

Einträge von Kupfer und Zink in das Ökosystem

Hullmann, H. (1), Kraft, U. (2)

Der vorliegende Beitrag ist der zweite einer dreiteiligen Folge, in welcher die Umweltauswirkungen von Kupfer und Zink in Gebäudehüllen betrachtet werden. Als erster erschien ein Beitrag über Herstellung und Recycling von Kupfer und Zink in METALL 10-2001. Nach der in diesem Heft behandelten Frage der Einträge in die Umwelt wird sich ein abschließender Beitrag mit der Wirkung von Kupfer und Zink in der Umwelt befassen (METALL 5-2002).

Korrosion von Kupfer und Zink

Kupfer und Zink werden seit langem bei der Herstellung von Dächern, Regenrinnen und Fallrohren von Gebäuden eingesetzt. Dabei entstehen an den der Witterung ausgesetzten Flächen Korrosionsprodukte, von denen der größte Teil als Patina auf der Metalloberfläche verbleibt. Ein geringerer Teil wird abgeschwemmt und gelangt mit dem Regenwasser in die Kanalisation oder in den Boden von Versickerungsanlagen.

Das Maß dieser Einleitungen und die Frage ihrer Schädlichkeit werden derzeit kontrovers diskutiert. Im Folgenden wird daher der aktuelle Stand der Forschung vorgestellt und erläutert, um diese Diskussion zu versachlichen und – insbesondere im Hinblick auf die in der Außenhaut von Gebäuden eingebauten Metalle Kupfer und Zink – die entsprechenden Daten und Fakten zusammenzufassen.

Der Begriff Korrosion ist zunächst wertfrei. Der Korrosionsprozess kann, wie z. B. bei Stahl, zu einer fortschreitenden Zerstörung des Materials führen, er kann aber auch, wie z. B. bei Kupfer und Zink, durch die Bildung einer Deckschicht auf

der Metalloberfläche einen dauerhaften Schutz des Metalls bewirken. Nach praktischen Gesichtspunkten kann man also unterscheiden zwischen erwünschter Korrosion, die zur Bildung einer das Metall schützenden Patina führt, und unerwünschter Korrosion, die Korrosionsschäden zur Folge hat und die in der Baupraxis auf einen ungeeigneten Einsatz des Materials und/oder auf eine fehlerhafte Konstruktion zurückzuführen ist.

Arten der Korrosion

Korrosion ist, allgemein gesagt, eine physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung (Ausführliche Hinweise s. DIN EN ISO 8044 : 1999). Bei Kupfer und Zink ist es die elektrochemische Reaktion der Metalloberfläche mit Elektrolyten.

In der Baupraxis werden unter Korrosion häufig die unerwünschten Arten verstanden, die zu Bauschäden führen und also vermieden werden müssen. Hierzu gehören die galvanische Korrosion, beispielsweise als Kontaktkorrosion, die chemische Korrosion oder auch die sogenannte Bitumenkorrosion.

Im Hinblick auf den Einsatz von Kupfer und Zink in der Außenhaut von Gebäuden soll hier die erwünschte Form der Korrosion erläutert werden. Unter dem Einfluss der Atmosphäre (atmosphärische Korrosion)

entsteht eine Patina, die den metallischen Kern schützt. Diese Schutzschicht ist dauerhaft und wird nur zu einem vergleichsweise geringen Teil vom Regen abgeschwemmt. Sie ist der eigentliche Grund für die Langlebigkeit von Kupfer und Zink in der Außenhaut von Gebäuden.

In der Atmosphäre reagiert Kupfer mit dem Sauerstoff aus der Luft. Es bildet sich auf der Oberfläche eine dünne Schicht von Kupferoxid. Mit der Feuchtigkeit werden auch Bestandteile der Luft eingetragen, die ebenfalls korrosiv wirken. Die Patina ist ein basisches Kupferkarbonat, in das auch Chlorid und Sulfat eingelagert sein können. Abhängig von der Dicke der Patinaschicht und der Form der sich bildenden Kristalle entstehen unterschiedliche Farben.

Bei Zink entsteht auf der metallischen Oberfläche zunächst mit dem Sauerstoff aus der Luft Zinkoxid. Dieses reagiert mit Wasser aus Regen oder Feuchtigkeit zu Zink-Hydroxid. Durch Reaktion mit dem Kohlendioxid aus der Luft entsteht dann eine dichte, wasserunlösliche und fest haftende Schicht aus basischem Zinkkarbonat, die Patina.

Korrosions- und Abschwemmraten

Neben den oben beschriebenen Korrosionsarten werden im Folgenden weitere Begriffe erläutert, die für die Thematik der Korrosion von Bedeutung sind. Der Korrosionsprozess bei Metallen in der Außenhaut von Gebäuden ist von vielen Faktoren abhängig. Die wichtigsten hiervon sind der SO_2 -Gehalt der Luft („saurer Regen“), der pH-Wert des Regens, die Exposition der Metalloberfläche, deren Orientierung und Neigung sowie die Betauung resp. die Dauer der Nasszeit. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der unmittelbare Einfluss von Chloriden, beispielsweise in der Nähe des Brandungsbereiches an der Küste oder durch Streusalz.

