

VGB/BAW-Standard
Korrosionsschutz von
Offshore-Bauwerken zur
Nutzung der Windenergie
Teil 4: Kathodischer
Korrosionsschutz (KKS)

VGB-S-021-04-2018-07-DE

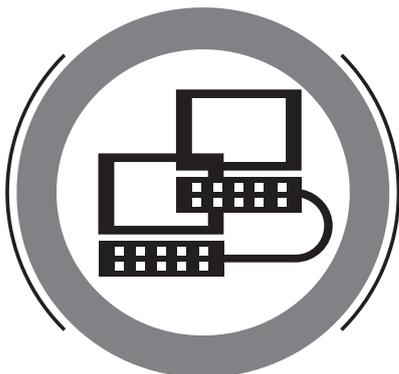


Public License Document

Public License Document
Freie Lizenz



Network access allowed
Einstellen in Netzwerke erlaubt



Copying and distribution allowed
Kopie und Weitergabe erlaubt



All other rights reserved.
Alle weiteren Rechte vorbehalten.

VGB/BAW-Standard

Korrosionsschutz von Offshore-Bauwerken zur Nutzung der Windenergie

Teil 4: Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)

VGB-S-021-04-2018-07-DE

Herausgeber:

VGB PowerTech e.V.

Verlag:

VGB PowerTech Service GmbH

Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften

Deilbachtal 173, 45257 Essen

Tel.: +49 201 8128-200

Fax: +49 201 8128-302

E-Mail: mark@vgb.org

ISBN 978-3-86875-067-9 (eBook)



Jegliche Wiedergabe ist nur mit vorheriger Genehmigung
des VGB PowerTech gestattet.

www.vgb.org

Vorwort

Die europa- und weltweit wachsende Anzahl von Windenergieanlagen stellt die Betreiber vor neue Herausforderungen. Um die Installations- und Betriebskosten senken und die Betriebssicherheit erhöhen zu können, ist eine koordinierte und gemeinsame Analyse der betrieblichen Erfahrungen zwingend erforderlich. Neben dem Informations- und Erfahrungsaustausch ist es das wesentliche Ziel der beteiligten Unternehmen, die Standardisierung (Best Practice) voranzutreiben. Zu diesem Zweck haben VGB PowerTech e.V. und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) entschieden, gemeinsam einen VGB/BAW-Standard zum Korrosionsschutz von Offshore-Bauwerken (z. B. Offshore-Stationen) zu erstellen.

Ziel ist es, aufgrund von hohen Investitionskosten in Offshore-Bauwerke, durch entsprechende Korrosionsschutzsysteme Rechnung zu tragen. Dabei sollen z. B. Beschichtungssysteme die Stahlkonstruktionen der Offshore-Anlagen während ihrer Nutzungsdauer, üblicherweise mindestens 25 Jahre, ohne aufwändige Reparaturmaßnahmen vor Korrosionsschäden schützen. Deshalb werden robuste Systeme verlangt, welche bei berechenbaren Herstellungskosten (CAPEX) die Betriebskosten (OPEX) langfristig auf einem planbaren und niedrigen Niveau halten. Reparaturen auf See sind zu vermeiden, da der Kostenfaktor gegenüber einer Onshore-Reparatur hierfür üblicherweise ca. 100 beträgt.

Im vorliegenden Teil 4 „Kathodischer Korrosionsschutz“, werden Planung, Auslegung, Betrieb und Überwachung von Galvanischen Schutz- und Fremdstromanlagen beschrieben. In den bereits veröffentlichten Teilen 1 bis 3 wird im Teil 1 das Korrosionsschutzthema im Allgemeinen inklusive einer Festlegung der Korrosionszonen behandelt. Im Teil 2 liegt der Fokus auf den Anforderungen von Korrosionsschutzsystemen und im Teil 3 auf der sicheren Applikation einer Erstbeschichtung. Die Teile 5 bis 6 sind zurzeit in Vorbereitung und werden sich mit den Themen Reparatur von Beschichtungssystemen und wiederkehrende Prüfungen und Monitoring beschäftigen.

Dieser VGB/BAW-Standard wird unentgeltlich zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Er wurde nach bestem Wissen erstellt, kann aber nicht in jedem denkbaren Fall den Stand der Technik vollständig wiedergeben. Eine Haftung, auch für die sachliche Richtigkeit der Darstellung, wird nicht übernommen. Ebenso sind Patente und andere Schutzrechte vom Anwender eigenverantwortlich zu klären. Der VGB/BAW-Standard ist nicht für sich allein verbindlich, sondern seine Anwendung muss zwischen den Vertragspartnern ausdrücklich vereinbart werden.

Änderungsvorschläge können an die E-Mail-Adresse vgb.standard@vgb.org und info@baw.de gesendet werden. Zur eindeutigen Zuordnung des Inhalts sollte die Betreffzeile die Kurzbezeichnung des betreffenden Dokuments enthalten.

Es wurden Kommentierungen im Rahmen der Erstellung dieses Standards von folgenden Institutionen und Verbänden eingereicht und übernommen:

- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), zuständige Genehmigungsbehörde für Offshore-Bauwerke in Deutschland innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone
- TenneT TSO GmbH
- 50Hertz Transmission GmbH
- Arbeitsgemeinschaft Offshore-Wind e.V. (AGOW)
- Fachausschuss für Korrosionsfragen der Hafentechnischen Gesellschaft (HTG-FAKOR)
- Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V. (fkks)
- DNV GL SE
- Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.(GfKORR)

und von weiteren interessierten Kreisen.

Essen, im Juli 2018

Karlsruhe, im Juli 2018

VGB PowerTech e.V.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Deilbachtal 173

Kußmaulstraße 17

45257 Essen

76187 Karlsruhe

Teil 4 – Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)

Inhalt

1	Allgemeines	5
2	Geltungsbereich	6
3	Kathodischer Korrosionsschutz	7
3.1	Planungshinweise	7
3.2	Planung und Schutzstromberechnung	9
3.3	Überpotentiale bei Beschichtungen	11
4	Galvanische Schutzanlagen	12
4.1	Anoden	12
4.2	Messung des Schutzpotenzials bei galvanischen Anoden	12
5	Fremdstromanlagen	13
5.1	Temporärer Schutz	13
5.2	Fremdstromanoden	14
5.3	Schutzstromgerät	15
5.4	Bezugselektroden	15
5.5	Ausrüstungsteile – Zubehör	16
5.5.1	Kabel und Leitungen	16
5.5.2	Anoden- und Elektrodenhalterungen, Schutzrohre	17
6	Betrieb und Überwachung	18
6.1	Messung des Schutzpotentials	18
6.2	Beurteilung des Schutzpotentials	19
6.3	Anforderungen an das Personal für den Betrieb einer KKS-Anlage	20
7	Regelwerke	21
8	Literatur	24
9	Anlagen	25

1 Allgemeines

Ungeschützter Stahl korrodiert in der Atmosphäre, in Wasser und im feuchten Erdreich, was zu Schäden führen kann. Um solche Korrosionsschäden zu vermeiden, werden Stahlbauten geschützt, damit sie den Korrosionsbelastungen während der geforderten Nutzungsdauer von üblicherweise mindestens 25 Jahren standhalten.

Die Offshore-Bauwerke sind über einen langen Zeitraum starken korrosiven Einflüssen ausgesetzt bei gleichzeitig schlechten Bedingungen für die Ausbesserung und Instandsetzung. Neben Korrosionsschutzsystemen die höchsten Anforderungen entsprechen müssen, ist daher auch der Gedanke der Korrosionsschutzstrategie einzu beziehen. Dies heißt u. a., dass die spezifischen Belastungen verschiedener Bereiche von Offshore-Bauwerken, aber auch das Zusammenspiel mehrerer Schutzmethoden wie z. B. Beschichtungen, Duplexsysteme (passiver Korrosionsschutz), Kathodischer Korrosionsschutz (aktiver Korrosionsschutz) und Korrosionszuschlag (siehe DIN 50929-3 Beiblatt 1) im wasserbelasteten Bereich in Erwägung zu ziehen sind.

Dieser Standard befasst sich mit Offshore-Bauwerken. Dabei werden in den verschiedenen Teilen alle wesentlichen Gesichtspunkte berücksichtigt, die für einen angemessenen Korrosionsschutz von Bedeutung sind.

Um Stahlbauten wirksam vor Korrosion zu schützen, ist es notwendig, dass Auftraggeber (AG), Planer, Berater, den Korrosionsschutz ausführende Firmen, Aufsichtspersonal für Korrosionsschutzarbeiten und Hersteller von Beschichtungsstoffen dem Stand der Technik entsprechende Angaben über den Korrosionsschutz durch Korrosionsschutzsysteme in zusammengefasster Form erhalten. Solche Angaben müssen möglichst vollständig, außerdem eindeutig und leicht zu verstehen sein, damit Schwierigkeiten und Missverständnisse zwischen den Vertragspartnern, die mit der Ausführung der Schutzmaßnahmen befasst sind, vermieden werden.

In Bezug auf Mindestanforderungen an die Korrosionsschutzkonzepte wird auf den jeweils aktuellen Stand des BSH Standards Konstruktion „Mindestanforderungen an die konstruktive Ausführung von Offshore-Bauwerken in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ)“ der Genehmigungsbehörde verwiesen.

Dieser Standard definiert ergänzende Anforderungen zu den unter Kapitel 7 genannten Regelwerken.

Über diesen Standard hinaus sind für die Auslegung des Korrosionsschutzes die länderspezifischen Mindestanforderungen und Regelungen u. ä. der entsprechenden Behörden für die Standorte der Windenergieanlagen und Windparkkomponenten sowie anderer Offshore-Bauwerke zur Nutzung der Windenergie zu berücksichtigen. Für den Bereich der deutschen AWZ gelten die Mindestanforderungen und Regelungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).

2 Geltungsbereich

Der vorliegende Standard „Korrosionsschutz von Offshore-Bauwerken zur Nutzung der Windenergie – Teil 4: Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)“ regelt die Anforderungen an den Kathodischen Korrosionsschutz durch galvanische Schutzanlagen und Fremdstromanlagen für wasser- und schlammbelastete Offshore-Bauwerke, wie in Teil 1 „Allgemeines“, Kapitel 2 Geltungsbereich definiert.

