

## Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

# **„Verbundvorhaben: "KKS-Gründung" - Korrosionsmonitoring und aktiver kathodischer Korrosionsschutz von Offshore-Gründungsstrukturen - Teilvorhaben: Korrosionsprüfungen im Laborcontainer“**

**in der Fördermaßnahme „Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE im 6.  
Energieforschungsprogramm“ im Förderbereich „Windenergie“**

Akronym: KKS-Gründung

Berichtszeitraum: 01.11.2018 bis 30.06.2022

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)  
11019 Berlin

Projekträger: Projekträger Jülich (PTJ)  
Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ)  
Geschäftsbereich Energiesystem:  
Erneuerbare Energien/Kraftwerkstechnik (ESE)  
52425 Jülich

Verbundpartner: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
FKZ: 0324333D

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Projektleitung: Dr.-Ing. Martin Babutzka

Projektbearbeitung: M.Sc. Khalid Zekhnini  
M.Sc. Lando Seifert  
Quynh Hoa Le, Ph.D.  
M. Eng. Sven Grabowski

# **I. Kurze Darstellung**

## **1. Aufgabenstellung**

Für den Erfolg des geplanten Umbaus der Energieversorgung in Deutschland sind Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) eine der entscheidenden Technologien. Raue Betriebsbedingungen, wie eine extreme Korrosivität von Atmosphäre und Meerwasser sowie hohe mechanisch-dynamische Wechselbelastungen, fordern besondere Maßnahmen für einen sicheren, reibungslosen und dauerhaften Betrieb. Offshore bedeutet gleichzeitig auch eingeschränkte Zugänglichkeit, was enormen logistischen Aufwand und hohe Wartungs- und Instandsetzungskosten mit sich bringt. Einer der entscheidenden Punkte für die Dauerhaftigkeit und Lebensdauer von Offshore-Anlagen sind das Erkennen und der Schutz vor Korrosion. Bis heute hat sich noch kein Korrosionsschutzsystem für das Zusammenspiel von Effizienz, Montage, Wartung und Instandhaltung bewährt. Daher besteht in diesem Bereich noch entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Das Ziel des Verbundforschungsvorhabens KKS-Gründung war die Entwicklung eines Monitoringsystems zur Erfassung von Korrosion an Gründungsstrukturen im Labormaßstab. Dafür war eine umfassende Bewertung und Beschreibung korrosionsbeeinflussender Faktoren und der Korrosionssysteme notwendig. Im Vorhaben KKS-Gründung wurde die Gründungsstruktur unterhalb der Wasserlinie betrachtet bis hin zum anaeroben Bereich im Sediment. Insbesondere der Sedimentbereich wurde bisher nur unzureichend betrachtet. Da die komplexen Mechanismen in der Sedimentzone noch nicht ausreichend wissenschaftlich untersucht wurden, mussten Möglichkeiten entwickelt werden, um diese zu bewerten.

Im Verbundforschungsvorhaben KKS-Gründung agierte die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) als Forschungsstelle. Die Hauptziele des Teilvorhabens der BAM waren die Bereitstellung einer Messumgebung für das von den Partnern entwickelte Monitoringsystem, die umfassende wissenschaftliche Beschreibung der Korrosionssysteme im Unterwasserbereich und Sediment sowie die Gewinnung von Messdaten zur Verifizierung und Überführung in die Simulation. Als Forschungsstelle war die BAM der Ansprechpartner für die Verbundpartner bei wissenschaftlichen Fragestellungen.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Für einen sicheren und dauerhaften Betrieb von Offshore-Strukturen werden zwingend entsprechende Schutzvorkehrungen benötigt. Ungeschützte Stahloberflächen in maritimer Umgebung sind besonders anfällig für Korrosionsreaktionen und Korrosionsermüdungsversagen. In der Folge kann die Standfestigkeit negativ beeinflusst werden. Standards des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) zur Genehmigung von Anlagen verlangen daher Mindestanforderungen an den Korrosionsschutz zur Gewährleistung der Standsicherheit. Differenziert wird dabei zwischen verschiedenen Zonen (Atmosphäre, Spritzwasser, Wasserwechselwirkung und Unterwasser) sowie nach stofflichen Eigenschaften, Art und Verarbeitung. Die folgenden Korrosionsschutzmaßnahmen sind üblich:

- ausschließliche Beschichtung,
- Beschichtung in Kombination mit Kathodischem Korrosionsschutz (KKS),
- ausschließlicher KKS: galvanische Anode oder Fremdstrom,
- Korrosionszuschlag, meist in Verbindung mit obigen Verfahren.

Im VGB/BAW-Standard zum „Korrosionsschutz von Offshore-Windenergieanlagen und Windparkkomponenten“ sowie in der GfKORR-Richtlinie „Korrosionsschutz von Offshore-Wind-

energieanlagen“ werden ergänzende Anforderungen definiert. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen für Atmosphäre (Einteilung in atmosphärische Korrosivitätskategorien) und Wasser/Erdrich (Einteilung in Immersionskategorien) ergeben sich für OWEA unterschiedliche Korrosionszonen und -kategorien. Jede der Zonen stellt eigene Anforderungen an den Korrosionsschutz. Aufgrund der Komplexität und Diversität wird daher ein gesamtheitliches Korrosionsschutzkonzept verlangt, um die geforderte Nutzungsdauer von üblicherweise 25 Jahren ohne Erneuerung zu gewährleisten. Die Anforderungen an die Korrosionsschutzsysteme für die verschiedenen Freigabestufen werden in entsprechenden Normen geregelt, welche im BSH-Standard angegeben sind, wobei für die Spritzwasserzone (SpWZ) und Wasserwechselzone (WWZ) Beschichtungssysteme unabdingbar sind. Gründungsstrukturen von Unterwasserbauten werden in Deutschland grundsätzlich mit einer kathodischen Korrosionsschutzanlage ausgerüstet.

Für die Betrachtung der Korrosion an OWEA weitestgehend vernachlässigt wurde bisher der Sedimentbereich, da angenommen wird, dass Korrosion aufgrund des vorherrschenden Sauerstoffmangels vernachlässigt werden kann. Da der Sedimentbereich in der Regel jedoch nicht homogen, sondern geschichtet ist, variiert die lokale elektrische und elektrolytische Leitfähigkeit des Sediments um das zu schützende Objekt. Folglich können sich Potentialdifferenzen auf der Stahloberfläche einstellen, was die Ausbildung von Korrosionselementen begünstigen kann. Durch den zusätzlichen Kontakt der Stahlstruktur zum Unterwasserbereich wird dieses System zunehmend komplexer. Es werden daher umfassende Kenntnisse zum Korrosionsverhalten von Werkstoffen zum einen in den unterschiedlichen Belastungszonen zum anderen in verschiedenartigen Wässern benötigt.

Die Durchführung der Korrosionsuntersuchungen und die Prüfung der Funktionstüchtigkeit des Monitoringsystems der Verbundpartner sollte zu Vorhabenbeginn in einer realen Messumgebung durchgeführt werden. Dafür wurde ein Testlabor in einem Laborcontainer mit einem Meerwasserbypass avisiert. Die BAM trug die Kosten der Beschaffung und Aufstellung des Laborcontainers aus ihrem eigenen Größtgerätebudget unabhängig von der Projektfinanzierung und stellte diesen für die Arbeiten im Vorhaben zur Verfügung. Der Laborcontainer sollte an einem Standort im Hafengebiet der Nordseeinsel Norderney aufgestellt werden. Dadurch sollten Funktionstests und Korrosionsuntersuchungen unter Laborgegebenheiten in realem Nordseewasser mit allen seinen spezifischen Einflussfaktoren sowie realem Sediment ermöglicht werden. Über einen Meerwasserbypass sollten mehrere Versuchsbecken mit Nordseewasser befüllt werden. In diesen Wasserbecken sollten die Korrosionsuntersuchungen und die Funktionsprüfung stattfinden. Durch den Zulauf des realen Meerwassers sollte ein reales Versuchsmedium für die Korrosionsuntersuchungen mit allen seinen Eigenheiten (Bewuchssporen, Leitfähigkeit, Chloridgehalt) zur Verfügung stehen. Für jedes Wasserbecken sollte die gesamte Messperipherie inklusive elektrochemischer Messgeräte (Potentiostaten/Galvanostaten) sowie Laborausrüstung zur Verfügung stehen, die gezielte Korrosionsuntersuchungen ermöglichen. Zum Zeitpunkt der Antragseinreichung war die Fertigung, der Transport und die Aufstellung des Laborcontainers in Planung. Der Laborcontainer sollte rechtzeitig zu Beginn der experimentellen Arbeiten am geplanten Standort einsatzfähig sein.

Erfahrungen aus der Öl- und Gasindustrie konnten zur Projektbearbeitung nur teilweise in Betracht gezogen werden, da die Umweltbedingungen bei OWEA-Fundamenten sich standortbedingt unterscheiden.

Zur erfolgreichen Bearbeitung des Verbundforschungsvorhabens wurde ein Projektkonsortium aus vier Partnern aus Forschung und Industrie gebildet:

- Wölfel Engineering GmbH & Co. KG (Verbundkoordinator),
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),
- Steffel KKS GmbH,

- Jörss-Blunck-Ordemann (J-B-O).

Ergänzt wurde das Konsortium durch die zwei assoziierten Partner RWE und Omexon aus der Industrie.

Das Verbundforschungsvorhaben KKS-Gründung wurde durch die Fördermaßnahme „Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE im 6. Energieforschungsprogramm“ im Förderbereich „Windenergie“ gefördert und durch den Projektträger Jülich betreut. Das Teilvorhaben "KKS-Gründung" - Korrosionsmonitoring und aktiver kathodischer Korrosionsschutz von Offshore-Gründungsstrukturen - Teilvorhaben: Korrosionsprüfungen im Laborcontainer“ der BAM wurde mit dem Förderkennzeichen 0324333D gefördert. Als Projektzeitraum wurde der Zeitraum von 01.11.2018 bis zum 31.10.2021 veranschlagt.

Die in dem Projekt erforderlichen wissenschaftlichen Korrosionsuntersuchungen und -prüfungen wurden durch den Fachbereich 7.6 „Korrosion und Korrosionsschutz“ der BAM durchgeführt. Dieser besitzt langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Korrosion, des Korrosionsschutzes und im Bereich der Methodenentwicklung für Korrosionsprüfverfahren. Der Fachbereich 7.6 beschäftigt sich im Rahmen der Forschungstätigkeit und im Rahmen von Schadensgutachten mit den unterschiedlichsten Korrosionsfragestellungen im Bereich der atmosphärischen Korrosion und der Korrosion im Meerwasser.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der ursprüngliche Arbeitsplan des Vorhabens umfasste neun übergeordnete Arbeitspakete. Die Arbeitspakete mit BAM-Beteiligung werden im Folgenden aufgeführt. Die jeweiligen Leiter der Arbeitspakete sind in Klammern hinterlegt.

- *AP 1: Definitionsphase (JBO)*  
Definition der allgemeinen Anforderungen, von Lasten- und Pflichtenheften durch das Projektkonsortium sowie Evaluation eines geeigneten Versuchsträgers
- *AP 2: Simulationen (Steffel)*  
Simulationen als Grundlage für die Funktion des KKS-Systems sowie zur Verifizierung der Ergebnisse der Experimente und vice versa
- *AP 3: Versuchsträger (Steffel)*  
Planung, Konstruktion sowie Beschaffung einer Offshore-Gründungsstruktur (Versuchsträger) im Modellmaßstab
- *AP 4: Laborcontainer (BAM)*  
Einrichtung des Laborcontainers der BAM im Hinblick auf die geplanten Untersuchungen sowie Installation und Inbetriebnahme des Modells einer Offshore-Gründungsstruktur
- *AP 5: Versuche am Modell unter realen Versuchsbedingungen (Steffel)*  
Begleitende Korrosionsuntersuchungen zur Beschreibung des Korrosionssystems sowie Funktionstests sowie kontinuierliches Monitoring mit dem neuentwickelten Messverfahren im Laborcontainer
- *AP 6: Entwickeln von Software und Algorithmen (Wölfel)*  
Datenauswertung, -transfer und -verarbeitung der Messdaten

- AP 7: Ableitung von Maßnahmen zur Anpassung von Richtlinien (BAM)  
Regelwerksarbeit und Arbeit in den Normungsgremien, Definition von normativen Anforderungen
- AP 9: Rückbau des KKS- und Monitoringsystems (BAM)  
Rückbau des KKS- und Monitoringsystems der Firma Steffel und Entleerung des Laborcontainers

Das Flussdiagramm in Abbildung 1 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen mit BAM-Beteiligung.

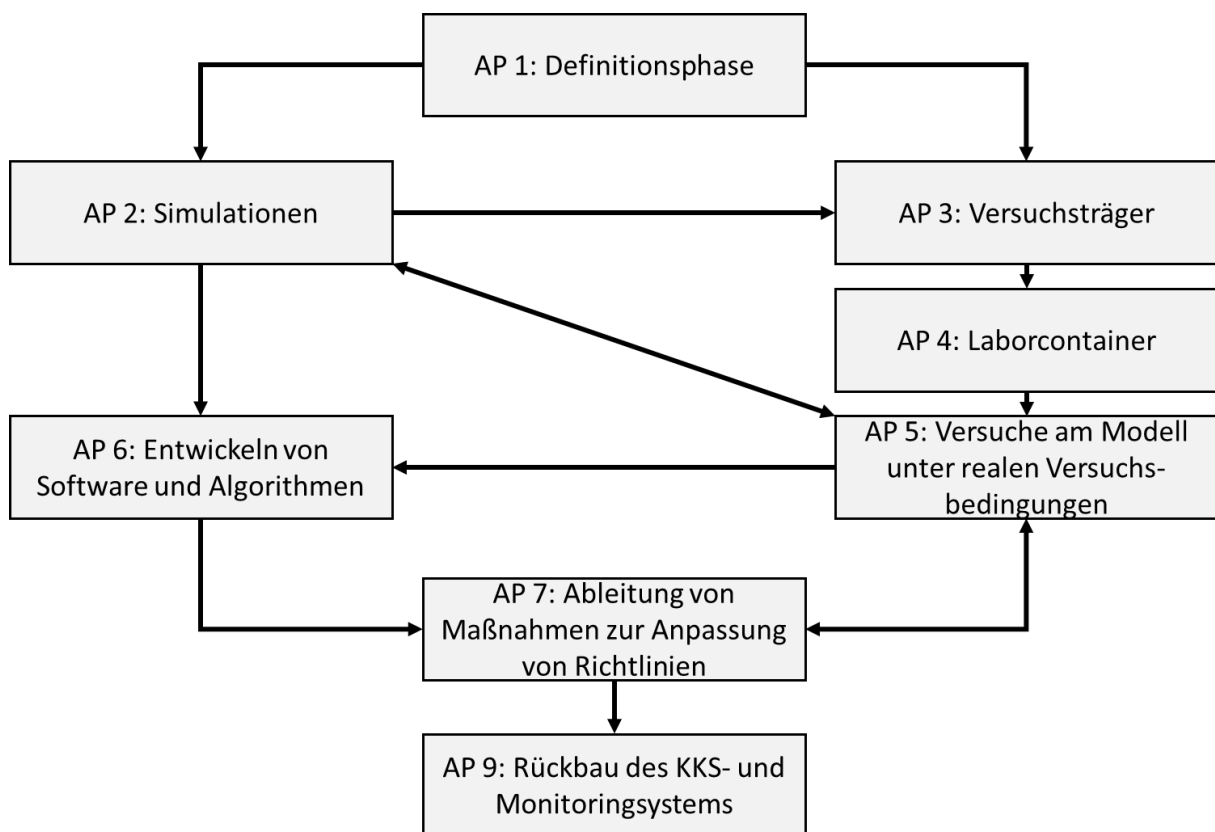


Abbildung 1: Darstellung der Arbeitspakete und der Zusammenhänge der im Vorhaben geplanten Arbeiten mit BAM-Beteiligung

Um die gesetzten Ziele zu erreichen, mussten zunächst die allgemeinen Anforderungen sowie Lasten- und Pflichtenhefte durch das Projektkonsortium erarbeitet werden. Auf dieser Basis wurde ein Modell einer Monopile-Gründungsstruktur in geeignetem Maßstab definiert, konstruiert und mittels eines Unterauftrags gefertigt. Dieses Modell wurde in weiteren Arbeitsschritten durch den Partner Steffel mit dem neuartigen Monitoringsystem ausgerüstet und im Laborcontainer der BAM aufgestellt. Die Partner prüften die Funktionstüchtigkeit der Anlage und des Modells in einer realitätsnahen Messumgebung in künstlichem Meerwasser und Sand als Sediment. Die BAM führte parallel dazu Korrosionsuntersuchungen zur Beschreibung des Korrosionssystems im Laborcontainer und im kleineren Maßstab in den Laborräumen der BAM am Stammgelände in Berlin durch. Anhand der Untersuchungen konnten eine Vielzahl an neuen Erkenntnissen zum Korrosionsverhalten von Gründungsstrukturen im Meerwasser und im Sediment gewonnen werden. Die Erkenntnisse bieten neue Ansätze für anschließende Forschungstätigkeiten und können auch für die Regelwerksarbeit von Interesse sein.

Aufgrund von Verschiebungen im Arbeitsplan während der Projektdurchführung war eine zuwendungsneutrale Laufzeitverlängerung um 8 Monate bis zum 30.06.2022 notwendig, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Der Bedarf und die prognostizierte Laufzeitverlängerung wurden mit den Konsortialpartnern einvernehmlich abgestimmt.

Die Aufgabenstellung und der Arbeitsplan mussten aufgrund jeweils aktueller Entwicklungen während der Versuchslaufzeit angepasst werden. Im Folgenden werden die zeitkritischsten Einflussfaktoren kurz erläutert.

Die finale Planung, Fertigung und Aufstellung des Laborcontainers verzögerte sich durch baurechtliche und sicherheitstechnische Problemstellungen am geplanten Containerstandort Norderney. Aus diesem Grund konnte der Meilenstein M2 „Versuchsträger im Laborcontainer“ in der ursprünglichen Zielzeit (August 2019) nicht erreicht werden. Für die Verzögerungen lassen sich drei Hauptgründe festmachen:

1. Da es sich beim Laborcontainer um eine Größtgeräteinvestition der BAM handelt, musste die Fertigungsleistung entsprechend den Vergaberichtlinien für den öffentlichen Dienst erfolgen. Diese sahen bei der vorliegenden Investitionssumme eine europaweite Ausschreibung mit entsprechend langer Ausschreibungsfrist vor. Als einziger Bewerber bekam die Firma Thiemt den Zuschlag für die Planung, Fertigung und Lieferung des Laborcontainers. Vertraglich war Fa. Thiemt zunächst mit dem Beginn der Fertigung des Laborcontainers an die Genehmigung des Bauantrags auf der Nordseeinsel Norderney gebunden. Durch langwierige Vorabsprachen und Vorabbesprechungen mit dem zuständigen Bauamt und Verzögerungen bei der Bereitstellung wichtiger Antragsdokumente durch den Containerbauer kam es zu zeitlichen Abweichungen vom ursprünglichen Projektplan. Durch die Probleme bei der Einreichung und Bearbeitung des Bauantrags hatte die BAM im September 2019 die Verträge geändert und die Laborcontainerfertigung somit vom Bauantrag gelöst, um weitere Verzögerungen bzgl. des Fertigungsbeginns des Laborcontainers zu vermeiden. Ein Alternativstandort auf dem Testgelände Technische Sicherheit der BAM in Baruth/Mark in Brandenburg wurde den Konsortialpartnern vorgeschlagen.

2. Die Einreichung des Bauantrags für die Fundamente und Medienanschlüsse im Hafen von Norderney konnte erst im Januar 2020 erfolgen. Grund dafür waren ausbleibende Angebote von Planungsbüros in der ersten Ausschreibungsphase. Aus diesem Grund musste die Ausschreibung ein zweites Mal erfolgen. Erst in der zweiten Ausschreibungsphase konnte einem Ingenieurbüro der Zuschlag erteilt werden.

3. Die Fertigstellung des Laborcontainers bei der Fa. Thiemt war ursprünglich für Februar 2020 geplant. Infolge der Corona-Pandemie hatte sich der Fertigstellungstermin um mehrere Monate verschoben. Der Laborcontainer wurde schlussendlich im August 2020 an einem Alternativstandort aufgestellt.

Aufgrund dieser Tatsachen hatte sich das Projektkonsortium gemeinschaftlich mit dem Projektträger für einen Alternativstandort des Laborcontainers auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit (BAM-TTS, Baruth/Mark) entschieden, um dort die Funktionsfähigkeit des neuartigen Korrosionsmonitoringsystems der Fa. Steffel am Versuchsträger zu testen. Auch bei Inbetriebnahme eines anderen Standortes sollte der Laborcontainer aus Kostengründen nicht innerhalb der Projektlaufzeit noch einmal den Standort wechseln und verblieb deshalb am Standort BAM-TTS bis zum Projektende.

Am Alternativstandort konnten Versuche mit dem Monopilemodell und künstlichem Meerwasser ohne Einfluss von marinem Bewuchs durchgeführt werden. Die Funktionstüchtigkeit des neuartigen Korrosionsmonitoring-Systems konnte dennoch erprobt werden und Fehler bei der Messtechnik, sowie praktische Probleme beim Handling ohne lange Anfahrtswege be-

hoben werden. Die Hauptziele des Vorhabens konnten somit am Standort Horstwalde erfüllt werden.

Infolge des Umzugs an den Alternativstandort waren für die BAM Anpassungen der eigenen Arbeiten im Arbeitspaket 5 notwendig, da Untersuchungen an Couponproben und am Versuchsträger ohne den Einfluss des Umgebungsparameters mariner Bewuchs erfolgen mussten. Eine Untersuchung des generellen Korrosionssystems mit einem Fokus auf den Sedimentbereich war ohne weitere Einschränkungen möglich. Für KKS-Untersuchungen musste auf das Labor am BAM-Stammgelände in Berlin ausgewichen werden. Durch eine mögliche Chlorgasentwicklung bei KKS-Versuchen und fehlende Absaugmöglichkeiten im Laborcontainer durften die Versuche aus Sicherheitsgründen nicht im Laborcontainer erfolgen.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Bearbeitung des Teilvorhabens des Partners Steffel kam es zur Verzögerung beim Einbau des Versuchsträgers und der Messperipherie in den Laborcontainer. Dennoch konnte ein ausreichend langes Zeitintervall für Messungen realisiert werden, um die Funktionstüchtigkeit des Monitoringsystems grundsätzlich zu bewerten.

Das Forschungsvorhaben wurde durch die Corona-Pandemie signifikant beeinflusst. Es kam zu deutlichen Verzögerungen bei der Beschaffung von Material, insbesondere elektronischen Bauteilen, Laborabläufe und Versuchsintervalle mussten angepasst werden und Projekttreffen und -besprechungen waren nur digital möglich.

Durch eine an die jeweiligen Problemstellungen angepasste Arbeitsplanung konnten dennoch die Hauptziele des Teilvorhabens der BAM innerhalb der verlängerten Projektlaufzeit erreicht werden.

#### **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Die folgenden Textstellen knüpfen direkt an die Ausführungen aus Abschnitt I.2. an und führen diese fort.

Aufgrund des angestrebten Energiewandels steigt die Anzahl der sogenannten Offshore-Windenergie-Anlagen (OWEA) und somit auch die Menge an Stahlstrukturen in maritimen Umgebungen. Nach ihren korrosiven Einflüssen werden die Bereiche um eine Struktur im maritimen Bereich in fünf Zonen unterteilt: die atmosphärische Zone, die Spritzwasserzone, die Niederwasserzone, die Unterwasserzone und den Bodenbereich, der sich aus Sediment und Schlicke zusammensetzt [1]. Im Vorhaben KKS-Gründung wurde die Gründungsstruktur unterhalb der Wasserlinie betrachtet bis hin zum anaeroben Bereich im Sediment.

