

BBSR-
Online-Publikation
13/2026

RUNOFF

Neubewertung der Dauerhaftigkeit von Dach- und
Fassadenmaterialien und des Eintrags von Schwermetall-
ionen in die Umwelt, hervorgerufen durch Runoff

von

Gino Ebell
Nasrin Haacke
Martin Babutzka
Andreas Burkert

RUNOFF

Neubewertung der Dauerhaftigkeit von Dach- und Fassadenmaterialien und des Eintrags von Schwermetallionen in die Umwelt, hervorgerufen durch Runoff

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
F O R S C H U N G S F Ö R D E R U N G

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.31

Projektlaufzeit: 09.2021 bis 10.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
Dr.-Ing. Gino Ebell
gino.ebell@bam.de

Dr.-Ing. Nasrin Haacke
Dr.-Ing. Martin Babutzka
Dr.-Ing. Andreas Burkert

Redaktion

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
Dr.-Ing. Gino Ebell

Stand

Januar 2026

Gestaltung

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
Dr.-Ing. Gino Ebell

Bildnachweis

Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 69.

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Ebell, G.; Haacke, N.; Babutzka, M.; Burkert, A., 2026: RUNOFF: Neubewertung der Dauerhaftigkeit von Dach- und Fassadenmaterialien und des Eintrags von Schwermetallionen in die Umwelt, hervorgerufen durch Runoff. BBSR-Online-Publikation 13/2026. Bonn.
<https://doi.org/10.58007/crc7-8036>

DOI 10.58007/crc7-8036

ISSN 1868-0097

Bonn 2026

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	8
Einführung	9
Atmosphärische Korrosion von Zink und Kupfer	9
Stand der Forschung	10
Freibewitterungsstände	12
Niederschlagssimulation	13
Forschungsbedarf/Zielstellung	15
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	15
Konkrete Projektziele und Forschungsfragen	15
Forschungsdesign	17
Methodischer Ansatz	17
LPR	17
Röntgendiffraktometrie	18
Laboranalysen	20
Wetterdaten	20
Künstliche Vorbewitterung	21
Design of Experiment	21
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner und Arbeitspakete	23
Meilensteine	24
Projektverlauf – Vorstellung der Arbeitspakete 1-8	25
Arbeitspaket 1: Probenauswahl und Probenpräparation	25
Arbeitspaket 2: Konzeption, Fertigung und Aufstellung eines Messstandes für Runoff	26
Arbeitspaket 3: Analyse von Wetterdaten, des Niederschlags und des Runoffwassers	27
Analyse von Wetterdaten	27
Analyse Niederschlagswasser	31
Analyse Runoffwasser	32
Arbeitspaket 4: Bewitterungsversuche im Feld zur Studie des Abschwemmverhaltens in Abhängigkeit der Bewitterungszeit	35
Elektrochemische Untersuchung der Deckschichtstabilität	36
Bestimmung der Korrosionsprodukte in Abhängigkeit der Bewitterungszeit	37
Arbeitspaket 5: Modellversuche mittels Modellniederschlag im Labormaßstab	38
Konstruktion und Bau eines Niederschlagsimulators	38
Versuchsdurchführung	39
Arbeitspaket 6: Berechnungen zum Eintrag von Ionen in die Umwelt und zum Beitrag des Runoffs zum Schichtdickenverlust von Materialien im Bauwesen	47
Arbeitspaket 7: Synthese der Ergebnisse aus Labor- und Felduntersuchungen zur Einschätzung des Einflusses von Runoff im Bauwesen	49
Arbeitspaket 8: Erstellung des Abschlussberichtes und Publikation der Ergebnisse an geeigneter Stelle	55
Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	55
Ergebnisse	56
Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis	56

Bewertung/Diskussion/Zielerreichung – Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext inkl. möglicherweise bekannt gewordenen Ergebnissen von dritter Seite	57
Wissenschaftliche Abschlussfähigkeit/Fazit	58
Empfehlungen für die Praxis	61
Bestimmung der Runoffrate unter Verwendung von C-Kategorien	61
Bestimmung der Runoffraten für einen Standort	61
Testverfahren zur standardisierten Bestimmung von Metallioneneintrag in die Umwelt	62
Prüfverfahren für Oberflächenvorbehandlungsmaßnahmen	62
Hinweise für Dachrinnen	63
Ausblick	64
Mitwirkende	65
Kurzbiographien	66
Literaturverzeichnis	67
Abbildungsverzeichnis	69

Kurzfassung

Im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojekts wurden das Korrosionsverhalten und die Runoffraten von Zink, feuerverzinktem Stahl und Kupfer unter natürlichen und simulierten Bewitterungsbedingungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Bildung schützender Deckschichten, anders als bisher angenommen, nach einem Jahr noch nicht abgeschlossen ist. Die Untersuchungen ergaben, dass im ersten Jahr keine direkte Korrelation zwischen Masseverlust und Runoffrate besteht. Erst ab dem zweiten Jahr gleichen sich die Runoffraten zunehmend den fortschreitenden Korrosionsraten an. Die Ursache liegt in der Bildung stabiler Deckschichten, insbesondere bei Zink, deren Eigenschaften jedoch stark von äußeren Faktoren wie pH-Wert des Regenwassers, Regenintensität, Probenneigung und Benetzungsdauer beeinflusst werden.

Experimentelle Daten aus künstlichen Beregnungsversuchen zeigten, dass bei intensiven Regenereignissen wasserlösliche Bestandteile der Deckschicht verstärkt ausgewaschen werden, während natürlich gewachsene Deckschichten unter geringerer Intensität dichter und stabiler ausfallen. Die Zeitdauer, in der die Oberfläche feucht bleibt (Time of Wetness), erwies sich als entscheidender Faktor für den Runoff. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass nach einem Runoffereignis Korrosion einsetzt, um die durch Abschwemmung verlorenen Zinkionen zu ersetzen und die Zinkionenkonzentration für die Deckschichtbildung im Gleichgewicht zu halten.

Auf Basis langjähriger Messungen konnten mathematische Modelle entwickelt werden, die eine Prognose der Runoffraten ab dem zweiten Jahr ermöglichen. Diese beruhen auf einer logarithmischen Regression der Masseverluste und bei Berücksichtigung der Umweltfaktoren wie Niederschlagsmenge, Intensität und pH-Wert können die Runoffraten anhand der Modelbasierten Daten berechnet werden. Ein zentrales Ergebnis ist, dass die häufig verwendete ISO 9224 zur Abschätzung der Korrosionsraten für diesen Anwendungsfall nicht geeignet ist. Insgesamt zeigt die Studie, dass Deckschichtbildung und Runoff hochdynamische Prozesse sind, die durch komplexe Wechselwirkungen gesteuert werden und sich nicht pauschal oder kurzfristig beschreiben lassen.

Abstract

As part of a multi-year research project, the corrosion behavior and runoff rates of zinc, hot-dip galvanized steel, and copper were investigated under natural and simulated weathering conditions. The results showed that, contrary to previous assumptions, the formation of protective surface layers is not complete after one year. The investigations revealed that there is no direct correlation between mass loss and runoff rate in the first year. It is only from the second year onwards that the runoff rates increasingly match the progressive corrosion rates. The reason for this lies in the formation of stable protective layers, especially in the case of zinc, whose properties are, however, strongly influenced by external factors such as the pH value of the rainwater, rainfall intensity, sample inclination, and wetting duration.

Experimental data from artificial rainfall tests showed that during intense rainfall events, water-soluble components of the coating layer are washed out more intensively, while naturally grown coating layers are denser and more stable at lower intensities. The length of time the surface remains wet (time of wetness) proved to be a decisive factor for runoff. In addition, it was found that after a runoff event, corrosion sets in to replace the zinc ions lost through washout and maintain the zinc ion concentration for topsoil formation in equilibrium.

Based on many years of measurements, mathematical models were developed that enable runoff rates to be predicted from the second year onwards. These are based on a logarithmic regression of mass losses, and when environmental factors such as precipitation amount, intensity, and pH value are taken into account, the runoff rates can be calculated using the model-based data. A key finding is that the frequently used ISO 9224 standard is not suitable for estimating corrosion rates in this application. Overall, the study shows that coating formation and runoff are highly dynamic processes that are controlled by complex interactions and cannot be described in general terms or in the short term.

Einführung

Zink- und Kupferwerkstoffe besitzen eine herausragende Bedeutung für Korrosionsschutzanwendungen unter atmosphärischen Bedingungen, insbesondere im Bauwesen. Sie kommen für Dächer, Fassadenelemente und zur Regenwasserableitung bei Bauwerken zum Einsatz. Die hohe Korrosionsbeständigkeit von Zink- und Kupferwerkstoffen an der Atmosphäre liegt in der Fähigkeit zur Ausbildung von schützenden Deck- und Patinaschichten aus festhaftenden Korrosionsprodukten begründet, die sich durch Wechselwirkungen mit der umgebenden Atmosphäre auf der Oberfläche ausbilden. Die Bildungs- und Auflösungskinetik dieser Schichten (Korrosionsreaktionen und nachgelagerte Reaktionen) sowie die durch Feuchtigkeit und Regen von der Oberfläche abgeschwemmte Metallionen („Runoff“) bestimmen somit den Verbrauch und die Degradation der Schichten unter Einsatzbedingungen. Damit sind sie für die Dauerhaftigkeit des Korrosionsschutzes von ausschlaggebender Bedeutung. Bei richtiger Planung, ausreichender Überzugsdicke (Zink) und unter Beachtung der klimatischen Bedingungen am Einsatzort können Verzinkungen in der Regel Lebensdauern von über 50 Jahren erreichen, da in der Bundesrepublik Deutschland nur noch geringe bis mittlere Korrosionsbelastungen herrschen.

Atmosphärische Korrosion von Zink und Kupfer

Die Korrosionsbeständigkeit und damit die Dauerhaftigkeit an der Atmosphäre ist direkt mit der Bildungs- und Auflösungskinetik von schützenden Deck- und Patinaschichten aus festhaftenden Korrosionsprodukten verknüpft. Bei einem optimalen Zusammenwirken und einer günstigen Abfolge von atmosphärischen Einflussfaktoren bilden sich über einen langen Zeitraum gut schützende, bei Feuchtigkeitszutritt nahezu unlösliche Deckschichten aus. Damit sind sie für die Dauerhaftigkeit von ausschlaggebender Bedeutung. Art und Eigenschaften der gebildeten Deckschichten hängen dabei insbesondere von den Luftinhaltsstoffen der Einsatzumgebung, wie Chloriden und Schwefeldioxid, sowie von spezifischen Temperatur-Feuchte-Zyklen und Niederschlagsereignissen ab.

Stand der Forschung

In der Literatur wird international seit Beginn der 2000er Jahre verstärkt das Phänomen des Runoffs beschrieben und betrachtet. Dabei handelt es sich um die Abschwemmung von Metallionen von Metalloberflächen insbesondere durch Niederschlagsereignisse. Besonders intensiv beschäftigen sich eine schwedische Forschergruppe um Odnevall Wallinder und Leygraf [1-5] sowie eine mexikanische Forschergruppe um Veleza [6, 7] mit dieser Thematik. Unter anderem durch Grenzwerte an Zink für Böden, in Grund- und Trinkwässern [6] und Ökotoxizitätsbetrachtungen [3] ist die Menge an abgeschwemmten Metallionen ein wichtiger zu betrachtender Faktor und gewinnt zunehmend an Bedeutung für wissenschaftliche Betrachtungen.

Bei Betrachtungen zur Lebensdauer von Metallbauteilen müssen Korrosions- und Runoffvorgänge an der Atmosphäre als zwei verschiedene Reaktionen unterschieden werden. Korrosion ist der Prozess, der nach Ausführungen von Odnevall Wallinder und Leygraf [1] von elektrochemischen Reaktionen an der Grenzfläche Metall/Patina kontrolliert wird. Runoff dagegen wird durch chemische Reaktionen an der Grenzfläche Patina/Atmosphäre begünstigt. Die Geschwindigkeit des Runoffs ist tendenziell geringer als die Korrosionsgeschwindigkeit. Mit zunehmender Auslagerungszeit nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit stetig ab, während postuliert wird, dass die Geschwindigkeit des Runoffs über die gesamte Zeit fast konstant bleibt. Zurückgeführt werden die Unterschiede auf die verschiedenen physikochemischen Prozesse bei Korrosion und Runoff. Die Gesamtmenge an korrodiertem Metall beinhaltet zwei Bestandteile. Ein Teil wird in die Schicht aus Korrosionsprodukten eingebaut, der andere wird aufgrund von Niederschlägen aus der Patina gelöst. Aus diesem Grund ist die Menge an Zink-Runoff stark abhängig von den Eigenschaften der Korrosionsproduktschicht und nicht anhand der Zusammensetzung des Metalls abschätzbar [1]. Die hier beschriebene strikte Trennung von Korrosions- und Runoffreaktion sollte aber kritisch hinterfragt werden. Insbesondere im Anfangsstadium einer Bewitterung können die beiden Reaktionen nicht voneinander getrennt werden, da sich auf der Oberfläche noch keine Patina aus Korrosionsprodukten befindet und Korrosion und Runoff somit an der gleichen Grenzfläche ablaufen. Die strikte Trennung der beiden Reaktionen sollte auch bei Vorhandensein instabiler Deckschichten hinterfragt werden, da diese sich auflösen können und die darunter liegende Zinkoberfläche freigelegt werden kann. Die wissenschaftliche Literatur gibt für diese beiden Fälle aber keine ausreichenden Angaben.

Da der Runoff hauptsächlich durch Niederschlag hervorgerufen wird, haben Odnevall Wallinder et al. [4] grundlegende Untersuchungen zum Einfluss von Niederschlägen durchgeführt. Sie haben dabei den Einfluss der Bewitterungsrichtung und des Neigungswinkels auf den Runoff bei der Bewitterung auf Modelldächern betrachtet. Es wurde gezeigt, dass die Menge des Zink-Runoffs mit höheren Bauteilneigungen abnimmt. Bei 7 ° Neigung ist der Runoff tendenziell drei- bis sechsfach höher als bei 90 °. Zusätzlich ist der Runoff höher, wenn die Oberflächen in Windrichtung ausgerichtet sind. Bei einer vorhandenen Verunreinigung wird der Runoff stark von der Niederschlagsmenge dominiert, die auf der Oberfläche auftrifft [4]. Dabei nimmt bei einem Niederschlagsereignis die Menge an gelöstem Zink zu, wenn der SO_2 -Gehalt der Atmosphäre über $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt. Chloridablagerungen haben nur einen sehr geringen Einfluss auf den Runoff [1].

In einer Laborstudie haben He et al. [2] Untersuchungen zum Abschwemmverhalten beim ersten Niederschlagsereignis („first flush“) an frischen und bewitterten Zinkoberflächen durchgeführt, um grundlegende Einflussfaktoren auf den Zink-Runoff herauszuarbeiten. Für die Versuche verwendeten sie eine Apparatur, die mit künstlichem Regen arbeitet. Diese konnte Regenereignisse mit variierender Intensität und variierendem pH-Wert simulieren. Der künstliche Regen entsprach in seiner Zusammensetzung dem Regen im südlichen und zentralen Schweden. Es konnte gezeigt werden, dass beim ersten Regenereignis zunächst leicht lösliche Korrosionsprodukte abgespült werden. Bei nachfolgenden Regenereignissen bleibt der Runoff mehr oder weniger konstant. Die Höhe des Runoffs hängt beim ersten Niederschlagsereignis von den Umweltbedingungen vor einem Regenereignis ab. Dies beinhaltet die Länge der Trockenperiode und die Menge an Trockenablagerungen. Zusätzlich sind das Regenvolumen und die Regenintensität für die Menge des Runoffs wichtig. Eine defektreiche und poröse Korrosionsproduktschicht erhöht die Menge an

abgeschwemmten Spezies beim ersten Niederschlagsereignis, da sie korrosive Spezies und Wasser in der Schicht halten. Die Gesamtmenge an Zink-Runoff nimmt mit abnehmendem pH-Wert [2] zu.

Vera et al. [6] haben den Zink-Runoff in feuchtem tropischem Klima untersucht. Der Zink-Runoff wurde in den Untersuchungen stark von der Befeuchtungsdauer der Metalloberfläche, der Frequenz und der Intensität der Niederschlagsereignisse, dem pH-Wert des Niederschlags, den Zyklen der Niederschläge und den Chlorid- und SO_2 -Verunreinigungen beeinflusst. Der SO_2 -Gehalt bestimmt dabei den pH-Wert des Wassers oder der Feuchtigkeit auf der Metalloberfläche.

In einer Weiterführung der Untersuchungen durch Veleva et al. [7] wurde der Anteil des Runoffs untersucht, der aus einer teilweisen Auflösung der Korrosionsprodukte resultiert. Dafür wurden die Formeln zu Abschätzung der Degradation eines Zinküberzugs im Hinblick auf den Beitrag des Runoffs genauer betrachtet. Es wurde eine exponentielle Gleichung vorgeschlagen, die die experimentellen Daten des Zinkmasseverlustes aus Runoff als Funktion der Zeit der Oberflächenbefeuchtung, auch time of wetness genannt, (TOW) wiedergibt. Mit der Beziehung soll es möglich sein, den Masseverlust zu ermitteln, bevor ein stationärer Zustand der Korrosion erreicht ist. In den Untersuchungen wurde auch gezeigt, dass die Korrosionsgeschwindigkeit und der Runoff im zweiten Jahr der Bewitterung abnehmen. Die Menge an CO_3^{2-} -Ionen in der aufgefangenen Runofflösung erreichte Konzentrationen, die ein- bis zweimal höher als im Regen waren. Zurückgeführt wird das auf die aus den Korrosionsprodukten gelösten Carbonate [7].

Lindström und Odnevall Wallinder haben in [5] Langzeituntersuchungen zum Zink-Runoff über einen Zeitraum bis zu 10 Jahren durchgeführt. Dafür haben sie verschiedene Zinkvarianten einer freien Bewitterung unter städtischen Bedingungen ausgesetzt. Nach zehn Jahren Bewitterung war das basische Zinkcarbonat Hydrozinkit die Hauptkomponente der Zinkpatina. Fast 40 % der Gesamtmenge des korrodierten Zinks wurden in der Patina nach zehn Jahren gehalten. Die Menge an Zink, die von der Patina gelöst wurde, war signifikant geringer als die Menge an korrodiertem Zink. Die Menge an Runoff war im ersten Jahr am höchsten. Ab dem zweiten Jahr nahm die Runoffgeschwindigkeit nur noch in sehr geringem Maße ab und verblieb auf einem annähernd gleichen Niveau. Berechnungen zur Lebensdauer auf Basis der Runoffgeschwindigkeiten zeigten, dass die verschiedenen Zinkschichten noch 200 Jahre halten können.

In verschiedenen Artikeln wird berichtet, dass Runoffgeschwindigkeiten aus dem Feld gut mit den Ergebnissen aus Laboruntersuchungen bei künstlichem Niederschlag korrelieren [2, 4, 7]. Beim Vergleich von freier Bewitterung zu Laborversuchen mit verschiedenen Neigungswinkeln wurde sogar festgestellt, dass Runoffgeschwindigkeiten an großen Blechen ähnlich sind wie bei kleinen Blechen [5].

Durch die vorhergehenden Ausführungen wird die Bedeutung von Niederschlagsereignissen für die Menge an Runoff deutlich. Niederschlag sorgt für eine zusätzliche Befeuchtung der Oberfläche und kann Korrosionsstimulatoren von der Oberfläche abwaschen, die sich durch Trockenablagerung akkumuliert haben. Niederschlag kann durch Reaktion mit Schadgasen (SO_2) in der Atmosphäre auch korrosionsstimulierende Ionen transportieren, die sich auf den Korrosionsfortschritt auswirken. Niederschlag mit niedrigem (saurem) pH-Wert kann eine bestehende Schicht aus Korrosionsprodukten teilweise auflösen und somit die korrosionsschützenden Eigenschaften der Schichten herabsetzen [8]. Der pH-Wert des Niederschlages korreliert üblicherweise mit dem SO_2 -Gehalt der Luft [9]. In stark mit SO_2 verunreinigten Atmosphären sind der Niederschlag und die kondensierte Feuchtigkeit saurer Natur [10], wodurch sich die Korrosionsprodukte auflösen. In industrieller Atmosphäre kann die Auflösung des Korrosionsproduktfilms sogar einen Punkt erreichen, an dem keine Korrosionsprodukte mehr auf der Oberfläche gefunden werden. Bei einem pH-Wert nahe bei 6 ist das Regenwasser dagegen nicht in der Lage, die basischen Carbonate aus der Korrosionsproduktschicht zu lösen [10]. Kreislova und Knotkova [9] haben am Beispiel der Tschechischen Republik gezeigt, dass die jährliche Niederschlagsmenge im Zeitraum von 1990 bis 2010 um 7 % zugenommen hat. Gleichzeitig verschob sich der pH-Wert des Niederschlags von pH 5 im Jahr 1990 zu pH 6 im Jahr 2016 [9]. Zusätzlich zum chemischen Aspekt des Niederschlags kann aber auch ein physikalischer Effekt (Aufschlagintensität) einen Einfluss auf die Menge des Runoffs haben.

Wallinder et al. haben in [3] Betrachtungen zur Ökotoxizität von Zink angestellt. Mit verschiedenen zinkbasierten Materialien wurde eine Studie durchgeführt, um die Zusammenhänge zwischen Zink und der

Ökotoxizität herzustellen und Daten für eine Risikoabschätzung zu gewinnen. Ausgewertet wurde der Runoff bei 15 zinkbasierten Materialien nach einjähriger Auslagerung. Es konnte festgestellt werden, dass hydratisiertes Zn^{2+} bei allen Zinkvarianten mit über 95 % die am meisten bioverfügbare Spezies im aufgefangenen Runoff war. Die Auswirkung des Zinkionengehaltes wurde an Grünalgen durch Betrachtung des Wachstumshemmungsprozesses untersucht. Es konnte eine hohe Korrelation zwischen der Menge an Zink im Runoff und dem Umwelteinfluss festgestellt werden. Mit höherem Zn^{2+} -Gehalt nimmt die Ökotoxizität bei den untersuchten Algen zu. Der Runoff wurde aber direkt nach dem Abschwemmen von der Oberfläche aufgefangen. Deshalb wird ein Verdünnungseffekt oder eine Änderung der chemischen Spezies durch Eintritt in die Umgebung verhindert. Aus diesem Grund zeigen die Untersuchungen keinen realen Ökotoxizitätseffekt, können aber als Annäherung für erste Betrachtungen verwendet werden [3]. In [5] haben Lindström und Odnevall Wallinder festgestellt, dass Beton eine große Menge an gelöstem Zink aus Runoff aufnimmt. Das meiste gelöste Zink soll dabei aber in der Nähe von seiner Quelle verbleiben.

Eine intensive Beschäftigung mit der Thematik Runoff erfolgte bisher hauptsächlich im europäischen und amerikanischen Ausland. Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland sind aber die Untersuchungen von Bittner [11, 12] und im Auftrag des Umweltbundesamtes [13] hervorzuheben. In der Dissertation von Bittner [11] wurden Untersuchungen zum Runoff von Schwermetallionen an zwei Expositionsstandorten durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse wurden Dosis-Wirkungs-Funktionen erstellt. In der Arbeit wurde aber nicht zwischen Korrosions- und Runoffreaktionen unterschieden. Zusätzlich wird der Effekt von schützenden Deck- und Patinaschichten, die sich im Laufe einer Bewitterung unter den heutigen atmosphärischen Bedingungen schnell ausbilden, nicht betrachtet. Der Leitfaden des Umweltbundesamtes [13] gibt Hinweise zur Konstruktion und Auslegung von metallenen Elementen im Bauwesen mit dem Ziel, den Anteil der Boden- und Gewässerbelastung durch einen Schwermetalleintrag aus dem Bauwesen zu verringern, ohne die Verwendung von dauerhaften und bewährten Baumaterialien pauschal zu verbieten. Auch hier wird aber eine zeitliche Änderung der Runoffgeschwindigkeit nicht betrachtet.

Babutzka [14] untersuchte die Deckschichtbildung von Zink an der Atmosphäre unter den derzeit in der Bundesrepublik Deutschland gültigen Bedingungen. Umfangreiche Versuchsreihen bei atmosphärischer Bewitterung konnten belegen, dass Schwefeldioxid und die aus ihm resultierenden Sulfate keinen dominierenden Einfluss mehr auf die Deckschichtbildung und -degradation von Zink in der Bundesrepublik Deutschland besitzen. In der Folge ändern sich die Mechanismen der Deckschichtbildung von Zink an der Atmosphäre und bisher gültige Deckschichtbildungsmodelle verlieren ihre Bedeutung. Am Beispiel einer freien Bewitterung an städtischer Atmosphäre mit einer Korrosivitätskategorie C3 konnte in einem Modell postuliert werden, dass Niederschlagsereignisse eine größere Rolle bei der Deckschichtbildung spielen als bisher angenommen. Niederschlagsereignisse scheinen demnach eine notwendige Voraussetzung zu sein, um genügend Zinkkorrosionsprodukte bereitzustellen, aus denen sich bei nachfolgender Abtrocknung stabile und gut schützende Deckschichten aus karbonathaltigen Korrosionsprodukten bilden. Durch den Einsatz gelartiger Elektrolyte konnte gezeigt werden, dass sich im Zeitraum nach einem Niederschlagsereignis das elektrochemische Verhalten von Deckschichten grundlegend ändert. Innerhalb kurzer Zeiträume bilden sich schützende Deckschichten, die über einen langen Zeitraum stabil bleiben und die Korrosionsgeschwindigkeit infolge deutlich herabsetzen. Um den Einfluss und die Wirkung von Niederschlägen exakt zu belegen und die ablaufenden Reaktionen nachzuvollziehen, bedarf es weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen, welche im RUNOFF-Projekt aufgegriffen wurden.

Freibewitterungsstände

Die Freibewitterungsprüfung dient dazu, die Beständigkeit von Materialien gegenüber Umwelteinflüssen, wie z.B. UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen, atmosphärische Bedingungen, im Freien zu bewerten. Allgemeine Anforderungen an stationäre Bewitterungsversuche bei Freibewitterung oder unter Überdachungen sind in der DIN EN ISO 8565:2011 DE zusammengefasst. So werden detaillierte Anweisungen zur Durchführung von Freibewitterungsprüfungen gegeben, zuzüglich Probenvorbereitung, Standortwahl, Prüfbedingungen und Bewertungskriterien. In dem Standard werden außerdem Anforderungen an die Einrichtungen und Geräte für die Freibewitterungsprüfung beschrieben, um sicherzustellen, dass die

Prüfungen unter kontrollierten und vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden können. Einige allgemeine Anforderungen an einen Freibewitterungsstand, die laut Norm berücksichtigt werden sollten, sind:

- **Belichtung:** Der Freibewitterungsstand sollte der natürlichen Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein. Ist dies nicht möglich, können Xenonbogenlampen, UV-Lampen oder anderen Lichtquellen verwendet werden, die das Spektrum und die Intensität der Sonnenstrahlung simulieren können.
- **Klimatische Bedingungen:** Der Freibewitterungsstand sollte natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt sein. Ist dies nicht möglich, müssen diese möglichst lagegetreu simuliert werden können.
- **Kontrolle & Messung:** Es sollten geeignete Messgeräte und Überwachungssysteme vorhanden sein, um die Umgebungsbedingungen zu dokumentieren.
- **Probenhalterung:** Der Freibewitterungsstand sollte eine stabile und sichere Halterung für die Proben bieten, um sicherzustellen, dass sie während der Prüfung korrekt positioniert und vor äußeren Einflüssen geschützt sind.

Diesen Anforderungen folgend, sind 2010 bereits Bewitterungsstände zur freien und überdachten Bewitterung angefertigt worden. Dabei besteht das Gerüst aus nichtrostendem Stahl (Werkstoff 1.4301) und befindet sich aus Stabilitätsgründen und einer besseren Durchlüftung des überdachten Bereiches auf Betonfüße. Die frei bewitterten Probenbefestigungsflächen sind aus Acrylglas gefertigt und haben einen Neigungswinkel von 45°.

Die BAM besitzt insgesamt 17 Bewitterungsstände an 10 verschiedenen Standorten. Diese sind ebenfalls im *Exposure Site Catalogue* zu finden – einem online Katalog, der Informationen über verschiedene Standorte europaweit enthält, an denen Freibewitterungsprüfungen durchgeführt werden können. Detailinformation zu den spezifischen Standorten und Umgebung, historische Wetterdaten, Verfügbarkeit von Testeinrichtungen sowie Kontaktdaten sind außerdem gegeben und erleichtert somit die Planung und Durchführung von Freibewitterungsprüfungen zur Qualitätskontrolle von Materialien oder für Forschungszwecke, indem er relevante Informationen über potenzielle Teststandorte bereitstellt.