3 Kathodischer Korrosionsschutz

Im wasserberührten Bereich der Offshore-Bauwerke ist der Kathodische Korrosionsschutz (KKS) ein wesentlicher Faktor für die Standsicherheit.

Grundsätzlich muss für einen wirksamen KKS die gesamte zu schützende Stahlkonstruktion dauerhaft untereinander elektrisch leitend verbunden sein. Hierzu müssen alle Konstruktionsteile über ausreichend dimensionierte Schweißnähte verbunden werden. Der KKS kann in diesem Bereich alleine oder in Kombination mit einer geeigneten Beschichtung angewendet werden. Der für einen kathodischen Schutz notwendige Schutzstrom richtet sich nach

- der Art des umgebenden Mediums,
- des Schutzobjektes und
- der Oberfläche.

Durch Stromzufuhr wird eine dauerhafte Potenzialabsenkung zum Schutz der Anlage erzielt. Zur Erzeugung des Schutzstroms gibt es mehrere Möglichkeiten:

- mittels Fremdstrom,
- durch galvanische Anoden (Opferanoden) oder
- eine Kombination (Hybridsystem) von diesen.

Bei metallisch leitenden miteinander verbunden Anlagenteilen ist eine gegenseitige Beeinflussung von galvanischen Schutzanlagen mit Fremdstromanlagen zu vermeiden.

Die für den Kathodischen Korrosionsschutz erforderlichen Grundlagen der Funktions- und Messtechnik, sowie deren praktische Anwendungen sind in Kapitel 7 enthalten.

3.1 Planungshinweise

Bereits während der ersten Planungsphase eines Offshore-Bauwerks sind Festlegungen über Notwendigkeit und Art eines Korrosionsschutzes zu treffen, da diese nicht nur die bauliche Gestaltung, sondern auch die Nutzungsdauer entscheidend beeinflussen. Wegen der grundlegenden Bedeutung des Korrosionsschutzes für die Ausbildung und Gestaltung der Offshore-Bauwerke, sowie für deren Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit müssen alle Grundsatzuntersuchungen und Feldmessungen frühzeitig, spätestens aber bei Beginn der detaillierten Entwurfsbearbeitung abgeschlossen sein, siehe BSH Standard

„Mindestanforderungen an die konstruktive Ausführung von Offshore-Bauwerken in der ausschließlichen Wirtschaftszone“

In Meeresbodennähe besteht bei Offshore-Bauwerken auf der Innen- und auch auf der Außenseite immer die Gefahr einer mikrobiell induzierten Korrosion (MIC). Dieser

Korrosion kann wirksam durch ein KKS-System entgegen gewirkt werden, soweit ein negativeres Potenzial als -900 mV gegen Ag/AgCl-Elektrode vorliegt.

Es muss aber immer berücksichtigt werden, dass es im Inneren der Gründungselemente durch das KKS-System zur Bildung und Ansammlung von Wasserstoff und Chlorgas kommen kann. Hinsichtlich der Gefährdung von Personal und Offshore-Bauwerk ist zu beachten, dass in geschlossenen Räumen (z. B. Monopile), unter anderem auch aus Explosionsschutzgründen, geeignete Überwachungsmaßnahmen und gegebenenfalls notwendige Be- und Entlüftungseinrichtungen vorzusehen sind. Diese sind auf die besonderen Bedingungen (säure-, salzhaltige und feuchte Luft sowie Wasserstoff und Chlorgas) abzustimmen.

Um im Inneren von Gründungselementen vollständig auf einen Korrosionsschutz verzichten zu können, müsste der Zutritt von Sauerstoff vollständig unterbunden werden. Diese Voraussetzung kann konstruktiv kaum erreicht werden. Bei Begehungen unterhalb des Airtight-Decks besteht die Möglichkeit des Sauerstoffzutritts in den abgeschlossenen Raum. Auch bei Kabeldurchführungen in ein Gründungselement (z. B. Monopile) ist zu beachten, dass diese keine dauerhaft sichere Abdichtung besitzen. Des Weiteren ist auch in einer sauerstofffreien Umgebung das Auftreten von MIC nicht auszuschließen.

Für den Außen- und Innenbereich von Monopiles können KKS-Anlagen auch in Kombination mit einer Beschichtung angewendet werden.

Der Einsatz von Aluminiumanoden im Innenbereich ist aufgrund möglicher Milieuänderungen (u. a. pH-Wert-Absenkung) grundsätzlich als kritisch anzusehen. Alternativ kann ein Fremdstromsystem eingesetzt werden. .

Zur Orientierung der Anwendbarkeit der beiden KKS-Systeme (galvanische Anoden, Fremdstrom), siehe Anlage 1.

3.2 Planung und Schutzstromberechnung

Die Auslegung und Berechnung des KKS-Systems von Offshore-Bauwerken erfolgt für gewöhnlich in einem iterativen Verfahren. Eine Liste der mindestens benötigten Daten zur Auslegung einer kathodischen Schutzanlage ist in Anlage 2 enthalten.

Die Auslegung und Berechnung ist von einem zertifizierten Fachunternehmen nach den textgleichen Regelwerken DVGW GW 11 bzw. fkks-Richtlinie Güteüberwachung oder einem vergleichbaren Regelwerk durchzuführen.

Das allgemein anerkannte Kriterium für einen ausreichenden Korrosionsschutz ist ein Potenzialbereich von -800 mV bis -1.100 mV gegen Ag/AgCl-Elektrode. Um eine kathodische Blasenbildung oder Unterwanderung der Beschichtung zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass eine kathodische Korrosionsschutzanlage auf ein Potenzial von -1.100 mV gegen Ag/AgCl-Elektrode begrenzt wird. Zudem wird dadurch sichergestellt, dass keine schädliche Wasserstoffbildung an der Stahloberfläche (Wasserstoffversprödung) stattfindet. Bei Vorhandensein von mikrobiell induzierter Korrosion (MIC) ist das Potenzial auf mindestens -900 mV gegen Ag/AgCl-Elektrode abzusenken.

In Abhängigkeit von Ort und Umwelteinflüssen ergeben sich für Offshore-Bauwerke drei kathodisch zu schützende Korrosionszonen (A-C). Diese sind am Beispiel eines Monopiles dargestellt; siehe Tabelle 1 und Abbildung 1.

Tabelle 1: Kathodische Korrosionsschutzzonen mit möglichen Fehlstellen

Zone	Bereich	Fehlstellen der Beschichtung/Reparatur/KKS
A	WWZ, NWZ und UWZ	Fehlstellen durch mechanische Einflüsse; Reparatur der Beschichtung nur in der WWZ möglich spezifischer Schutzstrombedarf des KKS hoch
B	locker gelagerter Meeresboden/Schlick	Fehlstellen nach Installation der Offshore-Bauwerke; Reparatur der Beschichtung unrealistisch spezifischer Schutzstrombedarf des KKS sehr hoch
C	dicht gelagerter Meeresboden	Fehlstellen nach Installation der Offshore-Bauwerke; Reparatur der Beschichtung nicht umsetzbar spezifischer Schutzstrombedarf des KKS mäßig

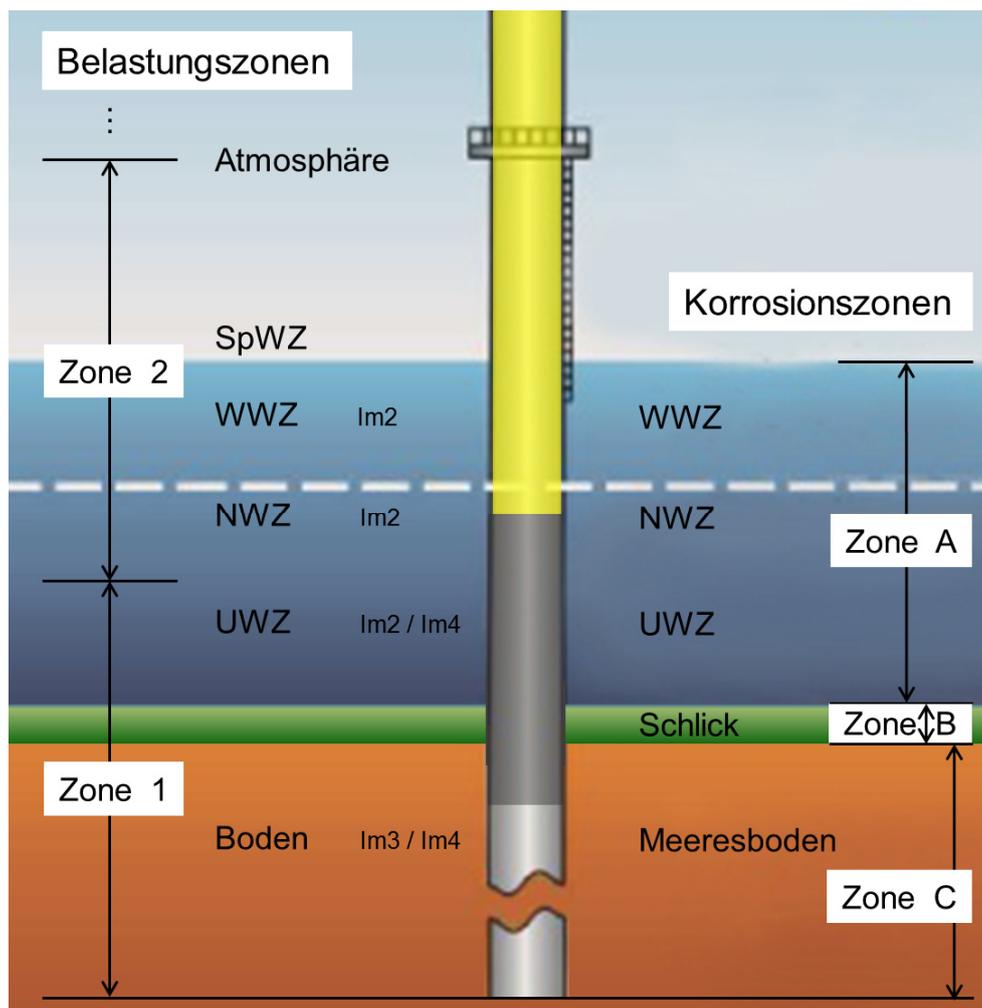


Abbildung. 1: Kathodisch zu schützende Korrosionszonen an einem Offshore-Bauwerke (z. B. Monopile)

Orientierungswerte für die elektrische Leitfähigkeit von Gewässern in Deutschland sind in der Tabelle 2 dargestellt. Die Werte sind für genaue Berechnungen durch den Bauherrn zu verifizieren (z. B. durch eigene Messungen).