Es wurden bereits verschiedene Arbeiten bezüglich der Korrosionsgeschwindigkeit verschiedener Metalle in Offshore-Umgebungen veröffentlicht, wobei sich die meisten dieser Arbeiten hauptsächlich dem atmosphärischen und Meerwasserbereich widmeten [2-4]. Zwar existieren auch Veröffentlichungen zur Korrosion in Meeresböden, diese fokussieren sich jedoch meistens auf mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) durch sulfatreduzierende Bakterien (SRB).

In Arbeiten um Yantao Li et al. [5] und D. Jizhou et al. [6], bezüglich Pipelines in Meeresböden, wurden mehrere Forschungsergebnisse von Auslagerungsversuchen von Stahlproben in Meerwasser und unterschiedlichen Sedimenten in Hinblick auf ihr Korrosionsverhalten diskutiert. Unter anderem haben Li et al. [5] in ihrer Veröffentlichung aus dem Jahr 2000 Auslagerungsversuche an unlegiertem Stahl (A3-Stahl) und niedriglegiertem Stahl (16Mn-Stahl) durchgeführt, durch die die Korrosion im Offshore-Bereich simuliert wurde. Sie haben in Laborversuchen Probenbleche über ein Jahr in drei unterschiedlichen Sedimenten sowie in Meerwasser und Meerwasseratmosphäre ausgelagert und die Bleche in einer Versuchsreihe



einzelnen und in einer weiteren Versuchsreihe elektrisch kontaktiert (kurzgeschlossen) aufgehängt. Es stellte sich heraus, dass die Reihenfolge der Korrosionsgeschwindigkeit für die freien Proben „Meerwasseratmosphäre > Meerwasser > Sediment“ betrug, wogegen bei den elektrisch kontaktierten Proben die Korrosionsgeschwindigkeit für die Sedimentproben zwischen der Meerwasseratmosphäre und Meerwasser lag. Dies erklärten sie unter anderem durch die Bildung von Mikro- und Makrozellen aufgrund der Sauerstoffkonzentrationsunterschiede zwischen den Zonen.

In einer weiteren Veröffentlichung aus dem Jahr 2004 diskutierten Yantao Li et al. [7] den Korrosionseinfluss auf A3-, 16Mn- und 20#-Stahl nach einer dreijährigen Auslagerungskampagne im Chengdao Offshore-Gebiet, wo Proben zum einen einzeln und zum anderen elektrisch kontaktiert (kurzgeschlossen) in der atmosphärischen, der Wechselwasser- und der Dauertauchzone ausgelagert wurden. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die elektrisch kontaktierten Proben im Gegensatz zu den einzelnen Proben einen Makrozelleneffekt aufwiesen. Dabei erhöhte sich die Korrosionsgeschwindigkeit der Dauertauchproben, während sich die des Wechselwasserbereichs reduzierten. Die Korrosionsgeschwindigkeit der Proben in der Spritzwasserzone veränderte sich kaum.

Eine im Jahr 2002 veröffentlichte Arbeit von D. Jizhou et al. [6] fokussierte sich auf den Massenverlust von Baustahl, in drei unterschiedlichen Arten von Sediment. Dabei wurden drei Versuchsgefäße mit 10 kg Sand und Meerwasser aus dem Qingdao-Strand bis zu einer Höhe von 20 cm gefüllt. Es wurden zusätzlich elektrochemische Korrosionsuntersuchungen durchgeführt und dadurch Korrosionsstromdichten sowie Polarisationswiderstände bestimmt. Dadurch konnten Vergleiche zwischen praktischen Ergebnissen der Massenverluste und den Werten, welche über elektrochemische Untersuchungen erhalten wurden, gezogen werden. Hier fehlte jedoch der Vergleich zu Meerwasserproben, insbesondere durch elektrische Kontaktierung dieser mit Sedimentproben. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Korrosionsgeschwindigkeit von unlegiertem Stahl in den Sedimenten niedriger war als die Korrosionsgeschwindigkeit in anderen marinen Umgebungen und zum anderen, dass die Körnung der Sedimente das Korrosionsverhalten beeinflusste. Aus diesem Grund wurde der Sauerstoffdiffusionsmechanismus als signifikanter Faktor in dieser Arbeit gesehen.

Einen umfassenden Überblick über den Kathodischen Korrosionsschutz (KKS) im Stahlwasserbau bietet die HTG-Richtlinie „Korrosionsschutz im Stahlwasserbau“ [8]. Der KKS ist ein aktives System und nur wirksam, wenn die galvanischen Anoden oder das Fremdstromsystem in Betrieb sind und eine angemessene Polarisation des Stahls bewirken, um das Schutzkriterium zu erreichen. Deshalb sollte das Stahl/Elektrolytpotential während der Lebensdauer der Anlage gemessen werden, um die Schutzwirkung nachzuweisen [8]. Anlagen, insbesondere Fremdstromanlagen, sind laut der VGB/BAW-Richtlinie mit einem Mess-, Überwachungs- und Steuerungssystem auszustatten [1]. Die permanenten Veränderungen des Elektrolyten „Meerwasser“ in Hinblick auf Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsrichtung, Leitfähigkeit, pH-Wert und Sauerstoffgehalt erschweren die Nachweisbarkeit des KKS mit der „klassischen“ Potentialmessung vor Ort. Bei der Verwendung von Dauerbezugselektroden ist die Messgenauigkeit der Bezugselektrode über einen längeren Zeitraum fragwürdig. Die Eigenkorrosion sowie das Ansiedeln von marinem Bewuchs auf deren Oberfläche können die Messgenauigkeit zusätzlich stark beeinflussen. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass der KKS auch im Sedimentbereich wirksam ist.

In der Regel werden die Stahlkonstruktionen nur 2-4 m unter das absolute Niedrigwasser beschichtet. Der weitere Unterwasserbereich bleibt unbeschichtet und wird ausschließlich durch eine kathodische Korrosionsschutzanlage geschützt. Biofilme bzw. Bewuchs und damit verbundene mikrobiell induzierte Korrosion können somit in diesen Bereichen eine entscheidende Rolle spielen [9]. Das Zusammenwirken zwischen Biofilmen und kathodischem

Schutz ist schon verschiedentlich untersucht worden. Die Ergebnisse sind aber zum Teil widersprüchlich und lassen damit keine allgemein gültigen Schlussfolgerungen zu. In den für den kathodischen Schutz in Meerwasser relevanten Normen [10-14] wird aber als einer der Hauptfaktoren mit Einfluss auf die Stromdichteanforderungen mariner Bewuchs genannt. Einen Überblick über die weltweit gemachten Erfahrungen mit Problemen im Zusammenhang mit sulfatreduzierenden Bakterien (SRB) und KKS wird in [15] gegeben. Übereinstimmend wird dort festgestellt, dass bei Anwesenheit von SRB oder anderen Bakterien, ein negativeres Schutzpotential eingestellt werden muss. Dies deckt sich mit den Angaben in der DIN EN ISO 13174 [11] und dem NACE Standard SP0169 [16]. In mehreren Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich auf kathodisch geschützten Oberflächen mehr marine Bakterien ansiedeln als auf nicht polarisierten [17-19]. Die vorgenannten Ausführungen zeigen, dass im System Biofilm/Stahl/KKS in Abhängigkeit von den jeweiligen Versuchsbedingungen unterschiedliche Ergebnisse und Schlussfolgerungen gefunden werden können. Für Risikoabschätzungen hinsichtlich des Korrosionsverhaltens von Stählen in Meeresböden, die teilweise bis zu einer Tiefe von 30 bis 50 m eingebunden sind, sollten aber dem Betreiber eindeutige Regeln und Empfehlungen zur Verfügung stehen [9]. Ein Teilziel des geplanten Vorhabens ist es daher, in einem definierten Parameterfeld das Korrosionssystem im Sedimentbereich umfassend zu beschreiben.

Oftmals wird angenommen, dass Korrosion im Sedimentbereich aufgrund des vorherrschenden Sauerstoffmangels vernachlässigt werden kann. Da der Sedimentbereich in der Regel jedoch nicht homogen, sondern geschichtet ist, variiert die lokale elektrische und elektrolytische Leitfähigkeit des Sediments um das zu schützende Objekt. Folglich kann es zu Potentialdifferenzen auf der Stahloberfläche kommen, was die Ausbildung von Korrosionselementen begünstigen kann. Zusätzlich können sich auch Konzentrations- und Belüftungselemente (durch einen Sauerstoffgradienten) bilden, die die Korrosion zusätzlich verstärken können.

Ein weiterer stark vernachlässigter Themenbereich sind Korrosionsvorgänge innerhalb der Turmstruktur bei Monopile-Anlagen. Da es sich um abgeschlossene Bereiche handelt, wird oft von einer sauerstofffreien bzw. sauerstoffarmen Atmosphäre ausgegangen, in der keine Korrosionsvorgänge vermutet werden. Untersuchungen zeigen aber, dass zum Teil heftige Korrosionsvorgänge durch eintretendes Wasser auch innerhalb der Turmstruktur stattfinden können, die stark unterschätzt werden [20]. Der Großteil der wissenschaftlichen Untersuchungen beschäftigt sich mit KKS-Systemen und Korrosionsgeschwindigkeiten an der Außenseite der Windenergieanlage. Über Korrosionsgeschwindigkeiten innerhalb der Turmstruktur gibt es dagegen bisher nur eine kleine Datenbasis.

Als besondere Herausforderung stellt sich die Nachstellung des Korrosionssystems Meerwasser/Sediment im Labormaßstab dar. Es können immer nur idealisierte Systeme eingestellt werden, um unter beherrschbaren Bedingungen zu messen. Oftmals wird künstliches Meerwasser nach entsprechenden Normen [21] verwendet, welches in seiner Zusammensetzung realem Nordseewasser nachempfunden ist. Dennoch gestaltet es sich schwierig, Parameter wie Strömung, Gezeitenwechsel, Temperaturwechsel, Änderungen in der Wasserzusammensetzung durch Süßwasserzufluss und insbesondere marinem Bewuchs nachzustellen. Die Wachstumsprozess von Makro- und Mikrobiologie und das Vorhandensein von Bewuchssporen sind an bestimmte Anforderungen geknüpft, sodass eingestellte Biotope oftmals nicht über längere Messzeiträume im Labor aufrechterhalten werden können. Darüber hinaus ist es eine Herausforderung, reales Sediment aus tieferen Meeresbodenschichten zu bekommen und dabei gleichzeitig relevante Bewuchssporen am Leben zu erhalten. Dennoch sind auch in einem künstlichen Versuchsmedium Korrosionsuntersuchungen und die Evaluation von Messeinrichtungen und Messverfahren möglich, um generelle Aussagen zu erhalten. Dabei muss aber immer beachtet werden, dass mariner Bewuchs zu einem abweichenden Korrosions-

verhalten führen und es daher immer Unterschiede zum realen System geben kann. Aus diesem Grund können gewonnene Aussagen nicht ohne weiteres auf reale Systeme verallgemeinert werden. Seit einigen Jahren gibt es daher verstärkt die Bestrebung vom idealisierten Versuchsmedium hin zum realen Medium zu kommen, was sich in einem Ortswechsel der Untersuchungen zum Standort des realen Korrosionssystems widerspiegelt.

Die oben genannten Ausführungen verdeutlichen die Komplexität der Problemstellungen beim Korrosionsschutz in der Unterwasser- und Sedimentzone von Windenergieanlagen im Offshore-Bereich. Mit gravimetrischen Methoden können zwar Korrosionsgeschwindigkeiten bestimmt werden, ein tieferer Einblick in Korrosionsmechanismen ist darüber hinaus aber nicht möglich. Aus diesem Grund müssen gezielt elektrochemische Untersuchungsmethoden angewandt werden. Über diese kann ein Einblick in die Korrosionsmechanismen gewonnen und Korrosionsschutzmethoden evaluiert werden. In diesem Bereich gibt es noch viel Forschungsbedarf und es ergibt sich ein Ansatzpunkt für weiterführende Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens KKS-Gründung insbesondere für den Sedimentbereich.

Für die Recherche der wissenschaftlichen Literatur wurde sich verstärkt auf die Korrosionsfachjournale „Materials and Corrosion“ (WILEY), „Corrosion Science“ (Elsevier) und „Corrosion Engineering, Science and Technology“ (Taylor and Francis) konzentriert.

Neben den gängigen Regelwerken und Vorgaben für Offshore-Windenergieanlagen [1, 22] und KKS-Systeme [8, 23] wurde das Beuth-Portal zur Recherche relevanter Normen und Standards für Recherchen herangezogen.

#### Literaturstellen:

- [1] VGB/BAW-Standard "Korrosionsschutz von Offshore-Bauwerken zur Nutzung der Windenergie", Teile 1 bis 4., Hrsg.: VGB PowerTech e.V., Verlag: VGB PowerTech Service GmbH, Essen, 2018.
- [2] F. L. Laque, Marine corrosion: causes and prevention. United States: N. p., 1975.
- [3] D. Gassama, A. A. Diagne, I. Yade, M. Fall, S. Faty, Investigations on the corrosion of constructional steels in different aqueous and simulated atmospheric environments, Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia 29(2):299, 2015.
- [4] C. I. S. Santos, M. H. Mendonca, I.T.E Fonseca, Corrosion of brass in natural and artificial seawater, Journal of Applied Electrochemistry 36:1353-1359, 2006.
- [5] Y. Li, Y. Li, B. Hou, Effect of different offshore seabed sediment on steel corrosion, Materials and Corrosion 51, 570-573, 2000.
- [6] D. Jizhou, H. Baorong, H. Yanliang, S. Huyuan, L. Yan, M. Shide, Corrosion of mild steel in different granularity seabed sediment saturated with seawater, Materials and Corrosion 53, 845-849, 2002.
- [7] Y. Li, B. Hou, H. Li, J. Zhang, Corrosion behavior of steel in Chengdao offshore oil exploitation area, Materials and Corrosion 2004, 55, No. 4.
- [8] Hafentechnische Gesellschaft e.V. (HTG), Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau, Hamburg, 2009.
- [9] O. Heins, T. Krebs, M. Baumann, G. Binder, Korrosionsschutz von Offshore-Windenergieanlagen - Einteilung, Normung und praktische Erfahrungen, HTG-Kongress in Würzburg, 9. September 2011.

- [10] DIN EN 12473, Allgemeine Grundsätze des kathodischen Korrosionsschutzes in Meerwasser; Deutsche Fassung EN 12473:2014, Beuth-Verlag.
- [11] DIN EN ISO 13174:2013-05, Kathodischer Korrosionsschutz für Hafengebäude (ISO 13174:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13174:2012, Beuth-Verlag.
- [12] SN EN 12474:2001-06, Kathodischer Korrosionsschutz für unterseeische Rohrleitungen; Beuth-Verlag.
- [13] DIN EN 12495:2000-04, Kathodischer Korrosionsschutz von ortsfesten Offshore-Anlagen aus Stahl; Deutsche Fassung EN 12495:2000, Beuth-Verlag.
- [14] DIN EN 13173:2001-07, Kathodischer Korrosionsschutz für schwimmende Offshore-Anlagen aus Stahl; Deutsche Fassung EN 13173:2001, Beuth-Verlag.
- [15] M. de Romero, O. de Rincón, L. Ocampo, Cathodic protection efficiency in the presence of SRB: State of the art, NACE CORROSION 2009, NACE International, Houston 2009, paper no. 09407.
- [16] NACE Standard SP 0169, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, Houston, 2013.
- [17] B. Little, P. A. Wagner, K. R. Hart, R. I. Ray, Spatial Relationships between Bacteria and Localized Corrosion, NACE CORROSION 1996, NACE International, Houston 1996, paper no. 278.
- [18] H. A. Videla, S. G. Gomez de Saravia, M. F. L. De Mele, Early Stages of Bacterial Biofilm and Cathodic Protection Interactions in Marine Environments, 12th International Corrosion Congress, Houston, 1993, p. 3687.278/4.
- [19] G. Zabala, R. Garcia, G. Munoz, G. Garcia, I. Guzman, F. Rivera-Dabur, C. M. Ulloa-Ochoa, Sulfate Reducing Bacteria Influence on the Cathodic Protection of Pipelines that transport Hydrocarbon, NACE CORROSION 2003, NACE International, Houston 2009, paper no. 03087
- [20] L. Hilbert, A. Black, F. Andersen und T. Mathiesen, Inspection and monitoring of corrosion inside monopile foundations for offshore wind turbines, in EUROCORR, Stockholm, Sweden, 2011.
- [21] DIN EN ISO 15711:2005-03, Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Widerstandes gegen kathodische Enthaltung von Beschichtungen in Meerwasser (ISO 15711:2003); Deutsche Fassung EN ISO 15711:2004, Beuth-Verlag.
- [22] BSH, Mindestanforderungen für den Korrosionsschutz an Offshore-Anlagen in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) von Nord- und Ostsee, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 1. Fortschreibung 28.07.2015 – Berichtigung vom 01.12.2015, Aktualisierung vom 01.06.2021.
- [23] BAW-Merkblatt „Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (MKKS)“, Hrsg.: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, Ausgabe 2015.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Arbeit im Verbundforschungsvorhaben wurde ein Projektkonsortium (siehe Abschnitt I.2) zusammengestellt. Im Vorhaben war eine enge Zusammenarbeit der Industrievertreter Wölfel, Steffel und J-B-O untereinander sowie mit der BAM als Forschungsstelle notwendig,

um eine erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens zu gewährleisten. Monatliche Jour Fixes wurden vom Koordinator Wölfel organisiert und haben die enge Abstimmung der Partner bzgl. der Arbeitsschritte zusätzlich zu halbjährigen Projekttreffen gewährleistet.

Als Forschungsstelle war die BAM Ansprechpartner für wissenschaftliche Fragestellungen zur Korrosion, zum Korrosionsschutz und zur Korrosionsprüfung für die Verbundpartner.

Die Zusammenarbeit mit dem Koordinator Wölfel erfolgte intensiv auf administrativer Ebene von Seiten der jeweiligen Projektleitungen. In diesem Rahmen erfolgten auch Ergebnisdiskussionen und die Diskussion der Ausrichtung der einzelnen Arbeitsschritte.

Die Zusammenarbeit mit dem Partner J-B-O erfolgte hinsichtlich der Richtlinienarbeit und -abstimmung. Darüber hinaus hat J-B-O das Modell des Monopiles im Maßstab 1:30 definiert und konstruiert. Durch die Vorgaben von J-B-O konnte das Korrosionssystem (Füllhöhen von Sand und künstlichem Meerwasser, zu verwendende Stahlgüte) entsprechend des vorgesehenen Maßstabs in den Becken des Laborcontainers realisiert werden. Durch die Absprachen konnte somit die Praxisrelevanz der Forschungsarbeiten gewährleistet werden.

Mit dem Partner Steffel erfolgte die engste Zusammenarbeit der BAM innerhalb des Verbundvorhabens. Aufgrund der Integration der Messtechnik von Steffel in die Monopile-Modellstruktur und den Laborcontainer waren engmaschige Abspracheprozesse notwendig, da sowohl die Infrastruktur der BAM (Laborcontainer) genutzt wurde, als auch eine Korrelation mit den Korrosionsuntersuchungen der BAM notwendig war. Es mussten dezidierte Absprachen bezüglich des Transports von Messtechnik, der Raumplanung innerhalb des Laborcontainers sowie Absprachen hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes getroffen werden. Es wurde eine Datenverbindung eingerichtet, über die der Partner Steffel per Remote-Zugang jederzeit auf die Messdaten der Monitoringanlage zugreifen konnte. Zur Dokumentation von Wartungstätigkeiten und von Stillstandzeiten wurde ein für beide Seiten zugängliches digitales Logbuch erstellt. Darüber hinaus wurden aufgetretene Störungen zeitnah gegenseitig kommuniziert und Problemlösungen eingeleitet. Für die regelmäßigen Wartungs- und Reparaturtermine wurde dem Partner Steffel der Zugang zum BAM-Versuchsgelände Technische Sicherheit TTS in Baruth/Mark gewährleistet und jeweils ein Mitarbeiter der BAM als Ansprechpartner zur Seite gestellt.

Das Projektkonsortium hat sich in enger Absprache gemeinschaftlich dafür entschieden, am Alternativstandort BAM TTS in Baruth/Mark die Funktionsfähigkeit des neuartigen Korrosionsmonitoringsystems am Versuchsträger unter idealisierten Bedingungen zu testen und aus Kostengründen nicht innerhalb der Projektlaufzeit zu einem Alternativstandort zu wechseln.

Die Absprachen zum anfänglich avisierten Laborcontainerstandort Norderney erfolgten mit dem zuständigen Hafenbetreiber Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG (NPorts) und einem externen Forschungspartner für marinen Bewuchs, Dr. Brill + Partner GmbH Institut für Hygiene und Mikrobiologie. Die Verhandlungen waren aufgrund von baurechtlichen und sicherheitstechnischen Hindernissen nicht erfolgreich und wurden aus diesem Grund abgebrochen.

Während der Projektlaufzeit erfolgten in Q1/2022 Absprachen mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee bezüglich eines Laborcontainerstandortes am Eidersperrwerk. Der Standort war zwar im Projektzeitraum nicht mehr realisierbar. Die Verhandlungen sind aber weit fortgeschritten und eine Aufstellung des Laborcontainers ist nach Projektende am Eidersperrwerk für Q1/Q2 2023 geplant.

Mit Unterstützung des Projektträgers PTJ wurde Kontakt zu zwei anderen Forschungsverbänden unter Betreuung des PTJ aufgenommen. Ziel war ein Informationsaustausch zu Richtlinien- und Normenübersichten sowie die zukünftige Erstellung einer umfassenden, projekt-

übergreifenden Regelwerksübersicht. Eine Vernetzung wurde angestoßen und könnte zu Anschlussvorhaben bezüglich Regelwerksthemen führen.

Es erfolgten zudem eine Kontaktaufnahme und ein Austausch mit Vertretern des Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Arbeitsgruppe „Neue Werkstoffe / Beschichtung, Bewitterung und Korrosionsschutz“, zu den Themen Elementbildung und Messaufbauten unter Verwendung von Meerwasser sowie Sediment zur Nachstellung realer Korrosionssysteme.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Hauptziele des Teilvorhabens der BAM waren die Bereitstellung einer Messumgebung für das von den Partnern entwickelte Monitoringsystem, die umfassende wissenschaftliche Beschreibung der Korrosionssysteme im Unterwasserbereich und Sediment sowie die Gewinnung von Messdaten zur Verifizierung und Überführung in die Simulation. Die Hauptziele des Vorhabens wurden erreicht und es wurden grundlegende Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten von Offshore-Stahl im Unterwasser und Sedimentbereich gewonnen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in der Anlage 1 zu finden. Diese beinhaltet die Folien der Abschlusspräsentation und fasst die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen und Arbeiten zusammen.

Im Folgenden wird eine detaillierte Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen in den jeweiligen Arbeitspaketen gegeben.

