

DANSK BETONFORENINGS

ANVISNING I

KATODISK BESKYTTELSE

Indholdsfortegnelse

0.	Forord	3
1.	Indledning	4
1.1	Anvisningens indhold	4
2.	Generelt om katodisk beskyttelse	5
2.1	Katodisk beskyttelse	5
2.1.1	Stål i vand	5
2.1.2	Stål i beton, generelt	5
2.2.	Beskyttelseskriterier	6
2.2.1	Måling af potential	7
2.2.2	Potentialstigningskriteriet	8
2.2.3	Potentialsænkningkriteriet	9
2.3	Anodeprocesser	9
2.4	Katodeprocesser	9
2.5	Overbeskyttelse	10
3.	Forundersøgelser	11
3.1	Tilstandsvurdering	11
3.1.1	Visuel gennemgang af konstruktion og konstruktionstegninger	11
3.1.2	EKP- og modstandsmålinger	11
3.1.3	Ophugningen til armering	12
3.1.4	Chlorid- og karbonatiseringsbestemmelse	12
3.1.5	Dæklagsmålinger	12
3.1.6	Udtagning af borekerner	12
3.2	Statiske overvejelser	13
3.3	Katodisk beskyttelse - teknisk anvendelsesområde	13
3.3.1	Fordele og ulemper	13
3.4	Katodisk beskyttelse - økonomi	14
4.	Dimensionering	16
4.1	Generelt	16
4.1.1	Bestemmelse af strømbehov	16
4.1.2	Valg af anodetype og anodemateriale	16
4.1.3	Vurdering af anodesystemets levetid	16
4.1.4	Fastsættelse af den maksimalt nødvendige driftsspænding	17
4.2	Detailprojektering	17
4.3.	Krav til virkemåde	17
4.3.1	Prøveanlæg	18
4.4	Drift og vedligehold	18
5.	Anoder	19
5.1	Anodegeometri	19
5.1.1	Anoder placeret i omgivende vand eller jord	19
5.1.2	Anoder placeret i konstruktionsbetonen eller i reparationsbeton	20
5.1.3	Indborede eller indfræsedede anoder	20
5.1.4	Ledende, tynde overfladelag	21
5.1.5	Ledende, tykke overfladelag	22
5.1.6	Anoder indstøbt i pudslag	22
5.2	Anodematerialer	23
5.1.6	Titanbaserede anodematerialer	23
5.2.2	Kulbaserede anoder	23
5.3	Anbefalede maksimale strømtætheder for anoder i beton	24

6.	Elektrisk installation og udstyr	25
6.1	Generelt	25
6.2	Tilslutningsledninger for armering, anoder og referenceceller	25
6.3	EI-installation	25
6.4	Referenceceller	25
6.5	Strømforsyning	25
6.6	Ensretter	26
6.7	Overvågningsudstyr	26
7.	Udførelse	27
7.1	Generelt	27
7.1.1	Reparation af betonskader	27
7.1.2	Forberedelse af konstruktion	27
7.1.3	Montering af anodesystem	28
7.1.4	Omstøbning af anoder	28
7.1.5	Indregulering	28
7.1.6	Kvalitetsstyring	28
8.	Drift og vedligehold	30
	Supplerende litteratur	31

0. Forord

Dansk Betonforening nedsatte i 1988

Arbejdsgruppe vedr. Katodisk Beskyttelse

Arbejdsgruppen fik følgende sammensætning:

Christian Munch-Petersen (Formand).
Mogens Abrahamsen.
Ole Viggo Andersen.
Hans Arup.
Carsten Faber Henriksen (fra 30.06.1990).
Karsten Petersen.
Erik Stoltzner.
Bo Søgaard (til 31.12.1990).

Arbejdsgruppen fik som kommissorium at udarbejde en praktisk orienteret anvisning, der skal være læsbar for alle bygningsingeniører. Anvisningen skal omfatte følgende forhold:

- Princippet i KB.
- Anvendelsesområde for KB.
- Praktiske systemer for KB, herunder udførelse, økonomi og holdbarhed.
- Kontrol og drift af KB.

Arbejdsgruppen skulle udføre arbejdet gennem at opsamle og vurdere eksisterende viden om katodisk beskyttelse af armeret beton. Anvisningen skal omfatte fordele og ulemper samt beskrive usikre forhold.

Dansk Betonforening skal takke Birit Buhr, Jens M. Frederiksen, Ruth E. Sørensen og Claus Chr. Bærentsen for konstruktiv kritik.

Anvisningen har desuden ved et møde i Dansk Betonforening den 20.11.1991 været fremlagt til kritik.

Januar 1992
Dansk Betonforening

Publikationen er udgivet af:

Dansk Betonforening
c/o Dansk Ingeniørforening
Vester Farimagsgade 29
1606 København V
Tlf.: 33 15 65 65
Fax.: 33 93 71 71

ISSN 0106-0406
ISBN 87-87823-31-4

1. Indledning

1.1 Anvisningens indhold

Traditionelt repareres skadet beton ved, at revnet, afskallet, chloridholdigt og karbonatiseret beton borthugges, armeringsstålet renses, og området udstøbes med mørtel eller beton.

Som et alternativ til disse traditionelle reparationsmetoder er der i nyere tid udviklet de elektrokemiske reparationsmetoder.

De elektrokemiske metoder omfatter:

- Katodisk beskyttelse.
- Elektrokemisk chloridudtrækning.
- Elektrokemisk realkalisering.

De elektrokemiske metoder stopper korrosionen enten ved reetablering af betonens korrosionsbeskyttende egenskaber (chloridudtrækning) og/eller ved at genskabe den høje pH-værdi i porevæsken (realkalisering), eller ved standsning af korrosionsprocessens hastighed (katodisk beskyttelse).

Princippet bag de tre elektrokemiske metoder er ens. Der påtrykkes et elektrisk felt på den armerede betonkonstruktion. Det elektriske felt giver anledning til en række elektrokemiske processer og reaktioner i konstruktionen. De tre metoder bygger alle på de elektrokemiske reaktioner og processer, der foregår ved alle tre metoder, omend med forskellig hastighed. Forskellen mellem metoderne ligger bl.a. i størrelsen af det påtrykte elektriske felt, behandlingstiden og de ydre rammer for reparationen.

Chloridudtrækning og realkalisering er midlertidige foranstaltninger, mens katodisk beskyttelse foregår permanent (eventuelt periodisk) i resten af konstruktionens levetid.

Nærværende anvisning beskriver kun katodisk beskyttelse i detaljer. Vedrørende chloridudtrækning og realkalisering henvises til speciallitteraturen (se supplerende litteratur).

2. Generelt om katodisk beskyttelse

2.1 Katodisk beskyttelse

Katodisk beskyttelse er en velkendt, udbredt og veldokumenteret metode til at forhindre korrosion af stålkonstruktioner i vand (og fugtig jord).

Det skal i dette afsnit i populær form kort forklares, hvorledes katodisk beskyttelse af stål i vand fungerer, og dernæst generelt, hvilke ligheder og forskelle der er mellem katodisk beskyttelse af stål i vand og stål i beton.

2.1.1 Stål i vand

Korrosion af stål sker ved to forskellige - men samtidige - processer, anode- hhv. katodeproces. Disse processer er kemiske, men afhænger elektrisk af hinanden. Armeringskorrosion er derfor en elektrokemisk proces. Der henvises til speciallitteraturen om dette emne.

Tæringen af jernet foregår ved anoden. Dette sker ved, at stålet går i opløsning og enten forsvinder ud i vandet eller sætter sig som et rustlag på konstruktionen.

Det opløste jern findes i form af positive jernioner. Hvis stålet kan gøres negativt ved hjælp af påtrykning af et ydre elektrisk kredsløb, vil det negative potential kunne blive så stort, at det holder de positive jernioner fast på stålet, hvorved korrosionen standser.

Hele stålkonstruktionen er dermed gjort til katode, hvilket betyder, at der ikke sker tæring. Deraf navnet katodisk beskyttelse.

Det ydre elektriske kredsløb kan etableres på to forskellige måder. Enten ved at forbinde stålet til et mere uædelt metal som zink eller aluminium (offeranode), eller ved et ydre elektrisk kredsløb, normalt fra elnettet via transformere og ensrettere.

Stål i vand skal påtrykkes et så stort negativt potential, at stålet bliver immunt overfor korrosion, det vil sige, at stålopløsningen ikke kan finde sted.

Da vand er et glimrende medium til at lede de begrænsede elektriske strømme, der er nødvendige, kan man normalt nøjes med få, ydre anoder. Disse placeres så langt væk fra den konstruktion, der skal beskyttes, at alle dele af konstruktionen har nogenlunde lige langt til anoden. Herved fordeles strømmen - og den katodiske beskyttelse - jævnt.