Tabelle 2: Orientierungswerte für spezifische elektrische Leitfähigkeit und elektrischen Widerstand folgender Gewässer

Gewässer	κ [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	ρ [$\Omega \cdot \text{c m}$]
Nordsee	ca. 33.333	ca. 30
Ostsee	ca. 9.100	ca. 110

Die Werte des erforderlichen Schutzstroms ergeben sich unter anderem aus der Fehlstellenrate in der Beschichtung und der benötigten Stromdichte vor Ort. Hierbei hat die Fehlstellenrate einen entscheidenden Einfluss auf die Auslegung des KKS-Systems.

Eine KKS-Modellberechnung für den Außenschutz eines beschichteten Monopiles ist in Anlage 3 enthalten. Insbesondere unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Beschichtungen gemäß VGB/BAW-Standard VGB-S-021, Teile 1 bis 3 ist eine anfängliche, mittlere und finale Fehlstellenrate zwischen AN und AG festzulegen. Indikationen für Fehlstellenraten sind zu finden in der Anlage 3, den einschlägigen Regelwerken oder Erfahrungen aus benachbarten Offshore-Bauwerken.

Für die Planung eines aktiven Korrosionsschutzes mittels einer KKS-Anlage ist folgende Vorgehensweise notwendig:

- Zusammenstellung erforderlicher Daten für die Planung (siehe Anlage 2)
- KKS angepasste Gestaltung der Stahlbauteile
- Minimierung von galvanischen Elementen (z. B. Vermeidung von CrNi-Stahl)
- KKS-verträgliche Beschichtung
- Einbeziehung des Sekundärstahlbaus
- Beachtung von anodischen Spannungstrichtern
- Anordnung von Anodenbefestigungspunkten und Verbindungselementen

Geschweißte Verbindungsstellen sind geschraubten vorzuziehen und sind im Rahmen der schweißtechnischen Verarbeitung bei der Herstellung der Konstruktion anzubringen. Nach Möglichkeit sind Verbindungsstellen des KKS-Systems (z. B. Anoden, Elektroden, Halterungen, Kabelführungen) vorzugsweise vor der Applikation der Beschichtung zu installieren.

Im Rahmen der Planung ist ein Bauprüffolgeplan (Inspektions- und Testplan, ITP) vom Auftragnehmer zu erstellen und vom Auftraggeber freizugeben.

3.3 Überpotenziale bei Beschichtungen

Schäden an KKS-geeigneten Beschichtungen durch Überpotenziale (zu weit abgesenktes Schutzpotenzial) sind bei galvanischen Anoden in der Regel nicht möglich, mit Ausnahme von Magnesiumanoden.

In Anodennähe ist das Potenzial deutlich negativer als das allgemeine Schutzpotenzial. Deshalb ist in unmittelbarer Nähe ein Isolierschild aus Kunststoff oder auch eine höhere Schichtdicke der Beschichtung vorzusehen. Am Rand dieses sogenannten Schutzschildes sollte das beabsichtigte Schutzpotenzial eingehalten werden. Überpotenziale sind zu vermeiden, da sie grundsätzlich durch Hydroxylybildung organische Beschichtungen schädigen können. Bei ausreichend dimensioniertem Abstand der Anoden vom Schutzobjekt kann auf ein Isolierschild oder höhere Schichtdicke verzichtet werden. Ein möglichst großer Abstand der Anoden vom Schutzobjekt ist dabei unter Beachtung der mechanischen Beanspruchung anzustreben. Indikationen sind in der DNV-RP-B401 zu finden.

4 Galvanische Schutzanlagen

4.1 Anoden

An Offshore-Bauwerken können galvanische Anoden in der Regel aus Aluminium zum Einsatz kommen, deren Materialeigenschaften in DIN EN 12496 zu entnehmen sind.

Für eine gute Anodenstromabgabe sollte der Abstand zwischen Anode und Oberfläche 0,3 m nicht unterschreiten. Bei einem geringeren Abstand sind der Anodenausbreitungswiderstand und die damit reduzierte Stromabgabe entsprechend zu berücksichtigen.

Ein widerstandsarmer Stromübergang wird insbesondere durch Aufschweißen der eingegossenen Halterungen auf eine am Objekt aufgeschweißte Stahlplatte erreicht. Dies macht späteres erneutes Aufschweißen ohne Bauwerksschäden möglich. Grundsätzlich sind an dieser Stelle Schweißverbindungen gegenüber Schraubverbindungen vorzuziehen. Sofern Schraubverbindungen dennoch eingesetzt werden sollen, sind diese gegen Lösen zu sichern, z. B. durch einen Schweißpunkt (Schraubensicherung).

Der Einsatz von galvanischen Anodenketten ist nicht erlaubt, da es an der Anodenkette durch den nach unten zunehmendem Spannungsabfall zu einer deutlichen Verringerung der Anodenstromabgabe führt.

In abgeschlossenen bzw. nur bedingt durchströmten Innenbereichen führen galvanische Anoden aus Aluminium zu einer starken Milieuänderung und pH-Wert Absenkung des eingeschlossenen Meerwassers. Dies führt zu einem vorzeitigen Versagen des Schutzes und kann zu Korrosionsschäden führen. Galvanische Anoden aus Aluminium sind in diesen Bereichen nicht einzusetzen.

4.2 Messung des Schutzpotenzials bei galvanischen Anoden

Wenn nicht anders vorgegeben, sind beim Außenschutz mit galvanischen Anoden als Empfehlung mindestens 10 % der Bauwerke in einem Offshore-Windpark mit einem Fernüberwachungssystem auszustatten. Das KKS-Fernüberwachungssystem soll Messwerte der Schutzpotenziale im Außenbereich ermitteln und übertragen, siehe 5.4).

Dabei müssen die Werte nach vom AG vorgegebenen Zeitzyklen (z. B. 12 h) gemessen, aufgezeichnet und übertragen werden.

5 Fremdstromanlagen

Bestandteile einer KKS-Anlage sind:

- Fremdstromanoden
- Schutzstromgerät mit Stromquelle
- Bezugselektroden
- Schutzrohre, Halterungen
- Kabelübergangskästen
- Verbindungskabel

Ausführliche Angaben zu den einzelnen Bauteilen werden im HTG-Handbuch Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau (2009) und dem Handbuch des Kathodischen Korrosionsschutzes (1996), sowie Normen und Regelwerke gemacht.

5.1 Temporärer Schutz

Solange kein Fremdstrom vorhanden ist (z. B. Montagezeit) werden temporäre Schutzsysteme gemäß Tabelle 3 empfohlen. Maßgeblich für die Wahl eines temporären Schutzsystems sind mögliche Korrosionsgefährdungen wie z. B. Fehlstellen und MIC.

Tabelle 3: Temporäre Schutzsysteme

Primäres Schutzsystem	Temporäres Schutzsystem	
	Außen	Innen
Vollständig beschichtet und Fremdstromanlage	Abrostungszuschlag und/oder Galvanische Anoden aus Aluminium (rückbaubar oder als Hybridsystem ¹)	kein temporärer Schutz nötig
Teilbeschichtet und Fremdstromanlage		Abrostungszuschlag und/oder
Unbeschichtet und Fremdstromanlage		Galvanische Anoden aus Zink ²

1 Bei Hybridsystem ist eine Wechselwirkung zwischen galvanischen Anoden für den Schutz im Zeitraum der Montage und der Fremdstromanlage für den späteren Schutz zu berücksichtigen.

2 Zn-Anoden zur Vermeidung einer negativen pH-Wert Absenkung gegenüber Al-Anoden.

Der temporäre Schutz inkl. der Wechselwirkung der einzelnen Schutzsysteme, ist durch einen Fachplaner in Zusammenarbeit mit dem Statiker (Ermüdungsnachweis) auszulegen.

Eine standortbezogene Individualplanung ist unumgänglich und Bestandteil des Korrosionsschutzkonzeptes (siehe VGB/BAW-Standard VGB-S-021-01, Teil 1, Kapitel 4).

Für Planung, Ausschreibung und Bau von kathodischen Korrosionsschutzanlagen sind geeignete Unterlagen in der Literatur- und Regelwerksliste erfasst.

5.2 Fremdstromanoden

Fremdstromanoden müssen gegen Meerwasser beständig sein. Folgende Fremdstromanoden haben sich im Meerwasser bewährt:

- Metalloxid beschichtetes Titan (MOX), hohe spezifische Stromdichte.
- Magnetitanoden, bei hohen Treibspannungen einsetzbar, Säure- und Chlorgasbeständig
- Platin beschichtetes Titan/Niob/Tantal, hohe spezifische Stromdichte.

Überspannungen sind auf alle Fälle zu vermeiden (starker Materialabtrag). Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt die Charakteristiken der üblichen Anodenwerkstoffe.

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Fremdstrom-Anodentypen

Fremdstromanode	Abtragsrate [g/A·a]	Ausnutzung [%]	Max. Stromdichte [A/m ²]	Spannungsbegrenzung [V]
Metalloxid beschichtetes Titan (MOX)	0,04	90	600	12
Magnetit	20	90	70	keine
Platin beschichtetes Titan/Niob/Tantal	0,08	90	600	12/40/80

Die Beschichtungsstärke von MOX-Anoden muss entsprechend auf die Lebensdauer der Anoden ausgelegt sein und mindestens 12 g/m² betragen. Es sind vorzugsweise Ir-Mischoxide oder Ir/Ru-Mischoxide einzusetzen.

