

Peter Lebelt, Dr.-Ing. Jörg Gehrke
Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH, Dresden

Korrosionsverhalten von Zink in natürlicher Atmosphäre

Bericht Nr. 167
Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.
Düsseldorf
2018

Abstract:

In Deutschland und Europa wurde die Umweltbelastung in den vergangenen Jahrzehnten durch strengere gesetzliche Regulierung mit der Festlegung geringerer Emissionsgrenzwerte systematisch reduziert. Aufgrund der reduzierten Schadstoffbelastung wurden eine geringere Korrosivität und eine damit verbundene längere Korrosionsschutzdauer von Zinküberzügen in natürlicher Atmosphäre erwartet. Im Auftrag des Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (GAV) starteten unter der Leitung der Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH (IKS Dresden GmbH) im Mai 2011 Auslagerungstests mit standardisierten Korrosionsprobekörpern nach ISO 9226 [1] an sechs ausgewählten Straßenbrücken in Deutschland. Ziele waren die Bestimmung der aktuellen atmosphärischen Korrosivität und eine Aussage zum langfristigen Korrosionsverhalten von Zinküberzügen, um deren Einsatz als wartungsfreies Korrosionsschutzsystem für dynamisch belastete Brückenbauwerke abzusichern [2].

Mit der bisher durchlaufenen 5-jährigen atmosphärischen Korrosionsbelastung von Probekörpern kann an sechs untersuchten Brückenbauwerken gezeigt werden, welche Korrosivitätskategorie unter den heute wirkenden atmosphärischen Bedingungen vorliegt. Durch Vergleich mit Korrosivitätskategorien einer BAST-Studie aus dem Jahr 1983 [3], kann für vier der untersuchten Brückenbauwerke eine Abnahme der Korrosivität festgestellt werden. Zwei der untersuchten Brückenbauwerke wurden erst nach 1983 errichtet, wodurch für diese Brücken keine Vergleichsmesswerte aus deren Historie vorliegen. Werden die nach dem ersten Jahr der Auslagerung bestimmten Korrosionsgeschwindigkeiten für eine Bestimmung der Korrosivitätskategorie gemäß DIN EN ISO 9223 [4] und Extrapolation der Korrosionsschutzdauer von Zinküberzügen gemäß DIN EN ISO 9224 [5] zugrunde gelegt, kann in Abhängigkeit von der eingesetzten Zinkschichtdicke eine Gesamtschutzdauer prognostiziert werden. Mit der bisher an den sechs Brückenbauwerken begleiteten 5-jährigen Messdauer zur Korrosionsgeschwindigkeit von Probekörpern ist es nun möglich, den aus dem ersten Jahr der Freibewitterung prognostizierten langfristigen korrosiven Abtrag für Zink der tatsächlichen Korrosionsgeschwindigkeit in natürlicher Bewitterung der letzten fünf Jahre gegenüberzustellen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der häufig verwendete Ansatz zur linearen Korrosionsgeschwindigkeit für die Auslegung der Schutzdauer von Zinküberzügen, aus dem Korrosionsverlust des ersten Jahrs der Auslagerung, äußerst konservativ ist und dem tatsächlichen degressiven Korrosionsverhalten und der damit verbundenen wesentlich längeren Schutzdauer nicht gerecht wird.

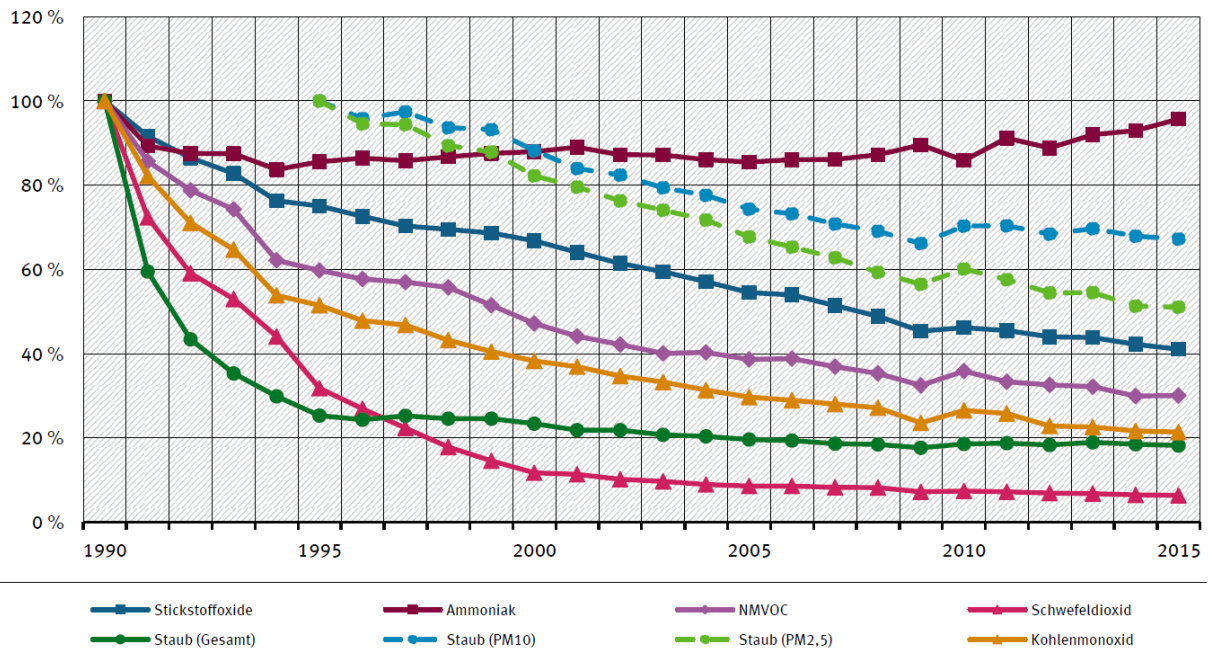
1 Einleitung

Die Korrosionsbelastung von Stahlbaukonstruktionen wird in natürlicher Atmosphäre zum großen Teil durch die Anwesenheit eines Elektrolyten (z.B. Kondenswasser, Niederschlag, Spritzwasser) bei gleichzeitigem Angebot an Sauerstoff und die Einwirkdauer dieser beiden Komponenten bei gegebener Temperatur hervorgerufen. Des Weiteren wirken Salze, Schwefeldioxid und Staub zusätzlich korrosionsbeschleunigend. Aus diesem Grund werden Stahlbaukonstruktionen durch Korrosionsschutzsysteme vor den Witterungsbedingungen geschützt. Fehlt der Elektrolyt oder liegt dieser bei niedrigen Temperaturen in fester Form vor, kommt die atmosphärische Korrosion zum Erliegen. Das Entfernen des Oxidationsmittels Sauerstoff führt nur in geschlossenen Systemen (z.B. dicht geschweißte Hohlkästen) zum Erliegen der atmosphärischen Korrosionsreaktion. Fehlen die beschleunigenden Korrosionsstimulantien wirkt sich das ebenfalls positiv mit einer verringerten Korrosionsgeschwindigkeit aus.