2.1.2 Stål i beton, generelt

Omstøbning med beton kan ikke forhindre, at vand og ilt når frem til det indstøbte jern.

Normalt vil sund beton dog kunne forhindre skadelig korrosion. Der sker nemlig det, at betonen på grund af cementens hydratisering bliver kraftig basisk, og i dette miljø vil der blive dannet et passiverende oxidlag, som beskytter armeringen.

To forhold kan ødelægge dette passivlag. Det ene er karbonatisering, hvor luftens kuldioxid (kulsyre, CO_2) med tiden neutraliserer betonens basiske miljø. Det andet er chloridindtrængen, hvor chlorider stammende fra f.eks. tørsaltning, havvand, badevand og/eller betonens delmaterialer direkte ødelægger passivlaget. Der henvises til speciallitteraturen om dette emne.

Ved katodisk beskyttelse af stål i beton skal korrosionskredsløbet imødegås med et ydre kredsløb. Offeranoder kan normalt ikke bruges fordi spændingsforskellene bliver for små.

En betonkonstruktion i fri luft kan ikke - som en betonkonstruktion i vand - beskyttes med få anoder, fordi luften ikke - som vand - kan lede strømmen. Anoderne må derfor anbringes på betonoverfladen eller i selve betonen. Fra anoderne vil strømmen på grund af naturens indbyggede dovenskab gå den korteste vej, d.v.s. til de armeringsjern, der ligger nærmest anoderne.

På en betonkonstruktion, der skal katodisk beskyttes, har man derfor brug for en jævn anodefordeling, enten som mange enkeltanoder, et anodenet eller et anodelag. Der henvises til kapitel 5.

En anden forskel mellem stål i vand og stål i beton er det potential, som armeringen skal påtrykkes. På grund af det høje pH er det ikke nødvendigt i beton at sænke potentialet så langt, at stålet bliver immunt, men blot så langt, at der opnås passivitet.

En potentialsænkning kan nemlig bevirke, at stabil passivitet indtræder, selv om en vis chloridmængde er tilstede, og selv om pH-værdien i betonen er i underkanten. Jo lavere potentialet er, des større bliver stålets tolerance overfor begge disse skadelige faktorer. Katodisk beskyttelse kan derfor også bruges forebyggende på beton, hvor armeringen endnu ikke er begyndt at korrodere, og dette kan gøres med et meget begrænset forbrug af strøm.

Når allerede korroderende armering skal beskyttes, må der i den første tid efter anlæggets igangsættelse bruges en stærkere strøm end senere, fordi den påtrykte strøm ændrer forholdene i gunstig retning. Ved overfladen af det beskyttede jern sker der nemlig følgende ændringer af det kemiske miljø:

- Der produceres hydroxylioner (alkali), d.v.s., pH stiger.
- Chloridioner trækkes væk og bevæger sig i retning af anoden.
- Ilten forbruges.

Hvis anlægget for katodisk beskyttelse afbrydes, vil korrosionen ikke begynde igen med det samme. Det er altså muligt katodisk at beskytte stål i beton, uden at beskyttelsen er konstant over tiden. Det kan udnyttes til at katodisk beskytte f.eks. svømmebassiner med anoder nedsænket i badevandet i de perioder, hvor hallen ikke benyttes.

En speciel anvendelse af dette fænomen er den såkaldte chloridudtrækning, hvor et midlertidigt katodisk beskyttelsesanlæg bruges med en stor strømstyrke i en kort tid. Der henvises til afsnit 2.3, hvor mulige bivirkninger fra store strømstyrker er omtalt. Ved processen trækkes chloridioner ikke blot væk fra jernene, men helt væk fra betonen ved hjælp af et midlertidigt ekstra dæklag på betonoverfladen (f.eks. fugtig papirmasse). Hvis chloriderne herved er fjernet, og nye forhindres at komme til, kan korrosionen standses.

2.2. Beskyttelseskriterier

Det er ikke videnskabeligt afklaret, hvilket generelt kriterium der skal benyttes for at vurdere, om den katodiske beskyttelse er tilstrækkelig.

Der er imidlertid opstillet en række kriterier, der i konkrete tilfælde har vist sig at fungere.

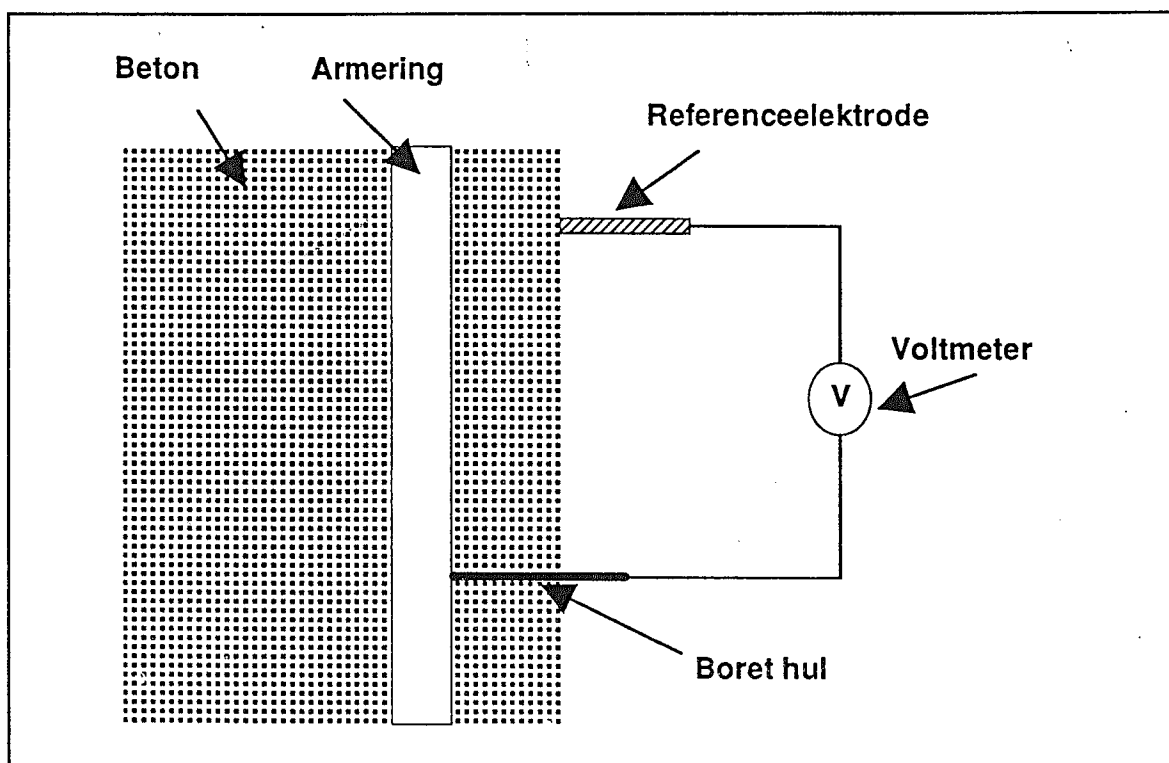
2.2.1 Måling af potential

De fleste kriterier benytter potentialmålinger. Dette er en måling af armeringens potential overfor en referenceelektrode. Ideelt burde referenceelektroden placeres i betonen tæt på det jern, hvis potential skal måles. Dette kan lade sig gøre med indstøbte referenceelektroder, men generelt er man henvist til at måle på betonens overflade, umiddelbart over den armeringsstang, hvis potential ønskes bestemt. Figur 1 viser princippet i potentialmåling.

Hvis der er korrosion i denne armeringsstang, eller stangen er beskyttet ved katodisk beskyttelse, vil spændingsfaldet gennem dæklaget derfor give anledning til en måleunøjagtighed. Når denne unøjagtighed skyldes beskyttelsesstrøm, kaldes den IR-drop (se figur 2). Bidraget herfra forsvinder øjeblikkeligt, når strømmen afbrydes, hvorfor målingen af potentialer på beton med katodisk beskyttelse skal udføres øjeblikkeligt efter at strømmen er afbrudt (INSTANT OFF).

En anden fejlkilde er det såkaldte kontaktpotential ved overgangen mellem referenceelektroden og betonoverfladen. Størrelsen af dette kontaktpotential afhænger af betonens tilstand, og det målte potential vil synes at blive højere, hvis betonen er tør og/eller karbonatiseret.

Som referenceelektrode kan bruges en kobber/kobbersulfatelektrode, der består af en kobberstang placeret i en kobbersulfatopløsning. En anden ofte anvendt referenceelektrode er en sølv/sølvchloridelektrode. Andre referenceelektroder kan også bruges, og måleværdierne kan let omregnes. Tabel 1 indeholder de konstanter, der skal lægges til potentialer målt med sølv/sølvchlorid og calomelektroder for sammenligning med potentialer målt med kobber/kobbersulfatelektroder. Der henvises i øvrigt til speciallitteraturen.