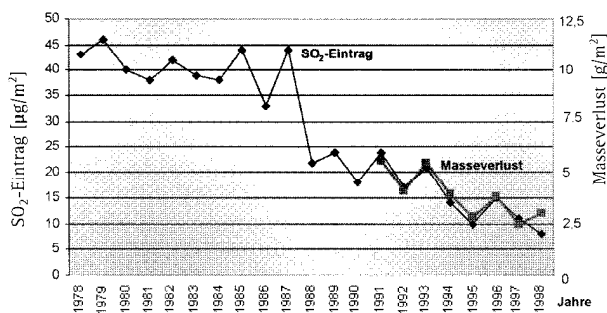


Abb. 1: Korrelation zwischen SO_2 -Gehalt der Luft (1978-98) und Abschwemmrates von walzblankem, unter 45° geneigtem, nach Westen orientiertem Titanzink (1991 bis 1998) in Hannover-Herrenhausen (in Anlehnung an [12])

Für Kupfer und Zink in Dächern, Dachrinnen und Fallrohren ist dieser allerdings nur von lokaler Bedeutung.

Als Korrosionsrate (engl.: corrosion rate, in schweizerischen Veröffentlichungen auch „Abtragsrate“ genannt) bezeichnet man das Maß der Korrosion, angegeben in $\text{g/m}^2\text{a}$ oder $\mu\text{m/a}$. Sie beschreibt den Dickenverlust des Grundmaterials und dient der Ermittlung der möglichen Nutzungsdauer. Bei deckschichtbildenden Werkstoffen ist sie für eine Bilanzierung der Wirkung in der Umwelt ohne Bedeutung, da ein großer Teil der Korrosionsprodukte auf der Metalloberfläche verbleibt.

Abschwemmung ist die Ablösung der äußeren Schicht des Korrosionsproduktes, im wesentlichen durch Regen. Die von Dächern, Dachrinnen und Regenfallrohren abgeschwemmten Korrosionsprodukte gelangen, je nach dem System der Entwässerung, in die Kläranlage, den Vorfluter oder bei Versickerung des Regenwassers in den Filterkörper der Versickerungsanlage.

Die Abschwemmrate (engl.: run off rate) ist das Maß der Abschwemmung. Sie wird in $\text{g/m}^2\text{a}$ oder auch $\mu\text{m/a}$ angegeben. Die Abschwemmrate ist grundsätzlich kleiner als die Korrosionsrate und die für einen Eintrag in die Umwelt entscheidende Größe.

Die SO_2 -Konzentration in der Atmosphäre hat dank der Bemühungen um den Umweltschutz wesentlich abgenommen. Diese Abnahme korreliert mit der Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit und der Abschwemmungen von Kupfer und Zink. Dieser Zusammenhang wurde für die Jahre 1991 bis 1998 für die Abschwemmrate von Titanzink und die SO_2 -Konzentration in Hannover-Herrenhausen dokumentiert und in Abbildung 1 dargestellt [12].

Der Durchschnittswert der SO_2 -Konzentration für Deutschland lag bei unterschiedlichen statistischen Rechenansätzen im Jahr 1996 bei 7 bzw. 10 mg/m^3 Luft. Für die Niederlande wurden 6 bzw. 7 mg/m^3 ermittelt [7]. Diese Verringerung wird sich voraussichtlich fortsetzen. Damit werden auch die Abschwemmraten sowohl von Kupfer als auch von Zink in der Zukunft noch weiter abnehmen.

Dies bedeutet auch, dass die Angaben zu Abschwemmraten in der Literatur umso mehr überholt sind, je älter die jeweilige Quelle ist und dass diese Daten nicht die heutigen und erst recht nicht die in Zukunft zu erwartenden Abschwemmraten richtig wiedergeben. Für den Eintrag von Kupfer und Zink in die Umwelt ist ausschließlich von Bedeutung, wie viel Metall abgeschwemmt wird und so in die Kanalisation, den Vorfluter oder in die Versickerungsanlage gelangt. Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich daher auf die Abschwemmrate.

In der Praxis sind die Metallflächen an Gebäuden nach Neigung, Orientierung und Abdeckung anders verteilt, als dies für standardisierte Experimente angenommen wird. Odnevall Wallinder [9] gibt für Kupfer an, dass der Durchschnitt der Abschwemmraten unter realen Verhältnissen niedriger ist als experimentell gemessene Abschwemmraten. Berücksichtigt man dies, so können für eine Abschätzung zukünftiger Abschwemmungen 1,3 $\text{g/m}^2\text{a}$ entsprechend 0,15 $\mu\text{m/a}$ als Durchschnittswert für Abschwemmraten von Kupfer unter mitteleuropäischen Klimabedingungen als realistisch angenommen werden. Dieser Wert liegt etwa zwischen den Werten, die von Faller [4] und Priggemeyer [13] experimentell ermittelt wurden.

