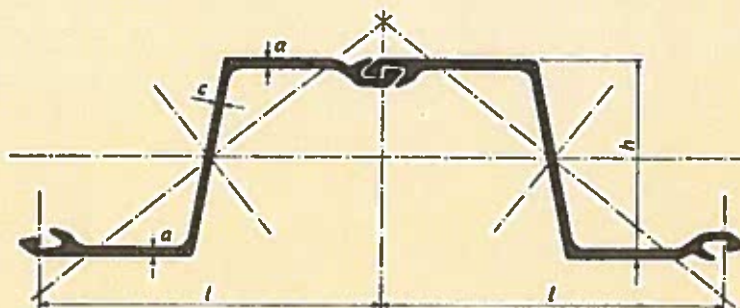


HAVNEKORROSIONS UDVALGET



MEDDELELSE NR 5

Korrosionsbeskyttelse af jernspunsvægge



KORROSIONSBESKYTTELSE
AF JERNPUNSVÆGGE

HAVNEKORROSIONSUDVALGET
DECEMBER 1974

© Havnekorrosionsudvalget. 1974.
v. Korrosionscentralen, Parkalle 345, Glostrup

FORORD

I løbet af 1950'erne konstateredes et stigende antal gennemtæringer i jernspunsvægge fra 1920'erne og begyndelsen af 1930'erne. Derfor nedsatte ATV den 17.3.59 et udvalg, Havnekorrosionsudvalget, med daværende vandbygningsdirektør Arne Lehnfelt som formand med det formål at undersøge korrosionsproblemer i danske havne. Fra januar 1961 betragtedes udvalget som nedsat af ATV i samarbejde med Ministeriet for offentlige arbejdere. Efter vandbygningsdirektør A. Lehnfelts død i 1971 har professor H. Lundgren fungeret som formand.

Havnekorrosionsudvalget har haft følgende medlemmer:

Aa. Grum-Schwensen	stadsingeniør, cand. polyt.	1959-1966
Arne Jeppesen	afdelingsingeniør, cand. polyt.	1959-1964
F.H. Klingemann	civilingeniør	1959-1967
J.E. Kruhøffer	havnedirektør, cand. polyt.	1966-
Arne Lehnfelt	vandbygningsdirektør, cand. polyt.	1959-1971
H. Lundgren	professor, dr. techn. (formand fra 1971)	1959-
E. Lavbjerg Madsen	afdelingsingeniør, cand. polyt.	1964-
A. Mortensen	havneingeniør, cand. polyt.	1959-1968
Svend Nielsen	afdelingsingeniør, cand. polyt.	1959-
P.A. Orbæk	civilingeniør	1959-
C. Ringe	distriktsingeniør, cand. polyt.	1959-

Udvalget koncentrerede sig fra starten om at finde frem til praktisk anvendelige metoder til tykkelsesmåling under vand på eksisterende jernspunsvægge. På udvalgets foranledning udviklede Svejsecentralen en metode hertil, baseret på anvendelse af ultralyd, og snart kom et omfattende målearbejde i danske og islandske havne i gang. Siden målearbejdets start i 1960 har der hver sommer været foretaget tykkelsesmålinger, og det samlede antal rekvirerede undersøgelser har været ca. 50. Disse undersøgelser har bidraget væsentligt til det økonomiske grundlag for udvalgets arbejde.

4.

Der er herigennem indsamlet et betydeligt erfaringsmateriale, og korrosionens fordeling på jernspunsvægge må siges at være tilstrækkeligt belyst.

Målingerne viste bl.a., at korrosionen var meget ujævnt fordelt på en normal spunsvæg, og for nærmere at undersøge dette forhold blev der ved Langebro i København indledt et forsøg, hvor vægttab og elektrokemiske data blev målt på plader i forskellige dybder og på plader, der var under hel eller delvis katodisk beskyttelse. Disse forsøg, der strakte sig over et år, blev senere gentaget i Kyndby, hvor man på Kyndbyværkets grund fik tilladelse til at etablere et mindre laboratorium. Forsøgsarbejdet er nærmere beskrevet i udvalgets Meddelelser og i foredrag ved flere korrosionskongresser, jvf. referencelisten.

Målingerne har tjent til at underbygge de erfaringer der blev indvundet ved ultralydmålingerne, samt til i detaljer at beskrive forholdene på en jernspunsvæg, når denne beskyttes katodisk.

Udvalget beskæftigede sig senere i stigende grad med beskyttelsesmetoder, herunder først og fremmest katodisk beskyttelse, og vejledte havnene ved valg af beskyttelsesmetoder.

Efter oprettelsen af Korrosionscentralen i januar 1965 blev udvalgets praktiske og rådgivende arbejder overtaget af denne, og selve udvalgsarbejdet lå stille i en årrække.

Udvalget har dog ment, at der var behov for en publikation om katodisk beskyttelse, også med henblik på de erfaringer, der er indvundet herhjemme, og har med nærværende arbejde ønsket at afslutte sin virksomhed.

Udvalget skylder tak til mange sider.

Ministeriet for offentlige arbejder har givet et betydeligt økonomisk tilskud til arbejdet.

Statens teknisk-videnskabelige Fond har givet tilskud til oprettelsen af forsøgsstationen i Kyndby.

Københavns Havn og I/S Isefjordværket takkes for tilladelse til og praktisk hjælp ved gennemførelsen af forsøgsarbejdet. Instituttet for Metal-lære, DTH og Korrosionscentralen, ATV, har stillet lokaler til rådighed for udvalgets medarbejdere.

Den ledende kraft i udvalgets arbejde har været lektor, civilingeniør Hans Arup, siden 1965 Korrosionscentralens leder.

Udvalgets øvrige medarbejdere, indtil februar 1964 civilingeniør G. Glantz og derefter civilingeniør Jørgen Møller, har med levende interesse udført et stort og ofte krævende arbejde i forbindelse med forsøg og rapporter.

December 1974

Havnekorrosionsudvalget

INDHOLD

0	Indledning	
1	Korrosionens natur	
2	Beskyttelsesforanstaltninger	
2.1	Katodisk beskyttelse	
2.2	Maling - Zonemaling	
2.3	Forstøbning	
2.4	Bagstøbning	
3	Katodisk beskyttelse	
3.1	Teoretisk redegørelse	
3.1.1	Offeranoder	
3.1.2	Påtrykt strøm	
3.1.3	Potentialmåling	
3.1.4	Beskyttelsespotential	
3.1.5	Polarisation. - Strømbehov ved katodisk beskyttelse	
3.1.6	Vagabonderende strømme	
3.2	Anodeplaceringer	
3.3	Anodematerialer	
3.3.1	Offeranoder. - Zink, magnesium, aluminium	
3.3.2	Anodematerialer for påtrykt strøm	
	Anoder, der forbruges. - Jernskrot, aluminium.	
	Permanente anoder. - Grafit, siliciumjern, platineret titan, bly, magnetit	
3.4	Eksempler på udformning af anlæg for katodisk beskyttelse	
3.4.1	Anlæg med offeranoder	
3.4.2	Anlæg med påtrykt strøm	

- 8.
- 3.5 Konstruktive detaljer før installation af katodisk beskyttelse
- 3.6 Dimensionering af anlæg til katodisk beskyttelse
 - 3.6.1 Dimensioneringsvejledning
 - 3.6.2 Eksempler
 - Offeranoder
 - Fjernt placerede anoder af jernskrot
 - Magnetitanoder på spunsvæggen
- 3.7 Forholdsregler mod vagabonderende strøm
 - 3.7.1 Interferensmålinger
 - 3.7.2 Aflledning af vagabonderende strøm
 - 3.7.3 Skader på skibe
 - 3.7.4 Skader på pæle, kabler og rørledninger
- 3.8 Kontrolmålinger
 - 3.8.1 Automatisk regulerede anlæg til katodisk beskyttelse
- 4 Maling
 - 4.1 Forbehandling
 - 4.2 Zonemaling
 - 4.3 Totalmaling
 - 4.4 Materialer til overfladebehandling
- 5 Økonomi
 - 5.1 Eksempler på katodisk beskyttelse
 - 5.1.1 Aluminiumanoder på spunsvæggen
 - 5.1.2 Fjernt placerede anoder af jernskrot
 - 5.1.3 Magnetitanoder på spunsvæggen
 - 5.2 Zonemaling
 - 5.3 Totalmaling
- 6 Erfaringer med anlæg til katodisk beskyttelse

O INDLEDNING

Havnekorrosionsudvalgets arbejde har igennem årene koncentreret sig om undersøgelser af korrosionshastigheder i havnene og om gennem forsøg og litteraturstudier at klarlægge, dels hvilke muligheder der var for at bremse korrosionen på eksisterende jernspunsvægge, dels hvad der kunne gøres for at forlænge nye spunsvægges levetid. Det førstnævnte var det mest akutte problem på grund af de oftere og oftere forekommende gennemtæringer af gamle jernspunsvægge.

Den eneste, i princippet helt effektive metode var og er katodisk beskyttelse, hvorfor denne metode og dens forskellige udførelsesformer m.v. blev studeret særlig grundigt, ikke mindst fordi der har været afgørende vanskeligheder med en del af de hidtil udførte anlæg.

Katodisk beskyttelse er endnu for mange et relativt ukendt begreb, der i tankerne kædes sammen med ord som vagabonderende strøm, galvanisk korrosion, elektrolyse, magnetisk vandbehandling eller statisk elektricitet, og som derfor mødes med usikkerhed og skepsis.

Det har været Havnekorrosionsudvalgets hensigt med "Korrosionsbeskyttelse af jernspunsvægge" at søge at råde bod herpå ved, gennem en kort gennemgang af teorien og en udførligere beskrivelse af de praktiske problemer, at redegøre for den eksisterende viden og de indhøstede erfaringer på dette felt. Udvalget har tilstræbt, at bogen kan tjene som vejledning for bygningsingeniører og havnemyndigheder ved teknisk og økonomisk sammenligning af katodisk beskyttelse med andre foranstaltninger mod korrosion. På begge felter foregår stadig en betydelig udvikling.

Af andre beskyttelsesforanstaltninger er betonstøbning foran eller bagved spunsvæggen samt maling nævnt i bogen, men kun beskyttelse med maling er lidt udførligere behandlet. Den særlige omtale af maling er dels motiveret af udvalgets forsøg med malingsprodukter i forbindelse med katodisk beskyttelse, dels af muligheden for partiel påføring af maling i den mest korrosionspåvirkede zone.

10.

Forstøbning og bagstøbning er ikke behandlet i detaljer, da det må antages, at bygningsingeniører, som man især henvender sig til, ikke står fremmede overfor sådanne arbejder, der i øvrigt kan udføres på mange forskellige måder.

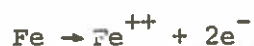
"Korrosionsbeskyttelse af jernspunsvægge", der sammenfatter Havnekorrosionsudvalgets hele arbejde, er den femte af udvalgets "meddelelser", og udvalget agter hermed at afslutte sin virksomhed. Udvalgets arbejde er i de senere år foregået i nær tilknytning til Korrosionscentralen, hvis leder, lektor, civilingeniør Hans Arup lige fra udvalgets oprettelse har været dets sekretær. Fremover vil sager vedrørende korrosion og korrosionsbeskyttelse af jernspunsvægge i havnene derfor naturligt kunne forelægges Korrosionscentralen.

Der kan dog tænkes problemer, hvor der desuden vil være brug for havneteknisk sagkundskab. Det er derfor udvalgets hensigt, inden dets formelle opløsning, at etablere et organ, som i særlige tilfælde kan rådgive Korrosionscentralen ved problemer i havnene eller tage initiativ til nye forskningsprojekter af betydning for konstruktioner på kysten eller i havet.