Figur 1 Potentialmåling.

Tabel 1 Konstanter for sølv/sølvchlorid- og calomelektroder. (Lægges til potential målt med nævnte elektrode for sammenligning med potential målt med kobber/kobbersulfat-elektroder).

Elektrodetype	Sølv/sølvchloridelektrode	Calomelektrode
Konstant	-0.08 V	-0.075 V

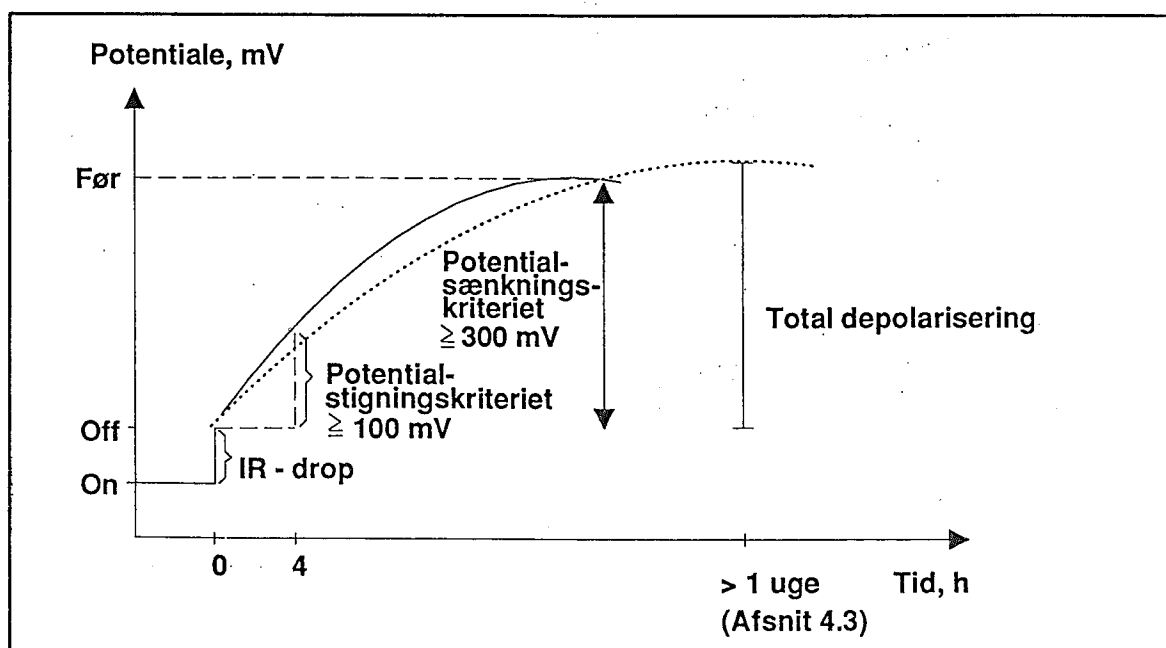
I de efterfølgende afsnit er alle angivne potentialværdier baseret på måling med kobber/kobbersulfatelektrode.

Der anvendes en række forskellige kriterier for et katodisk beskyttelses anlægs korrekte funktion. To anerkendte og ofte anvendte kriterier for effektiviteten af den katodiske beskyttelse skal gennemgås nedenfor. Der henvises desuden til afsnit 4.3.

2.2.2 Potentialstigningskriteriet

Efter afbrydelse af strømmen skal potentialet stige mindst 100 mV i løbet af 4 timer, se figur 2. Dette kriterium anbefales af NACE (National Association of Corrosion Engineers, USA). Kriteriet er et udtryk for, at den katodiske beskyttelse har ændret det kemiske miljø omkring det indstøbte jern således, at der indtræder passivering. Potentialstigningen fremkaldes af inddiffunderende ilt.

Der sker en hurtig potentialændring umiddelbart efter afbrydelse af beskyttelsesstrømmen, og udgangsmålingen (INSTANT OFF) bør foretages indenfor en brøkdel af et sekund ved hjælp af en timer.



Figur 2 Begreber ved potentialmåling. Den optrukne kurve er typisk for nye anlæg til KB, den punkterede for ældre anlæg til KB.

Potentialstigningen fra denne udgangsværdi kan være meget langsom, hvis betonen er vandmættet, og hvis beskyttelsen har været i gang i lang tid. I disse tilfælde fås ikke en stigning på 100 mV på 4 timer, men beskyttelsen kan alligevel vise sig at være effektiv, men andre kriterier som det nedenfor anførte potentialsænkningsskriterium skal i givet fald anvendes.

2.2.3 Potentialsænkningsskriteriet

Beskyttelsen kan anses for effektiv, hvis potentialet målt efter strømafbrydelse (INSTANT OFF) overalt er mere end 300 mV lavere end før katodisk beskyttelse blev taget i brug.

Da overflademålte potentialer kan ændre sig, fordi betonoverfladen ændrer sig, er kriteriet kun anvendeligt i kort tid efter at anlægget for katodisk beskyttelse er etableret.

På et anlæg, der har været i drift i længere tid, kan potentialværdier målt før anlægget er taget i brug erstattes af værdier målt efter at anlægget har været afbrudt i en længere periode, og der er indtrådt en total depolarisering, se figur 2.

2.3 Anodeprocesser

Ved etablering af et anlæg for katodisk beskyttelse er det ikke nok at overveje forholdene ved katoden, som er de armeringsjern, der skal beskyttes.

Forholdene ved anoderne bør også overvejes. Anoderne kan være punktformede (enkelte, flere eller mange), netformede eller som lag, jvf. kapitel 5.

Uanset dette vil der ved anoden ske elektrokemiske processer, der i princippet er modsatrettet af de, der foregår ved katoden (armeringsnettet, der skal beskyttes).

Imidlertid er anodearealet ofte endog meget lille, hvorfor problemerne ved anoden let kan blive meget store.

Ved anoden forbruges hydroxylioner, chlorid tiltrækkes, og der produceres ilt og eventuelt også chlor (fra chloridioner, der neutraliseres). På grund af de forskellige ioners størrelse og dermed deres vandringshastighed i beton, modsvares forbruget af hydroxylioner kun delvis af vandringen af nye hydroxylioner til anoden. Det vil sige, at forholdene ved anoden bliver stadig mindre basiske, og der kan ske en direkte forsuring og opløsning af betonen omkring anoden.

Der er en grænse for, hvor længe en anode holder, og hvor meget strøm, der kan sendes ud fra en anode. Grænsen sættes primært af anodetype og anodeareal, jvf. kapitel 5.

2.4 Katodeprocesser

Når jernet gøres til katode (negativ), vil der produceres negativt ladede hydroxylioner, og selv om størstedelen af disse vil migrere (vandre) mod anoden, vil der ske en opkoncentrering af natrium- og kaliumhydroxyd, idet natrium- og kaliumioner migrerer hen imod katoden.

Når der derfor sker en opkoncentrering af K^+ , Na^+ og OH^- ved armeringen, kunne man frygte, at der ville kunne fremprovokeres alkaliskelreaktioner, der jo netop kræver en høj koncentration af alkalihydroxid.

Erfaringerne fra brug af katodisk beskyttelse tyder dog ikke på, at dette sker, men problematikken bør foreløbigt gennemtænkes i hvert enkelt tilfælde.

Den beskrevne proces udnyttes i den såkaldte realkalisering, hvor der ved armeringsjernene ved hjælp af en midlertidig, men kraftig strøm, genskabes et betonmiljø med høj koncentration af alkali-hydroxid.

Et andet problem ved katoden er, om strøm og spænding bliver så kraftigt påtrykt, at vandet i betonen sønderdeles, d.v.s., der dannes brint, der udskilles på den negative katode.

Brintdannelse kan give anledning til brintskørhed, ved at atomar brint går ind i metallets krystalstruktur, og gør det skørt. Risikoen er størst ved højstyrkestål og derfor ved forspændte konstruktioner.

Erfaringerne fra brug af katodisk beskyttelse tyder dog ikke på, at dette sker, men problematikken bør foreløbigt gennemtænkes i hvert enkelt tilfælde.

2.5 Overbeskyttelse

Et anlæg til katodisk beskyttelse har i princippet et optimalt driftsniveau. Det vil sige et niveau, hvor anlægget beskytter armeringen tilstrækkeligt, men hvor beskyttelsen ikke giver negative effekter i skadeligt og i hvert fald ikke i uovervejede og ukontrollerede omfang.

