat de stalen wand aan de stroom weerstand biedt. In werkelijkheid gaat het om belemmeringen door optredende polarisatie, die men als een soort schijnweerstand kan beschouwen.

De weerstand in een mantelbuis van asbestcement is echt. Asbestcement ge-



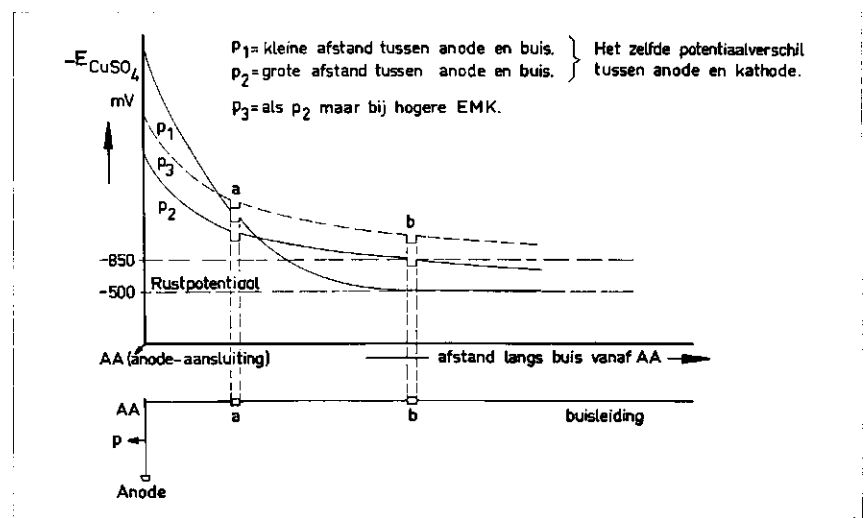
Afb. 11 - Potentiaalverloop E bij stroomdoorgang door wand van asbestcement, die zich in vloeistof (grondwater) bevindt. Potentiaaldaling: b.

leidt de stroom minder dan de meeste gronden of grondwatersoorten; in goed geleidende gronden kan men zelfs zeggen veel minder. Dit is een gevolg van het hoge gehalte aan niet-geleidend vast materiaal, dat per volume-eenheid aanwezig is. Dit betekent, dat asbestcement doorgaans een hogere specifieke weerstand heeft dan het omringende grondwater. Volgens de wet van Ohm ($E = I \times R$) betekent dit, dat als gelijke stroomhoeveelheden congruente volumina grond resp. asbestcement doorlopen, de potentiaaldaling in asbestcement groter is dan die in grond. Dus ook in een asbestcement mantelbuis treedt bij stroomdoorgang een extra potentiaaldaling op, ditmaal als gevolg van de aanwezigheid van een (echte) hogere weerstand in het asbestcement. In afb. 11 is het potentiaalverloop in een mantelbuis van asbestcement getekend bij af- resp. aanwezigheid van stroomdoorgang (getrokken resp. gestippelde lijn).

De potentiaaldaling in de wand is gelijk aan b.

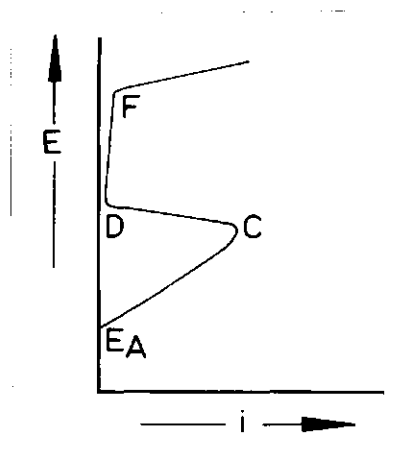
Voor het potentiaalverloop langs een kathodisch beschermde leiding heeft de

Afb. 12 - Potentiaalverloop langs beschermde leiding. Mantelbuizen (staal of asbestcement) bij a en b.



aanwezigheid van mantelbuizen om de leiding gevolgen die nu op duidelijke wijze kunnen worden uiteengezet. Men ziet dit in afb. 12. Ter plaatse van de mantelbuizen is de potentiaaldaling aangegeven. Voor de mantelbuis a vlak bij het anodebed, wordt bij kleine p_1 resp. grote p_2 kathodische bescherming verkregen op de binnenbuis, want de potentiaaldaling brengt de potentiaal aldaar niet aan de onbeschermd zijde van de grenslijn (-0,85 V). Bij kleine p_1 strekt de beschermingstoestand zich niet tot mantelbuis b uit. Ook bij grote p_2 blijkt de binnenbuis in deze mantelbuis niet of nauwelijks de beschermingspotentiaal te bereiken. Om zeker te zijn moet men de EMK van de gelijkrichter verhogen (zie stippellijn p_3), hetgeen belangrijke overbescherming op grote leidingdelen meebrengt.