In den Jahren 1990 bis 2015 wurde, nach Informationen des Umweltbundesamtes, eine deutliche Abnahme der Schadstoffexposition in der Atmosphäre festgestellt [6] (siehe Abbildung 1). Durch verringerte Exposition der Schadstoffe NO_x um 58,9%, SO_2 um 93,6% und NH_3 um 4,3% in der Atmosphäre im Jahr 2015 bezogen auf 100% im Jahr 1990 kann generell von einer Verbesserung der Luftqualität und einer damit verbundenen Verringerung der korrosiven Belastung ausgegangen werden.

Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe

Veränderung seit dem Basisjahr (1990/1995) in Prozent



Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 (Stand 02/2017)

Abbildung 1: Luftschadstoffindex für Deutschland Schadstoffbelastung 100 % im Jahr 1990 [6]

Die Verbesserung der Luftqualität wird im Folgenden anhand der Abnahme der Schwefeldioxidkonzentration innerhalb von 10 Jahren deutlich. Zeigte sich im Jahr 1990 noch eine Jahresmittelkonzentration an Schwefeldioxid von $>175 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde bereits 10 Jahre später eine Konzentration von nur $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als maximaler Mittelwert an einer Messstation in Deutschland ermittelt. Die Verteilung der Schwefeldioxidemission in Deutschland und deren flächenhafte Entwicklung, ist exemplarisch in Abbildung 2 dargestellt.

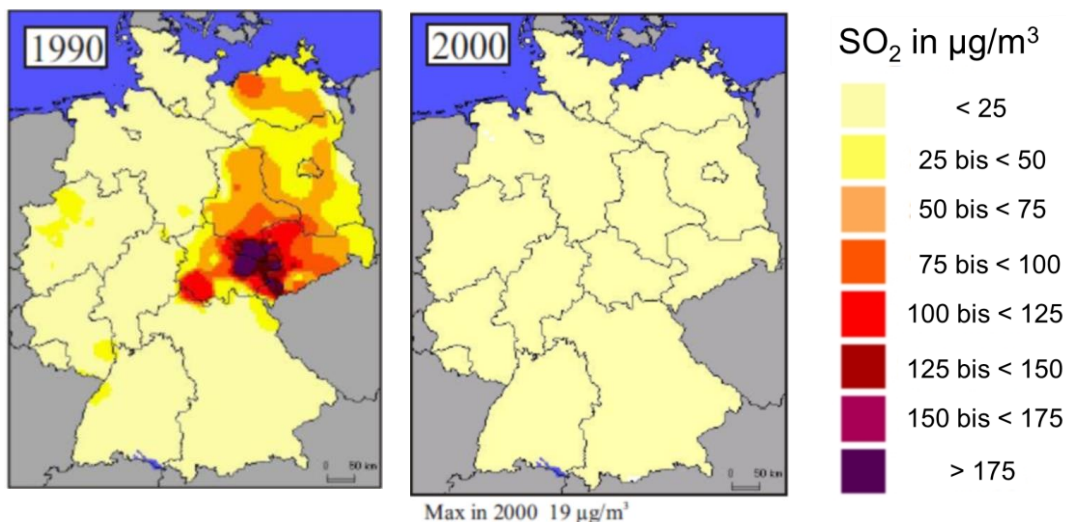


Abbildung 2: SO₂ Konzentrationen als Mittelwert im Jahr 1990 und im Jahr 2000 [7]

Die Emission von Schwefeldioxid verbesserte sich bis zum Jahr 2008 weiter und erreichte in der Folge nur noch mittlere Messwerte von $<10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an allen Messstationen in Deutschland [7].

Für die Ermittlung aktueller Jahresmittelwerte der Schwefeldioxidkonzentration in der Atmosphäre wurde für vier willkürlich ausgewählte Messstationen in Deutschland vom Umweltbundesamt die

Datenbasis aus täglichen Messwerten eines Messzeitraums von einem Jahr für ein Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt. In der folgenden Tabelle 1 sind die daraus berechneten Jahresmittelwerte zusammengestellt. Deutlich ist die weitere Abnahme der Schwefeldioxidkonzentration im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren erkennbar.

Tabelle 1: Jahresmittelwert SO₂, Messzeitraum: 01.07.15-07.07.16

Ausgewählte Messstation in Deutschland	Mittlere SO ₂ Konzentration
Datteln-Hagem, Nordrhein Westfalen	2,51 µg/m ³
Dresden Winckelmannstr., Sachsen	3,11 µg/m ³
Zinnwald, Sachsen	4,78 µg/m ³
Garz (Rügen), Mecklenburg Vorpommern	0,79 µg/m ³

Gerade die Abnahme der Schwefeldioxidkonzentration wirkt sich positiv auf die Korrosionsbelastung aus, da Schwefeldioxid für den sogenannten „sauren Regen“ verantwortlich ist. Sowohl für Baustahl als auch für Zink hat die Anwesenheit von Schwefeldioxid eine beschleunigte Korrosionsreaktion zur Folge. Fehlt diese chemische Verbindung im Elektrolyten (Regen, Tau, Nebel) verringert sich die Korrosionsaktivität und damit auch die Korrosionsgeschwindigkeit. Auch auf die Festlegung der Korrosivitätskategorie hat der Schwefeldioxidgehalt direkten Einfluss, da er als Parameter P_d in die Berechnung der Korrosionsgeschwindigkeit gemäß DIN EN ISO 9223 [4] eingeht.

Auch wenn die globale Konzentration an Schwefeldioxid in der Atmosphäre in Deutschland im Mittel verschwindend gering ist, so gibt es dennoch Emittenten, die für erhöhte Schwefeldioxidkonzentrationen in begrenzter Ausdehnung sorgen können. Bei aktuellen Untersuchungen wurden mit Passivsammlern in einem deutschen Stahlwerk im Messzeitraum Juni bis Dezember 2017 mittlere Schwefeldioxidkonzentrationen von 40 bis 60 µg/m³ in der Atmosphäre ermittelt.

