

# **Einsatz von Kupfer und Zink bei Dächern, Dachrinnen und Fallrohren**

## **Sachstandsbericht**

von

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Hullmann  
hwp – hullmann, willkomm & partner GbR, Hannover

Dipl. Ing. Udo Kraft  
Gruppenleiter im Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg

Dr. med. Dipl.-Chem. Herbert Lichtnecker  
Medizinisches Institut für Umwelt- und Arbeitsmedizin, Erkrath

September 2001

im Auftrag der

Heinz Hullmann\*, Udo Kraft\*\*, Herbert Lichtnecker\*\*\*

## **Einsatz von Kupfer und Zink bei Dächern, Dachrinnen und Fallrohren**

### **Sachstandsbericht**

\* Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Hullmann  
hwp – hullmann, willkomm & partner GbR, Hannover

\*\* Dipl.-Ing. Udo Kraft  
Gruppenleiter im Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg

\*\*\* Dr. med. Dipl.-Chem. Herbert Lichtnecker  
Medizinisches Institut für Umwelt- und Arbeitsmedizin, Erkrath

Das Bewusstsein für eine intakte Umwelt nimmt erfreulicherweise seit Jahren deutlich zu. Dies zeigt sich nicht nur in einem zunehmend umweltbewussten Verhalten der Bevölkerung, sondern auch in entsprechenden Vorschriften, wenn es um den Eintrag von Stoffen in die Umwelt geht. Insbesondere ist hier der Schutz des Bodens und des Wassers angesprochen.

Ein wichtiger Aspekt ist dabei der Eintrag von Schwermetallen in Gewässer. Der Begriff „Schwermetall“ ist dabei insofern ungenau, als er nach dem spezifischen Gewicht definiert ist, nicht aber nach der Wirkung der Metalle in der Umwelt. Während Schwermetalle wie Quecksilber oder Cadmium grundsätzlich toxisch wirken sind andere Schwermetalle wie Eisen, Zink oder Kupfer „essentiell“, d.h. für die Existenz von Pflanzen, Tieren und Menschen in der richtigen Dosierung lebensnotwendig.

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 ein Teil abgeschwemmt wird und mit dem Regenwasser in die Kanalisation oder in den Boden von Versickerungsanlagen gelangt.

Das Maß dieser Einleitungen und die Frage ihrer Schädlichkeit wird derzeit kontrovers diskutiert. In dem folgenden Sachstandsbericht 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.

# 1. Abschwemmraten und Konzentrationen von Kupfer und Zink im Dachablauf

## 1.1 Definitionen und Zusammenhänge

Zunächst sind einige Begriffe und Zusammenhänge zu erläutern, die für die folgenden Darstellungen von Bedeutung sind.

**Korrosion** ist eine physikochemische Wechselwirkung, bei welcher ein Metall unter dem Einfluss der jeweiligen Umwelt so reagiert, dass eine messbare Veränderung entsteht <sup>1</sup>). Der Begriff 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, zu einer Patinierung der Metalloberfläche führen, die einen dauerhaften Schutz des Metalls bewirkt. 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 ist bei deckschichtbildenden Werkstoffen 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 Dachablaufwassers in den Filterkörper der Versickerungsanlage. Die **Abschwemmrate** (engl.: run off rate) wird in  $\text{g/m}^2\text{a}$  angegeben. Sie ist die für einen Eintrag in die Umwelt entscheidende Größe.

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  $\text{g/m}^3$  oder  $\text{mg/l}$  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 Dachablaufwasser 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, in  $\text{kg/a}$  oder  $\text{t/a}$  angegeben. Die Fracht ergibt sich als Produkt aus der Konzentration und dem Volumenstrom. Sie ist damit das entscheidende Maß für den Eintrag in die Umwelt aus der jeweiligen Quelle. Bei hohen Volumenströmen, z.B. bei Industrieinleitungen, führen auch geringe Konzentrationen zu hohen Frachten.

---

<sup>1</sup> s.a. DIN EN ISO 8044 : 1999

## 1.2 Abschwemmraten von Kupfer und Zink

Die Metalle Kupfer und Zink korrodieren unter dem Einfluss der Atmosphäre an ihrer Oberfläche. Das Korrosionsprodukt, die Patina, schützt die metallische Oberfläche vor einer weiteren Korrosion, so dass der Korrosionsprozess sich mit fortschreitender Zeit verlangsamt.

Der Korrosionsprozess ist von vielen Faktoren abhängig. Die wichtigsten sind der  $\text{SO}_2$ -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 Einflussfaktor ist der unmittelbare Einfluss von Chloriden, beispielsweise in der Nähe des Brandungsbereiches an der Küste oder durch Streusalz – für Kupfer und Zink in Dächern, Dachrinnen und Fallrohren allerdings nur von lokaler Bedeutung.

Die  $\text{SO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre hat dank der Bemühungen um den Umweltschutz wesentlich abgenommen. In der Zeit von 1978 bis 1992 nahm sie beispielsweise in Stockholm von ca.  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf ca.  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ab. Diese Abnahme im Zusammenhang mit der Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit von Zink in dem selben Zeitraum ist in Abbildung 1 dargestellt <sup>2)</sup>.