1 KORROSIONENS NATUR

Ved korrosion forstås nedbrydning af metaller ved kemiske eller elektrokemiske reaktioner med omgivelserne.

Når jern korroderer i havvand, sker det ved, at jernatomerne, hvis kemiske symbol er Fe, overgår fra uladet tilstand i metalstrukturen til positivt ladede ioner, Fe^{++} , i det omgivende vand. Herved frigøres der for hvert jernatom to elektroner, der bliver i jernet:



Dele af overfladen, hvor dette sker, kaldes anodiske. De frigjorte elektroner bevæger sig hen, hvor de kan reagere med vandet og den heri opløste oxygen under dannelse af hydroxylioner, OH^{-} :



vand + oxygen + elektroner \rightarrow hydroxylioner

Områder, hvor denne proces sker, kaldes katodiske.

Dens katodiske reaktion er den trægste og derfor den hastighedsbestemmende for korrosionsforløbet. Dens hastighed er bestemt af en forholdsvis langsom oxygendiffusion ind til jernet.

Jernionerne reagerer hurtigt med oxygen og vand eller de katodisk dannede hydroxylioner til rust, $Fe(OH)_3$.

Kort sagt fordeler korrosionsprocesserne på en jernspunsvæg sig således, at man får anodisk jernopløsning på steder med lavere koncentration af oxygen ved jern-

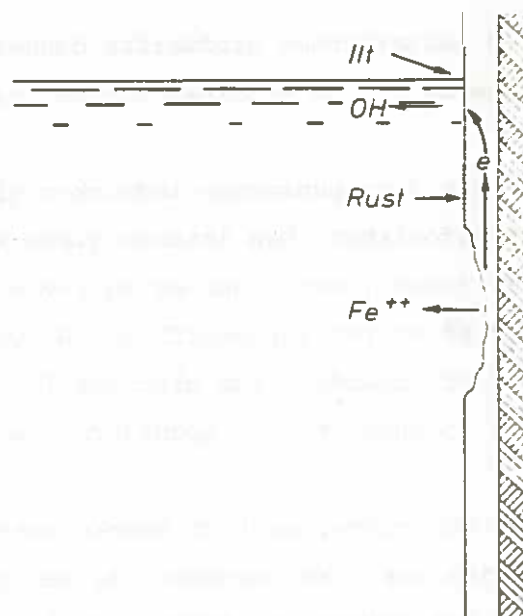


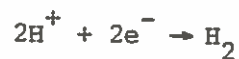
Fig. 1. Korrosionselement på spunsvæg. Den kraftigste korrosion sker i kote -0,5 til -1,0.

12.

overfladen, og katodisk omdannelse af oxygen på steder med højere koncentration.

Den højeste oxygenkoncentration ved en jernspunsvæg forekommer lige under vandoverfladen, hvor vandet er uroligt, og her foregår der en kraftig katodisk reaktion. Denne medfører en tilsvarende kraftig anodisk reaktion, som vil sætte kraftigst ind i nærheden af de katodiske områder. Dette er forklaringen på, at man oftest finder den alvorligste korrosion mellem kote -0,5 og kote -1,0.

Oxygenkoncentrationsforskelle findes i øvrigt overalt på en jernspunsvæg, og langt den overvejende del af korrosionen skyldes disse. Hvor der ingen oxygen findes, f.eks. i bundens mudder, kan den ovennævnte katodiske proces ikke finde sted. Her er imidlertid gode vækstbetingelser for visse bakteriearter, såkaldte sulfatreducerende bakterier, som kan fremme en anden katodeproces: Reduktion af hydrogenioner til "fri" hydrogen (brint).



hydrogenioner + elektroner \rightarrow fri hydrogen

Ved bakteriernes stofskifte dannes hydrogensulfid, som sammen med jernionerne fra de anodiske områder danner jernsulfid i stedet for rust.

På nye jernspunsvægge indvirker glødeskal (valsehud) kraftigt på korrosionsforløbet. Den intakte glødeskal, der er elektrisk ledende, beskytter jernet, men i huller og revner bliver angrebet mange gange kraftigere end på en ren jernoverflade. Selvom den pletvis kraftige korrosion ophører efterhånden, som glødeskallen løsnes, er det ønskeligt, at glødeskallen fjernes fra nye spunsjern, før disse rammes.

Den beskrevne, særligt stærke korrosion af en spunsvæg lidt under vandlinien var ikke forudset, da man begyndte at anvende jernspunsvægge, og det kan nævnes, at dette forhold er særligt fremtrædende i farvande som de danske, hvor vandstandsvariationerne - specielt på grund af det svage tidevande - almindeligvis er meget små, således at den stærkeste tæring hele tiden foregår på omtrent samme sted. Ved undersøgelser i danske hav-

ne er der fundet korrosionshastigheder helt op til 0,5 mm pr. år i grubetæringer, og hastigheder på 0,30 - 0,40 mm pr. år er meget almindelige. Når en jernspunsvæg bliver kassabel, er grunden da også praktisk talt altid gennemtæring i den øvre del. I enkelte tilfælde findes gennemtæringer også i større dybde, f.eks. i færgelejer, hvor der ved hyppige anløb piskes meget oxygen ind til jernet, og også her er det normalt utætheder, der nødvendiggør ombygning.

2 BESKYTTELSESFORANSTALTNINGER

2.1 Katodisk beskyttelse

I betragtning af korrosionens elektrokemiske natur er det nærliggende at bekæmpe tæringen med "katodisk beskyttelse", der er en metode til ad elektrisk vej at hindre den anodiske jernopløsning i at finde sted. Denne metode, der vil blive behandlet nærmere nedenfor, har i en årrække gennemgået en stærk udvikling, som vel ikke kan siges at være helt afsluttet endnu, og der forefindes da også en hel del forskellige udformninger af anlæggene. Der har hidtil været visse vanskeligheder ved at gøre sådanne anlæg tilstrækkeligt robuste til at kunne holde til de i forskellige henseender meget hårde vilkår, som de bliver udsat for i en havn, ligesom de kræver en omhu i tilsyn og vedligeholdelse, som det kan være svært at opnå i alt fald ved mindre havne.

Der opnås teoretisk en "evigtvarende" beskyttelse, men der kræves også en - omend ret beskedent - driftsudgift til et sådant anlæg foruden anlægsomkostningerne, og udgifterne går ikke blot til at beskytte det stærkest udsatte område, men også i nogen grad til væggenes nedrammede del og bagside, hvor tæringen i reglen er ubetydelig. Man ville i øvrigt i mange tilfælde i og for sig være tilfreds med den varighed (50 á 75 år), der kan opnås for den nedre del af spunsvæggen, når den er beregnet med et sædvanligt "rusttillæg", idet udviklingen meget ofte fører med sig, at der er brug for ombygning af anlæggene, før de er kassable.

Disse forhold bevirker, at man også på anden måde end ved katodisk be-

skyttelse har forsøgt at dække det område lidt under vandlinien, der er udsat for den kraftigste korrosion, eller i alt fald at udskyde det tidspunkt, hvor et katodisk beskyttelsesanlæg må etableres. Det kan i øvrigt nævnes, at området lidt under vand i en almindelig forankret spunsvæg er påvirket af et meget mindre bøjningsmoment end maksimalmomentet, og man kan derfor uden skade lade det ruste ned i en vis - kortere - årrække, inden der etableres katodisk beskyttelse. Det vil dog være praktisk, om der allerede ved jernspunsvæggens udførelse træffes visse foranstaltninger til lettelse af den senere etablering af katodisk beskyttelse, hvorom nærmere nedenfor. Af metoder til beskyttelse af kun det stærkest udsatte område af spunsvæggen kan nævnes følgende:

2.2 Maling - Zonemaling

Der findes i dag til overfladebehandling af jern udmærkede produkter, som selv under de meget vanskelige forhold i havvand kan holde en årrække, måske ca. en halv snes år. Der kræves dog en omhyggelig rensning af jernet før strygningen, og behandlingen bliver alt i alt så dyr, at den kun med fordel kan anvendes i den øverste, særligt udsatte zone af spunsvæggen, således at rustangrebet her kan udskydes nogle år (jfr. afsnit 4 nedenfor).

2.3 Forstøbning

Der kan udføres en betonstøbning på forsiden af den øverste del af spunsvæggen, eventuelt i forbindelse med en kajmur over vand. Dette kan gøres på mange forskellige måder, men idet støbningen skal være så robust, at den kan tåle skibsstød, bør den armeres, og armeringen skal helst være svejst fast til spunsvæggen. Undertiden anvendes færdigstøbte jernbetonelementer, der danner forskalling for en støbning ind mod væggen.

Det alkaliske miljø, der forekommer på den betondækkede del af spunsvæggen, vil gøre stålet mere "ædelt", og kan derigennem forøge korrosionen på den ikke-indstøbte del. Jo større arealforholdet mellem indstøbt og ikke-indstøbt jern er, jo kraftigere forøges korrosionen på det ikke-indstøbte jern. Ved forstøbning må det således forventes, at noget af korrosionen i det stærkest udsatte område flyttes længere ned. Det er

ikke klarlagt, hvor kraftig virkningen vil være, men hvor forstøbning er udført, er der grund til enten jævnligt at kontrollere korrosionens udvikling eller at etablere katodisk beskyttelse af den ikke-indstøbte del af væggen.

Medens zonestrygning kun kan anvendes ved nyanlæg, kan forstøbning anvendes også ved et ældre anlæg, ja endog i det - meget hyppige - tilfælde, hvor en spunsvæg allerede er begyndt at få gennemtæringer. Der må imidlertid før støbningen foretages en rensning af spunsvæggen for begroning og rust, og en tørlægning af spunsvæggens øverste del er almindeligvis nødvendig.

2.4 Bagstøbning

Endelig kan man udføre en betonstøbning inden for spunsvæggen på det mest udsatte øverste område. Når dette gøres straks ved spunsvæggens bygning er det i mange tilfælde en ret billig foranstaltning, og man har herved på forhånd sikret sig mod utætheder i væggen ved de først fremkommende gennemtæringer. Da hullerne i reglen optræder som grubetæringer, er det meget almindeligt, at spunsjernets styrkeegenskaber som tidligere nævnt langt fra er udtømt, når sådanne huller forekommer.

3 KATODISK BESKYTTELSE

3.1 Teoretisk redegørelse

Jernet gives en sådan negativ elektrisk spænding, at positive jernioner ikke kan frigøres; denne spænding kan kun opretholdes, så længe der løber en elektrisk strøm fra vandet ind til jernoverfladen. Katodisk beskyttelse kan opnås ved anvendelse af to metoder: Beskyttelse med offeranoder og beskyttelse med påtrykt strøm.

3.1.1 Offeranoder

Den nødvendige strøm opnås i dette tilfælde ved at sætte spunsvæggen i forbindelse med zink, magnesium eller aluminium (anodemetaller), der

nedsænkes i havvandet. Jern og anodemetal danner i havvandet et galvanisk element, som leverer den ønskede elektriske strøm. Resultatet bliver, at jernet bevares, og at anodemetallet går i opløsning. Anodemetallet ofres for at beskytte jernet; heraf navnet "offeranode".

Det bemærkes, at metoden med sædvanlige offeranoder (zink- eller aluminiumanoder) kun kan anvendes med tilstrækkelig virkning, når vandet har en tilpas lav specifik elektrisk modstand. Det er vanskeligt at angive en eksakt grænse, fordi grænsen er afhængig af vanddybden, spunsjernsprofilet, beskyttelsessystemets levetid, økonomi m.v., men som en håndregel kan man regne med, at op til en specifik modstand på 40 ohm.cm er beskyttelsen ukompliceret. Fra 40-75 ohm.cm er beskyttelse mulig under anvendelse af en ekstra stor anodebestykning. Over 75 ohm.cm kan en ubehandlet jernspunsvæg ikke i praksis beskyttes med zink- eller aluminiumanoder. 75 ohm.cm svarer til en saltoldighed på ca. 10‰ ved 15°C.