Niederschlagssimulation

Die Simulation von Niederschlägen ist eine Methode aus den Bereichen der Bodenerosion und Bodenhydrologie und wird eingesetzt, um verschiedene Teilprozesse der Abflussbildung, Erosion und Schadstoffverteilung /-transport zu analysieren. Dies geschieht durch den Einsatz sogenannter Niederschlagssimulatoren (oder auch Beregner, Beregnungsapparatur), mit denen sich Niederschlagscharakteristika über eine bestimmte Fläche und Zeit kontrollieren lassen. Während also natürliche Niederschlagsereignisse räumlich und zeitlich sehr variabel sind, werden Parameter wie räumliche Verteilung, Intensität, Dauer, Tropfengrößenverteilung, Tropfengeschwindigkeiten und kinetische Energie des Niederschlags während der Beregnungsversuche konstant gehalten oder so variiert, dass der Effekt einzelner Parameter herausgearbeitet werden kann. Diese "Standardisierung" ermöglicht es, notwendige und vergleichbare Daten zu sammeln. Es gibt jedoch keine Standardisierung für das Design eines Niederschlagsmodulators, so dass sich existierende Simulatoren unterschiedlicher Institutionen stark unterscheiden können.

Zwei Haupttypen von Niederschlagssimulatoren werden üblicherweise unterschieden, darunter auch kleine portable Geräte, die Niederschlag auf kleinen Parzellen simulieren können ([15],[16]). Düsenberegner sind druckbetriebene Simulatoren und erzeugen künstlichen Niederschlag durch das Zerstäuben von Wasser über einen bestimmten Bereich. Dabei wird das Wasser durch eine oder mehrere Düsen gepresst, wodurch der Druck letztendlich die Fallgeschwindigkeit und somit die Niederschlagsintensität beeinflusst. Tröpfchen bildende Simulatoren, sogenannte Kapillarberegner, nutzen das Prinzip der Kapillarität und erzeugen Niederschlag durch Dosiernadeln, wobei der Innendurchmesser der Nadeln die Tropfengröße bestimmt. Durch die regelmäßige Anordnung der Kapillaren wird eine gleichmäßige Benetzung der Oberfläche erzeugt. Anders als Düsenberegner, arbeiten Kapillarberegner mit niedrigem Systemdruck, welcher sich aus der Wasserstandhöhe oberhalb der Kapillaren und dem Wasserdruck im Zuleitungssystem ergibt. Aufgrund des

Drucksystems werden Düsenberegner in der geo- und agrarwissenschaftlichen Forschung vorrangig zur Nachbildung von Starkregenereignissen eingesetzt [17,18,19]. Allerdings nimmt die Tropfengröße der einzelnen Tropfen mit zunehmendem Druck ab, was gegenteilig der natürlichen Gegebenheiten ist: Sprühregen weist kleine Tropfen (0,5 mm Durchmesser), Starkregen große Tropfen 2-5 mm [20,21] auf. Zudem kann es aufgrund der Sprühform zu unregelmäßigen Niederschlagsverteilungen kommen, was bei der Interpretation der Runoffergebnisse berücksichtigt werden muss. Möglichst realistische und eventgetreue Regentropfen können hingegen durch die Wahl der Nadeln mit dem Kapillarberegner erzeugt werden. Dadurch eignet sich der Kapillarberegner gut für die Bestimmung von Stofftransportmechanismen und Infiltrationsstudien. Die Nachteile dieses Beregnertyps liegen allerdings ebenfalls in der Tropfenverteilung (Tropfen auf gleicher Stelle treten in der Natur während eines Events nicht auf). Zudem können mit einfachen Kapillarberegnern nur geringe Intensitäten abgebildet werden. Die Wahl des richtigen Beregners hängt also zwangsläufig von der Forschungsfrage ab.

Forschungsbedarf/Zielstellung

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Bei Betrachtungen zur Lebensdauer von Metallbauteilen im Bauwesen müssen Korrosions- und Runoffvorgänge an der Atmosphäre als verschiedene Reaktionen unterschieden werden. Korrosion ist der Prozess, der von elektrochemischen Reaktionen an der Grenzfläche Metall/Patina kontrolliert wird. Runoff dagegen wird durch chemische Reaktionen an der Grenzfläche Patina/Atmosphäre begünstigt. Die Geschwindigkeit des Runoffs ist tendenziell geringer als die Korrosionsgeschwindigkeit. Mit zunehmender Bewitterungszeit nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit stetig ab, während postuliert wird, dass die Geschwindigkeit des Runoffs über die gesamte Zeit konstant bleibt. Dieses Verhalten des Runoffs muss aber zunehmend bezweifelt werden. Die Gesamtmenge an abgezehrtem Metall beinhaltet zwei Bestandteile. Ein Teil wird in die Schicht aus Korrosionsprodukten eingebaut, der andere wird aufgrund von Niederschlägen aus der Patina gelöst. Aus diesem Grund ist die Menge an Zink-Runoff stark abhängig von den Eigenschaften der Korrosionsprodukt- bzw. Patinaschicht und nicht anhand der Zusammensetzung des Metalls abschätzbar. Es wird noch immer von einer linear verlaufenden Runoffgeschwindigkeit ausgegangen. Dabei wird aber nicht die natürliche Bildung von schützenden und stabilen Deckschichten einbezogen, die zu einer Verringerung der Runoffgeschwindigkeit führen kann.

Vorhandene Modelle können die Menge an Runoff, und damit verbunden die Abzehrung einer Schicht aus Zink und Kupfer, sowie den resultierenden Eintrag von Schwermetallionen in die Umwelt nicht mehr darstellen und erklären. Um den Korrosionsschutz an Bauwerken zum einen dauerhaft unter Beachtung von Kostenaspekten und Ressourcenschonung und zum anderen unter ökologischen Gesichtspunkten auslegen zu können, müssen deshalb neue wissenschaftliche Grundlagen erarbeitet und die Mechanismen beschrieben werden.

Konkrete Projektziele und Forschungsfragen

In diesem Forschungsvorhaben wurde eine Kombination von Untersuchungen im Feld und im Labor vorgesehen. Durch die Untersuchungen im Labor sind grundlegende elektrochemische und chemische Mechanismen sowie der Einfluss wichtiger Parameter auf den Runoff herausgearbeitet worden. Die Feldversuche ermöglichten die Korrelation der idealisierten Versuche im Labor mit den Mechanismen im Feld unter realen Bewitterungsbedingungen und dienten der Verifikation der Laboruntersuchungen. Die Hauptziele des Projektes bestanden aus der Erstellung eines Grundlagenmodells zu Runoffvorgängen und eines Leitfadens.

Die Hauptziele des Forschungsvorhabens können wie folgt zusammengefasst werden:

- Besseres Verständnis von konstruktiv- und umweltbedingten Einflussfaktoren auf den Runoffprozess
- Dauerhaftigkeitsbetrachtung: Beschreibung des Einflusses von Runoff auf die Dauerhaftigkeit des Korrosionsschutzes
- Ökologische Betrachtung zum Umwelteintrag durch Quantifizierung des Eintrags von Schwermetallionen in die Umwelt
- Beschreibung eines geeigneten Prüfverfahrens zur Bestimmung des Runoffs

Dabei sollen folgende zentrale Fragestellungen beantwortet werden:

1. Nach welchen Mechanismen erfolgt der Runoff unter den aktuell vorherrschenden, gering korrosiven Bedingungen innerhalb der Bundesrepublik Deutschland?
2. Kann ein allgemeingültiges Modell zur Beschreibung des Runoffs in Abhängigkeit von Bewitterungszeit und Bewitterungsbedingungen definiert werden?

3. Welche Umwelteinflüsse haben neben Niederschlägen den stärksten Einfluss auf den Runoff?
4. Welchen Beitrag liefert der Runoff in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Zink- und Kupferwerkstoffen, die für Bauwerke, Dächer und Fassadenelemente eingesetzt werden? Kann der Einfluss des Runoffs vernachlässigt werden oder muss er bei der Auslegung des Korrosionsschutzes und der Lebensdauer von Zink- und Kupferbauteilen im Bauwesen berücksichtigt werden?
5. Welche Mengen an Schwermetallionen werden aufgrund von Runoff unter den derzeit vorherrschenden klimatischen Bedingungen in die Umwelt eingetragen? Sind diese Mengen unter einem ökologischen Gesichtspunkt als kritisch zu betrachten?

Forschungsdesign

Das Forschungsprojekt RUNOFF zielt darauf ab, die Langzeitbeständigkeit verschiedener Dach- und Fassadenmaterialien zu bewerten und deren potenziellen Einfluss auf die Umwelt zu untersuchen, insbesondere hinsichtlich des Auswaschens von Schwermetallionen. Angesichts der wachsenden Bedeutung nachhaltiger Baustoffe und des Umweltschutzes ist eine gründliche Analyse unerlässlich, um die Auswirkungen dieser Materialien auf die Umwelt zu verstehen und entsprechende Maßnahmen zur Minimierung von Umweltauswirkungen zu entwickeln.

Das Forschungsdesign dieses Projekts beinhaltet mehrere Schlüsselaspekte, wie die Auswahl der Forschungsmethode, die Definition relevanter Variablen sowie die Planung von Datenerhebungs- und Analyseverfahren. Zusätzlich werden potenzielle Einschränkungen und Herausforderungen des Designs berücksichtigt, um die Gültigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Durch diese Herangehensweise wird angestrebt, einen bedeutsamen Beitrag zum Verständnis der Dauerhaftigkeit von Baustoffen und ihrem Einfluss auf die Umwelt zu leisten. Letztlich sollen die gewonnenen Erkenntnisse zur Entwicklung nachhaltiger Bau- und Umweltschutzstrategien beitragen.

Methodischer Ansatz

Im Folgenden werden die verschiedenen Techniken und Verfahren im Detail behandelt, wobei besonderes Augenmerk auf ihre Anwendungsbereiche, die eingesetzten Geräte sowie die spezifischen Protokolle und Vorgehensweisen zur Datenerhebung und -analyse gelegt wird. Insbesondere werden die elektrochemische LPR-Messmethode (Linear Polarization Resistance) und die XRD-Messtechnik (X-ray diffraction) ausführlich erläutert. Beide Methoden sind nicht-destruktiv und ermöglichen es, Rückschlüsse auf die Korrosionsbeständigkeit von Materialien zu ziehen. Des Weiteren werden die Laboranalysen der Wasserproben sowie die künstliche Bewitterung ausgewählter Materialien behandelt, wobei die verwendeten Instrumente und Geräte sowie ihre technischen Spezifikationen und Kalibrierungsverfahren näher erläutert werden. Es werden auch Besonderheiten oder Herausforderungen diskutiert, die während der Messungen auftraten, und entsprechende Lösungsansätze präsentiert.

In zwei weiteren Abschnitten werden außerdem die Wetterstationen, die zur Datenerhebung und -analyse verwendet wurden, als auch deren präzise Platzierung und Funktionsweise in diesem Zusammenhang genauer beleuchtet. Zudem wird Design of Experiments (DoE), eine Methode zur systematischen Planung und Durchführung von Laborexperimenten, ausführlich beschrieben und deren Anwendung im Rahmen dieses Projekts genauer erläutert. Die umfassende Beschreibung des methodischen Ansatzes gewährleistet die Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Experimente und Messungen.

LPR

Der lineare Polarisationswiderstand (LPR) dient als Maß für die Beschreibung der Korrosionsaktivität und wird nach Formel (1) berechnet. Dabei beschreibt er den Widerstand eines korrodierenden metallenen Werkstoffes gegen den Korrosionsfortschritt in einem Korrosionssystem. Diese Betrachtung gilt allgemein für korrodierende, nicht deckschichtbildende Werkstoffe in einem Elektrolyten, sogenannte durchtrittskontrollierte Korrosionssysteme. Bei widerstandskontrollierten Korrosionssystemen, wie deckschichtbildende oder diffusionskontrollierte Systeme gilt es den linearen Bereich, um den Stromnullpunkt zu definieren. Der eigentliche Polarisationswiderstand (R_p) wird hierbei über eine lineare Regression ermittelt. Dabei werden keine strikten Grenzen definiert, über die die lineare Regression zu erfolgen hat. Diese werden iterativ angepasst, bis eine größtmögliche Determinationskonstante gefunden wurde. In dieser Studie wurde R_p über eine lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 \geq 92\%$ definiert. War dies nicht möglich, so wurde das größtmögliche Bestimmtheitsmaß verwendet.

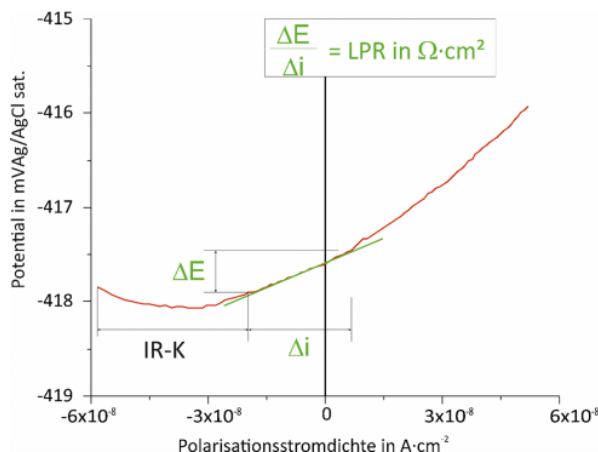
Anhand der Steigung des kathodischen oder des anodischen Astes der LPR-Messung kann die Korrosion limitierende Teilreaktion ermittelt werden. Dies bedeutet, sofern für einen der beiden Äste das Verhältnis $\Delta E/\Delta i$ deutlich höher ist, ist diese Teilreaktion gehemmt, eine beispielhafte Darstellung ist Abbildung 1 zu entnehmen. Hier beschreibt die gefittete grüne Kurve die Steigung $\Delta E/\Delta i$, die nachfolgenden Steigungen im Bereich der anodischen Teilreaktion werden größer, die limitierende Teilreaktion ist hier die anodische. Der als IR-K bezeichnete Bereich der kathodischen Teilreaktion ist infolge der vorgenommenen Kompensation „überkompensiert“ und ist für die Bewertung nicht nutzbar.

Die LPR-Messung erfolgte mit einer Polarisationsgeschwindigkeit von $0,1 \text{ mV s}^{-1}$, die Proben wurden um das freie Korrosionspotential $E_{\text{corr}} \pm 5 \text{ mV}$ polarisiert.

$$LPR = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (1)$$

LPR	Linearer Polarisationswiderstand	Ωcm^2
ΔE	Potential	V
Δi	Stromdichte	A/cm^2

Abbildung 1
Darstellung einer LPR-Messkurve und die zugehörige in Grün gekennzeichnete lineare Regression mit Angabe der Steigung $\Delta E/\Delta i$.



Quelle: Ebell [22]

Röntgendiffraktometrie

Zur Analyse der Deckschichten wurde ein Röntgendiffraktometer vom Typ XRD 3000 TT der Firma Seifert eingesetzt. Die Messung erfolgt unter streifendem Einfall, was eine präzise Analyse sehr dünner Schichten ermöglicht, ohne dass das Substrat signifikant beeinflusst wird. Die Messanordnung entsprach dabei der Parallelstrahl-Anordnung mit Göbel-Spiegel.

Folgende Geräteeinstellungen wurden hierfür verwendet:

Röntgenröhre: Cu K α -Strahlung mit $\lambda = 1,541787 \text{ \AA}$ / 40 kV und 40 mA

Schrittweite: $0,05^\circ$

Abtaste: $1,5^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$

Scanbereich: $5\text{-}72^\circ$

Die Auswertung der Diffraktogramme für die Deckschichtbildung erfolgte unter Verwendung der Software der Firma Seifert Typ Rayflex mit der PDF-2 Datenbank ICDD 1993.

Untersucht wurden die Proben hinsichtlich 13 verschiedener Verbindungen, die in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgelistet sind, die Bewertung der nachgewiesenen Deckschichtvarianten ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 1: Mittels XRD untersuchte Deckschichtbestandteile.

Phase	Verbindung	ICDD/COD
Zink	Zn	4-831
Zinkhydroxid	Zn(OH) ₂	20-1437
Zinkhydroxid / Wulfingite	Zn(OH) ₂	38-385
Zinkhydroxid / Ashoverite	Zn(OH) ₂	41-1359
Zinkoxid / Zinkit	ZnO	5-664
Simonkolleite	Zn ₅ (OH) ₈ Cl ₂ ·H ₂ O	7-155
Zinksulfathydroxide / Osakaite	Zn ₄ SO ₄ (OH) ₆ ·5H ₂ O	39-688
Zinkchloridsulfathydrat	Zn ₁₂ (OH) ₁₅ Cl ₂ (SO ₄) ₃ ·5H ₂ O	42-152
Calciumhydrozinkat (CHZ)	Ca(Zn(OH) ₃) ₂ ·2 H ₂ O	24-222
Calciumzinkkarbonat / Minrecordite	CaZn(CO ₃) ₂	35-667
Zinkkarbonat / Smithsonite	ZnCO ₃	8-449
Zinkhydroxykarbonat	Zn ₄ CO ₃ (OH) ₆ ·H ₂ O	11-287
Hydrozinkit	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆	19-1458

Quelle: Ebell [22]

Die Messungen erfolgten durch den Fachbereich 6.1 *Oberflächenanalytik und Grenzflächenchemie* der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) innerhalb von zwei Wochen nach Abnahme der Probenbleche. Die Analyseergebnisse werden durch die Identifikation der Phasen mittels eines Datenbankvergleichs mit der zuvor erwähnten Datenbank präsentiert. Die Quantifizierung der Phasen ist in Tabelle 12 detailliert beschrieben.

Tabelle 2: Mittels XRD untersuchte Deckschichtbestandteile für Kupferverbindungen.

Phase	Verbindung	ICDD/COD
Kupfer	Cu	4-836
Kupfer[I]-oxid	Cu ₂ O	5-662
Kupferhydroxidhydrat	Cu(OH) ₂ ·H ₂ O	42-638/-746
Kupferhydroxid	Cu(OH) ₂	35-505
Kupferhydroxycarbonat	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	41-1390

Quelle: BAM

Tabelle 3: Darstellung der verwendeten Indexe und die zugehörigen Bewertungen.

Index	Bewertung
+++	sicher zugeordnet, mind. zwei Reflexe eindeutig
++	wahrscheinlich enthalten, mind. zwei Reflexe passend
+	Hinweis durch mind. ein Reflex
o	möglich (nicht mehrere fehlende starke Reflexe im freien Bereich)
-	unwahrscheinlich (mehrere fehlende starke Reflexe im freien Bereich)
--	ausgeschlossen (nur eindeutig falsche Reflexlagen)
()	widersprüchlich durch fehlenden starken Reflex

Quelle: Ebell [22]

Laboranalysen

Zur Bestimmung der Zink- und Kupferionen aus den Feld- und Laborversuchen wurde die optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) verwendet. Die ICP-OES ist eine analytische Messtechnik mit hoher Empfindlichkeit, Präzision und Multielementanalysefähigkeit, und beruht auf der Erzeugung eines hochenergetischen Plasmas durch Induktion, das als Quelle für die Emission charakteristischer Spektrallinien der Elemente in der Probe dient. Diese Spektrallinien werden dann gemessen und analysiert, um die Konzentrationen der Elemente in der Probe zu bestimmen. Bei den Untersuchungen kam ein Gerät der Firma Thermo Fisher vom Typ iCap 6300 zum Einsatz. Die Bestimmung der Kationen (Ammonium, Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium) und Anionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) erfolgte durch die Ionenchromatographie (IC) der Firma Metrohm. Zusätzlich wurde der pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit der Wasserproben (ausgeschlossen die Wasserproben aus den Laborversuchen) bestimmt.

Wetterdaten

Für die Analyse der Niederschlagsverteilungen (zzgl. Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurden Messdaten von Wetterstationen beim DWD (Regionales Klimabüro Potsdam) angefordert, welche sich in unmittelbarer Nähe zu den Mesständen befinden. Bei den Stationen handelt es sich um die Station Berlin-Lichterfelde sowie Horstwalde. Die Station Berlin-Lichterfelde befindet sich hierbei nahe des Stammgeländes der BAM (Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, WGS84_N 52.44'008" WGS84_E 13.28'251") und ist als „urban“ innerstädtisch zu betrachten. Die Station Horstwalde auf dem Testgelände Technische Sicherheit TTS (An der Düne 9, 15837 Baruth/Mark, WGS84_N 52.09'552" WGS84_E 13.40'939"), der Standort kann als „rural“, ländlich beschrieben werden. Lokaluntersuchungen wie in [23,24,25] dargestellt, haben allerdings gezeigt, dass die Größe und Bebauungsdichte der Stadt Berlin einen nachweisbaren Effekt auf die Niederschlagsverteilung haben, so dass zu vermuten war, dass die ausgewählte Wetterstation in Berlin die klimatischen Umgebungsbedingungen der beiden dort befindlichen Messtände nicht optimal abbildet. Aus diesem Grund wurde auf dem Dach der BAM eine Wetterstation (BAM-Dach), genauer ein All-in-one Wettersensor (ClimaVUE50) der Firma Campbell Scientific, installiert, welches Klimadaten wie Niederschlag, Lufttemperatur und -feuchte automatisch alle 10 Minuten aufzeichnet. Die Auflösung wurde hier der Datenauflösung der Wetterstation in Horstwalde angepasst. Gefallener Niederschlag wird in der Einheit mm angegeben. Diese Einheit entspricht Liter pro Quadratmeter (L/m²) und gibt die Höhe der Wassersäule an, welche sich auf einem Quadratmeter bildet.

Künstliche Vorbewitterung

Für die Vorbewitterung der Zink- und Kupferproben (30 Proben im A4-Format je Material) für die geplanten Beregnungsversuche im Labormaßstab wurden die Proben zunächst gereinigt (s. AP1) und anschließend mit künstlichem Niederschlag ($\text{pH} = 5$, s. AP5 für Niederschlagszusammensetzung) gleichmäßig besprüht. Es wurde darauf geachtet, eine hohe Anzahl dichter Tropfen zu erzeugen und die Bildung eines zusammenhängenden Wasserfilms auf der Oberfläche der Probe zu vermeiden. Nach Eintrocknen der Tropfen wurden die Zink-Proben zwei unterschiedlich lang andauernden Temperatur-Luftfeuchtezyklen in der Klimakammer ausgesetzt. Während beider Zyklen wechselte die Luftfeuchte in 12,5-Stundenschritten zwischen 25 und 90 %, bei konstanter Temperatur von 30 °C. Der erste Zyklus dauerte hierbei 3 Tage und 5 Stunden, der Zweite 2 Tage und 3 Stunden.

Nach Beenden jedes Zyklus wurden die Deckschichtwiderstände dreier Zink-Probenbleche mittels der LPR-Methode gemessen und erneut besprüht (Abbildung 2). Die Messung der Deckschichtwiderstände diente zur Kontrolle des Deckschichtbildungsprozesses. Nach 10 Wochen konnten stabiler Deckschichten, d.h. Deckschichtwiderstände von $>100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, gemessen und die Vorbewitterung für Zink somit beendet werden. Die Kupferbleche wurden auf gleiche Weise bewittert – allerdings war der Prozess der stabilen Deckschichtbildung hier langsamer, weshalb die Proben nach 13 Wochen zweimal für 24 Stunden (10 % SO_2), und zweimal für 72 Stunden (50 % SO_2) in der SO_2 -Kammer weiter bewittert wurden bis Deckschichten von $>50 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ erreicht waren.

Abbildung 2

Mit künstlichem Wasser benetztes Zinkblech (links) und Zinkproben in der Klimakammer (rechts).



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Design of Experiment

Design of Experiments (DoE, statistische Versuchsplanung oder Versuchsdesign) ist eine effiziente Methode, um aus einer Vielzahl von Parametern die relevanten Einflussfaktoren für einen Prozess oder ein Produkt zu ermitteln. Mit Hilfe eines Versuchsplans werden diese Faktoren weitgehend unabhängig voneinander variiert, um deren Effekte auf die Zielgrößen und damit ein Ursache-Wirkungs-Modell abzuleiten. Bei der Auswertung wird abgeschätzt, ob sich alle angestrebten Ziele erreichen lassen oder ob z.B. bestimmte Zielvorgaben widersprüchlich sind. Die zielgerichtete visuelle Aufbereitung der Daten dient als Grundlage für weitere

Entscheidungen. Ziel einer DoE-Investigation ist es, mit geringstem Aufwand ein Maximum an Information über die untersuchten Faktoren und deren Variation zu erhalten. DoE wird bereits in unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft, Ingenieurwesen, Qualitätssicherung, Produktentwicklung und Prozessoptimierung erfolgreich eingesetzt.

Zu den Schlüsselaspekten des DoE gehören die Variablenidentifikation, die Versuchsplanung mit anschließender Durchführung des Experiments, Datenaanalyse und Interpretation der Ergebnisse. Bei der Variablenidentifikation werden zunächst relevante Variablen identifiziert, die einen Einfluss auf das untersuchende System haben könnten. Dies können unabhängige Variablen (Faktoren) sein, die kontrolliert und vom Experimentator bewusst manipuliert werden können, um ihren Einfluss auf das System zu untersuchen. Beispiele sind die Änderung der Temperatur, der Konzentration eines Stoffes, die Geschwindigkeit eines Prozesses oder die Variation von Materialparametern. Es können aber auch abhängige Variablen (Reaktionen) sein, die gemessen werden, um die Reaktion des Systems auf die Änderungen der unabhängigen Variablen zu beobachten. Sie sind die Ergebnisse oder Auswirkungen der experimentellen Manipulation. Beispiele sind die Produktionsrate, Produktqualität, Reaktionszeit oder die Ausbeute eines Prozesses. Neben den abhängigen und unabhängigen Variablen gibt es noch die Störvariablen (konfounding variables). Diese Variablen können unbeabsichtigte Auswirkungen auf die abhängigen Variablen haben und müssen daher berücksichtigt und kontrolliert werden, um die Validität der Experimente sicherzustellen. Zu den Störvariablen zählen z.B. Umgebungseinflüsse und Messfehler. Die Identifikation der Variablen erfordert umfangreiche Kenntnisse des untersuchten Systems sowie der potenziellen Einflussfaktoren. Daher muss zu Beginn einer mit DoE-durchgeführten Versuchsreihe immer klar definiert und festgelegt werden, was das Experiment unter welchen Bedingungen erreichen möchte und welche Variablen dafür relevant sind.

Basierend auf die identifizierten Variablen wird ein Versuchsplan erstellt. Dabei hält DoE für verschiedenste Anwendungsfälle verschiedene Versuchspläne bereit. Diese Pläne legen fest, wie die Variablen variiert werden sollen, um die gewünschten Informationen zu erhalten. Ein gut geplanter Versuchsplan berücksichtigt dabei verschiedene Faktoren wie Stichprobengröße, Replikation und Randomisierung, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse zuverlässig und aussagekräftig sind. Es kann grundsätzlich zwischen fünf verschiedenen Design-Ansätzen gewählt werden: vollständig zufällig, blockweise zufällig, faktoriell, fraktorial und RSM (response surface methodology). Während bei dem vollständig zufälligen Design alle Versuchseinheiten zufällig den unterschiedlichen Kombinationen von Variablenwerten zugewiesen werden, werden diese bei der blockweise Randomisierung in homogene Gruppen unterteilt, die sich in einer oder mehreren Störvariablen unterscheiden. Bei dem faktoriellen Ansatz werden zwei oder mehr unabhängige Variablen gleichzeitig untersucht, indem alle möglichen Kombinationen der Variablenwerte berücksichtigt werden. Dies ermöglicht die Untersuchung von Haupteffekten jeder einzelnen Variable sowie möglicher Interaktionen zwischen den Variablen. Der fraktoriale Versuchsplan ist eine reduzierte Version des faktoriellen Designs, bei dem nur eine Teilmenge der möglichen Kombinationen von Variablenwerten untersucht wird. Dieses Design wird oft verwendet, um die Anzahl der Experimente zu reduzieren, wenn nicht alle Interaktionen zwischen den Variablen von Interesse sind. Die RSM zielt darauf ab, die Beziehung zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable zu modellieren, insbesondere wenn die Antwort als Funktion mehrerer Variablen betrachtet wird. Dies beinhaltet oft die Untersuchung von Quadrat- oder Interaktionstermen, um nichtlineare Effekte zu erfassen.