Durch den Einsatz von Ru-Mischoxiden im Meerwasser wird deutlich mehr Chlorgas an der Anode produziert. Somit wird der Einsatz dieser Anoden nicht empfohlen.

Magnetitanoden benötigen keine zusätzliche Beschichtung und können generell in allen Bereichen und ohne Spannungsbegrenzung als Fremdstromanoden eingesetzt werden. Kombiniert mit Kabelanschlusskomponenten und Kabel aus PVDF sind diese resistent gegen Chlorgas, welches in chloridhaltigem Meerwasser an der Anode gebildet wird.

Die Platinauflage platinbeschichteter Anoden muss eine Schichtdicke von mindestens 5 µm besitzen.

Die Entscheidung, welche Anoden zum Einsatz kommen, kann mit Hilfe der ZTV-W, LB 220 unter Beachtung von Praxiserfahrungen und den Ausführungen im HTG-Handbuch Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau (2009) getroffen werden.

Zur Vermeidung von Beschichtungsschäden durch den Einfluss eines Spannungstrichters in unmittelbarer Anodennähe sollte der Abstand zwischen Anode und Oberfläche möglichst so groß gewählt werden, dass die Oberfläche außerhalb des anodischen Spannungstrichters liegt. Dieser Abstand hat mindestens 1,5 m zu betragen. Ist dieser Abstand nicht erreichbar, so ist unter den Anoden ein Isolierschirm durch Kunststoffzwischenlagen anzubringen, an deren Rändern das Potenzial einen Wert von nicht negativer als -1.100 mV Ag/AgCl erreichen darf (Spannungstrichterberechnung).

5.3 Schutzstromgerät

Die Schutzstromgeräte (SSG) bilden das Kernstück von Fremdstromanlagen. Sie sollten automatisch regelnd ausgestattet sein. Ein wesentliches Bauelement ist der Gleichrichtersatz, weshalb die SSG häufig auch Gleichrichter genannt werden. SSG sollten nach Möglichkeit innerhalb von trockenen, belüfteten Räumen innerhalb der Offshore-Bauwerke installiert werden. Die Auswahl der Geräte hängt von den Leitfähigkeitsschwankungen, Betrieb und anderen Randbedingungen ab. Die Leistungsmerkmale sind unter Beachtung der ZTV-W, LB 220 und im BAW-Merkblatt Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (MKKS), 2015 beschrieben. Besonders hervorzuheben ist die Notwendigkeit der Datenübertragung an die Leitzentrale. Zur Vermeidung längerer Ausfallzeiten sind automatische Anlagen soweit mit Schnittstellen zu versehen, dass Störmeldungen zu Leitzentralen weitergeleitet und Behebungen vor längeren Depolarisationsphasen veranlasst werden können. Aufgrund der exponierten Lage der Offshore-Bauwerke, den rauen Umgebungsbedingungen, der nur bedingten Erreichbarkeit der Offshore-Bauwerke, sowie der hohen Zahl an Offshore-Bauwerken, wird empfohlen, die Fremdstrom-KKS-Anlagen mindestens redundant auszulegen, um Depolarisationsphasen grundsätzlich zu vermeiden.

5.4 Bezugselektroden

Bezugselektroden (BE), auch Mess- oder Referenz-Elektroden/Sonden genannt dienen der Überwachung und bei automatisch potenzialregelnden SSG der Steuerung von Fremdstromanlagen. Mit den Messergebnissen können Veränderungen an Korrosionsschutzsystemen des passiven oder aktiven Korrosionsschutzes erkannt werden. Hinweise zu Bezugselektroden und Dauerbezugselektroden (DBE) sind in der Tabelle 5 enthalten.

Tabelle 5: Bezugselektrodenpotenziale und Einsatzgebiete

Bezugselektrode	Elektrolyt	Potenzial U_H^* [mV]**	Einsatz
Cu/CuSO₄ gesättigt [mV Cu]	Gesättigte Kupfersulfat-Lösung	+320	mobile Messungen, nicht als DBE einsetzbar, da Kontamination möglich
Ag/AgCl gesättigt [mV Ag]	gesättigte Kaliumchlorid-Lösung	+200 ± 10	mobile Messungen, nicht als DBE
Zink-Stab [mV Zn]	Objektwasser	-770 ± 25	DBE und mobile Messungen

* in DIN EN 13509 verwendetes Symbol: E_H

** U_H ist die Potentialdifferenz der Bezugselektrode gegenüber der Normal-Wasserstoff-Elektrode

Bei den Überprüfungen der KKS-Anlagen vor Ort sind die Bezugselektroden bezüglich der Potenzialstabilität (Abweichung bis 25 mV möglich) mit den sehr genauen mobilen Cu/CuSO₄ oder gesättigten Ag/AgCl Halbzellen zu kontrollieren. Zu berücksichtigen sind eventuelle Passivierungen/Verunreinigungen, da sich dadurch Messfehler bei der Potentialmessung ergeben können.

Die Dauerbezugselektroden sind dort zu installieren, wo die geringsten und höchsten Potenziale zu erwarten sind. Insbesondere in Hinblick auf spätere, aufwendige und gefährliche Arbeiten unter Wasser ist eine mindestens redundante Auslegung vorzusehen.

5.5 Ausrüstungsteile – Zubehör

5.5.1 Kabel und Leitungen

Die Anforderungen an die Qualität der Kabelumhüllungen und die Art der Verlegung sind bei Offshore-Bauwerken sehr hoch. Für die Kabel und Leitungen vom SSG zu den Anoden müssen die Kabelquerschnitte so bemessen sein, dass die Treibspannungen auch an der Anode selbst eingehalten werden.

Generell ist der Schutz gegen mechanische und chemische Belastungen zu beachten. Der Anodenkopf ist besonders dicht und mechanisch robust auszubilden. Ein Kabelknickschutz ist notwendig, ebenso an den örtlichen Übergängen von ggf. vorgesehenen Anodenschutzkörben in die Kabelschutzrohre und ganz besonders an Kanten. Entsprechend der Belastung können die in Tabelle 6 genannten Materialien zum Einsatz kommen.

Tabelle 6: Charakteristika von Kabel und Leitungen für KKS-Anlagen

Umgebung	Kabel- bzw. Leitungs-Typ	Material	Eigenschaften/Hinweise
Meer- oder Brackwasser	NSSHÖU, H01N2-D (alte Bezeichnung: NSLFFÖÜ)	schwere Gummischlauch-Leitungen	mechanisch besonders robuste und öl- und temperaturfeste Bergbau- bzw. Lichtbogen-schweiß/Batterie-Leitungen Verlegung über Wasser in UV beständigen Kabelschutzrohren
Schlick – ohne Wasseraustausch	PVDF	chlorgasresistentes PVDF	mechanisch robust, thermisch und chemisch beständig, speziell für den Einsatz in extrem aggressiver Umgebung

5.5.2 Anoden- und Elektrodenhalterungen, Schutzrohre

Die Anordnung der Anoden und DBE, sowie die sichere Anbringung beginnt bereits in der Planungs- und Konstruktionsphase der Fundamente für die Offshore-Bauwerke. In der Struktur eingebrachte Nischen oder der Einbau von Kofferdammkästen sind von Vorteil, allerdings bei Offshore-Bauwerken schwierig oder nur mit erheblich höherem Aufwand realisierbar. Besser ist es, Anoden und Elektroden in Schutzrohren oder speziellen Halterungen einzubauen. Kabelschutzrohre sind in der Art zu dimensionieren und zu installieren, dass ein nachträglicher Einzug von Kabeln durch Taucher sicher und einfach möglich ist. Materialien für Anoden- und Elektrodenhalterungen, sowie Schutzrohre sind beschrieben in Anlage 4. Kabel sind für die angestrebte Nutzungsdauer gegen mechanischen Einfluss hinreichend zu schützen.

Bei der Auswahl ist stets auf chlor-, chlorid- und sauerstoffbeständige Materialien, sowie UV-Belastung zu achten. Auf den Einsatz von CrNi-Stählen für z. B. Schellen und Bolzen, ist aufgrund von galvanischer Elementbildung (höhere Korrosionsgefährdung) zu verzichten. Im atmosphärischen Innenbereich sollen aus Gesundheitschutzgründen nur halogenfreie Materialien eingesetzt werden, ggf. ist eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen.

6 Betrieb und Überwachung

KKS-Anlagen, insbesondere Fremdstromanlagen, erfüllen nur dann dauerhaft ihre Funktion, wenn sie kontinuierlich im Betrieb sind und die sachgerechten Geräteeinstellungen ständig überwacht (z. B. online), sowie die eingesetzten Bauteile im Rahmen der Anlagen- und Bauwerksinspektion kontinuierlich betreut bzw. überwacht werden. Ein Inspektions- und Wartungsplan ist im Voraus zu entwickeln und an den späteren Betreiber zu übergeben.

6.1 Messung des Schutzpotenzials

Für einen optimalen Schutz der Offshore-Bauwerke muss ein Potenzial von -800 mV gemessen gegen eine gesättigte Silber-Silberchlorid (Ag/AgCl) Messelektrode erreicht werden (-900 mV bei anaeroben Bedingungen (MIC-Gefahr)). Mobile Messungen mit einer Kupfer-Kupfersulfat (Cu/CuSO₄) Messelektrode sind auch möglich.

Hinweis:

- Die Zinkelektrode wechselt bei -1.036 mV, bezogen auf Ag/AgCl, die Polarität.
- Das Schutzpotenzial wird in der Regel über die Messung des Ausschaltpotenzials ermittelt. Bei galvanischen Anoden ist eine Ermittlung des Ausschaltpotenzials nur mit hohem Aufwand möglich. Ersatzweise kann das Schutzpotenzial über Referenzelektrodenmessung direkt am Bauwerk mit einer Potentialmesspistole erfolgen, Abbildung 2.



Abbildung 2: Potentialmesspistole

6.2 Beurteilung des Schutzpotenzials

Die Beurteilung der gemessenen Potenzialwerte ist nicht ganz unproblematisch. Sie sind durch den Anlagenbetreiber (bzw. durch eine Person mit besonderer Sachkunde) zu bewerten. Um Verwechslungen vorzubeugen, sind bei Potenzialmessungen die Messwerte immer in Millivolt [mV] Ag/AgCl zu protokollieren.