Den nuværende viden er ikke tilstrækkelig til at fastlægge det optimale niveau præcist. Nogle retningslinier kan dog gives.

Anoder bør ikke udnyttes til grænsen med hensyn til antal, afstande og strømtæthed. En sikkerhed på 50 eller 100% vil normalt være passende. Ligeledes bør strømme og/eller spændinger skal holdes på niveauer, der ligger inde i erfaringsområdet.

Hvis anlægget køres for hårdt (kaldet overbeskyttelse), opnås ingen forbedring af armeringens beskyttelse, og der kan tværtimod opstå problemer ved både anode og katode, som beskrevet i afsnit 2.3 og 2.4.

Desuden slides anoderne hurtigere op, hvilket vil sige, at anlægget har en kortere levetid.

Anlæg til katodisk beskyttelse kræver således kvalificeret overvågning, og specielt indregulering kræver erfaring og ekspertise.

3. Forundersøgelser

3.1 Tilstandsvurdering

De dele af en tilstandsvurdering, der er relevant for vurdering af et eventuelt behov for katodisk beskyttelse, er beskrevet nedenfor.

Før beslutningen om etablering af katodisk beskyttelse tages bør følgende undersøgelser foreligge:

- 1) Visuel gennemgang af konstruktion og konstruktionstegninger.
- 2) EKP-, modstands- og kontinuitetsmålinger.
- 3) Ophugninger til armering.
- 4) Chlorid- og karbonatiseringsbestemmelse i beton.
- 5) Dæklagsmålinger.
- 6) Udtagning af borekerner.

De enkelte prøvningsmetoder er overordnet beskrevet nedenfor. Med hensyn til en detaljeret beskrivelse af metoderne henvises til speciallitteraturen.

3.1.1 Visuel gennemgang af konstruktion og konstruktionstegninger

En gennemgang af konstruktionstegningerne vil give kendskab til virkemåde og de kritiske snit. Der kan desuden ofte fås oplysninger om dæklag, armeringsstød og om diskontinuitet i armeringen. Manglende kontinuitet kan vanskeliggøre EKP-målinger og den eventuelle senere etablering af anlæg for katodisk beskyttelse.

Ved den visuelle gennemgang fås et første indtryk af konstruktionens tilstand, herunder afskalninger, rustudslag, støbeskel og revner.

3.1.2 EKP- og modstandsmålinger

Ved måling af det elektrokemiske potential, kaldet EKP-måling, kan armeringens øjeblikkelige korrosionstilstand vurderes. EKP-målingerne kan kun bruges til at adskille ikke-korroderende områder fra korroderende.

EKP-målingerne skal derfor suppleres med ophugninger i betonen til armeringen for at få et indtryk af korrosionsomfanget, se nedenfor.

EKP-målingerne fungerer samtidig som et nødvendigt udgangspunkt for kontrol af et katodisk beskyttelses anlæg.

Som en del af dimensioneringen af katodisk beskyttelse og som hjælpemiddel til vurdering af EKP-målingerne, er det nødvendigt at kende betonens elektriske modstand. Den elektriske modstand er primært en indikator for betonens fugtindhold.

Stor modstand indikerer lille fugtindhold i betonen og omvendt. En stor modstand i betonen vil vanskeliggøre anvendelse af katodisk beskyttelse. NACE angiver, at hvis den specifikke modstand i betonen er mindre end $50 \Omega \cdot \text{cm}$, er betonen egnet til katodisk beskyttelse.

I forbindelse med vurdering af EKP-målingernes pålidelighed bør der udføres en kontrol af armeringens kontinuitet i måleområdet. Denne måling er samtidig værdifuld i forbindelse med en vurdering af muligheden for at etablere katodisk beskyttelse.

3.1.3 Ophugningen til armering

Ophugninger til armeringen udføres for at bedømme armeringens faktiske korrosionstilstand. Ophugningerne placeres i karakteristiske områder valgt ud fra EKP-målingen. Ophugninger bør både ske i områder, hvor der konstateres de laveste potentialer (indikerende korroderende områder) og i områder, hvor der er konstateret høje potentialer (indikerende ikke-korroderende områder).

3.1.4 Chlorid- og karbonatiseringsbestemmelse

Ved chlorid- og karbonatiseringsbestemmelse fås en indikator for, om evt. konstateret armeringskorrosion skyldes karbonatisering eller chlorid, og om korrosion kan forventes i fremtiden på grund af chlorid eller karbonatisering. Vurderingen af disse målinger hænger sammen med dæklagsmålingerne, se nedenfor.

3.1.5 Dæklagsmålinger

Dæklagsmålingen indgår som en del af eftersynsrutinen med det formål at eftervise, at konstruktionen er udført i henhold til konstruktionstegningerne med hensyn til armeringsmængde og -placering. I forbindelse med etablering af katodisk beskyttelse bruges dæklagsmålingen til at vurdere, om der er risiko for uhensigtsmæssig strømfordeling, lokal overbeskyttelse eller kortslutninger mellem anoder og armeringen på grund af yderligtliggende jern.

Vurderingen af disse målinger hænger sammen med måling af chlorid og karbonatisering, se ovenfor.

3.1.6 Udtagning af borekerner

På udtagne borekerner vurderes betonen generelt. Desuden vurderes, om der er revner, lamineringer, isolerende lag (epoxy, luftfyldte revner o.lign.) eller reaktivt materiale i betonen. Enhver form for diskontinuitet i betonen vil vanskeliggøre den strømtransport igennem betonen, som katodisk beskyttelse kræver.

Til omfangsbestemmelse af områder med lamineringer er bankning på betonoverfladen med en hammer et nødvendigt supplement til udtagning af borekerner.

3.2 Statiske overvejelser

Med de skader, der er konstateret ved tilstandsvurderingen, må konstruktionens nuværende bæreevne gennemregnes. Konstruktionens bæreevnereserve skal beregnes for at kunne vurdere restlevetiden under fortsat nedbrydning af såvel armering som beton.

Samtidig skal det også vurderes om konstruktionen kan bære mere vægt, som f.eks. kan være aktuelt ved de typer katodisk beskyttelse, hvor anoden beskyttes af en kappe af beton eller mørtel.

3.3 Katodisk beskyttelse - teknisk anvendelsesområde

Når tilstandsvurderingen og de statiske overvejelser er gennemført, kan det vurderes, om katodisk beskyttelse er en teknisk relevant løsning.

Der skal herunder ske en afvejning af de nedenfor anførte fordele og ulemper. Opmærksomheden henledes på, at katodisk beskyttelse kun skal overvejes anvendt, når der pågår - eller er risiko for - skadelig armeringskorrosion.

Det betyder dog ikke, at et anlæg for katodisk beskyttelse ikke også har indflydelse på andre skademekanismer. For eksempel vil en anode påført som maling eller i en påstøbt kappe ændre fugtforholdene i betonen og dermed påvirke en eventuel frostnedbrydning.

I mange tilfælde vil tre overordnede forhold skulle være opfyldt for at katodisk beskyttelse er en relevant løsning:

- Korrosionsprocessen må ikke have givet anledning til væsentlig svækkelse af hovedarmeringen.
- Skaderne på beton, som armeringskorrosionen har givet anledning til, skal være relativt beskedne.
- Armeringsjernene skal være i elektrisk kontakt med hinanden (elektrisk kontinuitet).

Men selv hvor disse forhold ikke er opfyldt, kan katodisk beskyttelse være fordelagtig. Det afhænger af de alternative muligheder.

3.3.1 Fordele og ulemper

Fordele ved katodisk beskyttelse:

- Standser/begrænser korrosion på en enkel måde uden brug af større reparationsarbejder. Metoden er - når den fungerer effektivt - alle andre metoder teknisk overlegen med hensyn til korrosionsbeskyttelse.

Ulemper ved katodisk beskyttelse:

- Kræver overvågning.

- Anodernes levetid er ikke langtid dokumenteret. Levetiden af et katodisk anlæg bør derfor vurderes nøje i hvert enkelt tilfælde, om nødvendigt i samråd med eksperter indenfor katodisk beskyttelse.

Desuden er der en række forhold, som ikke kan betragtes som egentlige ulemper, men som bør vurderes på forhånd:

- Ved etablering af katodisk beskyttelse stoppes eller begrænses korrosionsprocessen på armeringen. Risikoen for egentlige betonskader (frost eller alkalikiselreaktioner) vil derimod fortsat være tilstede. Igangværende alkalikiselreaktioner vil måske endda blive accelereret (se kapitel 2). Det skal derfor i hvert enkelt tilfælde vurderes, om en eventuel udvikling af betonskader får indflydelse på levetiden af det katodiske beskyttelses anlæg.
- Ved etablering af nogle typer katodiske beskyttelses anlæg lukkes den oprindelige betonoverflade enten ved en overfladebehandling eller med et dæklag. Det bør vurderes, om dette medfører en øget risiko for betonskader på grund af opfugtning. Effekten kan også blive en udtørring af betonen, som i sig selv forhindrer korrosion og dermed egentlig overflødig gør den katodiske beskyttelse.
- Højstyrkestål (forspændingsstål) er følsomme overfor brintskørhed (stålet revner), som et resultat af, at det katodiske anlæg køres for hårdt med unødvendigt store strømtætheder (overbeskyttelse).