Ein weiterer wichtiger Einflussparameter für die Korrosivität ist die Chloridkonzentration, die als Parameter S_d ebenfalls in die Berechnung der Korrosionsgeschwindigkeit gemäß DIN EN ISO 9223 [4] eingeht. Der atmosphärische Einfluss ist jedoch auf Küstenbereiche beschränkt, da die Chloridkonzentration mit zunehmender Entfernung von der Küste, gemessen in den Niederlanden, rasch abnimmt [8], siehe Tabelle 2. Im Einfluss nicht natürlicher Quellen, wie zum Beispiel Streusalz, muss der Einfluss der Chloridkonzentration durchaus berücksichtigt werden.

Tabelle 2: Chloridgehalt in Regenwasser in Abhängigkeit von der Entfernung zum Meer

Entfernung von der Küste in km	0,4	2,3	5,6	48	86
Chloridgehalt in mg/l	16	9	7	4	3

Für den Korrosionsschutz von atmosphärisch belasteten Stahlbauteilen hat sich das Feuerverzinken unter vorwiegend ruhender Beanspruchung bewährt. Eine Korrosionsschutzdauer von vielen Jahrzehnten ohne Wartung und Instandhaltung ist die Regel. Bei vielen feuerverzinkten Bauwerken erreicht die Korrosionsschutzdauer der Feuerverzinkung die Nutzungsdauer des Bauwerkes, ohne dass am Korrosionsschutzsystem Zinküberzug Ausbesserungsarbeiten nötig werden. Im Vergleich zu handelsüblichen organischen Korrosionsschutzsystemen, die erfahrungsgemäß gewartet und in Abständen von 25-35 Jahren erneuert werden müssen, kann das Feuerverzinken unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer von Stahlbauten eine sehr wirtschaftliche Korrosionsschutzmaßnahme sein [9]. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Stahlkonstruktion für eine Instandhaltungsmaßnahme nur noch schwer oder gar nicht zugänglich ist oder die Nutzung oder Funktion des Bauwerks während der Instandhaltungsmaßnahme eingeschränkt wird. Da die Schutzdauer einer Feuerverzinkung von der Dicke des Zinküberzugs und den vorliegenden Belastungsbedingungen der Atmosphäre abhängig ist, kann die zum Positiven veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre zu einer verlängerten Schutzdauer beitragen.

Zur Untersuchung der aktuellen Korrosivität der Atmosphäre und deren weiterer Entwicklung wurden im Auftrag des Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (GAV) unter der Leitung der Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH (IKS Dresden GmbH) im Mai 2011 Auslagerungstests mit standardisierten Korrosionsprobekörpern nach ISO 9226 [1] an sechs ausgewählten Straßenbrücken in Deutschland begonnen. Mit der bisher erfolgten 5-jährigen atmosphärischen Korrosionsbelastung von Korrosionsprobekörpern kann für sechs untersuchte Brückenbauwerke gezeigt werden, welche Korrosivität unter den heute wirkenden atmosphärischen Belastungen vorliegt und welche Schutzdauer Zinküberzüge unter den derzeit einwirkenden atmosphärischen Belastungsbedingungen erreichen können.

2 Bestimmung der Korrosivitätskategorie der Atmosphäre an Straßenbrücken

Für die Ermittlung der aktuellen Korrosivitätskategorie der Atmosphäre wurden an sechs ausgewählten Brückenbauwerken in Deutschland Standardproben/Wendeln gemäß ISO 9226 [1] aus unlegiertem Stahl (Cu: 0,03-0,1%; P: < 0,07%; Rest: Fe), Zink mit 99,99%, Kupfer mit 99,5%, Aluminium mit 99,5% und zusätzlich feuerverzinktem Stahldraht von der IKS Dresden GmbH ausgelagert. In Tabelle 3 sind die Auslagerungsstandorte aufgelistet.

Tabelle 3: Ausgewählte Brückenbauwerke für die Bestimmung der Korrosivitätskategorie

Bauwerkname	Bundesland	Straße	Brücke über...
Rader Hochbrücke	Schleswig-Holstein	A7	Nord-Ostsee Kanal
Putlitz-Brücke	Berlin	Stadtstraße	Straße/ Eisenbahn
Müglitztalbrücke	Sachsen	A17	Wasserlauf/ Straße/ Eisenbahn
Wirtschaftswegbrücke	Thüringen	Feldzugang	Bundesautobahn A4
Innbrücke	Bayern	A93	Wasserlauf
Donaubrücke	Bayern	A3	Wasserlauf

Es wurde versucht, möglichst viele Beanspruchungsgruppen bei der Standortwahl zu berücksichtigen. So wurden beispielsweise eine Wirtschaftswegbrücke über die A4 zwischen den Anschlussstellen Gera-Leumnitz und Ronneburg mit zu erwartendem Tausalz-Sprühnebel wie auch eine Autobahnbrücke der A93 zwischen Kiefersfelden und Kufstein über den Inn mit erwarteter Betauung ausgewählt. Je Bauwerk wurden zwei charakteristische Bereiche an den Brückenunterseiten mit jeweils drei Korrosionsprobekörpern bestückt. Die Auslagerungsstellen sind für die ausgewählten Brücken in Abbildung 3 bis Abbildung 8 schematisch dargestellt [2].