Het is dus wel duidelijk, dat er moeilijkheden kunnen ontstaan op de binnen-



Afb. 13 - Anodische stroomspanningslijn van passiverend metaal.

buis van mantelbuizen, die ver van het grondbed zijn gelegen. Men kan de moeilijkheden bestrijden door het plaatsen van een extra grondbed nabij dergelijke mantelbuizen. In de praktijk is zulks echter niet altijd op economische wijze mogelijk, omdat stroomaansluiting niet steeds eenvoudig kan worden tot stand gebracht.

Er is nog weinig gezegd over de grootte van de potentiaaldaling in de mantelbuis, hoewel deze grootte in wezen bepaalt hoe hinderlijk het verschijnsel van de potentiaaldaling is. Steeds is de hoeveelheid stroom per oppervlakte-eenheid d.w.z. de stroomdichtheid de bepalende factor. Hoe groter stroomdichtheid, hoe groter polarisatie en hoe groter de potentiaaldaling a in afb. 10 (stalen mantelbuis) of b in afb. 11 (mantelbuis van asbestcement). Hebben wij een goed beklede binnenbuis, dan is de totaal benodigde stroom voor de binnenbuis gering. De stroomdichtheid bij doorgang van deze stroom door een onbekte mantelbuis is dan zeer gering en de op-

tredende potentiaaldaling verwaarloosbaar of zelfs niet meetbaar. Is de binnenbuis onbekte of is de bekleding sterk beschadigd, dan is de toestand ongunstig of minder gunstig en dan moet men rekening houden met de effecten van afb. 12. Bij beklede mantelbuizen kan de toestand zeer moeilijk worden; kathodische bescherming met stroom van een bron buiten de mantelbuis is dan niet steeds mogelijk. Daarop gaan wij hier niet in. Men doet er dus goed aan te streven naar een goed beklede binnenbuis in een onbekte mantelbuis.

Tenslotte een tweetal speciale onderwerpen.

In de eerste plaats: wat verstaat men onder anodische bescherming? Van anodische bescherming kan gebruik worden gemaakt als het gaat om metalen, die automatisch of althans zeer gemakkelijk passiveren. Men ziet in deze gevallen de anodische stroomspanningslijn (de lijn E C in afb. 5) boven een zekere potentiaal terugbuigen tot dicht bij de verticale as (spanningsas), waardoor wordt aangeduid, dat in het betreffende potentiaalgebied met een (anodische) oplossingsstroom van volkomen verwaarloosbare grootte het metaal bestendig is, omdat zich op het metaal een passiveringslaag heeft afgezet van relatief hoge specifieke weerstand. In afb. 13 is de anodische stroomspanningslijn van een passiverend metaal getekend. In het potentiaalgebied DF is het metaal gepassiveerd en is de oplossingsstroom zeer gering.

Om anodische bescherming toe te passen moet men het gebied van passivering precies kennen; dit gebied kan nl. voor ieder metaal en voor ieder milieu verschillend zijn. Men moet verder de middelen hebben om snel het sterk-aantastende gebied E C te doorkruisen. Omdat de oppervlakteweerstand van gepassiveerd metaal zeer veel groter is dan van niet gepassiveerd metaal, groeit de passiveringslaag over het algemeen gemakkelijk aan over het hele metaaloppervlak, als eerst maar een deel van het oppervlak is gepassiveerd. Dit is een gunstige eigenschap bij het passiveren van metalen met ingewikkeld oppervlak.

Tot slot de vraag: is staal bij -0,85 V t.o.v. de kopersulfaatelectrode ook tegen anaerobe corrosie beschermd? Neen, dat is niet het geval. In anaerobe omstandigheden, als sulfaatreducerende bacteriën aan de corrosie kunnen meewerken, is -0,95 V (CuSO_4) veilig gebleken, dus ongeveer 100 mV lager. De waarde is proefondervindelijk vastgesteld. Men heeft er op dit ogenblik geen door proeven bevestigde verklaring voor.

Bij deze waarde zijn de in anaerobe grond gelegen buisdelen beschermd, de in aerobe grond gelegen buisdelen zijn overbeschermd.