Für Zink wurde eine Abhängigkeit der Abschwemmrate von dem SO_2 -Gehalt der Luft abgeleitet. Sie lautet: $\text{Abschwemmrate} [\text{g/m}^2\text{a}] = 1,36 + 0,164 \cdot [\text{SO}_2]$, wobei $[\text{SO}_2]$ die SO_2 -Konzentration in $\mu\text{g/m}^3$ angibt [8, 19]. Für die Niederlande wurde eine Abnahme der Abschwemmraten bei Zink, bedingt durch die Abnahme der SO_2 -Konzentration, von 15 bis 45 $\text{g/m}^2\text{a}$ (2,1 bis 6,3 $\mu\text{m/a}$) im Jahre 1980 auf 4 bis 10 $\text{g/m}^2\text{a}$ (0,6 bis 1,4 $\mu\text{m/a}$) im Jahre 1995 ermittelt. Als Richtwert werden für 1999 2 bis 3 $\text{g/m}^2\text{a}$ (0,3 bis 0,4 $\mu\text{m/a}$) angegeben. Den weiteren Rechnungen wird daher

ein Wert von 3,0 $\text{g/m}^2\text{a}$ entsprechend 0,4 $\mu\text{m/a}$ für die durchschnittliche Abschwemmrate von Zink zugrundegelegt, ein Wert, der nach den heutigen Erkenntnissen also eher zu hoch als zu niedrig ist.

Flächen von Kupfer und Zink in der Außenhaut von Gebäuden

Für die im Bauwesen für Dachflächen, Dachentwässerungen und in Fassaden im Jahre 2000 eingesetzten Kupferflächen kann von einem Volumen von insgesamt 40.000 t/a ausgegangen werden [20]. Der Einsatz für Renovierungen bleibt bei dieser Rechnung unberücksichtigt. Bei einer durchschnittlichen Materialdicke von 0,65 mm errechnet sich eine Gesamtfläche von 7,1 Mio m^2a . Hiervon ist die Fläche für Innenanwendungen (ca. 0,5 Mio m^2a) abzuziehen, so dass als Teil der Gebäudehülle eine Fläche von 6,6 Mio m^2a verbleibt.

Weiterhin wird die der Bewitterung ausgesetzte Fläche dadurch verringert, dass durch Kantungen, Falze und Überdeckungen ein Teil der Kupferoberflächen nicht bewittert wird. Darüber hinaus liegt ein Teil der Flächen so geschützt (beispielsweise Teile von Fassaden unter Auskragungen), dass er ebenfalls nicht benetzt werden kann. Eine Zusammenstellung der im Jahr 2000 montierten Flächen und eine Abschätzung der benetzten Flächen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Es zeigt sich also, dass nur ca. 53 % der

| Nr. | Flächen |
|-----|---|
| 1. | im Jahr 2000 insgesamt montierte Kupferflächen an Gebäuden 6.600.000 m^2a |
| 2. | der Bewitterung ausgesetzte Flächen von Dachrinnen und Fallrohren 1.600.000 m^2a der Bewitterung ausgesetzte Kupfer-Dachflächen 1.810.000 m^2a Kupfer-Fassadenflächen mit einer dachäquivalenten Benetzung 60.000 m^2a Summe der im Jahre 2000 montierten der Bewitterung ausgesetzten Flächen (40.000 t/a) 3.470.000 m^2a |
| 3. | Anteil der einer Bewitterung ausgesetzten Flächen an den insgesamt im Jahr 2000 montierten 52,7 % |
| 4. | von 1950 bis 2000 insgesamt montierte Kupferflächen an Gebäuden (700.000 t, ohne Renovierungen) 121.000.000 m^2 |
| 5. | Summe der insgesamt der Bewitterung ausgesetzten Kupferflächen (53 % von 121,0 Mio m^2) 64.100.000 m^2 |

Tab. 1: In der Außenhaut von Gebäuden in Deutschland montierte Kupferoberflächen (Summe u. Aufteilung nach [20])

| Nr. | Flächen |
|---|------------------------------|
| 1. im Jahr 2000 insgesamt montierte Zinkflächen an Gebäuden | 23.940.000 m ² /a |
| 2. der Bewitterung ausgesetzte Flächen von Dachrinnen und Fallrohren | 5.390.000 m ² /a |
| der Bewitterung ausgesetzte Zink-Dachflächen | 5.390.000 m ² /a |
| der Bewitterung ausgesetzte Zink-Kleinteile | 2.160.000 m ² /a |
| Summe der im Jahre 2000 montierten der Bewitterung ausgesetzten Flächen | 12.940.000 m ² /a |
| 3. Summe der insgesamt der Bewitterung ausgesetzten Zinkflächen (69.000 t/a · 30 Jahre abz. Abfall und Überdeckungen) | 260.000.000 m ² |

Tabelle 2: In der Außenhaut von Gebäuden in Deutschland montierte Zinkoberflächen (Summe und Aufteilung nach [20])

in der Außenhaut von Gebäuden eingesetzten Kupferflächen einer Bewitterung ausgesetzt sind und benetzt werden. Nur dieser Anteil kann der Betrachtung von Kupferabschwemmungen zugrundegelegt werden. Die in Deutschland installierte und der Bewitterung ausgesetzte Fläche von ca. 64,1 Mio m² verursacht bei einer Abschwemmrate von 1,3 g/m²a eine jährliche Abschwemmung von ca. 90 t/a. Das Marktvolumen für Bauzink liegt zur Zeit in Deutschland bei ca. 120.000 t/a entsprechend ca. 23,2 Mio m². Es wird etwa zu 50% für die Dachentwässerung, zu 30% für Dachdeckungen und zu 20% für Kleinteile wie Traufen, Kehlen und Mauerabdeckungen eingesetzt. Das Aufkommen an Recycling-Bauzink beträgt ca. 40.000 t/a und entspricht damit etwa dem Marktvolumen zu Beginn der 70er Jahre.