#### II.1. – AP 1: Definitionsphase

<b>Arbeitsaufgabe:</b> Definition der allgemeinen Anforderungen, von Lasten- und Pflichtenheften durch das Projektkonsortium sowie Evaluation eines geeigneten Prototyps
<b>Ziele des Arbeitspaketes</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Erstellung Lasten- und Pflichtenheft</li><li>• Erstellung einer Konstruktionszeichnung des Modells einer Monopile-Gründungsstruktur</li><li>• Zusammenstellung ausschreibungsrelevanter Unterlagen für das Modell einer Monopile-Gründungsstruktur</li><li>• Evaluation des Standes relevanter Richtlinien</li></ul>
<b>Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Es wurde eine detaillierte Übersicht über die für das Projekt relevanten Normen und Richtlinien (Regelwerke) erstellt. Die Übersicht enthält eine Bewertung der einzelnen Regelwerke, welche wichtige Punkte rund um das Thema KKS und das Korrosionsverhalten von Offshore-Gründungsstrukturen aufzeigt und den Inhalt zusammenfasst. Dieser Übersicht wurde ein organisatorischer Teil hinzugefügt, welcher die Mitgliedschaft des Konsortiums in den entsprechenden Fachausschüssen der Regelwerke und Normen spiegelt. Aus der thematischen Übersicht wurden Anforderungen an ein Monitoring-System von Offshore-Gründungsstrukturen seitens der Regelwerke identifiziert und den Partnern kommuniziert.</li><li>• Mit Unterstützung des Projektträgers wurde Kontakt zu anderen Forschungsverbänden unter Betreuung des PTJ aufgenommen. Ziel war ein Informationsaustausch zu Richtlinien- und Normenübersichten bezüglich Korrosion von OWEA-Gründungsstrukturen und Offshore-Bauwerken. Ein zukünftiges Ziel der Tätigkeiten beinhaltet die Erstellung einer umfassenden, projektübergreifenden Regelwerksübersicht für nationale und internationale Regelwerke.</li><li>• Die BAM hat gemäß ihrer Teilvorhabenbeschreibung ein Lasten- und Pflichtenheft erstellt.</li><li>• Das Modell des Monopiles im Maßstab 1:30 wurde durch den Partner J-B-O definiert und konstruiert. Durch die Vorgaben von J-B-O konnte das Korrosionssystem (Füllhöhen von Sand und künstlichem Meerwasser, zu verwendende Stahlgüte) entsprechend des vorgesehenen Maßstabs in den Becken des Laborcontainers realisiert werden. Durch die Absprachen konnte somit die Praxisrelevanz der Forschungsarbeiten gewährleistet werden.</li></ul>

## II.1. – AP 2: Simulationen

<b>Arbeitsaufgabe:</b> Simulationen als Grundlage für die Funktion des KKS-Systems sowie zur Verifizierung der Ergebnisse der Experimente und vice versa
<b>Ziele des Arbeitspaketes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Erstellung eines Simulationsmodells des Versuchsträgers und ständige Anpassung des Modells durch Rückführung von realen Messdaten (BAM unterstützend)</li><li>• Simulation des neuartigen Monitoringsystems (BAM unterstützend)</li></ul>
<b>Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Simulationen bildeten die Grundlage für die Bewertung des neuartigen Monitoringsystems und waren durchgehend über die gesamte Projektlaufzeit vorgesehen. Die BAM unterstützte die Partner als Forschungsstelle mit ihrer Expertise bzgl. Korrosionsvorgängen und besorgte die Versorgung mit realen Messdaten aus dem Laborcontainer. Sie unterstützte damit die stetige Verifizierung der Simulationen.</li><li>• Es wurden je nach Bedarf Daten zu Korrosionsgeschwindigkeiten in den jeweiligen Belastungszonen und sowie Daten zur Messumgebung (Wasserzusammensetzung, Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffgehalt) den Partnern zur Verfügung gestellt.</li></ul>

## II.1. – AP 3: Versuchsträger

<b>Arbeitsaufgabe:</b> Planung, Konstruktion sowie Beschaffung einer Offshore-Gründungsstruktur im Modellmaßstab
<b>Ziele des Arbeitspaketes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• funktionstüchtiger Versuchsträger</li><li>• Funktionstüchtigkeit des neuen KKS-Systems wird am Versuchsträger belegt</li></ul>
<b>Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Das Modell des Monopiles wurde im Maßstab 1:30 durch das Projektkonsortium definiert und von J-B-O konstruiert. Die BAM vergab den Unterauftrag zur Fertigung des Versuchsträgers an ein Stahlbauunternehmen. Der Versuchsträger bestand aus mehreren Ringsegmenten aus geschweißtem Baustahl. Es wurde der Baustahl S355J2C+G03 verwendet, der auch für Offshore-Konstruktionen zum Einsatz kommt. Die Ringsegmente besaßen jeweils definierte unterschiedliche Materialstärken, die an einen realen Monopile maßstabsgetreu angelehnt waren.</li><li>• Der Prototyp wurde direkt an den Projektpartner Steffel geliefert. Dort wurde er mit der notwendigen Messtechnik versehen. Anschließend erfolgten die ersten Vorversuche durch den Partner Steffel mit dem neu entwickelten Monitoringsystem (Bestimmung von Initialwerten).</li><li>• Die Funktionstüchtigkeit des Versuchsträgers wurde durch den Partner Steffel in Q3/2020 bestätigt.</li><li>• Darüber hinaus hatte die BAM im Arbeitspaket 3 nur beratende Tätigkeiten.</li></ul>



## II.1. – AP 4: Laborcontainer

<b>Arbeitsaufgabe:</b> Einrichtung des Laborcontainers der BAM sowie Installation und Inbetriebnahme des Modells einer Offshore-Gründungsstruktur
<b>Ziele des Arbeitspaketes</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Einrichtung des Laborcontainers mit notwendiger Peripherie</li><li>• Installation des Versuchsträgers</li><li>• Funktionstüchtigkeit des neuen KKS-Systems am Versuchsträger im Laborcontainer nachweisen</li></ul>
<b>Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Die Peripherie im Laborcontainer wurde geplant. Bei der Planung der mit Meerwasser durchströmten Versuchsbeckens mit dem Monopile als Versuchsträger im Maßstab 1:30 wurden hierbei sowohl die Materialien und Maße des Versuchsbeckens als auch die Höhe des Sedimentbereichs definiert, in dem der Monopile stand. Eine Dachluke, von dem Containerdach aus begehbar, wurde für die Installation des Versuchsträgers geplant.</li><li>• Aufgrund der Integration der Messtechnik des Partners Steffel in den Laborcontainer waren engmaschige Abspracheprozesse notwendig, da sowohl die Infrastruktur der BAM (Laborcontainer, Strom, Internetzugang) genutzt wurde, als auch eine Korrelation mit den Korrosionsuntersuchungen der BAM notwendig war. Es mussten dezidierte Absprachen bezüglich des Transports von Messtechnik, der Raumplanung innerhalb des Laborcontainers sowie Absprachen hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes getroffen werden.</li><li>• Die Bereitstellung des Laborcontainers als Messumgebung erfolgte mit einer kritischen Verzögerung im Hinblick auf den Arbeitsplan. Die Gründe dafür sind in Abschnitt „1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens“ detailliert beschrieben. Die Fertigstellung des Laborcontainers bei der beauftragten Fa. Thiemt war ursprünglich für Februar 2020 geplant. Infolge der Corona-Pandemie hatte sich der Fertigstellungstermin um mehrere Monate verschoben. Der Laborcontainer wurde schlussendlich in KW 33/2020 an einem Alternativstandort aufgestellt.</li><li>• Das Projektkonsortium hatte sich in enger Absprache gemeinschaftlich dafür entschieden, am Alternativstandort BAM TTS in Baruth/Mark die Funktionsfähigkeit des neuartigen Korrosionsmonitoringsystems am Versuchsträger unter idealisierten Bedingungen zu testen und aus Kostengründen nicht innerhalb der Projektlaufzeit zu einem Alternativstandort zu wechseln. Durch die Aufstellung des Laborcontainers am Alternativstandort konnten die Arbeiten im Arbeitspaket 5 mit Anpassungen fortgeführt werden.</li><li>• Es konnten am Alternativstandort Versuche mit dem Monopilemodell und künstlichem Meerwasser ohne Einfluss von marinem Bewuchs durchgeführt werden. Die Funktionstüchtigkeit des neuartigen Korrosionsmonitoring-Systems konnte erprobt werden und Fehler bei der Messtechnik, sowie praktische Probleme beim Handling ohne lange Anfahrtswege behoben werden. Die Hauptziele des Vorhabens konnten somit am Alternativstandort erfüllt werden.</li><li>• Es wurde am Standort BAM-TTS eine Datenverbindung eingerichtet, über die der Partner Steffel per Remote-Zugang jederzeit auf die Messdaten der Monitoringanlage zugreifen konnte. Zur Dokumentation von Wartungstätigkeiten und von Stillstandzeiten wurde ein für beide Seiten zugängliches digitales Logbuch erstellt. Darüber hinaus wurden aufgetretene Störungen zeitnah gegenseitig kommuniziert und Problemlösungen eingeleitet.</li><li>• Die Versuchsumgebung im Laborcontainer wurde abweichend vom ursprünglichen Plan mittels eines idealisierten Systems eingerichtet. Anstatt realem Nordseewasser und Sediment wurden ca. 8000 Liter künstliches Meerwasser nach DIN EN ISO 15711 hergestellt und Sand als Sedimentersatz verwendet.</li><li>• Der Versuchsträger wurde am 03.12.2020 in das Großversuchsbecken des Laborcontainers eingebaut. Anschließend erfolgte der Einbau der Messtechnik des Partners Steffel in gemeinsamer Absprache. Die notwendigen Elektroden und die Diagnosestäbe wurden entsprechend eines detaillierten Plans eingebaut. In Q1/2021 erfolgte eine erste Inbetriebnahme und die ersten Versuche zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit. Die Funktionstüchtigkeit konnte grundsätzlich festgestellt werden.</li><li>• Aufgrund von Problemen in der Messtechnik und eines unvorhergesehenen Stromschlags waren im Anschluss mehrere Reparatur- und Wartungstermine durch den Partner Steffel</li></ul>

notwendig, um die Funktionstüchtigkeit des Systems zu gewährleisten. Reparaturmaßnahmen am Monitoringsystem durch den Partner Steffel waren bis Q1/2022 notwendig und verzögerten einen weiteren kontinuierlichen Betrieb des Versuchsträgers.

- Eine Inbetriebnahme von KKS-Versuchen war innerhalb des Projektzeitraums nicht möglich, da die Gefahr einer Chlorgas- und Wasserstoffentwicklung bestand. Berechnungen zum theoretischen Austritt der Stoffe zeigten, dass kritische Innenraumgrenzwerte überschritten werden können.

## II.1. – AP 5: Versuche am Modell unter realen Versuchsbedingungen

### **Arbeitsaufgabe:**

Voruntersuchungen und Funktionstests sowie kontinuierliches Monitoring mit der neuentwickelten KKS-Methodik im Laborcontainer

### **Ziele des Arbeitspaketes**

- umfassende wissenschaftliche Beschreibung des Korrosionssystems in den Belastungszonen „Unterwasserbereich“ und „Sedimentbereich“ mittels Couponproben
- Untersuchung des Einflusses der zentralen Umgebungsfaktoren wie Wasserbewegung, Sauerstoffzufuhr und Temperatur auf die Funktionalität des neuartigen Monitoring-Systems und auf das Korrosionssystem.
- Bereitstellung relevanter Daten des Korrosionssystems (Monitoring von Einflussfaktoren wie Wasserzusammensetzung, Temperatur, mariner Bewuchs) für Simulationen und die Erstellung von Modellen

### **Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan**

- Historische Gewässerdaten der Insel Norderney (als zu Projektbeginn geplanter Standort) wurden als Grundlage für die den späteren Betrieb des Laborcontainers ausgewertet.
- Eine Vielzahl von Wasserproben aus der Ostsee, Nordsee und von Binnengewässern wurden über die Projektlaufzeit gesammelt und umfassend hinsichtlich der Leitfähigkeit und der Wasserzusammensetzung (Anionen- und Kationengehalt) analysiert. Diese Untersuchungen bildeten die Grundlage für die Evaluation der Wasserzusammensetzung mittels künstlichen Meerwassers im Laborcontainer und im Labor am Stammgelände der BAM.
- Das künstliche Meerwasser im Laborcontainer wurde regelmäßig analysiert, um die richtige Einstellung des Korrosionsmediums zu prüfen und ggf. gegenzusteuern. Dabei wurde festgestellt, dass die Salzkonzentration und die pH-Werte über die Monate steigen. Dies wurde mit der Verdunstung des Wassers in Zusammenhang gebracht, weshalb als Gegenmaßnahme Leitungswasser in den Wasserkreislauf nachgefüllt wurde. In Einzelfällen war auch eine Einstellung des Salzgehaltes nach DIN EN ISO 15711 notwendig.
- Aufgrund des Standortwechsels von Norderney zum BAM-TTS und die Verwendung von künstlichem Meerwasser und Sand als Sediment konnten keine Untersuchungen zur Wechselwirkung von marinem Bewuchs mit Korrosionsmechanismen durchgeführt werden. Durch den Alternativstandort BAM-TTS war eine Anpassung des Arbeits- und Kostenplans der BAM notwendig.
- Dennoch war im idealisierten System am Standort BAM-TTS nach wenigen Wochen eine Grünfärbung des Wassers feststellbar. Es stellte sich heraus, dass die biologische Zusammensetzung im Wasserbereich zu 99,5% aus Grünalgen bestand und im oberen Sedimentbereich zu 40%. Die anderen Anteile setzen sich aus diversen chemoheterotrophen und methylotherophen Bakterien zusammen. Ein direkter Einfluss der detektierten Mikroorganismen auf Korrosionsmechanismen konnte im Rahmen der Untersuchungen im Forschungsvorhaben nicht nachgewiesen werden. Um einen Einfluss gezielt festzustellen oder auszuschließen, müssen tiefergehende Versuchsreihen durchgeführt werden.
- Zur Vorbereitung der Versuche im Laborcontainer wurden in den Laboren der BAM am Stammgelände im kleinskaligen Format Korrosions- und KKS-Experimente mit realem Nordseewasser und künstlichem Meerwasser durchgeführt. Gezielt wurde der Einfluss der Potentiallage, Temperatur und Elektrolytbewegung auf die resultierenden Schutzstrom-

dichten untersucht. Mittels eines Ansatzes der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments) konnte der Verlauf der Schutzstromdichte unter Variation der Temperatur und des Schutzpotentials gezeigt werden. Diese Ergebnisse konnten mit den Verläufen des Sauerstoffgehaltes des Meerwassers während dieser Messungen korreliert werden. Darüber hinaus wurde ein signifikanter Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Bildung kalkhaltiger Schichten unter KKS-Einfluss festgestellt. Diese Erkenntnisse sind wichtig, um marine Korrosionssysteme zukünftig gezielt im Labor nachstellen zu können.

- Die BAM plante im Projekt Experimente an kleinformatigen Stahl-Couponproben aus Offshore-Baustahl in den kleineren Wasserbecken des Laborcontainers. Bei diesen Experimenten wurden die Couponproben an speziell gefertigten Probenracks vertikal in den Wasserbecken ausgelagert und elektrochemisch instrumentiert. Dabei wurden alle relevanten Belastungszonen von Gründungsstrukturen unterhalb der Wasserlinie nachgestellt (z.B. Unterwasser- und Bodenzone). Diese Belastungszonen lagen auch am großen Versuchsträger vor. Es wurden sowohl außenstromlose Experimente als auch Experimente mittels elektrochemischer Polarisationsmethoden sowie gravimetrische Untersuchungen durchgeführt. Zwei Wasserbecken wurden mit stagnierendem Wasser und zwei weitere Wasserbecken mit bewegtem Wasser betrieben, um den wichtigen Einfluss der Sauerstoffzufuhr auf die elektrochemischen Kennwerte einordnen zu können. Weiterhin wurde der Einfluss von Elementströmen bei einer vom Unterwasser- bis in den Sedimentbereich durchgehenden Struktur gemessen.
- Während der Auslagerungen wurden über die elektrochemische Instrumentierung die freien Korrosionspotentiale der Couponproben gemessen und deutliche Unterschiede hinsichtlich der Potentiallagen zwischen den einzelnen Belastungszonen festgestellt. Zusätzlich waren signifikante Unterschiede zwischen den beiden Versuchsbecken zu erkennen, was auf die Sauerstoffzufuhr in den Becken mit bewegtem Wasser zurückzuführen war, welche sich auf die Potentialbildung auswirkte. Im Sedimentbereich (sauerstoffarm) unterschieden sich die Potentiale dagegen nicht. Dies zeigte, dass im oberen Wasserbereich die Sauerstoffzufuhr am höchsten ist, mit der Tiefe abnimmt und im Bodenbereich keine Rolle mehr spielt. Im Unterwasserbereich nahe der Wasserlinie spielte die Positionierung der Proben zur Einströmungsöffnung des Frischwassers in den Becken ebenfalls eine Rolle.
- Die Beobachtungen zum unterschiedlichen Korrosionsverhalten in den einzelnen Belastungszonen konnten auch über die gravimetrisch ermittelten Massenverluste bestätigt werden. Die Korrosionsgeschwindigkeiten nahmen mit zunehmender Wassertiefe ab und waren im Sedimentbereich signifikant geringer als nahe der Wasserlinie. Bei den Proben im bewegten Wasser war die Korrosionsgeschwindigkeit höher als bei den in stagnierendem Wasser getauchten Proben.
- Aus der Literaturrecherche ging hervor, dass sich während eines KKS-Betriebes kalkhaltige Schichten auf den Stahloberflächen bilden können. Daher wurde ein zusätzlicher Fokus auf die Voraussetzungen zur Bildung dieser Schichten aus dem künstlichen Meerwasser gelegt. Diese Schichten können das Korrosionsverhalten sowie den notwendigen Schutzstrom einer KKS-Anlage signifikant beeinflussen. Diese Untersuchungen erfolgten in den Laboren am Stammgelände der BAM im kleinskaligen Format.
- Die sich bildenden Schichten wurden mittels der Profilometrie, der Röntgendiffraktion, der Rasterelektronenmikroskopie und der spektralen Ellipsometrie hinsichtlich ihrer Schichtdicke, den strukturellen Eigenschaften (Topografie und Porosität) und der Elementzusammensetzung im Submikro- und Nanomaßstab analysiert. Die Schichtbildung wurde potentiostatisch in Abhängigkeit der Auslagerungszeit, der Temperatur und des angelegten Schutzpotentials untersucht.
- Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich die im Labor erzeugten Schichten von denen im Becken des Laborcontainers hinsichtlich ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Im Labor bildeten sich vorwiegend Magnesiumhydroxid- ( $Mg(OH)_2$ ), im Laborcontainer hingegen kalkhaltige- ( $CaCO_3$ ) Schichten. Die Gründe dafür lagen in den Unterschieden im Carbonatgehalt der jeweiligen Wässer. Mittels einer weiteren Versuchsreihe konnte festgestellt werden, dass eine Zugabe von Natriumhydrogencarbonat zum künstlichen Meerwasser aus DIN EN ISO 15711 eine Bildung von kalkhaltigen Schichten forcieren kann. Somit konnten die natürlichen Bedingungen bei realem Meerwasser besser angenähert werden und der neue Elektrolyt erscheint zur Nachstellung von Korrosionsbedingungen unter Verwendung von künstlichem Meerwasser besser geeignet. Darüber hinaus liegt der neue Elektrolyt hinsichtlich seiner Zusammensetzung näher an realem Meerwasser.

- Es wurde in den Laborversuchen deutlich, dass das Schichtwachstum kalkhaltiger Schichten bereits nach einer Bildungsdauer von etwa 17 Stunden zunächst stagnierte. Die Schichtdicken dieser Schichten konnten mit einer hinreichenden Genauigkeit im Schichtdickenbereich von ca. 200 nm bis 400 nm unter Verwendung der Ellipsometrie und der Profilometrie als Referenzverfahren erfolgreich bestimmt werden.
- Bezüglich einer durchgehenden Struktur vom Unterwasser- bis in den Sedimentbereich konnte ein Elektronenfluss aufgrund Elementbildung festgestellt werden. Es hatte sich ein Makroelement aufgrund eines Sauerstoffgradienten ausgebildet.

**Kurzzusammenfassung:**

- **Wichtige Erkenntnisse zum Betrieb eines Laborcontainers und zur Nachstellung von Korrosionssystemen in Meerwasserbecken**
- **Beschreibung und Bewertung der Korrosivität und ablaufender Reaktionen in den einzelnen Belastungszonen mittels elektrochemischer und gravimetrischer Verfahren möglich und zielführend**
- **Erkenntnisse zu künstlichem Meerwasser und Sand als Sediment für die Nachbildung von Korrosionssystemen: Einsatzgrenzen und Besonderheiten erforscht**
- **Parameter Strömungseinfluss/Wasserbewegung, Temperatur auf Korrosionssysteme sind nicht zu unterschätzen – dargestellt im Labormaßstab und im Container**
- **Bildung von kalkhaltigen Schichten beim KKS und unter freier Korrosion nicht trivial → weitere Untersuchung notwendig – Nachstellung im Labor schwierig, da stark von der Wasserzusammensetzung abhängig**
- **Neue Ansätze für ein elektrochemisches Korrosionsmonitoring auf Basis der Messergebnisse geschaffen – weitere Untersuchungen in Zukunft notwendig**

Im Folgenden werden wichtige Ergebnisse zu Arbeitspaket 5 ergänzt, die nicht in der Abschlusspräsentation in Anlage 1 enthalten sind.

*Angaben zum Probenmaterial und zur Probenpräparation für die Couponuntersuchungen*

Als Versuchsmaterial wurde der Stahl S355J2C+G03 (1.0579 gemäß DIN EN 10025-2) als Stahlfeinblech mit einer Dicke von 3 mm verwendet. Das Material wurde von der Firma TechnikPartner zur Verfügung gestellt. Eine chemische Analyse mittels optischer Emissionsspektroskopie ergab die Zusammensetzung in Tabelle 1.

*Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung des Stahls S355J2C+G03 mit Hauptlegierungselementen in Gew.-%*

Material	C	Si	Mn	P	Cr	Cu	N	Ni	Al	Fe
S355J2 C+G03	0.164	0.026	1.480	0.017	0.101	0.097	0.016	0.041	0.085	Rest

Hinsichtlich der Legierungszuschläge gibt es keine Auffälligkeiten. Die Abbildung 2 stellt die Mikrostruktur des Stahls S355J2C+G03 anhand einer chemischen Ätzung dar.

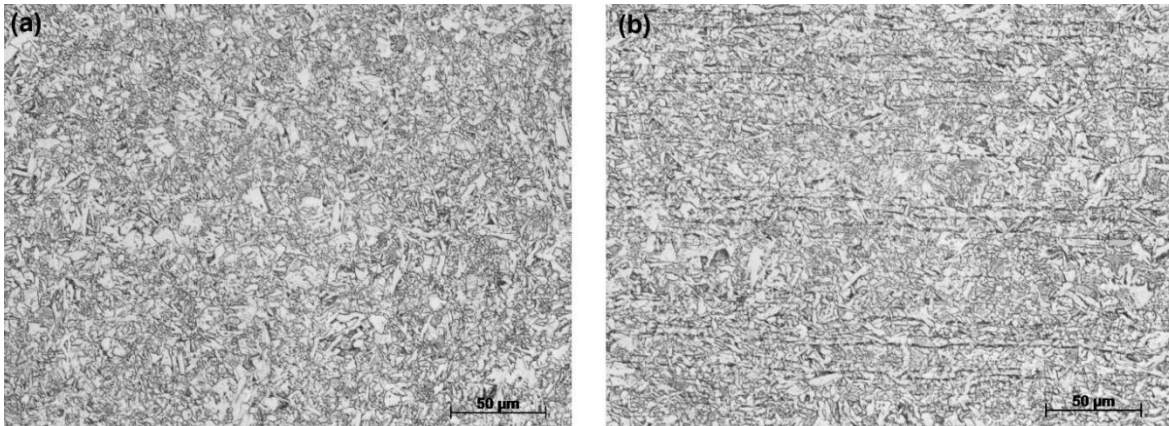


Abbildung 2 Mikrostruktur des Stahls S355J2C+G03, (a) Querschliff und (b) Längsschliff

Die Mikrostruktur bestand aus einer ferritischen Matrix mit einem geringen Perlitgehalt.

Die Feinbleche waren warmgewalzt und wurden ab Werk mit einem Transportöl als temporärem Korrosionsschutz versehen. Die Probenkörper wurden auf Abmaße von 100 mm x 100 mm x 3 mm (Laborcontainer) und 30 mm x 30 mm x 3 mm (Labor Stammgelände BAM) zugeschnitten. Vor dem Einbau wurden die Proben für 5 min in 99,5 % unvergälltem Ethanol geschwungen und zusätzlich mit Waschbenzin und Aceton handgereinigt. Aufgrund der Verunreinigungen und der Rückstände des Transportöls waren mehrere Reinigungszyklen notwendig. Elektrochemische Untersuchungen wurden durch eine elektrische Kontaktierung der Probekörper ermöglicht. Für die elektrische Kontaktierung wurde an jedem Probenkörper, mittig an einer Stirnseite, ein Schweißdraht mit einem Durchmesser von 2 mm mittels WIG-Schweißverfahren angebracht. Die Drähte wurden wiederum mit transparenten, selbstklebenden Schrumpschläuchen der Firma Hongshang mit einer Schrumpfrate von 3:1 isoliert. Als Kabelanschlüsse fungierten Bananensteckerbuchsen der Firma econ connect.