Letztendlich hängt die Auswahl des geeigneten Versuchsplans von den spezifischen Forschungszielen, der Komplexität des Systems und den verfügbaren Ressourcen ab. Jeder Versuchsplan hat seine eigenen Vor- und Nachteile in Bezug auf Effizienz, Genauigkeit und Interpretierbarkeit der Ergebnisse.

Nach der Auswahl und Erstellung des Versuchsplans, wird das Experiment entsprechend durchgeführt. Dabei müssen die Daten sorgfältig gesammelt und dokumentiert werden, um eine genaue Analyse zu ermöglichen. Nach der Datenerhebung werden statistische Methoden und Techniken wie z.B. Regression und ANOVA (Analysis of Variance) angewendet, um die Beziehung zwischen den Variablen zu untersuchen und Muster oder Trends zu identifizieren. Die Darstellung der Analyseergebnisse geschieht durch verschiedene Plots (z.B. Box-Cox-Plot, 3D-Plot, Contour-Plot) und hängt von der gewählten Software ab. Basierend auf den

Analyseergebnissen können ebenfalls die optimalen Einstellungen für die Eingangsvariablen bestimmt werden, um gewünschte Ergebnisse zu erreichen.

Design of Experiments (DoE) bietet eine Reihe von Vorteilen, die dazu beitragen, die Qualität und Effizienz von Experimenten zu verbessern. Durch die systematische Planung und Durchführung von Experimenten ermöglicht DoE eine effiziente Nutzung von Ressourcen und eine Reduzierung der benötigten Experimente, was Zeit und Kosten spart. Die robuste statistische Grundlage von DoE trägt zu präzisen und zuverlässigen Ergebnissen bei, während die strukturierte Variation der Variablen die Interpretation der Daten erleichtert und fundierte Entscheidungen ermöglicht. DoE hilft auch bei der Optimierung von Prozessen und Produkten, indem es den besten Kompromiss zwischen verschiedenen Variablen identifiziert. Darüber hinaus ermöglicht es die Entdeckung neuer Erkenntnisse und Trends in den Daten und bietet eine robuste Kontrolle über Störvariablen, was die Zuverlässigkeit und Validität der Experimente erhöht. Insgesamt trägt DoE dazu bei, die Qualität, Effizienz und Effektivität von Forschungsprojekten zu verbessern und fundierte Entscheidungen in verschiedenen Anwendungsbereichen zu unterstützen.

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner und Arbeitspakete

Der Fachbereich 7.6 „Korrosion und Korrosionsschutz“ als Teil der Abteilung 7 "Bauwerkssicherheit" der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist für die wissenschaftliche Bearbeitung des Forschungsvorhabens verantwortlich.

Das Forschungsvorhaben RUNOFF umfasst die folgenden acht Arbeitspakete:

- AP1: Probenauswahl und Probenpräparation
- AP2: Konzeption, Fertigung und Aufstellung eines Messstandes für Runoff
- AP3: Analyse von Wetterdaten, des Niederschlags und des Runoffwassers
- AP4: Bewitterungsversuche im Feld zur Studie des Abschwemmverhaltens in Abhängigkeit der Bewitterungszeit
- AP5: Modellversuche mittels Modellniederschlag im Labormaßstab
- AP6: Berechnungen zum Eintrag von Ionen in die Umwelt und zum Beitrag des Runoffs zum Schichtdickenverlust von Materialien im Bauwesen
- AP7: Synthese der Ergebnisse aus Labor- und Felduntersuchungen zur Einschätzung des Einflusses von Runoff im Bauwesen
- AP8: Erstellung des Abschlussberichtes und Publikation der Ergebnisse an geeigneter Stelle

BAM-interne Kooperationspartner:

- FB 6.1 *Oberflächenanalytik und Grenzflächenchemie*: Durchführung der Tropfenaufschlagtests zur Bestimmung einer geeigneten Probengröße (AP1)
- FB 1.1 *Anorganische Spurenanalytik*: ICP-MS-Messungen der Wasserproben aus der Versuchsreihe mittels Tropfenaufschlagsvorrichtung (AP1)
- FB 7.4 *Baustofftechnologie*: ICP-MS-Messungen der Runoffproben sowie umfangreiche Wasseranalysen aus Feld- und Laborversuchen (AP3, AP4, AP5)
- FB 9.2 *Versuchsanlagen und Prüftechnik*: Konstruktion und Bau des Niederschlagssimulators für Laborversuche (AP5)

Externe Kooperationspartner:

Das Institut Feuerverzinken GmbH stellte Zink, verzinktes Versuchsmaterial sowie eine mindestens 10 Jahre alte, feuerverzinkte Tür für die Untersuchungen zur Verfügung.

Über den Großhandel Hans-Erich Gemmel & Co. GmbH wurden die Kupferbleche erworben.

Das Unternehmen KME Germany GmbH stellte verschiedene Kupfervariationen zur Verfügung.

Meilensteine

Um das Erreichen der genauen Projektziele zu überprüfen, wurde das Vorhaben in sechs Meilensteine (MS) untergliedert. Dabei definiert MS I den Abschluss von AP1 und AP2, MS II von AP3, MS III den Abschluss der Vorarbeiten für AP5, MS IV den Abschluss von AP4, MS V von AP5 und MS VI von AP6 und AP7, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Übersicht zu den Meilensteinen und Arbeitspaketen des Forschungsvorhabens RUNOFF.

MS I		MS II	MS III	MS IV	MS V	MS VI	
AP1	AP2	AP3	Vorarbeit: AP5	AP4	AP5	AP6	AP7

Der Meilenstein 1 mit Bezug auf die Fertigstellung der Probenstände konnte mit erheblicher Verspätung fertiggestellt werden. Der Versuchsplan wurde dementsprechend angepasst.

Der Modelniederschlag konnte im Rahmen des AP 2 definiert werden.

Die Relevanz der natürlich gewachsenen Deckschichten wurde im Rahmen des Vorhabens immer klarer. Die nachgelagerten Meilensteine konnten erst ein Jahr nach Abschluss des Vorhabens erfüllt werden.

Der Meilenstein III konnte sowohl an „frischen Proben“, künstlich bewitterten und an 2 Jahre alten frei bewitterten Proben erreicht werden, jedoch nicht im Rahmen der angedachten Projektlaufzeit.

Der MS IV wurde in der Antragstellung aufgrund der nicht vollständig ausgebildeten Deckschicht mit einem zu kurzen Untersuchungszeitraum bemessen. Konnte aber 1,5 Jahre nach Projektende realisiert werden. Dies gilt ebenfalls für die Modellbildung und somit für MS V, die auf bewitterten Proben beruhen muss. MS VI wurde nach Beendigung der Projektlaufzeit und Vorliegen aller Ergebnisse umgesetzt.

Projektverlauf – Vorstellung der Arbeitspakete 1-8

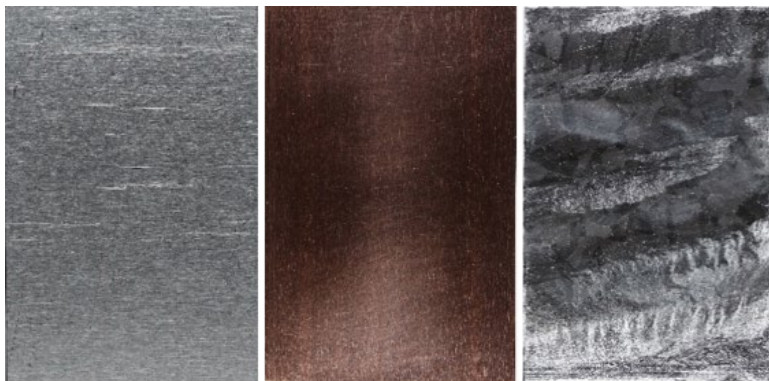
In diesem Abschnitt des Berichts werden die durchgeführten Arbeiten sowie die Erkenntnisse/Zwischenergebnisse daraus ausführlich beschrieben. Dies erfolgt in der chronologischen Reihenfolge der Arbeitspakete. Eine Zusammenführung der Zwischenergebnisse zu einem Endergebnis sowie eine einheitliche Diskussion und Einordnung der Ergebnisse im wissenschaftlichen Kontext erfolgt im nächsten Kapitel.

Arbeitspaket 1: Probenauswahl und Probenpräparation

Ziel des Arbeitspaketes 1 war die Auswahl, Beschaffung und Präparation geeigneter Probenvarianten für die geplanten Feld- und Laborversuche (AP4 und AP5). Bei der Probenauswahl wurden ausschließlich Materialien mit Metalloberflächen ohne Beschichtungen oder Konversionsschichten sowie mit hoher Relevanz für bautechnische Anwendungen berücksichtigt. Dafür wurden vorab verschiedene Werkstoffe mit Vertretern der Industrie diskutiert. Titanzink ist eins der meistverwendeten Konstruktionsmaterialien die in Blechform für Rinnen, Fensterbleche, Schornsteineinfassungen und Bedachungen verwendet wird. Kupfer galt im Bereich der Bedachungsmaterialien bislang als langlebigstes metallenes Material, das in Blechform und falztechnischer Verlegung verwendet wurde. Feuerverzinkte Stahlbauteile nehmen im frei bewitterten Bereich immer mehr zu, gerade mit der Energiewende nimmt die Verwendung verzinkter Bauteile an Photovoltaik-Anlagen exponentiell zu. Folgende Werkstoffvarianten wurden letztendlich untersucht:

- Reinzink-Blechmaterial (Titanzink),
- Kupfer-Blechmaterial,
- feuerverzinktes Blechmaterial (Abbildung3).

Abbildung 3
Probenmaterial: Titanzink, Kupfer und feuerverzinkter Stahl.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Dabei handelt es sich bei allen Proben um Neumaterial ohne Vorbewitterung und somit ohne nennenswerte Deckschichten. Kupfer wurde über den Großhandel Gemmel Metalle in Berlin bezogen. Grund dafür war die hohe Qualität sowie langjährige Erfahrungen zum Korrosionsverhalten mit diesen Varianten. Das verzinkte Versuchsmaterial sowie Titanzink stellte das Institut Feuerverzinken GmbH zur Verfügung. Alle Blechproben, welche der Untersuchung des Runoffverhaltens dienten, wurden auf Wunsch im A4-Format bereitgestellt. Diese Entscheidung basiert auf eine Vorversuchsreihe, welche mittels einer Tropfenaufschlagsvorrichtung die Metallionen-Abschwemmkonzentration bei unterschiedlichen Beregnungsintensitäten untersuchte. Dabei wurde 100 x 150 mm (entspricht ca. A6-Format) große Kupfer- und Titanzinkbleche auf zwei Intensitätsstufen, 1,2 mm/h und 9,0 mm/h, mit deionisiertem Wasser beregnet, das abfließende Wasser aufgefangen und im Labor mittels ICP-MS auf Zink- und Kupferionen analysiert. Bei einer Intensität von 1,2 mm/h (entspricht einem

Niederschlagsereignis geringer Intensität, Deutschen Wetterdienst DWD, n.d.) konnten 37,37 ppb Kupfer und 3450,05 ppb Zink, bei 9,0 mm/h (Niederschlagsereignis mittelmäßiger Intensität, Deutschen Wetterdienst DWD, n.d. [a]) 6,89 ppb Kupfer und 517,44 ppb Zink nachgewiesen werden. Diese Werte liegen außerhalb der Kalibriergeraden (Multielementstandard kalibriert bis 20 ng/g) und haben somit nur einen rein informellen Charakter. Um Abschwemmkonzentrationen von fortgeschrittenem bewitterten Material innerhalb der ICP-MS-Nachweisgrenzen gewährleisten zu können, wurde das Probenformat auf eine Größe von 200 x 300 mm (entspricht ca. A4-Format) erweitert und entspricht somit ebenfalls der empfohlenen Probengröße von mindestens 100 x 300 mm nach internationalem Standard (ISO 17752:2012).

Für die geplanten Feld- und Laborversuche wurden insgesamt 315 Probenbleche benötigt. Die genaue Probenanzahl eines jeden Materials ist der Tabelle 5 zu entnehmen. Zur Beseitigung jeglicher Schmutzstoffe wurden alle Proben (Referenzmaterial ausgeschlossen) vor dem Einsatz sorgfältig mit Petroleumbenzin entfettet und mit Ethanol gereinigt, unter einem warmen Luftstrom getrocknet und bis zum Gebrauch geschützt in Labortüten verwahrt. Bei dem Referenzmaterial handelte es sich um transparenten, thermoplastischen Kunststoff (Plexiglas), beidseitig umgeben von einer Schutzfolie, welche vor der Auslagerung entfernt wurde.

Tabelle 5: Übersicht zur Probenanzahl für Auslagerungs- und Laborversuche.

Versuchsform Probenmaterial	Feldversuche (A4)	Laborversuche (A4)	Feldversuche (A6)	Gesamtzahl (A4 / A6)
Titanzink	9	54	63	63 / 63
Feuerverzinkt	9	27	18	36 / 18
Kupfer	9	54	63	63 / 63
Referenzmaterial (RM)	9	-	-	9 / -
Gesamtanzahl	36	135	144	315

Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Arbeitspaket 2: Konzeption, Fertigung und Aufstellung eines Messtandes für Runoff

Das Arbeitspaket 2 umfasste die Konzeption, Fertigung, Aufstellung und Ausstattung von Mesständen für Korrosions- und Runoffuntersuchungen unter atmosphärischen Bedingungen an verschiedenen Standorten. Dafür wurden nach ISO EN DIN 8565:2011 DE konzipierte und bereits existierende Bewitterungsstände genutzt und diese zusätzlich mit Vorrichtungen (bestehend aus Ablaufrinne, Ablaufrohr und Auffanganister, Abbildung 4) zum Auffangen von abgespültem Runoffwasser von den einzelnen Probenoberflächen ausgestattet. Dafür wurden je Bewitterungsstand insgesamt drei, in 45° zur Horizontalen ausgerichtete Proben eines jeden Materials in A4-Größe zzgl. des Referenzmaterials befestigt. Zusätzlich wurden an jedem Stand 21x A6-Proben aus Titanzink, 21x A6-Proben aus Kupfer, sowie 6x A6-Proben aus feuerverzinktem Stahl angebracht. Diese dienten zur Bestimmung der Korrosionsprodukte (AP4), Massenverluste und Abschwemmraten (AP6).

Die Feldversuche wurden an drei charakteristischen Standorten durchgeführt, welche eine gute Zugänglichkeit gewährleisten und bezüglich der Korrosivität der Atmosphäre umfassend kategorisiert sind. Der erste Bewitterungsstand befindet sich in städtischer Umgebung auf dem BAM Stammgelände in Berlin-Steglitz und ermöglichte durch seine unmittelbare Nähe zur stark befahrenen Bundesstraße B1 die Untersuchung des Einflusses von Verkehrsverunreinigungen auf den Runoff (Standort UE-B1, WGS84_N 52.44'239", WGS84_E 13.28'524"). Basierend auf älteren Versuchsreihen, konnte Zink an diesem Standort bei freier Bewitterung der Korrosionskategorie C2, Kupfer zu C4 zugeordnet werden. Diese Korrosivitätskategorien

beschreiben die Wechselwirkung der Umwelt mit dem jeweiligen metallenen Werkstoff, je korrosiver die Atmosphäre an einem Standort für das jeweilige Material ist, desto höher wird die Korrosivitätskategorie. Die zugehörigen Abtragsraten in Form von Masseverlusten als auch Dickenreduktion sind in der DIN EN ISO 9223 dargestellt. Ein weiterer städtischer Standort (Standort Dach) befindet sich 25 m (Luftlinie) entfernt vom ersten, allerdings verkehrsgeschützt auf dem Dach des Hauptgebäudes der BAM (WGS84_N 52.44'294", WGS84_E 13.28'754"), in 17 m Höhe über Straßenniveau (Korrosionskategorie C3 für Zink und Kupfer unter freier Bewitterung). Der dritte Standort (Standort TTS) liegt auf dem BAM *Testgelände Technische Sicherheit* in brandenburgischen Horstwalde, Baruth/Mark (WGS84_N 52.09'806", WGS84_E 13.41'789") in einer ländlichen und somit atmosphärisch geringen belasteten Umgebung (Korrosionskategorie C2 für Zink, C4 für Kupfer unter freier Bewitterung). Die Bewitterungskampagne ging insgesamt ein Jahr- sie startete Ende Januar 2023 und endete Ende Februar 2024.

Abbildung 4

Mit Probenmaterial ausgestatteter Bewitterungsstand auf dem BAM-Stammgelände an der B1 in Berlin-Steglitz.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Arbeitspaket 3: Analyse von Wetterdaten, des Niederschlags und des Runoffwassers

Analyse von Wetterdaten

Hochaufgelöste Wetterdaten (10-min Auflösung), genauer, Niederschlagsmenge, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit, wurden für den Zeitraum an den beiden Lokationen der stattgefundenen Feldversuche Horstwalde und Berlin ausgewertet. Für Berlin wurde hier auf zwei Wetterstationen zurückgegriffen: die Wetterstation Lichterfelde sowie die BAM-eigene Wetterstation auf dem Dach des Hauptgebäudes. Dabei stammen die Niederschlags- und Temperaturdaten von der BAM-Wetterstation und wurden durch die Daten zur relativen Luftfeuchtigkeit von der Wetterstation Lichterfelde ergänzt. Am Standort TTS wurden ausschließlich Daten der Wetterstation Horstwalde verwendet. Die Abbildung 5 gibt einen allgemeinen Überblick zu den o.g. Parametern in täglicher Datenauflösung.

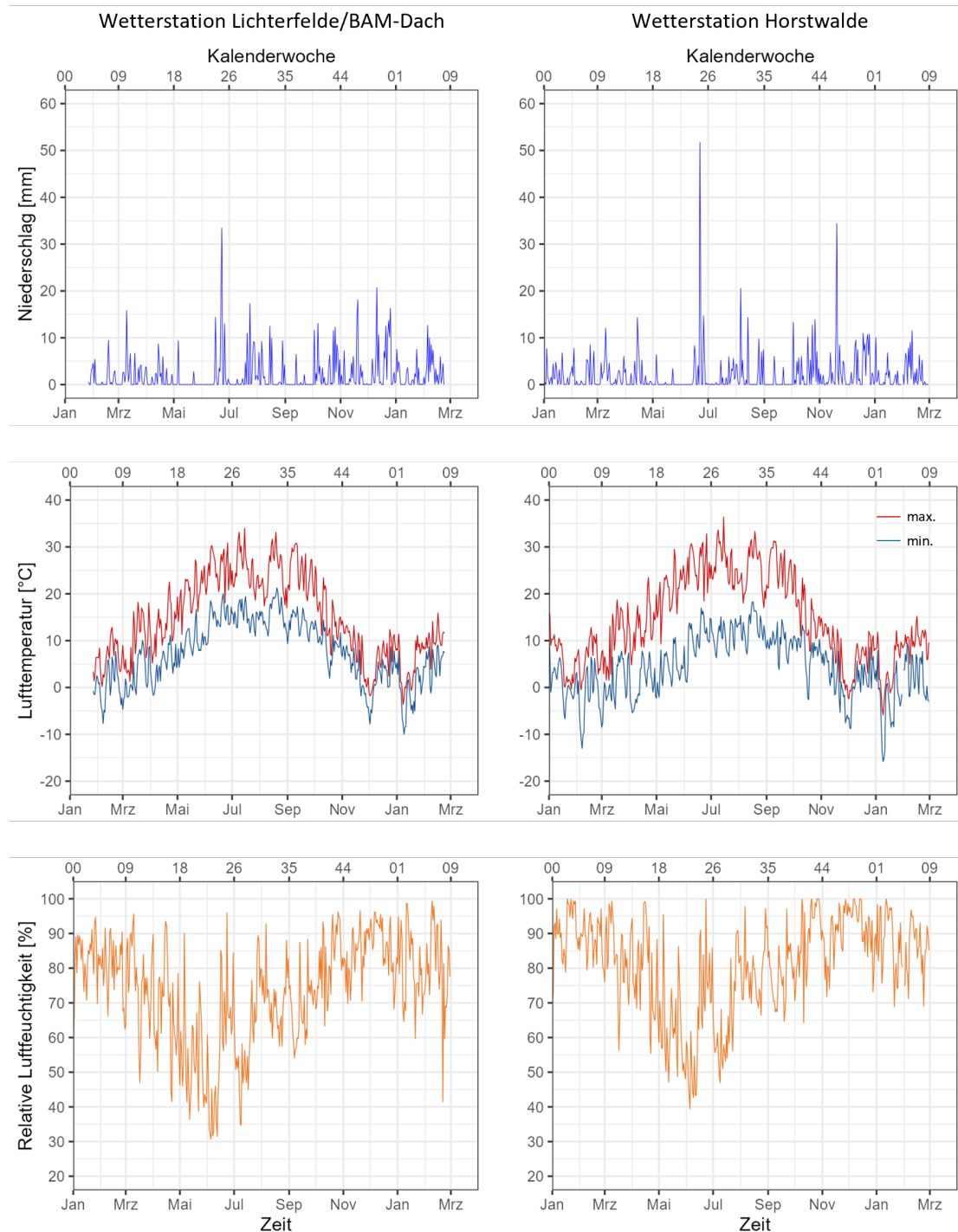
Die Niederschlagsverteilungen der Stationen unterscheiden sich nur geringfügig. Dabei fielen im Gesamtzeitraum in Berlin insgesamt 795,12 mm, in Horstwalde 811,02 mm, davon 673,59 mm und 695,86 mm jeweils im Jahr 2023 (Tabelle 6). Unter dem Aspekt, dass der Monat Januar nicht mitgezählt wurde, liegt der Jahresniederschlag für Berlin bereits deutlich über der mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 581 mm (Umweltatlas Berlin [26]). Niederschlagsreichste Monate im Jahr 2023 waren der Dezember, Juni und Oktober mit ca. 90 – 130 mm je Standort. Dabei viel der Niederschlag im Dezember an beiden Standorten über 21/22

Tage, im Juni allerdings nur an der Hälfte der Anzahl der Tage (10/11). Dabei entspricht die Anzahl der Tage, an denen Niederschlag (ND) zu verzeichnen war, ungefähr der Anzahl der identifizierten Niederschlagsereignisse (Tabelle 6). Das Verhältnis von Niederschlagsmenge zu aufsummierten Niederschlagsstunden und identifizierte Niederschlagsereignisse (NDE) lässt auf wenige Starkregen im Juni, und doppelt so viele, weniger intensive Dauerregen im Winter schließen (Abbildung 5).

Höchsttemperaturen wurden 2023 an beiden Standorten im Juli, Tiefsttemperaturen im Februar verzeichnet. Dabei liegen im Schnitt die Höchsttemperaturen in Horstwalde 2 °C über die in Berlin bzw. unter die der Tiefsttemperaturen. Dieser Temperaturunterschied ist durch das jeweilige städtische bzw. ländliche Umfeld zu erklären. Zwischen der Temperatur und dem Niederschlag besteht ein deutlicher Zusammenhang: ein kurzfristiger Temperaturanstieg hat vergleichsweise erhöhten Niederschlag zur Folge (Abbildung 5). Die relative Luftfeuchtigkeit liegt in den Wintermonaten beider Stationen immer über 50%, in Horstwalde meist 10% höher als in Berlin, und kann durch die rasche Sättigung der kalten Winterluft erklärt werden. Eine Zunahme der Temperatur hat somit eine Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit zur Folge.

Abbildung 5

Verteilung (Tageswerte) von Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit für den Zeitraum Januar 2023 bis Ende Februar 2024 für den Standort UE-B1 und BAM-Dach (links) sowie den Standort TTS (rechts).



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Tabelle 6: Übersicht zur Niederschlagskennwerten

Monat	Anzahl ND-Tage (Stunden)		ND-Summe [mm = L/m ²]		Identifizierte NDE	
	Berlin	TTS	Berlin	TTS	Berlin	TTS
Feb-2023	14 (60)	15 (56)	33,37	48,85	12	10
Mär-2023	22 (78)	23 (72)	64,63	62,10	21	18
Apr-2023	13 (58)	14 (70)	39,92	51,11	11	12
Mai-2023	3 (8)	5 (9)	12,58	11,64	3	2
Jun-2023	11 (28)	10 (33)	90,08	104,86	7	11
Jul-2023	14 (13)	15 (14)	64,33	31,18	10	9
Aug-2023	15 (30)	16 (39)	64,45	80,76	14	18
Sep-2023	4 (4)	3 (8)	9,33	11,34	3	3
Okt-2023	20 (88)	19 (99)	98,79	100,57	18	20
Nov-2023	20 (76)	21 (86)	66,23	90,06	14	14
Dez-2023	22 (155)	21 (128)	129,88	103,39	20	21
Jahr 2023	156 (598)	162 (614)	673,59	695,86	133	138
Jan-2024	17 (59)	15 (49)	44,93	39,56	15	8
Feb-2024	19 (83)	21 (93)	76,60	75,60	17	13
Gesamtzeitraum	192 (740)	220 (756)	795,12	811,02	165	159

Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Diskussion Niederschlag/Metallkonzentration/Runoffraten

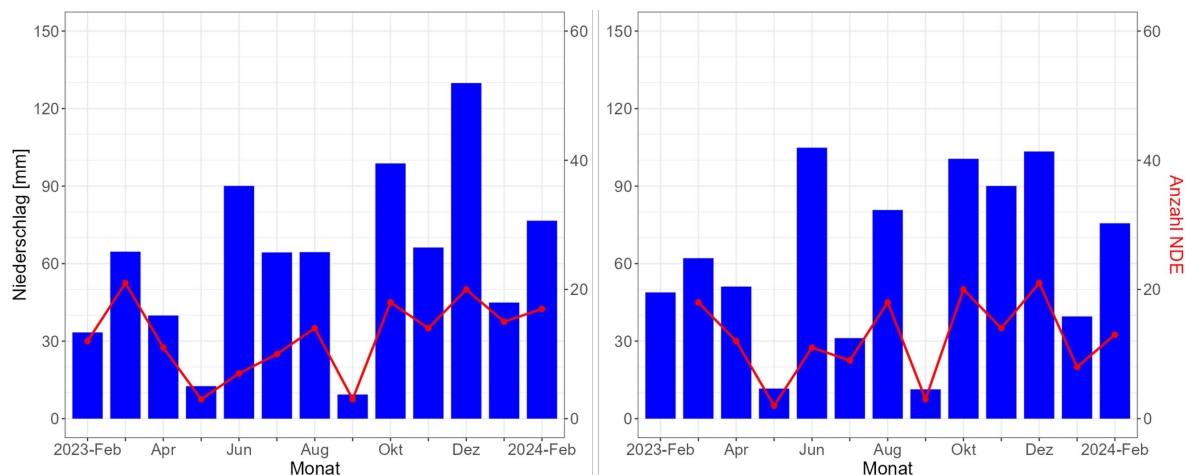
Folgender Zusammenhang zwischen Niederschlagssummen und Konzentrationen: anhand der Niederschlagsanalyse wissen wir, dass die Niederschlagssummen im Juni und Dezember 2023 ähnlich hoch sind, allerdings fällt dieser im Juni hauptsächlich in Form von Starkregen an wenigen Tagen und im Dezember in Form von weniger intensiven Dauerregen über die doppelte Zeit. Welchen Einfluss hat also die Intensität auf das Abschwemmverhalten? Die Zink- und Kupfer-Konzentrationen sind aufgrund des Verdünnungseffekts zu diesen Zeitpunkten niedrig. Im Vergleich mit den Runoffraten fällt allerdings auf, dass diese im Juni (also unter Starkregen) geringer sind als im Dezember, trotz ähnlich hoher Niederschlagssummen. Grund dafür ist wohl nicht die Niederschlagssumme, aber dafür möglich: Intensität des Niederschlags, Dauer des Niederschlags, Stabilität der Deckschicht (R), Temperatur.

Schlussfolgerung: Niederschlagsdauer (somit Benetzungszeit) spielt eine ganz wichtige Rolle. Deckschichten sind zwar stabiler im Dezember, aber dafür sind die Proben länger/kontinuierlich benetzt, so dass mehr Ionen aus der Deckschicht gelöst werden können. Temperatureinfluss weniger stark, da Feuchtigkeit auf Proben sofort verdunstet.

- ➔ Überprüfung mit Laborversuchen, ob geringe Intensitäten tatsächlich höheren Einfluss haben als kurze Starke NDE.