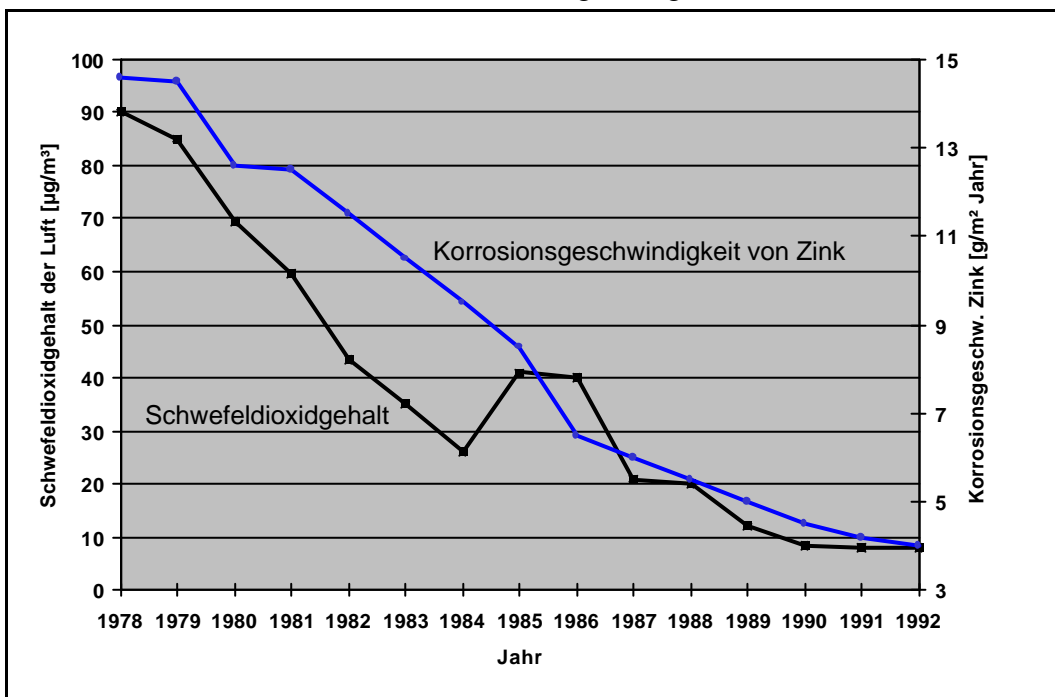


Abbildung 1 Verringerung des  $\text{SO}_2$ -Gehaltes der Luft und Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit von Zink in Stockholm in der Zeit von 1978 bis 1992 <sup>3)</sup>

Ein ähnlicher Zusammenhang wurde für die Jahre 1991 bis 1998 für die Abschwemmrate von Titanzink und die  $\text{SO}_2$ -Konzentration in Hannover-Herrenhausen dokumentiert und ist in Abbildung 2 dargestellt <sup>4)</sup>. Der Durch-

<sup>2)</sup> Orzessek, K. et al.: Zink-Abtrag

<sup>3)</sup> Orzessek, K. et al.: Zink-Abtrag deutlich vermindert

<sup>4)</sup> Pohl, W.H. et al.: Titanzink – Korrosionsverhalten

schnittswert der  $\text{SO}_2$ -Konzentration für Deutschland lag bei unterschiedlichen Rechenansätzen im Jahr 1996 bei 7 bzw. 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  Luft. Für die Niederlande wurden 6 bzw. 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ermittelt <sup>5</sup>). 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.

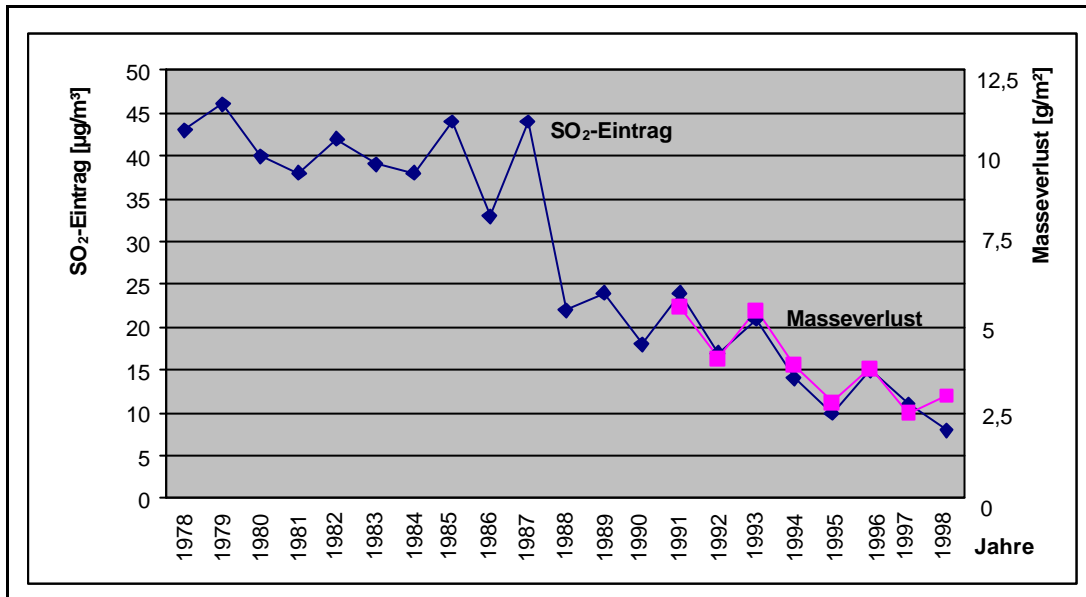


Abbildung 2 Korrelation zwischen dem  $\text{SO}_2$ -Gehalt der Luft (1978 bis 1998) und der Abschwemmrate von walzblankem, unter  $45^\circ$  geneigtem, nach Westen orientiertem Titanzink (1991 bis 1998) in Hannover-Herrenhausen (in Anlehnung an: Pohl et al.: Titanzink – Korrosionsverhalten)