#### *Versuchsaufbau und eingesetzte Messtechnik*

Als Probenhalterung für die Untersuchungen im Laborcontainer wurden spezielle Probenracks aus Polamid angefertigt, mit denen die Höhe der Probenkörper durch Versetzung von Querstreben variiert werden konnte. Die Querstreben besaßen zusätzlich vertikale Bohrungen, durch die die Schweißdrähte durchgeführt und mit einer Kunststoffschraube, die durch eine horizontale Bohrung geschraubt wurde, fixiert werden konnten.

Die Versuchsbecken im Laborcontainer bestanden aus PE und Plexiglas und besaßen Innenabmaße von 1000 mm x 600 mm (Länge x Breite) und eine Höhe von 800 mm. Die Becken wurden bis zu einer Höhe von 300 mm mit Sand als Sediment und anschließend bis zu einer Höhe von 600 mm mit künstlichem Meerwasser befüllt.

Die an den Racks befestigten Probenkörper wurden einzeln in die Becken eingebracht, sodass sich die unteren Probenkörper vollkommen im Sediment und die oberen Probenkörper knapp unter dem Wasserspiegel befanden.

Die isolierten Schweißdrähte der Probenkörper wurden aus den Versuchsbecken herausgeführt und über Kabel an Schaltboxen kontaktiert, welche wiederum mit einem DAQ970A Keysight Datenlogger (3 x 20-Channel Multiplexer) verbunden waren. Über eine Computer-

station und der Software BenchVue von Keysight wurde ein kontinuierliches Monitoring des Korrosionspotentials sowie des Mischpotentials und des Elementstroms bei Kurzschluss ermöglicht.

Weiterführende elektrochemische Untersuchungen (dynamische Polarisation, Bestimmung des  $iR$ -Drops) wurden über eine Interface 1010 Potentiostat/Galvanostat der Firma Gamry Instruments zu Beginn und gegen Ende der Auslagerungen realisiert. Die Untersuchungen erfolgten in einer Drei-Elektrodenanordnung. Als Bezugs elektrode diente eine Silber/Silberchlorid-Referenzelektrode (197 mV vs.  $E_{SHE}$ ) und als Gegenelektrode ein MMO-beschichtetes Titan-Maschendrahtnetz. Die Probe wurde als Arbeitselektrode geschaltet. Die Messfläche betrug 212 cm<sup>2</sup> bei den Proben im Laborcontainer und 12,6 cm<sup>2</sup> bei den Proben in den Laboruntersuchungen am Stammgelände der BAM.

### *Einstellung des Versuchsmediums – Monitoring Versuchsmedium*

Die Untersuchungen wurden in Versuchsbecken durchgeführt, in denen abgelagerter Sand als Sediment und künstliches Meerwasser als Versuchsmedium eingebracht wurden. Als Prüflösung wurde künstliches Meerwasser in Anlehnung an DIN EN ISO 15711 angesetzt. Die Ionenkonzentrationen wurden über die Testzeit regelmäßig, quantitativ kontrolliert und ggf. durch die Zugabe von Salzen bzw. durch Verdünnung mit Wasser korrigiert.

Als Sediment wurde herkömmlicher Sand (Siebkörnung 0-2 mm, gewaschen, lose) von der Firma Heidelberger Sand und Kies verwendet.

Die Auslagerungsversuche fanden aufgrund des begrenzten Platzangebots in mehreren Versuchsreihen statt. In Versuchsreihe 1 wurden die einzelnen Proben ohne gegenseitige Kontaktierung (von Sediment und Unterwasserprobe) in zwei verschiedene Becken getaucht. Dabei wurden zwei Zustände realisiert:

- I) unbewegter Elektrolyt
- II) durch Wassereinspeisung durchströmter Elektrolyt

Die Becken im Zustand I erfuhren keine Wasserzirkulation. Die Becken im Zustand II waren mit weiteren Becken verbunden (Elektrolytvolumen ca. 5400 Liter) und wurden jeweils durch ein durchlöcherteres Rohr im oberen Bereich mit einer plätschernden Wassereinspeisung mit Wasser versorgt. Die Strömung variierte zum Teil stark, befand sich aber im Durchschnitt bei ca. 2 l/min. Es wurde mittels einer Sauerstoffsonde (Dissolved Oxygen Meter HI 5421 der Firma Hanna) die Menge an gelöstem Sauerstoff exemplarisch ermittelt, wobei sich im Becken mit unbewegtem Wasser durchschnittlich 4,35 mg/L und im Becken mit durchströmtem Wasser durchschnittlich 6,58 mg/L gelöster Sauerstoff befanden. Probenracks wurden jeweils nach einer Auslagerung von 28, 56 und 112 Tagen entnommen. In dieser Phase wurden die Massenverluste aller Proben nach den einzelnen Auslagerungszeiten und kontinuierlich die freien Korrosionspotentiale für jeweils zwei Proben pro Zone und Becken bestimmt.

In Versuchsreihe 2 wurden Racks mit jeweils einer Probe in der Unterwasser- und einer Probe in der Sedimentzone ausgelagert. Die Proben wurden über eine Schaltbox kurzgeschlossen und ein Präzisionswiderstand in den Schaltkreis eingefügt. Durch den Widerstand wurde die Messung des Elementstroms ermöglicht. Zusätzlich dazu wurden Probenracks verwendet, bei denen kein Kurzschluss zwischen Zone 1 und 2 erfolgte. Diese dienten als Vergleichsproben. Die Probenahme erfolgte nach 27 Tagen und 72 Tagen. Es wurde die Korrosionsgeschwindigkeit anhand des Massenverlustes bestimmt sowie kontinuierlich die freien Korrosionspotentiale, Mischpotentiale und der Elementstrom ermittelt.

### *Elektrochemische Messmethoden zur Bestimmung korrosionsrelevanter Werte*

Für die beschriebenen Versuchsreihen wurden zusätzliche elektrochemische Untersuchungen an den Probekörpern durchgeführt. Die Probekörper wurden jeweils vor der Entnahme elektrochemisch untersucht. Bei den kurzgeschlossenen Proben in Versuchsreihe 2 wurde zunächst der Kurzschluss entfernt und anschließend die einzelnen Proben gemessen.

Es wurden korrosionsrelevante, charakteristische Werte durch elektrochemische Messmethoden bestimmt. Zur elektrochemischen Beschreibung des Korrosionsverhaltens wurden die freien Korrosionspotentiale sowie das Mischpotential bei Kurzschluss kontinuierlich ermittelt. Die Potentialwerte gaben einen ersten Einblick bezüglich der unterschiedlichen Gegebenheiten in den Belastungszonen.

In der Versuchsreihe 2 wurden kurz nach dem Start der Auslagerung und zu festgelegten Versuchszeiten mittels dynamischer Polarisierung Stromdichte-Potential-Verläufe ermittelt. Die Polarisierung erfolgte in einem Potentialbereich von  $\pm 150$  mV vs.  $E_{\text{cor}}$  in anodische Richtung mit einer Polarisierungsgeschwindigkeit von 1 mV/s. Über die Tafelgeraden wurden die Korrosionsstromdichten  $i_{\text{corr}}$  bestimmt.

Für die Bestimmung der Elementströme während der Auslagerungen in Versuchsreihe 2 wurde jeweils ein  $10 \Omega$  Präzisionswiderstand zwischen dem Probekörper im Sediment und im Unterwasserbereich geschaltet und der Spannungsabfall über diesen über die gesamte Auslagerungsdauer ermittelt. Mittels des Ohm'schen Gesetzes wurde der geflossene Strom nach Glg. 1 bestimmt, wobei  $I$  für die Stromstärke,  $U$  für den Spannungsabfall und  $R$  für den Ohm'schen Widerstand stehen:

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{Glg. 1})$$

Die Stromstärken wurden in Abhängigkeit der Versuchsdauer geplottet. Über die Software Origin wurde der Gesamtladungsumsatz  $\Delta Q$  mittels Integration der Stromkurve nach Glg. 2 ermittelt:

$$\Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad (\text{Glg. 2})$$

Über das 1. Faraday'sche Gesetz wurde anschließend der theoretische Massenverlust, hervorgerufen durch die Kontaktierung, nach Glg. 3 bestimmt, wobei  $M$  für die molare Masse,  $z$  für Wertigkeit des beteiligten Ions (welches in diesem Fall das 2-wertige Eisenion ist) und  $F$  für die Faraday-Konstante (96485 C/mol) steht:

$$\Delta m_{\text{element}} = \frac{M \cdot \Delta Q}{z \cdot F} \quad (\text{Glg. 3})$$

Über das Vorzeichen des Spannungsabfalls und dem Wissen über den elektrischen Schaltkreis konnte die Richtung des Ladungsaustausches ermittelt und dadurch die Kathode und Anode zwischen den kontaktierten Proben identifiziert werden.

Alle elektrochemischen Untersuchungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

### *Gravimetrische Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit*

Nach den einzelnen Auslagerungszeiten wurde mittels Gravimetrie die Korrosionsgeschwindigkeit in den einzelnen Belastungszonen bestimmt. Dafür wurden die Probekörper im Ausgangszustand mit einer Feinwaage der Firma Sartorius, Modell CPA3-CE2 gewogen und die

Ausgangsmassen bestimmt. Nach den Auslagerungen wurden zunächst die Korrosionsprodukte entsprechend den Vorgaben der DIN EN ISO 8407 entfernt und die Proben erneut eingewogen. Die Korrosionsgeschwindigkeit wurde dann als flächenbezogener Massenverluste in  $\text{g/m}^2$  dokumentiert. Für  $\Delta m$  wurde jeweils der arithmetische Mittelwert pro Becken, Entnahmezeit und Belastungszone verwendet (entsprechend 4 Proben).

#### *Ergebnisse der dynamischen Polarisation – Stromdichte-Potentialverläufe von S355J2C+G03 im Unterwasserbereich und im Sedimentbereich*

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in der Anlage 2 zu finden. Es zeigen sich deutliche Unterschiede hinsichtlich des Korrosionsverhaltens von Stahl im Unterwasserbereich und in der Sedimentzone.

#### *Ergebnisse der mikrobiologischen Analyse der Proben aus dem Laborcontainer*

In den einzelnen Becken des Laborcontainer wurde während des Betriebs offensichtlicher mikrobieller Bewuchs festgestellt. Die Abbildung 3 gibt einen Eindruck vom Erscheinungsbild des mikrobiellen Bewuchs.

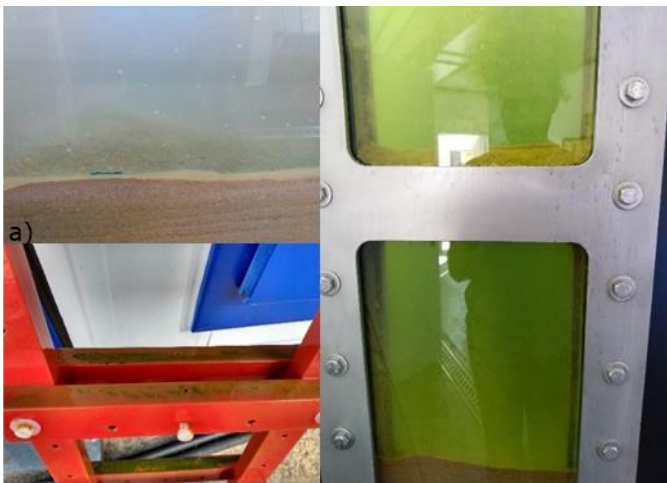


Abbildung 3: Erscheinungsbild des mikrobiellen Bewuchs und Verfärbung des künstlichen Meerwassers.

Es ergaben sich die folgenden Forschungsfragen:

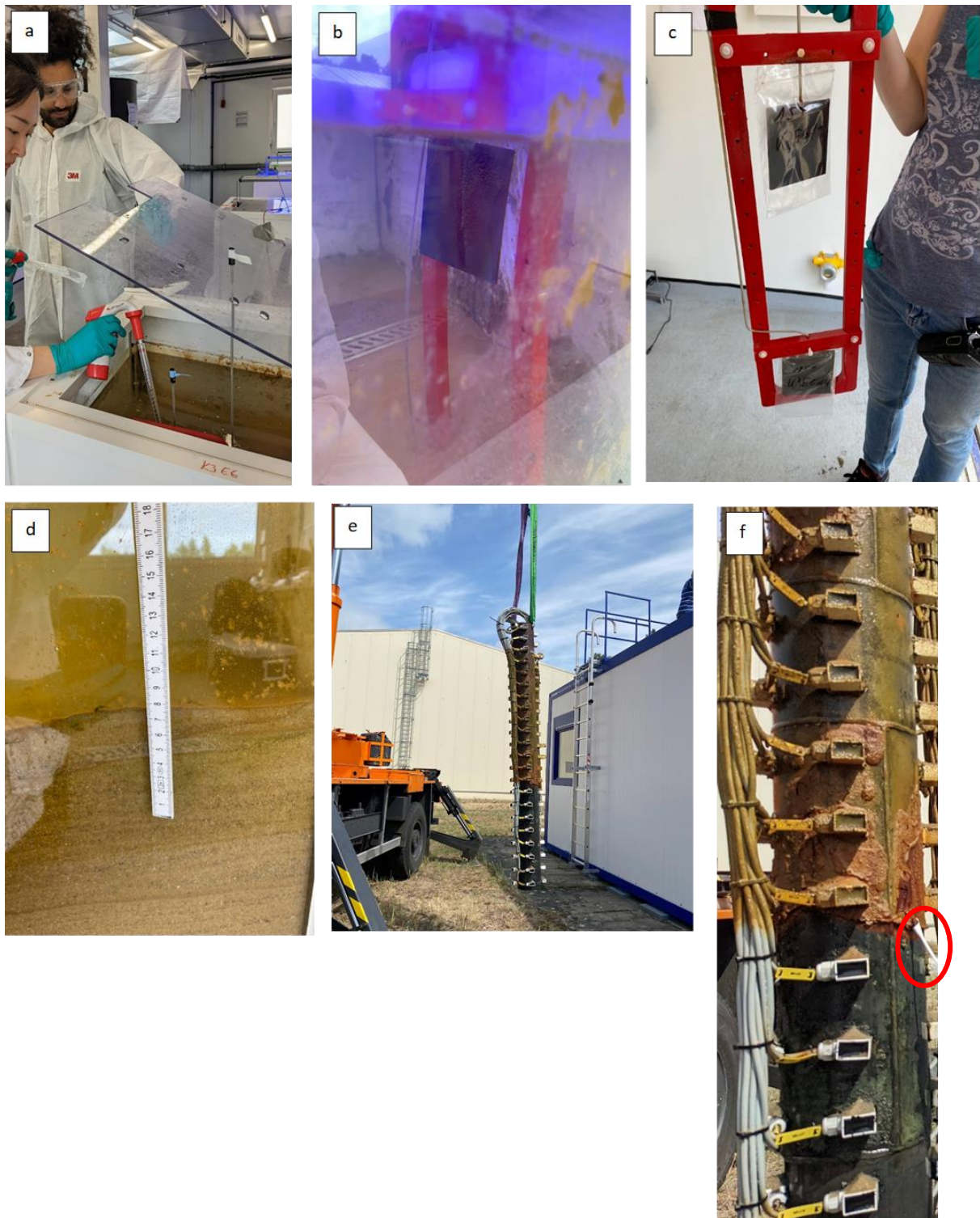
- a) Welche Mikroorganismen waren vorhanden?
- b) Bietet der Laborcontainer die Möglichkeit, mikrobiologische Prozesse zukünftig gezielt in künstlichem Meerwasser und Sand als idealisiertes System zu untersuchen?
- c) Können reale Bewuchsbedingungen nachgestellt werden?

Die Probenahme und mikrobiologische Bewertung erfolgte durch den Fachbereich 4.1 „Biologische Materialschädigung und Referenzorganismen“ der BAM.



Im ersten Schritt wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Aus mikrobiologischer Sicht fand das Wachstum im Laborcontainer unter für den Meereslebensraum ungewöhnlichen Bedingungen statt. Das Medium bestand aus künstlichem Meerwasser. Als Sediment wurde herkömmlicher Sand verwendet. Dies bedeutet, dass das anfängliche Material bzw. die anfängliche Mikrobiologie nicht derjenigen entsprach, die im Meeressediment zu finden wäre.

Zunächst wurde eine standardmäßige 16 sRNA-Analyse durch die Firma Eurofins durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass hauptsächlich Algen (99 %) als biologisches Material vorhanden waren. Da "Umweltproben" jedoch oftmals schwierig zu handhaben sein können und das Fachwissen von Spezialisten erforderlich ist, wurde beschlossen, die Hilfe eines spezialisierten Unternehmens in Anspruch zu nehmen. Aus diesem Grund wurden im nächsten Schritt Tupferproben von den Stahlblechen der Korrosionsuntersuchungen innerhalb der Becken genommen. Es wurden mikrobiologische Proben von Stahlblechen im Sedimentbereich (Bezeichnung *BAM-TTS-Bottom stagnant*) und im Unterwasserbereich nahe der Oberfläche (Bezeichnung *BAM-TTS-Top stagnant*) eines Beckes mit stagnierendem Wasser genommen. Darüber hinaus wurde eine Sedimentprobe (Bezeichnung *BAM-TTS-Sediment Coupon*) nahe den Stahlblechen und eine Wasserprobe (Bezeichnung *BAM-TTS-H2OTankstagnant*) aus dem gleichen Becken genommen. Zusätzlich wurde eine Probe am Versuchsträger (Bezeichnung *BAM-TTS-Bottom Monopile*) an der Grenze zwischen Sediment und Wasser, nach Ausbau des Versuchsträgers entnommen. Die Abbildung 4 gibt einen Eindruck von der Probenentnahme für die mikrobiologischen Untersuchungen.



*Abbildung 4: Fotos des Vor-Ort-Einsatzes zur Probenentnahme für die mikrobiologischen Untersuchungen.*

*a) Wassertank mit stagnierendem Wasser*

*b und c) obere und untere Probebleche am Rack in stagnierendem Wasser*

*d) Sedimentprobe, welche 8 cm unterhalb der Grenzfläche genommen wurde*

*e and f) entnommener Monopile und der Beprobungsort (roter Kreis).*

Es wurde eine QuantArray Analyse durchgeführt, die eine genauere Auswertung der beteiligten Mikroorganismen ermöglicht (qPCR). Des Weiteren wurden eine Amplikon-Sequenzierung (reguläre NGS) und eine Amplikon-Sequenzierung (Oxford Nanopore) durchgeführt,

um die Häufigkeit und Diversität der mikrobiellen Gemeinschaft in den Proben zu untersuchen. Die Abbildung 5 zeigt eine beispielhafte Auswertung der Analysen in Form einer Heatmap.

Gammaproteobacteria-	44.7	43.3	60.2	4.6	16.6
Alphaproteobacteria-	34.5	33.5	14.4	25.4	35.7
Cyanobacteria-	4.1	3.5	4.3	19.2	29.1
Bacteroidia-	5.9	6.2	2.8	3.8	6.4
OM190-	1.3	0.9	0.7	18.5	2.2
Phycisphaerae-	1	0.8	8.1	0.9	3.1
Anaerolineae-	0	0.2	0.1	6.5	3.2
Nitrososphaeria-	1.5	3.3	1.7	2.2	0.2
Planctomycetes-	0.3	0.2	1.5	3.7	1
Gracilibacteria-	0.1	0.2	2.9	2.1	0.1
Actinobacteria-	1.8	1.1	0.3	1.6	0.4
Polyangia-	0.5	0.6	0.2	2.3	0.1
Desulfitobacteria-	0.5	2.1	0	0	0
Verrucomicrobiae-	0.2	0.2	0.5	1.1	0.1
Bdellovibrionia-	0.1	0.3	0.8	0	0.4
k_Unclassified_OTU_52-	0.2	0	0	1.1	0.2
Clostridia-	0.6	0.6	0.1	0.1	0
Halanaerobiia-	0.1	1.2	0	0	0
WPS-2-	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3
k_Unclassified_OTU_69-	0	0	0.2	0.8	0.1
	bottom-1-	bottom-2-	h2o-tank-	monopile-	top-

Abbildung 5: Heatmap der Zusammensetzung der bakteriellen Gemeinschaft in den verschiedenen Proben

Der Großteil der identifizierten Bakterien gehört der Klasse der Gammaproteobakterien und Alphaproteobakterien an, zu denen jeweils Bakterien wie schwefeloxidierende Bakterien (SOB) und Sulfitobakterien gehören. Auch Cyanobakterien scheinen in einigen der Proben sehr häufig vorzukommen. Trotz der Verwendung desselben künstlichen Meerwassers und Sandes für alle Proben wurden in den Mikroumgebungen unterschiedliche Kombinationen von Bakterienarten (mit unterschiedlichem Wachstumsstadien) gefunden. So wurden zum Beispiel SOB und Eisenreduzierer (IRB) eher an den Proben identifiziert, die an der Metalloberfläche entnommen wurden - die Häufigkeit in der Wasserprobe war um zwei Dekaden niedriger. Außerdem wurden Sulfatreduzierer (APS-Gen) in den Proben identifiziert, die mit Metall und Sand in Kontakt gewesen waren. Cyanobakterien wurden häufiger in den Proben aus dem oberen Teil des Beckens mit stagnierendem Wasser beobachtet, was auf eine höhere Lichtexposition zurückzuführen sein könnte. Interessant war auch, dass die Anzahl der Cyanobakterien in den Proben mit Metallkontakt erhöht war. Die Monopile-Probe wies eine größere Vielfalt an Mikroorganismen auf. Der Monopile stand jedoch etwa 1,5 Jahre lang im Becken, während die Metallbleche, in deren Nähe die anderen Proben entnommen worden

sind, nur etwa 10 Wochen ausgelagert waren. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Mikroumgebung das Wachstum und das Verhalten der Mikroorganismen diktiert. In Bezug auf zukünftige Untersuchungen zur Mikrobiologie bedeutet dies, dass es wichtig ist, die Beeinflussung des Wachstums der Mikroorganismen in verschiedenen möglichen Umgebungen zu überprüfen.

Wenn es in zukünftigen Experimenten gelingen sollte, die richtigen Fragen zu formulieren und die Experimente um diese herum zu gestalten, so sind die verwendeten molekularen mikrobiologischen Methoden (MMM) ein sehr leistungsfähiges Werkzeug, um mögliche MIC-fördernde Mikroorganismen zu untersuchen. Darüber hinaus sind auch die Methoden zur Handhabung der Proben (z. B. Extraktion von DNA usw.) wichtig. Da das untersuchte System jedoch künstlich war und das Inokulum nicht mit dem Meeressediment in Verbindung stand und keinen Kontakt zu Sauerstoff hatte, war es überraschend, dass eine Anhäufung von Mikroorganismen, die am Schwefelkreislauf beteiligt sind (anaerobe SRBs), nachgewiesen werden konnten.

Ein direkter Einfluss der detektierten Mikroorganismen auf Korrosionsmechanismen konnte im Rahmen der Untersuchungen im Forschungsvorhaben nicht nachgewiesen werden. Um einen Einfluss gezielt festzustellen oder auszuschließen, müssen tiefergehende Versuchsreihen durchgeführt werden.