Wirtschaftsbrücke A4 (566) bei Korbüßen

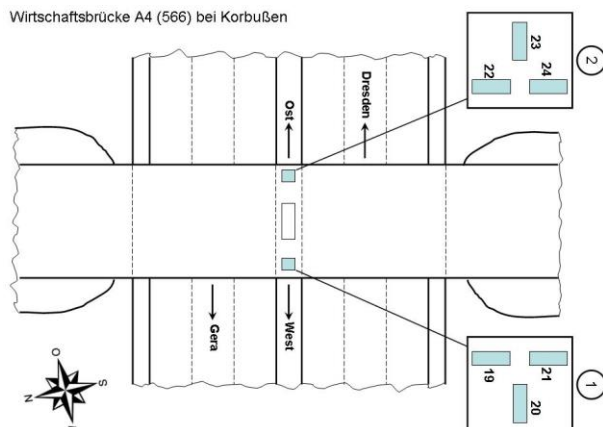


Abbildung 3: Probekörperposition BW 142Ü2 auf der BAB A 4

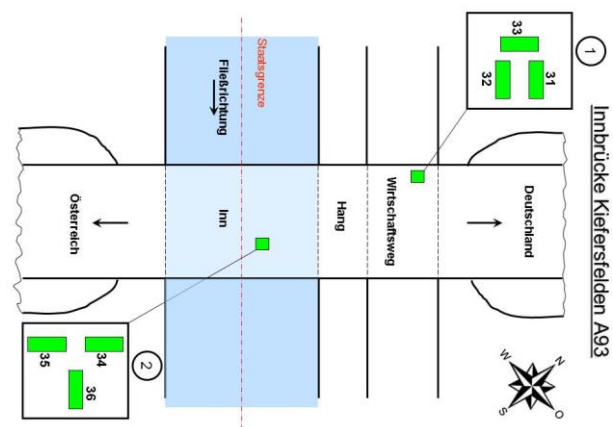


Abbildung 4: Probekörperposition Innbrücke A93 bei Kiefersfelden

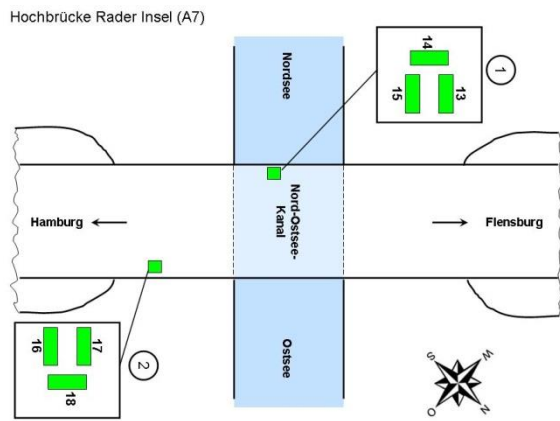


Abbildung 5: Probekörperposition Rader Hochbrücke A7 bei Rendsburg

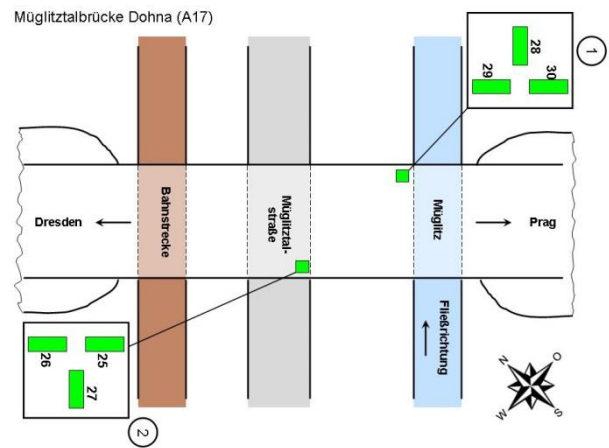


Abbildung 6: Probekörperposition Müglitztalbrücke A17 bei Heidenau

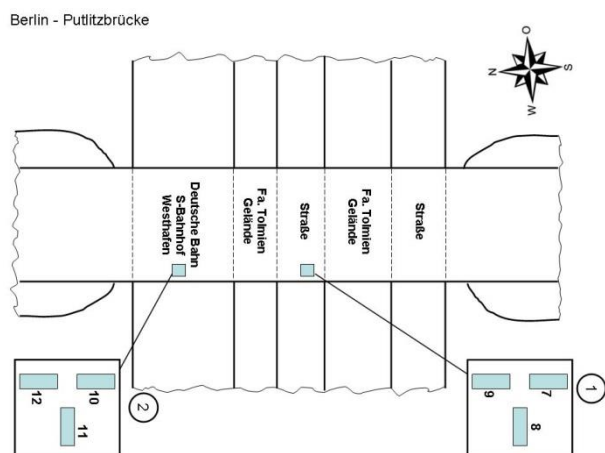


Abbildung 7: Probekörperposition Puttitzbrücke in Berlin

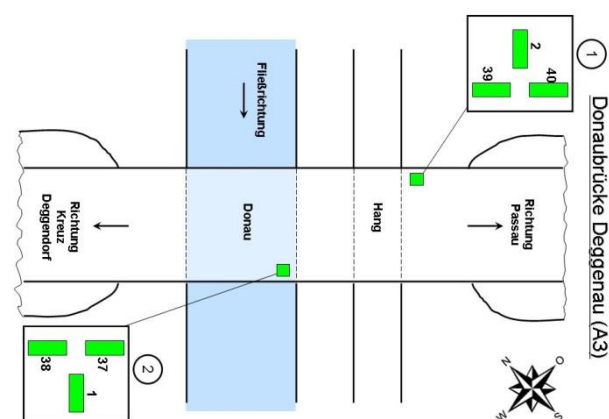


Abbildung 8: Probekörperposition Donaubrücke A3 bei Deggendorf (Deggenu)

Die Probekörper wurden in Brückenmitte, am Widerlager oder entsprechend relevanter Himmelsrichtungen unter den Brücken und vor direkter Beregnung geschützt ausgelagert. In Abbildung 9 ist die Auslagerung der verwendeten Probekörper am Beispiel der Wirtschaftswegbrücke BW 142Ü2 über die Autobahn A4 in der Mitte am Stützpfiler zwischen den Fahrspuren dargestellt.

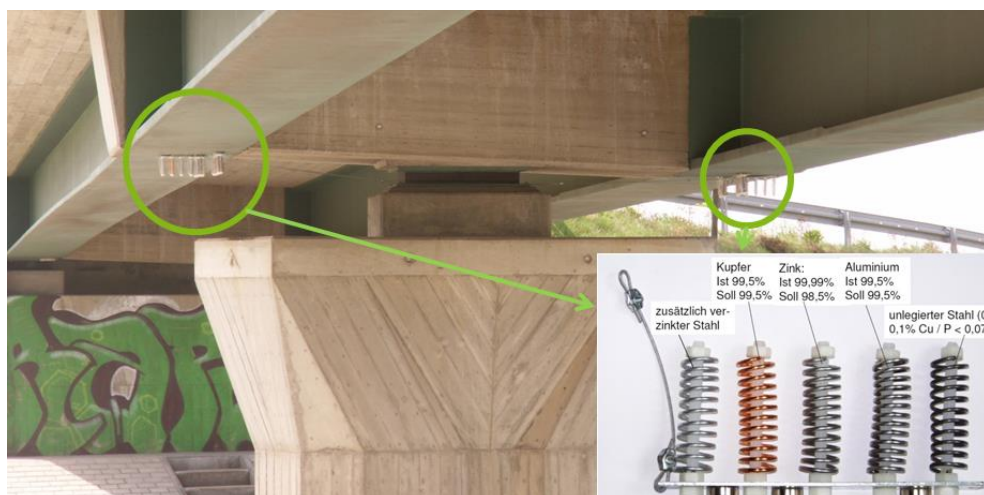


Abbildung 9: Auslagerungsproben an Brücke über die Autobahn A4 in Thüringen

Insgesamt wurden 36 Probekörper zur Ermittlung der Korrosivitätskategorien und dem Nachweis der weiteren Entwicklung der Korrosionsgeschwindigkeit ausgelagert. Die Auslagerungsdauer der