Abbildung 6

Verteilung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] für den Zeitraum Februar 2023 bis Februar 2024 für die Standorte BAM-Dach (links) und TTS (rechts), in Rot dargestellt sind die Anzahl der identifizierten Niederschlagsereignisse (NDE) pro Monat.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Analyse Niederschlagswasser

Im Zeitraum von Mai bis Juni 2022 wurde mit der Niederschlagsbeprobung an den Standorten BAM-Dach und TTS begonnen, wobei die Ergebnisse dieser Analysen als Basis für die Zusammensetzung des künstlichen Niederschlags für die Laborversuche (AP5) dienen. Aufgrund der leichteren Zugänglichkeit zum BAM-Dach-Standort wurde das Niederschlagswasser dort mittels eines Auffangtrichters, der an einem Stativ befestigt war, gesammelt (siehe Abbildung 7 links). Da der Standort TTS weniger leicht erreichbar ist, wurde dort ein Niederschlagssammler des Typs "Forst" der Firma Umwelt-Geräte-Technik GmbH installiert (siehe Abbildung 7 rechts). Dieser Sammler wurde wöchentlich gewartet und gegebenenfalls Niederschlagsproben entnommen, während auf dem BAM-Dach-Standort der Niederschlag nur gelegentlich gesammelt wurde. Die Laboranalyse der Niederschlagsproben umfasste die Untersuchung verschiedener Parameter, darunter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit sowie Gehalte an Kationen (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und Anionen (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^-).

Eine detaillierte Übersicht über die Analyseergebnisse der einzelnen Beprobungen an beiden Standorten ist im Anhang (Anhang 1) zu finden. Die pH-Werte für den BAM-Dach-Standort liegen zwischen 5,07 und 6,87 (Median: 5,6), während sie für den Standort TTS zwischen 4,44 und 6,16 variieren (Median: 5,7). Diese Werte befinden sich im ähnlichen Bereich wie die gemessenen Niederschlags-pH-Werte des Deutschen Wetterdienstes und des Umweltbundesamtes (UBA 2022). Die gemessenen Kationen- und Anionenkonzentrationen sind für beide Standorte im Durchschnitt höher als die veröffentlichten Konzentrationsverteilungen des DWD. Dies könnte auf die Lage des Niederschlagssammlers des DWD in Hohenpeißenberg zurückzuführen sein, der fernab städtischer und industrieller Einflüsse auf einer Höhe von 780 m über dem Meeresspiegel liegt (im Vergleich dazu liegt Berlin zwischen 29,5 und 115 m über dem Meeresspiegel). Basierend auf den Analyseergebnissen des natürlichen Niederschlags wurden folgende Konzentrationsbereiche verschiedener Inhaltsstoffe für die Herstellung des künstlichen Niederschlags

abgeleitet: Ammonium (0,6–0,8 mg/L), Calcium (0,2–0,8 mg/L), Kalium (0,2–0,4 mg/L), Magnesium (0,3–0,5 mg/L), Natrium (0,2–0,7 mg/L), Chlorid (0,5–1,5 mg/L), Nitrat (1,5–2,2 mg/L) und Sulfat (1,0–1,4 mg/L). Hierfür wurden 1,78 g Ammoniumchlorid, 0,73 g Calciumchlorid, 1,63 g Kaliumnitrat, 3,10 g Magnesiumsulfat und 0,73 g Natriumhydrogencarbonat in einem Liter bidestilliertes Wasser. Von dieser hochkonzentrierten (1000-fach) Lösung wurden dann jeweils 10 mL in 10 L bidestilliertes Wasser gegeben, um realitätsnahes Regenwasser zu produzieren. Für die Laborversuche wurde der pH-Wert je nach Bedarf mit 0,1 molarer Salzsäure oder Natriumhydroxid-Lösung angepasst – untersucht wurde der Einfluss von drei verschiedenen pH-Werten: 4,5, 5,5 und 6,5. Die Wahl der pH-Werte basierte auf die tatsächlich gemessenen pH-Werte der Runoffwässer.

Abbildung 7

Niederschlagssammler am Standort BAM-Dach (links) sowie am Standort TTS (rechts).



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Analyse Runoffwasser

Mit Fertigstellung der Messstände und der Probenauslagerung an den drei Standorten Ende Januar 2023, hatte ebenfalls die Probenahme und -analyse der Runoffwässer begonnen. Das Runoffwasser jeder einzelnen Probe wurde in einem 5L-Kanister aufgefangen, welcher anfänglich wöchentlich, nach einem halben Jahr nur noch monatlich gewechselt wurde. Dabei wurde jedes Mal das genaue Runoffvolumen bestimmt, standardmäßig auf die o.g. Kationen und Anionen, und zusätzlich auf Cu- und Zn-Ionen analysiert. Abbildung 8 und 9 zeigen eine genaue Übersicht der Konzentrationsverteilungen von Cu, Zn, Cl⁻, SO₄²⁻ sowie eine Verteilung des Runoffvolumens, der elektrischen Leitfähigkeit sowie des pH-Wertes. Sulfat und Chlorid wurden aufgrund ihrer bekannten Eigenschaft, Korrosion zu verstärken [14], mit dargestellt.

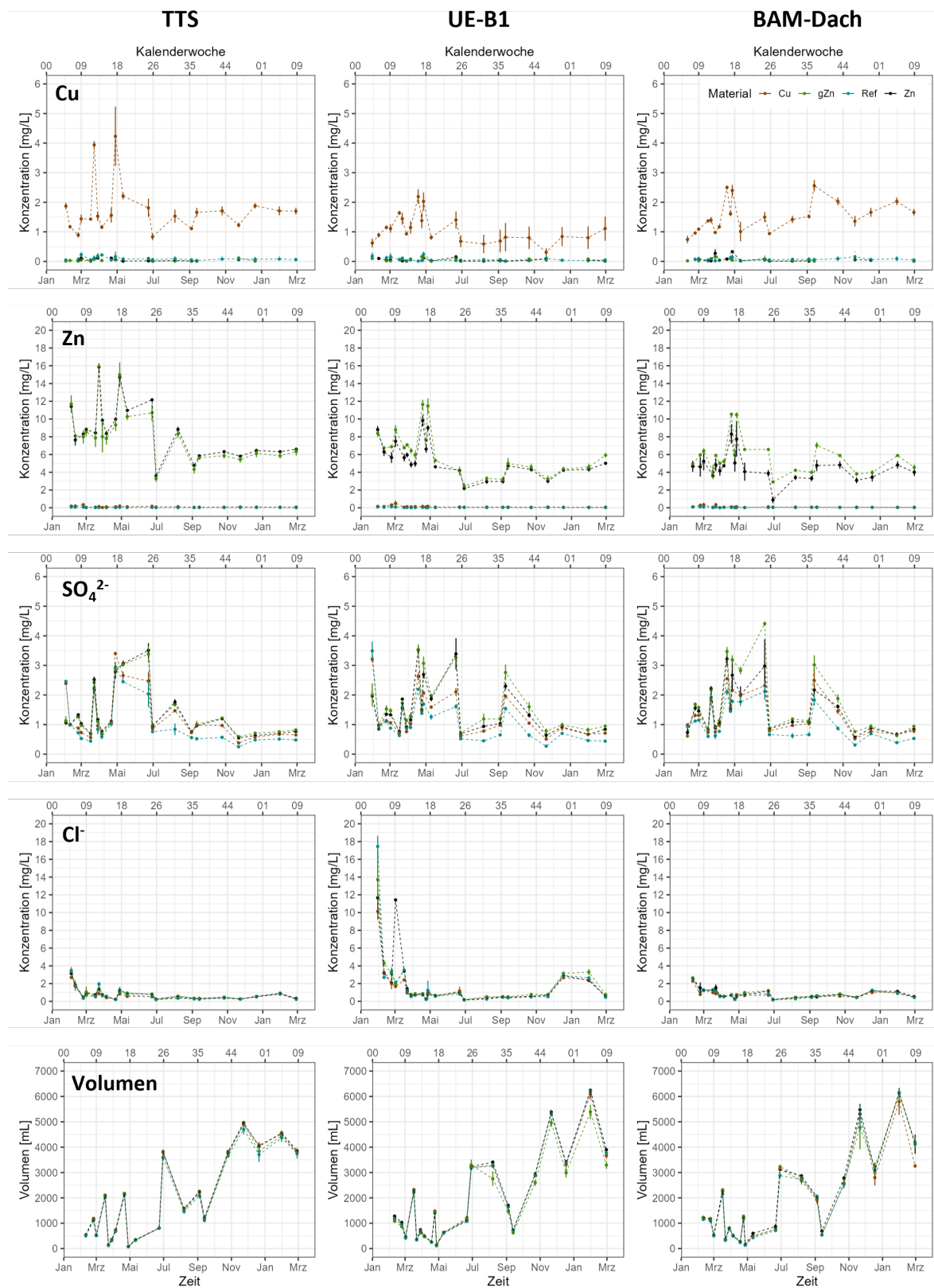
Die Cu-Konzentrationen der Runoffwässer der Kupferproben rangieren an allen drei Standorten zwischen 0,5 und 4,8 mg/L. Dabei wurden die höchsten Konzentrationen am Standort TTS im Frühjahr 2023 gemessen, die Durchschnittskonzentration an diesem Standort beträgt 1,74 mg/L. Die Durchschnittskonzentration am Standort BAM-Dach (1,52 mg/L) ist ähnlich der auf dem TTS und damit höher als am UE-B1 (1,06 mg/L) trotz unmittelbarer Nähe der beiden Bewitterungsstände. Die Cu-Konzentrationen der Runoffwässer von Zink (Zn) und feuerverzinktem Stahl (gZn) liegen dauerhaft unter 0,5 mg/L. Die Zn-Konzentrationen in den Runoffwässern der Zink- und feuerverzinkten Proben sind bis zu viermal höher als die entsprechenden Cu-Konzentrationen. Maximalwerte wurden an allen Standorten wieder im Frühjahr 2023 gemessen mit 16,25 mg/L am TTS, 12,39 mg/L am UE-B1 und 10,67 mg/L am BAM-Dach. Die jährliche Durchschnittskonzentration liegt hierbei zwischen 8,41 mg/L (TTS) und 5,08 mg/L (BAM-Dach). Dabei sind die gemessenen Zn-Konzentrationen an den feuerverzinkten Proben im Vergleich zu den Titanzink-Proben oft geringfügig höher. Diese Diskrepanz (BAM-Dach: 1,26 mg/L, UE-B1: 0,73 mg/L) ist vor allem an den Standorten in Berlin zu beobachten. Die Zn-Konzentrationen der Runoffwässer der anderen Proben (Cu, Referenzmaterial) sind unauffällig niedrig (0,08 mg/L). Die Chloridkonzentrationen erreichten zu Beginn der Probenkampagne (Ende Januar) an allen Standorten ihre Höchstwerte: Standort TTS mit bis zu 4 mg/L, UE-B1 mit bis zu 19 mg/L und

Standort BAM-Dach mit bis zu 3 mg/L. Seitdem ist eine Abnahme der Chloridkonzentrationen an allen Standorten zu beobachten mit Durchschnittskonzentrationen von 0,9 mg/L. Die Sulfatkonzentrationen liegen im gesamten Bewitterungszeitraum zwischen 0,5 – 4,6 mg/L (Mittelwert: 1,34 mg/L). Dabei wurden alle Höchstwerte im Zeitraum April-Juni 2023 erreicht. Die höchsten elektrische Leitfähigkeiten wurden Ende Januar 2023 am Standort UE-B1 in Berlin gemessen (95 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Im Jahresmittel rangieren die elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 23 (BAM-Dach) und 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (UE-B1). Bei den Runoffwässern der Zink- und feuerverzinkten Proben sind an allen drei Standorten höhere Leitfähigkeiten und pH-Werte im Vergleich zu denen der Kupfer-Proben zu verzeichnen. Grund für die höheren Leitfähigkeiten sind die höheren Zink-Konzentrationen; die tendenziell höheren pH-Werte können durch die Auflösung der sich gebildeten, aber instabilen Zinkhydroxid-Schichten auf den Materialien erklärt werden.

Der Vergleich der Metallkonzentrationen mit dem aufgefangenen Runoffvolumen zeigt deutlich, dass bei Regenereignissen mit geringem Volumen die Metallkonzentration im Runoffwasser deutlich höher ist als bei Regenereignissen mit höherem Niederschlagsvolumen. Diese Beobachtung lässt sich durch den sogenannten First-Flush-Effekt erklären, welcher sich auf das Abspülen der Oberflächenprodukte innerhalb des effektiven Niederschlagsabflusses beschränkt. Dadurch kommt es nach dem First-Flush nur noch zu einer Verdünnung der Konzentrationen im Runoffwasser. Bei diesem Prozess nimmt die Konzentration mit zunehmendem Niederschlagsvolumen ab, bis eine kontinuierliche Zinkionenfracht infolge Korrosion bei andauernder Befeuchtung durch langanhaltende Regenereignissen hinzukommt. Während Konzentrationen wichtige Messgrößen für die Überwachung der Wasserqualität und die Einhaltung von Umweltstandards sind, müssen oft Runoffraten für eine bessere Kontextualisierung und direktere Informationen über den Eintrag von Schadstoffen in z.B. Gewässer Böden, Kanalisation, hinzugezogen werden, was sie in vielen Fällen zu einer bevorzugten Metrik macht. Zudem erlauben sie einen direkten Vergleich zwischen verschiedenen Standorten und Zeiträumen und bieten somit eine bessere Grundlage für die Bewertung der Umweltbelastung und die Entwicklung von Maßnahmen zu dem Gewässer- und Umweltschutz im Vergleich zu Konzentrationen allein.

Abbildung 8

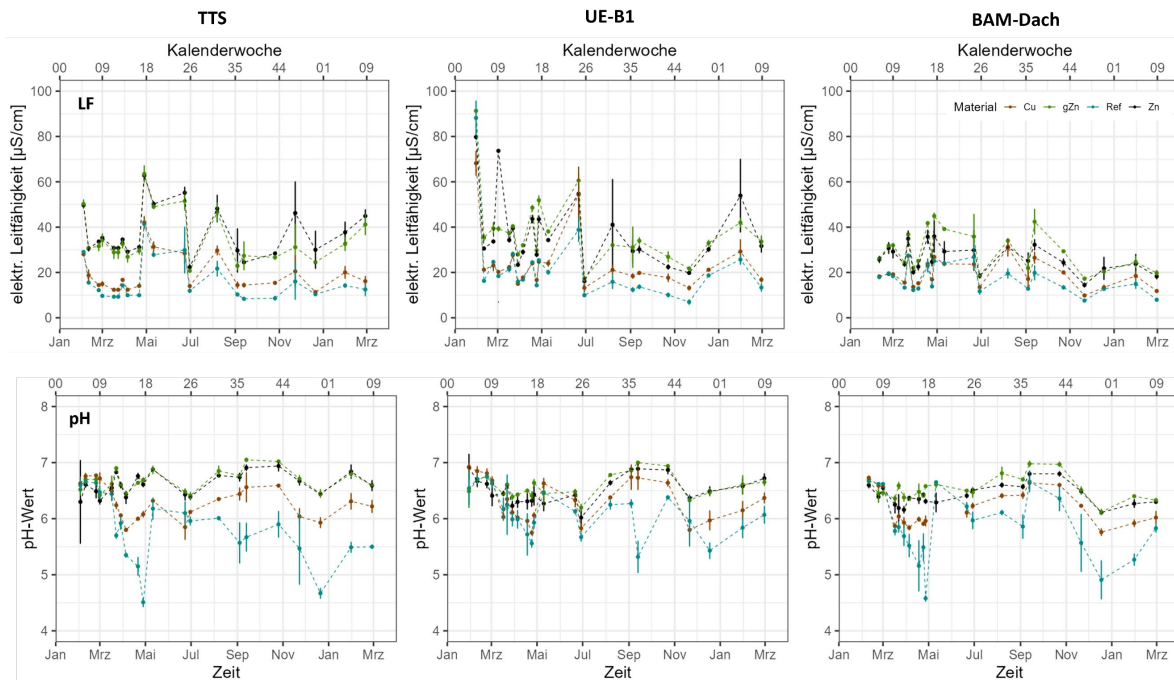
Darstellung der Konzentrationsverteilungen von Cu-, Zn-, Sulfat- und Chloridionen im Runoffwasser an den drei Standorten sowie des aufgefängenen Runoffvolumens für den Zeitraum Januar 2023 bis Ende Februar 2024.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 9

Darstellung der pH- und elektrische Leitfähigkeitsverteilung an den drei Standorten für den Zeitraum Januar 2023 bis Ende Februar 2024.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Arbeitspaket 4: Bewitterungsversuche im Feld zur Studie des Abschwemmverhaltens in Abhängigkeit der Bewitterungszeit

Die Auslagerung von Probenmaterial diente zur Bestimmung der Abschwemmraten (Runoffraten) von Zink- und Kupferionen, der Massenverluste sowie zur genauen Untersuchung der Deckschichtbildung unter aktuell atmosphärischen Bedingungen. Auf die genauen Berechnungen zum Eintrag von Ionen in die Umwelt und zum Beitrag des Runoffs zum Schichtdickenverlust von den Untersuchungsmaterialien wird in AP6 näher eingegangen. Dieses Kapitel widmet sich der Bestimmung der Zusammensetzung der gebildeten Deckschichten über den Bewitterungszeitraum mittels analytischer Verfahren als auch der Deckschichtstabilität mittels elektrochemischer Methoden. Dabei ermöglichen analytische Methoden Rückschlüsse auf die Reaktionsmechanismen und Korrosionsprodukte, elektrochemische Methoden dahingegen Aussagen bzgl. der Korrosionsschutzfähigkeit und Stabilität einer Deckschicht.

Die Bewitterungsversuche starteten Ende Januar/Anfang Februar 2023 und endeten Ende Februar 2024. In AP2 ist eine detaillierte Beschreibung der drei Standorte sowie zur Ausstattung der Bewitterungsstände in AP2 zu finden. Abbildung 10 zeigt einen ausgestatteten Bewitterungsstand am Standort TTS bei Auslagerungsbeginn, nach einer einmonatigen Bewitterungszeit und die Durchführung einer LPR-Messung an einer Zink-Probe.

Abbildung 10

Bewitterungsstand am Standort TTS bei Auslagerungsbeginn, nach einer natürlichen Bewitterungszeit von einem Monat und Durchführung einer LPR-Messung an einer Zink-Probe (von links nach rechts).



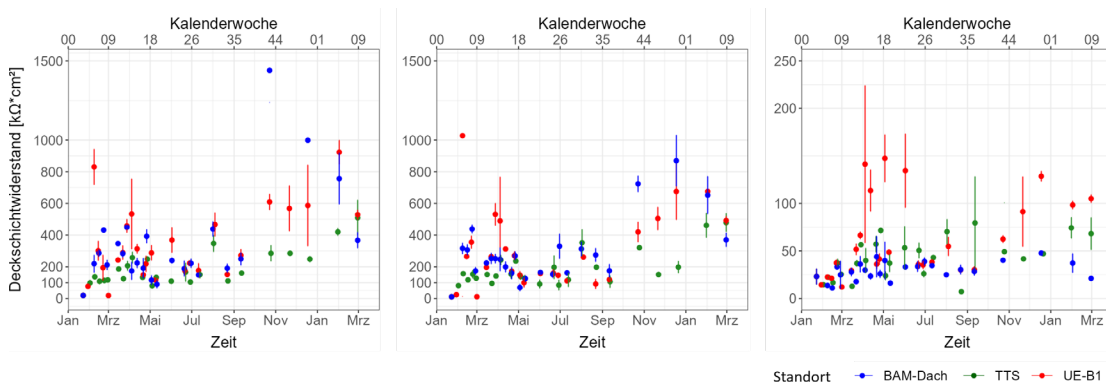
Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Elektrochemische Untersuchung der Deckschichtstabilität

Für die elektrochemisch Untersuchung der Deckschichtstabilität wurde eine Drei-Elektroden-Messanordnung für die Messungen mittels gelartiger Elektrolyte verwendet. Die Messungen unter atmosphärischen Bedingungen starteten Ende Januar (KW5) an den Ständen UE-B1 und BAM-Dach, Anfang Februar (KW6) am TTS (Abbildung 11). Jeweils eine Woche zuvor wurden Messungen vor Auslagerungsstart durchgeführt. Die hier ermittelten Deckschichtwiderstände lagen bei $6,7 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$ für Zink, $3,7 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$ für Feuerverzinktes und $8,1 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$ für Kupfer. Über den Gesamtzeitraum von einem Jahr ist eine deutliche Zunahme des Deckschichtwiderstandes bei allen drei Materialien zu verzeichnen. Dieser zeichnet sich besonders stark an den Zink- und feuerverzinkten Proben ab. Hier schwanken die Deckschichtwiderstände innerhalb der ersten neun Monate zwischen $10,41$ und $1027,61 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$. Allerdings werden bereits nach einem Monat an allen Standorten Deckschichtwiderstände $>100 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$ erreicht, wonach bereits von der Bildung stabiler Deckschichten ausgegangen werden kann [14]. Die verzeichneten Schwankungen können durch den Einfluss von Niederschlagsereignissen erklärt werden. Deutlich erhöhte Werte, besonders innerhalb der ersten Wochen, sind hierbei besonders kritisch zu betrachten. Die zu diesem Zeitpunkt herrschende Lufttemperatur unter dem Gefrierpunkt ($-2 \text{ }^\circ\text{C}$) hatte zu einem Anfrieren der gelartigen Elektrolyte geführt und somit die Messwerte maßgeblich beeinflusst. Auch hohe Standardabweichungen sind ein Indiz für beeinflusste Messwerte, meistens durch entweder zu niedrige oder zu hohe Temperaturen. Die Deckschichtwiderstände für Kupfer rangieren zwischen $7,11$ und $147,43 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$ und liegen ab September fast ausschließlich über $40 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$. Im Vergleich zwischen den Standorten, lassen sich die höchsten Deckschichtwiderstände bei Zink am UE-B1 und BAM-Dach, beim Kupfer am UE-B1 und TTS verzeichnen.

Abbildung 11

Gemessene Deckschichtwiderstände über den Zeitraum von Januar 2023 bis Februar 2024 an Zink (links), feuerverzinktem Stahl (mittig) und Kupfer (rechts).



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

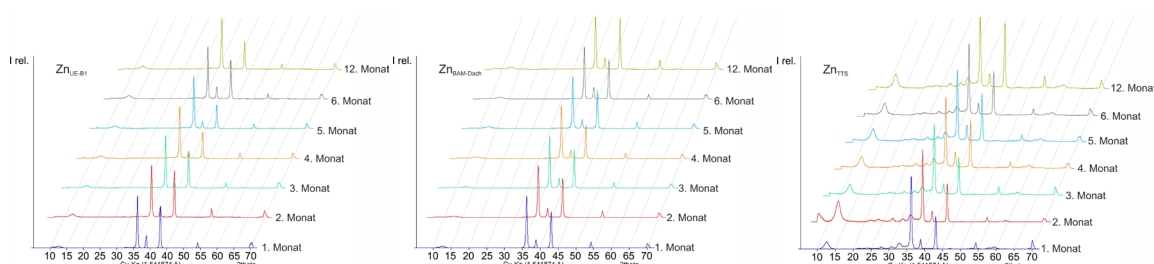
Bestimmung der Korrosionsprodukte in Abhängigkeit der Bewitterungszeit

Für die Bestimmung der Deckschichtzusammensetzung wurden am Ende eines jeden Monats 3x Zn- und 3x Cu-Proben im A6-Format pro Standort zur XRD-Analyse gegeben. Bei dieser Analyseverfahren werden spezifische Spektren aufgenommen und die Phasen anschließend analysiert und identifiziert. Es ist anzumerken, dass mithilfe der XRD-Analyse keine Aussage über den Bedeckungsgrad gemacht werden kann – dies ist ggf. aus den LPR-Messungen abzuleiten.

Die genauen Analyseergebnisse für Zink und Kupfer sowie eine visuelle Darstellung zur Veränderung der Deckschicht über die Zeit ist den nachfolgenden Diffraktogrammen zu entnehmen (Abbildung 12 und Abbildung 13). Bei den Zinkproben konnte an allen Standorten bereits nach einem Monat Zinkhydroxycarbonat-Monohydrat in der Deckschicht nachgewiesen werden (Tabelle 7), die Bildung von Ashoverit wurde als möglich bewertet. Außerdem wurde das Vorkommen von Zinkhydroxycarbonat und Zinkoxid an den Standorten UE-B1 und TTS als sehr wahrscheinlich bewertet. Bei den Kupferproben konnte nach einem Monat an allen Standorten Kupfer(I)-oxid nachgewiesen werden (Tabelle 8), nach sechs Monaten Kupferhydroxydhydrat. Außerdem wurde das Vorkommen von Kupferhydroxid am Standort UE-B1 nachgewiesen; Kupferhydroxycarbonat wurden an allen Standorten als möglich bewertet.

Abbildung 12

Diffraktogramme der Zinkproben über einen Zeitraum von 12 Monaten für die Standorte, von links: UE-B1, BAM-Dach und TTS



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

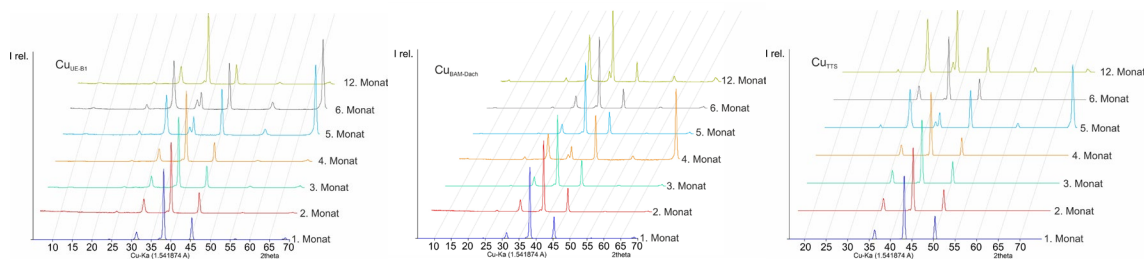
Tabelle 7: Übersicht der Deckschichtzusammensetzung für Zinkproben nach 1, 6 und 12 Monate Auslagerungsdauer

Phase / Verbindung	ICDD/COD	UE- B1			BAM-Dach			TTS			Verbindung
		1. Mon.	6. Mon.	12. Mon.	1. Mon.	6. Mon.	12. Mon.	1. Mon.	6. Mon.	12. Mon.	
Zn	4-831	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	
Zn₄CO₃(OH)₆·H₂O	11-287	+++	+++	+++	++	++	++	+++	+++	+++	Zinkhydroxy-carbonat-Monohydrat
Zn₅(CO₃)₂(OH)₆	19-1458	++	++	++	-	-	-	++	++	++	Hvdrozincat
Zn(OH)₂ Wulfingite	38-385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zn(OH)₂ Ashoverite	41-1359	o	o	o	-	-	-	o	o	o	
ZnO Zinkit	5-664	++	++	++	o	o	o	++	++	++	

Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 13

Diffraktogramme der Kupferproben über einen Zeitraum von 12 Monaten für die Standorte, von links: UE-B1, BAM-Dach und TTS



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Tabelle 8: Übersicht der Deckschichtzusammensetzung für Kupferproben nach 1, 6 und 12 Monate Auslagerungsdauer

Phase / Verbindung	ICDD/COD	UE- B1			BAM-Dach			TTS			Verbindung
		1. Mon	6. Mon	12. Mon	1. Mon	6. Mon	12. Mon	1. Mon	6. Mon	12. Mon	
Cu	4-836	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	
Cu ₂ O Cuprite	5-667	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	Kupfer-[I]-oxid
Cu(OH) ₂ *H ₂ O	42- 638/746	-	o	+	o	+	++	o	+	++	Kupferhydroxid- hydrat
Cu(OH) ₂ Sperntinite	35-505	-	+	+	-	-	o	-	-	-	Kupferhydroxid
Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂ Malachite	10-399 41-1390	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Kupferhydroxi- carbonat

Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Arbeitspaket 5: Modellversuche mittels Modellniederschlag im Labormaßstab

Das Arbeitspaket 5 umfasste die Konstruktion und den Bau eines Niederschlagsmodells sowie die Durchführung von Berechnungsversuchen im Labormaßstab. Dabei lag der Fokus vor allem auf die Untersuchung des Effekts der Niederschlagsintensität in Wechselwirkung mit der Probenneigung sowie des pH-Wertes des künstlichen Niederschlagswassers auf das Abschwemmverhalten von Schwermetallionen.