3.1.2 Påtrykt strøm

Den nødvendige strøm kan også opnås ved, at jernet, der skal beskyttes, forbindes til den negative pol af en jævnstrømskilde, hvis positive pol forbindes til en passende elektrode (anode), som er neddyppet i havvandet. Som jævnstrømskilde benyttes som regel en ensretter, der forsynes fra vekselstrømsnettet. Man taler om beskyttelse med påtrykt strøm.

Fig. 3.

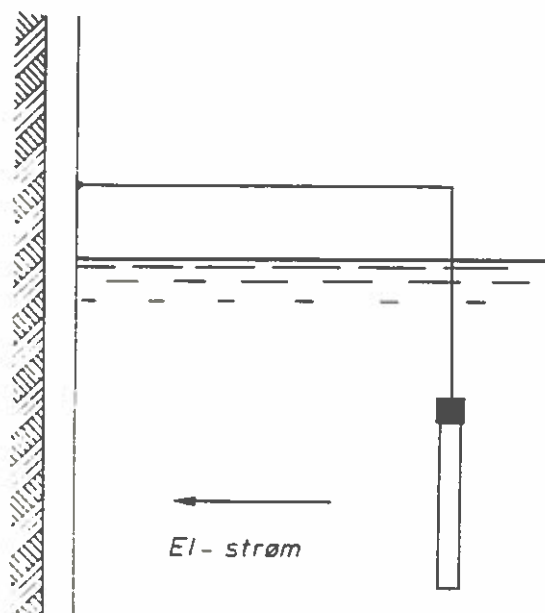


Fig. 2. Katodisk beskyttelse med offeranode.

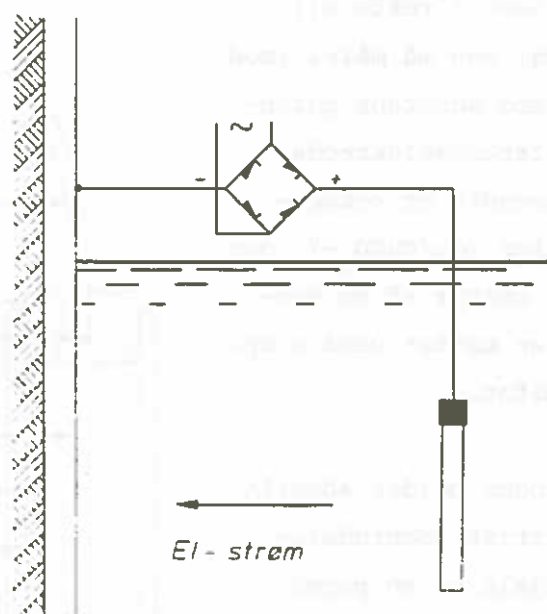


Fig. 3. Katodisk beskyttelse med påtrykt strøm.

3.1.3 Potentialmåling

Et vigtigt spørgsmål i forbindelse med den katodiske beskyttelse er, hvor stor negativ elektrisk spænding spunsvæggen bør have for netop at opnå den optimale beskyttelse. Før vi kommer ind på dette emne, er det imidlertid praktisk at omtale, hvordan jernets spænding måles.

Umiddelbart kunne man tænke sig ved hjælp af et voltmeter at måle spændingsforskellen mellem spunsvæg og anode, men da spændingsfaldet lige omkring anoden er afhængig af både anodeform, anodestørrelse, anodemateriale og vandets ledningsevne, giver en direkte måling ikke et brugbart mål for jernets beskyttelsesgrad.

For at forklare den i praksis anvendte metode, må vi omtale emnet halvceller. En halvcelle består af et metalstykke omgivet af en elektrisk ledende vandig opløsning. Jern i havvand udgør en sådan halvcelle. Mellem metallet og opløsningen vil der være en elektrisk spændingsforskel, som benævnes halvcellens potential.

Dette potential er ikke direkte tilgængeligt for måling, men må måles imod en anden halvcelle med konstant potential, en såkaldt referenceelektrode. Den almindeligst anvendte er kobber-kobbersulfathalvcellen ($\text{Cu}/\text{CuSO}_4^-$), der, som navnet antyder, består af en kobberstang anbragt i en mættet vandig opløsning af kobbersulfat.

Kobbersulfatopløsningen holdes adskilt fra, men dog i elektrisk forbindelse med havvandet ved hjælp af en porøs træprop. Da $\text{Cu}/\text{CuSO}_4^-$ -halvcellen kun kan tåle en meget lille strøm, må spændingsforskellen mellem halvcellerne måles med et voltmeter med en meget stor indre modstand, f.eks. et transistoriseret voltmeter, eller ved hjælp af et kompensationsinstrument.

Andre i praksis anvendte standardceller er calomelhalvcellen (kviksølv-kviksølvklorid-) og sølv-sølvchloridhalvcellen.

Når jernets potential refereres, må det angives, hvilken halvcelle, der er brugt. I resten af bogen refereres, hvis ikke andet er nævnt, til $\text{Cu}/\text{CuSO}_4^-$ -halvcellen.

3.1.4 Beskyttelsespotential

Potentialet af ubeskyttet jern i havvand har ikke nogen veldefineret værdi. De i praksis målte værdier ligger mellem -550 mV og -750 mV. En tilfredsstillende beskyttelsesgrad, bedre end 95%, regnes at være opnået, når jernets potential ved katodisk beskyttelse sænkes til -850 mV

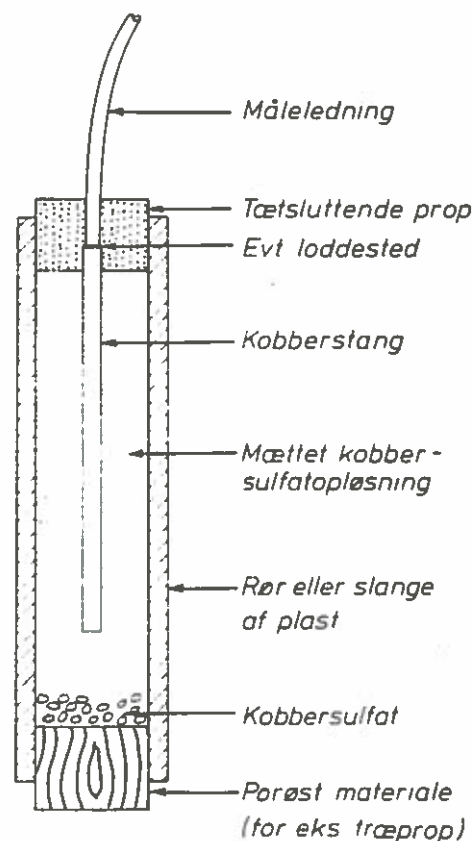


Fig. 4. Kobber-kobbersulfat-referenceelektrode.

overfor Cu/CuSO_4 -halvcellen svarende til -780 mV overfor calomelhalvcellen. Hvor der på grund af særlig kraftig bakterievirksomhed i muddret på bunden forekommer forøget korrosion, anbefales det at sænke potentialet yderligere 100 mV til -950 mV.

3.1.5 Polarisation - Strømbehov ved katodisk beskyttelse

Den til opnåelse af beskyttelsespotentialet nødvendige strøm varierer betydeligt med tiden. Fig. 6. Strømbehovet er højt fra starten, men vil efterhånden formindskes, idet der udfældes isolerende belægninger af calcium- og magnesiumsalte på jernoverfladen. Man taler om, at jernet polariseres.

Hvor effektiv polarisationen er, afhænger af tilførslen af depolarisatorer til jernet. Som depolarisatorer virker oxygen og stofskifteprodukterne fra de sulfatreducerende bakterier. På dette grundlag kan man forudsige, at der medgår mere strøm til fuld beskyttelse i de øverste vandlag og i bundens mudder end på den øvrige del af spunsvæggen. Dette er eksperimentelt påvist. Fig. 7.

Strømbehovet ved katodisk beskyttelse varierer en del fra havn til havn og i mindre grad fra sted til sted inden for den samme havn. Det påvirkes af flere faktorer, f.eks. forureningsgraden, iltindholdet og temperaturen, hvis indflydelse man ikke på forhånd kan forudsige. Strømbehovet vil i de fleste tilfælde ligge mellem 50 og 100 milliampere/ m^2 , men kan i dybt og roligt vand ligge lavere.

I mange tilfælde kan man få et groft begreb om strømbehovet ved at regne med 100 mA/ m^2 for den del af spunsvæggen, der vender mod åbent vand og se bort fra forbruget i bunden og på væggen bagside. Dette gælder for jern, der er ubeskyttet af bestrykningsmidler under vandoverfladen.

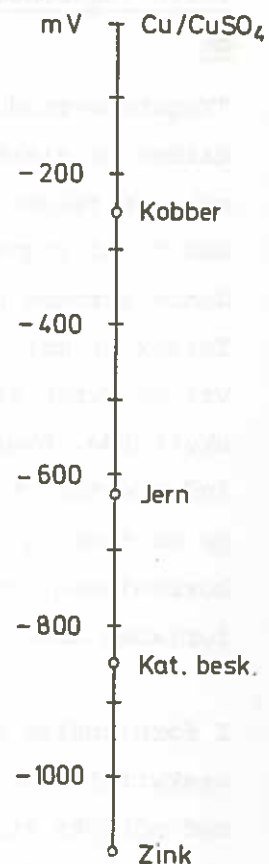


Fig. 5. Potentialer i forhold til Cu/CuSO_4 -halvcellen.

3.1.6 Vagabonderende strømme

"Vagabonderende strømme" kaldes de elektriske strømme, som følger andre veje end de tilsigtede. Hvis sådanne strømme på deres vej følger en metalgenstand, vil de virke katodisk beskyttende, hvor de løber ind i metallet, og forårsage en kraftig forøgelse af korrosionen, hvor de igen forlader det.

I forbindelse med katodisk beskyttelse af spunsvægge med påtrykt strøm vil der være mulighed for forøget korrosion på de ved kajen liggende skibe. Dette indses lettest, hvor skibet ligger mellem anoden og spunsvæggen. Da den elektriske modstand er langt mindre i skibets jernskrog end i havvandet, vil den fra anoden kommende strøm "skyde genvej" gennem skibet og forårsage forøget korrosion på skibssiden nærmest spunsvæggen. På den side af skibet, der er nærmest anoderne, kan reaktionsprodukterne fra den katodiske delproces virke

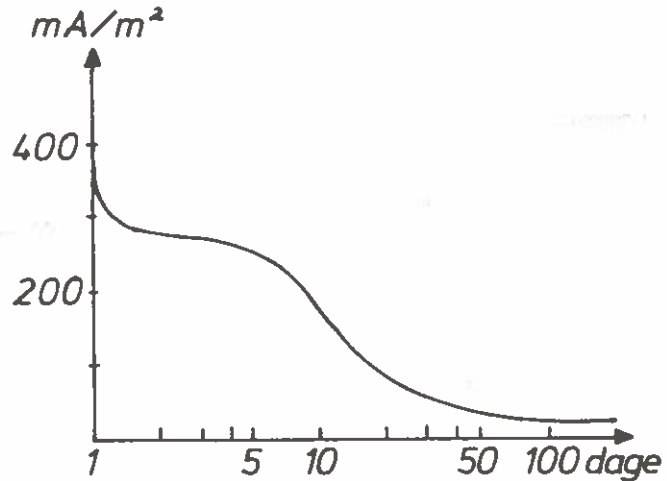


Fig. 6. Målt strømforbrug ved -850 mV i afhængighed af tiden.