Die Korrosionsprodukte von Kupfer und Zink bilden die Patina, die weitgehend beständig ist und das darunter liegende Metall vor weiterer Korrosion schützt. Lediglich ein Teil der Patina wird durch Wettereinflüsse abgeschwemmt. Während zu Beginn der Bewitterung von Kupfer- und Zink-Oberflächen die Korrosionsrate deutlich größer ist als die praktisch gleichbleibende Abschwemmung, stabilisiert sich dieses Verhältnis im Laufe der Zeit, so dass sich nach mehreren Jahren sich Korrosions- und Abschwemmrate nahezu angleichen. Dieser Zusammenhang wird von Faller auf der Grundlage von an verschiedenen Orten in der Schweiz durchgeführten Bewitterungsversuchen dargestellt <sup>6</sup>). Bei Zink verbleiben demnach ca. 30 bis 40 % der Korrosionsprodukte auf der Metalloberfläche und bilden die Patina, bei Kupfer sind es ca. 75 bis 80 %.

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 Vorflu-

<sup>5</sup> Korenromp, R.H.J. et al.: Diffuse emissions

<sup>6</sup> Faller, M.: Metallabtrag und Metallabschwemmung

ter oder in die Versickerungsanlage gelangt. Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich daher auf die Abschwemmrate.

Bei **Kupfer** sind die Parameter  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  und die Nasszeit für die Abschwemmrate von Bedeutung. Dabei gewinnen mit abnehmendem  $\text{SO}_2$ -Gehalt der Luft die beiden anderen Faktoren Nasszeit und  $\text{O}_3$ -Gehalt der Luft relativ an Bedeutung für den Korrosionsprozess und für die Abschwemmung.

In der Untersuchung eines großen Kupferdaches in Luzern wurde eine Abschwemmrate von  $1,8 \text{ g/m}^2\text{a}$  bzw.  $0,2 \text{ }\mu\text{m/a}$  ermittelt <sup>7)</sup>. Das untersuchte Dach liegt in städtischem Klima, die hier ermittelte Abschwemmrate wird als Durchschnittswert für schweizerische Klimabedingungen angesehen. Betrachtet man die Anwendung von Kupfer und Zink in der Baupraxis, so ergibt sich ein nach Orientierung und Neigung anderer Durchschnittswert. Die Abschwemmrate, die diesem Durchschnitt entspricht, liegt nach Odnevall Wallinder <sup>8)</sup> unter den Werten, die in standardisierten Experimenten gemessen werden.

Berücksichtigt man dies, so können für eine Abschätzung zukünftiger Abschwemmungen  **$1,3 \text{ g/m}^2\text{a}$  entsprechend  $0,15 \text{ }\mu\text{m/a}$  als Durchschnittswert für Abschwemmraten von Kupfer unter mitteleuropäischen Klimabedingungen** als realistisch angenommen werden (s.a. Anhang 8). Dieser Wert liegt zwischen den Messwerten von Priggemeyer in Osnabrück <sup>9)</sup> und Odnevall Wallinder in Stockholm ( $1,1 \text{ g/m}^2\text{a}$ ) einerseits und Faller in Dübendorf <sup>10)</sup> andererseits ( $1,8 \text{ g/m}^2\text{a}$ ) und erscheint angesichts eines noch sinkenden  $\text{SO}_2$ -Gehaltes der Luft für die Zukunft als angemessen. Dieser Wert wird daher den weiteren Rechnungen in den Kapiteln 1.4 und 2 zugrundegelegt.

Für **Zink** wurde aus der Beobachtung von Korrosionsprozessen eine Formel abgeleitet, welche die Abhängigkeit der Abschwemmrate von dem  $\text{SO}_2$ -Gehalt der Luft beschreibt. Sie lautet:  $\text{Abschwemmrate} [\text{g/m}^2\text{a}] = 1,36 + 0,164 \cdot [\text{SO}_2]$ , wobei  $[\text{SO}_2]$  die  $\text{SO}_2$ -Konzentration in  $\mu\text{g/m}^3$  angibt <sup>11)</sup>. Für die Niederlande wurde eine Abnahme der Abschwemmraten bei Zink, bedingt durch die Abnahme der  $\text{SO}_2$ -Konzentration, festgestellt. Die ermittelten Werte sanken von 15 bis  $45 \text{ g/m}^2\text{a}$  ( $2,1$  bis  $6,3 \text{ }\mu\text{m/a}$ ) im Jahre 1980 auf 4 bis  $10 \text{ g/m}^2\text{a}$  ( $0,6$  bis  $1,4 \text{ }\mu\text{m/a}$ ) im Jahre 1995. Die Korrosionsrate beträgt nach 20 Jahren nur noch 60 % des Wertes in den ersten fünf Jahren. Nach zehn Jahren liegt die Abschwemmrate bei etwa  $2/3$  der Korrosionsrate <sup>12)</sup>. Als Richtwert werden für 1999 2 bis  $3 \text{ g/m}^2\text{a}$  ( $0,3$  bis  $0,4 \text{ }\mu\text{m/a}$ ) angegeben.

Den weiteren Rechnungen in den Kapiteln 1.4 und 2 wird ein Wert von  **$0,4 \text{ }\mu\text{m/a}$  entsprechend  $3,0 \text{ g/m}^2\text{a}$  für die durchschnittliche Abschwemmrate von Zink** zugrundegelegt.