Korrosionsprobekörper wurde zunächst auf 1, 2 und 5 Jahre festgelegt. Der Beginn der Auslagerungsversuche erfolgte im Mai 2011. Im Jahr 2016 wurden nach Ablauf der fünfjährigen Auslagerungsdauer bisher nach ein-, zwei- und fünfjähriger Freibewitterung Korrosionsprobekörper eingeholt und ausgewertet. Nach der chemischen Entfernung der Korrosionsprodukte von den ausgelagerten Metallwendeln gemäß ISO 8407 [10] wurde deren Masseverlust gravimetrisch bestimmt. Für den vorliegenden Bericht wurde die Auswertung auf das Korrosionsverhalten von Zinküberzügen beschränkt. Vergleichbare Ergebnisse mit dem Korrosionsverhalten des unlegierten Stahls liegen für alle Auslagerungsstellen vor.

Die nach dem ersten Jahr der Auslagerung für Zink ermittelten Korrosionsgeschwindigkeiten dienen zum einen zur Ermittlung der Korrosivitätskategorien am jeweiligen Bauwerk und zum anderen als Basis für die Berechnung der Prognosekurve zur theoretisch möglichen Korrosionsschutzdauer der Feuerverzinkung auf Stahl. Die zwei und fünf Jahre freibewitterten Zinkwendeln der Korrosionsprobekörper wurden zur Überprüfung der Prognosekurve und ermittelten Korrosivitätskategorie für Zink verwendet.

Die nach dem ersten Jahr der Freibewitterung ermittelten Korrosionsgeschwindigkeiten und Korrosivitätskategorien an den Brückenbauwerken sind in der folgenden Tabelle 4 für Zink getrennt nach Auslagerungsstelle 1 und 2 gegenübergestellt.

Tabelle 4: Korrosionsgeschwindigkeit und Korrosivitätskategorie im Jahr 2012 nach dem 1. Jahr der Auslagerung

Brückenstandort	Korrosionsgeschwindigkeit/Korrosivität für Zink an Auslagerungsstelle 1	Korrosionsgeschwindigkeit/Korrosivität für Zink an Auslagerungsstelle 2
A4 Wirtschaftsbrücke BW 142Ü2 über die Autobahn	2,65 µm/a / C4	3,6 µm/a / C4
Putlitzbrücke in Berlin über S-Bahnhaltestelle Westhafen	0,62 µm/a / C2	0,74 µm/a / C3
A7 „Hochbrücke Rader-Insel“ bei Rendsburg	1,31 µm/a / C3	1,7 µm/a / C3
A17 Brücke über das Müglitztal bei Heidenau	0,48 µm/a / C2	0,65 µm/a / C2
A93 Brücke über den Fluss Inn bei Kiefersfelden	0,9 µm/a / C3	0,44 µm/a / C2
A3 Donaubrücke bei Deggenau	0,54 µm/a / C2	0,62 µm/a / C2

In Tabelle 5 wurden die an Brückenuntersichten ermittelten Korrosivitätskategorien von Zink aus dem Jahr 1983 den im Jahr 2012 bestimmten Korrosivitätskategorien gegenübergestellt. Für den Vergleich wurde die am höchsten ermittelte Korrosionsgeschwindigkeit zweier Messstellen einer Brücke aus dem Jahr 2012 verwendet.

Tabelle 5: Korrosionsgeschwindigkeit und Korrosivitätskategorie nach dem 1. Jahr der Auslagerung im Vergleich

Brückenstandort	Korrosionsgeschwindigkeit / Korrosivität für Zink im Jahr 1983	Korrosionsgeschwindigkeit / Korrosivität für Zink im Jahr 2012	Veränderung der Korrosivität im Jahr 2012 zum Jahr 1983
A4 Wirtschaftsbrücke BW 142Ü2 über die Autobahn	Keine Daten	3,6 µm/a / C4	Keine Aussage
Putlitzbrücke in Berlin über S-Bahnhaltestelle Westhafen	2,7 µm/a / C4	0,74 µm/a / C3	geringer
A7 „Hochbrücke Rader-Insel“ bei Rendsburg	2,4 µm/a / C4	1,7 µm/a / C3	geringer
A17 Brücke über das Müglitztal bei Heidenau	Keine Daten	0,65 µm/a / C2	Keine Aussage
A93 Brücke über den Fluss Inn bei Kiefersfelden	1,1 µm/a / C3	0,9 µm/a / C3	geringer
A3 Donaubrücke bei Deggenau	1,1 µm/a / C3	0,62 µm/a / C2	geringer

In der Tabelle 5 ist im Jahr 2012 eine deutliche Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit für Zink im Vergleich zum Jahr 1983 erkennbar. Die bis zur Hälfte verringerte Korrosionsgeschwindigkeit bewirkt, dass die Korrosivitätskategorien an der Atmosphäre für die vier vergleichbaren Brücken aus dem Jahr 1983 bis zu einer Kategorie im Jahr 2012 geringer sind. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass eine Verbesserung des Makroklimas (weniger Schadstoffe in der Atmosphäre) sich nur geringfügig oder gar nicht verbessernd auf die Korrosionsbelastung auswirkt, wenn gleichzeitig eine lokale Zusatzbelastung wie Streusalz einwirkt (Mikroklima). So führte das Streusalz in vom Verkehr verursachter Gischt an der Wirtschaftswegbrücke über die Autobahn A4 zu einer höheren Korrosivität als die ländlich geprägte natürliche Umgebung hätte vermuten lassen. Diese Tatsache wurde anhand der Salzbelegung der feuerverzinkten Grundplatten der Korrosionsprobekörper nachgewiesen. Dafür wurde das auf den Grundplatten abgelagerte wasserlösliche Salz in vollentsalztem Wasser gelöst und anschließend durch Ionenchromatographie die Konzentration der in den wässrigen Lösungen gefundenen Ionen bestimmt. In Tabelle 6 ist die flächenbezogene Auflagemasse der an den Grundplatten der Korrosionsprobekörper gemessenen Ionen den Auslagerungsstellen an 3 charakteristischen Brücken gegenübergestellt [2].