Das durchschnittliche Marktvolumen für Bauzink kann für die vergangenen 30 Jahre mit jährlich ca. 69.000 t/a angenommen werden. Bei einer technischen Lebensdauer von durchschnittlich 30 Jahren ergibt dies eine insgesamt der Bewitterung ausgesetzte Zink-Oberfläche von 260 km² (entspr. 260 Mio m²) für Deutschland. Bei einer durchschnittlichen Abschwemmrate von 3,0 g/m²a (entsprechend 0,4 µm/a) ergibt sich eine Abschwemmung von insgesamt ca. 780 t/a.

Konzentrationen und Frachten

Die Konzentration eines Stoffes, hier also eines Metalls, ist die jeweilige Menge bezogen auf eine Volumeneinheit des transportierenden Mediums, hier also des Wassers. Sie wird in g/m³ oder mg/l angegeben. Konzentrationen sind leicht messbar und werden z.B.

als Grenzwerte für industrielle Einleitungen vorgegeben. Sie sind aber für einen Eintrag in die Umwelt nur in Verbindung mit dem Volumenstrom aussagefähig. Für Konzentrationen von Stoffen im Dachabflusswasser haben auch die Vorbelastung des Regenwassers aus der Atmosphäre und die trockenen Ablagerungen auf der Dachfläche vor dem Regenereignis eine Bedeutung.

Als Fracht wird die Menge z.B. eines Metalls bezeichnet, die in einem Abfluss oder einem Fluss pro Zeiteinheit transportiert wird, angegeben in kg/a oder t/a. Sie ergibt sich als Produkt aus der Konzentration und dem Volumenstrom. Die Fracht ist damit das entscheidende Maß für den Eintrag in die Umwelt aus der jeweiligen Quelle. Bei hohen Volumenströmen, z.B. bei Industrieleitungen, führen auch schon geringe Konzentrationen zu hohen Frachten.

Für die Niederlande wurde die Zink-Konzentration in Flüssen in Abhängigkeit von der Jahreszeit gemessen (s. Abbildung 2). Dabei stellte sich heraus, dass die Konzentration im August mit ca. 10 bis 18 µg/l am niedrigsten ist und im Januar auf Werte von ca. 32 bis 68 µg/l ansteigt.

In der Graphik sind die Zink-Konzentrationen dargestellt. Die Unterschiede der Metall-Frachten in den Flüssen sind noch ausgeprägter, als es die Graphik vermuten lässt, da die Flüsse im Winter mehr Wasser führen. Es wird also im Winter eine hohe Fracht in einer großen Wassermenge, im Sommer hingegen eine niedrige Fracht in einer geringen Wassermenge

transportiert. Man geht davon aus, dass diese Schwankungen natürliche Ursachen haben.

In den folgenden Abschnitten werden die möglichen Einträge von Kupfer und Zink aus Dächern, Dachrinnen und Fallrohren dargestellt. Als Haupteintragspfade werden die Versickerung, Trennkanalisation und Mischkanalisation betrachtet. In einem weiteren Schritt wird der Verbleib der Einträge näher untersucht.

Eintragspfade bei der urbanen Bebauung

Für den Eintrag von Kupfer und Zink gibt es drei Haupteintragspfade mit verschiedenen Verursachern, die in der Abb. 3 dargestellt sind. Zu unterscheiden sind Versickerung, Trennkanalisation und Mischkanalisation.

Bei der Versickerung zeichnet sich in jüngster Zeit eine Trendwende im Umgang mit dem Niederschlagswasser ab. Die Kommunen setzen verstärkt auf das Prinzip der Vermeidung von Abwasser. Regenwasser soll bereits am Entstehungsort versickert werden. Niederschlagswasser wird von den befestigten und versiegelten Flächen zu den angrenzenden Bodenbereichen geführt und dort versickert. Im Fall der angesprochenen Dachflächen wird das Regenwasser über Regenrinnen und Fallrohre zur oberflächlichen Versickerung der Versickerungsanlage zugeführt. Darüber hinaus sind durch die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall allgemeine Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser herausgegeben worden [2].

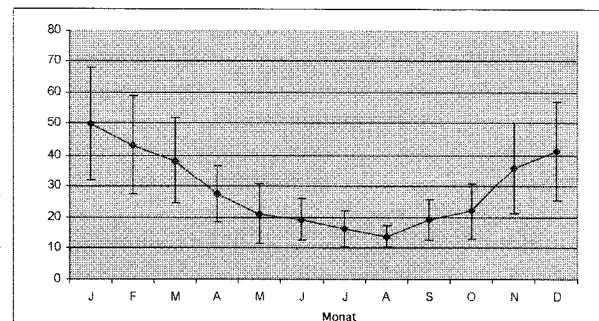


Abb. 2: Saisonale Schwankungen der Zink-Konzentration in 20 Niederländischen Flüssen – Mittelwerte für alle Flüsse von 1990 bis 1998 (error bar +SD) [18].

