



ONTWERP VAN KB-SYSTEMEN MET GALVANISCHE ANODES

Definitieve versie 2020.9

Aanleiding

In de markt worden verschillende benaderingen gehanteerd bij het toepassen van KB-systemen op basis van galvanische anodes (GCP). In een eerdere publicatie van het KB Kenniscentrum is aangegeven hoe de levensduurverwachting van dit type anodes kan worden benaderd. Hierbij werd telkens uitgegaan van een 'goed ontwerp en een goede uitvoering'.

Het 'goed' ontwerpen met galvanische anodes verdient nadere aandacht, omdat hier geldt dat het gevoel van 'smaak' en 'mening' de ongerustheid bij de eindgebruikers laat toenemen. Een goed onderbouwde benadering voor het ontwerpen met dit type anodes, is daarom gewenst.

In deze Kenniscentrum publicatie van het KB-Kenniscentrum worden aandachtspunten gegeven voor het ontwerpen van KB-systemen op basis van galvanische anodes (GCP).

GOED FUNCTIONEREN GALVANISCHE ANODES

Voor het goed functioneren van galvanische anodes (ook op langere termijn), zijn 4 factoren van belang:

1. De beschikbare zinkcapaciteit
2. De activator gebruikt in het anodesysteem om het zink actief te maken en te houden
3. De spatiëring van de anodes, een belangrijk onderdeel van het "goed ontwerpen"
4. De uitvoering van het KB-systeem, bijvoorbeeld de duurzaamheid van de contacten en het ionisch geleidende contact van de anodes met het omliggende beton ("goede uitvoering")

De eerste factor is beschouwd in een eerdere werkgroep en gepubliceerd in eindverslag (bijgewerkt) "KB kennispublicatie Werkgroep Levensduur Galvanische Anodes" versie 2020.9. Factor 3 wordt in deze Kenniscentrum publicatie nader worden uitgewerkt.

WAT ZIJN DE CRITERIA VOOR GALVANISCHE ANODES VOOR KB VAN WAPENINGSSTAAL IN BETON AFHANKELIJK VAN DE TOEPASSING?

Deze zijn hetzelfde als die welke gebruikt worden voor KB-systemen met opgedrukte stroom, namelijk die welke zijn vermeld in § 8.6 van ISO-EN-NEN12696 (kortweg ISO12696).

Als verbijzondering dient daarbij voor GCP een onderscheid te worden gemaakt naar:

- Kathodische bescherming van wapening die mogelijk zou corroderen zonder KB: volledig bouwdeel, ook wel aangeduid als 'global' KB
- Kathodische preventie ('KPre') en/of 'Corrosion Control': het lokaal aanpakken van corrosiebedreiging in of juist rondom een reparatieplek, ook wel aangeduid als 'patch repair'

Wereldwijd worden galvanische anodes (praktisch gezien altijd *zinkanodes*) dominant (90%) toegepast in het gebied van de plaatselijke reparaties ('patch repairs'). Hierbij wordt op basis van een 'goede' reparatie de galvanische anode in de reparatie aangebracht als een soort KPre. Daarbij voorkomt deze KPre ook gelijk de kathodische werking van de wapening in de reparatieplek in de macrocel die kan ontstaan met de rand (perimeter) van de reparatieplek. Hiermee worden geïnduceerde anodes, ook wel 'ringanodes' genoemd, voorkomen. Aldus wordt het probleem van nieuwe schades op het grensvlak van de reparatieplek met het oude beton voorkomen en heeft buiten de reparatieplek geen versnelling van wapeningscorrosie



plaats die zonder de anodes wel zou plaatsvinden. Wij zullen dit gaan aanduiden met ‘**KP-reparatie**’.

Deze toepassing is min of meer vergelijkbaar met **KPre** (kathodische preventie of ‘corrosion control’, meestal toegepast op een geheel bouwdeel) en heeft een lage stroombehoefte (uitgedrukt in $\text{mA}/\text{m}^2_{\text{staal}}$ in het reparatiegebied). In deze situatie wordt dan een “reparatie⁺⁺” uitgevoerd, een reparatie conform de geldende voorschriften voor goed herstel (van de reparatieplek) met aanvullend één of meerdere anodes voor de verduurzaming van het randgebied van de reparatieplek. Er wordt dan voor de omliggende wapeningsstaven buiten de reparatieplek niet noodzakelijkerwijs voldaan aan ISO12696¹. Bij ‘KP-reparatie’ is GCP soms niet in staat om een volledige afwezigheid van corrosie te bewerken. Bedacht moet worden dat de bescherming op enige afstand van het reparatiegebied stopt. Derhalve zijn de aanvullend aangebrachte anode(s) wel van waarde voor het reparatiegebied maar slechts van beperkt effect op de omliggende betonnen delen (met name die delen op grotere afstand).