Hinweis:

- Die Angabe der Bezugselektrode und des Vorzeichens des Potenzialwertes sind mit zu dokumentieren, da ohne diese Angaben keine Interpretationen möglich sind.
- Die Tabelle 7 zeigt die wichtigsten in der Praxis zu beachtenden Potenziale und Potenzialbereiche der gebräuchlichsten Bezugselektroden (Ag/AgCl und Zn) im Vergleich mit der Standardwasserstoffelektrode (SHE).

Tabelle 7: Potenzialbereiche von Baustählen gegenüber den gebräuchlichsten Bezugselektroden

Messelektrode Grenzpotenziale	[mV Ag/AgCl]	[mV Zn]	[mV Cu/CuSO ₄] °	[mV SHE]
Bereich des freien Korrosionspotenzials von Baustahl in Meerwasser	-500 bis -700	+536 bis +336	-550 bis -750	-236 bis -434
Schutzpotenzial Grenzwert 1	-800	+236	-850	-534
Schutzpotenzial Grenzwert 2 *	-900	+136	-950	-636
Max. Absenkung bei beschichteten Bauteilen	-1.100	-64	-1.150	-834
Wasserstoffentwicklung	-1.200	-164	-1.250	-934

* Schlick, anaerobe Bedingungen – z. B. bei Mikrobiell Induzierter Korrosion (MIC)

° Ausschließlich für mobile Messungen

Werden mobile Referenzmessungen in zeitlichen Abständen an den Offshore-Bauwerken durchgeführt, dann sind diese mit den Permanentmessungen zu vergleichen, um ggf. Korrekturen an der Steuerung der Fremdstromanlage durchzuführen.

Ausführungen zu Messungen zur Überwachung von KKS-Anlagen im Betrieb werden gesondert im Teil „Regelmäßige Überprüfungen/Monitoring“ behandelt.

6.3 Anforderungen an das Personal für den Betrieb einer KKS-Anlage

Die kathodische Korrosionsschutzanlage ist von erfahrenem Betriebspersonal (geschultes Personal bzw. Sachkundigen in Anlehnung an DIN EN 15257 Grad 2, Off-shore) kontinuierlich zu betreuen.

Das Betriebspersonal muss mindestens Grundkenntnisse auf folgenden Gebieten haben:

- Einschlägiges Regelwerk zum kathodischen Korrosionsschutz
- Elektrochemische Korrosion
- Aktiver Korrosionsschutz
- Passiver Korrosionsschutz
- Elektrische Messtechnik.

7 Regelwerke

Dieser Standard definiert zusätzliche Anforderungen in Ergänzung zu folgenden Regelwerken, wovon einige in diesem Standard zitiert sind:

Normen:

DIN EN 10204	Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen
DIN EN 12068	Kathodischer Korrosionsschutz – Organische Umhüllungen für den Korrosionsschutz von in Böden und Wässern verlegten Stahlrohrleitungen im Zusammenwirken mit kathodischem Korrosionsschutz – Bänder und schrumpfende Materialien
DIN EN 12473	Allgemeine Grundsätze des kathodischen Korrosionsschutzes in Meerwasser
DIN EN 12474	Kathodischer Korrosionsschutz für unterseeische Rohrleitungen
DIN EN 12495	Kathodischer Korrosionsschutz von ortsfesten Offshore-Anlagen aus Stahl
DIN EN 12496	Galvanische Anoden für den kathodischen Schutz in Seewasser und salzhaltigem Schlamm
DIN EN 12499	Kathodischer Korrosionsschutz für die Innenflächen von metallischen Anlagen
DIN EN 13173	Kathodischer Korrosionsschutz für schwimmende Offshore-Anlagen aus Stahl
DIN EN 13509	Messverfahren für den Kathodischen Korrosionsschutz
DIN EN 15257	Kathodischer Korrosionsschutz – Qualifikationsgrade und Zertifizierung von für den kathodischen Korrosionsschutz geschultem Personal
DIN EN 61400-3	Windenergieanlagen – Teil 3: Auslegungsanforderungen für Windenergieanlagen auf offener See
DIN EN ISO 12944	Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme
DIN EN ISO 12944-9	Beschichtungsstoffe – Leistungsanforderungen an Beschichtungssysteme für Bauwerke im Offshorebereich, 2018 ersetzt ISO 20340
DIN EN ISO 13174	Kathodischer Korrosionsschutz für Hafengebäude

Richtlinien, Merkblätter und Listen:

BAW	BAW-Merkblatt – Einsatz von nichtrostendem Stahl im Stahlwasserbau (MNIS), 2012
BAW	Liste der zugelassenen Systeme II (für Meerwasser und Böden, Im 2/3), 2016
BAW	BAW-Merkblatt Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (MKKS), 2015
BAW	Richtlinien für die Prüfung von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (RPB), 2011
BSH	Standard Konstruktion – Mindestanforderungen an die konstruktive Ausführung von Offshore-Bauwerken in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ); Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2015
DNVGL	DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures (DNV, 2014)
DNVGL	DNV-RP-B401: Cathodic Protection Design, 2017
DNVGL	DNVGL-RP-0416 Corrosion protection for wind turbines, 2016
DNVGL	Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, GL, Edition, 2012
FKKS-Richtlinie	Güteüberwachung – Qualifikationsanforderungen für die Zertifizierung von Fachunternehmen des kathodischen Korrosionsschutzes
GfKORR	Richtlinie für die Zertifizierung von Personal und Akkreditierung von Zertifizierungsstellen auf dem Gebiet der Korrosion und des Korrosionsschutzes
HTG	Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau, 2009
NORSOK M-501	Surface preparation and protective, 2012
NORSOK M-503	Cathodic protection, Edition 4, 2016
STKL-W	STKL, LB 218: Standardleistungskatalog – Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (2011)
STKL-W	STKL, LB 220: Standardleistungskatalog – Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (2015)

TL/TP-KOR-Stahlbauten	Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Beschichtungsstoffe für den Korrosionsschutz von Stahlbauten
VG 81259	Verteidigungs-Geräte, vom deutschen Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung – Kathodischer Korrosionsschutz von Schiffen; Außenschutz durch Fremdstrom
VGB/BAW-Standard VGB-S-021	Korrosionsschutz von Offshore-Bauwerken zur Nutzung der Windenergie
ZTV-Ing 4/3	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 4 Stahlbau, Stahlverbundbau, Abschnitt 3 Korrosionsschutz von Stahlbauten
ZTV-W	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (Leistungsbereich 218)
ZTV-W	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (Leistungsbereich 220)

8 Literatur

von Baeckmann, W.: Taschenbuch für den Kathodischen Korrosionsschutz, Vulkan Verlag Essen, 6. Auflage 1996

Karge, C. & Graff, M.: Zum Risiko für und die verschiedenen Arten von mikrobieller Korrosion in Monopiles; HTG-Workshop 2013; www.htg-online.de

Krebs, T.: KKS für OWEA; HTG-Workshop 2014

9 Anlagen

Anlage 1: Vergleich von galvanischen Anoden und Fremdstromanlagen

Kriterium	Galvanische Anoden	Fremdstromanlage
Meerwasser	Hoher Metalleintrag	Sehr geringer Metalleintrag
Innenräume	Gefahr der Milieuveränderung und Unterschut	H ₂ - und Cl ₂ -Entwicklung einkalkulieren
Flexible Auslegung der Schutzdauer	Keine nachträgliche Verlängerung der geplanten Auslegung möglich	Austausch der Anoden ggf. nach Ende der geplanten Nutzungsdauer mit relativ geringem Aufwand möglich
Aufbau	Robust, auf Teilflächen begrenzt	Berücksichtigung von Anlagenteilen wie z. B. Schutzstromgerät; Kabel und Anodenhaltungen sind gegen Beschädigung anfällig
Installationsaufwand	Technisch einfach	Technisch komplex
Aufwand bei Nachrüstung	Transport und Anbringen von Anodenmaterial – sehr hoch	Je nach Umfang und Auslegung der Erstausrüstung mittel bis hoch
Anodenmasse, -anzahl	(sehr) hoch	Gering
Stromabgabe [Dimension]	je Anode begrenzt ([mA]/Anode)	Anoden sind regelbar ([A]/Anode)
Treibspannung	Gering, durch Material festgelegt	Hoch, variabel, jedoch abhängig vom Trägermaterial der Anode
Schädliche Beeinflussung von unmittelbar benachbarten Bauwerken	Allgemein nicht	Kontrollmessungen erforderlich
Mögliche schädigende Einflüsse auf das zu schützende Bauwerk	Allgemein nicht, lokal begrenzter Überschutz möglich	Beschichtungsschäden bei Überschutz und ungeeigneter Beschichtung
Funktionsüberprüfung	Kurzschlussverbindung, Sichtprüfung bei Bauwerksinspektion, regelmäßige Kontrollmessungen (Schutzpotenzial) erforderlich	Problemlos über Messinstrumente; Fernüberwachung möglich, regelmäßige Kontrollmessungen erforderlich, da z. B. beim Monopile die Installation von Referenzelektroden zum Meeresboden hin kaum technisch machbar ist.
Wartungs- und Unterhaltungsaufwand	Gering	Mittel (ständige Überwachung – Fernüberwachung notwendig)
Planer	DIN EN 15257 Grad 2, Offshore	DIN EN 15257 Grad 2, Offshore
Ausführender	GW 11, Offshore, bzw. entsprechendes Regelwerk	GW 11, Offshore, bzw. entsprechendes Regelwerk
Überwacher/Prüfer	DIN EN 15257 Grad 2, Offshore	DIN EN 15257 Grad 2, Offshore