Bei der Trennkanalisation wird das häusliche und industrielle Schmutzwasser getrennt von anfallendem Niederschlagswasser abgeleitet. Das Niederschlagswasser kann separat auf dem kürzesten Wege einem Vorfluter zugeleitet werden, ohne das andere Kanalnetz oder die daran anschließende Kläranlage zu belasten.

Bei der Mischkanalisation wird im Gegensatz zur Trennkanalisation Schmutzwasser und Niederschlagswasser gemeinsam in einem Rohrleitungssystem der Kläranlage zugeleitet.

Die Deposition beschreibt die Ablagerung von Schadstoffen aus der Luft. Grundsätzlich wird zwischen einer trockenen Deposition, d.h. dem Staubniederschlag, und einer nassen Deposition, dem Eintrag von Schadstoffen über das Niederschlagswasser, unterschieden.

Metalleinträge über Versickerung

Die Versickerung von Regenwasser geschieht über besondere Vorrichtungen wie Mulden, Rigolen, Rohr-Rigolen, Schächte oder Becken. Neue Untersuchungen in Berlin [11] haben gezeigt, dass Befürchtungen für eine punktförmige Belastung für Boden und Grundwasser unbegründet sind. In dem Beprobungs- und Untersuchungsprogramm wurden insgesamt 9 Schachtanlagen unterschiedlicher Betriebsdauer beprobt. Die älteste Anlage

ist seit 18 Jahren in Betrieb. Das Untersuchungsprogramm beschränkte sich nicht nur auf das Sediment innerhalb der Schachtanlage, sondern es wurden auch Bodenproben aus dem Sickerkörper außerhalb des Schachtes gezogen. Der Vergleich der Gesamtgehalte der untersuchten Bodenproben aus den Sickerkörpern mit den geogenen Hintergrundwerten für Berliner Böden ergab, dass bei Kupfer 93% und bei Zink 90% aller Proben unterhalb der Hintergrundwerte lagen. Weiterhin lassen sich in dem umgebenden Sickerkörper keine derartigen Einträge nachweisen. Der Grund könnten die vorhandenen Boden- und Sedimentschichten im Sickerschacht sein, die als Metallfallen oder -senken wirken. Außerdem ist die Metallmobilisierung bei der Einhaltung limitierender Randbedingungen (pH-Wert, organischer Anteil) geringer. Als Ergebnis aus dem oben zitierten Untersuchungsprogramm bleibt festzuhalten, dass auch unter ungünstigen Bedingungen kein Eintrag ins Grundwasser stattfindet.

Zur Abschätzung der Gesamteinträge von Kupfer und Zink aus Dächern, Dachrinnen und Fallrohren in Deutschland kann der derzeitige Anteil der Versickerung mit ca. 15% der Entwässerung abgeschätzt werden. Hypothetisch berechnet ergibt sich hieraus ein Gesamteintrag für Kupfer von ca. 13,5 t/a und für Zink von ca. 117 t/a. Zum Vergleich: Die versickerten Einträge in der Landwirtschaft über die

Schweine- und Rindergülle ergeben einen Wert für Kupfer von ca. 293 t/a und für Zink von ca. 1.432 t/a [1].

Metalleinträge über die Trennkanalisation

In diesem Abschnitt soll der Eintrag von Kupfer und Zink aus Dächern, Dachrinnen und Fallrohren über die Trennkanalisation dargestellt werden. Grundlage für diese hypothetische Berechnungen sind die exponierten Metallflächen, die Ab-

schwemmrate von den Metallflächen, die atmosphärische Depositionsrate, der Straßeneintrag, die Niederschlagsmenge sowie die befestigten Gebäude- und Verkehrsflächen. Zusätzlich wurde ebenfalls berücksichtigt, dass ca. 46,5% der Niederschläge über die Trennkanalisation in den Vorfluter abgeleitet und somit nicht in der Kläranlage behandelt werden [14, 16]. Der Eintrag von Kupfer bei der Trennkanalisation errechnet sich zu 2/3 über den Straßeneintrag. Das verbleibende Drittel teilt sich zu fast gleichen Anteilen in den Eintrag über die atmosphärische Deposition und der Abschwemmung von den Kupferflächen auf.

Für Zink wurden nach der gleichen Methode Berechnungen durchgeführt. Ungefähr die Hälfte des Eintrags kommt über die Straße in die Trennkanalisation. Die Eintragspfade atmosphärische Deposition und Abschwemmung von den Zinkflächen teilen sich die verbleibende Hälfte etwa zu gleichen Anteilen.

Bei den oben errechneten Werten handelt es sich um erste Zwischenergebnisse, die eine Reihe von zusätzlichen Faktoren wie z.B. die Einträge in die Sielhaut oder auch die Ablagerungen in den Kanalbauwerken nicht mit berücksichtigen. In einer Gesamtbilanzierung für die Trennkanalisation werden sich die Einträge in die Oberflächengewässer dadurch noch reduzieren.

Metalleinträge über die Mischkanalisation

Um den Eintrag von Kupfer und Zink von Metalldächern in die Mischkanalisation der Bundesrepublik Deutschland zu demonstrieren wurden in der Tabelle 4 vereinfachte Berechnungsergebnisse aufgeführt.

Für den Gesamteintrag von Kupfer und Zink über die Mischkanalisation in den Vorfluter ist berücksichtigt worden, dass bei einem Abscheidegrad von ca. 80% in der Kläranlage der überwiegende Anteil der Kupfer- und Zinkfracht im Klärschlamm verbleibt und nur ca. 20% des Gesamteintrages über den Vorfluter abfließen [21, 22].