Die Wahl, einen Kapillarberegner einzusetzen, gründet sich darauf, dass Kapillarberegner realistische Regentropfen erzeugen können, die für den Abschwemmprozess besonders relevant sind. Außerdem ermöglichen sie eine breitere Skala von Niederschlagsintensitäten, wodurch verschiedene Niederschlagsereignisse simuliert werden können.

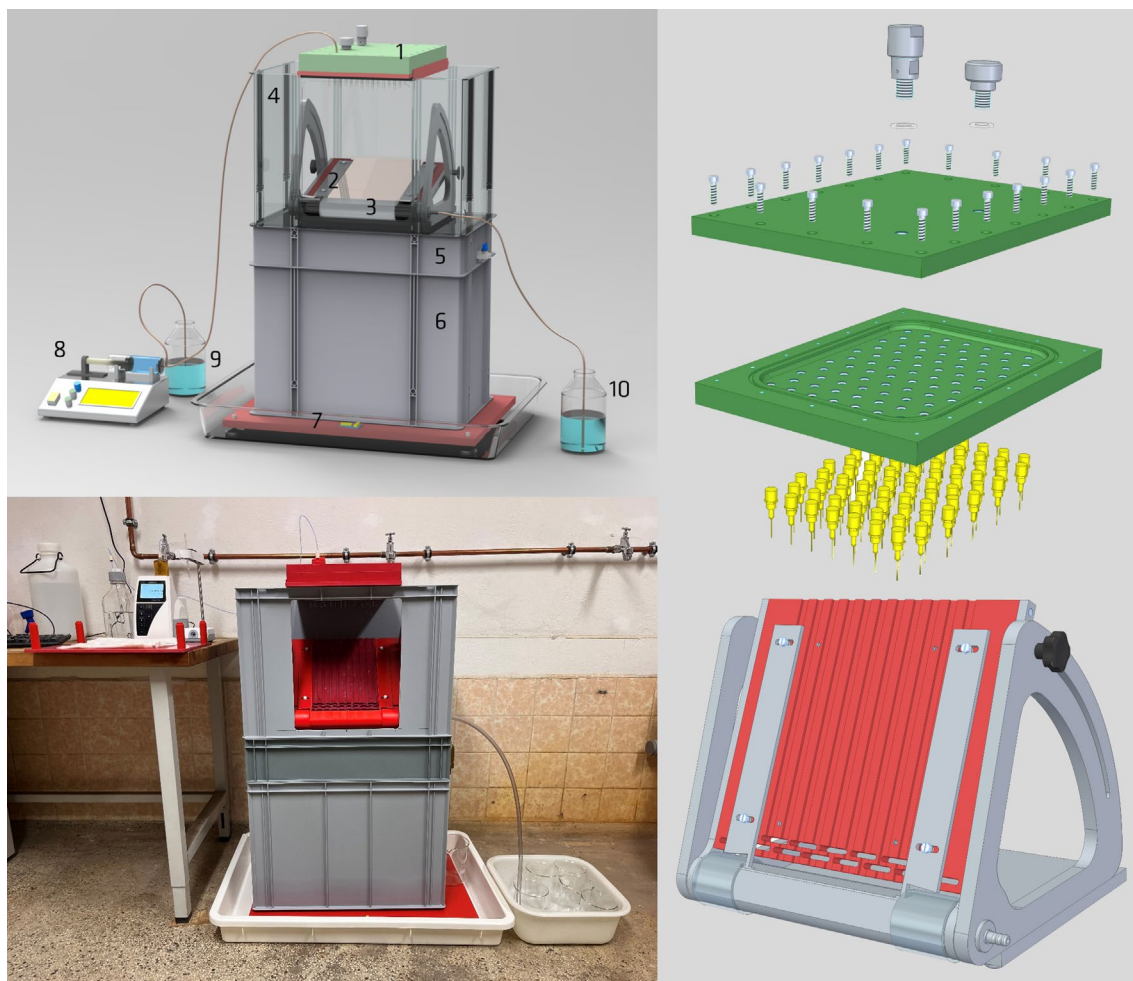
Konstruktion und Bau eines Niederschlagsmodells

Der Bau des BAM-Kapillarbregners geschah in der Zusammenarbeit mit Kollegen aus dem FB 6.1 *Oberflächenanalytik und Grenzflächenchemie* sowie aus dem FB 9.2 *Versuchsanlagen und Prüftechnik*. Dem Bau des Breggers ging eine intensive Recherche und Testreihe zu Tropfengenerierung und -größenverteilung

voraus. Getestet wurden Dosiernadeln (Braun Sterican) mit verschiedenen Nadelinnendurchmessern (0,4 mm, 0,45 mm, 0,8 mm, 0,9 mm) sowie unterschiedliche Pumpsysteme zur Erzeugung von sowohl schwachen als auch intensiven Niederschlagsereignissen. Erfolgsversprechende Zwischenergebnisse lieferten die Dosiernadeln mit einem Innendurchmesser von 0,4 mm sowie die Verwendung einer Kolbenburette (Titronic® 300 von Xylem Analytics Germany GmbH) als Druck- und Pumpsystem. Teil des Beregners ist ebenfalls der Probenständer mit neigbarer Auflagefläche (20-60°) sowie geeigneter Wasserablaufvorrichtung. Abbildung 14 zeigt eine technische Zeichnung des BAM-Beregners (links oben) sowie den Beregner nach Fertigstellung (links unten). Dieser besteht aus der Kapillar-Einheit mit insgesamt 77 x 0,4 mm konischen Dosiernadeln (1), dem Beregnergehäuse (4), dem Probenhalter (2) mit Schlauchverbindung zum Runoffsammler (10) und dem Pumpensystem (8). Auf metallene Werkstoffe wurde komplett verzichtet, um potenzielle Fehlerquellen bei den Analyseergebnissen auszuschließen.

Abbildung 14

BAM-designter Kapillarberegner (technische Zeichnung und Umsetzung): (1) Kapillar-Einheit, (2) winkelverstellbarer Probenhalter, (3) Runoffauffangsystem, (4) Beregnergehäuse, (5) Niederschlagsauffangbehälter mit Ablasshahn, (6) Eurobehälter, (7) Zentriertisch, (8) Pumpe, (9) künstliches Niederschlagswasser und (10) Runoffwasserbehälter.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Versuchsdurchführung

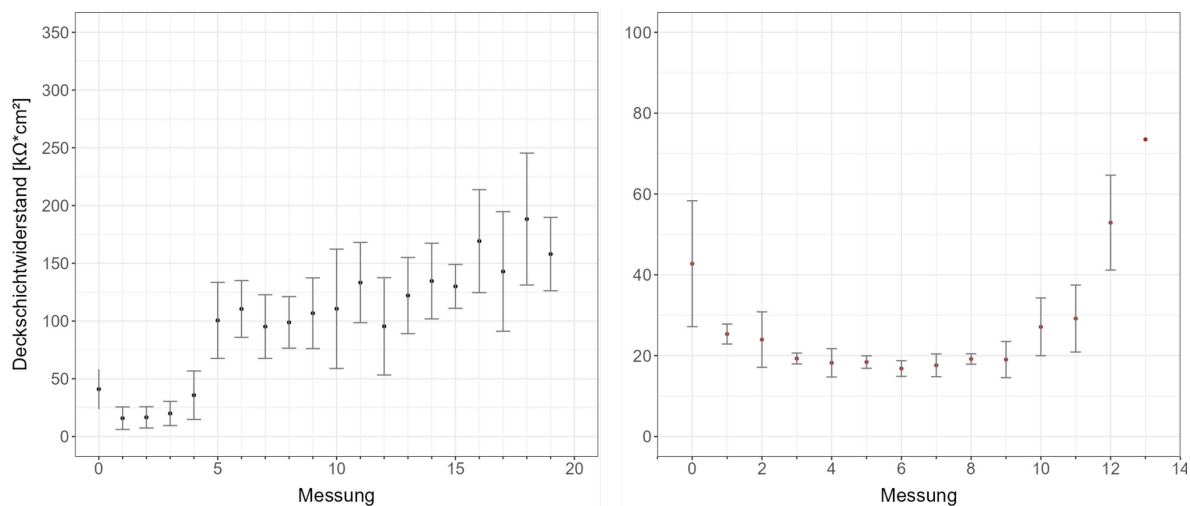
Bei den Laborversuchen wurden insgesamt drei Parameter und ihre Wechselwirkungen untersucht: Niederschlagsintensität (5, 10 und 20 mm), Neigungswinkel der Probe (20°, 45° und 60°) sowie pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers (4.5, 5.5 und 6.5). Die unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten entsprachen hierbei einem schwachen, mäßigen und starken Niederschlag. Detaillierte Informationen zu der

künstlichen Niederschlagszusammensetzung finden sich in Abschnitt AP3. Zu den untersuchenden Materialien gehörten wie bei den Feldversuchen blankes Titanzink, Kupfer und feuerverzinkter Stahl sowie künstlich vorpatinierte Zink- und Kupferproben.

Bisher gibt es keine festgelegten Richtlinien oder Normen für die künstliche Vorkonditionierung von Proben. Daher wurde für jedes Material (Zink, Kupfer) eine Versuchsreihe gestartet, um die künstliche Deckschichtbildung unter kontrollierten Bedingungen in der Klimakammer sowie SO₂-Kammer genauer zu untersuchen. Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Vorpatinierung findet sich im Unterkapitel *Vorpatinierung*. Die Veränderung des Deckschichtwiderstandes über die Zeit ist in Abbildung 15 zu sehen. Stabile Deckschichten sind erreicht, wenn der Deckschichtwiderstand bei Zink über 100 kΩ·cm² liegt. Für Kupfer liegen für das verwendete Verfahren mit Gel-Elektrolyten noch keine zuverlässigen Werte für stabile Deckschichten vor. Jedoch wurden an projektunabhängigen Kupferproben (Auslagerungsdauer: zwei Jahre, Standort: hochbelasteter Bereich) mit dem genannten Untersuchungsverfahren Deckschichtwiderstände von etwa 50 kΩ·cm² gemessen, sodass bei diesem Wert von stabilen Deckschichten ausgegangen werden kann.

Abbildung 15

Entwicklung der Deckschichtwiderstände für Zink (links) und Kupfer (rechts) bei künstlicher Bewitterung in der Klimakammer und SO₂-Kammer. Messung 0 bezeichnet Deckschichtwiderstände im Ausgangszustand.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Um eine effiziente Versuchsplanung zu gewährleisten, wurde für die Laborversuche zunächst eine statistische Versuchsplanung mithilfe von DoE (s. Unterkapitel Design of Experiment) durchgeführt. DoE wird für multifaktorielle Datenanalysen und zur Planung von Experimenten herangezogen. Dabei werden die klassischen Stadien der Versuchsplanung, Screening, Optimierung (RSM) und Validierung durchlaufen.

Der Parameterraum für die dargestellten Ergebnisse umfasst Runoffraten mit 20, 45 und 60° Neigung, mit pH-Werten von 4,5, 5,5 und 6,5 und Regenintensitäten von 5, 10 und 20 mm/h Niederschlagsöhe. Während eines Beregnungsprozesses erfolgt die Regenwasserentnahme nach 5, 10, 30 und 60 Minuten. Die Summation der analysierten Metallionenkonzentration für jeden Zeitraum entspricht der zeitlich basierten Runoffrate.

In den nachfolgenden Darstellungen sind die Ergebnisse des Design of Experiment grafisch dargestellt. Deutlich sind die Abhängigkeiten von Beregnungsdauer, Intensität, pH-Wert und Neigung zu erkennen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass sich Titanzink (Reinzink) fast identisch wie feuerverzinkter Stahl verhält.

In Tabelle 9 sind die DOE-Stützstellen dargestellt, für einen Werkstoff sind 108 Stützstellen untersucht worden, für alle durchgeführten Untersuchungen sind somit 756 Runoffanalysen erstellt worden.

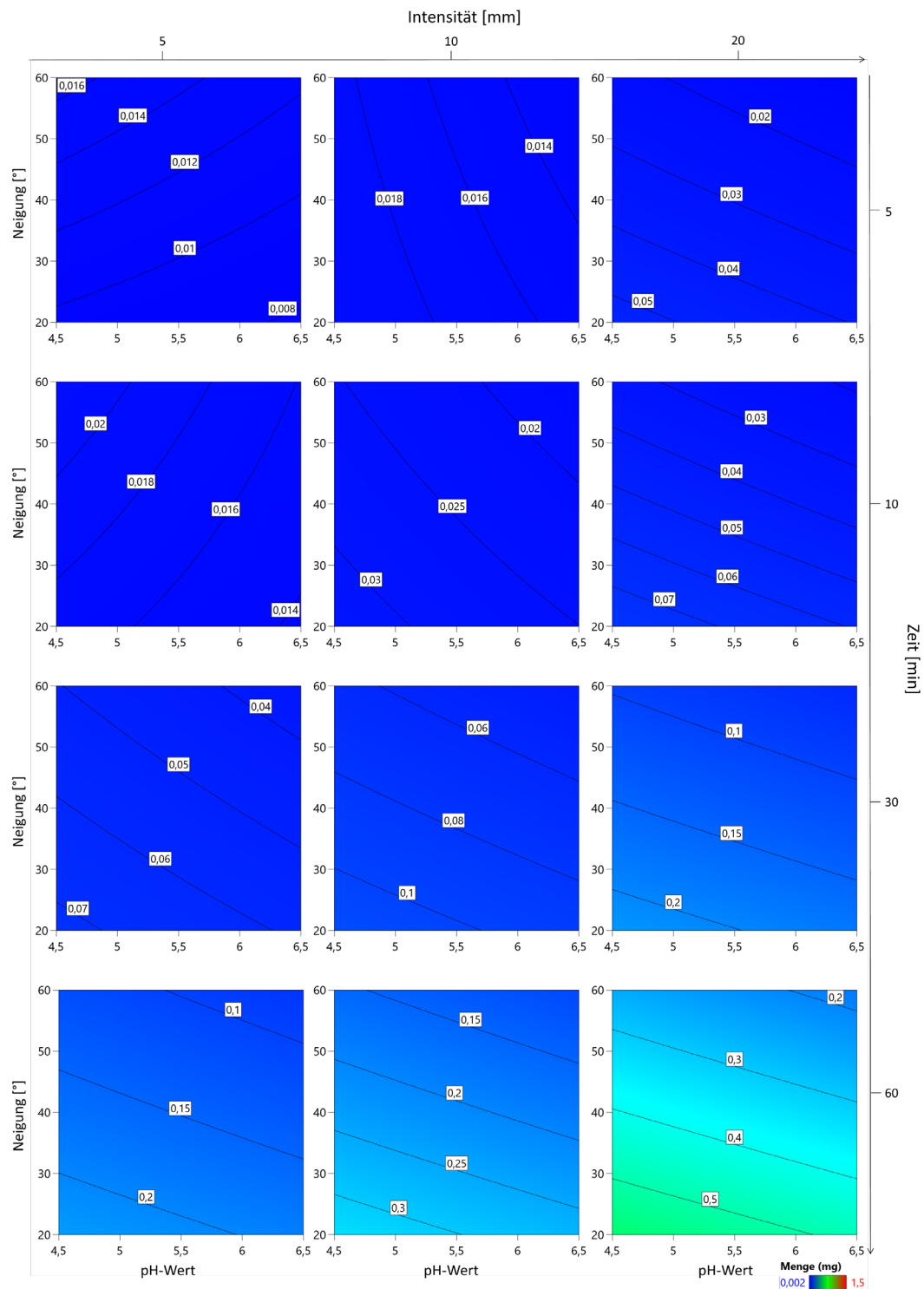
Tabelle 9: DOE- Stützstellen für alle untersuchten Werkstoffe und Variationen (Bewitterung)

Run			pH-Wert			Neigung in °	Intensität in mm/h	Beregnungsdauer in min.
1	37	73	4,5	5,5	6,5	20	20	5
2	38	74	4,5	5,5	6,5	20	20	10
3	39	75	4,5	5,5	6,5	20	20	30
4	40	76	4,5	5,5	6,5	20	20	60
5	41	77	4,5	5,5	6,5	20	5	5
6	42	78	4,5	5,5	6,5	20	5	10
7	43	79	4,5	5,5	6,5	20	5	30
8	44	80	4,5	5,5	6,5	20	5	60
9	45	81	4,5	5,5	6,5	60	5	5
10	46	82	4,5	5,5	6,5	60	5	10
11	47	83	4,5	5,5	6,5	60	5	30
12	48	84	4,5	5,5	6,5	60	5	60
13	49	85	4,5	5,5	6,5	45	20	5
14	50	86	4,5	5,5	6,5	45	20	10
15	51	87	4,5	5,5	6,5	45	20	30
16	52	88	4,5	5,5	6,5	45	20	60
17	53	89	4,5	5,5	6,5	45	5	5
18	54	90	4,5	5,5	6,5	45	5	10
19	55	91	4,5	5,5	6,5	45	5	30
20	56	92	4,5	5,5	6,5	45	5	60
21	57	93	4,5	5,5	6,5	45	10	5
22	58	94	4,5	5,5	6,5	45	10	10
23	59	95	4,5	5,5	6,5	45	10	30
24	60	96	4,5	5,5	6,5	45	10	60
25	61	97	4,5	5,5	6,5	60	10	5
26	62	98	4,5	5,5	6,5	60	10	10
27	63	99	4,5	5,5	6,5	60	10	30
28	64	100	4,5	5,5	6,5	60	10	60
29	65	101	4,5	5,5	6,5	60	20	5
30	66	102	4,5	5,5	6,5	60	20	10
31	67	103	4,5	5,5	6,5	60	20	30
32	68	104	4,5	5,5	6,5	60	20	60
33	69	105	4,5	5,5	6,5	20	10	5
34	70	106	4,5	5,5	6,5	20	10	10
35	71	107	4,5	5,5	6,5	20	10	30
36	72	108	4,5	5,5	6,5	20	10	60

Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 16

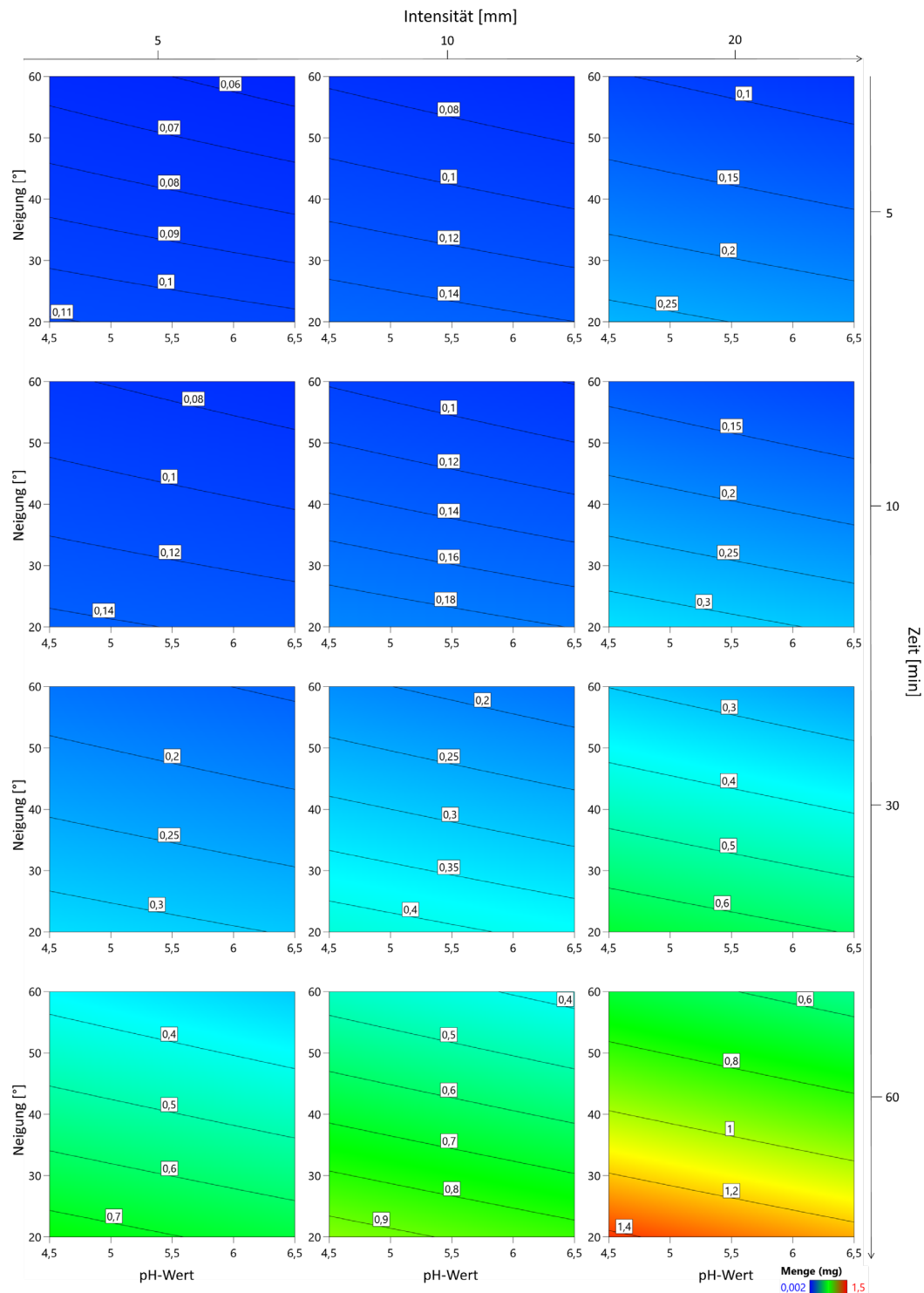
Abgespülte Zinkmenge [mg] von blanken Titanzink-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 17

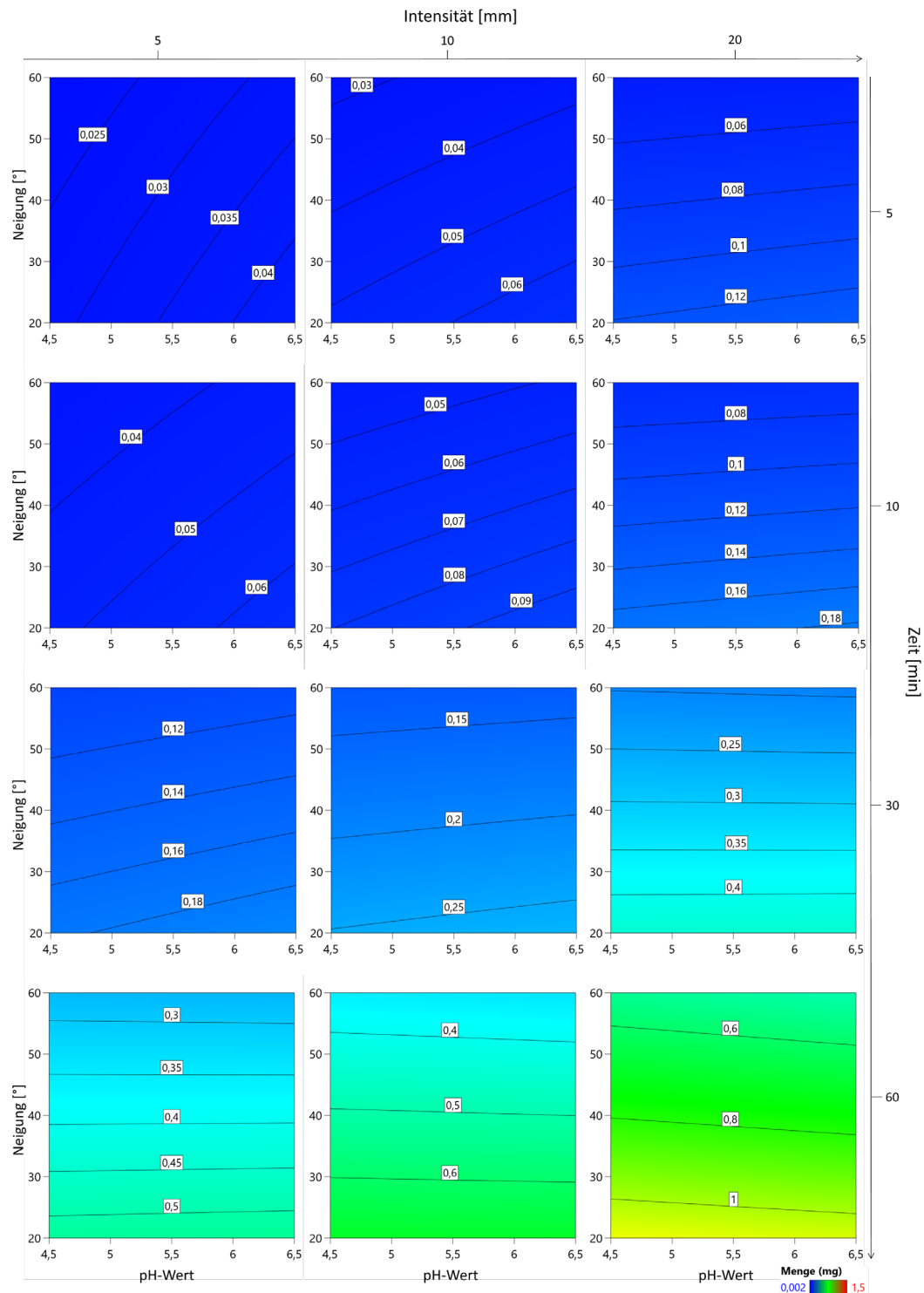
Abgespülte Zinkmenge [mg] von künstlich-bewitterten Titanzink-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 18

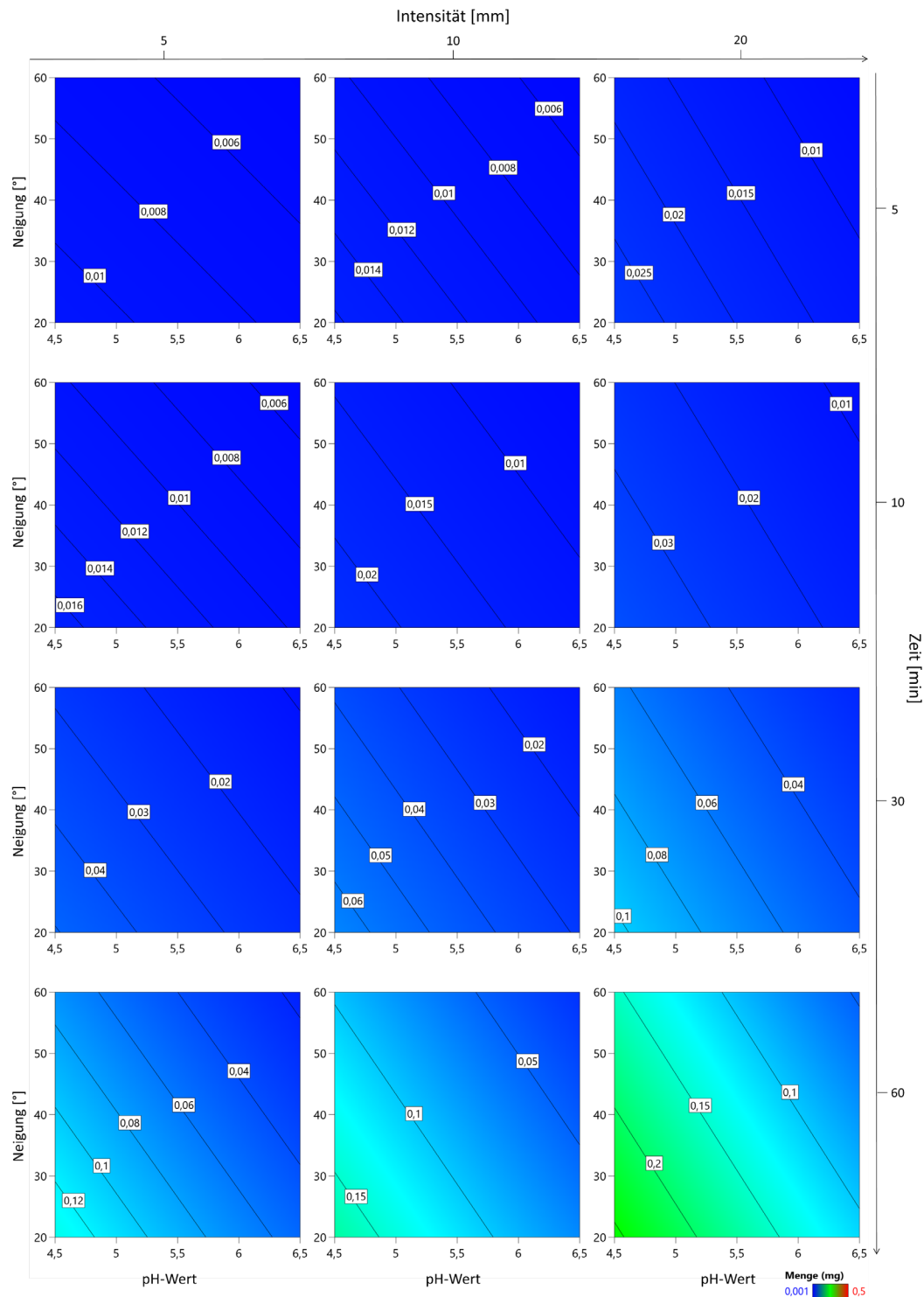
Abgespülte Zinkmenge [mg] von feuerverzinkten Stahl-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 19