Tabelle 6: Ermittelte Salzbelegung auf Grundplatten der ein Jahr bewitterten Probekörper

Ionenkonzentration in der Lösung	Probennr. Rader Hochbrücke A7		Probennr. Wirtschaftswegbrücke A4		Probennr. Innbrücke Kiefersfelden A93	
	Stelle 1	Stelle 2	Stelle 1	Stelle 2	Stelle 1	Stelle 2
Chlorid in [mg/m²]	843,1	343,1	718,44	1365,25	94,48	15,16
Nitrit in [mg/m²]	<0,89	<0,93	<0,84	<1,74	0,85	<0,93
Nitrat in [mg/m²]	<1,78	3,81	5,9	8,52	6,26	<1,86
Sulfat in [mg/m²]	126,15	95,77	116,37	141,74	38,89	<1,86
Natrium in [mg/m²]	511,72	247,33	693,14	719,15	112,89	11,44
Kalium in [mg/m²]	20,17	29,94	4,22	<4,35	9,58	<4,65
Ammonium in [mg/m²]	<0,89	<0,93	15,85	29,48	<0,95	<4,65
Magnesium in [mg/m²]	13,24	<0,93	<0,84	<0,87	<0,95	<0,93
Calcium in [mg/m²]	46,82	11,99	31,62	38,35	28,65	<4,65

< ... Elementgehalt geringer als die mittels Zahlenwert genannte Nachweisgrenze

Die Auswertung der gefundenen Salzbelegung ergab folgende Erkenntnisse:

- Rader Hochbrücke: Die Grundplatte der Stelle 1 in ca. 60 m Höhe über dem Nord-Ostsee-Kanal weist eine höhere Salzbelegung auf als die ca. 500 m entfernte Grundplatte der Stelle 2 am Widerlager
- Wirtschaftswegbrücke über A4: Die Grundplatte der Stelle 1 an der Westseite (Wetterseite) weist eine geringere Salzbelegung als die Grundplatte der Stelle 2 an der Ostseite auf. An beiden Grundplatten wurden Ammonium Ionen festgestellt, deren Herkunft nicht sicher geklärt werden kann. Möglich ist die Ablagerung aus Rückständen des Dieselsatzes AdBlue (Ammoniakschlupf) oder durch Düngung in der Landwirtschaft
- Innbrücke in Kiefersfelden: Die Grundplatte der Stelle 1 über dem Wirtschaftsweg weist eine höhere Salzbelegung auf als die Grundplatte der Stelle 2 über dem Inn.

Die Salzbelegung korreliert mit den ermittelten Korrosivitätskategorien. Je höher die Salzbelegung der Grundplatte war desto höher war auch die festgestellte Korrosivitätskategorie. Das bei ähnlicher Salzbelegung nicht die gleiche Korrosivitätskategorie an den verschiedenen Brücken festgestellt werden kann, wird auf die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen (Befeuchtungsdauer, Temperatur) am jeweiligen Brückenstandort zurückgeführt.

3 Prognose zur Korrosionsschutzdauer einer Feuerverzinkung

Eine längere Korrosionsschutzwirkung ist prinzipiell für alle Korrosionsschutzsysteme durch die Abnahme von Schadstoffen in der Atmosphäre zu erwarten. Besonders positiv wirkt sich die Verringerung der Korrosivität allerdings auf Zinküberzüge mit einer längeren Schutzdauerprognose aus, da die Überzüge langsamer korrosiv abgetragen werden. Wurden im Jahr 1983 noch Korrosivitätskategorien von C4 und C3 bestimmt, können heutzutage Korrosivitätskategorien von C3 und C2 an den gleichen Bauwerken gemessen werden. Die Einschätzung zur Korrosionsgeschwindigkeit von Zink ist gemäß DIN EN ISO 9224 [5] als degressives (nicht lineares) Korrosionsverhalten bis zu einer Nutzungsdauer von 100 Jahren möglich. Die für die Korrosivitätskategorien C2 bis C5 prognostizierten Überzugsdicken sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Theoretisch notwendige Überzugsdicke des Zinks berechnet gemäß DIN EN ISO 9224 mithilfe der Werte aus Tabelle B.1

Korrosivitätskategorie	Mittlere Korrosionsgeschwindigkeit r_{av} für Zink, in den ersten 10 Jahren in $\mu\text{m/a}$		Stationäre Korrosionsgeschwindigkeit r_{lin} für Zink, für mehr als 10 Jahre in $\mu\text{m/a}$		Theoretisch benötigte Zink Überzugsdicke für 100 Jahre in μm	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
C2	0,07	0,5	0,05	0,4	5	41
C3	0,5	1,4	0,4	1,1	41	113
C4	1,4	2,7	1,1	2,2	113	225
C5	2,7	5,5	2,2	4,4	225	451

Unter der Annahme einer Korrosivitätskategorie C4 und einer Beurteilung nach degressivem Korrosionsverhalten des Zinküberzugs wäre rechnerisch eine Zinkschichtdicke von ca. 113 μm bis 225 μm für die angestrebte Nutzungsdauer von 100 Jahren erforderlich. Legt man nun die an den untersuchten Brücken am höchsten ermittelte Korrosionsgeschwindigkeit für Zink von 3,6 μm (Wirtschaftswegbrücke über die A4 in Thüringen) nach dem ersten Jahr der Auslagerung als Basis für die konkrete degressive Extrapolation zugrunde, ergibt sich bei einer Überzugsdicke des Zinks von 152 μm ($t^b = 42,267$, Tabelle 3; Zink; B1) bis 201 μm ($t^b = 55,719$, Tabelle 3; Zink; B2) eine theoretische Schutzdauer von 100 Jahren. Diese Aussagen führten zu dem Schluss, dass an einer feuerverzinkten Wirtschaftswegbrücke bei einer Korrosivitätskategorie C4 und einer – im Stahlbau durchaus üblichen – Überzugsdicke von > 250 μm Zinküberzug voraussichtlich keine Erneuerung des Korrosionsschutzsystems über eine Nutzungsdauer von 100 Jahren notwendig wird.