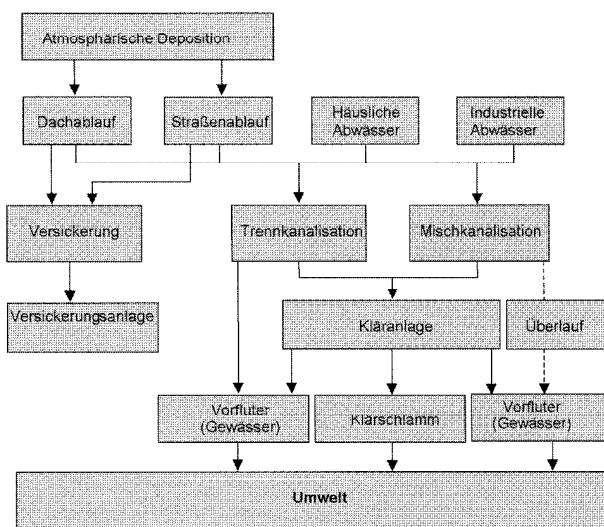


Abb. 3: Haupteintragspfade von Kupfer und Zink in die Umwelt

| BRD | Kupfer | Zink |
|--|----------------------------------|---------------------------------|
| Exponierte Metallfläche | 64,1 Mio m ² | 260 Mio m ² |
| Abschwemmrare | 1,34 g/(m ² a) | 3,0 g/(m ² a) |
| Depositionsrare | 0,00452 g/(m ² a) [3] | 0,0346 g/(m ² a) [3] |
| Straßeneintrag | 0,08 g/(m ² a) [3] | 0,27 g/(m ² a) [15] |
| Wohn- und Industriegebiete | 10.870 Mio m ² [20] | |
| Verkehrsfläche mit Kanalanschluss | 3.500 Mio m ² [3] | |
| Mittlerer Niederschlag | 800 mm/a [16] | |
| Anteil der Trennkanalisation | 46,5 % | |
| Gesamtmetalleintrag Trennkanalisation ohne Versickerung | 190 t/a | 944 t/a |
| Eintrag über die exponierten Metallflächen ohne Versickerung | 34 t/a | 308 t/a |

Tabelle 3: Abschätzung zur Trennkanalisation

Betrachtet man bei der Mischkanalisation die Abschwemmraten der Metalldächer, dann liegt der Eintrag aus Metalldächern in die Vorfluter für Kupfer bei ca. 1,4% und für Zink bei ca. 3,1% des Gesamteintrages. Daraus kann man schließen, dass andere Eintragspfade als Kupfer- und Zinkdächer einen deutlich höheren Anteil an der Kupfer- und Zinkfracht in der Mischkanalisation haben.

Metalleinträge in Oberflächengewässer

Aufgrund der Herkunft des Wassers kann man drei Beiträge für die gemessenen Kupfer- und Zinkkonzentrationen feststellen:

Die Kupfer- und Zinkfrachten im abfließenden Regenwasser ergeben sich durch die Erosion von Böden mit hohem geogenen Hintergrundwerten an Metallen sowie durch die Abschwemmung von landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Weitere wichtige Faktoren, die einen Einfluss auf die Kupfer- und Zinkkonzentrationen der Oberflächengewässer haben, sind der pH-Wert und der Salzgehalt des Gewässers. Sie können z. B. durch das Einleiten hoher Salzfrachten oder durch Regenwasser

industrielle Abwässer, als Direkteinleiter mit entsprechender Genehmigung, häusliche und industrielle Abwässer, als Indirekteinleiter über die Abläufe der Kläranlagen, Ablauf des Regenwassers, über Drainagesysteme und Trennkanalisation.

für Kupfer und Zink für das Jahr 1989 und 1998 an den verschiedenen Messstellen sind in der Abbildung 4 dargestellt.

Innerhalb des betrachteten Zeitraumes der Jahre 1989 und 1998 ist ablesbar, dass die Werte für Zink innerhalb der betrachteten Zeit deutlich gesunken sind. Für Kupfer hingegen haben sich die Konzentrationen über den betrachteten Zeitraum nicht signifikant geändert.

Unter der Annahme, dass die Haupteintragspfade für die Kupfer- und Zinkkonzentration im Rhein die industriellen Abwässer, die Abläufe der Kläranlagen sowie der Ablauf von Regenwasser sind und der Rhein einen mittleren Abfluss von