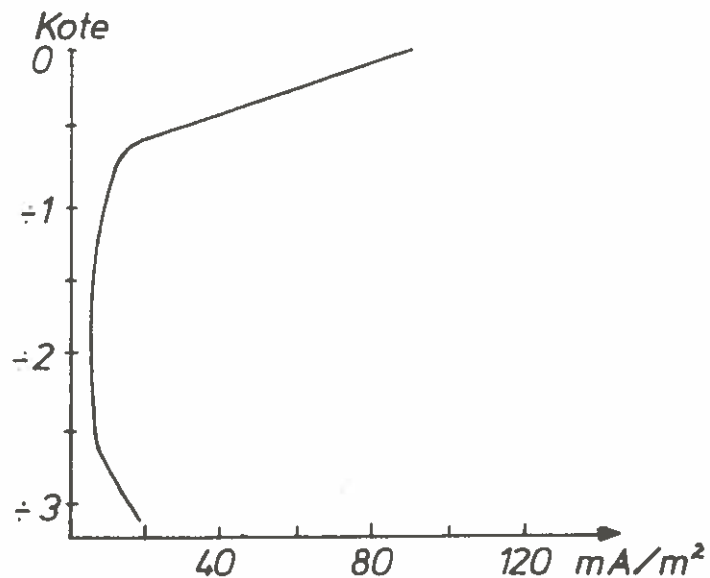


Fig. 7. Strømforbrug ved -850 mV som funktion af vanddybden.

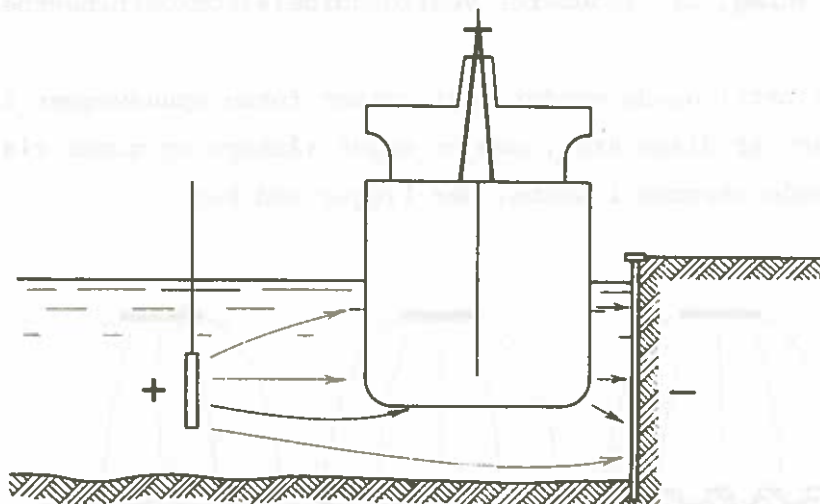


Fig. 8. Vagabonderende strøm i skib. Katodisk påvirkning på anodesiden, anodisk jernopløsning på kaj siden.

nedbrydende på undervandsmalingen. Ved kortere ophold, f.eks. nogle få døgn, er faren for skader minimal. Skibe med en godt vedligeholdt undervandsmaling vil naturligvis være bedre beskyttet mod disse skader end skibe, der er dårligt vedligeholdte.

Som omtalt senere kan anoderne anbringes på andre måder, der giver mindre risiko for vagabonderende strømme.

En nærmere redegørelse for imødegåelse af vagabonderende strømme findes i afsnit 3.6.

3.2 Anodeplaceringer

Placering og fordeling af anoderne er en vigtig del af projekteringsarbejdet ved katodisk beskyttelse.

Der tilstræbes:

- (1) Optimal fordeling af strømmen på spunsvæggen.
- (2) Lav elektrisk modstand.

(3) Robust anlæg, der reducerer vedligeholdelsesomkostningerne.

Forholdsvis tætliggende anoder nogle meter foran spunsvæggen tilfredsstiller flere af disse krav, men er meget sårbare og giver risiko for vagabonderende strømme i skibe, der ligger ved kaj.

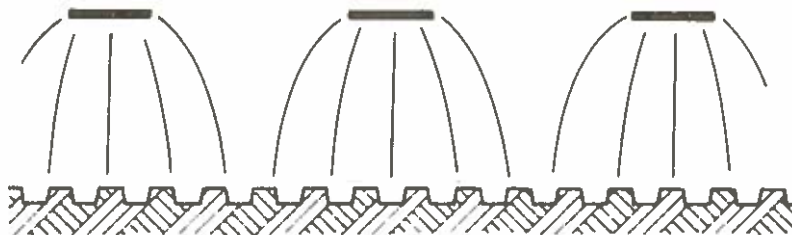


Fig. 9. Anoder på bunden langs spunsvæggen.

Anoder for påtrykt strøm kan i visse tilfælde placeres samlet i stor afstand fra både skibe og spunsvæg, f.eks. ved et modstående træbolværk, ved en skråning eller lignende. Fig. 10. Den elektriske modstand omkring de tæt samlede anoder og i det lange kabel er dog større end ved andre installationer.

Anoderne kan også fastgøres på spunsvæggen, evt. således at de i særlig grad beskytter den mest korroderende zone. Dette gøres almindeligvis med zink- og aluminiumanoder (fig. 11), men er principielt også muligt ved anoder med påtrykt strøm. For i det sidste tilfælde at undgå tab ved overbeskyttelse i anodens nærhed må anoderne placeres tæt, f.eks. i hver anden eller tredje bugt.

Anoderne skal anbringes så tæt ved spunsvæggen, at berøring med en skibside er udelukket.

Anoderne kan endelig anbringes bag spunsvæggen, da strømmen let går "nedenom". Denne anodeplacering giver en vis overbeskyttelse af væggenes bagside, der normalt ikke behøver at beskyttes. Det har været forsøgt at anbringe anoderne i brønde bag spunsvæggen, men metoden har hidtil været forbundet med forskellige komplikationer.

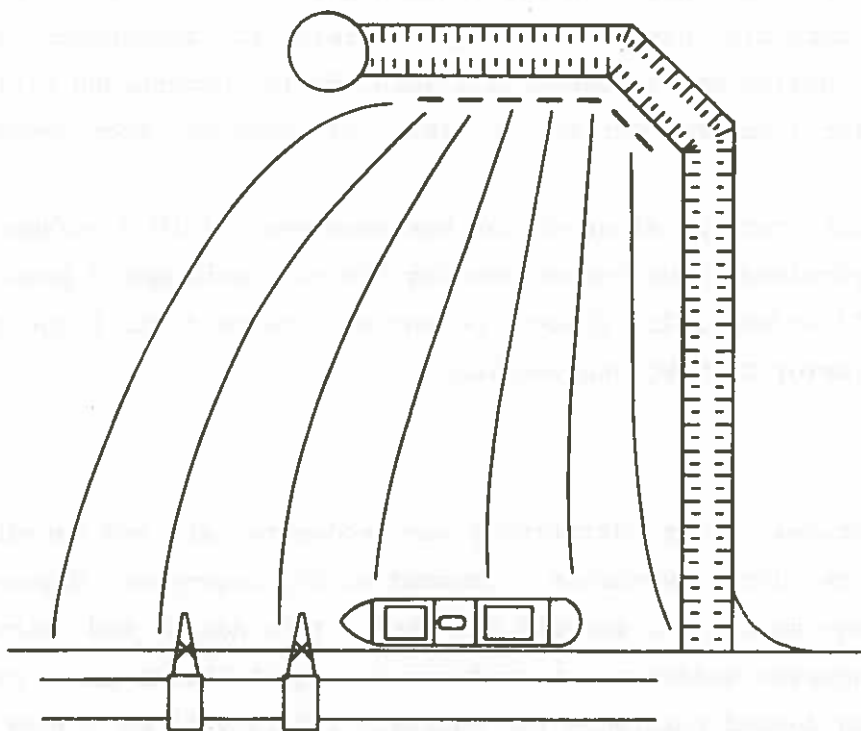


Fig. 10. Anoder placeret fjernt fra spunsvæggen.

3.3 Anodematerialer

3.3.1 Offeranoder - Zink, magnesium, aluminium

Til galvanisk beskyttelse af jern i havvand med offeranoder kan teoretisk benyttes de metaller og legeringer, der står over jern i den såkaldte "spændingsrække i havvand". I praksis benyttes dog kun 3 metaller: Zink, magnesium og aluminium. Af disse har zink hidtil været det mest benyttede, men aluminium vinder for tiden større og større indpas.

Zink

Zinket skal være meget rent, da urenheder, f.eks. jern i mængder over 0,001%, kan forårsage, at zinkets korrosionsprodukter danner et beskyt-

tende lag, så strømafgivelsen efterhånden går i stå. Det samme kan ske i svovlbrinteholdigt havvand. Udgangsmaterialet til zinkanoder er derfor altid fintzink med et meget lavt jernindhold. Undertiden tillegeres andre stoffer i små mængder for at sikre, at anoderne tærer jævnt.

Det teoretiske forbrug af anodezink kan beregnes til 10,7 kg/ampereår, men da udnyttelsesgraden kun er omkring 90% vil forbruget i praksis blive ca. 12 kg/ampereår. Zinkets potential i havvand vil ligge på ca. -1100 mV overfor Cu/CuSO_4 -halvcellen.

Magnesium

Magnesium bruges i stor udstrækning som anodemateriale ved katodisk beskyttelse, men dets anvendelse i havvand er dog begrænset. Magnesiums relativt høje spænding i forhold til jern i forbindelse med saltvands gode ledningsevne medfører, at anoderne i mange tilfælde giver overbeskyttelse og dermed forbruges for hurtigt. I ferskvand og i jord med stor modstand vil magnesiumanoder derimod med fordel kunne bruges, idet zink her ikke vil kunne beskytte jernet effektivt.

Det teoretiske forbrug af en magnesiumanode er beregnet til 4,0 kg/ampereår, men da udnyttelsesgraden ikke overstiger 50%, bliver forbruget mindst 8 kg/ampereår.

Magnesiums potential i havvand vil ligge på ca. -1500 mV overfor Cu/CuSO_4 -halvcellen.

Aluminium

Aluminium har ikke tidligere været anvendt som offeranodemateriale i nogen større udstrækning, idet udnyttelsesgraden har været for lav. Imidlertid er der i de senere år udviklet aluminiumslegeringer til brug i havvand med en udnyttelsesgrad på ca. 90%. Det er dog ikke alle anodeproducenter, der leverer lige pålidelige anoder. Bedst synes aluminiumslegeringer med et lille indhold af kviksølv at være. Da det teoretiske forbrug af aluminium er 2,95 kg/ampereår, overstiger forbruget altså ikke omkring 3,5 kg/ampereår. Med mindre særlige omstændigheder gør anlæg med

påtrykt strøm nødvendige eller meget billige, opnår man i dag den økonomisk og teknisk mest forsvarlige beskyttelse med gode aluminiumsanoder. Aluminiumslegeringer med potentialer, der i havvand ligger mellem ca. -1100 mV og ca. -1450 mV overfor Cu/CuSO_4 -halvcellen, findes i handelen.

3.3.2 Anodematerialer for påtrykt strøm

I beskyttelsesanlæg med påtrykt strøm kan man enten benytte anoder, der forbruges, eller anoder af mere permanent karakter.

Overfladeprocessen på permanente anoder er en anden end på anoder, der forbruges. På sidstnævnte er processen en opløsning af metal, mens der på permanente anoder sker en dannelse af klor og oxygen i havvand og i ferskvand alene en dannelse af oxygen. Dannelsen af oxygen og klor kræver en overspænding for at foregå. Anlæg med permanente anoder behøver derfor en ca. 2 volt større driftspænding end anlæg med anoder, der forbruges.