Katodiske anlæg på for- eller efterspændte konstruktioner bør derfor altid vurderes i samråd med eksperter indenfor katodisk beskyttelse.

Anlæg på forspændte konstruktioner kan i øvrigt være vanskelige at etablere, fordi den nødvendige elektriske kontakt til armeringen ikke kan etableres, da strengene som regel ikke er i elektrisk kontakt med hinanden.

3.4 Katodisk beskyttelse - økonomi

Den afgørende faktor ved valg af reparationsløsning er ofte de økonomiske faktorer. Ved vurderingen af de økonomiske omkostninger for katodisk beskyttelse skal følgende punkter belyses:

- Projektering, herunder eventuelle omkostninger til ekstern assistance. Hvis det ikke er muligt selv at foretage detailprojekteringen er ekstern assistance nødvendig. Som støtte ved den overordnede tekniske og økonomiske vurdering henvises til kapitel 4.
- Materialer.
- Etablering og tilsyn eventuelt med ekstern assistance.
- Indkøring og fremstilling af driftsmanual eventuelt med ekstern assistance.
- Løbende overvågning og kontrol. Det er væsentligt, at denne post figurerer i de økonomiske betragtninger.
- Anlæggets levetid, det vil sige den tid der forløber, før det skal repareres/udskiftes. Der skal ikke i den forbindelse fokuseres alene på enkelte langtidsholdbare delmaterialers levetid. Levetiden afgøres først og fremmest af, at anlægget er velegnet til opgaven og udført i den rette kvalitet, samt at anlægget vedligeholdes som foreskrevet. Et anlæggs levetid bør derfor altid vurderes i

Samråd med eksperter på området. Det skal erindres, at behovet for katodisk beskyttelse ofte skabes af et aggressivt omgivende miljø, som anlægget i givet fald også skal kunne overleve i.

4. Dimensionering

4.1 Generelt

Dimensionering af et katodisk beskyttelsesanlæg vil normalt bestå i en indledende overordnet dimensionering og en efterfølgende detailprojektering.

Den indledende overordnede dimensionering bør indeholde mindst følgende:

- 1) Bestemmelse af strømbehov.
- 2) Valg af anodetype og anodemateriale.
- 3) Vurdering af anodesystemets levetid.
- 4) Fastsættelse af den maksimalt nødvendige driftsspænding.

Det bør overvejes at opdele anlægget i flere delanlæg. Herved bliver det muligt at styre og indregulere de enkelte delanlæg hver for sig. For eksempel vil strømbehovet på en overflade variere kraftigt ved et støbeskel, hvorfor områder omkring støbeskel bør være beskyttet af et separat delanlæg.

4.1.1 Bestemmelse af strømbehov

Det samlede strømbehov udregnes ved at beregne overfladen af det indstøbte stål og gange dette tal med en, erfaringsmæssig fastsat, nødvendig strømtæthed. Denne sættes ofte til 20 mA/m² armeringsoverflade.

Strømbehovet vil normalt falde stærkt med tiden, mest i vandmættet beton og i beton med overfladebehandlere eller tildækkede overflader. Afhængigt af det valgte beskyttelseskriterium kan beskyttelsesstrømmen normalt efter længere tids beskyttelse nedsættes til værdier fra 2 til 10 mA/m² stål-overflade. Strømtætheden kan sættes lavest for dybereliggende eller mindre korrosionstruet armering.

4.1.2 Valg af anodetype og anodemateriale

Anodetype, -mængde og -materiale vælges ud fra konstruktionens geometri, miljø, strømbehov pr. m² betonoverflade (bestemt af armeringsoverflade i forhold til betonoverflade) og anbefalet maksimal strømbelastning af anoder.

Hensynet til at undgå skadelige reaktioner ved overgangen mellem anode og beton (se afsnit 5.3) har fået de fleste anodeleverandører til at anbefale en maksimal strømtæthed på 100-120 mA/m² anodeoverflade, selv om visse anodematerialer, i hvert fald i kortere tid, i sig selv kan tåle at afgive betydelig højere strøm.

For anodematerialer som ledende maling eller plast anbefales som oftest væsentlige lavere maksimal strømbelastning for at øge selve anodematerialets levetid.

4.1.3 Vurdering af anodesystemets levetid

Skader som følge af syreproduktion ved anoden stiger ved øget strømtæthed (udover den anbefalede værdi), og det samme gælder nedbrydning af plastbundne kulbaserede anoder (plastkabel og ledende maling).

Da den producerede syre neutraliseres, hvis betonen er basisk, vil levetiden være kortere i karbonatiseret beton.

4.1.4 Fastsættelse af den maksimalt nødvendige driftsspænding

Det er nødvendigt at fastsætte den maksimalt nødvendige driftsspænding under hensyn til betonens resistivitet (der kan variere i løbet af året).

De fleste beskyttelses anlæg anvender i praksis driftsspændinger fra 3-10 V, afhængigt af konstruktionsbetonens resistivitet.

4.2 Detailprojektering

Detailprojekteringen, herunder udførelse af udbuds- og betingelsesmaterialet, bør ske i samarbejde med eksperter på området. Specielt vil forholdene omkring anlæggets virkemåde og garantien for denne, indkøringen og den senere løbende kontrol af anlægget kræve bistand.

Håndregler for en vurdering af et katodisk beskyttelses anlægs virkemåde og drift beskrives i de følgende afsnit.

4.3. Krav til virkemåde

Når anlægget er tilsluttet, skal det indstilles, så følgende krav opfyldes:

- Potentialerne målt INSTANT OFF må ikke være mere negative end -1100 mV (kobber/kobbersulfat), da der ellers er risiko for brintudvikling.
- Potentialstigningskriteriet skal være opfyldt: Potentialerne målt INSTANT OFF skal være mindst 100 mV mere negative end potentialerne målt i samme punkter 4 timer efter, at anlægget er blevet slukket.
- Alternativt skal potentialsænkingskriteriet være opfyldt. Potentialerne målt INSTANT OFF skal være mindst 300 mV mere negative end potentialerne målt i samme punkter, før anlægget blev tilsluttet.

For anlæg, der har været i drift i en periode, kan værdier målt før anlæggets tilslutning erstattes med værdier målt efter, at anlægget har været afbrudt i en længere periode. Der skal være foregået en total depolarisering, hvilket svarer til, at der måles konstante potentialer. Der går normalt en uge eller længere, inden tilstanden er blevet stabil.

- Potentialerne må ingen steder være mere negative målt INSTANT OFF end målt med tilsluttet strøm.

Ved anlæg, hvor anoden ligger uden på konstruktionen indstøbt i en betonkappe, skal der godtgøres en sammenhæng mellem potential målt på overfladen af kappen og stålpotentialet eller benyttes indstøbte måleelektroder som supplement.

"4-timers"-kravet er et vejledende krav, som kan fraviges afhængigt af den enkelte konstruktion. Alternativer til "4-timers"-kravet kan være:

- INSTANT OFF-potentialerne skal være mere negative end -850 mV (kobber/kobbersulfat), men dog stadig højere end -1100 mV.
- "100 mV"-kravet erstattes af et "x-mV"-krav fastlagt med forsøg på den pågældende konstruktion eller ud fra erfaring med tilsvarende konstruktioner. x kan typisk være 80 eller 90 mV.

Det katodiske beskyttelses anlægs ydeevne vil som korrosionsprocessen variere med klimaets årsvariationer. Desuden kan anlæg til katodisk beskyttelse være lang tid om at opnå optimal ydeevne. Der bør derfor foreskrives en indreguleringsperiode på mindst et år.

4.3.1 Prøveanlæg

I visse tilfælde ved en særlig kompliceret konstruktionsgeometri, hvis betonen indeholder reaktivt tilslag, eller hvor flere lag armering ønskes beskyttet, kan det være hensigtsmæssigt at vælge at udføre et prøveanlæg, for at afklare om dimensioneringskriterierne giver en tilstrækkelig beskyttelse. Prøveanlæg bør også udføres, hvis man vælger at bruge specielle lokalt betingede vurderingskriterier, se afsnit 4.3

4.4 Drift og vedligehold

Anlæg til katodisk beskyttelse skal jævnligt kontrolleres. Der henvises til kapitel 8.