In Nederland wordt, mogelijk in afwijking van gebruiken elders in de wereld, veelal gewerkt met discrete (galvanische) anodes in combinatie met oppervlakkige reparaties. Dit komt voort uit het besef dat bij KB de wapening niet conform de CUR-Aanbeveling 118 hoeft te worden gesaneerd en gestraald bij chlorideschades, onder de voorwaarde dat KB wordt toegepast om duurzaamheid te bewerken. De KB ‘dekt’ dan meestal het gehele gebied of het volledige betonnen bouwdeel en dus ‘ook’ de reparatieplek. Deze toepassing kan worden aangeduid als ‘global protection’ waarbij KB voor het hele betonnen bouwdeel wordt ontworpen, kortweg ‘**KB**’.

‘KB’ was het uitgangspunt van de eerste werkgroep (zie eindverslag 2020.9).

OVERWEGINGEN BIJ HET ONTWERP VAN HET KB-SYSTEEM (GCP)

Levensduur is een belangrijk onderdeel van het ontwerp. Naast de aanwezige *zinkcapaciteit* (bij stroomlevering wordt zink opgeofferd en derhalve verbruikt), is de stroomdichtheid een belangrijke factor (zie eindverslag 2017.4). Laatstgenoemde is sterk afhankelijk van de behoefte aan beschermstroom, maar is meestal laag per $\text{m}^2_{\text{anode}}$.

De aanwezige zinkhoeveelheid, in relatie tot de optredende stroomdichtheid, resulteert in een bovengrens voor de totale periode waarin de anode kan functioneren. Voor de *stroomdichtheid* geldt dat deze, afhankelijk van het doel of de toepassing (KPre, KP-reparatie of KB), valt binnen een bereik van navolgende gebruikelijke waarden:

KPre & KP-reparatie	0,2 - 2 $\text{mA}/\text{m}^2_{\text{staal}}$
KB	2 - 20 $\text{mA}/\text{m}^2_{\text{staal}}$

Op basis van de wet van Faraday kan de capaciteit van galvanische (zink)anodes eenvoudig theoretisch worden uitgerekend: het zinkverlies bedraagt theoretisch 10,7 gram / mA / jaar. Daarnaast geldt dat de aanwezige zinkhoeveelheid dient te worden gecorrigeerd voor rendement / efficiency met een factor van 72% (zie eindverslag 2017.4). Het voorgaande kan ook als volgt worden samengevat: per jaar is per mA circa 15 gram zink benodigd. Hieruit kan de benodigde (ontwerp)zinkhoeveelheid eenvoudig worden afgeleid (zie ook eindverslag 2017.4) na opgave van de beoogde levensduur, het vaststellen van het specifieke doel of de toepassing van de te plaatsen anodes (KPre, KP-reparatie of KB), het berekenen van het aanwezige staaloppervlak en het weloverwogen inschatten van (het verloop van) de stroomdichtheid bij genoemde toepassing.

Geometrisch is er vervolgens een aanmerkelijk verschil tussen anodes welke oppervlak

bedekkend zijn en discrete anodes die lokaal worden opgenomen op of in het beton.

Bij *oppervlakte bedekkende anodes* is 100% dekking gebruikelijk (en maximaal haalbaar) en vervolgens is voornoemde levensduurberekening het voornaamste ontwerpcriterium. 'Meer' dekking dan 100% is niet mogelijk en dit geeft, in combinatie met de aan te houden (ontwerp)stroomdichtheid voor de specifieke toepassing (KPre, KP-reparatie of KB), de maximale periode van functioneren van de anode. De enige ontwerpvariabele zou dan nog de dikte of het gewicht van de aan te brengen zinkanode kunnen zijn.