## II.1. – AP 6: Entwickeln von Software und Algorithmen

<b>Arbeitsaufgabe:</b> Datenauswertung und -verarbeitung der Messdaten am Modell einer Offshore-Gründungsstruktur
<b>Ziele des Arbeitspaketes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung einer geeigneten Software zur Auswertung und Darstellung von Messdaten (BAM unterstützend)</li> </ul>
<b>Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die BAM hatte in Arbeitspaket 6 nur unterstützende Tätigkeiten. Sie unterstützte die Projektpartner bei der Entwicklung von Software und Algorithmen durch beratende Tätigkeiten. Die BAM stellte ihr Know-How bzgl. der Verarbeitung und geeigneten Darstellung von Messdaten zur Verfügung. Die BAM ermöglichte eine kontinuierliche Datenleitung zum Versuchsträger inklusive Remote-Zugriff.</li> </ul>

## II.1. – AP 7: Ableitung von Maßnahmen zur Anpassung von Richtlinien

<b>Arbeitsaufgabe:</b> Anpassung des KKS-Systems an aktuelle Richtlinien bezüglich des Korrosionsschutzes und des Designs
<b>Ziele des Arbeitspaketes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Erstellen eines Konzeptes zur Anpassung an die bestehenden Richtlinien</li> <li>neuartiges KKS und Monitoringsystem an die Anforderungen bestehender Richtlinien anpassen</li> <li>Einbringen des neuartigen Systems in bestehende Richtlinien</li> </ul>

<b>Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundlage für die Arbeiten im Arbeitspaket 7 waren die Recherchen zu Normen und Regelwerken aus Arbeitspaket 1. Aus der thematischen Übersicht wurden Anforderungen an ein Monitoring-System von Offshore-Gründungsstrukturen seitens der Regelwerke identifiziert.</li> <li>• Eine Harmonisierung des neuartigen Monitoringsystems mit bestehenden Regelwerken konnte innerhalb der Projektlaufzeit aus Zeitgründen nicht erreicht werden.</li> <li>• Das neuartige Monitoringsystem konnte während der Projektlaufzeit nicht in bestehende Normenausschüsse zwecks Evaluation eingebracht werden, da noch nicht alle Funktionen ausreichend erforscht werden konnten (bspw. KKS-Tauglichkeit des Systems). Weitere Folgeuntersuchungen sind notwendig, bevor die Regelwerksarbeit begonnen werden kann.</li> <li>• Die weitere Bearbeitung der Regelwerksarbeit wird vorwiegend durch den Partner Steffel bzw. den Partner J-B-O vorangetrieben.</li> <li>• Die BAM fokussiert sich auf die Einbringung der gewonnenen Erkenntnisse und Messergebnisse zum Korrosionsverhalten von Stählen im Unterwasser- und Sedimentbereich in die entsprechenden Normenausschüsse (bspw. NA 062-01-78 AA "Kathodischer Korrosionsschutz" des DIN-Normenausschusses Materialprüfung (NMP)).</li> </ul>

## II.1. – AP 9: Rückbau des KKS- und Monitoringsystems

<p><b>Arbeitsaufgabe:</b> Rückbau des KKS- und Monitoringsystems der Firma Steffel aus dem Laborcontainer</p>
<p><b>Ziele des Arbeitspaketes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückbau des KKS-Systems und der von Steffel bereitgestellten Peripherie</li> <li>• Entsorgung des künstlichen Meerwassers und des Sediments</li> </ul>
<p><b>Beschreibung des erzielten Ergebnisses und der Anpassungen am Arbeitsplan</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die BAM besorgte in Kooperation mit dem Partner Steffel den Rückbau des KKS- und Monitoringsystems.</li> <li>• Die Schaltschränke, Server und Messperipherie wurden durch den Partner Steffel demontiert und transportfertig gemacht. Am 27. und 28. Juli 2022 wurde die Messperipherie per Spedition zum Partner Steffel gesendet.</li> <li>• Der Versuchsträger wurde aus dem Großversuchsbecken per Kran entfernt und verbleibt im Besitz der BAM.</li> <li>• Das künstliche Meerwasser und der Sand als Sedimentersatz wurden am 11.08.2022 aus den Becken und dem Wasserkreislauf innerhalb des Laborcontainers entfernt.</li> <li>• Die Arbeiten im Arbeitspaket 9 wurden vollumfänglich abgeschlossen.</li> </ul>

## II.1. – Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Verlauf des Forschungsvorhabens ergaben sich neue wissenschaftlich-technische Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten von Stahlstrukturen im Offshore- und Sedimentbereich. Dennoch gab es auch Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben oder keinen ausreichenden wissenschaftlichen Beitrag leisten konnten.

Für die Durchführung von Korrosionsversuchen und die Evaluation des neuartigen Monitoringsystems in realem Meerwasser und Sediment konnte der Standort Norderney nicht realisiert werden. Somit waren keine Untersuchungen unter Einfluss von realem marinem Bewuchs möglich. Am Alternativstandort konnten dennoch Versuche mit dem Monopilemodell

und künstlichem Meerwasser ohne Einfluss von marinem Bewuchs durchgeführt werden. Die Funktionstüchtigkeit des neuartigen Korrosionsmonitoring-Systems konnte erprobt werden und Fehler bei der Messtechnik, sowie praktische Probleme beim Handling ohne lange Anfahrtswege behoben werden. Die Hauptziele des Vorhabens konnten somit am Standort Horstwalde erfüllt werden.

Ein elektrochemisches Monitoring mittels LPR-Methodik unter Einfluss von KKS war nicht möglich. Es besteht bei länger laufendem KKS-Schutz das Problem von langen Depolarisationszeiten nach Ausschalten des KKS bei Vorhandensein kalkhaltiger Schichten auf Oberflächen. Darüber hinaus sind elektrochemische Methoden wie LPR, EIS oder die dynamische Polarisation unter KKS-Einfluss nicht anwendbar zur Bestimmung von Korrosionsgeschwindigkeiten. Im Labormaßstab am Stammgelände der BAM konnten aber kurzzeitige KKS-Versuche durchgeführt werden.

Eine Harmonisierung des neuartigen Monitoringsystems des Partners Steffel mit bestehenden Regelwerken konnte innerhalb der Projektlaufzeit aus Zeitgründen nicht erreicht werden. Das neuartige Monitoringsystem konnte während der Projektlaufzeit nicht in bestehende Normenausschüsse zwecks Evaluation eingebracht werden, da noch nicht alle Funktionen ausreichend wissenschaftlich und technisch belegt werden konnten (bspw. KKS-Tauglichkeit des Systems).

Die vergleichenden Untersuchungen mittels eines Korrosimeters der Firma Imotron haben zu keinen verwertbaren Ergebnissen geführt. Grund dafür war eine zu kurze Messzeit um eine ausreichende Auflösung der Messwerte zu erhalten. Die Lieferung des Korrosimeters hatte sich wegen Materialmangels und einer langen Beschaffungszeit verzögert.

Elektrochemische Messungen im Labor mit kleinen Couponproben, die beschichtet wurden, haben zu keinem Ergebnis geführt. Die Beschichtung war fehlerhaft ausgeführt. An den Kanten und Ecken der Proben lagen unbeschichtete Bereiche vor, die zu Polarisierungseffekten und zu einer Verfälschung der elektrochemischen Ergebnisse geführt haben.

Analytische Untersuchungen zum Schichtwachstum im Labor waren Grenzen unterworfen. Für die ellipsometrischen Untersuchungen waren spiegelpolierte Proben mit einer Rauheit im nm-Bereich notwendig. Diese Oberflächen sind weit von realen Bauteiloberflächen mit einer Rauheit im  $\mu\text{m}$ -Bereich entfernt. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der ellipsometrischen Untersuchungen auf reale Stahloberflächen muss geprüft werden.

## **2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

*- nicht öffentlich -*

## **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Alle durchgeführten Arbeiten entsprachen den Angaben im Antrag sowie den gemeldeten Arbeitsplanänderungen, erfolgten zielgerichtet und waren zur Beantwortung der Fragestellungen geeignet. Alle Arbeitsschritte waren notwendig, um die umfassende Beschreibung des komplexen Korrosionssystems und die Arbeiten im Laborcontainer zu gewährleisten.

Das veranschlagte wissenschaftliche Personal war für die zielorientierten Arbeiten notwendig und vom Zeitumfang her angemessen. Aufgrund von Personalwechseln konnten nicht alle Personalmittel abgerufen werden. Durch eine gezielte Anpassung des Versuchsplans, die an

den sich ergebenden Änderungen ausgerichtet war, konnten dennoch die Hauptziele des Vorhabens erreicht werden.

#### **4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Die erreichten Ergebnisse und Ziele ermöglichen auf wissenschaftlicher Ebene eine hohe Anschlussfähigkeit. Die erzielten Grundlagenkenntnisse können direkt im Anschluss an das Forschungsvorhaben für weiterführende Projekte Anwendung finden. Es konnten bereits während der Projektlaufzeit die folgenden zwei Anschlussvorhaben realisiert werden:

- Verbundforschungsvorhaben 03HY302 im 7. Energieforschungsprogramm:  
Leitprojekte zu Grünem Wasserstoff (PTJ) „Verbundvorhaben H2Mare\_VB2: PtX-Wind – Offshore Power-to-X-Prozesse – Teilvorhaben: Untersuchung zu bauseitigen Fragestellungen der Korrosion und des Korrosionsschutzes mit Fokus auf die Außenkorrosion von Bau- und Anlagenteilen“  
Laufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2025  
Fördermittelgeber: BMBF
- Verbundforschungsvorhaben 03HY303 im 7. Energieforschungsprogramm:  
Leitprojekte zu Grünem Wasserstoff (PTJ) „Verbundvorhaben H2Mare\_VB3: TransferWind – H<sub>2</sub>Mare Forschungs-Transfer – Teilvorhaben: Übertragung von wissenschaftlichen Erkenntnissen zur bauseitigen maritimen und offshore-Korrosion in die Normung und Erarbeitung einer Handlungsempfehlung zu Korrosionsschutz und -prüfung“  
Laufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2025  
Fördermittelgeber: BMBF

Bei diesen Vorhaben handelt es sich um Teilprojekte des Leitprojektes H<sub>2</sub>Mare zum Thema „Grüner Wasserstoff“. An diesen Großverbundvorhaben sind diverse Partner aus Industrie, Universitäten, Hochschulen, Verbänden und außeruniversitären Forschungseinrichtungen beteiligt. In den Teilvorhaben der BAM finden die gewonnenen Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten und zum Korrosionsschutz aus KKS-Gründung direkt Anwendung und werden auf Offshore-PtX-Anlagen sowie deren Gründungsstrukturen übertragen. Im Vorhaben PtX-Wind wird sich fortführend mit Themen der Korrosionsbeständigkeit verschiedener Materialien in allen Belastungszonen von Offshore-Anlagen beschäftigt. Im Vorhaben TransferWind steht dagegen die Regelwerksarbeit im Vordergrund.

Darüber hinaus werden nach Projektende Forschungsideen mit den folgenden Themenstellungen identifiziert und geprüft:

- Verbundvorhaben zum Thema „Nationale und internationale Regelwerks- und Normendatenbank für den Korrosionsschutz offshore“ aufbauend auf der im Vorhaben KKS-Gründung erstellten Datenbank,
- Entwicklung eines Monitoringsystems für den Sedimentbereich von Offshore-Gründungsstrukturen auf Basis elektrochemischer Methoden,
- Wechselwirkung von KKS und marinem Bewuchs,
- Verifizierung der Ergebnisse am idealisierten System „künstliches Meerwasser und Sand als Sediment“ und einem realen System „Meerwasser und Sediment“ im Laborcontainer unter der Fragestellung „Wie nahe prüft man mit dem idealisierten System am realen System bezüglich des Korrosionsverhaltens?“.

Der Laborcontainer der BAM soll in Q1/Q2 2023 am Standort Eidersperrwerk aufgestellt und in Betrieb genommen werden. Dieser eröffnet neue wissenschaftliche Möglichkeiten und ermöglicht eine weitere direkte Fortsetzung der Forschungstätigkeiten aus KKS-Gründung zum Korrosionsverhalten in Meerwasser und Sediment. Darüber hinaus kann das Modell der Monopile-Gründungsstruktur für weitere Forschungsaktivitäten und -projekte verwendet werden.

Im Rahmen von Promotionen kann auf einzelne Themenbereiche und Erkenntnisse des Vorhabens KKS-Gründung aufgebaut und das Wissen um das Korrosionsverhalten vertieft werden. Darüber hinaus können die Erkenntnisse aus KKS-Gründung für Untersuchungen zur Korrosionsermüdung von Offshore-Gründungsstrukturen verwendet werden. Für Ermüdungsversuche werden gezielt vorkorrodierte Stahloberflächen benötigt. Mit den Kenntnissen aus KKS-Gründung ist dies realisierbar.

Ein nächster Verwertungsschritt betrifft die Regelwerksarbeit. Das zum Zeitpunkt der Antragstellung formulierte übergeordnete Ziel der Integrierung des neuartigen KKS-Systems in bestehende Richtlinien liegt nicht mehr Prioritätsbereich der BAM. Die Normungstätigkeit bezüglich des neuartigen Monitoringsystems wird vorwiegend beim Partner Steffel gesehen. Die Erkenntnisse aus dem Teilprojekt der BAM können aber verwendet werden, um Regelwerke zum Korrosionsverhalten von Stahl in Sedimenten neu zu betrachten. Mit der Präsentation von Vorhabenergebnissen auf relevanten Normenausschüssen wird direkt im Anschluss an das Vorhabenende begonnen. Eine Aufnahme in entsprechende DIN-Normen kann nur in einem längerfristigen Zeithorizont erfolgen, da dafür zunächst eine ausreichende Akzeptanz am Markt und in der wissenschaftlichen Community erreicht werden muss. Zusätzlich sind die Revisionszeiträume der entsprechenden Normen zu beachten, da nur zu diesen Zeitpunkten Änderungen in die Normen eingebunden werden können. Bis zur erfolgreichen Aufnahme in eine Norm oder Richtlinie muss mit einem Zeithorizont von fünf Jahren nach Beendigung des Projektes gerechnet werden.

Während der Projektlaufzeit wurden Ergebnisse und Konzepte aus dem Forschungsvorhaben im Rahmen von Vorträgen und eines Posters auf Fachveranstaltungen vorgestellt. Im Folgenden ist eine Auflistung der Fachvorträge zu finden:

- 1) *Posterpräsentation*  
Khalid Zekhnini (Präsentierender), Martin Babutzka:  
„Corrosion testing in a laboratory container: Corrosion testing with artificial seawater and sediment“  
European Corrosion Congress EUROCORR 2023, 28.08.-01.09.2022, Berlin.
- 2) *Vortrag*  
Martin Babutzka (Vortragender), Khalid Zekhnini:  
„BAM-Meerwassercontainer – Konzept und zukünftige Forschungsideen“  
Sitzung der DECHEMA/GfKORR-Fachgruppe "Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz, 10.11.2021, Online-Meeting.
- 3) *Vortrag*  
Andrea Koerdt (Vortragende), Martin Babutzka, Khalid Zekhnini:  
„Mikrobielle Zusammensetzung im Wassertank“  
Sitzung der DECHEMA/GfKORR-Fachgruppe "Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz, 10.11.2021, Online-Meeting.
- 4) *Vortrag*  
Martin Babutzka (Vortragender):  
„Offshore-Windenergieanlagen – Ist ein dauerhafter und gleichzeitig "sauberer" Korrosionsschutz möglich?“



29. Berliner Gesundheitstechnische Tagung - 70 Jahre Gesundheitstechnische Gesellschaft, 08.11.2019, Berlin

- 5) *Vortrag*

Matthias Baeßler (Vortragender), Martin Babutzka (Vortragender), Volker Trappe (Vortragender), Andreas Pittner, Rainer Krankenhagen, Hans-Carsten Kühne:  
„Vorstellung des Aktivitätsfelds Erneuerbare Energie“  
Beiratssitzung Themenfeld Energie, 09.04.2019, Berlin

Aufgrund der Verzögerungen im Projektablauf und bei den elektrochemischen Versuchsreihen im Laborcontainer wurden während der Projektlaufzeit keine referierten Veröffentlichungen bei wissenschaftlichen Journals eingereicht. Zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichts sind die folgenden weiterführenden Publikations- und Verwertungstätigkeiten geplant:

- *A) referierte Publikation*

Arbeitstitel „Investigation of corrosion behavior of S355 Steel in artificial seawater and sediment“

Journal: Materials and Corrosion, Verfügbarkeit open access durch DEAL-Vertrag  
Einreichung bis 31.01.2023 geplant

- *B) referierte Publikation*

Publikation zu mikrobiologischen Analysen im künstlichen Meerwasser und Sediment  
Federführung durch Fachbereich 4.2 „Biologische Materialschädigung und Referenzorganismen“ der BAM

Journal mit mikrobiologischer Ausrichtung  
Einreichung im ersten Quartal 2023 geplant

- *C) referierte Publikation*

Arbeitstitel „Characterization of deposits from early stage cathodic protected steel surfaces in artificial seawater using spectroscopic Ellipsometry and complementary methods“

Federführung durch Fachbereich 6.1 „Oberflächenanalytik und Grenzflächenchemie“  
Journal: Materials and Corrosion  
zum Zeitpunkt der Erstellung des Schlussberichts werden die Ergebnisse noch einmal kritisch betrachtet und ggf. ergänzende Messungen durchgeführt

- *D) Konferenzbeitrag*

*Vortrag oder Poster mit Tagungsbandbeitrag auf dem European Corrosion Congress EUROCORR 2023 in Brüssel, Belgien, 27.-31. August 2023*

- *E) Präsentationstätigkeit*

Vortrag auf Arbeitskreissitzung des Arbeitskreises „Korrosionsschutz von Windenergieanlagen“ der GfKORR – Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.  
Frühjahr 2023

- *F) Präsentationstätigkeit*

Vortrag beim Fachausschuss „Korrosionsfragen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG)  
Q2/Q3 2023

- *G) Präsentationstätigkeit/Normungstätigkeit*

Vortrag auf Arbeitsausschuss NA 062-01-78 AA "Kathodischer Korrosionsschutz" des Normenausschusses Materialprüfung (NMP) des DIN  
Q2/Q3 2023

- *H) Präsentationstätigkeit*

Vortrag auf der Fachkonferenz „Korrosionsschutz in der maritimen Technik“  
Q1 2024

Eine wirtschaftliche Verwertung der Vorhabenergebnisse ist von Seiten der BAM aufgrund der Forschungscharakters des Teilprojektes nicht geplant. Eine wirtschaftliche Verwertung wird vorwiegend beim Partner Steffel eingeordnet.

Die durchgeführten und geplanten Verwertungstätigkeiten können das Wissen um das Korrosionsverhalten von Gründungsstrukturen im Unterwasser- und Sedimentbereich von Offshore-Windenergieanlagen erweitern und zu einem sicheren und dauerhaften Betrieb beitragen. Durch die Fortführung der Untersuchungen in Folgeprojekten und durch die Einbringung wissenschaftlicher Erkenntnisse in die Regelwerksarbeit kann die BAM einen wesentlichen Beitrag zu den genannten Zielen leisten.

## **5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Durchführung des Forschungsvorhabens wurde relevanter Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens durch das Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Arbeitsgruppe „Neue Werkstoffe / Beschichtung, Bewitterung und Korrosionsschutz“ bekannt. Die Erkenntnisse der Kollegen wurden in einem Fachartikel festgehalten, der nach Beendigung des Forschungsvorhabens KKS-Gründung erschienen ist:

*A. Gericke, M. Hauer, B. Ripsch, M. Irmer, J. Nehlsen, K.-M. Henkel, „Fatigue Strength of Structural Steel-Welded Connections with Arc-Sprayed Aluminum Coatings and Corrosion Behavior of the Corresponding Coatings in Sea Water“, Journal of Marine Science and Engineering, November 2022, DOI: 10.3390/jmse10111731.*

In den Arbeiten des Fraunhofer IGP wurde das Korrosionsverhalten von Aluminiumspritzschichten für den Einsatz als alternativer Korrosionsschutz für Meerwasserstrukturen untersucht. Polarisierungseffekte bei Kombination von Aluminiumspritzschichten und Stahlsubstrat wurden betrachtet und ein Korrosionsgeschwindigkeitsmonitoring mittels der elektrochemischen Methodik LPR (Linear Polarization Resistance) angewendet. Das Versuchsmedium war Ostseewasser. Es wurde aber kein Sediment verwendet.

Es erfolgte eine Kontaktaufnahme und ein gegenseitiger gewinnbringender Austausch zu den Themen Elementbildung und Messaufbauten unter Verwendung von Meerwasser sowie Sediment zur Nachstellung realer Korrosionssysteme im Labor.

Methoden zum Monitoring von Korrosionsgeschwindigkeiten mittels Widerstands- und Elementstrommessungen werden mittlerweile auch verstärkt für Untersuchungen zur Atmosphärischen Korrosion verwendet. Inwiefern solche Ansätze auf Anwendungen im Meerwasser- und Sedimentbereich übertragbar sind, muss in zukünftigen Forschungstätigkeiten evaluiert werden. Beispielhaft wird im Folgenden ein internationales Reviewpaper genannt:

*K. Popova, T. Prosek, „Corrosion Monitoring in Atmospheric Conditions: A Review“, Metals 2022, 12, 171, DOI: 10.3390/met1202017.*

Darüber hinaus etabliert sich in den letzten Monaten verstärkt das Thema der Korrosionsermüdung an OWEA-Gründungsstrukturen. Durch eine Kombination von Ermüdungsbelastung und Korrosionsvorgängen bilden sich demnach Kerben und Risse an den Strukturen, die die Standfestigkeit der Anlagen herabsetzen könnten. Stellvertretend sei an dieser Stelle eine relevante Publikation des KIT Karlsruhe und der Hochschule München genannt:

S. Gkatzogiannis, J. Weinert, I. Engelhardt, P. Knoedel, T. Ummenhofer, „Correlation of laboratory and real marine corrosion for the investigation of corrosion fatigue behaviour of steel components“, *International Journal of Fatigue*, Volume 126, September 2019, 92-102, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.041.

Während der Projektlaufzeit wurden kontinuierliche Entwicklungen im Bereich des KKS in der beobachtet. Es besteht der Trend, laufende Anlagen an OWEA verstärkt vom KKS mittels galvanischer Anoden auf KKS-Anlagen auf Fremdstrombasis umzurüsten. Grund dafür ist die höhere Effektivität und eine bessere Wartung der Anlagen.

### **III. Erfolgskontrollbericht**

- *nicht öffentlich* -

### **Anlagen**

Dem Schlussbericht sind die folgenden Anlagen beigefügt.