5. Anoder

Anoden er i det efterfølgende betragtet som det medie, der ved ledning overfører strømmen til betonen, hvori strømmen transporteres ved elektrolyse. Det betyder, at ved en indboret eller indfræset anode, hvor en metaltråd er indlagt/indstøbt i en ledende pasta, er det pastaen, der er anoden. Hvis metaltråden er indstøbt i cementpasta, er det derimod tråden, der er anoden. Herved fås en ensartet beskrivelse af processer og problemer på anodens overflade, hvilket altså er kontaktfladen til betonen.

5.1 Anodegeometri

Der skal vælges en anodegeometri, der fordeler strømmen og dermed beskyttelsen efter behov. Det vil i nogle tilfælde sige en anodegeometri, der gør det muligt at få en jævn strømfordeling (facader, vægge dæk). I andre tilfælde ønskes en punktvis beskyttelse af enkelte armeringsjern ved anvendelse af punktanoder.

De mest anvendte anodegeometrier kan opdeles i 6 hovedgrupper:

- 1) Anoder placeret i omgivende vand eller jord.
- 2) Anoder placeret i konstruktionsbetonen eller i reparationsbeton.
- 3) Indborede eller indfræsede anoder.
- 4) Ledende, tynde overladelag.
- 5) Ledende, tykke overladelag.
- 6) Anoder indstøbt i pudslag.

Der er intet i vejen for at bruge forskellige anodegeometrier på forskellige dele af samme betonkonstruktion.

5.1.1 Anoder placeret i omgivende vand eller jord

Konstruktioner, der delvist er omgivet af vand eller jord, kan ofte med stor fordel tilføres i hvert fald en del af beskyttelsesstrømmen fra anoder anbragt i det omgivende medium. Typiske eksempler er vandfyldte tanke, gulve mod jord, støttemure, bropiller og fundamenter.

Det er ofte muligt at udnytte, at beskyttelsen af f.eks. en pille eller væg er virksom et stykke over det neddykkede niveau, og som regel vil tidevandszonen blive delvist beskyttet.

Fordelene ved brug af anoder i omgivende vand eller jord er:

- En væsentlig billiggørelse.
- God strømspredning.
- Ingen indgreb i konstruktionen, bortset fra etablering af kontakt til armering, og evt. indboring af referenceelektroder.

Ulemperne er:

- Der må træffes foranstaltninger til at forebygge skadelige vagabonderende strømme i nærliggende rørledninger, kabler eller stålkonstruktioner.
- Hvis der i konstruktionen er anvendt vandstandsende, isolerende membraner, f.eks. under gulve, er det umuligt at bruge denne udførelse.

5.1.2 Anoder placeret i konstruktionsbetonen eller i reparationsbeton

Ved forebyggende katodisk beskyttelse af nye konstruktioner kan anoder anbringes i konstruktionsbetonen. Det tilsvarende gælder ved reparationer, hvis det har været nødvendigt at fjerne dæklaget over hele den del, der skal beskyttes.

Fordelen ved brug af anoder i konstruktionsbeton er:

- At konstruktionens geometri forbliver uændret.

Ulempen er:

- At der er risiko for ødelæggende kortslutning mellem armering og anoder. Der må udvises meget omhu ved planlægning og under udførelse.

Egnede anodematerialer er aktiveret titan i form af bånd eller net og ledende plastkabler. De sidstnævnte udviser kun begrænset risiko for kortslutning.

5.1.3 Indborede eller indfræsedede anoder

Anoden består af enten anodemasse eller af en metaltråd indstøbt i cementmørtel.

Den ledende anodemasse fyldes i borede huller eller i fræsedede riller. Som anodemateriale anvendes specialpasta eller støbemasse med højt indhold af kulstof (grafit). Platineret eller aktiveret titantråd (eventuelt med kobberkerne) bruges ofte til strømovertførsel fra kobberledning og eventuelt til strømfordeling. Anoderne kan også udføres som metaltråd indstøbt i cementmørtel. Dette er en speciel (lokal) udgave af anoder indstøbt i pudslag, se afsnit 5.1.6

Fordelene ved brug af indborede eller indfræsedede anoder er:

- At konstruktionens geometri ikke ændres, og at lokal beskyttelse kan opnås.
- At man ved nogle udformninger har mulighed for at forny eller vedligeholde anoderne.
- At anoderne kan indbores fra konstruktionens bagside eller underside.

Ulemperne er:

- At udformningen let resulterer i uønsket store anodestrømtætheder og mangelfuld strømfordeling. Specielt ved rillemonteringen kan anoden være omgivet af beton, der er delvist karbonatiseret og derfor har nedsat alkalireserve.
- At det ved indborede anoder kan skabe problemer, at reaktionsprodukter fra anoden (ilt, chlor) udvikles i betonens midte.

Ved disse anodeformer bør man være særligt opmærksom på muligheden for kortslutninger til armeringen. Tætliggende armering kan give stor lokal anodebelastning og medføre lokal overbeskyttelse.

5.1.4 Ledende, tynde overfladelag

Ved påføring af elektrisk ledende overfladebehandlinger er det muligt - ligesom for anoder indstøbt i overfladelag - at fordele anodestrømmen jævnt over konstruktionens overflade.

Materialet kan være maling, der indeholder elektrisk ledende partikler, typisk grafit. Anodestrømmen tilsluttes igennem titantråde, der indlægges i overfladelaget. Titantråde eller kulfibre kan også udlægges som et primært strømfordelingsnet.

Fordele ved brug af elektrisk ledende maling er:

- At det er nemt at opnå en jævn fordeling af beskyttelsesstrøm og tilsvarende lav anodestrømtæthed.
- At konstruktionens geometri bevares.
- At den kan anvendes på f.eks. undersider af dækkonstruktioner.
- At den er let at udføre.

Ulemperne er:

- At der er risiko for kortslutning ved f.eks. yderligtliggende armering og bindetråd eller ved indtrængning af maling i revner.
- At systemet har en relativ kort levetid. Dette kan skyldes såvel nedbrydning af malingen som syreangreb på betonoverfladen, der kan have begrænset alkalireserve på grund af karbonatisering.
- At genbehandling og vedligehold af den elektrisk isolerende dækmaling er problematisk.
- At malinglaget ikke er slidstærkt.
- At et malinglag i sig selv kan påvirke betonens fugtbalance, iltindhold m.m.

- At der er risiko for, at malingens vedhæftning ødelægges eller er vanskelig at opnå f.eks. på grund af fugt.

Der markedsføres flere typer maling fra forskellige leverandører, der hver især har udarbejdet specifikationer for påføring og ydeevne. Fælles for systemerne er, at behandlingen kan afsluttes med en beskyttende dækmaling i ønsket kulør.

Tynde, ledende overfladelag har også været påført i form af flammesprøjtet zink. Det må forventes, at levetiden begrænses af et langsomt voksende lag af zinkkorrosionsprodukter. Metoden er kendt fra udlandet, men er p.t. ikke brugt i Danmark.

5.1.5 Ledende, tykke overfladelag

Ved de første anvendelser (i USA) af katodisk beskyttelse af betonbrodæk anvendtes tykke lag af ledende asfalt som anode. Cementbaserede mørtler, der ligesom asfalt var gjort ledende med tilsætning af koks eller grafit, har også været brugt.

Der anvendes nu også punktanoder, dækket af et ledende asfaltlag til strømfordeling.

Disse systemer har foreløbigt ikke været anvendt i Danmark.

5.1.6 Anoder indstøbt i pudslag

Et meget anvendt anodesystem er anoder indstøbt i et lag cementpuds eller sprøjtebeton.

Anoderne er typisk udformet som metalnet og/eller kabler i form af f.eks. "strækmetal" af platineret titantråd og polymerkabler. Begge former kan monteres med varierende tæthed til afgivelse af differentierede strømstyrker efter konstruktionens behov.

Omstøbningsmassen er typisk cementmørtel, der påsprøjtes med specialaggregat.

Fordelene ved brug af overfladeanoder er:

- At anoden befinder sig i frisk mørtel med fuld alkalireserve.
- At man samtidig opnår et ekstra dæklag.
- At kortslutning til armering med sikkerhed kan undgås ved etablering af afstand mellem net og eksisterende betonoverflade.

Ulemperne er:

- At sammenhængsstyrken mellem pudslaget og konstruktionsoverfladen kan være vanskelig at opnå, og at det ikke vides om vedhæftningen ændres som følge af strømmen.
- At konstruktionens geometri, vægt og udseende ændres.
- At det umiddelbart ikke er nemt at ændre anlægsudformningen efter installation.

- At anoderne ikke umiddelbart lader sig udskifte.
- At det er vanskeligt at udføre EKP-målinger efter etablering af anlægget.