	Galvanische Anoden	Fremdstromanlage
Vorteil	<ul style="list-style-type: none"> • sehr geringer Wartungsaufwand, nur gelegentliche Kontrollmessungen • vorwiegend für Objekte mit geringem Schutzstrombedarf und niedrigen spezifischen Boden- und Wasserwiderständen eingesetzt • Eignung insbesondere für kleinere, verwinkelte und aufgelöste Bauwerksformen • Schattenbereiche können durch zusätzliche Anoden kompensiert werden • spezielle Schutzschichten im anodischen Spannungstrichter sind nicht notwendig • sofort wirksam nach der Installation • nicht an bestimmte Bauwerksformen gebunden • jede beliebige Anodenform denkbar • keine elektrischen Sicherheitsprobleme aufgrund der niedrigen Spannungen 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Treibspannung möglich • Anlage ist ständig über installierte Referenzelektroden überwacht • Automatische Potenzialregelung über Referenzelektroden möglich • Fernbedienung möglich • nachträgliche Installation im Offshore-Bereich möglich
Nachteil	<ul style="list-style-type: none"> • spezielle aktive Legierung erforderlich • hohe Anodenmasse • hohe Anodenzahl • geringe Treibspannung • Stromabgabe begrenzt • Schutz endet spätestens mit kompletter Auflösung des Anodenmaterials • Genaue Schutzdauer abhängig von einer angepassten Auslegung des KKS-Systems und vom Alterungsprozess einer vorhandenen Beschichtung • Nachrüstung von neuen Anoden im Offshore-Bereich aufwendig bzw. kostenintensiv • es können keine Ausschaltpotenziale gemessen werden 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Wartungsaufwand und ggf. Reparaturaufwand, da zumindest die eingehenden Messwerte permanent ausgewertet werden müssen • Reparatur zumindest im Unterwasserbereich schwierig, z. B. bei zerstörten Montagehalterungen • Anoden können durch zu hohe Treibspannungen zerstört werden, gilt jedoch nicht beim Einsatz von Magnetitanoden • Permanente Energieversorgung erforderlich • robuste Schutzkonstruktionen erforderlich • laufende Betriebskosten • Kabelführungen sind robust und für den nachträglichen Austausch von Anoden bei Defekten auszuliegen • Eventuell Isolierschild aus Kunststoff im unmittelbaren Bereich der Anode erforderlich • Überschutz bei schlecht geregelten Anlagen möglich • Mögliche Wasserstoff- und Chlorgasentwicklung • bei Ausfall einer Komponente (Schutzstromgerät, Kabel, Stromanschluss, Anode) wird der kathodische Schutzstrom unterbrochen

Anlage 2: Daten zur Auslegung einer kathodischen Schutzanlage

1. Geographischer Standort
 - spezifischer elektrischer Widerstand [Ω cm]
 - spezifische Polarisationsstromdichte (Wasser und Boden) [mA/m²]
 - spezifische mittlere Stromdichte (Wasser und Boden) [mA/m²]
 - spezifische Repolarisationsstromdichte (Wasser und Boden) [mA/m²]
2. Festlegung der zu schützenden Bauteilfläche [m²]
3. Oberfläche unbeschichtet [m²]
4. Oberfläche beschichtet [m²]
Zustand der Beschichtung
5. Edelstahlfläche unbeschichtet [m²]
6. Fehlstellenrate
 - anfängliche Fehlstellenrate [%]
 - mittlere Fehlstellenrate [%]
 - maximale Fehlstellenrate während der Nutzungsdauer der Anlage [%]
7. Anodenparameter
 - praktische Strombelastbarkeit [Ah/kg]
 - angenommene Strombelastbarkeit [Ah/kg]
 - Abtragsrate [kg/Aa]
 - Nutzungsgrad
 - Treibspannung [mV]
 - Größe/Länge [m]
 - Masse [kg]
8. Strukturzeichnungen der zu schützenden Offshore-Konstruktion
(z. B. Monopile, Tripile, Jacket, Tripod, Stahlbetonfundamente)
9. Fremdobjekte im Nahbereich
(z. B. Rohrleitungen, Kabel, weitere Offshore-Bauwerke)
10. Wasseranalyse am Schutzobjekt eventuell aus unterschiedlichen Tiefen (jährlicher Durchschnitt)
 - Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
 - Sauerstoffkonzentration [mg/l]

Optional

- Sulfide (S^{2-}); Bereich des Meeresbodens [mg/l]
- Sulfat (SO_4^{2-}) [mg/l]
- Chlorid (Cl^-) [mg/l]
- Phosphat (PO_4^{3-}) [mg/l]
- Calcium (Ca^{2+}) [mg/l]
- Magnesium (Mg^{2+}) [mg/l]
- Mangan (Mn^{4+}) [mg/l]
- Eisen (Fe_{gesamt}) [mg/l]
- pH-Wert

Anlage 3: Beispielrechnung von Kathodischen Korrosionsschutzanlagen

**Beispielrechnung
von
Kathodischen Korrosionsschutzanlagen
(Fremdstromanlage und galvanische Anlage)
für
den Außenschutz eines beschichteten Monopiles**

Inhaltsverzeichnis

1.	Auslegungsparameter	31
1.1	Projektdatei eines Monopiles in der Nordsee	31
1.2	Spezifischer Wasserwiderstand.....	31
1.3	Spezifische Schutzstromdichten	31
1.4	Fehlstellenrate (Beschichtungsreduktion).....	32
2.	Schutzstrombedarfsberechnung	33
2.1	Berechnung des Schutzstrombedarfs zu Beginn der Schutzdauer.....	33
2.2	Berechnung des mittleren Schutzstrombedarfs	34
2.3	Berechnung des Schutzstrombedarfs am Ende der Nutzungsdauer	35
2.4	Übersicht des Schutzstrombedarfs	36
3.	Berechnung der Auslegung eines kathodischen Korrosionsschutzes durch ein Fremdstromsystem	37
3.1	Auslegungsstrom	37
3.2	Materialparameter.....	37
3.3	Anodenlebensdauerberechnung.....	37
3.4	Ausbreitungswiderstand einer Anode	38
3.5	Gesamter Stromkreiswiderstand.....	38
3.6	Ausgangsspannung des Schutzstromgerätes	39
3.7	Anzahl der Anoden	39
3.8	Dimensionierung des Schutzstromgerätes	39
4.	Berechnung der Auslegung eines kathodischen Korrosionsschutzes durch galvanische Anoden	40
4.1	Benötigte Anodenmasse.....	41
4.2	Verbleibende Gesamtanodenmasse.....	42
4.3	Anodenstromberechnung (Anfang).....	43
4.4	Anodenstromberechnung (Ende).....	44
4.5	Prüfung der Kriterien.....	45
4.6	Ergebnis	45

1. Auslegungsparameter

Die Beispielrechnung von Kathodischen Korrosionsschutzanlagen (Fremdstromanlage und galvanische Anlage) für den Außenschutz eines beschichteten Monopiles berücksichtigt Zone A (WWZ/NWZ/UWZ) und Zone C (Meeresboden). Die Zone B ist in Zone A (Schlick) enthalten.

1.1 Projektdaten eines Monopiles in der Nordsee

Material:	Stahl
Außendurchmesser:	6 m
Max. Länge unter Wasser:	26 m
Länge im Boden:	25 m
Oberfläche (WWZ, NWZ, UWZ):	490 m ²
Oberfläche (Meeresboden):	471 m ²
Beschichtung:	Organische Beschichtung mit 600 µm Gesamtschichtdicke im wasserberührten Bereich
Geplante Nutzungsdauer:	25 Jahre
Geplante Schutzdauer:	27 Jahre

1.2 Spezifischer Wasserwiderstand

Spezifischer Wasserwiderstand (Nordsee):	30 Ωcm
--	--------

1.3 Spezifische Schutzstromdichten

Die erforderlichen Schutzstromdichten je Zone sind den einschlägigen Regelwerken (z. B. DIN EN 12495, DNV RP-B401) zu entnehmen.

Die Stromdichtenangaben für die Anfangsphase dient der Auslegung der Leistungsfähigkeit des Systems für die Erstpolarisation, die der Endphase für die Repolarisation. Der mittlere Wert dient der Auslegung der Gesamtkapazität.

Für beschichtete Bauteile werden folgende spezifischen Schutzstromdichten für die Auslegung angenommen (Bezugswert für blanken Stahl):

Tabelle 8: Beispiel für Schutzstromdichten je Zone und Auslegungsphase (referenzierte Norm)

Zone	Anfangsphase	mittlerer Wert	Endphase
A: WWZ/NWZ/UWZ	200 mA/m ² (DNV)	100 mA/m ² (DNV)	130 mA/m ² (DNV)
C: Meeresboden	25 mA/m ² (DIN)	20 mA/m ² (DIN)	20 mA/m ² (DIN)

Gegebenenfalls kann die Schlickzone/Ablagerungszone als eigene Zone mit einer deutlich höheren Schutzstromdichte berücksichtigt werden.

1.4 Fehlstellenrate (Beschichtungsreduktion)

Ausgangspunkt für die Berechnung des Schutzstrombedarfs ist die für den blanken Baustahl im Meerwasser erforderliche Schutzstromdichte (siehe z. B. Tabelle 8 für diese Berechnung). Dafür wird ein Produkt der zonen- und phasenspezifischen Schutzstromdichte ($i_{p,z}$, p= i: initial/Anfang, m: mean/Mittelwert, f: final/Ende; z=A: Zone A, C: Zone C) mit dem entsprechenden Beschichtungsreduktionsfaktor ($f_{c,p}$, Tabelle 9) gebildet.

Im wasserbedeckten Teil der Struktur wird die Schutzstromdichte durch eine Beschichtung stark erniedrigt, sodass rechnerisch nur unbeschichtete Teile des Bauwerks berücksichtigt werden. Der Grund für die Erhöhung des Beschichtungsreduktionsfaktors mit der Zeit ist der Abbau der Beschichtung im Laufe der Nutzungsdauer. Der Faktor ist dabei generell von der Qualität der Beschichtung abhängig.