- Anlage 1: Folien der Abschlusspräsentation der Ergebnisse
- Anlage 2: Poster vom der EUROCORR 2022
- Anlage 3: - *nicht öffentlich* -
- Anlage 4: - *nicht öffentlich* -

19.05.2022

---

# **ABSCHLUSSPRÄSENTATION KKS- GRÜNDUNG**

Teilvorhaben der BAM: Korrosionsprüfung im  
Laborcontainer

---

AP 1 | Definitionsphase

AP 3 | Versuchsträger (unterstützend)

AP 4 | Laborcontainer

AP 5 | Versuche

AP 6 | Entwicklung von Software und Algorithmen (unterstützend)

AP 7 | Ableitung von Maßnahmen zur Anpassung von Richtlinien

AP 9 | Rückbau des KKS- und Monitoringsystems

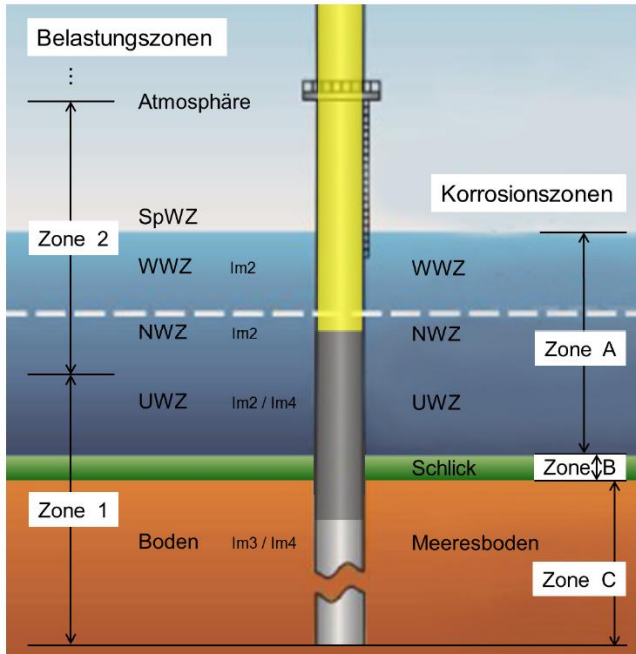
---

# AP 1 Definitionsphase

[www.bam.de](http://www.bam.de)

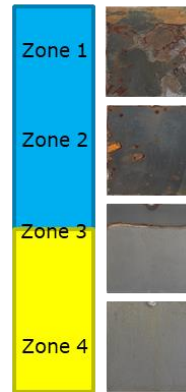
# Definitionsphase

## Planung der Experimente

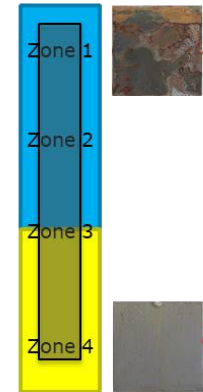


VGB/BAW-Standard Korrosionsschutz von Offshore-Bauwerken zur Nutzung der Windenergie  
Teil 4: Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)

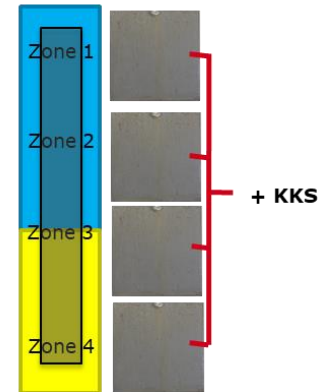
A) Untersuchungen in den einzelnen (voneinander getrennten) Zonen



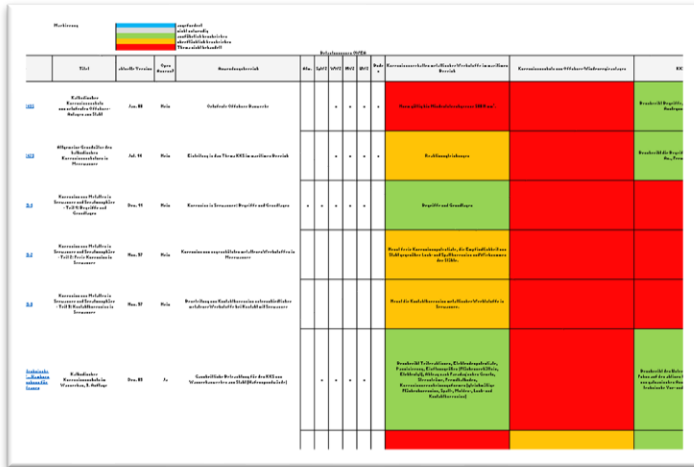
B) Untersuchungen zur Elementbildung bei einer durchgehenden Struktur



C) Untersuchungen bei kathodischem Korrosionsschutz



# Regelwerke zum Korrosionssystem Stahl im Meerwasser und Kathodischen Korrosionsschutz (KKS) von Offshore-Gründungsstrukturen



Das Diagramm zeigt eine detaillierte Übersicht über die Regelwerke für den Kathodischen Korrosionsschutz (KKS) von Offshore-Gründungsstrukturen. Es ist in eine Tabelle unterteilt, die verschiedene Aspekte wie die Art der Struktur, die Umgebung, die Normen und die zugehörigen Regelwerke darstellt. Die Tabelle ist farblich in Zellen unterteilt, die die Relevanz der Regelwerke für verschiedene Kategorien von Strukturen und Umgebungen zeigen.

Struktur	Umwelt	Norm	Beschreibung	KKS-System				Korrosionsschutz	Korrosionsschutz	KKS
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen			
Offshore-Gründungsstruktur	Meerwasser	Stahl	Kathodischer Korrosionsschutz	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
Onshore-Gründungsstruktur	Meerwasser	Stahl	Kathodischer Korrosionsschutz	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
Onshore-Gründungsstruktur	Süßwasser	Stahl	Kathodischer Korrosionsschutz	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
Onshore-Gründungsstruktur	Süßwasser	Alu	Kathodischer Korrosionsschutz	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	
				Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	Maßnahmen	

- DIN EN 12495
- DIN EN 12473
- DIN 81249-1|-2|-3
- DIN EN ISO 12944-1 bis -9
- HTG-Handbuch: KKS im Wasserbau
- VGB-Standard-021-04
- GfKORR-Richtlinie Gründungskörper
- DNVGL-RP Cathodic protection design
- DIN EN ISO 13174

- **Detaillierte Regelwerksübersicht erstellt**
- **Kontinuierliche Aktualisierung**
- **Über PTJ Kontaktaufnahme zu anderen Projekten und Verbänden**
- **Ansatz für zukünftige Kooperationen**



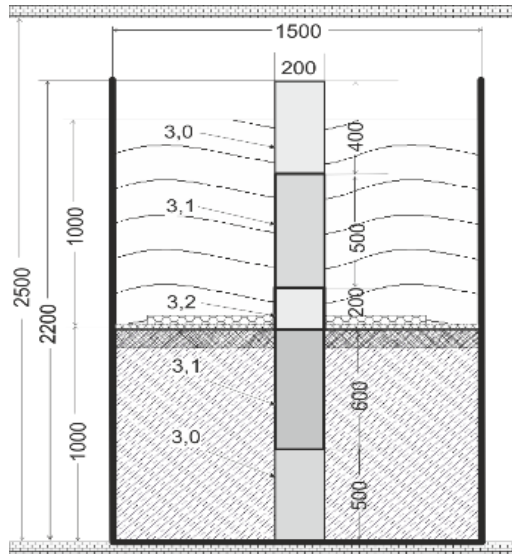
---

# AP 3 Versuchsträger

[www.bam.de](http://www.bam.de)

# Versuchsträger: Konzeption und Einbau

## Modell einer Gründungsstruktur



Von JBO zur Verfügung

S355J2C+N



Einbau des Versuchsträgers erfolgte am  
03.12.2020

---

# AP 4 Laborcontainer

[www.bam.de](http://www.bam.de)

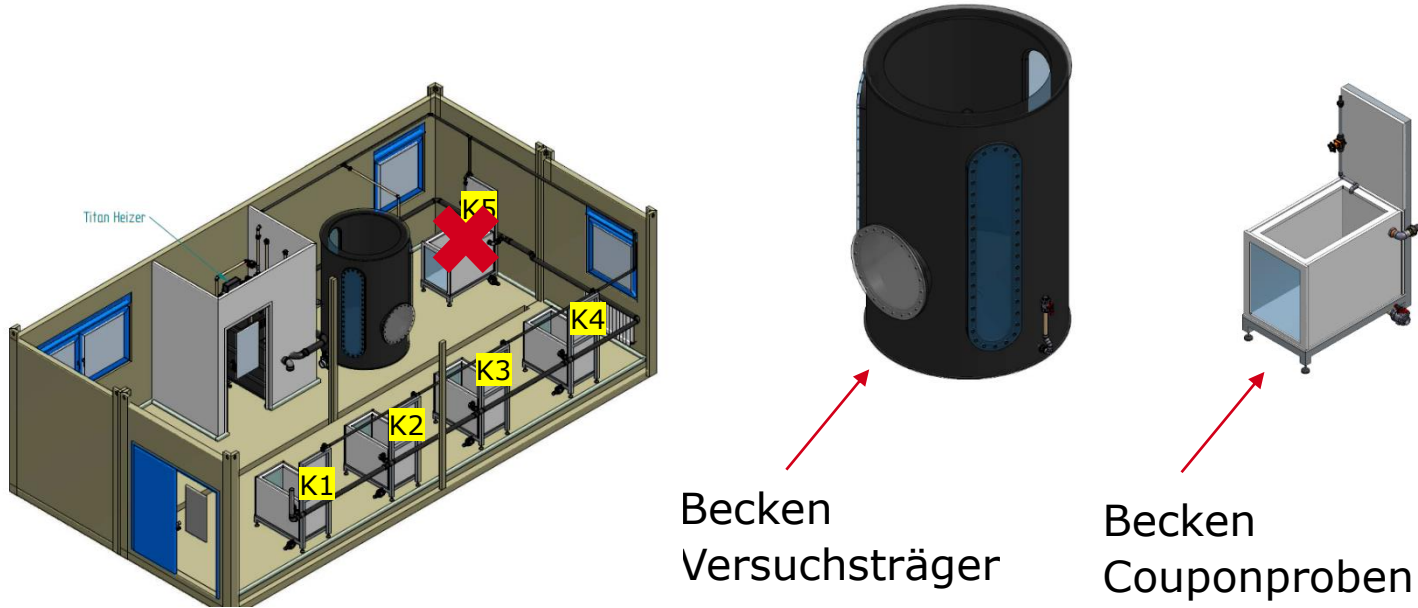
# Zusammenbau des Laborcontainers



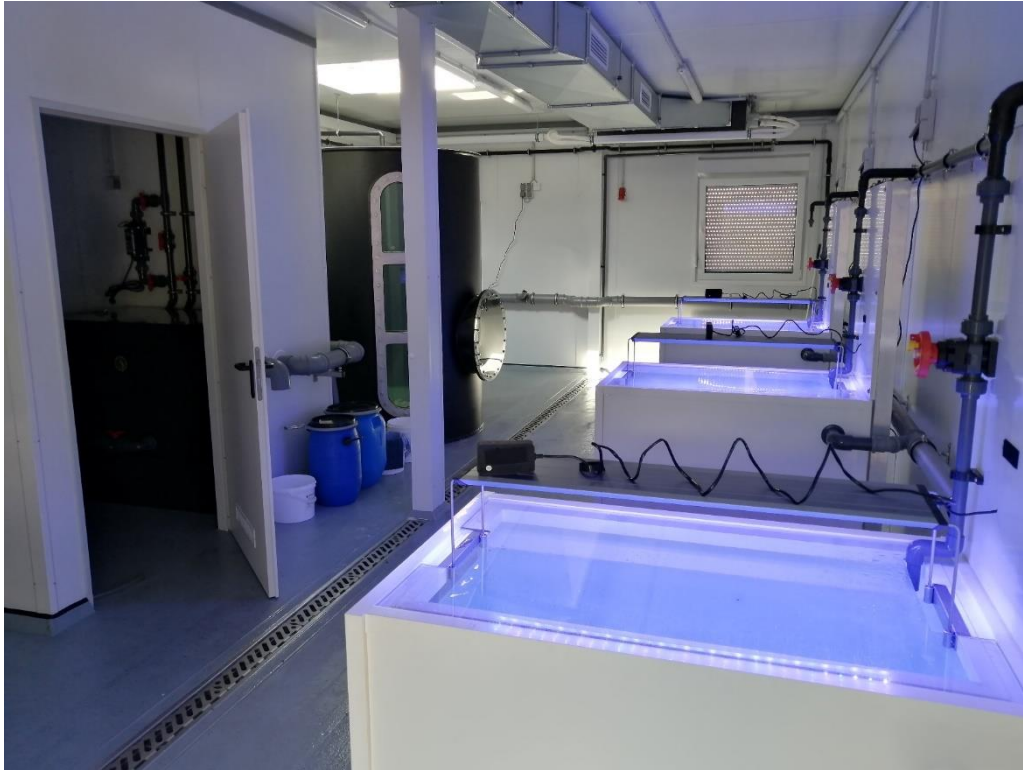
# Fertiger Laborcontainer



# Einrichtung des Laborcontainers

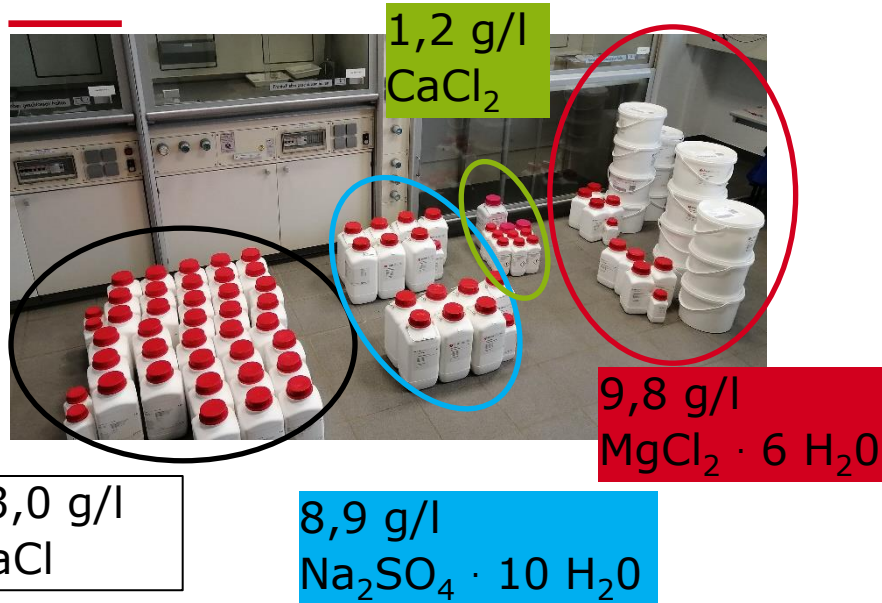


# Einrichtung des Laborcontainers



# Einrichtung der Versuchsbecken

## Erstellung des Korrosionssystems



Künstliches Meerwasser  
nach DIN EN ISO 15711:März 2005  
statt realem Nordseewasser

Sand (2 mm Größtkorn, gewaschen)  
statt Sediment

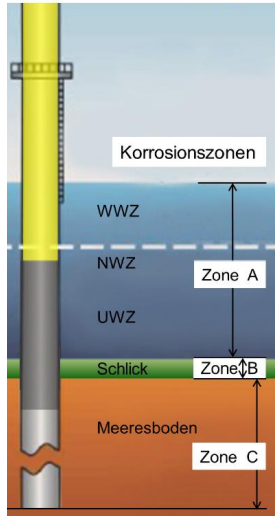


---

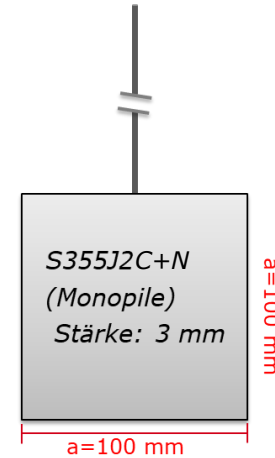
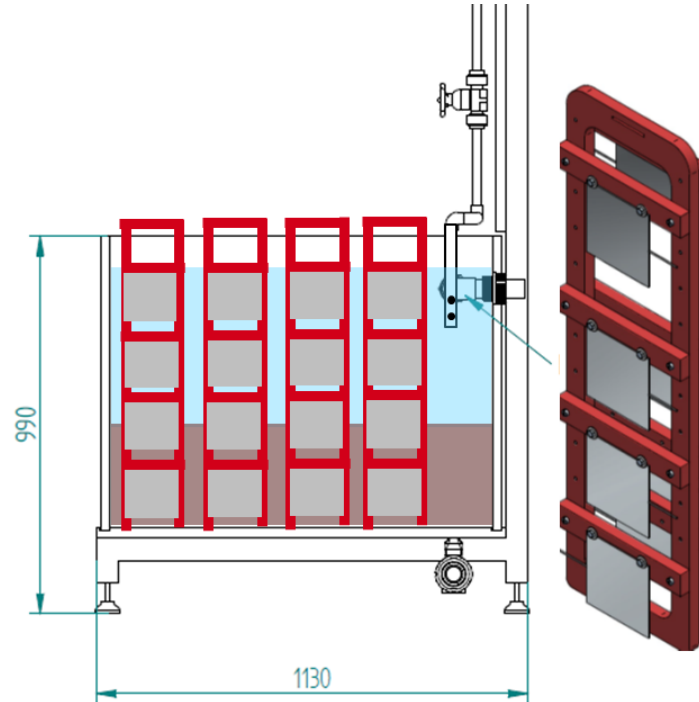
# AP 5 Versuche

[www.bam.de](http://www.bam.de)

# Planung der Versuche mit Couponproben



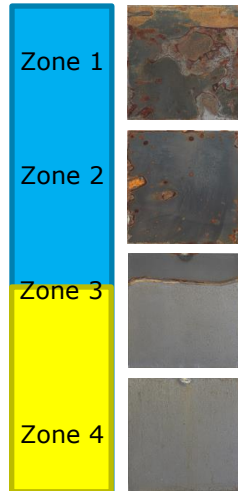
VGB/BAW-Standard Korrosionsschutz von Offshore-Bauwerken zur Nutzung der Windenergie  
Teil 4: Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)



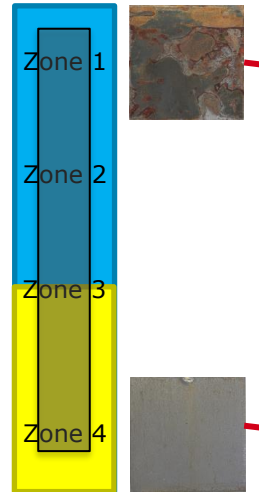
# Zu charakterisierende Korrosionssysteme

- Messungen in einem idealisierten System im Laborcontainer:  
künstliches Meerwasser, Sand als Sediment

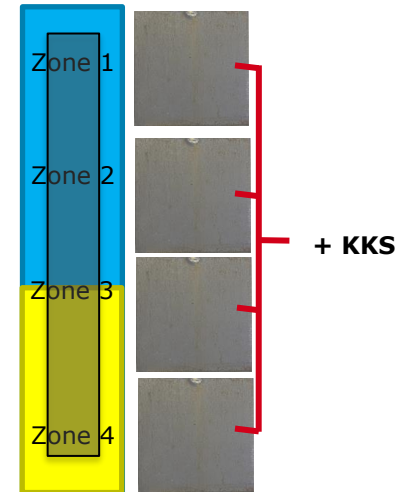
**A) Untersuchungen in den einzelnen  
(voneinander getrennten) Zonen**



**B) Untersuchungen zur Elementbildung  
bei einer durchgehenden Struktur**



**C) Untersuchungen bei  
kathodischem Korrosionsschutz**



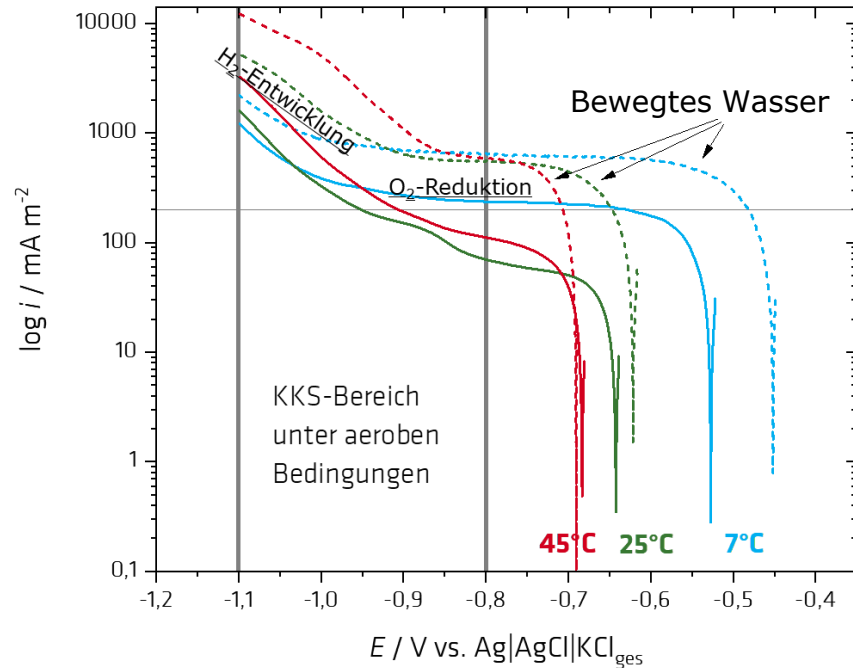
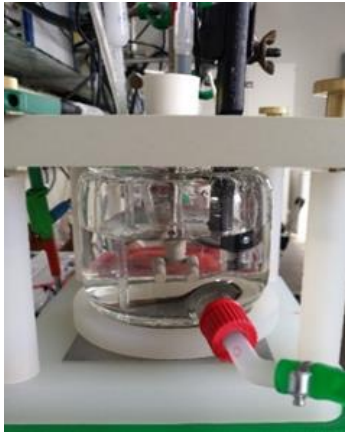
# Vorversuche im Labor unter dynamischer Potentialveränderung

Stahl (S355J2C+N)

in Nordseewasser

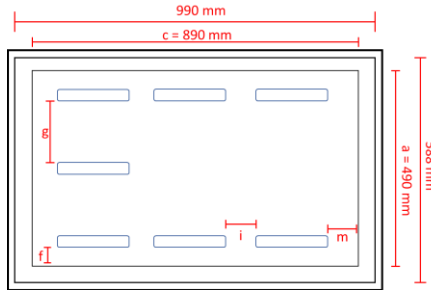
dynamisch polarisiert

Potentialvorschubgeschwindigkeit:  $0,2 \text{ mV s}^{-1}$

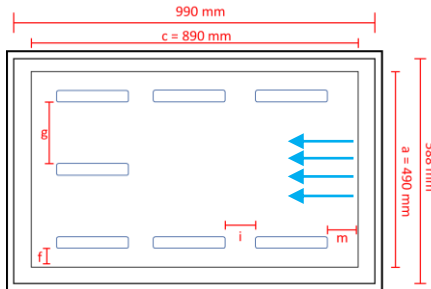


# Experimentplanung System A

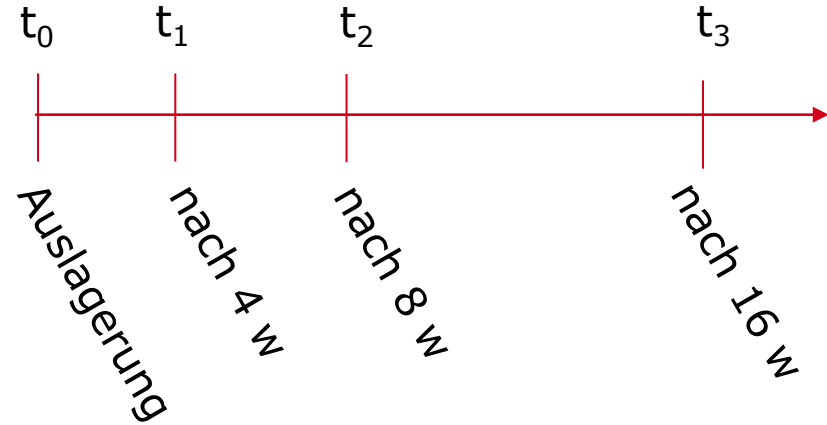
## Voneinander getrennte Zonen



Becken K1  
*ohne KKS*  
*Wasser stagniert*

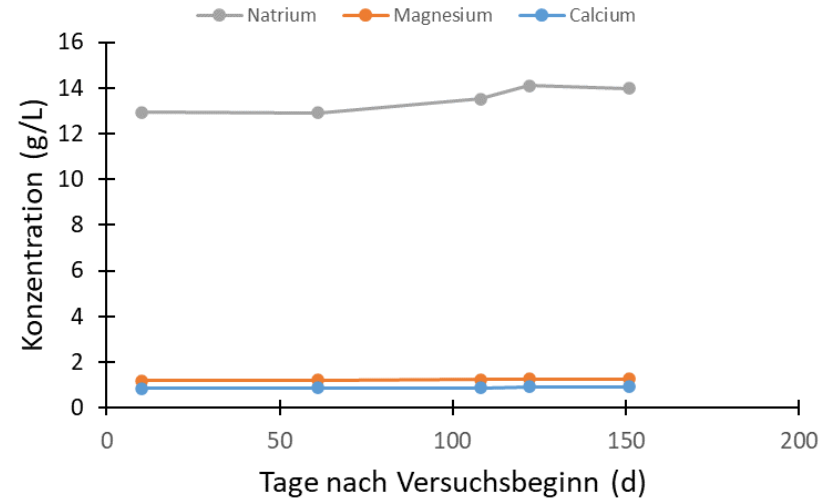
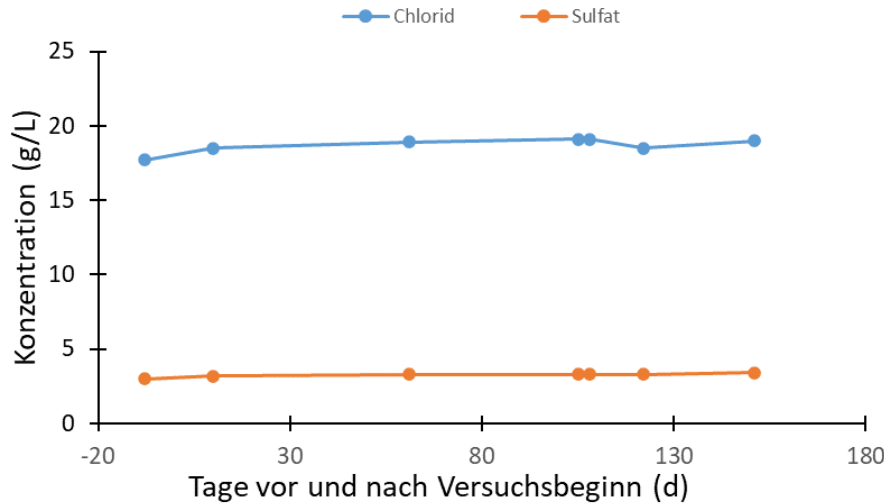