Anoder, der forbruges - Jernskrot, aluminium

Der anvendes her et metal, der opløses med en hastighed, der er proportional med strømmen.

Jernskrot

Anoder af jernskrot kan med fordel benyttes i havvand. Forbruget af jern er ca. 10 kg/ampereår. Materialet har to meget væsentlige fordele frem for permanente anoder: 1) Det er billigt og 2) anodeprocessen kræver ingen overspænding for at foregå, hvilket sammen med en normalt stor overflade (lille modstand) giver en lav driftspænding på anlægget og dermed en god økonomi. Skrotanoder kan benyttes ved næsten alle anodeplaceringer.

Da en lang anode, f.eks. et stykke jernbaneskinne, vil tåres fra enderne, bør kablet derfor ved hel neddykning af anoden hæftes på midten af denne. Hæftningen kan udføres ved thermitsvejsning eller svejsning med en monelektrode, og svejsestedet bør udformes med en bred fod, der

renses omhyggeligt og dækkes med asfalt eller bedre en epoxyklæber.

I nærheden af anoderne vil vandet kunne farves af den ved anodeopløsningen dannede rust, hvad der i visse tilfælde kan tænkes at være generende.

Aluminium

Dette materiale er på grund af sin højere pris kun lidt egnet som anodemateriale for påtrykt strøm i havvand. Da det ikke giver anledning til misfarvning, bruges det f.eks. til beskyttelse af drikkevandsbeholdere. Hertil kan de nyeste anodelegeringer dog ikke benyttes, idet de fleste indeholder lidt kviksølv, som er meget giftigt.

Permanente anoder. - Grafit, siliciumjern, platineret titan, bly, magnetit

Som navnet angiver, tilstræbes anodematerialer, der hverken påvirkes af omgivelserne eller af den elektriske strøm. Hidtil har de mest anvendte anodematerialer været grafit og siliciumjern, men i de senere år er anoder af platineret titan, blylegeringer eller magnetit blevet benyttet i stadig større målestok. Ingen af disse materialer er dog ubegrænset holdbare.

Grafit

Grafit, der er en form for kul, er det hidtil mest benyttede anodemateriale. Det forekommer i naturen, men fremstilles for det meste af amorft kul i elektriske ovne. Grafit er kemisk meget modstandsdygtigt og en god elektrisk leder. Grafit til anodebrug er imprægneret med linolie eller andre stoffer, og kvaliteten af denne imprægnering er af stor betydning for levetiden.

Størstedelen af den oxygen og klor, der dannes på overfladen af en grafitanode udvikles i luftform, men en mindre del reagerer med anodens kulstof. Hvis en grafit-anode ikke befinder sig i frit vand, men f.eks. i mudder på havbunden, vil den blive tæret meget hurtigt, idet den an-

gribes af den dannede klor, når denne ikke føres bort. Forbruget af grafitanoder vil i praksis være 50 - 500 g/ampereår ved strømtætheder, der ikke overstiger 20 - 25 ampere pr. m^2 anodeoverflade. Herover stiger anodeforbruget uforholdsmæssigt meget. Da materialet er temmelig skørt, bør det kun anvendes, hvor det kan ophænges beskyttet.

Siliciumjern

Sammensætningen af dette anodemateriale er ca. 14% silicium, 2½% molybdæn og resten jern. Materialet er meget hårdt og skørt, og anoderne kan derfor kun fremstilles ved støbning. Anodeforbruget stiger kraftigt med strømtætheden. Ledes f.eks. en strøm på 10 ampere gennem anodeoverflader på $1 m^2$, $0,25 m^2$ og $0,1 m^2$, kan anodeforbruget blive henholdsvis ca. 1,1 kg/år, 2,3 kg/år og 4,5 kg/år.

På grund af sin skørhed kræver siliciumjern ligesom grafit en beskyttet ophængning.

Platineret titan

Skønt titan er et meget aktivt metal, er det bestandigt i de fleste korroderende omgivelser. Dette skyldes dannelsen af en meget modstandsdygtig oxidfilm på metallets overflade. Filmen er stærkt isolerende, og titan vil i sig selv ikke kunne anvendes som anodemateriale. Udfældning af et ganske tyndt lag platin (2,5 - 4,0 μm) på titanoverfladen tillader strøm at passere fra titanet gennem platinlaget ud i den omgivende væske.

Magnetit

I Sverige har Televerket i en årrække arbejdet med en anodetype fremstillet af magnetit, dvs. magnetjernsten. Materialet har vist sig overordentlig velegnet til anvendelse i anlæg til katodisk beskyttelse.

Materialet er i øjeblikket i brug i et par danske havne.

Nærmere oplysninger om tilladelig strømbelastning og levetid mangler.

3.4 Eksempler på udformning af anlæg for katodisk beskyttelse

3.4.1 Anlæg med offeranoder

Zink eller aluminiumanoder

Der er her anvendt anoder med en armering bestående af et 20 mm rundjern, hvis ene udragende ende benyttes til ophængning. Rundjernet er beskyttet med kultjæreepoxymaling.

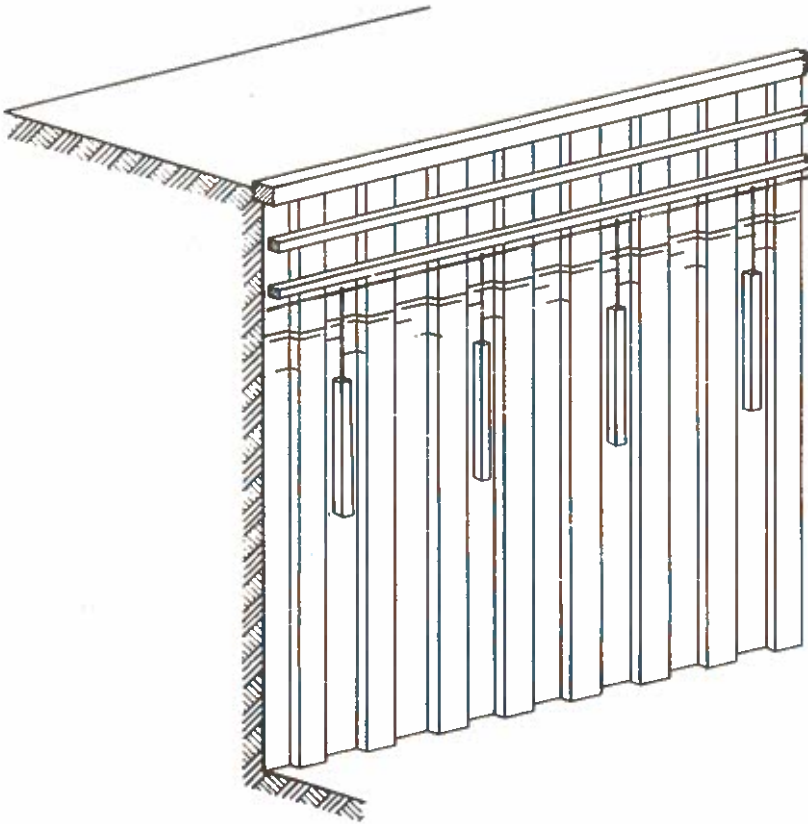


Fig. 11. Offeranoder ophængt i hveranden indadgående bugt.

Anoderne er ophængt ud for hveranden indadgående bugt i et langsgående rundjern, der er svejset fast på de udadgående bugter lige under friholderlisten. Forbindelsen mellem anode og bærende rundjern sikres ved svejsning.

Armeringens nederste ende bøjes ind i bugterne, dels for at holde afstand, dels for at undgå, at anoden "fiskes" af wirer eller lignende.

Tilføjelse: Side 27, efter "Platineret titan".

Levetiden for en platineret titananode med $2,5 \mu\text{m}$ platin opgives til ca. 10 år ved 500 til 700 ampere/ m^2 . Efterhånden som platinet nedbrydes, og titanet blottes, gendannes en oxidfilm på titanet. Herved opnås, at den elektriske strøm altid forlader anodeoverfladen gennem platinet, og at titanet derfor er beskyttet mod nedbrydning.

Oxidfilmen er i praksis kun beskyttende op til et potential på ca. +10 volt i havvand. Af denne årsag bør ensretterspændinger på mere end ca. 10 volt eksklusiv spændingsfald i kabler undgås.

Da platineret titan dårligt tåler pulserende jævnstrøm, bør trefaset ensretning eller ensrettere med udglattende led anvendes som jævnstrømskilde.

Bly

Når bly anvendes som anode i havvand, dannes et brunt overfladelag bestående overvejende af PbO_2 , blydioxid. Dette lag er elektrisk ledende og helt stabilt, så længe anoden er strømførende. Afbrydes strømmen til blyet, vil en nedbrydning af blydioxidet efterhånden finde sted, og strømafbrydelser af mere end eet døgn's varighed bør derfor ikke være for hyppigt forekommende.

Det har vist sig, at rent bly ikke er helt velegnet som anodemateriale. Derimod udviser blyanoder med 1% sølv og $\frac{1}{2}$ % vismut overordentlig gode egenskaber i havvand ved strømtætheder op til 100 ampere/ m^2 .

Ved en strømtæthed på 100 ampere/ m^2 opgives et anodeforbrug på 0,11 kg/ampereår. Blyanoder kan forholdsvis nemt modificeres til endnu større strømtætheder. Anoder, hvori der er indsat små stykker platintråd vinkelret på overfladen, har givet forbløffende gode resultater ved strømtætheder op til 500 ampere/ m^2 .

Blyanoder skal ophænges helt frit og må ikke dækkes af mudder, idet de erved nedbrydes temmelig hurtigt. Det synes også som om anodeforbruget stiger med forureningsgraden af vandet.



3.4.2 Anlæg med påtrykt strøm

Permanente anoder på spunsvæggen

Som anodemateriale anvendes magnetit. Anoderne fastspændes i jernbeslag, som er fastgjort i de indadgående bugter ved svejsning.

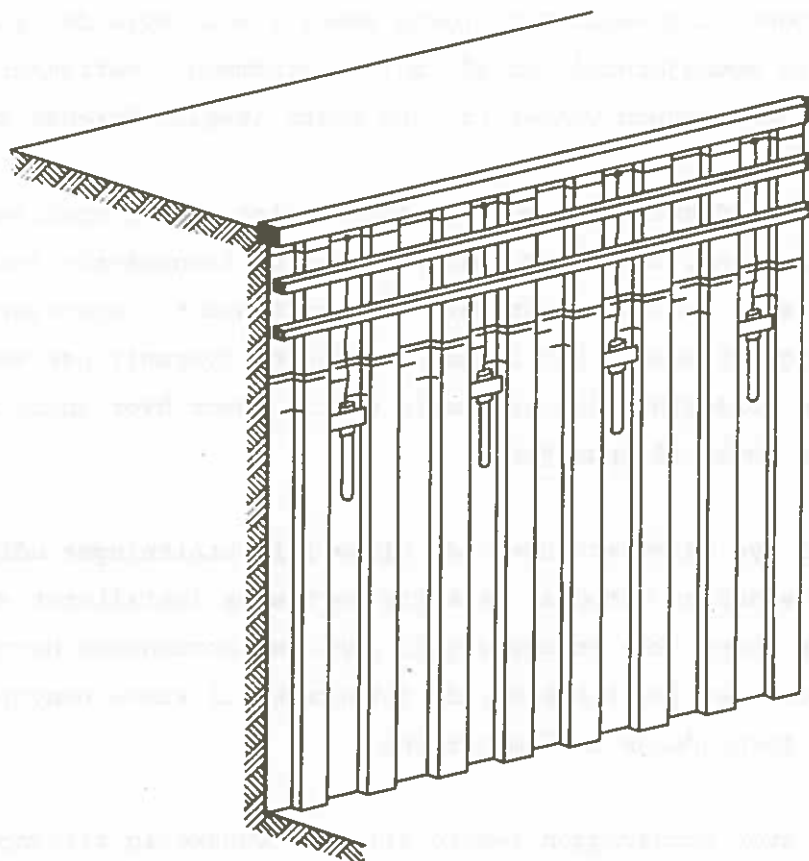


Fig. 12. Permanente anoder ophængt på spunsvæggen.