Üblicherweise wird der Beschichtungsreduktionsfaktor durch Addition eines Anfangswerts und einer jährlich gleichmäßig fortschreitenden Degradation gebildet. Für den Fall, dass keine belastbaren Werte für den Beschichtungsreduktionsfaktor vorliegen, kann stellvertretend auf die Werte aus den einschlägigen Regelwerken (z. B. DIN EN 12495, DNV RP-B401) zurückgegriffen werden. Dieser Anfangswert ($a = 0,02$) berücksichtigt üblicherweise die angenommenen Beschädigungen während des Transports und der Installation der beschichteten Bauteile. Ab dem Zeitpunkt der abgeschlossenen Installation beginnt die jährlich gleichmäßig fortschreitende Degradation ($b = 0,012$). Die jährliche (t) Degradation berechnet sich wie folgt:

$$f = a + b * t$$

Mögliche Beschichtungsreduktionsfaktoren zu Anfang, nach der Hälfte und zum Ende einer Anlage, mit einer geplanten Nutzungsdauer von 27 Jahren, sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: *Mögliche Beschichtungsreduktionsfaktoren für bis zu 27 Jahre (jährliche Degradation: 0,012; bis 30 m Wassertiefe):*

Situation	Nutzungszeit (t)	Kurzzeichen	Wert
Anfangswert	0 Jahre	$f_{i,z}$	0,020 (DNV)
mittlerer Wert	13,5 Jahre	$f_{m,z}$	0,182 (DNV)
Endwert	27 Jahre	$f_{f,z}$	0,344 (DNV)

2. Schutzstrombedarfsberechnung

In diesem Beispiel werden die in den Auslegungsparametern definierten spezifischen Schutzstromdichten (Tabelle 8), sowie die in Tabelle 9 angegebenen Beschichtungsreduktionsfaktoren verwendet. Diese Berechnung erfolgt entsprechend der üblichen drei Kriterien für Anfang, Ende und Gesamtnutzungsdauer. Hierzu werden die Polarisationsfähigkeit zu Beginn, die Repolarisationsfähigkeit bei geschädigter Beschichtung am Ende der Nutzungsdauer und der Gesamtstrombedarf über die gesamte Nutzungsdauer ermittelt.

Um den gesamten kathodischen Schutzstrombedarf I der Phase p zu bestimmen, werden, wie bereits beschrieben, die Schutzbereichsflächen mit dem jeweiligen spezifischen Schutzstrombedarf und den Beschichtungsreduktionsfaktoren ermittelt und entsprechend der folgenden Formel aufsummiert:

$$I_p = \sum_{z=1}^n (A_z \cdot f_{p,z} \cdot i_{p,z})$$

2.1 Berechnung des Schutzstrombedarfs zu Beginn der Schutzdauer

Strombedarfsrechnung für Zone A (WWZ/NWZ/UWZ)

$$I_{i,A} = A_A \cdot f_{i,A} \cdot i_{i,A}$$

A_A = Kathodenfläche	490 m ²
$f_{i,A}$ = Beschichtungsreduktionsfaktor	0,020
$i_{i,A}$ = spezifischer Schutzstrombedarf	0,200 A/m ²
$I_{i,A}$ = Schutzstrombedarf zu Beginn	<u>1,96 A</u>

Strombedarfsrechnung für Zone C (Meeresboden)

$$I_{i,C} = A_C \cdot f_{i,C} \cdot i_{i,C}$$

A_C = Kathodenfläche	471 m ²
$f_{i,C}$ = Beschichtungsreduktionsfaktor	1
$i_{i,C}$ = spezifischer Schutzstrombedarf	0,025 A/m ²
$I_{i,C}$ = Schutzstrombedarf zu Beginn	<u>11,8 A</u>

Gesamtstrombedarf aller Zonen

$$I_i = I_{i,A} + I_{i,C}$$

$I_{m,A}$ = Strombedarf Zone A	1,96 A
$I_{m,C}$ = Strombedarf Zone C	11,8 A
I_m = Gesamtstrombedarf zu Beginn	<u>13,8 A</u>

2.2 Berechnung des mittleren Schutzstrombedarfs

Strombedarfsrechnung für Zone A (WWZ/NWZ/UWZ)

$$I_{m,A} = A_A \cdot f_{m,A} \cdot i_{m,A}$$

A_A = Kathodenfläche	490 m ²
$f_{m,A}$ = Beschichtungsreduktionsfaktor	0,182
$i_{m,A}$ = spezifischer Schutzstrombedarf	0,100 A/m ²
<u>$I_{m,A}$ = mittlerer Schutzstrombedarf</u>	<u>8,92 A</u>

Strombedarfsrechnung für Zone C (Meeresboden)

$$I_{m,C} = A_C \cdot f_{m,C} \cdot i_{m,C}$$

A_C = Kathodenfläche	471 m ²
$f_{m,C}$ = Beschichtungsreduktionsfaktor	1
$i_{m,C}$ = spezifischer Schutzstrombedarf	0,020 A/m ²
<u>$I_{m,C}$ = mittlerer Schutzstrombedarf</u>	<u>9,42 A</u>

Gesamtstrombedarf aller Zonen

$$I_m = I_{m,A} + I_{m,C}$$

$I_{m,A}$ = Strombedarf Zone A	8,92 A
$I_{m,C}$ = Strombedarf Zone C	9,42 A
<u>I_m = mittlerer Gesamtstrombedarf</u>	<u>18,3 A</u>

2.3 Berechnung des Schutzstrombedarfs am Ende der Nutzungsdauer

Strombedarfsrechnung für Zone A (WWZ/NWZ/UWZ)

$$I_{f,A} = A_A \cdot f_{f,A} \cdot i_{f,A}$$

A_A = Kathodenfläche	490 m ²
$f_{f,A}$ = Beschichtungsreduktionsfaktor	0,344
$i_{f,A}$ = spezifischer Schutzstrombedarf	0,130 A/m ²
<u>$I_{f,A}$ = Schutzstrombedarf am Ende</u>	<u>21,9 A</u>

Strombedarfsrechnung für Zone C (Meeresboden)

$$I_{f,C} = A_C \cdot f_{f,C} \cdot i_{f,C}$$

A_C = Kathodenfläche	471 m ²
$f_{f,C}$ = Beschichtungsreduktionsfaktor	1
$i_{f,C}$ = spezifischer Schutzstrombedarf	0,020 A/m ²
<u>$I_{f,C}$ = Schutzstrombedarf am Ende</u>	<u>9,42 A</u>

Gesamtstrombedarf aller Zonen

$$I_f = I_{f,A} + I_{f,C}$$

$I_{f,A}$ = Strombedarf Zone A	21,9 A
$I_{f,C}$ = Strombedarf Zone C	9,42 A
<u>I_f = Gesamtstrombedarf am Ende</u>	<u>31,3 A</u>

2.4 Übersicht des Schutzstrombedarfs

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse nach der Montage (Anfangswert), einer Schutzdauer von 13,5 und 27 Jahren entsprechend der obigen Berechnung zusammengefasst:

Tabelle 10: Schutzstrombedarf

Strom	Anfangswert	Mittlerer Wert	Endwert
$I_{p,A}$	1,96 A	8,92 A	21,9 A
$I_{p,C}$	11,8 A	9,42 A	9,42 A
I_p	13,8 A	18,3 A	31,3 A

Die oben berechneten Werte sind Grundlage für die weiteren Berechnungen für ein Fremdstromsystem und ein galvanisches KKS-System.

3. Berechnung der Auslegung eines kathodischen Korrosionsschutzes durch ein Fremdstromsystem

3.1 Auslegungsstrom

Ein Fremdstromsystem muss in der Lage sein, den Maximalstrom entsprechend der Ergebnisse aus Tabelle 10 (Schutzstrombedarf) liefern zu können.

$$I_{max} \approx 32 \text{ A}$$

Gegebenenfalls kann der Maximalstrom mit einem Sicherheitsfaktor von 1,25 bis 1,5 multipliziert werden, um eine schlechte Potentialverteilung zu berücksichtigen (siehe DIN EN 12495).

3.2 Materialparameter

Für diese Beispielberechnung werden folgende wesentliche Komponenten ausgewählt:

Anode:	Magnetit-Anode
	max. Stromabgabe: 8 A
	Anodengewicht (netto): 4,7 kg
	Anodenlänge: 0,67 m
	Anodendurchmesser: 0,06 m
	Verbrauchsrate: 0,02 kg/Aa (kg/Amperejahr)
	Polarisationsspannung: 2 V
Kathodenkabel:	Kupferkabel, 16 m ² Querschnitt, 50 m Länge
	Widerstand: 0,056 Ohm
Anodenkabel:	Kupferkabel, 16 m ² Querschnitt, 30 m Länge
	Widerstand: 0,033 Ohm

3.3 Anodenlebensdauerberechnung

Nutzungsdauer einer Anode:

$$t = \frac{m \cdot u}{I \cdot C}$$

m = Anodenmasse [kg]

u = Nutzungsfaktor

I = Anodenstrom [A]

- C = Anodenverbrauchsrate [kg/Amperjahr]
0,02 kg/Aa (für Magnetit-Anode)
- t = Anodenlebensdauer [Jahre]

$$t = \frac{4,7 \text{ kg} \cdot 0,9}{8 \text{ A} \cdot 0,02 \text{ kg/A a}} = 26,4 \text{ Jahre}$$

Wird die Fremdstromanode erst einige Zeit nach der Installation in Betrieb genommen, so muss die Anodenlebensdauer größer als die verbleibende Nutzungsdauer des Bauwerks sein (in diesem Fall 25 bis 26 Jahre). Die Zeit bis zur Inbetriebnahme muss allerdings durch einen temporären Korrosionsschutz berücksichtigt werden.