---

<sup>7</sup> EMPA: Wasseruntersuchungen – Korrosionsprüfungen

<sup>8</sup> Odnevall Wallinder, I. et al.: Effects of exposure

<sup>9</sup> Priggemeyer, S.: System zur Verbesserung

<sup>10</sup> Faller, M.: Metallabtrag und Metallabschwemmung

<sup>11</sup> Odnevall Wallinder, I. et al.: Zinc Runoff from Roofing Materials, sowie Verbiest, P.: Zinc Runoff from Phosphated Zinc Sheets

<sup>12</sup> Korenromp, R.H.J. et al.: Diffuse emissions

Da die Korrosions- und die Abschwemmraten mit der abnehmenden SO<sub>2</sub>-Belastung der Luft zurückgehen, nimmt ebenso das Maß der aus Dächern, Dachrinnen und Fallrohren abgeschwemmten Korrosionsprodukte von Kupfer und Zink ab.

### 1.3 Konzentrationen von Kupfer und Zink

Die Konzentrationen von Kupfer und Zink im Dachablaufwasser hängen nicht nur von der Abschwemmung der verwendeten Metalle ab, sondern ganz entscheidend auch von der Art des Regenereignisses, das zu einer Abschwemmung führt. Untersuchungen zeigen <sup>13)</sup>, dass zwischen kräftigen Schauern und Nieselregen ebenso unterschieden werden muss wie zwischen dem Abflusswasser zu Beginn und dem im weiteren Verlauf eines Regenereignisses. Außerdem hat die Dauer der vorangegangenen Trockenperiode, in welcher auch Stoffe aus der Atmosphäre abgelagert werden, einen Einfluss auf die Konzentration.

Die Konzentration der abgeschwemmten Metalle kann in der ersten Niederschlagsmenge (first flush) hohe Werte annehmen. Der weitere Verlauf der Konzentration verläuft exponentiell abfallend. In den Versuchen an 2 m<sup>2</sup> großen Tafeln aus Kupfer und Zink – es wurde nur die Regenwassermenge gemessen, die unmittelbar auf diese Metallflächen aufgetroffen und von ihnen abgeleitet worden war – lagen Spitzenwerte für **Kupfer** bei bis zu 18 mg/l und bei **Zink** bei bis zu 50 mg/l. Diese Spitzenwerte traten aber nur in den ersten 0,8 l (entsprechend ca. 0,6 mm Niederschlag) auf. Länger anhaltender Regen bewirkt Durchschnittswerte, die dann bei ca. 2 mg/l für Kupfer und bei ca. 4 mg/l für Zink liegen <sup>14)</sup>.

Messungen an verschiedenen Punkten des Regenwasserkanals des mit **Kupfer** eingedeckten Kongress- und Kulturzentrums Luzern <sup>15)</sup> zeigten bei definierten Regenereignissen Konzentrationen von 3,7 mg/l in der first-flush-Phase am Einleitungsrohr, 0,5 ... 1,0 mg/l im öffentlichen Regenwasserkanal unmittelbar nach der Einleitung und 0,4 ... 0,6 mg/l am Eintritt des Regenwasserkanals in den Vierwaldstätter See. Eine durch die Einleitung verursachte Erhöhung der Konzentration von Kupfer im See war bereits 3 m außerhalb der Einleitungsstelle nicht mehr feststellbar.

Diese Zahlen verdeutlichen die Geringfügigkeit des Effektes, den die Einleitung von Dachablaufwasser in größere Gewässer hat. Andererseits treten die höheren Konzentrationen besonders in der first-flush-Phase und in dem geschlossenen Regenwasserkanal auf, der als technische Anlage nicht für die Ansiedlung tierischer oder pflanzlicher Organismen ausgelegt ist.

Für die Wirkung der Metalle Kupfer und Zink in der weiteren Umwelt sind aber nicht die Spitzenkonzentrationen, sondern langfristig nur die Frachtraten, d.h. die insgesamt beförderte Metallmenge, ausschlaggebend.

---

<sup>13</sup> Priggemeyer, S.: System zur Verbesserung

<sup>14</sup> Faller, M.: Metallabtrag und Metallabschwemmung

<sup>15</sup> EMPA: Wasseruntersuchungen – Korrosionsprüfungen

## 1.4 Frachten von Kupfer und Zink in Deutschland

### 1.4.1 Exponierte Kupferflächen

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 <sup>16</sup>). Der Einsatz für Renovierungen bleibt bei dieser Rechnung unberücksichtigt.

Errechnet man hieraus die einer Bewitterung ausgesetzten Fläche, so müssen dabei zunächst die unterschiedlichen Materialstärken berücksichtigt werden. Sie liegen für Dächer bei 0,6 bis 0,7 mm, bei Fassaden bei 0,7 bis 1,0 mm. Der nach den Mengen in der Anwendung gewogene Durchschnittswert beträgt 0,65 mm. Daraus errechnet sich eine Gesamtfläche von 7,1 Mio. m<sup>2</sup>. Hiervon ist die Fläche für Innenanwendungen (ca. 2.000 t/a) in Höhe von ca. 0,5 Mio. m<sup>2</sup> abzuziehen, so dass als Teil der Gebäudehülle eine Fläche von 6,6 Mio. m<sup>2</sup> 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. Die Ermittlung der benetzten Flächen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 *Im Jahre 2000 in der Außenhaut von Gebäuden in Deutschland montierte Kupferoberflächen (Summe und Aufteilung nach Mitteilung der Wirtschaftsvereinigung Metalle, Düsseldorf, vom 07.2001)*