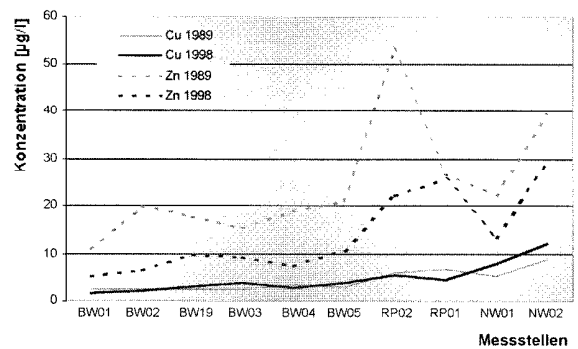


Abb. 4: Konzentrationen im Rhein für 1989 und 1998 von Kupfer und Zink – Gemessene Werte an Messstellen rheinabwärts (Quelle: [17])

| BRD | Kupfer | Zink |
|---|----------------------------------|---------------------------------|
| Einwohnerzahl | 82 Mio Einw. [16] | |
| Wasserverbrauch pro Einwohner | 150 l/d [6] | |
| Mittlere Abwasserkonzentration | 0,15 mg/l [16] | 0,5 mg/l [16] |
| Exponierte Metallfläche | 64,1 Mio m ² | 260 Mio m ² |
| Abschwemmrare | 1,34 g/(m ² a) | 3,0 g/(m ² a) |
| Depositionsrare | 0,00452 g/(m ² a) [3] | 0,0346 g/(m ² a) [3] |
| Straßeneintrag | 0,08 g/(m ² a) [15] | 0,27 g/(m ² a) [15] |
| Wohn- und Industriegebiete | 10.870 Mio m ² [20] | |
| Verkehrsfläche mit Kanalanschluss | 3.500 Mio m ² [3] | |
| Mittlerer Niederschlag | 800 mm/a [16] | |
| Anteil der Mischkanalisation | 53,5 % | |
| Gesamtmetalleintrag Mischkanalisation ohne Versickerung in die Kläranlage | 578 t/a | 2.287 t/a |
| Eintrag über die exponierten Metallflächen ohne Versickerung | 39 t/a | 355 t/a |
| Eintrag über die exponierten Metallflächen ohne Versickerung nach der Kläranlage in den Vorfluter | 8 t/a | 71 t/a |

Tabelle 4: Abschätzung zur Mischkanalisation

mit einem hohen Anteil an sauren Bestandteilen derart verändert werden, dass sich Kupfer und Zink aus dem Sediment lösen und damit die Kupfer- und Zinkkonzentration des Oberflächengewässers ansteigt. Zur Veranschaulichung der Problematik wird im Folgenden der Rhein als viel genutzter Vorfluter in Deutschland betrachtet. Die Messwerte der Konzentration im Rhein

2.270 m³/s [23] an der Messstelle Kleve-Bimmen hat, kann man aus den Konzentrationen von Kupfer und Zink an der Messstelle Kleve-Bimmen im Rhein die Jahresfracht für Kupfer und Zink berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt.

Um den Anteil der Metalldächer an dieser Jahresfracht für 1998 von 861 t/a Kupfer und 2047 t/a Zink im Rhein an der Messstelle Kleve-Bimmen abzuschätzen, muss die Fläche des Einzugsgebietes des Rheins mit 145.000 km² mit berücksichtigt werden. Die Daten zur Abschätzung sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Das Einzugsgebiet des Rheins an der Messstelle Kleve-Bimmen beträgt ca. 28% [23] der Fläche Deutschlands. Geht man davon aus, dass Metalldächer bundesweit annähernd gleichmäßig verteilt sind, so folgt da-

| Jahr | Cu-Konzentration im Rhein [µg/l] | Jahresfracht Kupfer [t/a] | Zn-Konzentration im Rhein [µg/l] | Jahresfracht Zink [t/a] |
|------|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| 1989 | 8,96 | 641 | 38,80 | 2778 |
| 1998 | 12,02 | 861 | 28,60 | 2047 |

Tabelle 5: Errechnete Jahresfracht aus der Cu- und Zn-Konzentration im Rhein (Messstelle Kleve-Bimmen)

aus ein maximaler Eintrag aus den Metalldächern im Einzugsgebiet der Messstelle Kleve-Bimmen von ca. 12 t/a Kupfer und ca. 106 t/a Zink. Dies ist ein prozentualer Anteil der Metalldächer an der Jahresfracht im Rhein für 1998 von ca. 1,4% für Kupfer und ca. 5,2% für Zink.

Zu den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Einträgen gibt es noch weitere, die im Rahmen einer ganzheitlichen Bilanzierung ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Hierzu gehören Einträge von Hofabläufen und Abdrift, Oberflächenabflüssen von unbefestigten Flächen, Erosionen, Drainagen, Wasserleitungen in Haushalt und Gewerbe, Stadtmöblierungen, Mobilisierung von Kupfer und Zink aus dem Sediment und der Sielhaut sowie nicht zuletzt Direkteinleitungen der Industrie und Einträge durch die Schifffahrt. Eine Berücksichtigung dieser Einleitungen, die hier nicht näher quantifiziert werden können, würde den Anteil der Metalleinleitungen aus der Außenhaut von Gebäuden noch deutlich verringern.

Die Einflüsse, die diese Eintragungen in der Umwelt bewirken können, werden im dritten Teil dieser Veröffentlichungsreihe im Heft 5-2002 dieser Zeitschrift behandelt.