3.4 Ausbreitungswiderstand einer Anode

Ausbreitungswiderstand einer Stabanode (Magnetit Anode):

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \cdot \left(\ln \frac{8 \cdot L}{D} - 1 \right)$$

- ρ = Spezifischer Elektrolytwiderstand [Ohm · m]
L = Anodenlänge [m]
D = Anodendurchmesser [m]
 R_a = Ausbreitungswiderstand

$$R_a = \frac{0,3 \text{ Ohm} \cdot \text{m}}{2 \cdot \pi \cdot 0,67 \text{ m}} \cdot \left(\ln \frac{8 \cdot 0,67 \text{ m}}{0,06 \text{ m}} - 1 \right) = 0,249 \text{ Ohm}$$

3.5 Gesamter Stromkreiswiderstand

Der gesamte Stromkreiswiderstand ist die Summe aller im Stromkreis vorhandenen Einzelwiderstände zwischen dem Pluspol und dem Minuspol eines Schutzstromgerätes und besteht im Wesentlichen aus:

$$R_{total} = R_{ac} + R_a + R_c + R_{cc}$$

- Anodenkabelwiderstand (R_{ac}): 0,033 Ohm
Anodenausbreitungswiderstand (R_a): 0,249 Ohm
Kathodenausbreitungswiderstand (R_c): 0 Ohm
Kathodenkabelwiderstand (R_{cc}): 0,056 Ohm

$$R_{total} = 0,033 \text{ Ohm} + 0,249 \text{ Ohm} + 0 \text{ Ohm} + 0,056 \text{ Ohm} = 0,338 \text{ Ohm}$$

3.6 Ausgangsspannung des Schutzstromgerätes

$$U_{TR} = R_{total} \cdot I + U_{pol}$$

Stromkreiswiderstand (R_{total}):	0,338 Ohm
Anodenstrom (I):	8 A
Polarisationsspannung (U_{pol}):	2 V
Ausgangsspannung (U_{TR}):	

$$U_{TR} = 0,338 \text{ Ohm} \cdot 8 \text{ A} + 2 \text{ V} = 4,7 \text{ V}$$

3.7 Anzahl der Anoden

$$N_{anoden} \geq \frac{I_{max}}{I_{anode}} = \frac{32 \text{ A}}{8 \text{ A}} = 4$$

Die Mindestanzahl beträgt demzufolge 4 Anoden.

Diese Berechnung berücksichtigt nicht die Potentialverteilung am Bauwerk, die von Anzahl, Position und Potential der Anoden abhängt. Diese ist gesondert zu betrachten. Die Nutzung der vollen Stromabgabe von 8 A ist eventuell nicht möglich, da dies sonst zu einem Überschreiten des maximal zulässigen negativen Potentials am Bauwerk führen kann. Dies gilt insbesondere für aufgelöste Konstruktionen (z. B. Jacket-Gründungen) Es kann daher nötig sein, mehr Elektroden zu verwenden, als aus der Rechnung hervorgeht.

3.8 Dimensionierung des Schutzstromgerätes

$$P = I_{max} \cdot U_{TR} = 32 \text{ A} \cdot 4,7 \text{ V} = 150,4 \text{ W}$$

Das Schutzstromgerät muss mindestens eine Gleichspannungsausgangsleistung von 150,4 W liefern können.

4. Berechnung der Auslegung eines kathodischen Korrosionsschutzes durch galvanische Anoden

Die Berechnung eines KKS-Systems mit galvanischen Anoden ist keine geradlinige Berechnung, sondern bedarf einer iterativen Vorgehensweise, um eine technisch und wirtschaftlich optimale Lösung zu erreichen. Dabei sind u. a. Anzahl und Dimension der Anoden zu ändern.

Diese Berechnung wird mit den folgenden Anodendaten durchgeführt:

Anodenmaterial:	Aluminiumlegierung
Anodenmasse:	65 kg
Anodenweite:	0,122 m
Anodenhöhe:	0,110 m
Anodenlänge:	2,5 m
Durchmesser Stahlträger:	0,06032 m
Treibspannung:	0,25 V
Strominhalt:	2.000 Ah/kg

Der effektiv nutzbare Strominhalt von Aluminiumanoden wird vom Hersteller meistens mit 2.400 bis 2.500 Ah/kg veranschlagt. Dieser Wert ist lediglich als Indikation zu verstehen. Für die Berechnung sollten jedoch nur 2.000 Ah/kg angesetzt werden. Beim Einsatz in Böden ist dieser Wert auf 1.500 Ah/kg zu reduzieren (siehe auch DNV RP-B401).

In der folgenden Berechnung wurden im ersten Schritt 40 Anoden eingesetzt und sie liefert nicht unbedingt die beste Lösung.

Dieser Berechnung können noch weitere Berechnungen mit Änderung der Anodendaten folgen, um die für den jeweiligen Anwendungsfall optimale Lösung zu finden.

4.1 Benötigte Anodenmasse

Berechnung der verbrauchten Anodenmasse für 27 Jahre

$$M_{av} = \frac{I_m \cdot t \cdot 8760}{\epsilon}$$

I_m = mittlerer Schutzstrombedarf	18,3 A
t = Anodennutzungsdauer	27 Jahre
Stunden pro Jahr	8.760 h
ϵ = Strominhalt	2.000 Ah/kg
<u>M_{av} = verbrauchte Anodenmasse</u>	<u>2.164 kg</u>

Berechnung der benötigten Anodenmasse nach 27 Jahren

$$M_{ab} = \frac{M_{av}}{u}$$

M_{av} = verbrauchte Anodenmasse	2.164 kg
u = Nutzungsfaktor	0,9
<u>M_{ab} = benötigte Anodenmasse</u>	<u>2.405 kg</u>

Der Nutzungsfaktor u ist vom Anodentyp abhängig und den einschlägigen Regelwerken zu entnehmen.

4.2 Verbleibende Gesamtanodenmasse

Die verbleibende Anodenmasse am Ende der Nutzungsdauer dient als Grundlage der Berechnung der dann vorliegenden Anodenabmessungen.

Berechnung der verbleibenden Anodenmasse nach 27 Jahren

$$M_{ar} = M_{ai} - M_{av}$$

M_{ai} = installierte Anodenmasse	2.600 kg
M_{av} = verbrauchte Anodenmasse	2.164 kg
M_{ar} = verbleibende Anodenmasse	<u>436 kg</u>

Berechnung der verbleibenden Anodenmasse nach 27 Jahren in Prozent

$$M_{arp} = 100 - \frac{M_{ar} \cdot 100}{M_{ai}}$$

M_{arp} = prozentuale verbleibende A.	<u>16,8 %</u>
M_{ai} = installierte Anodenmasse	2.600 kg
M_{ar} = verbrauchte Anodenmasse	2.164 kg

Aus der verbleibenden Anodenmasse müssen u.a. die verbleibende Länge und der verbleibende Radius der Anode kalkuliert werden. Diese dienen zur Abschätzung des resultierenden Ausbreitungswiderstands und damit der maximalen Stromabgabe am Ende der Nutzungsdauer. Dieser Berechnungsschnitt wird im vorliegenden Beispiel nicht explizit dargestellt.

4.3 Anodenstromberechnung (Anfang)

Berechnung des Ausbreitungswiderstandes einer Stabanode

Anfänglicher Ausbreitungswiderstand einer einzelnen Anode

$$R_a = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\ln \frac{4 \cdot L}{r} - 1 \right)$$

 ρ = spez. Wasserwiderstand (Nordsee) 0,3 Ohm m

L = Anodenlänge 2,5 m

r = Anodenradius 0,0738 m

 R_a = Anodenausbreitungswiderstand 0,075 Ohm*Für nichtzylindrische Anoden leitet sich r aus dem Querschnittsumfang ab***Berechnung der Stromabgabe einer Stabanode**

Anfängliche Stromabgabe einer einzelnen Anode

$$I_a = \frac{\Delta E}{R_a}$$

 ΔE = Treibspannung 0,25 V R_a = Anodenausbreitungswiderstand 0,075 Ohm I_a = Einzelanodenstrom 3,33 A**Berechnung der Stromabgabe von 40 Stabanoden**

Anfängliche Stromabgabe von 40 Anoden

$$I_{\text{atot}} = I_a \cdot N$$

 I_a = Einzelanodenstrom 3,33 A

N = Anodenanzahl 40

 I_{atot} = Gesamtanodenstrom 133 A

4.4 Anodenstromberechnung (Ende)

Bei der Berechnung des Ausbreitungswiderstands am Ende der Schutzdauer ist zu berücksichtigen, dass Anodenlänge und Anodenradius durch den Materialverbrauch reduziert wurden.

Berechnung des Ausbreitungswiderstandes einer Stabanode

Anfänglicher Ausbreitungswiderstand einer einzelnen Anode nach 27 Jahren

$$R_a = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\ln \frac{4 \cdot L}{r} - 1 \right)$$

ρ = spez. Wasserwiderstand (Nordsee)	0,3 Ohm m
L = Anodenlänge	2,25 m
r = Anodenradius	0,0377 m
<u>R_a = Anodenausbreitungswiderstand</u>	<u>0,095 Ohm</u>

Berechnung der Stromabgabe einer Stabanode

Stromabgabe einer einzelnen Anode nach 27 Jahren

$$I_a = \frac{\Delta E}{R_a}$$

ΔE = Treibspannung	0,25 V
R_a = Anodenausbreitungswiderstand	0,095 Ohm
<u>I_a = Anodenstrom</u>	<u>2,63 A</u>

Berechnung der Stromabgabe von 40 Stabanoden

Stromabgabe von 40 Anoden nach 27 Jahren

$$I_{\text{atot}} = I_a \cdot N$$

I_a = Anodenstrom	2,63 A
N = Anodenanzahl	40
<u>I_{atot} = Gesamtanodenstrom</u>	<u>105 A</u>

4.5 Prüfung der Kriterien

1. Gesamtmasse

$M_{ai} \geq M_{ab}$ $2.600 \text{ kg} \geq 2.405 \text{ kg}$

2. Polarisationsstrom

$I_{atot}(\text{Anfang}) \geq I_i$ $133 \text{ A} \geq 13,8 \text{ A}$
--

3. Repolarisationsstrom

$I_{atot}(\text{Ende}) \geq I_f$ $105 \text{ A} \geq 31,3 \text{ A}$
--

4.6 Ergebnis

Die Installation von 40 Aluminiumanoden mit einem Anodengewicht von jeweils 65 kg, wie oben beschrieben, reichen aus, um den nötigen mittleren Schutzstrombedarf über 27 Jahre Nutzungsdauer, sowie den Anfangsstrom (Polarisationsstrom) von 13,8 A und den Endstrom (Repolarisationsstrom) nach 27 Jahren von 31,3 A liefern zu können.

Bei den Berechnungen ist jedoch noch nicht berücksichtigt, dass sich die Anoden durch die Installationsanordnung gegebenenfalls gegenseitig beeinflussen, was zu einer Verringerung des nutzbaren Schutzstroms führen kann.