For at opnå en rimelig god spredning af beskyttelsesstrømmen og for at mindske faren for skader i skibe hidrørende fra vagabonderende strøm er anoderne anbragt temmelig tæt.

Kabler og samledåser placeres så godt beskyttet som muligt, f.eks. anbragt i et profiljern lige under hammeren. Kablerne til de enkelte anoder trækkes igennem beskyttelsesrør, som fastgøres til jernspunsvæggen.

Kablerne kan også samles i en kabelgrav i kajgaden lige bag hammeren.

3.5 Konstruktive detaljer før installation af katodisk beskyttelse

Vigtigt ved installation af anlæg til katodisk beskyttelse er det, at der sørges for elektrisk god forbindelse mellem alle jerndele, der ønskes beskyttet, idet dårlige forbindelser medfører energitab og kan medføre forøget korrosion. Det sidste sker, f.eks. hvis den elektriske modstand i en spunsjernslås er så høj, at strømmen foretrækker at løbe fra det ene jern gennem vandet til det næste (vagabonderende strømme).

Da man ikke altid kan regne med god forbindelse mellem spunsjernene på en kajstrækning, bør disse forbindes med et langsgående jern, der hæftes til hvert - eller i alt fald til hvert andet - spunsjern med en ca. 5 cm lang svejsesøm. Det langsgående jerns tværsnit bør være mindst 3 cm^2 . Denne foranstaltning er særlig vigtig, hvor hver anode beskytter mere end nogle få spunsjern.

Ved anlæg af nye kajstrækninger bør disse foranstaltninger udføres med det samme, hvadenten katodisk beskyttelse tænkes installeret straks, senere eller endnu ikke er overvejet, idet omkostningerne hertil på dette tidspunkt er forsvindende. Et jernstræk vil kunne benyttes som langsgående forbindelse mellem jernene.

I tilfælde, hvor spunsvæggen senere vil være vanskelig tilgængelig, f.eks. hvor den over vand er indstøbt i en kajmur, er det især vigtigt, at ovennævnte forberedelser udføres straks. Desuden bør der med visse mellemrum, måske 10 til 15 m, påsvejses væggen en jernstang, som føres frem til et senere let tilgængeligt sted udenfor betonens overflade. Disse jernstænger kan senere benyttes til tilslutning af anlæg til katodisk beskyttelse og som kontaktsted ved potentialmålinger.

Hvis der i konstruktionen under vand tæt ved spunsvæggen indgår armeret beton, f.eks. pæle, kan det ved katodisk beskyttelse med påtrykt strøm være nødvendigt at etablere elektrisk forbindelse med armeringen. Det må derfor tilrådes, at denne i fornøden udstrækning svejses sammen, og at der enkelte steder føres et armeringsjern ud, hvortil en evt. senere forbindelse kan sluttes.

3.6 Dimensionering af anlæg til katodisk beskyttelse

3.6.1 Dimensioneringsvejledning

Ved dimensionering af anlæg til katodisk beskyttelse kan man f.eks. gå frem i følgende trin:

- (1) Beregning af det areal, der skal beskyttes.
- (2) Skøn over den hertil nødvendige strøm.
- (3) Valg mellem offeranoder og påtrykt strøm.
- (4) Bestemmelse af anodeplacering.
- (5) Valg af anodetype og beregning af antal.
- (6) Ved anlæg med påtrykt strøm: Beregning af spændingsfald og dimensionering af kabler og elektriske installationer.

ad (1). Ved bestemmelsen af strømbehovet (punkt 2) vil det normalt være tilstrækkeligt at regne med spunsvæggens udfoldede areal mod åbent vand, idet dimensioneringsreglerne er baseret på dette forhold og i øvrigt er empiriske. Spunsvæggens udfoldede areal udregnes normalt ved hjælp af spunsjernskatalogerne. Arealet kan til overslagsberegninger sættes 50% større end det tilsvarende projicerede areal.

ad (2). Til foreløbige beregninger kan der regnes med et strømforbrug på ca. 100 miliampere/m² for den del af spunsvæggen, der vender mod åbent vand (afsnit 3.1.5 "Strømbehov ved katodisk beskyttelse").

ad (3). Valget er i vid udstrækning bestemt af lokale forhold. Konstruktioner, hvor der ikke er anlægsplads for skibe, så som moler og dæmnin-
ger, kan ofte med fordel beskyttes med påtrykt strøm medens aluminiums-
anoder for normale bolværker oftest vil være det mest hensigtsmæssige.

Beskyttelse med påtrykt strøm kræves blandt andet hvor

- a. Vandets specifikke elektriske modstand er så stor, over 60 - 70 ohm. cm, at offeranoder ikke kan give strøm nok til katodisk beskyttelse.

b. Kajkonstruktionen er utilgængelig for ophængning af offeranoder, eller ophængningen er så besværlig, at udgifterne hertil bliver uforholdsmæssigt store.

c. Der er fare for hyppige beskadigelser af anoder ophængt på konstruktionen, således at anoderne må anbringes andetsteds.

ad (4). Anoderne kan anbringes på flere forskellige måder som omtalt i afsnit 3.2.1 "Anodeplaceringer".

ad (5). På grundlag af anodeplaceringen vælges det bedst egnede anodemateriale.

Nedenstående skema angiver mulige kombinationer af anodematerialer og -placeringer, idet + angiver de egnede og - de uegnede under sædvanlige forhold.

Anodeplaceringer

	Ophængt på spunsvæg	Udlagt på bunden	Ophængt frit
Offeranoder	+	-	-
Grafitanoder ^{x)}	-	-	+
Siliciumjernanoder ^{x)}	-	-	+
Titananoder	+	-	+
Blyanoder	+	-	+
Magnetitanoder	+	+	+
Jernskrotanoder	+	+	+

^{x)} God beskyttelse mod mekaniske beskadigelser kræves, da materialerne er overordentlig skøre.

Anlæg med små anoder (bly og titan) kræver høj driftsspænding, mens anlæg med store anoder (øvrige anodematerialer) og især med anoder, der

forbruges, kan klare sig med betydeligt lavere driftsspænding. På grundlag af oplysningerne om anodematerialerne i afsnit 3.2.2 beregnes anodernes antal og størrelse.

ad (6). Denne beregning foretages for at bestemme ensretternes udgangsspænding. Spændingsfaldet er sammensat af følgende:

a. Ohmsk spændingsfald i vand. Dette er direkte proportionalt med vandets specifikke modstand. Spændingsfaldet afhænger desuden af anodeareal og anodeproportioner således, at det falder med stigende areal og for anoder med samme areal falder med stigende længde.

b. Ohmsk spændingsfald i kabler.

c. Polarisation på spunsvæggen. Denne andrager ca. 0,3 volt.

d. Anodeoverspænding. Overspænding kræves kun for permanente anoder og er på ca. 2 volt.

På grundlag af ovenstående og under hensyntagen til den gunstigste placering beregnes kabler, transformere og ensrettere. Transformerne indrettes således, at udgangsspændingen kan aftrappes i takt med et faldende strømbehov og igen hæves med anodernes nedbrydning. Alt efter anlæggets udformning kan det være hensigtsmæssigt at opdele strømforsyningen på flere ensretteraggregater.

3.6.2 Eksempler

Ovenstående fremgangsmåde skal belyses gennem nogle eksempler, hvori en spunsvæg med følgende dimensioner

længde	200 m
vanddybde	6,5 m
dobbeltjernsbredde	0,8 m
udfoldet længde	300 m

ønskes katodisk beskyttet udfra forskellige forudsætninger. Punkterne

34.

(1) og (2) bliver identiske for alle eksempler.

(1) Det udfoldede areal mod åbent vand

$$300 \times 6,5 \text{ m}^2 = 1950 \text{ m}^2$$

(2) Sættes strømbehovet til $100 \text{ miliampere/m}^2$, bliver den nødvendige strøm $1950 \times 0,1 \text{ ampere} = 195 \text{ ampere}$.

Offeranoder

(3) Der er tale om en gammel spunsvæg, hvis levetid kun ønskes forlænget en kortere årrække, og hvor placering af anoder på spunsvæggen er ukompliceret. Der vælges derfor aluminiumsanoder.

(4) Den gunstigste placering af aluminiumanoder er i spunsvæggenes indadgående bugter.

(5) Aluminium forbruges med $3,5 \text{ kg/ampereår}$. Det samlede aluminiumsforbrug bliver derfor $3,5 \times 195 \text{ kg/år} = 685 \text{ kg/år}$. Da man normalt regner med en aluminiumanode i hveranden indadgående bugt, og da strækningen har $200 : 0,8 = 250$ indadgående bugter bliver anodetallet 125.

Dimensioneres anoderne til at holde i fem år svarende til et anodeforbrug på ca. 3500 kg , bliver anodestørrelsen $3500 : 125 \text{ kg/anode} = 28 \text{ kg/anode}$.

Fjernt placerede anoder af jernskrot

(3) Kajstrækningens levetid ønskes øges så meget som muligt. Der vælges et anlæg med påtrykt strøm, idet ophængning af anoder i spunsvæggenes indadgående bugter er umulig.

(4) Der er gode muligheder for udlægning af anoder på bunden langs en overfor liggende dækmole.

(5) Bedst egnede til udlægning på bunden er skrotjernsanoder. De er des-

uden forholdsvis billige i anskaffelse, ligesom de giver lav driftsspænding på ensretteranlægget.

Jern forbruges med ca. 10 kg/ampereår svarende til et årligt forbrug på 195 x 10 kg. Til en tiårsperiode kræves ca. 30 tons anoder, idet kun ca. 60 - 70% af anodematerialet kan påregnes udnyttet.

Driftsspændingen sammensættes som følger

a. Ohmsk spændingsfald i vand	1,0 volt
b. Ohmsk spændingsfald i kabler	8,5 volt
c. Polarisering på spunsvæg	0,3 volt
d. Anodeoverspænding	0,0 volt
Driftsspændingen bliver således ca.	10 volt

Der vælges et ensretteraggregat med en udgangsspænding, der kan varieres fra 8-18 volt i trin på 1 volt.

Magnetitanoder på spunsvæggen

(3) Da vandet omkring spunsvæggen har for stor elektrisk modstand til anvendelse af aluminiumanoder, vælges et anlæg med påtrykt strøm.

(4) På grund af faren for skader fra vagabonderende strømme, ophænges anoderne på selve spunsvæggen, hvorved denne fare reduceres til et minimum.

(5) Da man ønsker lav driftsspænding i forbindelse med så lang anodelevetid som muligt ophænges et stort antal af de forholdsvis billige magnetitanoder. Placeres anoder i hver fjerde indadgående bugt, bliver anodeantallet $250 : 4 = 63$ anoder.

Driftsspændingen sammensættes herefter således:

a. Ohmsk spændingsfald i vand	1,5 volt
b. Ohmsk spændingsfald i kabler	2,0 volt
c. Polarisering på spunsvæg	0,3 volt
d. Anodeoverspænding	2,0
Driftsspænding	ca. 6,0 volt .