Bij oppervlakte bedekkende anodes kan eventueel wel worden geoptimaliseerd door te kijken naar een lagere dekkingsgraad door spatiëring van de anodesecties, die ieder op zich dan weer 100% dekkend zijn. Uiteraard gaat dit in de eerste plaats ten koste van de maximale periode van functioneren van de anode op basis van de aangebrachte zinkhoeveelheid (i.c. het zinkgewicht). Daarnaast zullen bij een dergelijke optimalisering de randvoorwaarden voor afdoende bescherming resulteren in een maximale spatiëringsafstand (zie hierna). Immers, net als bij discrete anodes dient het wapeningsstaal afdoende tegen corrosie te worden beschermd door middel van het aan te brengen KB-systeem, met bijbehorende spatiëring.

Bij *discrete anodes* is geen sprake van '100% dekking' en dient de spatiëringsafstand (ofwel het raster waarin de anodes aangebracht dienen te worden) te worden bepaald. Dit vormt aldus een belangrijk onderdeel van het ontwerp.

De spatiëringsafstand van zowel oppervlakte bedekkende als discrete anodes zou rekenkundig kunnen worden benaderd op basis van formules voor de spanningsval in anode-kathode-systemen², de vergelijking van Dwight³ en de wet van Ohm. Deze formules houden een aanzienlijke vereenvoudiging in; de resultaten worden daarom niet als voldoende betrouwbaar beschouwd. Ook FEM-modelering zou een optie kunnen zijn, maar het ontbreekt veelal aan gegevens rond de input-variabelen en bovendien zijn de kosten van een dergelijke modelering aanzienlijk in verhouding tot de gebruikelijke omvang van KB-systemen op basis van GCP.

Uit praktische overwegingen is daarom besloten om de grenzen van het ontwerp aan te geven op basis van empirische data, ervaringen, inzicht en kennis, ingebracht door de leden van het KB-Kenniscentrum. Tevens hebben een drietal publicaties bijgedragen aan genoemd inzicht (zie literatuurlijst) en zijn met genoemde formules enkele eenvoudige rekenexercities uitgevoerd met als voornaamste variabele de specifieke weerstand van het beton.

Genoemde grenzen zullen vooralsnog ruim gesteld worden, met daarnaast een aantal punten van aandacht en overweging die meegenomen kunnen worden bij een specifiek ontwerp. Naar verwachting zullen genoemde grenzen in komende versies van deze Kenniscentrum Publicatie verder worden verfijnd en verbijzonderd aan de hand van een aantal proefinstallaties die werden opgestart door leden van het KB-Kenniscentrum.

UITGANGSPUNTEN BIJ HET ONTWERP VAN HET KB-SYSTEEM (GCP)

Uitgangspunt is vooraleerst om te ontwerpen op de worst-case condities. Tevens gelden de volgende overwegingen:

- De potentiaal (ofwel de drijvende kracht) is vastgelegd door het potentiaalverschil tussen staal en zink (typisch 1 V of minder). Helaas is dit verschil kleiner als de wapening harder corrodeert en/of het milieu voor het staal slechter is. De

² Corrosion Handbook H.H. Uhlig, p. 941

³ NACE CP4 Manual, Chapter 4, p. 16

zinkpotentiaal is geen constante in de tijd, maar hangt sterk af van de chemische samenstelling van het milieu (pH, ionen-concentraties, activatoren etc.) en verloopt derhalve. Andere belangrijke invloedsfactoren zijn omgevingsfactoren zoals temperatuur en vocht (vochtbelasting en relatieve vochtigheid).

- De weerstand in het KB-systeem wordt bepaald door een aantal deelfactoren:
 - de polarisatieweerstanden van de staalwapening en de zinkanode en daarmee dus ook de betrokken (buiten)oppervlakken van de wapening en de anode
 - de geometrie van de anodes, het aantal geplaatste anodes, de ruimtelijke wapeningsconfiguratie, en de plaatsing van de anodes ten opzichte van de wapening (in de driedimensionale ruimte)
 - de weerstand van het tussenliggende beton, dat wil zeggen de specifieke weerstand van het beton (in combinatie met het vochtgehalte en/of de aanwezigheid van bijvoorbeeld chloriden), maar ook ten gevolge van de geometrie (waarmee de weerstand ook afhankelijk is van de plaatsing / spatiëring van de anodes)
 - de aanwezigheid van weerstandsverhogende reactieproducten in de matrix of op het anodeoppervlak (bij passivering van het staal blijft GCP functioneren, bij passivering van het zink stopt de beschermstroom nagenoeg volledig)

RICHTLIJN (RECOMMENDED PRACTICE) VOOR HET ONTWERP VAN HET KB-SYSTEEM (GCP)