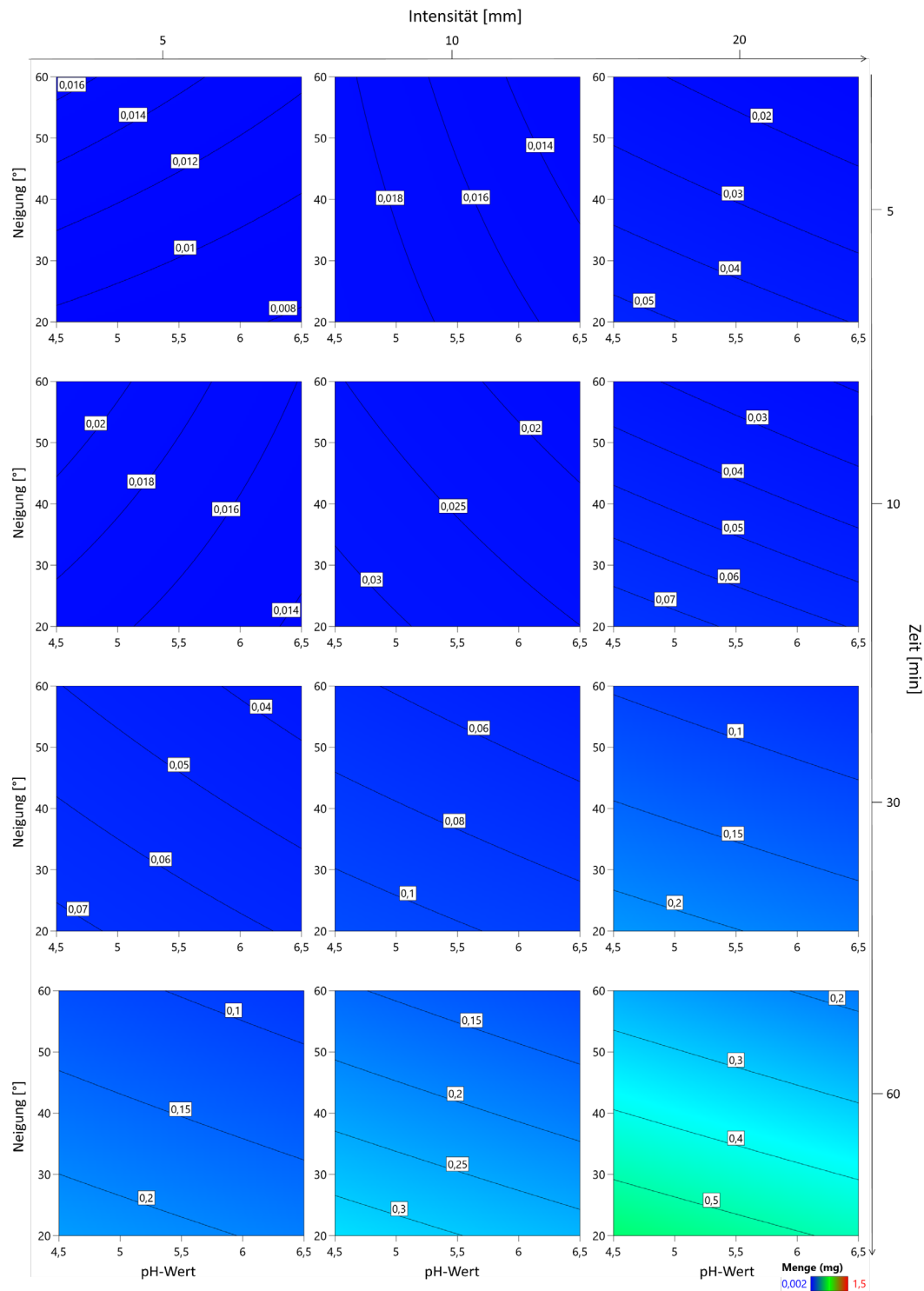
Abgespülte Kupfermenge [mg] von blanken Kupfer-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 20

Abgespülte Kupfermenge [mg] von künstlich-bewitterten Kupfer-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Arbeitspaket 6: Berechnungen zum Eintrag von Ionen in die Umwelt und zum Beitrag des Runoffs zum Schichtdickenverlust von Materialien im Bauwesen

Zur Ermittlung der Massenverluste wurden für jeden Bewitterungsstand jeweils drei der insgesamt 21 ausgelagerten Zink- und Kupfer-Proben im A6-Format nach definierten Zeitintervallen (1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 Monate) abgenommen. Gemäß den Vorgaben der ISO 8407:2021 wurden die entstandenen Korrosionsprodukte chemisch entfernt. Vor diesem Schritt wurde sichergestellt, dass die Proben frei von Verunreinigungen und Feuchtigkeit waren. Nach der Beizung wurden die Proben gründlich getrocknet und anschließend gewogen. Der Massenverlust wird durch die Differenz zwischen dem Gewicht der Probe nach der Beizung und dem Ausgangsgewicht berechnet. Aus den Massenverlusten lassen sich anschließend die Abtragsraten (Tabelle 10) berechnen. Die Abtragsraten der ersten sechs Monate wurden dabei auf ein Jahr extrapoliert, um den Verlauf der Korrosionsaktivität besser bewerten zu können. Nach einem Monat Auslagerung wurden für Zink Abtragsraten von 6,07 – 33,52 g/m²*a und für Kupfer von 25,91 – 38,57 g/m²*a erreicht, wobei jeweils die höchsten Werte am Standort TTS verzeichnet wurden, gefolgt von UE-B1 und BAM-Dach. Mit zunehmender Auslagerungszeit sinken die Abtragsraten und erreichen nach einer Auslagerung von 12 Monaten Werte zwischen 2,13 – 5,20 g/m²*a (Zink) und 4,04 – 8,98 g/m²*a (Kupfer). Geringste Abtragsraten für Zink werden hier am Standort BAM-Dach ermittelt, für Kupfer am Standort UE-B1. Aufgrund von einem kleineren Bestand an feuerverzinkten A6-Proben, wurden diese ausgelagert und für die Bestimmung des Massenverlustes erst nach einem Jahr abgenommen. Die Abtragsraten betragen hier 4,33 g/(m²*a) (UE-B1), 3,11 g/(m²*a) (BAM-Dach) und 6,22 g/(m²*a) (TTS).

Tabelle 10: Berechnete Abtragsraten für Zink und Kupfer

Proben	Bewitterungszeit (Monat)	Abtragsrate Zink [g/m ² *a]	Abtragsrate Kupfer [g/m ² *a]
UE-B1_01-03	1	14,28	28,15
UE-B1_04-06	2	7,86	10,92
UE-B1_07-09	3	5,69	33,50
UE-B1_10-12	4	4,66	23,43
UE-B1_13-15	5	4,14	11,30
UE-B1_16-18	6	3,80	6,63
UE-B1_19-21	12	3,18	4,03
BAM-Dach_01-03	1	6,07	25,91
BAM-Dach_04-06	2	3,35	9,36
BAM-Dach_07-09	3	2,51	40,94
BAM-Dach_10-12	4	2,31	31,37
BAM-Dach_13-15	5	1,86	24,51
BAM-Dach_16-18	6	1,55	20,98
BAM-Dach_19-21	12	2,13	8,98
TTS_01-03	1	33,52	38,57

Proben	Bewitterungszeit (Monat)	Abtragsrate Zink [g/m ² *a]	Abtragsrate Kupfer [g/m ² *a]
TTS_04-06	2	17,85	15,53
TTS_07-09	3	13,16	14,06
TTS_10-12	4	9,87	11,35
TTS_13-15	5	8,31	10,03
TTS_16-18	6	7,10	9,67
TTS_19-21	12	5,20	6,98

Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Runoffrate spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewertung und Überwachung der Umweltauswirkungen von Landnutzung und menschlichen Aktivitäten auf Gewässerökosysteme. Sie gibt an, wie viel eines bestimmten Schadstoffs oder Nährstoffs tatsächlich von einem bestimmten Gebiet in ein Gewässer abfließt, was direkte Einblicke in die Umweltbelastung ermöglicht. Durch die Analyse von Runoffraten können wir die Effektivität von Managementmaßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität bewerten und gezielte Interventionen entwickeln, um den Eintrag schädlicher Stoffe in Gewässer zu reduzieren. Somit dient die Runoffrate als wichtige Metrik für den Umweltschutz und die nachhaltige Bewirtschaftung von Wasserressourcen.

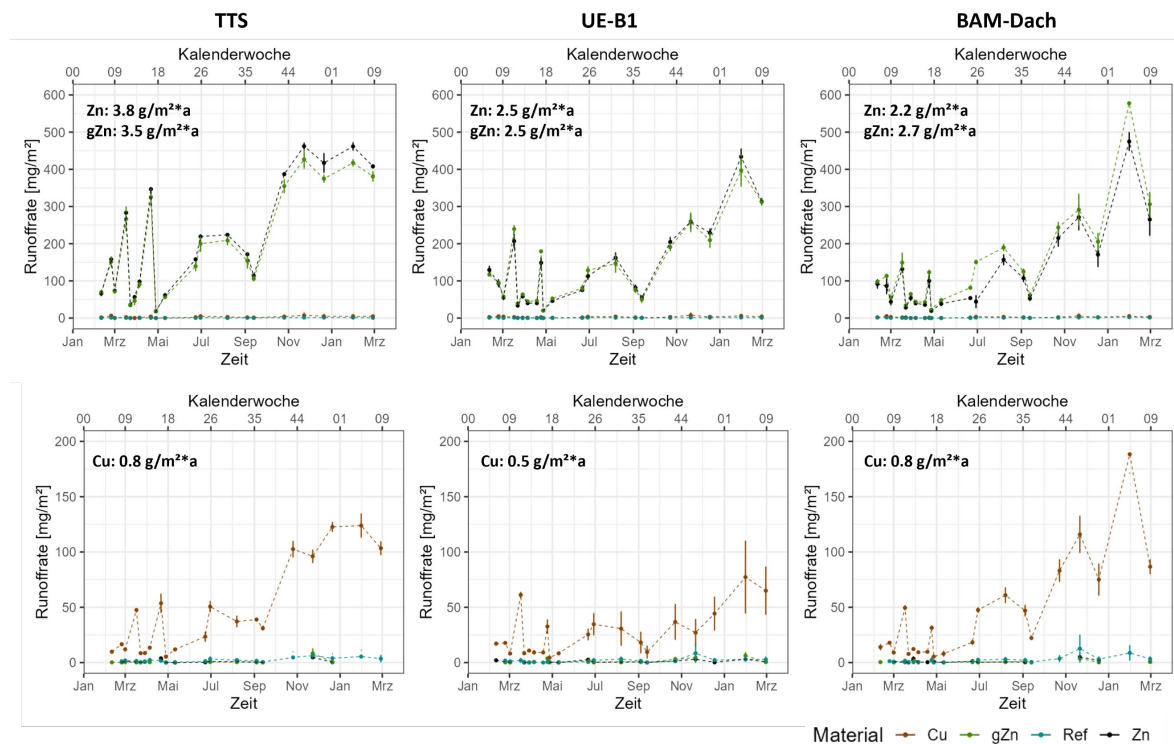
Die Runoffrate berechnet sich aus dem Produkt aus Konzentration und aufgefangene Wassermenge bezogen auf die Probenfläche.

In Abbildung 21 sind die Runoffraten bei Zink und Kupfer über den Auslagerungszeitraum schwankend. Über den Zeitraum von einem Jahr ergeben sich für Zink Runoffwerte zw. 10 und 450 mg/m², für Kupfer zwischen 5- 190 mg/m². Die Runoffraten ab Sept. 23 steigen signifikant an. Dies gilt sowohl für Zn als auch für Cu. Dies bestätigt bei Vergleich der Niederschlagsereignisse aus Abbildung 6 die These, dass mit steigender Anzahl an Niederschlagsereignissen und ähnlichen summativen Niederschlagsmengen die Runoffrate steigt und sich kein Verdünnungseffekt einstellt. Somit sind viele Regenereignisse mit geringen Intensitäten kritischer zu bewerten als vereinzelte Starkregenereignisse von kurzer Dauer.

Die über das 1. Jahr der Auslagerung gemittelte Runoffrate liegt für Zn und der Korrosivitätskategorie C2 (B1 und Dach) bei 2,35 mg/m²*a, für C3 (TTS) bei 3,8 mg/m²*a. Die Runoffraten für feuerverzinken Stahl unterscheiden sich nur marginal. Für Kupfer gibt es im ersten Jahr der Auslagerung keine Korrelation mit der Korrosivität am jeweiligen Standort, die Runoffrate beträgt 0,5 bis 0,8 mg/m²*a.

Abbildung 21

Berechnete Runoffraten für Zink (Zn), feuerverzinkten Stahl (gZn) sowie Kupfer (Cu) für den Bewitterungszeitraum von Ende Januar 2023 bis Ende Februar 2024. Berechnete jährliche Runoffraten für den Zeitraum bis Ende Januar 2024.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

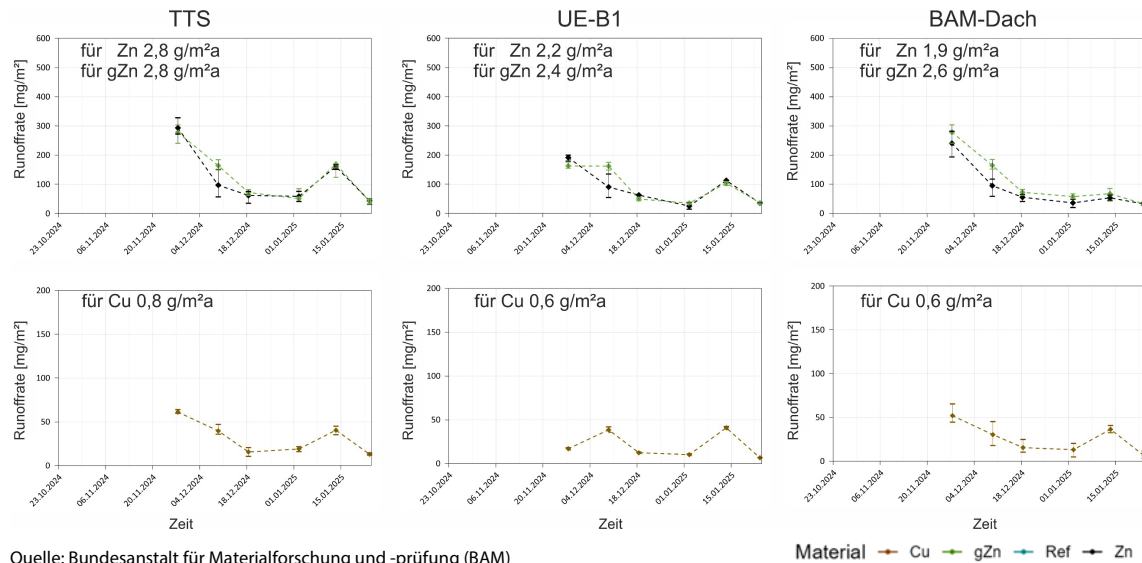
Arbeitspaket 7: Synthese der Ergebnisse aus Labor- und Felduntersuchungen zur Einschätzung des Einflusses von Runoff im Bauwesen

Die Arbeiten für dieses Arbeitspaket erfolgten ein Jahr nach Beendigung des Vorhabens. Hierfür wurden bewitterte Proben nach ausreichender Auslagerungsdauer im Labor untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Bleche der Auslagerungsstände BAM-Dach und UE-B1 wechselnd demontiert und die DOE-basierte Messprozedur im Regensimulator mit natürlich gewachsenen Deckschichten wiederholt. Bevor die Proben den Untersuchungen im Regensimulator unterzogen wurden, erfolgte die Bestimmung der Runoffraten unter natürlicher Exposition. Hierzu wurden Regenwasseranalysen von 6 Entnahmezeitpunkten über einen Zeitraum von 2,5 Monaten durchgeführt.

Im Vergleich zu den vorherigen im ersten Jahr ermittelten Runoffraten konnten nach zwei Jahren Auslagerungszeit, über einen Betrachtungszeitraum von 2,5 Monaten Runoffraten extrapoliert werden, die etwas geringer sind als die zuvor ermittelten, siehe Abbildung 22.

Abbildung 22

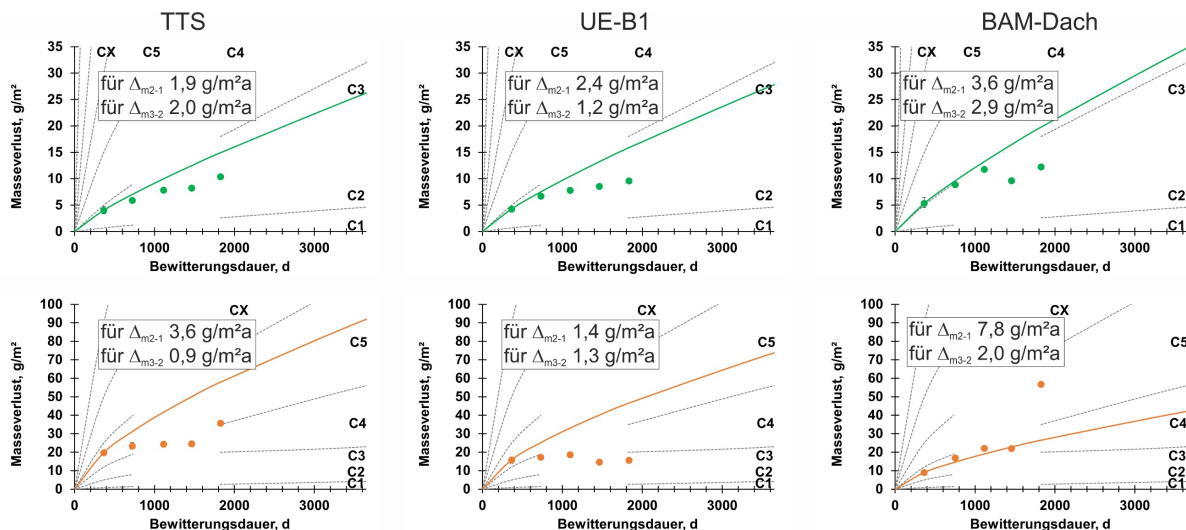
Berechnete Runoffraten für Zink (Zn), feuerverzinkten Stahl (gZn) sowie Kupfer (Cu) für den Bewitterungszeitraum von Ende Oktober 2024 bis Ende Januar 2025. Berechnete jährliche Runoffraten für den Zeitraum bis Mitte Februar 2025



Da die Bewitterungsstände bereits über einen langen Zeitraum an der BAM betreut werden, gibt es Erkenntnisse zu den Korrosionsraten der Werkstoffe Zink und Kupfer. Auch hier ist ein signifikantes Delta der Korrosionsgeschwindigkeit nach dem ersten Jahr der Auslagerung und nach dem zweiten Jahr der Auslagerung feststellbar, siehe Abbildung 23. Die Korrosionsgeschwindigkeit geht infolge Deckschichtbildung über die Auslagerungsdauer zurück. Dies gilt sowohl für Zink als auch für Kupfer. In der folgenden Abbildung sind die Verlaufsgebiete der Korrosivitätskategorien C1 bis CX aus DIN EN ISO 9224 dargestellt.

Abbildung 23

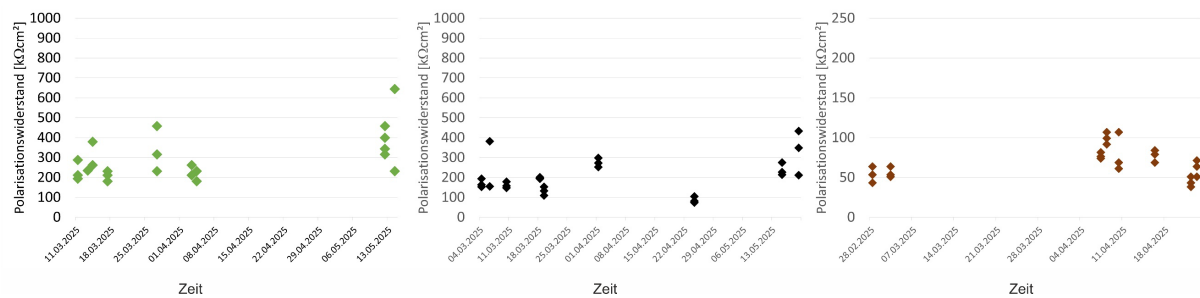
Ermittelte Abtragsraten für Zink (Zn) sowie Kupfer (Cu) aus bestehenden Daten der BAM.



Bevor die natürlich bewitterten Proben für die Durchführung der DOE im Regensimulator bewittert wurden, erfolgte die Bestimmung des Polarisationswiderstands. Die Deckschichtbildung und -ausbildung des Polarisationswiderstandes der feuerverzinkten Stahlproben unterscheiden sich nicht signifikant von denen der Zinkproben. Die Kupferproben hingegen weisen geringere Polarisationswiderstände mit geringerer Streuung der Mittelwerte auf.

Abbildung 24

Polarisationswiderstände für Zink (Zn), feuerverzinkten Stahl (gZn) sowie Kupfer (Cu), Probenalter zu Beginn: 2 Jahre (freie Bewitterung).



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

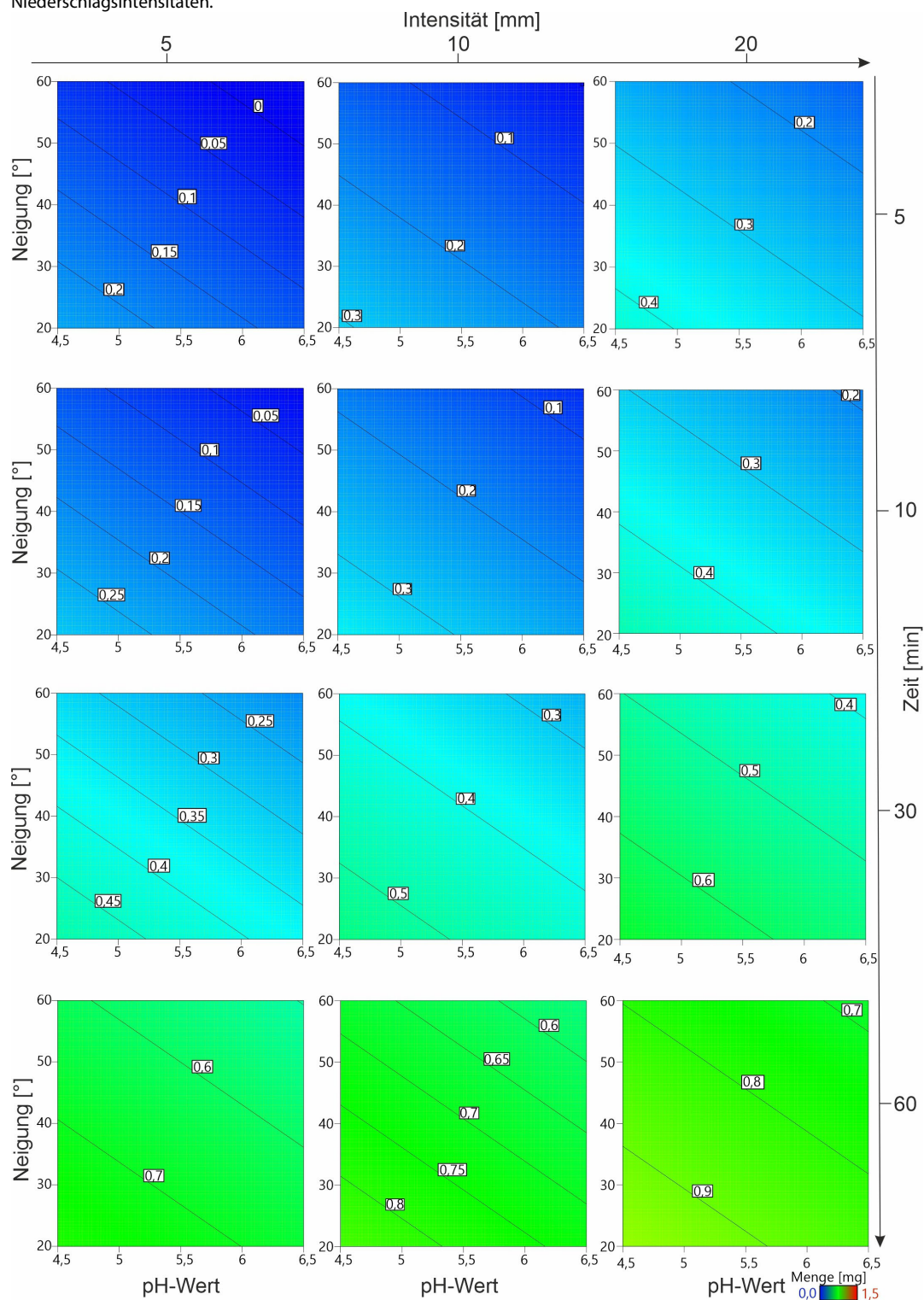
Nach Ermittlung der Polarisationswiderstände erfolgte die Ermittlung der Runoffraten im Regensimulator. Hier mit dem selben Parameterraum wie für die zuvor dargestellten Ergebnisse: Untersucht wurden Runoffraten mit 20, 45 und 60° Neigung, mit pH-Werten von 4,5, 5,5 und 6,5 und Regenintensitäten von 5, 10 und 20 mm/h Niederschlagshöhe. Während eines Berechnungsprozesses erfolgt die Regenwasserentnahme nach 5, 10, 30 und 60 Minuten. Die Summation der analysierten Metallionenkonzentration für jeden Zeitraum entspricht der zeitlich basierten Runoffrate.

In den nachfolgenden Darstellungen sind die Ergebnisse der Modelbildung aus dem Design of Experiment grafisch dargestellt. Deutlich sind die Abhängigkeiten von Berechnungsdauer, Intensität, pH-Wert und Neigung zu erkennen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass sich Titanzink (Reinzink) fast identisch wie feuerverzinkter Stahl verhält. Die Runoffraten sind somit, nach einer zweijährigen Auslagerungsdauer, als äquivalent anzusehen.

Einen Vergleich zu Kupferwerkstoffen kann nicht gebildet werden, hier wird auf die signifikante Differenz zwischen anfänglicher Korrosionsrate und Korrosionsfortschritt bzw. Runoffrate in der Ergebnisdiskussion eingegangen.