5.2 Anodematerialer

De fleste metaller vil korrodere, hvis de ved påtrykt strøm tvinges til at fungere som anoder i beton (eller andre elektrolytter), og deres vægttab kan beregnes efter Faradays lov. Med enkelte undtagelser, f.eks. flammesprøjtet zink på betonoverflader, bruges sådanne korroderbare metaller ikke som anodemateriale i forbindelse med beton.

Egnede anodematerialer er begrænset til to grupper af materialer:

- 1) Titan med belægning af platin eller aktiverende oxider.
- 2) Kul eller grafit i pulver eller fiberform ofte som en del af et kompositmateriale, indlejret i en binder af polymer, asfalt eller cement.

De titanbaserede anodematerialer kan i praksis regnes som permanente ved anvendelse i beton, hvis den pålagte spænding holdes under 10 V. De kulbaserede anoder udviser korrosion, idet noget af den ilt, der udvikles ved anodeprocessen, reagerer med kulstof og danner kuldioxid ved en slags kold forbrænding. I beton bidrager den dannede kuldioxid til syrevirkningen omkring anoden.

De nævnte materialer leveres typisk i følgende former:

5.2.1 Titanbaserede anodematerialer

- Titannet af strækmetal med aktiverende belægning, beregnet til indstøbning i beton eller pudslag.
- Strimler af aktiveret titan, også beregnet til indstøbning. Bruges også til fordeling af strømmen i udstrakte titannet.
- Titantråd med platinbelægning, evt. med en kerne af kobber. Bruges som primær strømtilførsel til kulbaserede anoder, f.eks. kulpastaer i borede huller eller ledende malinger, og til at fordele strømmen over større arealer.

5.2.2 Kulbaserede anoder

- Pasta med højt indhold af grafit.
Bruges som anodemasse i borede huller.
- Polymerkabler af ledende plast med kerne af kobber.
Beregnet til indstøbning i beton eller puds.
- Ledende støbemasser.
Bruges f.eks. til udstøbning i fræsede riller omkring en primæranode af titantråd.

- Ledende malinger.

Anodematerialet består af en maling, der indeholder grafit og et vand- eller opløsningsmiddelbaseret bindemiddel, f.eks. acryl. Materialet påføres i et lag på mellem 200 og 400 μm . Ledningsevnen er 10-50 $\Omega \cdot \text{cm}$.

Den ledende maling skal kombineres med en primæranode bestående af et kabel af platineret titan, der er indbygget i malingen pr. 3 m til 5 m.

Maling kan ikke anbefales til våde overflader og slidbelastede overflader. Få anodesystemer baseret på ledende maling har pr. 1991 fungeret i mere end 5-7 år, og det er svært at vurdere, om en forventet levetid kan sættes væsentligt højere. Det er også helt uafklaret, om malinglaget i praksis kan suppleres eller skal fjernes helt og fornys, når funktionstiden er forbi.

5.3 Anbefalede maksimale strømtætheder for anoder i beton

Strømovergangen fra anode til omgivende beton eller mørtel giver anledning til et forbrug af hydroxylioner (alkali) og i senere stadier en direkte syreproduktion. Syreproduktionen kan kun delvis opvejes af den tilgang af hydroxylioner, der kommer fra det katodisk beskyttede jern.

For at begrænse syreangreb på den omgivende beton anbefales det at holde anodestrømtætheden under 110 mA/m^2 . I praksis vil dette ofte betyde, at der pr. m^2 betonoverflade monteres anodemateriale med en aktiv overflade på ca. 0,15 m^2 . Endnu lavere strømtætheder bør tilstræbes, hvis den omgivende beton allerede er karboniseret. Dette er ofte tilfældet ved anvendelse af ledende malinger, men da anoden her dækker hele overfladen, er strømtætheder over ca. 20 mA/m^2 heller ikke påkrævede.

Visse typer kulfyldte plastmaterialer, f.eks. kabler eller støbemasse, kan ikke belastes med 110 mA/m^2 , da man ved højere strømtæthed risikerer en hurtigt stigende overgangsmodstand. For maling tilrådes endnu lavere strømbelastning. Uanset anodetyper bør leverandørens anvisninger om strømbelastning aldrig overskrides.

6. Elektrisk installation og udstyr

6.1 Generelt

Installationsmåde og udstyr tilpasses konstruktionens art, geometri og omgivende miljø samt stillede krav til sikkerhed og deraf følgende behov for overvågning.

6.2 Tilslutningsledninger for armering, anoder og referenceceller

Ledninger, der indstøbes i beton, skal have fornøden mekanisk styrke og være resistente for kemiske påvirkninger.

Tilslutning til armering udføres med solide skrue-, presse- eller klemmeforbindelser. Desuden kan termitsvejsning (cadweld), slaglodning (pin-brazing) og skudsøm med skruehoveder anvendes. Tilslutningssteder tildækkes med epoxy eller lignende.

Tilslutning til anoder udføres efter leverandørens anvisning.

Evt. samlinger på ledninger til referenceceller må ikke indstøbes i betonen.

6.3 EI-Installation

EI-installationer udføres solidt og forskriftsmæssigt under hensyntagen til konstruktionens karakter, arkitektur, miljø og evt. hærværksmuligheder. Samlinger mellem tilslutningsledninger og installationer kræver særlig omtanke.

6.4 Referenceceller

Kun referenceceller, der er konstrueret til formålet, bør indstøbes i beton.

Principielt placeres referenceceller så tæt på armeringen som muligt og skal monteres efter leverandørens anvisning.

6.5 Strømforsyning

Beskyttelsesstrømmen til et katodisk beskyttelsesanlæg skal leveres af en jævnstrømskilde med plus tilsluttet anoder og minus til armeringen. Spændingskravet vil typisk være 2-5 V. Strømbehovet afhænger af anlæggets krav. Variationen i spændingsniveauet (Ripple) må ikke overstige 5% ved titananoder.

For at undgå skader som følge af over- eller underbeskyttelse, er en sikker og nøjagtig regulering af strømmen nødvendig. Dette krav kan opfyldes med en moderne ensretter med automatisk regulering, der kan fastholde indstillede værdier efter tre forskellige principper:

1) Spændingsstyring.

Den indstillede spænding holdes konstant, mens strømmen varierer efter ændringer i betonens ledningsevne.

2) Strømstyring.

Strømmen holdes konstant på den indstillede værdi, uanset ændringer i ledningsevnen. Spændingen kan variere.

3) Potentialstyring.

Ensretteren indstilles på det ønskede potentiale (i mV). Strøm og spænding reguleres efter behov via en referenceelektrode indstøbt på et repræsentativt sted i betonkonstruktionen, så det indregulerede potentiale altid er til stede.

6.6 Ensretter

Ensretteren skal være let at indstille og aflæse, den skal kunne fastholde indstillede værdier indenfor små tolerancer og gerne have indbygget timer, så anoden kan afbrydes momentant for INSTANT OFF målinger.

Mulighed for let tilslutning af skriver eller datalogger gør det lettere at udføre kontrol og overvågning af anlægget.

Ensretterens spændingsområde fastlægges efter anodetype og spændingsfald over evt. indreguleringsmodstande. Spændingsbehovet er typisk under 12 V.

En multizoneensretter med individuel automatisk regulering af hver zone bør foretrækkes frem for indreguleringsmodstande, selv om prisen er lidt højere.

Maksimal strømafgivelse beregnes ud fra det tilsluttede anlægs samlede strømbehov med et tillæg på 10-20%.

Hvis ensretteren har mere end én reguleringsform, skal det være let at omstille mellem disse. Ligeledes bør ikke anvendte styringsformer automatisk indgå som "sikkerhedsloft" over indkoblet regulering.

6.7 Overvågningsudstyr

For at sikre, at et katodisk beskyttelsesanlæg til stadighed fungerer korrekt, er det nødvendigt at installere en eller anden form for overvågningsudstyr. Omfanget af udstyr afhænger af konstruktionens vigtighed og karakter.

Den mest simple form er lamper eller måleinstrumenter, der viser, om der til stadighed løber en strøm til anoderne.

Indbyggede referenceceller, der rapporterer det aktuelle beskyttelsespotentiale til instrumenter for visuel aflæsning, evt. kombineret med en alarmfunktion, giver en meget større sikkerhed.

Automatisk dataopsamling eller computerovervågning bør overvejes ved store anlæg. Ved disse anlæg kan oplysninger om temperatur, fugtighed, vind m.m. også indgå.

7. Udførelse

7.1 Generelt

Udførelsen af katodisk beskyttelse skal ske efter anvisning af det pågældende systems leverandør. Alternativt kan leverandøren tilknyttes som rådgiver eller entreprisen udføres af specialiserede firmaer.