Nr.	Bauteile (im Jahre 2000 montiert)	Flächen
1.	Dachrinnen und Fallrohre: 50 % von 40.000 t abzgl. 10 % Verschnitt, Aufweitungen, Überlappungen abzgl. nicht benetzte Flächen (50 % von 3,21 Mio. m <sup>2</sup> ) <b>benetzte Flächen von Dachrinnen und Fallrohren</b>	3.570.000 m <sup>2</sup> - 360.000 m <sup>2</sup> - 1.610.000 m <sup>2</sup> <b>1.600.000 m<sup>2</sup></b>
2.	Dachanwendungen: 35 % von 40.000 t abzgl. 25 % Falze, Abkantungen, Überdeckung, Verschnitt <b>benetzte Kupfer-Dachflächen</b>	2.420.000 m <sup>2</sup> - 610.000 m <sup>2</sup> <b>1.810.000 m<sup>2</sup></b>
3.	Fassadenanwendungen: 10 % von 40.000 t davon ca. 10 % <b>dachäquivalente Benetzung</b>	600.000 m <sup>2</sup> <b>60.000 m<sup>2</sup></b>
4.	<b>Innenanwendungen ohne Benetzung:</b> 5 % von 40.000 t entsprechend ca. 0,5 Mio. m <sup>2</sup>	<b>0 m<sup>2</sup></b>
5.	<b>Summe</b> der im Jahre 2000 montierten von Regen/Wasser benetzten Flächen	<b>ca. 3.470.000 m<sup>2</sup></b>

Setzt man die so ermittelte benetzte Fläche (3,47 Mio. m<sup>2</sup>) ins Verhältnis zu der in der Außenhaut von Gebäuden montierten Gesamtfläche (6,59 Mio. m<sup>2</sup>), so sind dies 52,7 %. **Es zeigt sich also, dass nur ca. 53 % der in der Außenhaut von Gebäuden eingesetzten Kupferflächen benetzt und somit der Betrachtung von Kupferabschwemmungen zugrundegelegt werden können.**

<sup>16</sup> Mitteilung der Wirtschaftsvereinigung Metalle, Düsseldorf, 07.2001



In Tabelle 2 sind die seit 1950 in der Außenhaut von Gebäuden montierten Kupferflächen ermittelt, also etwa der Gesamtbestand. Im Durchschnitt werden ca. 20 % des montierten Materials für Renovierungen eingesetzt. Bezogen auf den Bestand (s. Tabelle 2) bedeutet das, dass dieser nur 80 % von 888.000 t, also ca. 700.000 t entsprechend ca. 121,0 Mio. m<sup>2</sup> umfasst. Davon werden ca. 53 % benutzt, was einer Fläche von ca. 64,1 Mio. m<sup>2</sup> entspricht.

*Tabelle 2 Seit 1950 insgesamt in der Außenhaut von Gebäuden in Deutschland montierte Kupferoberflächen (nach Mitteilung der Wirtschaftsvereinigung Metalle, Berlin, vom 07.2001). In den letzten Jahren ist eine Stagnation bzw. ein Rückgang der montierten Kupferflächen zu verzeichnen.*

Zeitraum	Bauteile (Bestand, 1950 bis 2000 montiert)	Flächen
1950 - 1975	ca. 91.000 t : 8,9 t/m <sup>3</sup> : 0,00065 m =	15.730.000 m <sup>2</sup>
1976 – 1980	ca. 100.000 t : 8,9 t/m <sup>3</sup> : 0,00065 m =	17.286.000 m <sup>2</sup>
1981 – 1985	ca. 134.000 t : 8,9 t/m <sup>3</sup> : 0,00065 m =	23.163.000 m <sup>2</sup>
1986 – 1990	ca. 158.000 t : 8,9 t/m <sup>3</sup> : 0,00065 m =	27.312.000 m <sup>2</sup>
1991 - 1995	ca. 201.000 t : 8,9 t/m <sup>3</sup> : 0,00065 m =	34.745.000 m <sup>2</sup>
1996 - 2000	ca. 204.000 t : 8,9 t/m <sup>3</sup> : 0,00065 m =	35.264.000 m <sup>2</sup>
<b>1950 - 2000</b>	<b>Gesamtsumme (ca. 888.000 t)</b>	<b>153.500.000 m<sup>2</sup></b>

**Das bedeutet, dass ca. 64,1 Mio. m<sup>2</sup> im deutschen Gebäudebestand als Dachflächen und Dachentwässerungen aus Kupfer der Bewitterung exponiert werden. Bei einer durchschnittlichen Abschwemmrate von 0,15 µm/a (entsprechend 1,3 g/m<sup>2</sup>a) ergibt sich daraus eine Abschwemmung von insgesamt ca. 90 t/a.**

Im Kapitel 2 werden die Einträge von Kupfer in die Umwelt untersucht. Dabei wird die hier errechnete Abschwemmung von ca. 90 t/a Kupfer zugrunde gelegt.

#### 1.4.2 Exponierte Zinkflächen

Zur Zeit liegt das Marktvolumen für Bauzink in Deutschland bei ca. 120.000 t/a entsprechend ca. 23,2 Mio. m<sup>2</sup>/a. Es wird etwa zu 50 % für die Dachentwässerung, zu 30 % für Dachdeckungen und zu 20 % für Kleinteile wie Traufen, Kehlen und Mauerabdeckungen eingesetzt (s. Tabelle 3). 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. Es wird mit einer Dicke von 0,7 mm, mit 10 % Abfall bei der Montage und 25 % Reduktion der Oberfläche durch Überdeckungen eingebaut. Bei einer durchschnittlichen technischen Lebensdauer (useful lifetime, LT) von 30 Jahren ergibt sich daraus eine insgesamt **der Bewitterung ausgesetzte Zink-Oberfläche von 260 km<sup>2</sup>** (entspr. 260 Mio. m<sup>2</sup>) für Deutschland. Davon finden sich ca. 200 km<sup>2</sup> in den alten und ca. 60 km<sup>2</sup> in den neuen Bundesländern. Das genannte Marktvolumen berücksichtigt, dass in

den neuen Bundesländern praktisch erst seit 10 Jahren Bauzink eingesetzt wird<sup>17</sup>). Der Einsatz für Renovierungen bleibt bei dieser Rechnung unberücksichtigt. Es handelt sich daher um eine ausgesprochen konservative Schätzung.