Het voorgaande resulteert in de volgende 3-stappen-benadering van het ontwerp van een KB-systeem op basis van GCP:

1. De benodigde zinkhoeveelheid wordt, op basis van een verbruik van 15 gram zink per jaar per mA, bepaald in relatie tot:
 - de beoogde levensduur
 - het aanwezige staaloppervlak
 - het specifieke doel of toepassing van de te plaatsen anodes (KPre, KP-reparatie of KB)
 - het verwachte verloop van de stroomdichtheid bij deze toepassing (NB de beschermstroom hoeft in de tijd niet constant te zijn en mag afnemen in de tijd (zoals in de praktijk ook wordt waargenomen bij KB-systemen; zie 2017.4))

Dit resulteert in een **ondergrens** met betrekking tot de hoeveelheid aan te brengen zink per maateenheid.

2. A. *Voor 100% oppervlakte bedekkende anodes*: geen aanvullende eis (de ondergrens is tevens de **bovengrens**)
- B. *Voor oppervlakte bedekkende anodes met een lagere dekkingsgraad (door spatiëring van de anodesecties)*: hiervoor gelden als aanvullende eisen (**bovengrens**):
 - Minimaal 50% dekking
 - Maximale afstand tussen stroken oppervlaktebedekkend anodemateriaal van 250 mm
- C. *Voor discrete anodes*: hiervoor geldt dat de **bovengrens** voor de maximaal toe te passen anode-spatiëring (hart-op-hart afstand) wordt bepaald op basis van de huidige ervaring en de stand van kennis. Vooralsnog geldt voor een betonconstructie met een 'normale' (of gemiddelde) samenstelling, vochtbelasting, expositie, wapeningsgeometrie, betondekking en

chloridevervuiling dat de maximale anode-spatiering dient te liggen tussen 250 mm en 500 mm.

De maximale spatiering zal naar verwachting afhangen van een aantal factoren, waaronder:

- de specifieke weerstand van het beton (in afhankelijkheid van cementsoort, vochtgehalte en expositie-omstandigheden)
- de staalgeometrie en – dichtheid
- de afmetingen van de anode
- de anodepotentiaal en –polarisatie
- de corrosie-activiteit van het staal
- de aanwezigheid van chloride-ionen en carbonatatie.

Op dit moment is het niet mogelijk deze factoren met voldoende betrouwbaarheid te verdisconteren in een bovengrens voor de anodespatiering.

Naar verwachting zal genoemde bovengrens in komende versies van deze Kenniscentrum Publicatie verder worden verfijnd en verbijzonderd aan de hand van onderzoek, bijvoorbeeld aan een aantal proefinstallaties, waarbij het uiteindelijke doel is om de condities waarin het beton en de wapening zich bevinden mee te nemen bij de bepaling van deze bovengrens.

3. Op basis van de aanwezige wapeningsgeometrie wordt tot slot gezocht naar een passende spatiering, resulterend in een geometrische verdeling met zo min mogelijk anodes die aan beide grenzen (onder- en bovengrens) voldoet.

Met als **aanvullende eisen**:

- De anode-spatiering ten gevolge van de aanwezige wapeningsgeometrie bedraagt maximaal 3 keer de maaswijdte van het wapeningsnet
- De maximale afstand van (ieder stukje van) de wapening tot aan een anode zal ten gevolge van de gekozen anode-spatiering nooit meer bedragen dan 500 mm (diagonaal gemeten)
- De eerste en de laatste anode in een rij of een vlak (de zogenaamde rand-anodes) zijn nooit verder dan 250 mm verwijderd van de rand van het te beschermen onderdeel.

OPMERKINGEN

Bijkomend wordt opgemerkt dat het aanbrengen van monitoringsvoorzieningen veelal bij GCP wordt nagelaten. Dit is jammer, omdat juist de monitoring van praktijkinstallaties nodig is voor het verkrijgen van inzicht in het functioneren van dergelijke KB-systemen in de tijd. Bovendien wordt er in ISO12696 geen onderscheid gemaakt tussen ICCP- en GCP-systemen en dient elk KB-systeem dus te worden gemonitord.