Udførelsen af katodisk beskyttelse vil normalt - dog afhængigt af anodetypen - bestå af følgende overordnede faser:

- 1) Reparation af betonskader.
- 2) Forberedelse af konstruktion.
- 3) Montering af anodesystem inkl. elektrikerarbejde.
- 4) Omstøbning af anoder.
- 5) Indregulering.
- 6) Kvalitetsstyring.

7.1.1 Reparation af betonskader

Katodisk beskyttelse er afhængig af, at strømmen kan løbe i betonen fra anode til armering. Effektiviteten er afhængig af, hvor god den elektrolytiske forbindelse er gennem betonens porevæske.

Det er derfor vigtigt at sikre sig, at betonen er uden større porøsiteter eller delamineringer. Tidligere reparationer, som er udført med ikke ledende materialer, f.eks. epoxy, udskiftes.

For at få en jævn fordeling af beskyttelsesstrømmen i både gammel og ny beton skal det sikres, at den nye reparationsbeton har en styrke og kvalitet, som svarer til den eksisterende, for at opnå tilsvarende ledningsevne.

I den forbindelse er det vigtigt at gøre vedhæftningen så god som mulig uden brug af materialer, der nedsætter ledningsevnen (f.eks. plastbindere, mikrosilica, epoxy og lignende).

Retablering foretages med almindelig støbning eller sprøjtstøbning, afhængig af konstruktionernes udformning.

7.1.2 Forberedelse af konstruktion

Forberedelse af konstruktionen er afhængig af det valgte system. Der kan f.eks. være tale om behugning af overflade, fræsning af riller eller boring af anodehuller. Det er vigtigt at kontrollere armeringens kontinuitet. Er denne ikke til stede, skal den enten etableres, hvert jern forbindes særskilt eller det må accepteres, at de ikke tilsluttede jern ikke er beskyttet.

7.1.3 Montering af anodesystem

Leverandørens anvisninger bør altid følges. Denne fase inkluderer elektrikerarbejde.

7.1.4 Omstøbning af anoder

Ved omstøbning af anoder skal man sikre sig, at omstøbningsbetonen er af en så god kvalitet, at den elektrolytiske kontakt ikke hæmmes. På den anden side vil en for tæt beton kunne forhindre en god strømfordeling. Endelig skal betonen være holdbar i det miljø, den udsættes for.

Før påføringen af omstøbningsbeton må en effektiv afrensning finde sted. Denne afrensning omfatter som minimum en kraftig sandblæsning, men behugning eller fræsning kan være nødvendig.

Efter afrensning er det vigtigt, at der foretages en effektiv rengøring, som fjerner det støv, som uvægerligt vil forekomme efter behugning, fræsning, sandblæsning og lignende. Denne afrensning foretages bedst med højtryksspuling, men støvsugning kan også anvendes. Derimod bør blæsning med trykluft aldrig foretages, idet luften, med mindre den er effektivt rensset, indeholder olie fra kompressoren, som i givet fald vil lægge sig som en hinde og ødelægge vedhæftningen.

Vedhæftningen afhænger af udstøbningsmetoden og den omhyggelighed, hvormed udstøbning udføres. Udstøbning i form kræver en beton eller mørtel med et passende stort pastaindhold, idet det normalt ikke vil være muligt at foretage svumning.

Sprøjtebeton kan på grund af sin relativt gode vedhæftning være et rimeligt alternativ.

Som for alle andre former for betonreparation har efterbehandlingen stor betydning for reparations svind, kvalitet og levetid. Da det specielt i forbindelse med tilstøbning af anoder i overfladelag handler om relativt små betontykkelser, er det vigtigt at forhindre utilsigtet udtørring af betonen. Som minimum bør betonen påføres en effektiv curing, men hvor det er muligt, bør vådt sækkelærred og tilsluttende plast foretrækkes.

7.1.5 Indregulering

Når anlægget er installeret og eventuel afhærdningstid er forløbet, udføres alle relevante EKP- og modstandsmålinger, før strømmen tilsluttes.

Ønsket driftform samt spænding, strøm og eventuelt potentiale, indstilles på ensretteren.

I zoneopdelte anlæg indreguleres hver enkelt zone til den forudberegnete strøm.

EKP-målinger foretages under indregulering og periodisk herefter, som kontrol af strømspredningen og af, at det indstillede strømniveau svarer til den ønskede potentialeændring.

7.1.6 Kvalitetsstyring

En effektiv kvalitetsstyring af alle faser af arbejdets udførelse er en betingelse for et perfekt virkende anlæg.

Som en væsentlig del af denne kvalitetsstyring skal der ved installation af anoder fokuseres på følgende punkter:

1. Elektrisk sammenhæng i armeringen.
2. Korrekt udført bundbehandling.
3. Sikker elektrisk tilslutning af minusledning til armering.
4. Korrekt placering og indstøbning af eventuelle referenceceller.
5. Korrekt udførte reparationer med mørtel (uden plasttilsætning), så alle jern er dækket.
6. Korrekt montage af anoden efter leverandørens anvisning.
7. Kontrol af ledninger fra armering, anode og referencecelle.
8. Måling under udstøbning af modstand mellem armering og anode, som sikkerhed mod kortslutning.
9. Kontrol, der sikrer korrekt pålægning af evt. dækmateriale.
10. Kontrol af korrekt polaritet på anode (+) og katode (-), f.eks. ved hjælp af makroceller eller referenceelektroder.

8. Drift og vedligehold

Et katodisk beskyttelses anlæg er principielt vedligeholdelsesfrit i den projekterede levetid, dog skal regelmæssige eftersyn godtgøre, at anlægget stadig er i drift efter de fastlagte kriterier.

Eftersynsintervallerne afhænger af konstruktionens vigtighed og det installerede overvågningsudstyr, intervaller på 1/2-1 år anvendes ofte, hvor de ikke kan indgå i andre vedligeholdelsesrutiner.

Et eftersyn bør omfatte følgende:

- Visuel inspektion af betonkonstruktionen, kontrol af el-installation og elektrisk udstyr, især kontrolleres indbyggede referenceceller, der ofte har en kortere levetid end anoderne, evt. kontrolleres ved EKP-målinger med eksterne måleceller.
- Potentialmålinger optaget løbende eller ved eftersynet, danner grundlag for en vurdering af, om beskyttelsesstrømmen har den korrekte værdi. Alle måleresultater og observationer bør indføres i en protokol.

Supplerende litteratur:

Nedenstående liste er et udpluk af det meget store antal publikationer om katodisk beskyttelse.

ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, ACI 222R-85, ACI Journal, Vol. 82, No. 1, January-February 1985, pp. 3-32. Genoptrykt som ACI 222R-89 i ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1990.

Berkeley, K. G. C., og Pathmanaban, S., Cathodic Protection of Reinforcement Steel in Concrete, Butterworths, London, 1990.

Cathodic Protection of steel reinforced concrete, Technical report no. 36, National Association of Corrosion Engineers and The Concrete Society, 1989.

Ashworth, V., Cathodic Protection: Theory and Practice, 1986.

Tutti, K., Corrosion of steel in concrete, CBI Research Fo 4:82, Cement och Betong Institutet, Stockholm, 1982.

Page, C. L., Treadaway, K. W. J., og Bamforth, P. B. (editors), Corrosion of reinforcement in concrete, Society of Chemical Industry, Elsevier, London, 1990.

Rydén, C.-G., og Stoltzner, E., Dansk-Svensk samarbejde, Katodisk beskyttelse, 1. Fase, Vejdirektoratet, København, 1990.

Dansk Ingeniørforenings anvisning for korrosionsbeskyttelse af stålkonstruktioner i marine omgivelser, 1. udgave juni 1988, DS-Rekommeration DS/R 464, Normstyrelsens publikationer, NP-191-R, Teknisk Forlag, København, 1988.

Katodisk beskyttelse af beton - Måleprogram og resultater for forsøgsprojekt i bebyggelsen i Blokland, Byggestyrelsen, København, 1992.

Katodisk beskyttelse af stål i beton - muligheder og erfaringer, Bergsøe Anti Corrosion, Hvidovre, 1988.

NACE Standard Recommended Practice, Cathodic Protection of reinforcing Steel in atmospherically exposed Concrete Structures, T-3K-2, National Association of Corrosion Engineers, Houston, Texas, 1990.

Tilstandsbeskrivelse, Analyse og vurdering af betonkonstruktioners tilstand, 2. udgave, Teknologisk Institut, Byggeteknik, Taastrup, 1988.

Gautefall, O., Katodisk beskyttelse av betongkonstruksjoner, Rapport STF65 A91024, Forskningsinstituttet for Cement og Betong, SINTEF, Trondheim, 1991.