Bei dieser Einschätzung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Konzepte zur Prognose der zu erwartenden Schutzdauer von Zinküberzügen ausschließlich auf aktuell gemessenen atmosphärischen Belastungsbedingungen beruhen. Änderungen, die sich in den atmosphärischen Belastungsbedingungen über die Nutzungsdauer des Bauwerkes von 100 Jahren ergeben können, bleiben bei dieser Einschätzung unberücksichtigt. Dies beeinflusst für alle Arten von Korrosionsschutzsystemen die Sicherheit der Aussage zur erwarteten Schutzdauer und kann nur durch Langzeitmessungen zur Entwicklung der Korrosivität begleitet werden.

4 Vergleich zwischen Prognose und gemessener Korrosionsrate von Zink

Durch die weitere Messung der Korrosionsgeschwindigkeit an Korrosionsprobekörpern war es möglich, die aus dem ersten Jahr der Auslagerung berechnete Prognosekurve zur theoretischen weiteren Korrosion des Zinks den tatsächlich ermittelten Werten nach zwei und fünf Jahren Freibewitterung gegenüber zu stellen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 bis Abbildung 15 für die sechs Brückenbauwerke graphisch dargestellt. In den Diagrammen sind die Prognosekurven für die obere und untere Grenze der aus dem ersten Jahr der Auslagerung ermittelten Korrosivitätskategorie, die Prognosekurven für die weitere Entwicklung der Korrosion an der Auslagerungsstelle und die Einzelmesswerte der tatsächlich festgestellten Korrosionsgeschwindigkeit nach zwei und fünf Jahren zusammengestellt.

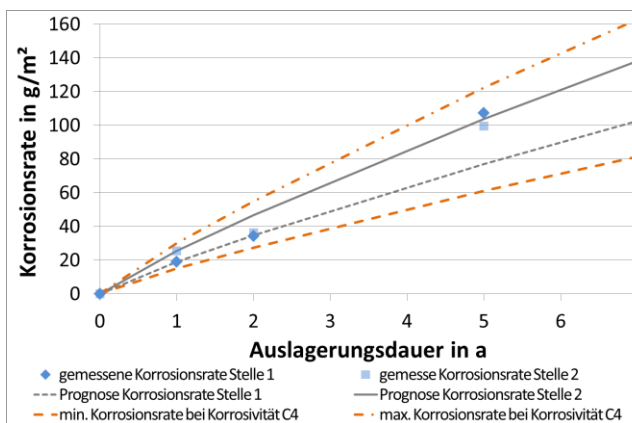


Abbildung 10: Korrosionsgeschwindigkeit für Zink an der Wirtschaftswegbrücke BW 142Ü2 über die BAB A 4

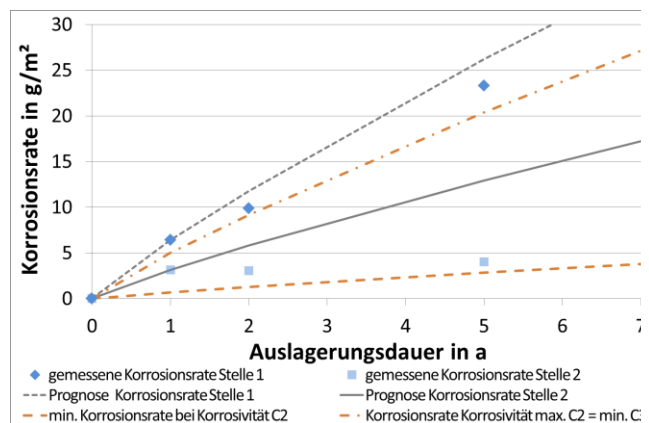


Abbildung 11: Korrosionsgeschwindigkeit für Zink an der Innbrücke A93 bei Kiefersfelden

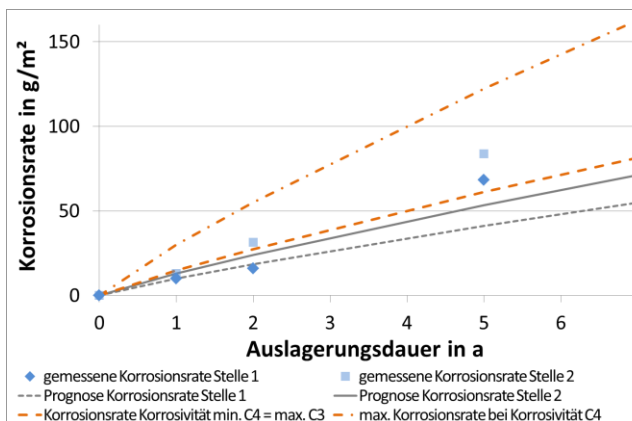


Abbildung 12: Korrosionsgeschwindigkeit für Zink an der Rader Hochbrücke A7 bei Rendsburg

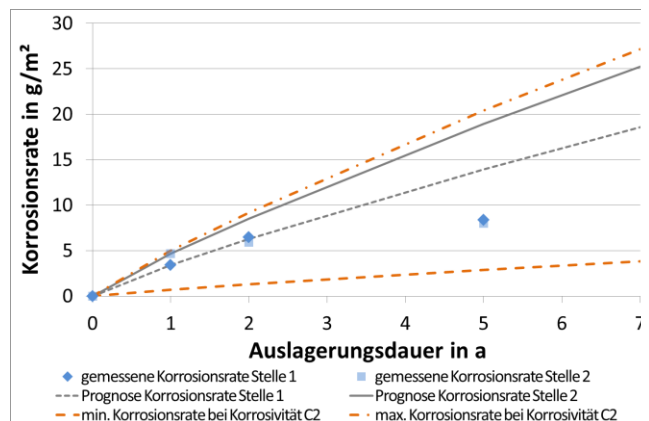


Abbildung 13: Korrosionsgeschwindigkeit für Zink an der Müglitztalbrücke A17 bei Heidenau