Abbildung 25

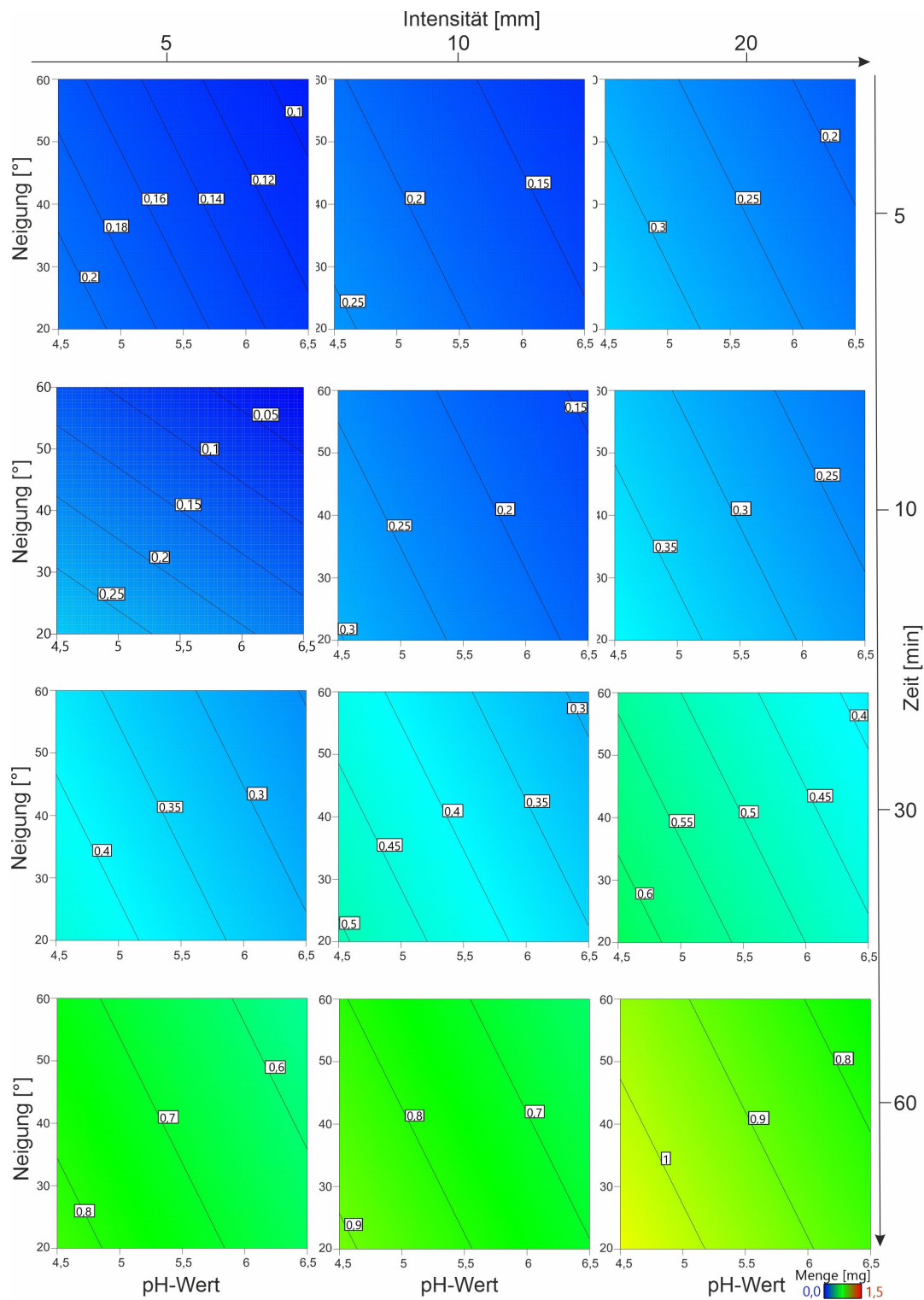
Abgespülte Zinkmenge [mg] von Titanzinkblechen mit natürlich gewachsener Deckschicht nach zweijähriger Auslagerung in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 26

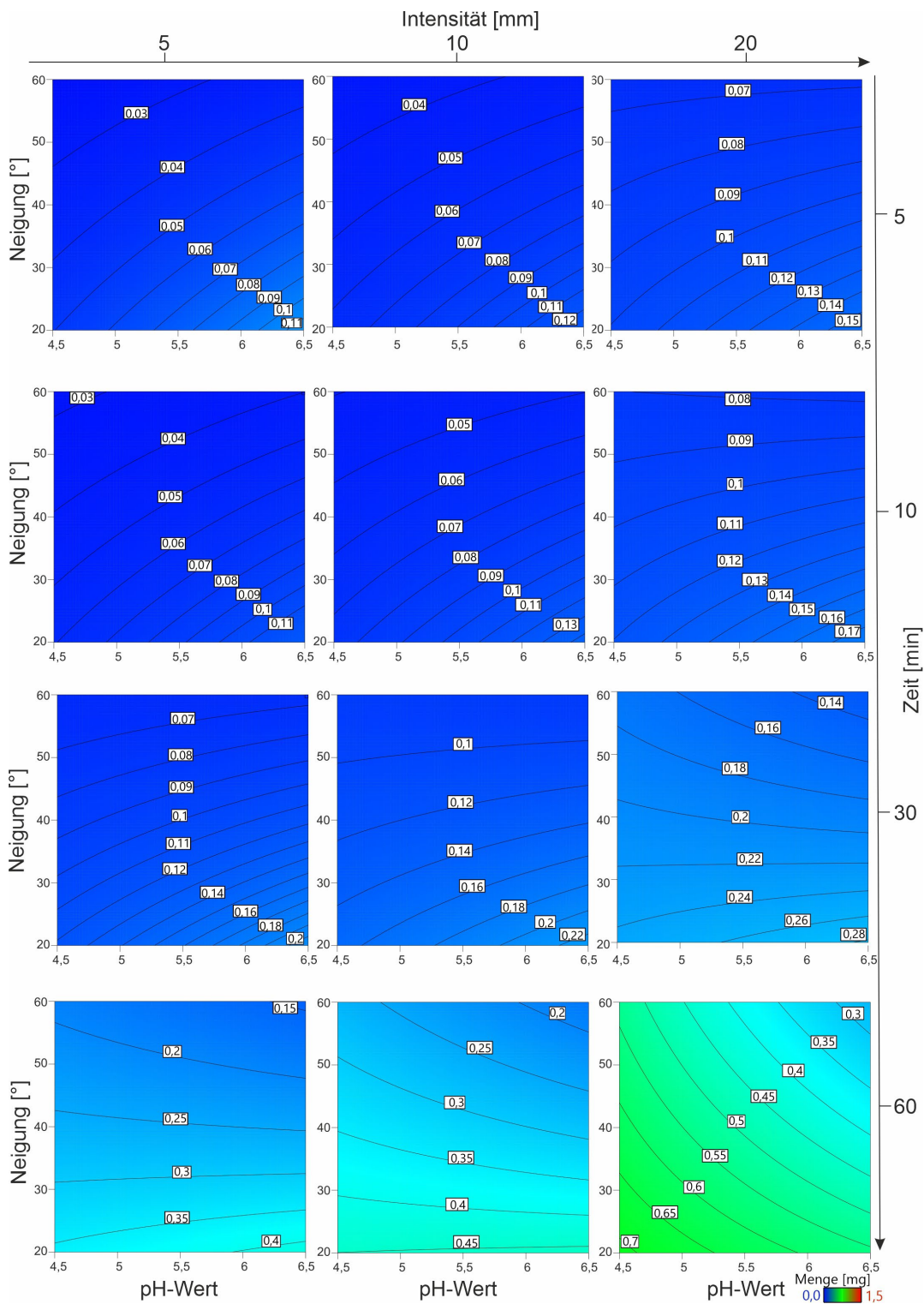
Abgespülte Zinkmenge [mg] von feuerverzinkten Stahlblechen mit natürlich gewachsener Deckschicht nach zweijähriger Auslagerung in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 27

Abgespülte Kupfermenge [mg] von Kupferblechen mit natürlich gewachsener Deckschicht nach zweijähriger Auslagerung in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Arbeitspaket 8: Erstellung des Abschlussberichtes und Publikation der Ergebnisse an geeigneter Stelle

Das Forschungsvorhaben RUNOFF sowie Zwischenergebnisse wurde auf folgenden **externen** Veranstaltungen vorgestellt (chronologisch sortiert):

- 19. Projekttag der Bauforschung (22.-24.03.2022): Projektvorstellung RUNOFF; online
- Klempnerfachtagung (11.-12.10.2022): Forschungsvorhaben RUNOFF – Vorhaben und aktueller Stand; Karlstadt am Main
- 24. Projekttag der Bauforschung (13.-14.06.2023): Neubewertung der Dauerhaftigkeit von Dach- und Fassadenmaterialien und des Eintrags von Schwermetallionen in die Umwelt hervorgerufen durch Runoff; Bonn
- EUROCORR 2023 (27.-31.08.2023): Design and construction of a rainfall simulator to test metal runoff at atmospheric conditions; Brüssel, Belgien
- GAV-Forschungskolloquium (16.-17.-10.2023): Aktueller Forschungsstand RUNOFF: Neubewertung von metallenen Dach- und Fassadenmaterialien unter Dauerhaftigkeits- und Umweltaspekten; online
- gfkorr-AK Korrosionsuntersuchung und -überprüfung (04.12.2023): Runoff-Messungen zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit von Materialien und des Eintrags von Schwermetallionen in die Umwelt, online
- Baumetalle Kupfer Zink (05.12.2023): Forschungsvorhaben RUNOFF: Aktueller Projektstand, online
- gfkorr-AK Kupfer und Korrosionsschutz von Kupfer und Kupferlegierungen (14.12.2023): Forschungsvorhaben RUNOFF: Aktueller Projektstand, online
- 20. Deutscher Klempnertag (23.-24.01.2024): Forschungsvorhaben RUNOFF, Ulm

Das Forschungsvorhaben RUNOFF sowie Zwischenergebnisse wurde auf folgenden **BAM-internen** Veranstaltungen vorgestellt (chronologisch sortiert):

- Themenfeldtag Infrastruktur (14.03.2023): Effect of precipitation on runoff rates of zinc and copper; Poster
- Themenfeldtag Umwelt (14.03.2024): Runoff rates from zinc and copper are influenced by R_{PL} and corrosion rates; Poster

Die Veröffentlichung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens RUNOFF in geeigneten nationalen und/oder internationalen Journalen ist geplant. Zusätzlich wurde ein Vortragsbeitrag bei der EUROCORR 2024 (01.-05.09.2024, Paris, Frankreich) mit dem Titel *Atmospheric corrosion and runoff of zinc and copper – A field and laboratory study* gehalten.

Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Da es sich bei dem Projekt um eine ergebnisoffene Grundlagenforschung handelte, war der genaue Probenumfang, insbesondere für die Laboruntersuchungen, zu Projektbeginn schwer abzuschätzen. Zu dem beschriebenen Testmaterial (s. Beschreibung Arbeitspaket 1), bestand die Idee, Dachrinnen aus Titanzink und Kupfer zu untersuchen für einen zusätzlichen Kenntnissgewinn zum Runoffprozess authentischer Probenformen. Dies ließ sich aufgrund der undefinierten Oberflächen-Elektrolyt-Interaktion jedoch in keiner Weise quantifizieren. Außerdem wurden verschiedene Kupfervariationen von KME Germany GmbH sowie ein mindestens zehn Jahre alte feuerverzinkte Tür vom Institut Feuerverzinken GmbH als zusätzliches Testmaterial zur Verfügung gestellt. Die Untersuchung der o.g. Probenformen und -varianten musste verworfen werden.

Ergebnisse

Die während der Projektlaufzeit ermittelten Ergebnisse zeigten für die Materialien Zink und feuerverzinkter Stahl, entgegen der aktuellen Erkenntnisse, dass die Deckschichtbildung nicht nach einem Jahr abgeschlossen ist. Dies hat uns veranlasst, die Schlussberichterstellung signifikant zu verschieben und die Untersuchungen zielführend in geringerem Umfang von November 2024 bis Februar 2025 weiterzuführen.

Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis

Die Ergebnisse aus den Bewitterungsversuchen und der Ermittlung der Runoffrate haben gezeigt, dass Korrosionsrate und Runoffrate binnen des ersten Jahres nicht korrelieren. Die ermittelten Masseverluste sind wesentlich höher als die Summation der Metallionen in den aufgefangenen Regenwässern. Dies ist mit der fortschreitenden Deckschichtbildung zu erklären, die sich auch in der mit zunehmendem Probenalter geringer werdenden extrapolierten Masseverluste (bezogen auf eine Jahr Auslagerungsdauer) widerspiegelt. Die ab September 23 stark zunehmenden Runoffraten sind auf die Änderung der Anzahl der Regenereignisse und deren Intensität zurückzuführen. Ist die Regenmenge gleichbleibend und steigt die Anzahl der Regenereignisse, so geht die Intensität zurück und die Runoffrate steigt.

Die mittels XRD festgestellten Deckschichtzusammensetzungen suggerieren an Zinkproben eine karbonatische Deckschicht, die bereits nach einem Monat nachgewiesen werden konnte. An den Proben aus Kupfer konnten Kupferoxide und -hydroxide nachgewiesen werden, die Bildung von Kupfercarbonat-sulfathaltigen Korrosionsprodukten konnte nicht nachgewiesen werden. Dennoch sagt das Vorhandensein der Korrosionsproduktzusammensetzung nichts über die flächige Verteilung und Dichte der Deckschichten aus. Auch die starken Schwankungen bei den ermittelten Polarisationswiderständen weisen auf eine sehr inhomogene Deckschichtzusammensetzung hin, hinzu kommt, dass die Feuchteverteilung innerhalb der Deckschichten einen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Widerstände haben kann, dies jedoch nicht verifiziert werden kann. Die ermittelten Polarisationswiderstände nach zwei Jahren liegen für Zink und feuerverzinkten Stahl im Mittel bei ca. 200 k Ω , für Kupferproben bei ca. 50 k Ω . Diese Ergebnisse decken sich mit den beschleunigt gebildeten Deckschichten aus den Bewitterungsversuchen.

Beim Vergleich der Ergebnisse aus den DOE gestützten Runoffversuchen mit dem Regensimulator zeigt sich jedoch, dass die künstlich gebildeten Deckschichten unter hoher Luftfeuchte deutlich höhere wasserlösliche Deckschichtbestandteile gebildet haben, die bei hohen Regenintensitäten vermehrt in Lösung gehen. Die ohne kontinuierliche Beregnung gebildeten Deckschichten konnten massiver aufwachsen und sich akkumulieren. Im Rahmen der DOE-Versuche sind somit signifikant für hohe Intensitäten höhere Runoffraten für künstlich bewitterte Proben ermittelt worden, was der Vergleich mit den Ergebnissen mit den zwei Jahre alten, frei bewitterten Proben zeigt, am Beispiel Zink lagen diese bei 1,4 mg vs. 0,9 mg bei 4,5/20/20/60 (pH/Neigung/Intensität/Dauer). Für die Bewertung der Proben mit Kupfer kann festgehalten werden, dass die künstliche Alterung ähnliche Ergebnisse generiert hat, wie sie an Proben, die zwei Jahre frei bewittert wurden, festgestellt wurden.

Dieser Mechanismus lässt sich aus den Interpolationen der DOE-basierten Beregnungsversuche im Labor ganz klar widerspiegeln. Der Unterschied für Zn bei einer Beregnungsdauer von 60 Minuten für vorbewitterte Proben und einer Intensität von 5 (0,7 mg/h_{pH4,5}) bzw. 20 mm/h (1,4 mg/h_{pH4,5}) ist gering. Rechnet man das auf gleiche Niederschlagsmengen um, so ergeben sich 2,8 mg (5mm/4h) und 1,4 mg (20mm/h). Das beschreibt die Differenzen bei den Freibewitterungsversuchen sehr gut. Bezogen auf die Regenwasserkontamination ist dies bei Starkregenereignissen (pro Liter) geringer als bei Regenereignissen mit geringerer Intensität.

Die Unterschiede werden bei Betrachtung der Runoffraten an Proben mit natürlich gewachsenen Deckschichten nach zwei Jahren noch deutlicher, hier konnten die DOE-basierten Beregnungsversuche an natürlich bewitterten Proben durchgeführt werden: für Zn ergeben sich bei einer Intensität von 5 (0,75

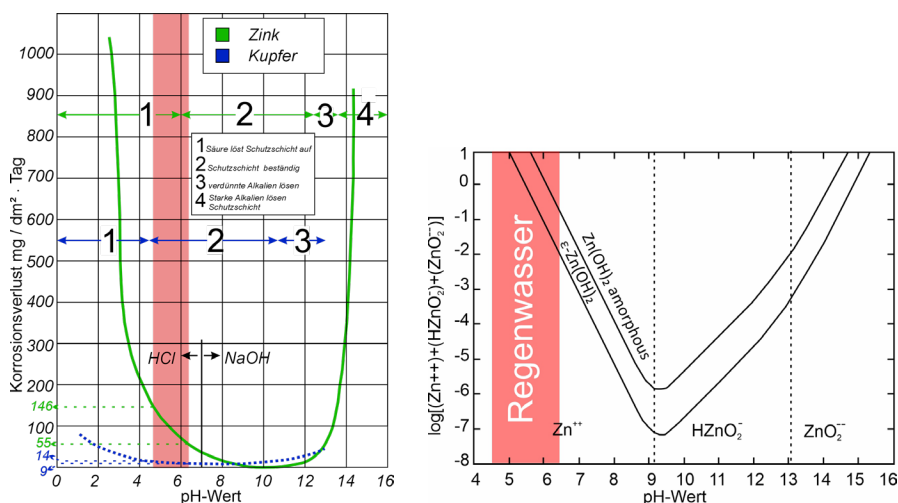
mg/h_{pH4,5}) bzw. 20 mm/h (0,95 mg/h_{pH4,5}), was bei gleicher Regenmenge zu Runoffraten für 5mm/4h von 3 mg führt und bei 20mm/h 0,95 mg Runoff generiert wird. Die Runoffrate steigt bei gleichbleibender Regenmenge und sinkender Intensität. Somit ist die Time of Wetness (TOW) maßgebend für den Runoff.

Beim Vergleich der ermittelten Masseverluste zwischen dem zweiten und dritten Jahr zuvor ausgelagerter Proben wird deutlich, dass die Runoffraten ziemlich genau den fortschreitenden Korrosionsraten entsprechen. Dies basiert, wie auch bei Ebell [22] beschrieben, auf der maßgebenden Gleichgewichtsbedingung von Zinkionen, um eine stabile Deckschicht zu gewährleisten. Mit zunehmendem Flächenanteilen nicht wasserlöslichen Deckschichtbestandteilen, wie Zinkkarbonatschichten, reduziert sich auch die Runoffrate. Basierend auf diesen Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass auch nach einer Bewitterungszeit von zwei Jahren noch kein vollflächige Deckschichtausbildung mit schlecht wasserlöslichen Karbonatschichten gegeben ist.

Bewertung/Diskussion/Zielerreichung – Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext inkl. möglicherweise bekannt gewordenen Ergebnissen von dritter Seite

Im Rahmen der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Runoffrate an metallenen Werkstoffen wie Zink oder Kupfer nach Ausbildung einer Deckschicht nicht durch Korrosionsprozesse maßgebend beeinflusst wird sondern durch Herauslösen von Metallionen aus den jeweiligen Deckschichten. Da die Deckschichtstabilität maßgeblich von der Metallionenkonzentration abhängig ist, erfolgt nach dem Runoffprozess ein Korrosionsereignis, das erneut Metallionen freisetzt, um die Gleichgewichtskonzentration wieder herzustellen. Am Beispiel für Zink ist die Deckschichtstabilität und die dafür benötigte Zinkionenkonzentrationen signifikant abhängig vom pH-Wert, somit steigen die Korrosions- als auch die Runoffraten mit sinkendem pH-Wert in den für Regenwasser heutzutage relevanten Bereichen. In den nachfolgenden literaturbasierten Darstellungen wird sowohl die Auflösekinetik für Zink und Kupfer in Abhängigkeit des pH-Werts von Regenwasser dargestellt. Die Zinkionenkonzentration, die benötigt wird, um eine stabile Deckschicht aus Zinkhydroxid aufrecht zu erhalten ist ebenfalls dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit pH-Werten um 4,5 signifikant höhere Korrosionsraten, gegenüber einem pH-Wert von 6,5, erzielt werden können und zeitgleich eine wesentlich höhere Zinkionenkonzentration benötigt wird. Der Unterschied der benötigten Zinkionenkonzentration für eine stabile Deckschicht zwischen pH 4,5 und 6,5 beträgt ca. 4 Dekaden. Für Kupfer ist dieser Unterschied nicht so signifikant, was sich an der Korrosionsrate im pH-Wertbereich ableiten lässt.

Abbildung 28 Links ist die sogenannte Badewannenkurve nach Roetheli et al. dargestellt, die die Auflösekinetik von ZnOH₂ und CuOH₂ in Abhängigkeit des pH-Werts als Masseverlust infolge Korrosion darstellt, rechts ist die Zinkionenkonzentration nach Fulton und Swineheart dargestellt, die in Abhängigkeit des pH-Wertes eine stabile ZnOH₂-basierte Deckschicht gewährleistet



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Diese Erkenntnisse spiegeln sich in den Ergebnissen der Berechnungsversuche eindeutig wider. Wie zuvor erörtert hat die Probenneigung also z.B. Dachneigung einen signifikanten Einfluss auf die Benetzungsdauer mit Wasser. Ebenso die Regenintensität, starke Regenereignisse haben die Erstlöslichkeit und über die Zeit sinkende Abschwemmraten, wiederkehrende Regenereignisse mit geringeren Intensitäten bringen bei gleicher Regenmenge erheblich längere Befeuchtungsdauern mit sich, die signifikant mehr Deckschichtreduktion mit sich bringen und daraus resultierend höhere Runoffraten.

Wissenschaftliche Abschlussfähigkeit/Fazit

Basierend auf den in diesem Vorhaben erzielten Erkenntnissen ist die Aussage, im Gegensatz zum ursprünglichen Ansatz dieses Vorhabens, das es möglich ist, keinen Vergleich der Runoffraten mit den Korrosionsraten aus vorhergehenden Untersuchungen zu validieren, generalisiert nicht richtig. Im ersten Jahr der Auslagerung stimmt die Aussage, Runoff und Korrosionsrate stimmen nicht überein, das haben die Untersuchungen von Masseverlust und Korrosionsraten im ersten Jahr der Auslagerung belegt. Ab dem zweiten Jahr, auch wenn die Deckschichtbildung noch nicht abgeschlossen ist, behält diese Aussage jedoch keine Gültigkeit mehr. Die im Rahmen der langjährigen Untersuchungen an den verwendeten Auslagerungsständen erzielten Ergebnisse zu fortschreitenden Masseverlusten zeigen, dass nach zwei Jahren Runoffraten und ermittelte Korrosionsraten nahezu übereinstimmen. Gemäß den in Abbildung 28 dargestellten Zusammenhängen, ist die Korrosionsrate nach Deckschichtbildung ein dem Runoff nachgelagerter Prozess, um die Zinkionenverluste aus Abschwemmprozessen der Deckschicht auszugleichen und eine günstige Gleichgewichtsbedingung wiederherzustellen. Wichtig ist hierbei, dass die prognostizierten Korrosionsraten gem. ISO 9224 nicht anwendbar sind.

Die im Rahmen langjährigen an der BAM durchgeführter Messkampagnen ermittelten Masseverluste ermöglichen es, aus den Korrosionsraten über einen Auslagerungszeitraum von 5 Jahren, mittels logarithmischer Regression Runoffraten prognostizieren zu können. Diese können mit den in Abbildung 29 und Abbildung 30 hinterlegten Formeln berechnet werden. Es ist zu beachten, dass die Ermittlung der Runoffrate für das dritte Jahr der Auslagerung und folgende, wie folgt berechnet wird.

$$Runoff(3.Jahr) = (a * \ln(x_2) - b) - (a * \ln(x_1) - b) \frac{g}{m^2 * a} \quad (2)$$

Dabei ist x_2 die Anzahl der Tage für drei Jahre also 1.095 Tage und für x_1 ist die Anzahl der Tage für 2 Jahre also 730 Tage. Die Variablen a und b sind als Zahlenwerte der Abbildung 29 und Abbildung 30 zu entnehmen.

Darüber hinaus können anhand der Modellbildung aus dem Berechnungssimulator Korrosionsraten ermittelt werden. Für das Jahr 2023-24 wurden im Summe 790 mm Niederschlag ermittelt, dabei ist die Intensität nicht bewertet worden. Ausgehend von der geringsten im Model hinterlegten Intensität kann nach 60 Minuten Berechnungsdauer und mit Bezug auf den mittleren pH-Wert von 5,5 sowie eine Neigung von 45° eine Korrosionsrate berechnet werden. Dabei sind die Runoffraten aus dem Berechnungssimulator auf eine Fläche von 21 x 29,7 mm bezogen.

Berechnungsdauer bei Intensität 5 mm/h und 790mm/a = 158 h/a

Runoffrate 5mm/h (60 min Berechnungszeit) und 45° sowie pH 5,5 für Zn = 0,65 mg/h

Umrechnungsfaktor auf 1 m² = 16,03 m⁻²

Runoffrate aus Modelbildung

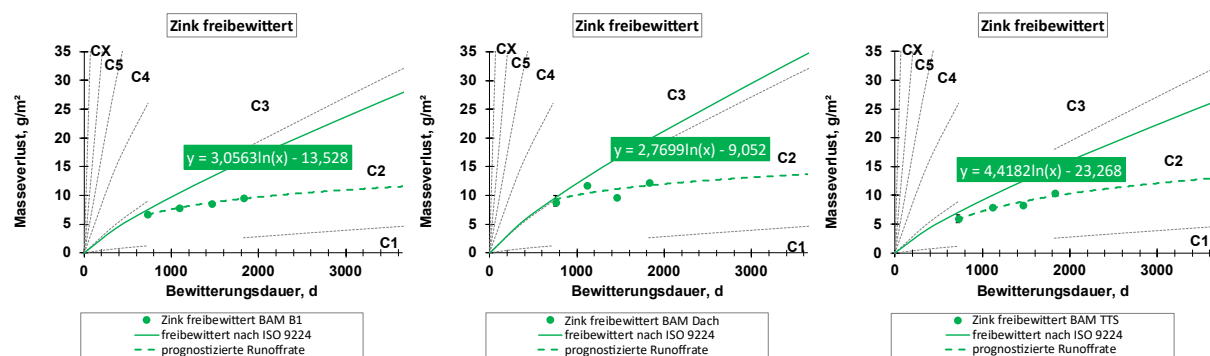
$$Runoffrate_{5/45/5,5} = 158 * 0,65 * 16,03 = 1.646 \frac{mg}{m^2 * a} \quad (3)$$

Anhand der aus der grafischen Darstellung ableitbaren Runoffraten nach zwei Jahren Bewitterungsdauer können Runoffraten wie zuvor beschrieben für Zn, feuerverzinkten Stahl und Kupfer ermittelt werden.

Bezugnehmend auf die Bewertungsgrundlage für metallene Werkstoffe im Kontakt mit Trinkwasser gilt gemäß WHO ein Grenzwert für Zink im Trinkwasser in Höhe von 3 mg/l. Das zuvor berechnete Beispiel zeigt, dass hier nur 69 % des Grenzwertes erreicht werden. Für Kupfer bei gleichen Eingangsparametern sogar nur 38 % des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung. Für feuerverzinkte bewitterte Eisenwerkstoffe wird der Grenzwert gem. WHO nur zu 73 % erreicht. Wird eine Dachneigung von nur 20° angenommen und der pH-Wert des Regenwassers mit 4,5, so ergibt sich die maximale Belastung des Regenwassers mit Zinkionen aus feuerverzinktem Material mit 88 % des WHO Grenzwertes.

Abbildung 29

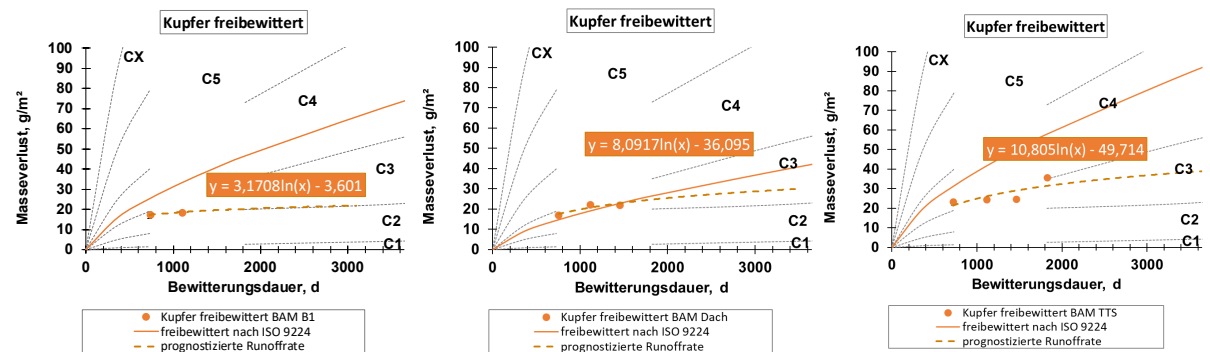
Logarithmische Regression der Korrosionsraten ab dem zweiten Jahr der Probenauslagerung zur Bemessung der Runoffraten ab dem zweiten Jahr für Zink.



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Abbildung 30

Logarithmische Regression der Korrosionsraten ab dem zweiten Jahr der Probenauslagerung zur Bemessung der Runoffraten ab dem zweiten Jahr für Kupfer.