Tabelle 3      *Derzeit (2000) jährlich in Deutschland montierte Zink-Oberflächen (Summe und Aufteilung nach Mitteilung der WVM 07.2001)*

Nr.	Bauteile (Marktvolumen 2000)	Flächen
1.	Dachrinnen und Fallrohre: 50 % von 120.000 t, 0,7 mm abzgl. 10 % Verschnitt, Aufweitungen, Überlappungen abzgl. nicht benetzte Flächen (50 % von 10,8 Mio. m <sup>2</sup> )	11.970.000 m <sup>2</sup> /a - 1.180.000 m <sup>2</sup> /a - 5.400.000 m <sup>2</sup> /a
	<b>Benetzte Flächen von Dachrinnen und Fallrohren</b>	<b>5.390.000 m<sup>2</sup>/a</b>
2.	Dachanwendungen: 30 % von 120.000 t, 0,7 mm abzgl. 25 % Falze, Abkantungen, Überdeckung, Verschnitt	7.180.000 m <sup>2</sup> /a - 1.790.000 m <sup>2</sup> /a
	<b>Benetzte Zink-Dachflächen</b>	<b>5.390.000 m<sup>2</sup>/a</b>
3.	Kleinteile (Traufen, Kehlen, Mauerabdeckungen): 20 % von 120.000 t, 0,7 mm, abzgl. 10 % Verschnitt, Aufweitungen, Überlappungen abzgl. nicht benetzte Flächen (50 % von 4,31 Mio. m <sup>2</sup> )	4.790.000 m <sup>2</sup> /a - 480.000 m <sup>2</sup> /a - 2.160.000 m <sup>2</sup> /a
	<b>Benetzte Zink-Kleinteile</b>	<b>2.160.000 m<sup>2</sup>/a</b>
4.	<b>Summe</b> der im Jahre 2000 montierten von Regen/Wasser benetzten Flächen	<b>12.940.000 m<sup>2</sup>/a</b>

**Bei einer durchschnittlichen Abschwemmrate von 0,4 µm/a (entsprechend 3,0 g/m<sup>2</sup>a) ergibt sich eine Abschwemmung von insgesamt ca. 780 t/a.** Im Kapitel 2 werden die Einträge von Zink in die Umwelt untersucht. Dabei wird die hier errechnete Abschwemmung zugrunde gelegt.

### 1.4.3 Metallfrachten

Die Frachten, also die Mengen der Metalle, die in einem Gewässer (Fluss, Vorfluter) pro Zeiteinheit transportiert werden, sind die eigentlichen Größen, die eine Aussage über die jeweilige Wasserqualität erlauben. Anhand der oben abgeschätzten in Deutschland insgesamt installierten und der Bewitterung ausgesetzten Kupfer- und Zink-Flächen werden die daraus resultierenden Frachten im Kapitel 2 näher betrachtet.

Für die Niederlande wurde die Zink-Konzentration in Flüssen in Abhängigkeit von der Jahreszeit gemessen (s. Abbildung 3). Dabei stellte sich heraus, dass die Konzentration im August mit ca. 10 bis 18 µg/l am niedrigsten ist und bis zum Januar auf Werte von ca. 32 bis 68 µg/l ansteigt.

Derzeit wird davon ausgegangen, dass der Grund hierfür die biologischen Aktivitäten sind: Im Herbst wird Biomasse abgebaut, die in ihr gebundenen essentiellen Metalle werden freigesetzt und stehen im Winter zur Verfügung, um neue biologische Aktivitäten zu ermöglichen. Dadurch wird der Zinkgehalt im Frühjahr in

<sup>17</sup> IZA-Schätzung auf der Basis von Industriedaten

neuer Biomasse gebunden und erreicht im Sommer wieder seinen niedrigen Stand.