Het is derhalve wenselijk (feitelijk ook vereist) om projecten met meetvoorzieningen toegankelijk te maken zodat ook het punt van maximale anode-spatiering verder onderbouwd kan worden. De landelijke KB-database zou gevuld moeten worden met informatie verkregen uit bestaande galvanische KB-projecten

Bij het bovenstaande moet worden bedacht dat expositie, temperatuur en RV zijn als gebruikelijk in Nederland en België. Dit is een belangrijk uitgangspunt. Bovenstaande opmerkingen en aanbevelingen zijn derhalve niet zondermeer vertaalbaar naar andere situaties, landen en klimaatzones.



Zoals duidelijk mag zijn is een “goed ontwerp” niet hetzelfde als levensduur. Een goed ontwerp van een KB-systeem is noodzakelijk om tot een goed functionerend KB-systeem te komen. Maar de daadwerkelijk te behalen levensduur van een KB-systeem zal afhankelijk zijn van veel praktische factoren die niet allemaal bekend of nauwkeurig vooraf in te schatten zijn. In de ontwerpfase wordt aandacht geschonken aan het begrip ‘levensduur’, maar hierbij wordt vooral en voornamelijk gekeken naar de beschikbare zinkvoorraad als anodecapaciteit (zie ook het bijgewerkte eindverslag “KB kennispublicatie Werkgroep Levensduur Galvanische Anodes” versie 2020.9). Hoewel belangrijk, is dit niet hetzelfde als de daadwerkelijke behaalde ‘levensduur’ zoals die op termijn wordt gerealiseerd.

Literatuur

- TNO onderzoek 2001 – Paper 15^e International Corrosion Congress 2002
- Bertolini 2009 – Corrosion Science
- Papers Concrete Solutions 2016 en ICCRRR 2018

Conclusies

Deze Kenniscentrum Publicatie geeft een 3-stappen-benadering van het ontwerp van een KB-systeem op basis van GCP:

1. Het bepalen van de benodigde zinkhoeveelheid op basis van een verbruik van 15 gram zink per jaar per mA, onder in acht name van de beoogde levensduur, het aanwezige staaloppervlak, het specifieke doel of toepassing van de te plaatsen anodes en het verwachte verloop van de stroomdichtheid bij deze toepassing. Dit resulteert in een **ondergrens** met betrekking tot de hoeveelheid zink per maateenheid.
2. Een maximale spatiëringsafstand (**bovengrens**) van 250 mm bij oppervlakte bedekkende anodes (en een minimale dekkingsgraad van 50%) en een maximale spatiëringsafstand van (vooralsnog) 250 mm tot 500 mm bij discrete anodes (diagonaal gemeten).
3. Het opstellen van een ontwerp met een passende spatiëring op basis van de aanwezige wapeningsgeometrie, resulterend in een geometrische verdeling die aan beide grenzen (onder- en bovengrens) voldoet, met als aanvullende eisen:
 - a. De anode-spatiëring ten gevolge van de aanwezige wapeningsgeometrie bedraagt maximaal 3 keer de maaswijdte van het wapeningsnet
 - b. De maximale afstand van de wapening tot aan een anode ten gevolge van de gekozen anode-spatiëring bedraagt nooit meer bedragen dan 500 mm (diagonaal gemeten)
 - c. De eerste en de laatste anode in een rij of een vlak (de rand-anodes) zijn nooit verder verwijderd dan 250 mm van de rand van het te beschermen onderdeel.

Aanbevelingen

De aangegeven bovengrenzen zijn vooralsnog ruim gesteld, met daarnaast een aantal punten van aandacht en overweging die meegenomen kunnen worden bij een specifiek ontwerp. Middels een aantal proefinstallaties die worden opgestart door leden van het KB Kenniscentrum, zullen genoemde grenzen in komende versies van deze Kenniscentrum Publicatie verder worden verfijnd en verbijzonderd.

Disclaimer : De Kennispublicatie van het KB-Kenniscentrum is een weergave van de algemeen besproken punten en inzichten van de werkgroep. De doelstelling hiervan is informatievoorziening van partijen betrokken bij het KB-Kenniscentrum. Als zodanig dient informatie uit deze publicatie met inzicht en voorbehoud te worden gebruikt. Aan deze tekst kunnen geen rechten worden ontleend en het KB-Kenniscentrum zal nimmer aansprakelijk zijn voor enigerlei schade die is ontstaan door het gebruiken van deze tekst en de weergegeven inzichten. Dit betreft een momentopname van de kennis en techniek, zoals die door de werkgroep op het moment van verschijnen begrepen werd.