Becken K2  
*ohne KKS*  
*Wasser bewegt*

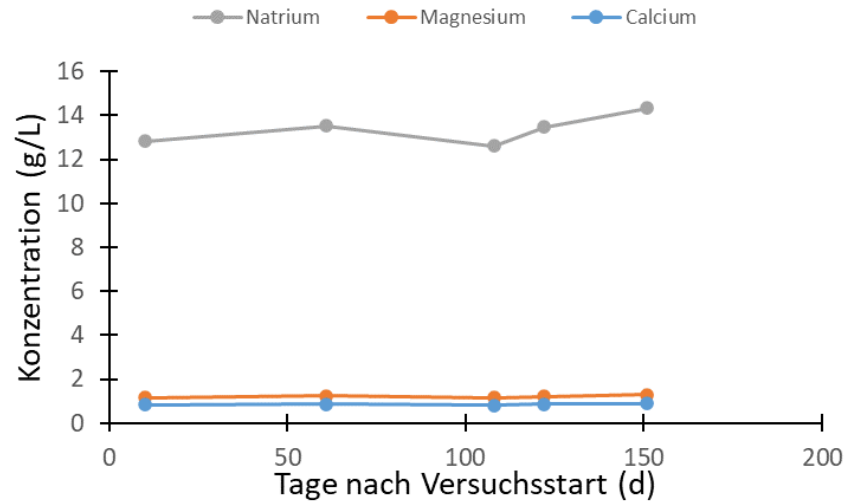
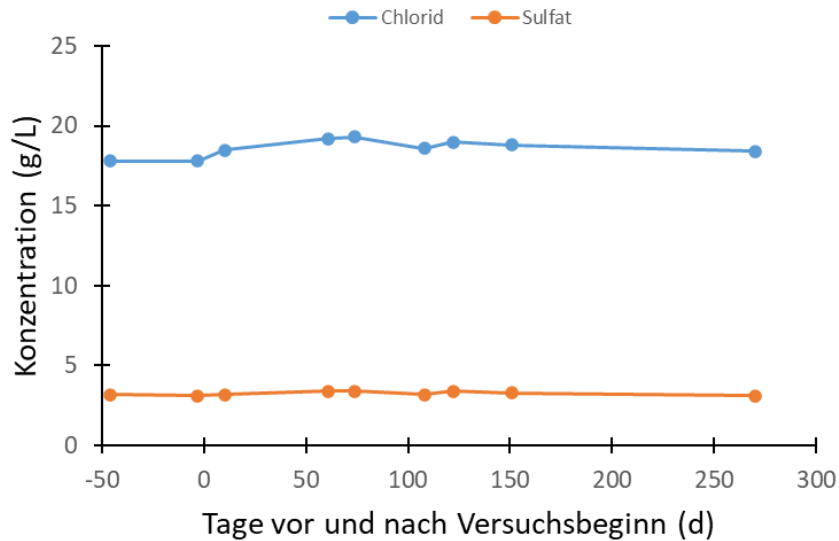


- **Gravimetrisch**
- **Potentialmessungen**

# Überprüfung der Wasserzusammensetzung nach ISO 15711-**bewegtes** Wasser



# Überprüfung der Wasserzusammensetzung nach ISO 15711-**unbewegtes** Wasser



---

Zusammenarbeit mit der Fachbereich 4.1 Biologische Materialschädigung und Referenzorganismen

Grünalgen sind am häufigsten vertreten → 99.5 % im Wasser & ~40 % im Sediment

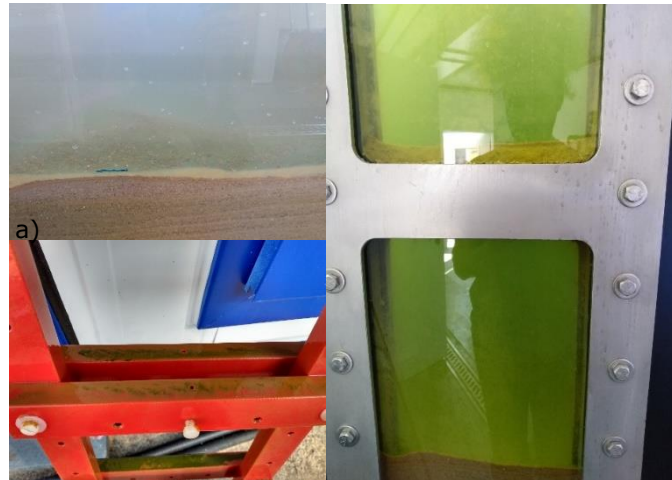
Nachweis von zahlreichen verschiedenen Bakterien

Alle Bakterien:

→ Chemoheterotroph

→ Methylothropen (Chemolithotrophi)

→ tieferegehende Analysen geplant, im Schlussbericht  
detailliert beschrieben

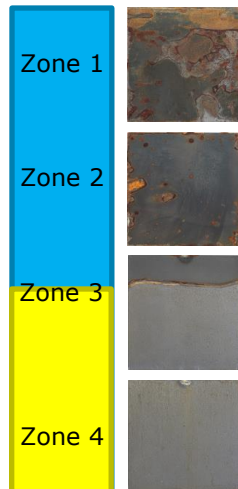




# Zu charakterisierende Korrosionssysteme

## Untersuchung der einzelnen Zonen

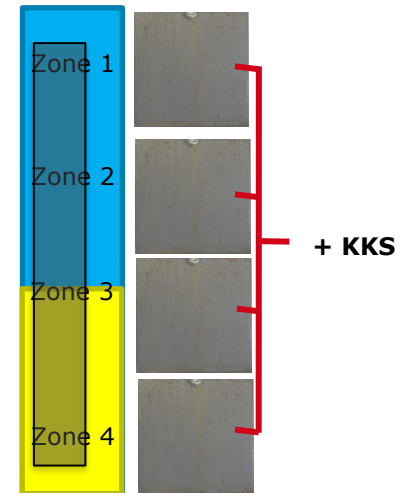
**A) Untersuchungen in den einzelnen (voneinander getrennten) Zonen**



**B) Untersuchungen zur Elementbildung bei einer durchgehenden Struktur**



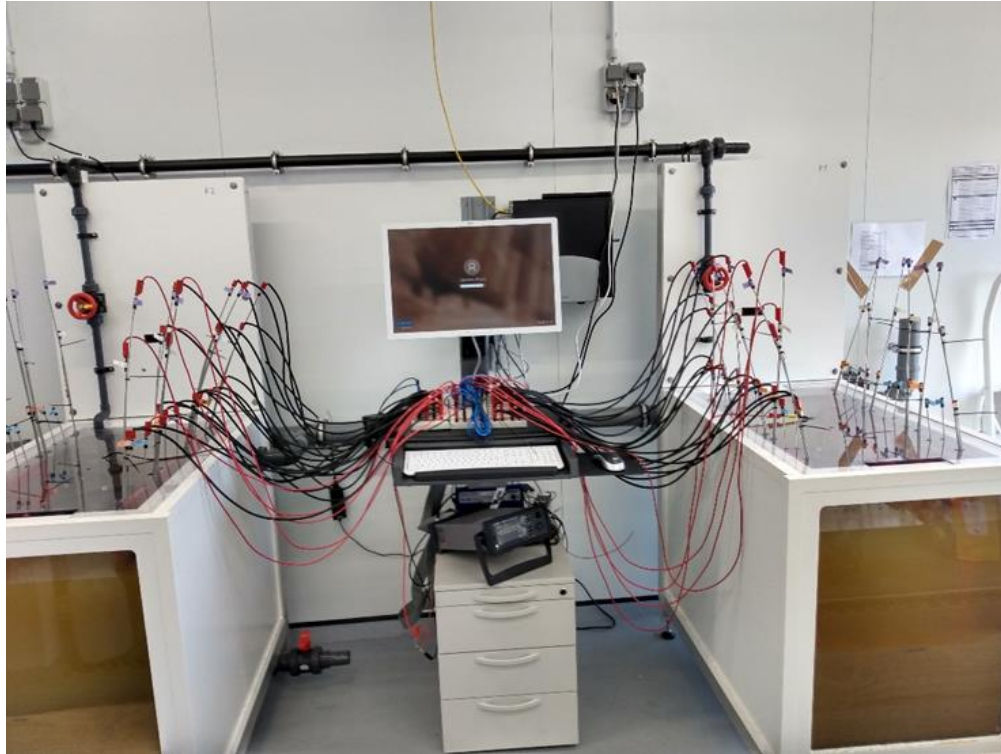
**C) Untersuchungen bei kathodischem Korrosionsschutz**



# Monitoring während der Messung

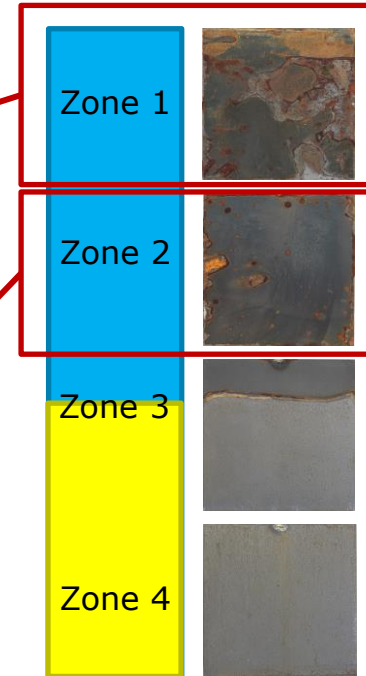
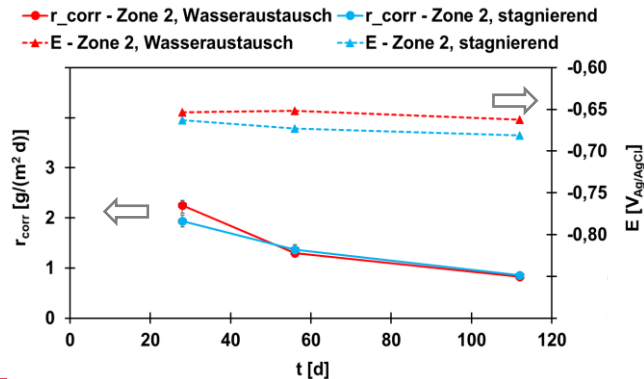
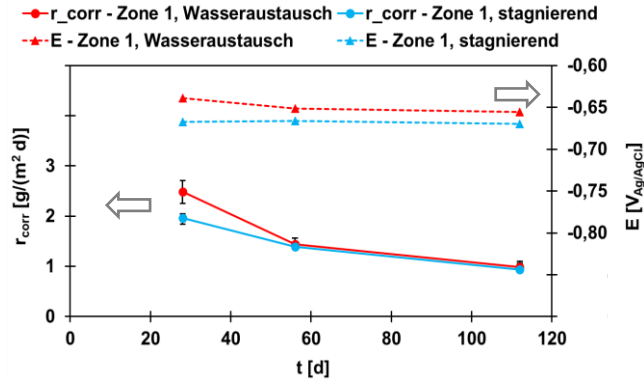
## Proben nach einer Messreihe

---



# Ergebnisse der Auslagerungsversuche ohne KKS

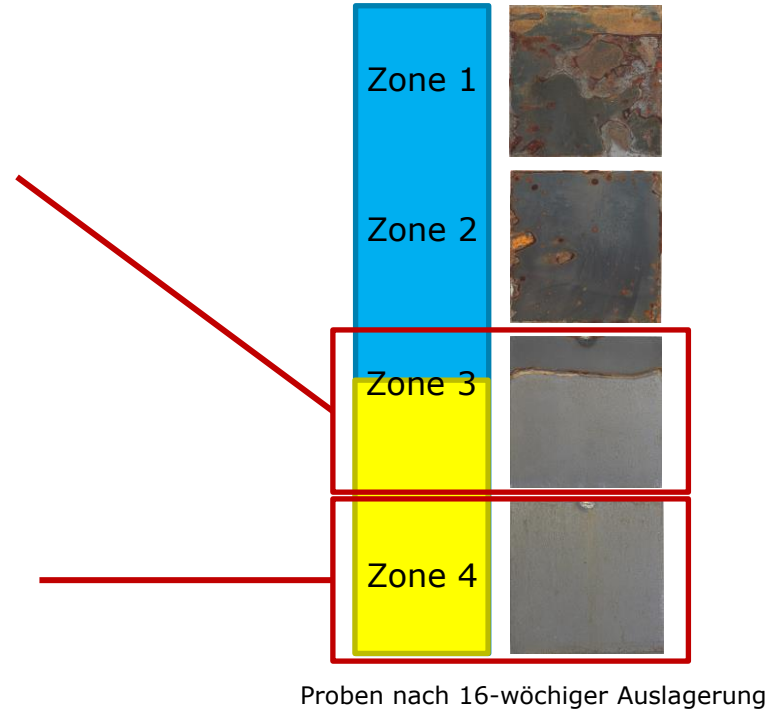
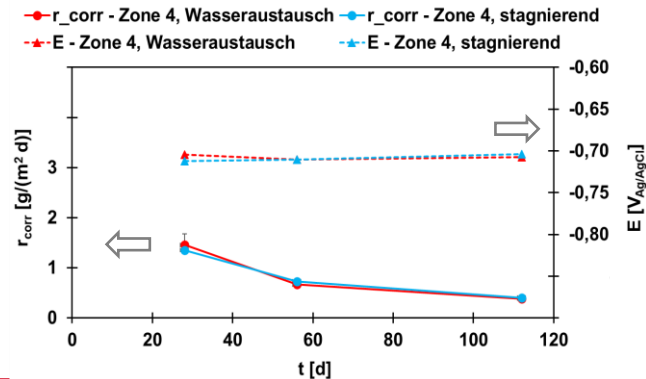
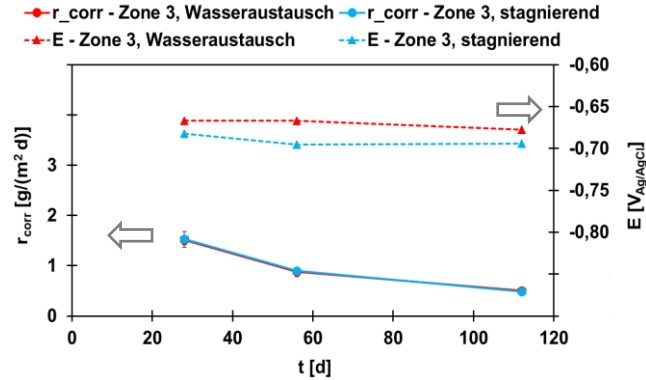
## Zone 1 und 2



Proben nach 16-wöchiger Auslagerung

# Ergebnisse der Auslagerungsversuche ohne KKS

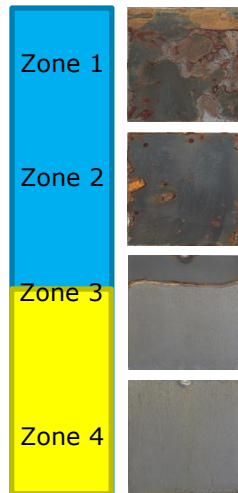
## Zone 3 und 4



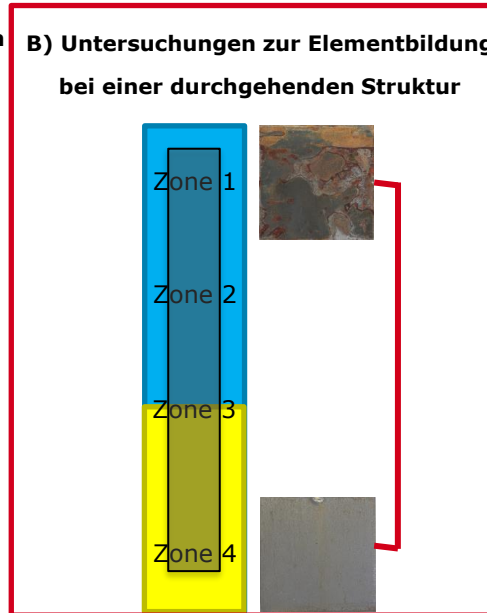
# Zu charakterisierende Korrosionssysteme

## Untersuchung der Elementbildung

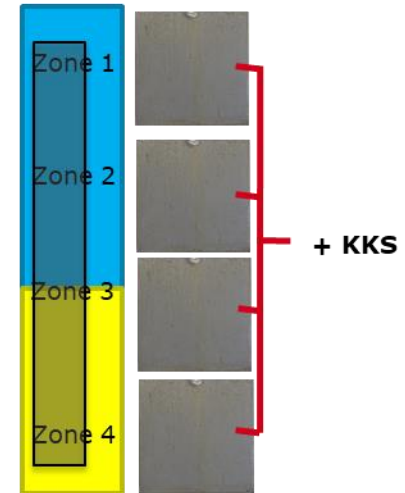
A) Untersuchungen in den einzelnen (voneinander getrennten) Zonen



B) Untersuchungen zur Elementbildung bei einer durchgehenden Struktur

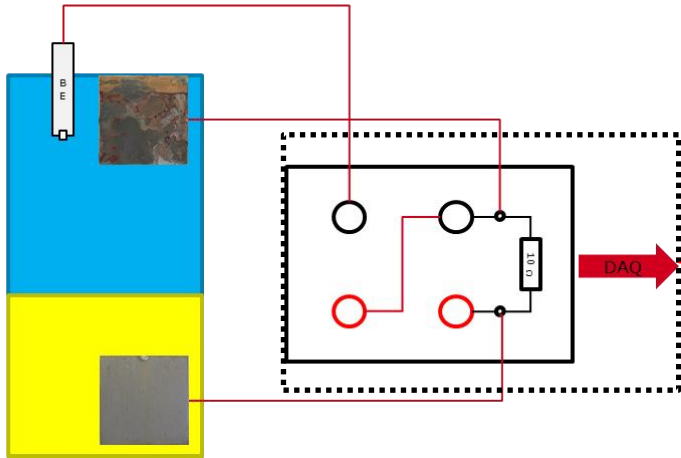


C) Untersuchungen bei kathodischem Korrosionsschutz



# Experimentplanung System B

## Zusammengeschaltete Proben

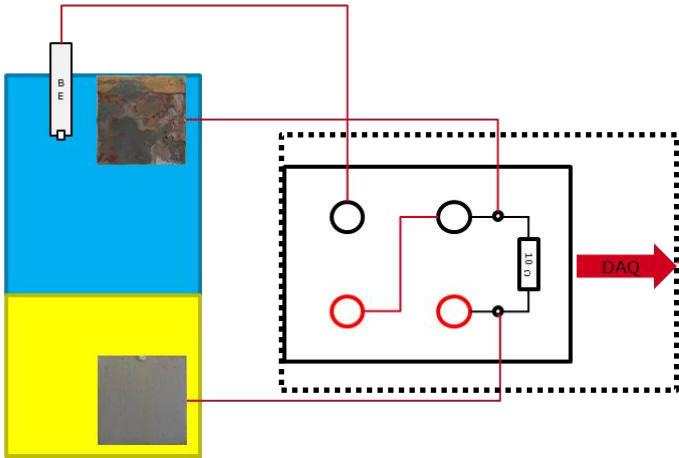


Bestimmung der Stromrichtung und des Betrages

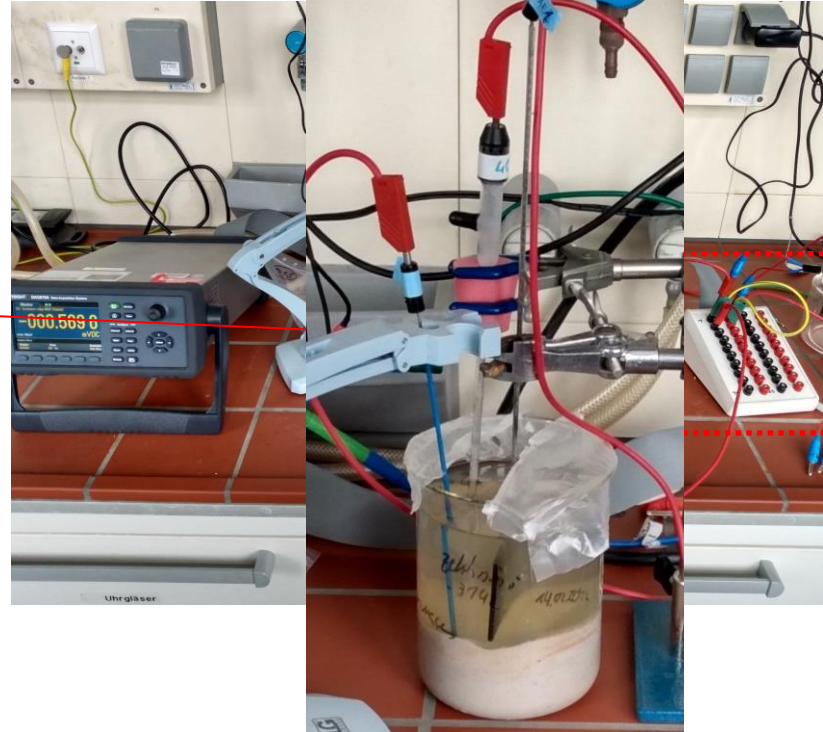
Versuch jeweils im Becken mit Wassereinspeisung und stagnierend

# Experimentplanung System B

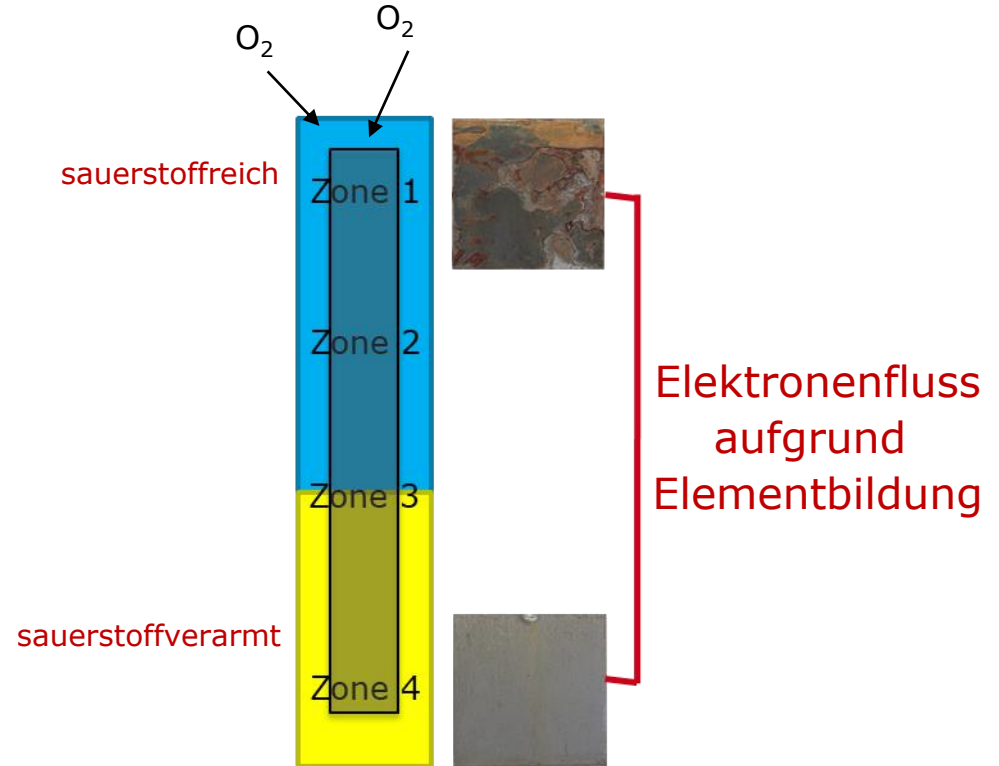
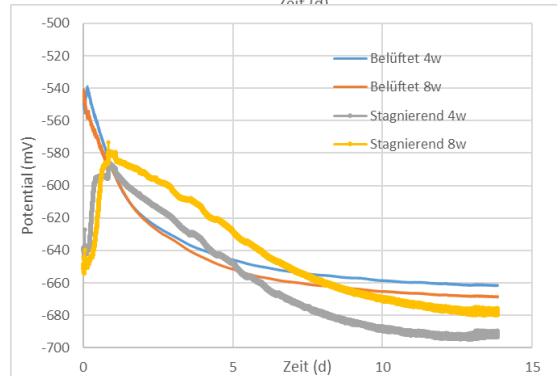
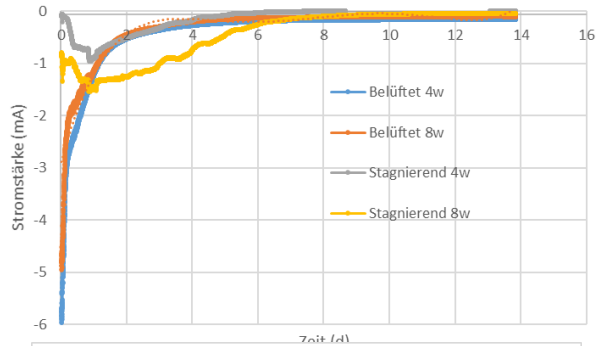
## Zusammengeschaltete Proben