Der vælges ensretteraggregater med en udgangsspænding, der kan varieres trinløst mellem 5 og 10 volt.

3.7 Forholdsregler mod vagabonderende strømme

Når katodisk beskyttelse med påtrykt strøm installeres, må man altid undersøge, om den elektriske beskyttelsesstrøm anretter skader på nærliggende genstande, og i givet fald træffe foranstaltninger til at undgå dette. Nærmere regler herfor er givet i "Regler for etablering og drift af anlæg til katodisk beskyttelse", ISBN 87 571 0357 7.

3.7.1 Interferensmålinger

Ved katodisk beskyttede spunsvægge kan der være fare for vagabonderende strømme i skibe, i tilstødende spunsvægge, i stålpæle eller armerede betonpæle og i kabler og rørledninger bag spunsvæggen. De vagabonderende strømme afsløres ved en såkaldt interferensprøve.

Strømmen til den katodiske beskyttelse - eventuelt et midlertidigt arrangement - slås til og fra, og potentialerne af de nærliggende konstruktioner (skibe, kabler osv.) måles. Hvis det et eller andet sted konstateres, at et potential ændres i positiv retning ved strømtilslutning, betyder det, at der på dette sted vil ske en forøget korrosion. Det er almindeligt at sætte den tilladelige grænse for en sådan potentialændring til 20 milivolt.

3.7.2 Afledning af vagabonderende strøm

På de steder, hvor en risiko er påvist, må man sørge for en bortledning af strømmen, enten gennem et kabel forbundet til spunsvæggen eller gennem en forbindelse til en nedgravet offeranode. I det første tilfælde kan det være ønskeligt at begrænse strømmen til den netop nødvendige værdi ved hjælp af en indskudt modstand.

3.7.3 Skader på skibe

Skader på skibe kan især frygtes, hvor anoderne er anbragt på bunden foran spunsvæggen eller i grupper længere væk. Skibssiden mod spunsvæggen bliver anode og korroderes, medens den udadvendende del af skroget bliver

katode. Også her kan der ved store strømme ske skader, idet der ved de katodiske arealer sker en dannelse af alkali (hydroxylioner), der ødelægger mange typer bundmaling.

Skader imødegås som omtalt i forrige afsnit. Forholdsregler er kun nødvendige i forbindelse med længere ophold af skibe, der ikke selv er katodisk beskyttede.

Ved oliekaier tages der altid særlige hensyn til gnistfaren.

Et fortøjet skib giver i alle tilfælde en vis "skygge" for den katodiske beskyttelse, men ved kortere ophold er dette uden betydning.

3.7.4 Skader på pæle, kabler og rørledninger

Skader på pæle og ledninger i jord kan stort set kun optræde, når anoderne er anbragt bag spunsvæggen eller placeret fjernt fra denne. Korrosionstruede dele af nedgravede ledninger og kabler findes ved interferensmålinger, før anlægget tages i brug, og ved passende afledning til spunsvæg eller til offeranoder, kan skaderne let forhindres.

Korrosion af stål-pæle eller af armeringer i jernbeton kan især frygtes, hvis der er tale om skråpæle, der foroven er nær anoderne, og som for-neden kommer nær spunsvæggens nederste del. Se fig. 13.

Her må man allerede under byggearbejdet sørge for at etablere en forbindelse til pælen, respektive den langsgående armering i betonpælen og senere inddrage denne i beskyttelsen.

Det skal bemærkes, at indstøbt jern kan holdes beskyttet med et meget lille strømforbrug. Hvis det ikke kan undgås, at enkelte pæle kommer tæt på anoderne, er det bedst at begrænse den strøm, der går gennem disse pæle, men da det ikke er muligt at foretage interferensmålinger, må man foretage skønsmæssige beregninger, hvorom der ikke kan gives vejledning på forhånd.

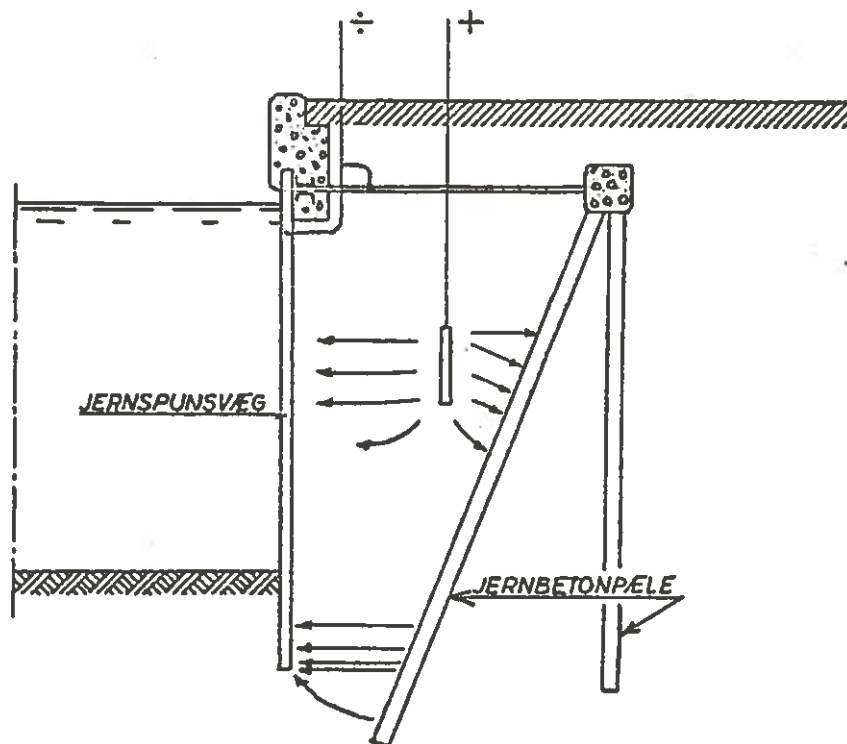


Fig. 13. Vagabonderende strøm i skråpæl af armeret beton.

Hovedbolte og ankre er normalt i elektrisk tilstrækkelig god forbindelse med spunsvæggen og derfor inddraget i den katodiske beskyttelse; men hvor forbindelsen er mindre god og anoderne anbragt bag spunsvæggen, kan der være grund til at sikre sig mod vagabonderende strøm ved påsvejsning af en stump el-kabel.

3.8 Kontrolmålinger

Anlæg til katodisk beskyttelse bør med visse mellemrum kontrolleres. Hvis potentialet overalt, altså også i de indadgående bugter, er mere negativt end -850 mV målt overfor en Cu/CuSO_4 - halvcelle er beskyttelsen i orden.

Ved anlæg med påtrykt strøm har man herudover mulighed for at følge anlæggets driftspænding og den afgivne strøm, idet anlægget bør være for-

synet med de dertil nødvendige instrumenter eller med tilslutningsmuligheder for disse.

Da strømmen til en anode er afhængig af modstanden omkring anoden, og da denne modstand er afhængig af anodens tilstand, er det hensigtsmæssigt, at strømmen til hver enkelt anode eller til mindre anodegrupper kan måles. En jævnt faldende strømefgang tyder på, at anodematerialet er ved at være opbrugt.

3.8.1 Automatisk regulerede anlæg til katodisk beskyttelse

De ovenfor nævnte kontrolmålinger af beskyttelsespotentialet kan foretages automatisk, og resultaterne benyttes til gennem et passende elektronisk udstyr at regulere beskyttelsesstrømmen, således at spunsvæggen til enhver tid netop er beskyttet.

Sådanne automatisk regulerede anlæg er konstrueret, men brugen af dem er i al væsentlighed begrænset til skibe, hvor den nødvendige strøm under fart kan blive op til ti gange større, end når skibet ligger stille, og hvor overbeskyttelse kan beskadige malingen. Som referenceelektroder til automatisk regulerede anlæg benyttes ofte små elektroder af finzink, som har et nogenlunde konstant potential i havvand.

Der er næppe økonomisk grundlag for at indføre automatisk regulerede stationære anlæg. Strømbehovet varierer her næppe mere end 50%, og nogen overbeskyttelse er ikke skadelig, ligesom kortere perioder med underbeskyttelse kan tolereres.

4 MALING

Ved etablering af nye spunsvægskajer kan spørgsmålet om overfladebehandling med maling, eventuelt i forbindelse med katodisk beskyttelse, komme på tale.

Spunsjernene leveres ofte fra stålværket med et tjære- eller bitumenlag,

men dette har kun meget begrænset holdbarhed under vand.

4.1 Forbehandling

Virkeligt gode overfladebehandlingssystemer til undervandsbrug, dvs. systemer med 10 års levetid eller mere, har kun været tilgængelige i en begrænset årrække. Udover generelle krav om lagtykkelse, poretæthed og lav permeabilitet for vanddamp skal et godt undervandssystem nemlig også være alkaliresistent, specielt hvis overfladebehandlingen kombineres med katodisk beskyttelse.

De nyere systemers holdbarhed er imidlertid meget afhængige af underlagets forbehandling, og der må derfor for opnåelse af et godt resultat foretages en omhyggelig rensning. Kravene til denne er følgende:

1. Rensning for eventuel fedt og olie.
2. Sandblæsning eller rensning med stålsand til metallisk renhed. (Se 3 efter DS 2019).
3. Malingspåføring samme dag på den tørre og støvfrie overflade.

Som et alternativ til sandblæsning ser man sommetider flammerensning nævnt. Rensningen foregår ved, at en flad acetylen-oxygenbrænder kombineret med en skraber føres hen over den genstand, der skal renses. Herved fjernes rust, gammel maling og forureninger, mens fastsiddende glødeskal kun fjernes ufuldstændigt. Metoden må betragtes som væsentlig ringere end sandblæsning.

Stålbørstning alene eller behandling med rustomdannere er heller ikke tilstrækkelig rensning.

Overfladebehandling med maling som beskrevet er almindeligvis dyr. Malingsprisen er omkring 10 gange så høj som for de hidtil anvendte tjære- og bitumenprodukter. Hertil kommer udgiften til sandblæsning, som udført konventionelt er temmelig kostbar.

4.2 Zonemaling

Spunsjernene behøver normalt kun at males på flader, der vender mod åbent vand. For yderligere at billiggøre overfladebehandlingen kan denne indskrænkes til den zone, hvor de erfaringsmæssigt korroderer mest. I havne uden væsentligt tidevande er en passende zone fra ca. 0,5 m over til ca. 1,5 m under dagligt lavvande. Denne behandling vil nedsætte korrosionen i den mest udsatte zone så meget, at man kan overveje at udskyde en eventuel katodisk beskyttelse af en spunsvæg i 10 år eller mere.

Hvis det alligevel besluttes at etablere katodisk beskyttelse, vil zonemalingen have en gunstig effekt på elektricitetsforbruget ved katodisk beskyttelse. Som vist er strømforbruget i den udsatte zone flere gange større pr. arealenhed end længere nede. Hvor zonemaling er udført, vil et anlæg til katodisk beskyttelse derfor blive mere stabilt (kun små variationer i strømforbrug) og betydelig billigere i drift (betydelig reduktion af elforbruget). Ved kajer med store vanddybder bliver den aggressive zones indflydelse på det samlede elektricitetsforbrug naturligvis mindre.

4.3 Totalmaling

Totalmaling af jernspunsvægge er ikke nødvendigt af korrosionstekniske grunde. Det kan endda vise sig at være en uheldig foranstaltning. Praktiske afprøvninger har vist, at korrosionen i fejlsteder i malingen efter 10 år punktvis kan nå en dybde på op til 10 mm.