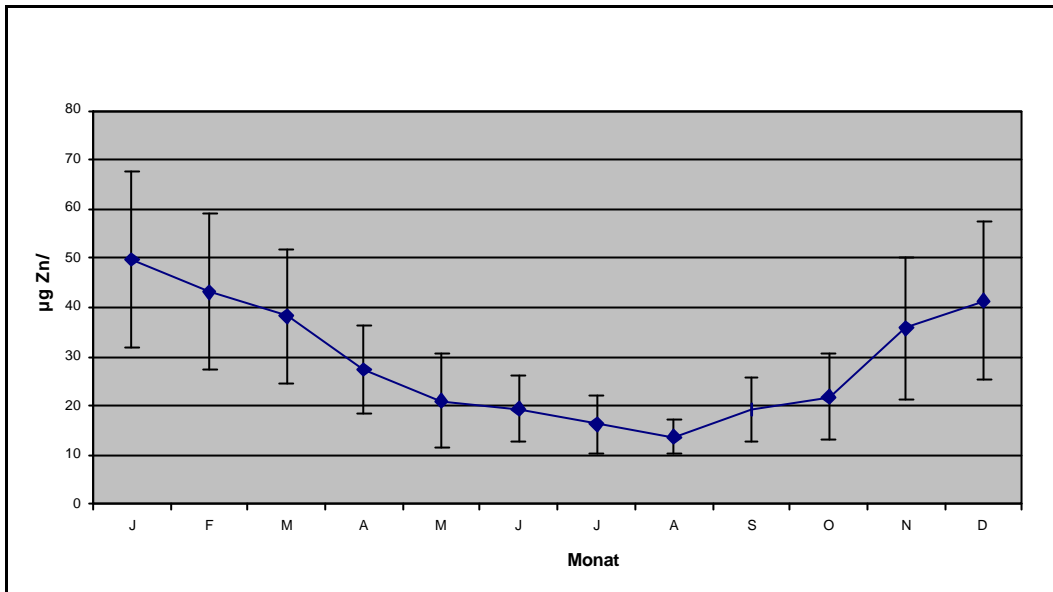


Abbildung 3 Saisonale Schwankungen der Zink-Konzentration in 20 Niederländischen Flüssen – Mittelwerte für alle Flüsse von 1990 bis 1998 (error bar  $\pm SD$ )<sup>18</sup>).

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. Dies macht deutlich, dass die natürlichen Schwankungen der Konzentrationen von Zink so hoch sind, dass sie eine Diskussion von Grenzwerten aus der Abschwemmung von Zink in Gebäudehüllen problematisch erscheinen lassen.

## 2. Einträge in die Umwelt

In den folgenden Abschnitten werden die möglichen Einträge von Kupfer und Zink aus Dächern, Dachrinnen und Fallrohren bilanziert. Als Haupteintragspfade werden die Versickerung, Trennkanalisation und Mischkanalisation betrachtet. Zunächst wird untersucht, welchen Anteil die Einträge von Kupfer und Zink aus Metalloberflächen in der Gebäudehülle bundesweit an dem Gesamteintrag durch Niederschlagswasser (Deposition) haben.

Im nächsten Schritt werden die Eintragspfade über die Trenn- und Mischkanalisation anhand des Beispiels der Stadt Duisburg dargestellt und anschließend auf die gesamte Bundesrepublik Deutschland übertragen.

Die Berechnungen werden zunächst für die wirklich exponierten Metallflächen durchgeführt. Weiter wird dargestellt, welche Auswirkung eine Verdopplung der Metalloberflächen auf den relativen Eintrag von Kupfer und Zink in die Umwelt haben würde.

<sup>18</sup> van Tilborg, W.J.M.: Emissies

Zum Abschluss wird der Eintrag von Kupfer und Zink in den Rhein betrachtet. Dabei werden die möglichen Wirkungen der Abschwemmungen von in der Außenhaut von Gebäuden exponierten Metallflächen auf die Metallkonzentrationen im Rhein ermittelt.

## 2.1 Haupteintragspfade

Für den Eintrag von Kupfer und Zink in die Umwelt gibt es drei Haupteintragspfade mit verschiedenen Verursachern, die in der Abbildung 4 dargestellt sind. Wir unterscheiden in: Versickerung, Trennkanalisation und Mischkanalisation.

Bei der **Versickerung** wird das Niederschlagswasser von befestigten und versiegelten Flächen zu den angrenzenden Bodenbereichen geführt und dort versickert. In jüngster Zeit zeichnet sich 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. Im Fall der angesprochenen Dachflächen wird das Regenwasser über Regenrinnen und Fallrohre zur oberflächlichen Versickerung dem Boden zugeführt.