Bestimmung der Stromrichtung und des Betrages  
Versuchnachstellung im Labormaßstab



# Ergebnisse der Auslagerungsversuche mit Elementstrom - laufend



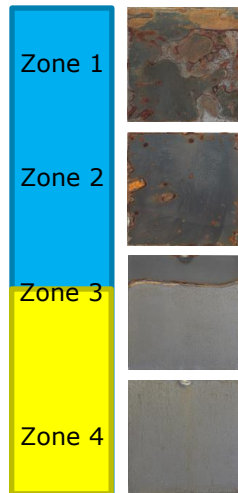


# Zu charakterisierende Korrosionssysteme

## Untersuchungen unter KKS

---

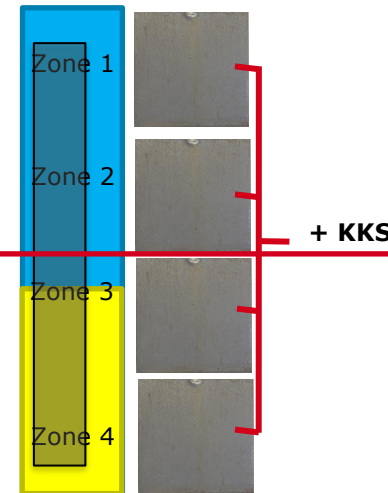
**A) Untersuchungen in den einzelnen (voneinander getrennten) Zonen**



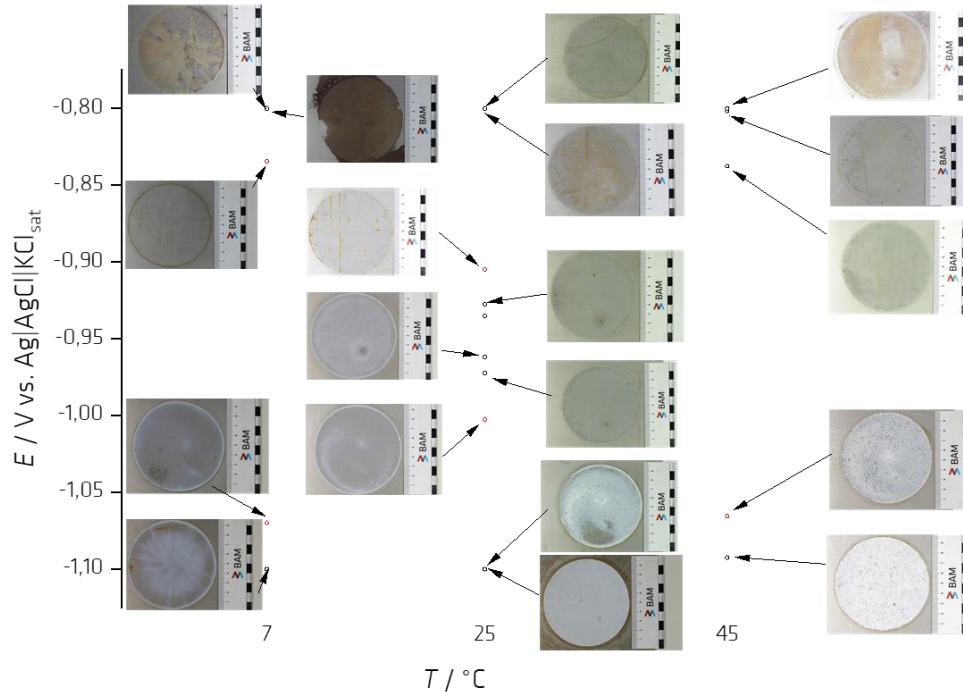
**B) Untersuchungen zur Elementbildung bei einer durchgehenden Struktur**



**C) Untersuchungen bei kathodischem Korrosionsschutz**



# Vorversuche an kathodisch geschützten Stahloberflächen



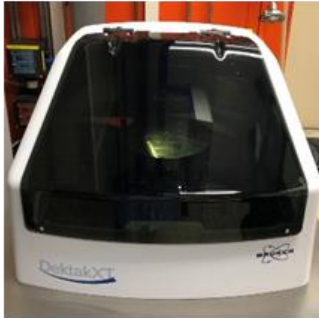
Bedingungen für die Ausbildung kalkhaltiger Schichten?

→ weitere Analysen im Labor

Vermutung aus Vorversuchen:

- Carbonatgehalt in der Lösung?
- Ausbildungszeit?
- Oberflächenbeschaffenheit?
- ...

## Profilometrie (PM)



Profilometer, *Dektak XT*  
Fa. Bruker

- Rauheit
- Schichtdicke

## Röntgen- diffraktion (XRD)



Röntgendiffraktometer, *XRD 3000 TT*  
Fa. Seifert & Co

- Elementzusammensetzung
- Phasenanalyse

## Elektronen- mikroskopie (SEM)



Rasterelektronen-  
Mikroskop, *FLEX  
SEM 1000*  
Fa. Hitachi

- Topographie
- Element-  
zusammensetzung

## Spektrale Ellipsometrie (SE)

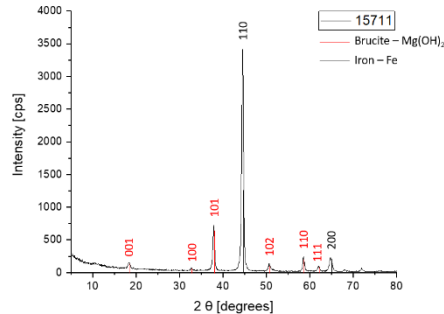


UV-VIS Ellipsometer, *M2000DI*

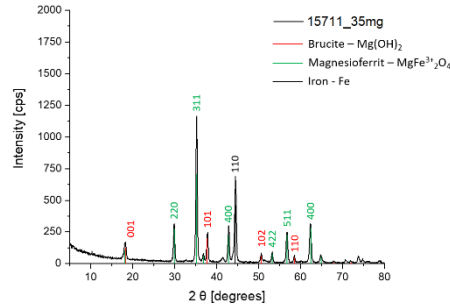
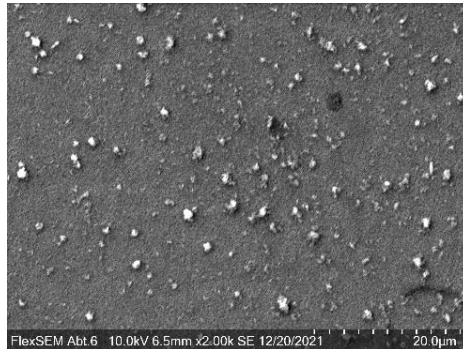
- Rauheit
- Schichtdicke
- Porosität

# Element- und Phasenanalyse des Elektrolyten

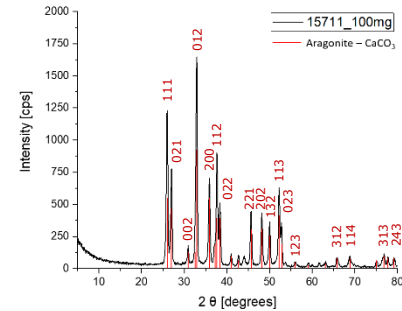
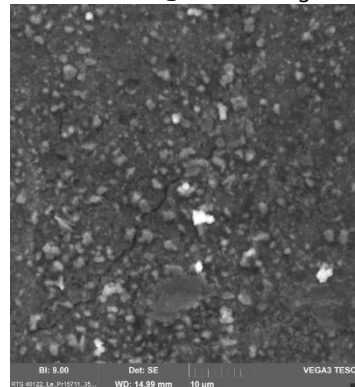
## Variation des Carbonatgehaltes ( $\text{NaHCO}_3$ )



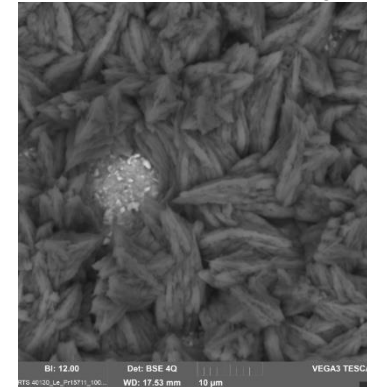
ISO 15711



+35 mg  $\text{NaHCO}_3$

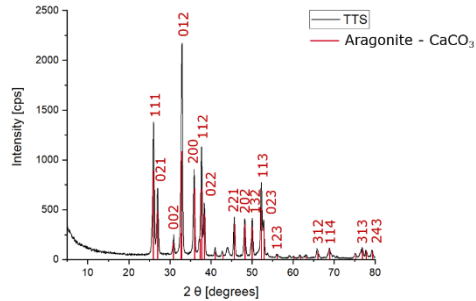


+100 mg  $\text{NaHCO}_3$

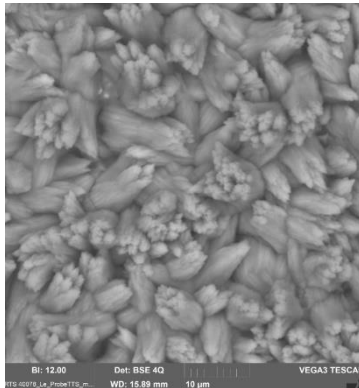


# Element- und Phasenanalyse des Elektrolyten

## Variation des Carbonatgehaltes ( $\text{NaHCO}_3$ )



Wasser Laborcontainer nach ISO 15711



Laborcontainer-Wasser:

→ entspricht ISO 15711 + 100mg  $\text{NaHCO}_3$

weitere untersuchte normative Meerwasserelektrolyte:

**ASTM D1141-98** (mit Carbonat- und Kaliumzusatz)

→ keine calciumhaltigen Schichten wurden gebildet

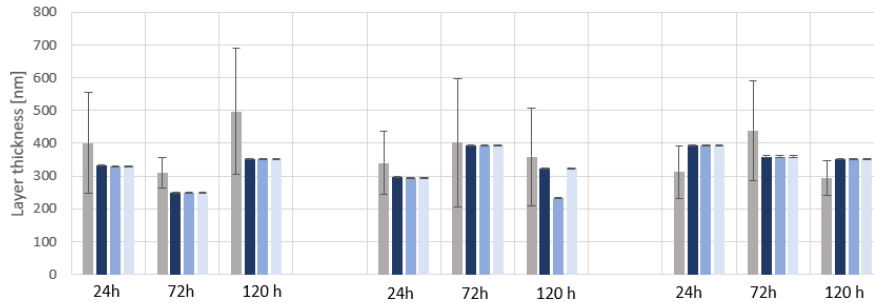
**DIN 50905** (erhöhter  $\text{NaHCO}_3$ -Gehalt)

→ entspricht ISO 15711+100 mg  $\text{NaHCO}_3$

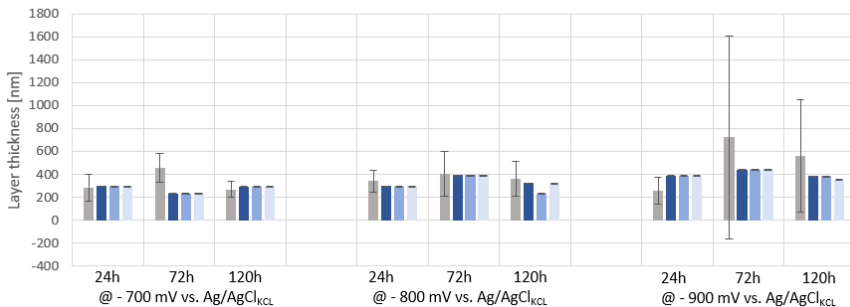
→ calciumhaltige Schichten wurden nachgewiesen

# Schichtdickenvergleich PM vs. SE<sub>EMA</sub> (linear vs. BM vs. MG)

Profilometry vs. Spectroscopic ellipsometry @ - 800 mV vs. Ag/AgCl<sub>KCL</sub>



Profilometry vs. spectroscopic ellipsometry @ 10°C

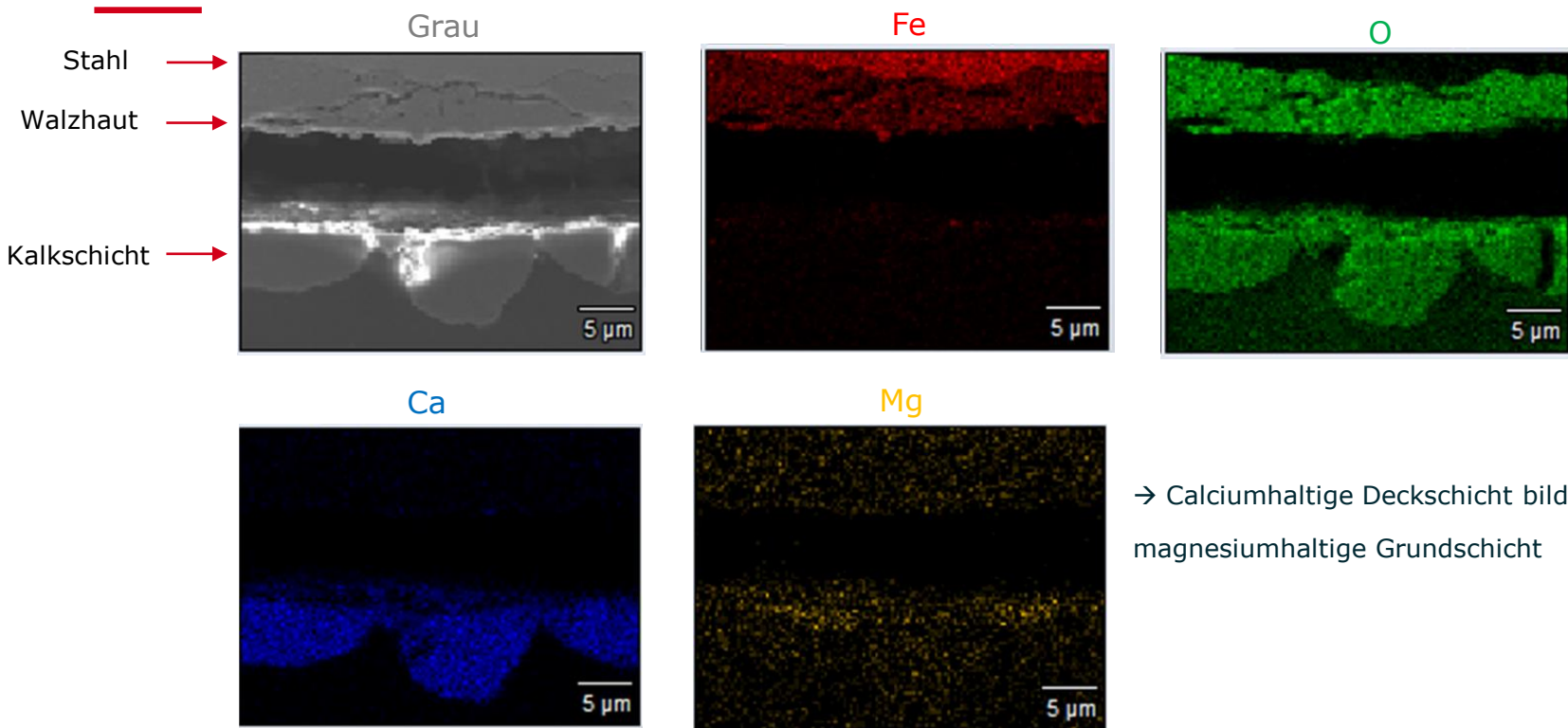


Im Labormaßstab mit spiegelpolierten Proben:

- Schichtdicke unabhängig von Temperatur & Potential
- Schichtdicke maximal bei 300 nm bis 400 nm
- Gute Übereinstimmung komplementärer Methode und Modelle bzgl. Schichtdicken

# EDX-Mapping von Querschliffen

## Elementverteilung auf Probenoberflächen



→ Calciumhaltige Deckschicht bildet sich auf magnesiumhaltige Grundschicht

# Was haben wir erreicht?

---

1. Wichtige Erkenntnisse zum Betrieb des Laborcontainers und zur Nachstellung von Korrosionssystemen
2. Wir können die Korrosivität und ablaufende Reaktionen in den einzelnen Zonen beschreiben und bewerten
3. Erkenntnisse zu künstlichem Meerwasser: Einsatzgrenzen und Besonderheiten
4. Strömungseinfluss auf Korrosionssysteme sind nicht zu unterschätzen
5. Kalkschichtbildung nicht trivial → weitere Untersuchung notwendig
6. Neue Ansätze für Korrosionsmonitoring



---

**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!**



[1] <https://www.bund.net/energie/wende/erneuerbare-energien/windenergie/offshore-windenergie/>, aufgerufen am [10.01.2022]

# Corrosion testing in a laboratory container: Corrosion testing with artificial seawater and sediment

**Khalid Zekhnini, Martin Babutzka**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Division 7.6 Corrosion and Corrosion Protection

Inside the laboratory container:  
-4 small and 1 big tank  
- Water pipes between the tanks  
-Pump room

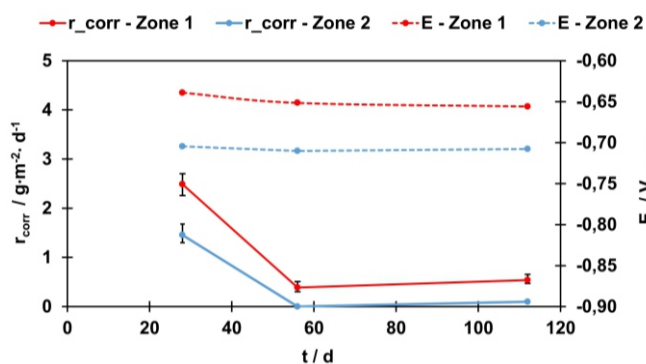
Experimental Setup:  
-PC  
-Keysight data logger  
-Gamry Potentiostat



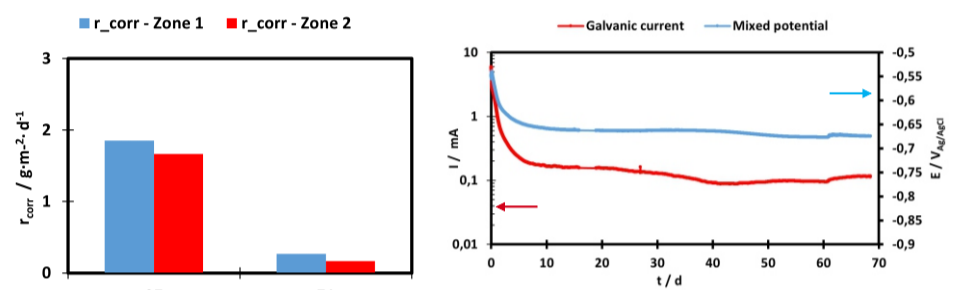
**Motivation**

- Highly corrosive conditions in offshore areas
- Particular challenge for the safe operation of WTCs
- Research on the foundation structure to ensure safe operations of the turbines
- Usage of circulating artificial seawater as electrolyte
- Simulation of different areas of WTCs in test tanks
- Gravimetric and electrochemical determination of corrosion rates

## Without galvanic current (Open Circuit)

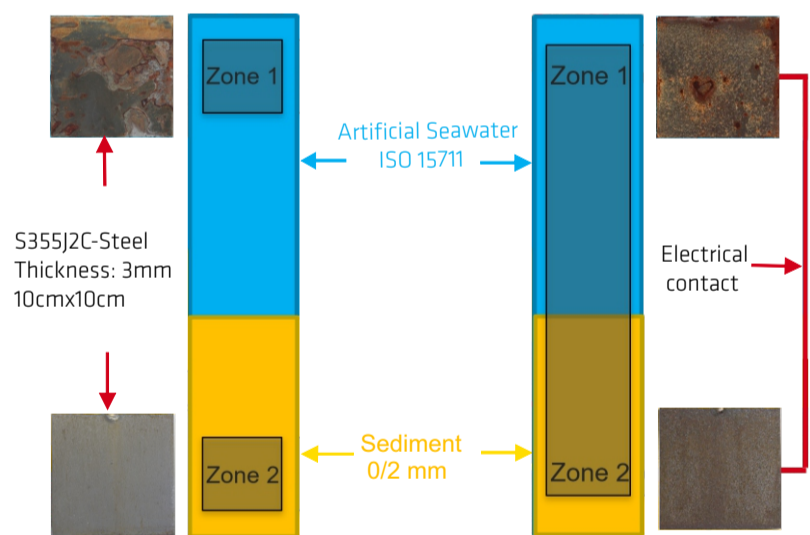
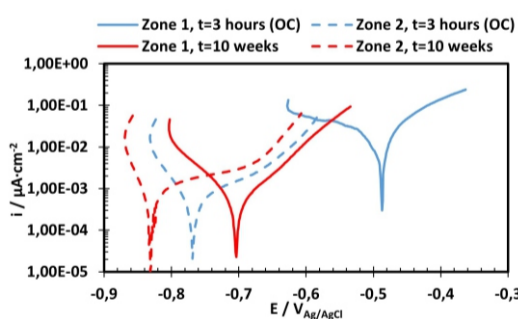


## With galvanic current

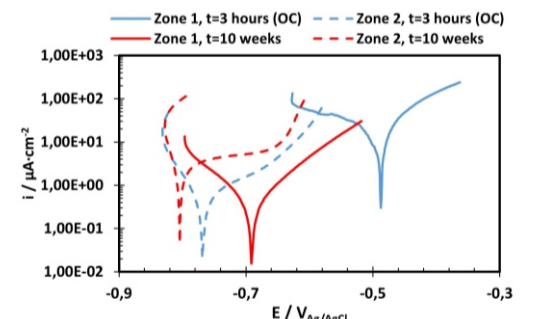


Measurements in an idealised system in a laboratory container:  
Artificial seawater, sand as sediment

Investigations in the individual, separate zones (Open Circuit = OC):  
Determination of the individual corrosion rates



Investigations into the cell formations with an idealized, continuous structure:  
Determination of the current direction and the amount



	Zone 1	Zone 2
$i_{corr, OC=3h} / \mu A \cdot cm^{-2}$	16,0	0,7
$i_{corr, OC=10 weeks} / \mu A \cdot cm^{-2}$	0,6	0,9
$i_{corr, elem=10 weeks} / \mu A \cdot cm^{-2}$	0,4	2,0

## Conclusions

- Important findings for the operation of the laboratory container and for the simulation of corrosion systems in the tanks
- Description and evaluation of the corrosion behaviour and reactions taking place in the individual zones are possible
- Clear differences between underwater and sediment areas can be determined
- Next step: Working with real seawater

This work was supported by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action in the frame of the project KKS-Gründung FKZ 0324333D."