Dette skyldes formodentlig, at malingen først nedbrydes omkring daglig vande hvorved der dannes et effektivt katodisk område, jvf. afsnit 1, korrosionens natur. Da de tilsvarende anodiske områder kun omfatter meget begrænsede arealer - fortrinsvis mekaniske skader fra transport og ramning - er korrosionshastigheden blevet høj. Ved zonemaling er faren for kraftig lokalkorrosion begrænset, fordi de anodiske områder er uendeligt meget større.

4.4 Materialer til overfladebehandling

De ovenfor omtalte nye kvalitetsprodukter indeholder næsten alle et

kunstharpiksbindemiddel, f.eks. vinyl eller epoxy. Almindelig anvendt er kombinationer af kultjære eller bitumen og epoxy. Malingen blandes af to komponenter (base og hærder) umiddelbart før påføringen. Kultjære-epoxy påført på sandblæst bund i lagtykkelser på ca. 400 μm har vist sig at give fortræffelig beskyttelse i meget lange perioder.

Som en særlig type skal nævnes zinkstøvmalingerne, hvor man har søgt at indbygge katodisk beskyttelse i malingsfilmen.

Zinkstøvmaling har et meget højt indhold af fintzinkpulver med en kornstørrelse på nogle få tusindedele m.m. Hidtil har bindemidler på epoxy- og natriumsilikat-basis været de almindeligste, men i de senere år har ethylsilikat givet overordentlig gode resultater.

Man lader sjældent en zinkstøvmaaling stå alene. For det meste kombineres den med en dækmaaling af god kvalitet, f.eks. kultjæreepoxymaling.

Kombinationer med zinkstøvmaaling bør næppe benyttes i forbindelse med zonemaling. Zinkholdig maling vil i disse tilfælde virke som offeranode for det dybere liggende blottede jern og derfor hurtigt ødelægges.

Selvom zinkholdige grundmalinger har været og stadig bliver anvendt i undervandsmalingssystemer, er fordelene dog tvivlsomme. Et ekstra lag kultjæreepoxy vil formodentlig have en bedre virkning og tillige være billigere.

For alle produkter af høj kvalitet gælder det, at de er temmelig dyre, og man bør derfor kun benytte gennemprøvede produkter og udføre overfladebehandlingen i nøje overensstemmelse med brugsanvisningen.

5 ØKONOMI

5.1 Eksempler på katodisk beskyttelse

For at give et indtryk af de med katodisk beskyttelse forbundne udgifter

skal der i det følgende gives overslag for de i afsnit 3.5.2 beskrevne eksempler:

Eks. 1: Anlæg med offeranoder.

Eks. 2: Anlæg med fjernt placerede anoder.

Eks. 3: Anlæg med permanente anoder ophængt på spunsvæggen.

Det må kraftigt pointeres, at der er tale om skøn, der kan varierer en del efter de lokale forhold, markedsforhold m.m.

Som grundlag for beregningerne sættes en effektiv rente på 10% og beskyttelsesanlægget tænkes forrentet og afskrevet over funktionsperioden med konstante årlige ydelser.

5.1.1 Aluminiumanoder på spunsvæggen

Eksempel 1: 125 aluminiumanoder á 28 kg med en beregnet levetid på ca. 5 år anbringes jævnt fordelt over 200 m spunsvæg. Udgifterne til anbringelsen af anoder skønnes til 20.000 kr. i første omgang og ca. 10.000 kr. ved fornyelse.

Anodemateriale: 3.500 kg á 15 kr./kg =	52.500 kr.
Anbringelse m.m.:	<u>20.000 kr.</u>
Ialt:	<u>72.500 kr.</u>
Forrentning og afskrivning:	19.150 kr.
Tilsyn:	<u>1.500 kr.</u>
Udgifter/år:	<u>20.650 kr.</u>

For beskyttelse med zinkanoder gælder til sammenligning følgende beregning:

Anodemateriale: 12.000 kg á 10 kr./kg:	120.000 kr.
Anbringelse m.m.:	<u>20.000 kr.</u>
Ialt:	<u>140.000 kr.</u>
Forrentning og afskrivning:	37.000 kr.
Tilsyn:	<u>1.500 kr.</u>
Udgifter/år:	<u>38.500 kr.</u>

5.1.2 Fjernt placerede anoder af jernskrot

Eksempel 2: 30 tons skrot i form af "fejlbarer" fra et stålverk forsynes med kabler og anbringes langs med en overfor liggende dækmole. Elforbruget bliver ca. $195 \text{ (Ampere)} \times 10 \text{ (Volt)} = 1950 \text{ Watt}$. Inklusiv tab i ensretterne på ca. 10% bliver forbruget ca. 2150 Watt svarende til 18.900 kWh/år.

Investeringen i et anlæg af denne type anslås til 60 kr./m^2 jernoverflade mod åbent vand eller $1950 \times 60 = 117.000 \text{ kr.}$ Heraf regnes udgiften til anoder at være 60.000 kr.

Afskrives el-installationerne over 20 år og anoder over 10 år bliver de løbende udgifter:

Forrentning og afskrivning

el-installation:	6.700 kr.
anoder:	9.775 kr.
el-udgifter: 0,25 kr./kWh:	4.725 kr.
tilsyn og vedligeholdelse:	<u>3.000 kr.</u>
Udgifter/år	<u>24.200 kr.</u>

5.1.3 Magnetitanoder på spunsvæggen

Eksempel 3: På spunsvæggen anbringes jævnt fordelt 63 magnetitanoder. El-forbruget er ca. $195 \times 6,0 = 1170 \text{ Watt}$ plus ca. 15% til tab i ensretter eller ialt ca. 1345 Watt, svarende til 11.800 kWh/år.

Anlægsudgifterne til et anlæg af denne type skønnes at være af størrelsesordenen 75 kr./m^2 jernoverflade mod åbent vand eller $1950 \times 75 \text{ kr.} = 146.250 \text{ kr.}$ Heraf er 20.000 kr. udgifter til anoder, hvis gennemsnitlige levetid sættes til 10 år.

Afskrives anlægget over 20 år bliver de løbende udgifter:

Forrentning og afskrivning	
el-installation, anodebeholdere:	14.850 kr.
anoder:	3.250 kr.
el-udgifter: 0,25 kr./kWh:	2.950 kr.
tilsyn og vedligeholdelse:	<u>3.000 kr.</u>
Udgifter/år	<u>24.050 kr.</u>

5.2 Zonemaling

Zonestrygning af en ny spunsvæg i området fra kote +0,5 til kote -1,5 vil ved behandling på stedet i dag kunne leveres for ca. 60 kr./m² jernoverflade. Den i eksemplerne forekommende kajstrækning, der har en udfoldet længde på 300 m, vil altså kunne zonestryges for 36.000 kr. Kan der garanteres en levetid på 10 år og behandlingen dermed forrentes og afskrives over denne periode, bliver de årlige udgifter 5.900 kr. svarende til ca. 30% af udgifterne ved katodisk beskyttelse med aluminiumanoder. En zonestrygning, der udsætter installation af katodisk beskyttelse i 10 år, kan altså foretages med betydelig fordel.

5.3 Totalmaling

En stryging inden ramningen af den overfor omhandlede spunsvæg med et kvalitetsprodukt fra ½ m over daglig vande til ½ m under bundniveau, i dette tilfælde altså 7½ m, vil koste omkring 300 x 7,5 x 60 kr. = 135.000 kr. svarende til årlige udgifter til forrentning og afskrivning på 22.000 kr. idet levetiden sættes til omkring 10 år.

De årlige udgifter bliver altså af samme størrelsesorden som for katodisk beskyttelse, hvorefter den næsten 100% effektive korrosionsbeskyttelse med katodisk beskyttelse bør foretrækkes.

6 DANSKE ERFARINGER MED KATODISK BESKYTTELSE

Katodisk beskyttelse har været anvendt i en række danske havne siden slutningen af 50'erne. De fleste anlæg er projekteret og udført af dan-

ske rådgivende ingeniører eller leverandører, men i ganske enkelte tilfælde har danske firmaer optrådt som repræsentanter for udenlandske leverandører.

Udfra et generelt kendskab til anlæggenes drift kan det sammenfattende siges, at alle anlæg med offeranoder synes at have opfyldt de stillede forventninger til driftsikkerhed således, at den forventede levetid er opnået eller overgået. Det bør i denne forbindelse bemærkes, at de aller fleste anlæg af denne type er leveret af samme firma.

Til forskel herfra er anlæggene med påtrykt strøm projekteret eller leveret af flere forskellige personer og firmaer, og de fleste anlæg er præget af eksperimenter med forskellige nye ideer til anodeplacering og andre detaljer i konstruktionen.

Herved er man uden tvivl ofte nået frem til løsninger, der i anlægsudgifter er blevet væsentligt billigere end de ville være blevet, hvis man havde fået erfarne udenlandske firmaer til at udarbejde projekterne, og samtidigt har man på godt og ondt indhentet en del erfaringer, der dog aldrig er blevet samlet, men må søges hos de pågældende.

Det er derfor ikke muligt for Havnekorrosionsudvalget på det foreliggende grundlag at fremsætte nogen konklusion med hensyn til hvilke konstruktionsprincipper, der har vist sig særlig egnede for danske forhold, men det må konstateres, at der kun for ganske enkelte anlæg er truffet aftale med leverandøren (eller med andre tilsynsførende) om regelmæssigt tilsyn og kontrol. Det er heller ikke kendt at ejerne af anlæggene selv har foretaget tilsyn og kontrol.

Udvalgets erfaringer synes at vise, at nogle anlæg stort set har været overladt til sig selv fra den dag, de er blevet installeret og sat igang og således kan have været ude af drift kort tid efter. Ved andre anlæg har tilsynet indskrænket sig til en mere eller mindre regelmæssig kontrol med en advarselsslampe eller aflæsning af en el-måler.

På trods af mangelfuldt tilsyn har enkelte anlæg øjensynlig fungeret i

en længere årrække med et jævnt anodeforbrug så i alle fald en delvis korrosionsbeskyttelse er opnået.

Endelig har et antal anlæg krævet så hyppig vedligeholdelse og reparation, at der foreligger rapporter om funktionstilstanden gennem en årrække.

De nyligt udkomne regler for igangsættelse og drift af anlæg til katodisk beskyttelse stiller krav om kontrol mindst een gang om året, dels for at sikre anlæggets rette drift, dels for at imødegå faren for skader på sekundære konstruktioner. Det er vigtigt at gøre sig klart, at et anlæg til katodisk beskyttelse ikke bør installeres, hvis man ikke samtidigt træffer aftale om regelmæssigt at få foretaget kontrolmåling, justering og vedligeholdelse. Det vil formentlig kun være få brugere, der vil være indstillet på selv at foretage denne kontrol.

LITTERATUR

1. Regler for etablering og drift af anlæg til katodisk beskyttelse, Udvalget vedrørende katodisk beskyttelse, 1971, Teknisk Forlag
ISBN 87 571 0357 7
2. Katodisk beskyttelse, Lærebog, Udvalget vedrørende katodisk beskyttelse, 1975, Teknisk Forlag (under trykning).
3. Havnekorrosionsudvalget, Meddelelser 1-4.
4. An Evaluation of Corrosion of Sheet Steel Piling in Danish Harbours, Hans Arup og Gerhard Glanz,
2nd International Congress on Metallic Corrosion, New York 1963, Proceedings.
5. Corrosion and Protection of Danish Harbours, Hans Arup, Scandinavian Corrosion Congress, Helsinki 1964, Proceedings.
6. Cathodic Protection, J. H. Morgan, Leonard Hill Books Ltd., London, 1959.
7. Cathodic Protection, L. M. Applegate, McGraw-Hill Books Company Inc., London 1960.
8. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, W.v. Baeckmann/ W. Schwenk, Verlag Chemie GmbH 1971,
ISBN 3-527-25331-9.