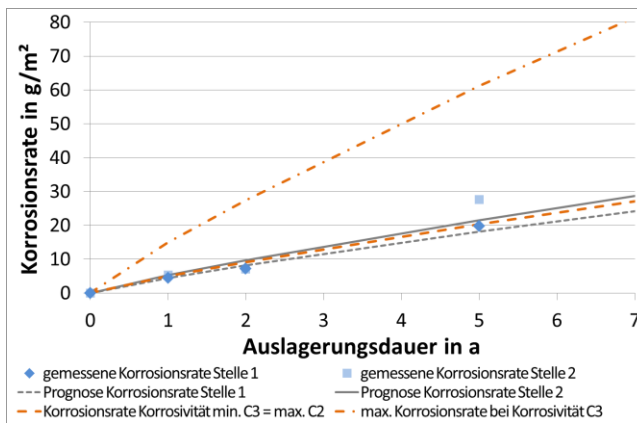


Abbildung 14: Korrosionsgeschwindigkeit für Zink an der Putzitzbrücke in Berlin

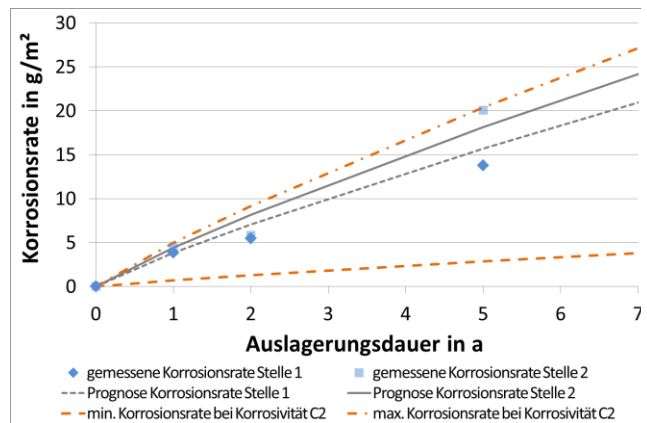


Abbildung 15: Korrosionsgeschwindigkeit für Zink an der Donaubrücke A3 bei Deggendorf (Deggendorf)

Anhand der Ergebnisse kann belegt werden, dass der häufig verwendete lineare Ansatz zur Auslegung des Korrosionsverhaltens von Zinküberzügen, durch Multiplikation der Bewitterungsjahre mit dem Korrosionsverlust des ersten Jahres der Auslagerung, ein äußerst konservativer Ansatz ist und dem festgestellten degressiven Korrosionsverhalten von Zinküberzügen nicht gerecht wird. Die Schwankungen der Zinkkorrosion um die aus dem ersten Jahr der Auslagerung entwickelte Prognosekurve, werden mit den klimatischen Bedingungen begründet, die sich in Befeuchtungsdauer und Temperatur von Jahr zu Jahr unterscheiden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zu den aktuellen Korrosivitäten in Deutschland belegen, dass sich die atmosphärische Belastung im Vergleich zum Jahr 1983 deutlich verringert hat und der Korrosionsschutz des Konstruktionsstahls durch eine Feuerverzinkung für die Nutzungsdauer von 100 Jahren theoretisch machbar und ohne nennenswert zusätzlichen Aufwand umsetzbar ist. Auslagerungsversuche an einer Brücke über eine Autobahn zeigen, dass unter dem dort vorherrschenden Mikroklima von einer Korrosivitätskategorie C4 auszugehen ist. Auf Basis der ausgelagerten Proben kann gezeigt werden, dass mit im Stahlbau üblichen Zinküberzugsdicken von $>200 \mu\text{m}$ Korrosionsschutzdauern von 100 Jahren erreicht werden können. Des Weiteren ist der häufig verwendete Ansatz zum linearen Korrosionsverhalten für die Auslegung der Schutzdauer von Zinküberzügen, aus dem Korrosionsverlust des ersten Jahres der Auslagerung, äußerst konservativ und wird dem tatsächlichen degressiven Korrosionsverhalten und der damit verbundenen wesentlich längeren Schutzdauer nicht gerecht.

Für die weitere Überwachung der Korrosionsgeschwindigkeit konnten erneut Korrosionsprobekörper im Jahr 2013 an den Brückenbauwerken ausgelagert werden. Diese Probekörper verbleiben für die nächsten 10 bzw. 15 Jahre an den Brücken und werden weiteren Aufschluss über die langfristige Entwicklung zum Korrosionsverhalten von Zinküberzügen bis ins Jahr 2028 geben.

6 Danksagungen

Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Industrieforschungsvorhabens in Kooperation mit dem Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (GAV) und eines AiF-IGF Forschungsvorhabens zum Thema: „Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau“ (FOSTA P835, IGF-Nr. 351/ZBG) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA) in Kooperation mit dem Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (GAV) und dem Deutschen Ausschuss für Stahlbau (DAST) im Auftrag des BMWI erarbeitet. Den vorgenannten Einrichtungen sei für die Betreuung und Förderung an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] ISO 9226, *Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity*, Berlin: Beuth Verlag, 1992.
- [2] D. Ungermann, D. Rademacher, M. Oechsner, R. Landgrebe, J. Adelmann, F. Simonsen, S. Friedrich und P. Lebelt, „Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau, IGF-No. 351/ZBG, FOSTA P835,“ Düsseldorf, 2014.
- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Salzablagerungen auf Korrosionsschutzbeschichtungen an Brückenuntersichten, Heft 405,“ Typo-Druck- & Verlagsgesellschaft mbH, Bonn, 1983.
- [4] DIN EN ISO 9223, *Korrosion von Metallen und Legierungen – Korrosivität von Atmosphären – Klassifizierung, Bestimmung und Abschätzung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 05/2012.
- [5] DIN EN ISO 9224, *Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Anhaltswerte für die Korrosivitätskategorien*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [6] Umweltbundesamt, „Emissionen von Luftschadstoffen,“ [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/indikator-emissionen-von-luftschadstoffen>. [Zugriff am 13 April 2015].
- [7] Umweltbundesamt, „Umweltbundesamt,“ 30 08 2017. [Online]. Available: www.umweltbundesamt.de/themen/luft/daten-karten/entwicklung-der-luftqualitaet#textpart-4.
- [8] *Merkblatt 400: „Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl“*, Düsseldorf: Stahl-Information-Zentrum, ISSN 0175-2006, 6. Auflage 2001.
- [9] U. Kuhlmann, P. Maier, T. Ummenhofer, T. Zinke, M. Fischer und S. Schneider, "Untersuchung zur Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken", Bd. Heft B 112, Bundesanstalt für Straßenwesen, Hrsg., Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, Februar 2015.
- [10] ISO 8407, *Corrosion of metals and alloys - Removal of corrosion products from corrosion test specimens*, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013.