Literatur

[1] ATV (Hrsg.), Ansätze der ATV-DVWK zu einer Neubewertung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung unter Berücksichtigung des Boden- und Verbraucherschutzes KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2001, Nr.10, S. 1374- 85
 [2] ATV (Hrsg.): Merkblatt ATV-DVWK-M 153 ATV-DVWK-Regelwerk: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Hennef: ATV, Februar 2000
 [3] Böhm, Eberhard; Hillenbrand, Thomas; Marscheider-Weidemann, Frank; Schempp, Christian; Fuchs, Stephan; Scherer, Ulrike: Bilanzierung des Ein-

trags prioritärer Schwermetalle in Gewässern. Berlin: Umweltbundesamt, 2000 – Forschungsvorhaben 298 22 243
 [4] Fallner, Markus: Metallabtrag und Metallabschwemmung von Metalldächern - Untersuchungsergebnisse der Freibewitterungsversuche in der Schweiz, In: BAU-METALL 4/2001
 [5] IKSR Internationale Kommission zum Schutz des Rheins: Bestandsaufnahme der Einträge prioritärer Stoffe, Dezember 1999
 [6] Koppe P. Stozek A.: Kommunales Abwasser. Essen: 4. Aufl., 1999
 [7] Korenromp, R.H.J.; Hollander, J.C.Th.: Diffuse emissions of zinc due to atmospheric corrosion of zinc and zinc coated (galvanized) materials, Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), TNO-MEP - 99/441, 1999
 [8] Odonevall Wallinder, I.; Verbiest, P.; Janssen, C.R.; Leygraf, C.: Environmental Effects of Zinc Runoff from Roofing Materials of Different Age as a Result of Atmospheric Corrosion, 14th International Corrosion Congress 1999, Cape Town
 [9] Odonevall Wallinder, I.; Verbiest, P.; He, W.; Leygraf, C.: Effects of exposure direction and inclination on the runoff rates of zinc and copper roofs, In: Corrosion Science 42 (2000)
 [10] Orzessek, K.; van Tilborg, W.J.M.; Reimerink, G.H.J.: Zink-Abtrag deutlich vermindert, In: Metall 5/96
 [11] Özgen, Ant; Ganter, Kathrin; Hegemann, Werner: Schadstoffrückhalt im Regenwassersickerschacht, Wasser Abwasser 2001; 7: 474-78
 [12] Pohl, W.H.; Behr, R.: Titanzink - Korrosionsverhalten bei atmosphärischer Beanspruchung, In: Metall 5/99
 [13] Priggemeyer, Sonja: System zur Verbesserung der Umweltqualität von Dachablaufwässern, Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Abschlußbericht AZ 10730, 1998
 [14] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Um-

welt, Fachserie 19, Seite 21. Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, Metzler, Poeschel, Stuttgart 1998
 [15] Stotz G, Knoche G.: Herkunft und Auswirkungen von Cu, Zn, Pb, und Hg aus diffusen Quellen auf Oberflächengewässer. Teil A, UBA Forschungsvorhaben 295 24 519, Berlin: UBA, November 1999; 121-23
 [16] Umweltbundesamt (Hrsg.): Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000. Berlin: UBA, 2001
 [17] Umweltbundesamt (Hrsg.): Ökobase Umwelatlas Version 4.0, Haan: Clemens Hölder GmbH, 2001
 [18] van Tilborg, W.J.M.: Emissies van Bouwmetallen in Nederland in perspectief, VTBC-Bericht 0103, Juli 2001
 [19] Verbiest, P.; Janssen, C.R.; Odonevall Wallinder, I.; Leygraf, C.: Environmental Effects of Zinc Runoff from Phosphated Zinc Sheets used for Building Applications, 14th International Corrosion Congress 1999, Cape Town
 [20] Wirtschaftsvereinigung Metalle WVM (Hrsg.): Hullmann, Heinz; Kraft, Udo; Lichtnecker; Herbert: Einsatz von Kupfer und Zink bei Dächern, Dachrinnen und Fallrohren – Sachstandsbericht, Düsseldorf: WVM, 2001
 [21] Bischofsberger, W.; Ruf, M.; Winkler, R.: Herkunft und Verbleib von Schwermetallen im Abwasser und Klärschlamm der Landeshauptstadt München, München: Prüflam für Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der TU München, Bay. Landesanstalt für Wasserforschung, 1981
 [22] Hoffmann, H.-J.: Untersuchungen des Anreicherungsverhaltens von Schwermetallen in Klärschlämmen, in: Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung (Hrsg.): Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie: Schwermetalle im Abwasser, Gewässer und Schlamm, München, R. Oldenburger Verlag 1982
 [23] Umweltbundesamt (Hrsg.): Jahresbericht 1995, Berlin, UBA, 1995

(1) Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Hullmann, hwp - hullmann, willkommen & partner, Hannover, hwp@hwp-hullmann-willkomm.de
 (2) Dipl.-Ing. Udo Kraft, Institut für Energie- und Umweltechnik e.V., Iuta, Duisburg, iuta@online.de

| Bezug | Daten |
|---|---------------------------------|
| Fläche BRD | 357.020 Mio m ² [16] |
| Einzugsgebiet Rhein an der Messstelle Kleve-Bimmen NW02 | 145.000 Mio m ² [16] |
| Exponierte Fläche Kupfer BRD | 64,1 Mio m ² [20] |
| Exponierte Fläche Zink BRD | 260 Mio m ² [2] |
| Kupfereintrag der exponierten Flächen ohne Versickerung | 12 t/a |
| Zinkeintrag der exponierten Flächen ohne Versickerung | 106 t/a |

Tabelle 6: Daten zur Abschätzung des Anteils der Metalldächer an den Jahresfrachten im Rhein (Messstelle Kleve-Bimmen)