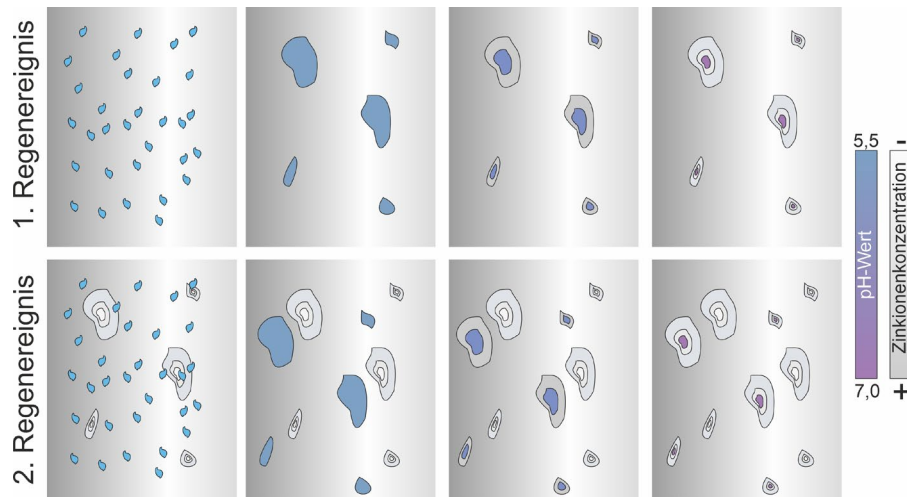


Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Als Fazit muss festgehalten werden, dass die Deckschichtbildung und Abschwemmprozesse und somit der Runoff kein statisches Konstrukt sind, das binnen weniger Jahre umfassend beschrieben werden kann. Die Bildung von Deckschichten ist ein dynamischer Prozess, der bei einem Regenereignis weder homogen noch flächendeckend an einer Probenoberfläche erfolgt. Infolge Feuchteverteilung und Tropfenbildung auf der Oberfläche bilden sich viele kleine Korrosionszellen aus, die beim Abtrocknen in der zuvor befeuchteten Fläche inhomogene Deckschichten bilden. Durch den Korrosionsprozess und die Bildung von OH--Ionen werden die Feuchtfilme alkalischer, was mit zunehmendem Abtrocknen forciert wird. Das bedeutet auch, dass die Metallionenkonzentration, um hydroxidische Deckschichten zu bilden, während des Eintrocknens signifikant

geringer wird. In Abbildung 31 ist eine schematische Darstellung gezeigt, die den Eintrocknungsprozess und die Änderung der Deckschicht sowie pH-Wertänderung am Beispiel von Zink darstellt.

Abbildung 31
Schematische Darstellung der Deckschichtbildung infolge Regenereignissen



Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Empfehlungen für die Praxis

Bestimmung der Runoffrate unter Verwendung von C-Kategorien

Die Runoffraten können für urbane als auch ländliche Standorte für Zink C3 und Kupfer C4 bzw. C5 anhand der zuvor dargestellten Formel (2) berechnet werden. Die Verwendung der in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellten Regression kann zielgerichtet für die jeweilige Korrosivitätskategorie eingesetzt werden. Hier sind für Zink C3 und C4 vertreten und für Kupfer C4 und C5. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen im Bereich der Bestimmung der C-Kategorien ist auch an küstennahen Standorten für diese Werkstoffe mit keiner höheren Korrosionsrate zu rechnen. Dies gilt nur für Dachneigungen von 45°.

Bei bekannten Korrosivitätskategorien nach ISO 9223 kann die Runoffprognose über den Korrosionsfortschritt gemäß ISO 9224 erfolgen. Auch hier muss die Korrosionsrate nach ISO 9223 und für das zweite Jahr nach ISO 9224 abgezogen werden. Dieses Vorgehen überschätzt die Runoffrate jedoch zum Teil drastisch, siehe Abbildung 29 und Abbildung 30. Dies gilt nur für Dachneigungen von 45°.

Eine Korrektur für die vorgenannten Varianten bei Variation der Dachneigung kann nach Tabelle 11 erfolgen, die ermittelte Runoffrate für 45° Dachneigung kann für eine Dachneigung von 60° umgerechnet werden, sie beträgt z.B. bei Zink für 60° Dachneigung nur 81 %.

Tabelle 11: Anpassung der Runoffrate für Zink und Kupfer

Dachneigung	60°	50°	40°	30°	20°
Änderung _{Zn} in % bezogen auf 45°	81	93	109	123	128
Änderung _{Cu} in % bezogen auf 45°	66	79	94	113	133

Bestimmung der Runoffraten für einen Standort

Die Bestimmung des Metallioneneintrags für einen Standort kann auf Basis der Analyse von Regenwasserproben für diesen erfolgen. Nach der Regenwasseranalyse kann die Zusammensetzung mit der in Kapitel „Analyse Niederschlagswasser“ verglichen werden. Dabei sollte das Hauptaugenmerk auf dem pH-Wert liegen. Die Nutzung des Regensimulators kann unter Betrachtung mittlerer ortsüblicher Regenereignisse erfolgen. Es bietet sich an, als Probenmaterial bereits am Standort befindliche langjährig ausgelagerte Blechproben zu gewinnen. Diese können aus Bestandsdacheindeckungen gewonnen werden und sollten der Größe DIN A4 entsprechen. Im Nachgang an den Beregnungsprozess erfolgt die Analyse des Regenwassers nach Kontakt mit der Probenoberfläche, woraus die Runoffrate ermittelt werden kann. Somit kann speziell für Dacheindeckungen aus metallenen Werkstoffen mit variierenden Dachneigungen, dezidierte Runoffprognosen errechnet werden. Für die Bestimmung des Metallioneneintrags aus einem Gebäude werden folgende Parameter ermittelt:

1. Flächen der Dacheindeckung mit gleicher Dachneigung [m²]
2. Dachneigungen [°]
3. Mittlere Regenintensität über ein Jahr [mm/h]
4. pH-Wert des örtlichen Regenwassers
5. Gesamtregenmenge über ein Jahr [mm/m²a]

Die ermittelten Runoffraten können unter Verwendung der in den Modellen für die verschiedenen Werkstoffe abgebildeten Runoffprognosen durch Berechnung nach Formel (3) verglichen werden.

Testverfahren zur standardisierten Bestimmung von Metallioneneintrag in die Umwelt

Die Variation der Regenintensität, Regenmenge, Windrichtung, Oberflächentemperatur und Verdunstung des aufgefangenen Runoff's in den Auffangbehältern generiert unter Realbedingungen sehr hohe Streuungen. Explizit bei geringen Regenwassermengen kann der „first flush“ in Kombination mit Verdunstungseffekten dazu führen, dass die Werte nicht repräsentativ sind.

Die ermittelten Kennwerte für einen Standort sind aufgrund der Vielzahl der nicht beeinflussbaren Variablen nicht reproduzierbar.

Als Testverfahren für die Bestimmung von Runoffraten bietet sich die Nutzung des BAM-Regensimulators an. Hiermit können Runoffraten an verschiedenen Werkstoffen unter Berücksichtigung der:

1. Dachneigung in °
2. Regenintensität in mm/h
3. Regendauer in Minuten

ermittelt werden.

Als Elektrolyt wird ein künstliches Regenwasser nach Vorgabe aus Kapitel „Analyse Niederschlagswasser“ verwendet, der pH-Wert soll hierfür 5,5 betragen (Tabelle 12).

Tabelle 12: Zusammensetzung künstliches Regenwasser nach BAM

pH-Wert 5,5	Einwaage in g /l
Ammoniumchlorid	1,78
Calciumchlorid	0,73
Kaliumnitrat	1,63
Magnesiumsulfat	3,10
Natriumhydrogencarbonat	0,73

Bei der Wahl des Probenmaterials muss jedoch besonders berücksichtigt werden, dass neue nicht deckschichtbehaftete Bleche nicht repräsentativ für die Ermittlung einer langjährigen Nutzungsdauerprognose sind. Diese sind ausschließlich nur für die Betrachtung eines Zeitraumes von den ersten Monaten bis zu einem Jahr der Auslagerung bzw. Nutzungsdauer anzusetzen.

Für die Beurteilung der Runoffrate nach bzw. über eine langjährige Nutzung bedarf es entsprechend zuvor langjährig ausgelagerter Probekörper.

Prüfverfahren für Oberflächenvorbehandlungsmaßnahmen

Das im vorherigen Kapitel beschriebene Verfahren ist besonders geeignet, um Oberflächenvorbehandlungsmaßnahmen zu validieren, die den Metallioneneintrag reduzieren sollen. Oberflächen Vorbehandlungen wie

Konversionsschichten oder die Nutzung vorpatinierter Bleche bzw. andere Oberflächenbehandlungsmaßnahmen können vergleichend bewertet werden. Das Prüfverfahren bietet wiederkehrend gleiche Prüfbedingungen, die es für die Einbindung in eine normative Regelung prädestinieren. Für die Bewertung und Vergleichbarkeit der Untersuchungen ist es notwendig einen einheitlichen Prüfelektrolyten zu verwenden, es bietet sich an hierzu, das künstliche Regenwasser nach BAM zu verwenden, dessen Zusammensetzung bereits in Tabelle 12 vorgestellt wurde.

Hinweise für Dachrinnen

Für Dachrinnen darf gemäß den Richtlinien des deutschen Dachdeckerhandwerks eine Spiegelentwässerung angesetzt werden (0° Gefälle). Dies kann anhand der Ergebnisse nicht empfohlen werden, da die TOW, also die Dauer der Befeuchtung hierbei am längsten andauert. Somit ist der Metallioneneintrag am höchsten. Ist dies aus technischen Gegebenheiten nicht zu vermeiden, wird hier ein Rinnenschutzanstrich im Bereich des Wasserlaufes zwingend empfohlen. Experimentell ist kein belastbarer Wert zu ermitteln, da die Variation aus Rinnengröße (2, 3, 4 oder 5-teilig) und die darüberliegende Regeneintragsfläche nicht festgelegt sind. In Kombination mit der Anzahl der Abläufe an einem Rinnenabschnitt ergeben sich verschiedenste Abflussraten und Füllstände. Darüberliegende gleichartige metallene Eindeckungen können die Korrosionsreaktion in der Rinne reduzieren, da hier bereits Metallionen eingetragen werden, die zu einer beschleunigten Gleichgewichtsbildung beitragen.

Ausblick

Die Untersuchungen der Runoffraten an den drei Standorten, parallel zur Bestimmung der Deckschichtbildung mittels elektrochemischer Messungen, zeigen deutlich, dass die Deckschichtbildung innerhalb des Untersuchungszeitraumes noch nicht abgeschlossen ist.

Für Langzeitprognosen über die gesamte Nutzungsdauer einer metallenen Dacheindeckung wird angeregt, Auslagerungsversuche von metallenen Werkstoffen, mit wiederkehrenden Bestimmungen der Runoffrate unter Verwendung des Regensimulators, durchzuführen. Die angestrebten Untersuchungszeiträume sollten möglichst ein Probenalter unter atmosphärischer Exposition von mindestens 5, 7 und 10 Jahren aufweisen. Die langjährigen Erfahrungen der BAM hinsichtlich der Entwicklung der Korrosionsraten über die Zeit zeigen, dass mit zunehmendem Probenalter eine geringere Runoffrate zu erwarten ist.

Die Bestimmung von Runoffraten unter atmosphärischen Bedingungen lässt sich in der Regel nicht vergleichen. Die Nutzung des Regensimulators mit gleichbleibenden Berechnungsparametern scheint hingegen ratsam. Dieser in Kombination mit realen ausgelagerten Proben generiert eine belastbare Runoffrate auf Basis von natürlich gewachsenen standortspezifischen Deckschichten. Es bietet sich an, dieses Verfahren normativ zu regeln.

Die Prognosewerte für die C-Kategorien gem. ISO 9224 sind aufgrund der nicht mehr gegebenen hohen SO₂-Belastung der Atmosphäre überschätzt. Für deckschichtbildende Systeme ist die Einstufung nach einem Jahr gem. ISO 9223 als kritisch einzuschätzen. Die Deckschichtbildung ist selbst zwar auf einem vorhergehenden Korrosionsprozess zurückzuführen, die Degradation der Deckschicht bringt jedoch gänzlich andere Korrosionsgeschwindigkeiten mit sich, die die Korrosionssysteme bzw. Standorte somit falsch bewerten.

Weitergehende Untersuchungen hierzu sollten zwingend in Kombination mit Runoffraten erfolgen, um einen bestmöglichen Synergieeffekt generieren zu können und zukünftig Runoffraten über die Korrosivitätskategorien der Standorte in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe zu erhalten.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Haacke, Nasrin (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) – bis 31.03.2024

Babutzka, Martin (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) – bis 31.01.2023

Burkert, Andreas (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Ebell, Gino (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Fachliche Betreuung

Brüggemann, Michael (BRÜGGEMANN KISSELER INGENIEURE, i.A. BBSR)

Kurzbiographien



Dr.-Ing. Nasrin Haacke

Dr.-Ing. Nasrin Haacke war bis zum 31. März 2024 PostDoc an der BAM. Als Umweltwissenschaftlerin beschäftigte Sie sich mit der Analyse und Bewertung von Umweltdaten und Schadstoffemissionen im Kontext des Klimawandels. Dr.-Ing. Nasrin Haacke ist seit dem 01.04.2024 am Kompetenzzentrum Wasser Berlin KWB und forscht zur Umsetzung klimaresiliente Anpassungsstrategien sowie nachhaltigem Wassermanagement.



Dr.-Ing. Martin Babutzka

Dr.-Ing. Martin Babutzka war bis zum 31.01.2023 Projektleiter des Projekts RUNOFF an der BAM. Hier beschäftigte er sich mit Fragestellungen zum Korrosionsverhalten von Metallen und zum Korrosionsschutz an der Atmosphäre. Nach einer beruflichen Station als Referent in der Staatskanzlei und Ministerium für Kultur des Landes Sachsen-Anhalt, ist er seit dem 01.02.2024 als Persönlicher Referent der Wissenschaftlichen Vorständin am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ tätig.



Dr.-Ing. Andreas Burkert

Dr.-Ing. Andreas Burkert ist Fachbereichsleiter des FB 7.6 Korrosion und Korrosionsschutz an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Als Werkstoffwissenschaftler mit dem Schwerpunkt Korrosion und Korrosionsschutz metallener Werkstoffe ist er seit dem Jahr 2000 an der BAM beschäftigt. Seit 2012 leitet er den Fachbereich Korrosion und Korrosionsschutz.



Dr.-Ing. Gino Ebell

Dr.-Ing. Gino Ebell ist seit dem 01.02.2023 Projektleiter des Projekts RUNOFF an der BAM. Er ist seit 2016 stellvertretender Fachbereichsleiter des FB 7.6 und bereits seit 2006 an der BAM. Er ist Bauingenieur und beschäftigt sowohl mit der Korrosion metallener Werkstoffe unter atmosphärischer Exposition als auch unter maritimer Exposition. Promoviert hat er im Themenbereich Korrosion von Stahl in Beton, hier beschäftigt er sich eingehend mit wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion.

Literaturverzeichnis

- [1] Odnevall Wallinder, I.; Leygraf, C.: „A Critical Review on Corrosion and Runoff from Zinc and Zinc-Based Alloys in Atmospheric Environments“, Corrosion, 2017, 73, S. 1060-1077.
- [2] He, W.; Odnevall Wallinder, I.; Leygraf, C.: „A laboratory study of copper and zinc runoff during first flush and steady-state conditions“, Corrosion Science, 2001, 43, S. 127-146.
- [3] Odnevall Wallinder, I.; Leygraf, C.; Karlén, C.; Heijerick, D.; Janssen, C. R.: „Atmospheric corrosion of zinc-based materials: runoff rates, chemical speciation and ecotoxicity effects“, Corrosion Science, 2001, 43, S. 809-816.
- [4] Odnevall Wallinder, I.; Verbiest, P.; He, W.; Leygraf, C.: „Effects of exposure direction and inclination on the runoff rates of zinc and copper roofs“, Corrosion Science, 2000, 42, S. 1471-1487.
- [5] Lindström, D.; Odnevall Wallinder, I.: „Long-term use of galvanized steel in external applications. Aspects of patina formation, zinc runoff, barrier properties of surface treatments, and coatings and environmental fate“, Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173, S. 139-153.
- [6] Veleva, L.; Meraz, E.; Acosta, M.: „Zinc corrosion runoff process induced by humid tropical climate“, Materials and Corrosion, 2007, 58, S. 348-352.
- [7] Veleva, L.; Acosta, M.; Meraz, E.: „Atmospheric corrosion of zinc induced by runoff“, Corrosion Science, 2009, 51, S. 2055-2062.
- [8] Leygraf, C.; Odnevall Wallinder, I.; Tidblad, J.; Graedel, T.: „Atmospheric Corrosion“, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2016, Hoboken, New Jersey.
- [9] Kreislova, K.; Knotkova, D.: „The Results of 45 Years of Atmospheric Corrosion Study in the Czech Republic“, Materials, 2017, 10, 394 (S. 1-10).
- [10] de la Fuente, D.; Castaño, J. G.; Morcillo, M.: „Long-term atmospheric corrosion of zinc“, Corrosion Science, 2007, 49, S. 1420-1436.
- [11] Bittner, S.: „Ermittlung der Schwermetallabgabe (Run-off) metallischer Werkstoffe infolge atmosphärischer Korrosion, insbesondere bei Blei, Kupfer und Zink“, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Naturwissenschaftliche Fakultäten, 2006.
- [12] FuE-Vorhaben FKZ 202 24 220/01, „Freisetzung von Schwermetallen aus Materialien in die Umwelt“, gefördert durch das Umweltbundesamt, 2002-2007.
- [13] Hoffmann, M.; Rudolphi, A.: „Leitfaden für das Bauwesen - Reduktion von Schwermetalleinträgen aus dem Bauwesen in die Umwelt“, Forschungsbericht 202 242 20/02, UBA-FB 000824, ISSN 0722-186X, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, 2005.
- [14] Babutzka, M.: „Neue Erkenntnisse zur Deckschichtbildung von Zink an der Atmosphäre“, Dissertation, RWTH Aachen University, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, Shaker Verlag GmbH, Düren, 2020, ISBN: 978-3-8440-7626-4.
- [15] Iserloh, T.; Fister, W.; Seeger, M.; Willger, H.; Ries, J.B., 2012: A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. Soil & Tillage Research, 124: 131-137.
- [16] Kavka, P.; Neumann, M.; Dostál, T.; Zúmr, D.; Laburda, T.; Rodrigo-Comino, J.; Iserloh, T., 2021: Chapter 17: Rainfall simulation experiments as a tool for process research in soil science, hydrology, and geomorphology. Precipitation, 395-418.

-
- [17] Lassu, T., Seeger, M., Peters, P., Keesstra, S.D., 2015: The Wageningen rainfall simulator: Set-up and calibration of an indoor nozzle-type rainfall simulator for soil erosion studies. *Land Degradation & Development*, 26:604-612.
- [18] Rodrigo-Comino, J.; Iserloh, T.; Morvan, X.; Malam Issa, O.; Naisse, C.; Keesstra, S.D.; Cerdà, A.; Prosdocimi, M.; Arnáez, J.; Lasanta, T.; Ramos, M.C.; Marqués, M.J.; Ruiz Colmenero, M.; Bienes, R.; Ruiz Sinoga, J.D.; Seeger, M.; Ries, J.B., 2016: Soil Erosion Processes in European Vineyards: A Qualitative Comparison of Rainfall Simulation Measurements in Germany, Spain and France. *Hydrology*, 3(1): 6.
- [19] Nielsen, K.T.; Moldrup, P.; Thorndahl, S.; Nielsen, J.E.; Duus, L.B.; Rasmussen, S.H.; Uggerby, M.; Rasmussen, M.R., 2019: Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. *Hydrological Processes*, 33: 3364-3377.
- [20] Assouline, S., 2009: Drop size distributions and kinetic energy rates in variable intensity rainfall. *Water Resources Research*, 45: W11501.
- [21] Iserloh, T., Ries J.B., 2012: Experiments for comparison of small scale rainfall simulators. *Geo-physical Research Abstracts*, 14: EGU2012-3188.
- [22] Ebell, G., (2023): Zur Deckschichtbildung an feuerverzinkten Betonstählen in chloridhaltigen Mörteln. Universität Kaiserslautern-Landau, Dissertation.
- [23] Pagenkopf, A., 2011: Urbane Niederschlagsbeeinflussung – Genese und räumliche Differenzierung am Beispiel von Berlin. Humboldt Universität Berlin, Dissertation.
- [24] Lorenz, J.M., Kronenberg, R., Bernhofer, C., Niyogi, D., 2019: Urban Rainfall Modification: Observational Climatology Over Berlin, Germany. *JGR Atmospheres*, 124: 731-746.
- [25] Haacke, N., Paton, E., 2021: Analysis of diurnal, seasonal and annual distribution of urban sub-hourly to hourly rainfall extremes in Germany. *Hydrology Research*, 52(2): 478-491.
- [26] Umweltatlas Berlin:
<https://www.berlin.de/umweltatlas/klima/niederschlagsverteilung/1991-2020/kartenbeschreibung/> (Seite zuletzt am 21.03.2024 aufgerufen).
-

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung einer LPR-Messkurve und die zugehörige in Grün gekennzeichnete lineare Regression mit Angabe der Steigung $\Delta E/\Delta i$.	18
Abbildung 2 Mit künstlichem Wasser benetztes Zinkblech (links) und Zinkproben in der Klimakammer (rechts).	21
Abbildung 3 Probenmaterial: Titanzink, Kupfer und feuerverzinkter Stahl.	25
Abbildung 4 Mit Probenmaterial ausgestatteter Bewitterungsstand auf dem BAM-Stammgelände an der B1 in Berlin-Steglitz.	27
Abbildung 5 Verteilung (Tageswerte) von Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit für den Zeitraum Januar 2023 bis Ende Februar 2024 für den Standort UE-B1 und BAM-Dach (links) sowie den Standort TTS (rechts).	29
Abbildung 6 Verteilung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] für den Zeitraum Februar 2023 bis Februar 2024 für die Standorte BAM-Dach (links) und TTS (rechts), in Rot dargestellt sind die Anzahl der identifizierten Niederschlagsereignisse (NDE) pro Monat.	31
Abbildung 7 Niederschlagssammler am Standort BAM-Dach (links) sowie am Standort TTS (rechts).	32
Abbildung 8 Darstellung der Konzentrationsverteilungen von Cu-, Zn-, Sulfat- und Chloridionen im Runoffwasser an den drei Standorten sowie des aufgefangenen Runoffvolumens für den Zeitraum Januar 2023 bis Ende Februar 2024.	34
Abbildung 9 Darstellung der pH- und elektrische Leitfähigkeitsverteilung an den drei Standorten für den Zeitraum Januar 2023 bis Ende Februar 2024.	35
Abbildung 10 Bewitterungsstand am Standort TTS bei Auslagerungsbeginn, nach einer natürlichen Bewitterungszeit von einem Monat und Durchführung einer LPR-Messung an einer Zink-Probe (von links nach rechts).	36
Abbildung 11 Gemessene Deckschichtwiderstände über den Zeitraum von Januar 2023 bis Februar 2024 an Zink (links), feuerverzinktem Stahl (mittig) und Kupfer (rechts).	36
Abbildung 12 Diffraktogramme der Zinkproben über einen Zeitraum von 12 Monaten für die Standorte, von links: UE-B1, BAM-Dach und TTS	37
Abbildung 13 Diffraktogramme der Kupferproben über einen Zeitraum von 12 Monaten für die Standorte, von links: UE-B1, BAM-Dach und TTS	38
Abbildung 14 BAM-designter Kapillarberegner (technische Zeichnung und Umsetzung): (1) Kapillar-Einheit, (2) winkelverstellbarer Probenhalter, (3) Runoffauffangsystem, (4) Beregnergehäuse, (5) Niederschlagsauffangbehälter mit Ablasshahn, (6) Eurobehälter, (7) Zentriertisch, (8) Pumpe, (9) künstliches Niederschlagswasser und (10) Runoffwasserbehälter.	39
Abbildung 15 Entwicklung der Deckschichtwiderstände für Zink (links) und Kupfer (rechts) bei künstlicher Bewitterung in der Klimakammer und SO ₂ -Kammer. Messung 0 bezeichnet Deckschichtwiderstände im Ausgangszustand.	40
Abbildung 16 Abgespülte Zinkmenge [mg] von blanken Titanzink-Bleichen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagswassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten.	42

- Abbildung 17 Abgespülte Zinkmenge [mg] von künstlich-bewitterten Titanzink-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagwassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. 43
- Abbildung 18 Abgespülte Zinkmenge [mg] von feuerverzinkten Stahl-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagwassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. 44
- Abbildung 19 Abgespülte Kupfermenge [mg] von blanken Kupfer-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagwassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. 45
- Abbildung 20 Abgespülte Kupfermenge [mg] von künstlich-bewitterten Kupfer-Blechen in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagwassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. 46
- Abbildung 21 Berechnete Runoffraten für Zink (Zn), feuerverzinkten Stahl (gZn) sowie Kupfer (Cu) für den Bewitterungszeitraum von Ende Januar 2023 bis Ende Februar 2024. Berechnete jährliche Runoffraten für den Zeitraum bis Ende Januar 2024. 49
- Abbildung 22 Berechnete Runoffraten für Zink (Zn), feuerverzinkten Stahl (gZn) sowie Kupfer (Cu) für den Bewitterungszeitraum von Ende Oktober 2024 bis Ende Januar 2025. Berechnete jährliche Runoffraten für den Zeitraum bis Mitte Februar 2025 50
- Abbildung 23 Ermittelte Abtragsraten für Zink (Zn) sowie Kupfer (Cu) aus bestehenden Daten der BAM. 50
- Abbildung 24 Polarisationswiderstände für Zink (Zn), feuerverzinkten Stahl (gZn) sowie Kupfer (Cu), Probenalter zu Beginn: 2 Jahre (freie Bewitterung). 51
- Abbildung 25 Abgespülte Zinkmenge [mg] von Titanzinkblechen mit natürlich gewachsener Deckschicht nach zweijähriger Auslagerung in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagwassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. 52
- Abbildung 26 Abgespülte Zinkmenge [mg] von feuerverzinkten Stahlblechen mit natürlich gewachsener Deckschicht nach zweijähriger Auslagerung in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagwassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. 53
- Abbildung 27 Abgespülte Kupfermenge [mg] von Kupferblechen mit natürlich gewachsener Deckschicht nach zweijähriger Auslagerung in Abhängigkeit der Neigung des Materials [°], pH-Wert des künstlichen Niederschlagwassers über die Zeit sowie bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. 54
- Abbildung 28 Links ist die sogenannte Badewannenkurve nach Roetheli et al. dargestellt, die die Auflösekinetik von ZnOH_2 und CuOH_2 in Abhängigkeit des pH-Werts als Masseverlust infolge Korrosion darstellt, rechts ist die Zinkionenkonzentration nach Fulton und Swineheart dargestellt, die in Abhängigkeit des pH-Wertes eine stabile ZnOH_2 -basierte Deckschicht gewährleistet 57
- Abbildung 29 Logarithmische Regression der Korrosionsraten ab dem zweiten Jahr der Probenauslagerung zur Bemessung der Runoffraten ab dem zweiten Jahr für Zink. 59
- Abbildung 30 Logarithmische Regression der Korrosionsraten ab dem zweiten Jahr der Probenauslagerung zur Bemessung der Runoffraten ab dem zweiten Jahr für Kupfer. 59
- Abbildung 31 Schematische Darstellung der Deckschichtbildung infolge Regenereignissen 60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittels XRD untersuchte Deckschichtbestandteile.....	19
Tabelle 2: Mittels XRD untersuchte Deckschichtbestandteile für Kupferverbindungen.	19
Tabelle 3: Darstellung der verwendeten Indexe und die zugehörigen Bewertungen.	20
Tabelle 4: Übersicht zu den Meilensteinen und Arbeitspaketen des Forschungsvorhabens RUNOFF.....	24
Tabelle 5: Übersicht zur Probenanzahl für Auslagerungs- und Laborversuche.	26
Tabelle 6: Übersicht zur Niederschlagskennwerten.....	30
Tabelle 7: Übersicht der Deckschichtzusammensetzung für Zinkproben nach 1, 6 und 12 Monate Auslagerungsdauer.....	37
Tabelle 8: Übersicht der Deckschichtzusammensetzung für Kupferproben nach 1, 6 und 12 Monate Auslagerungsdauer.....	38
Tabelle 9: DOE- Stützstellen für alle untersuchten Werkstoffe und Variationen (Bewitterung)	41
Tabelle 10: Berechnete Abtragsraten für Zink und Kupfer	47
Tabelle 11: Anpassung der Runoffrate für Zink und Kupfer.....	61
Tabelle 12: Zusammensetzung künstliches Regenwasser nach BAM.....	62