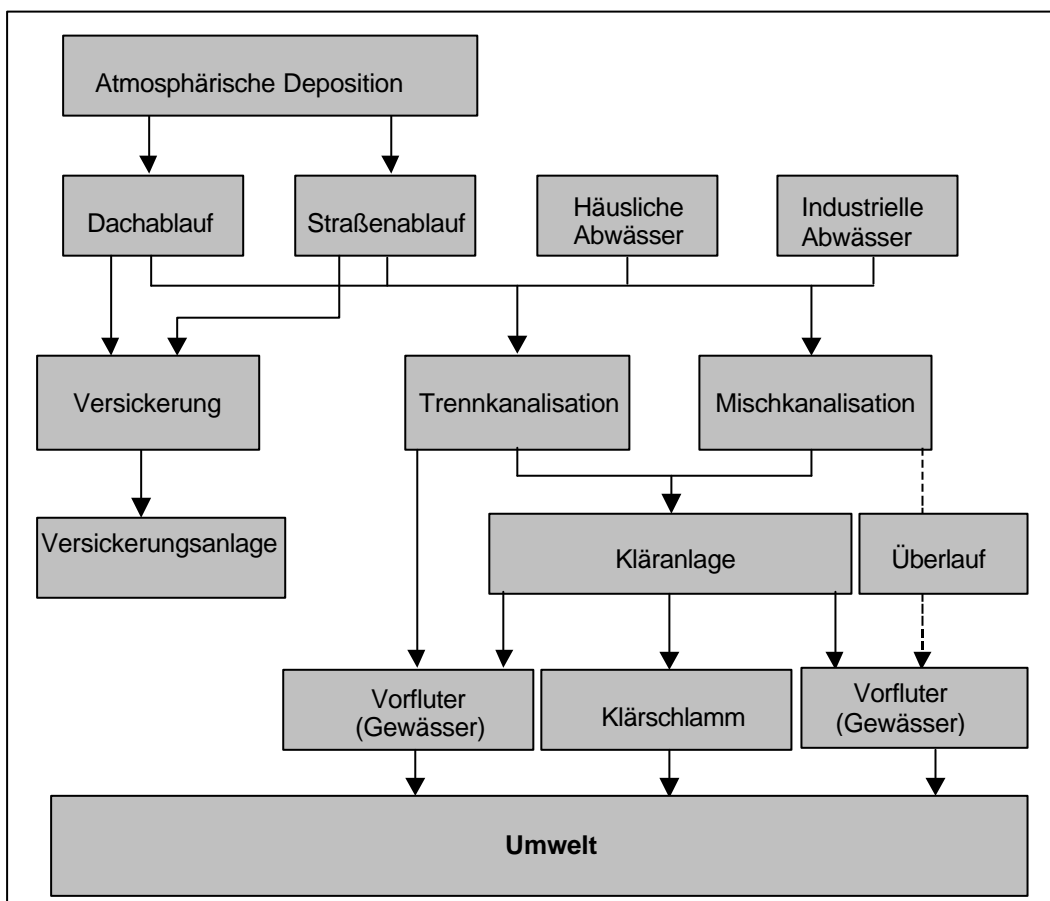


Abbildung 4 Haupteintragspfade von Kupfer und Zink in die Umwelt

Bei der **Trennkanalisation** wird das Schmutzwasser getrennt von anfallendem Niederschlagswasser abgeleitet. Das Niederschlagswasser kann separat auf dem kürzesten Wege einem Vorfluter zugeleitet werden, ohne das Kanalnetz oder die daran anschließende Kläranlage zu belasten. Damit geht in der Regel eine insge-

samt geringere Vorfluterbelastung einher. Im Vergleich zum Mischsystem entstehen höhere Investitionskosten, da zwei unabhängige Ableitungssysteme mit den entsprechenden Bauwerken vorhanden sein müssen.

Bei der **Mischkanalisation** wird im Gegensatz zur Trennkanalisation Schmutzwasser und Niederschlagswasser gemeinsam in einem Rohrleitungssystem der Kläranlage zugeleitet. Dadurch entstehen geringere Investitionskosten. Zusätzlich müssen allerdings Bauwerke zur Regenwasserentlastung der Kanalisation (Regenüberlaufbauwerke) errichtet werden. Außerdem werden bei Starkniederschlägen - vor allem zu deren Beginn - sehr hohe Abwasserlasten in die Gewässer gespült.

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

## 2.2 Metalleinträge über Versickerung

Um den Wasserkreislauf schließen zu können ist es notwendig, das anfallende Niederschlagswasser vor Ort zu versickern. Diese Überlegungen werden von vielen Bundesländern unterstützt und die gesetzlichen Voraussetzungen dafür geschaffen. Darüber hinaus sind durch die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall allgemeine Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser herausgegeben worden <sup>19</sup>).

Die Versickerung von Regenwasser geschieht über eigens zu diesem Zweck geschaffene Vorrichtungen wie beispielsweise Mulden, Rigolen, Rohr-Rigolen, Schächte oder Becken.

Zur Abschätzung der Mengen von Kupfer und Zink, die bei Versickerung maximal in den Boden eingetragen werden können, wird im Folgenden die Annahme getroffen in der Bundesrepublik Deutschland würde das gesamte Regenwasser versickert. Die entsprechenden Daten finden sich in Tabelle 4 und Tabelle 5.

Tabelle 4 Berechnungsgrundlagen zur Versickerung - Kupfer

Kupfer		Quelle
Exponierte Kupferfläche	64,1 Mio. m <sup>2</sup>	s. Kap. 1.4.1
Abschwemmrate Kupfer	1,34 g/m <sup>2</sup> a (0,15 µm/a)	s. Kap. 1.4.1
Depositionsrate Kupfer	0,00452 g/m <sup>2</sup> a	Böhm, E., et al.: Bilanzierung des Eintrags, S.61 Mittelwert
Fläche BRD	357.020 Mio. m <sup>2</sup>	UBA Daten zur Umwelt 2000

<sup>19</sup> ATV-DVWK-M 153

Tabelle 5 Berechnungsgrundlagen zur Versickerung - Zink

Zink		Quelle
Exponierte Zinkfläche	260 Mio. m <sup>2</sup>	s. Kap. 1.4.2
Abschwemmrate Zink	3,0 g/m <sup>2</sup> a	Odnevall Wallinder, I: Zinc Runoff
Depositionsrate Zink	0,0346 g/m <sup>2</sup> a	Böhm, E., et al.: Bilanzierung des Eintrags, S.61 Mittelwert
Fläche BRD	357.020 Mio. m <sup>2</sup>	UBA Daten zur Umwelt 2000

Die **Deposition**, also der gesamte Eintrag von Kupfer und Zink durch Ablagerung aus der Luft ist ein wichtiger Pfad in die Umwelt, speziell für den Bereich der Versickerung. Berechnet wird der Eintrag nach folgender Formel:

Darin sind:  $E_D$  = Metalleinträge durch Deposition [kg/a]

$$E_{ex} = \frac{A_{ex} * D_M}{1000}$$

$A_{ges}$  = Gesamtfläche der BRD [m<sup>2</sup>]

$D$  = Depositionsrate für Kupfer und Zink [g/m<sup>2</sup> a]

Entsprechend den oben angegebenen Werten ergäbe sich ein Gesamteintrag auf die Fläche der Bundesrepublik Deutschland aus der Deposition über den Luftpfad für

**Kupfer:** ca. 1.614.000 kg/a

**Zink:** ca. 12.352.000 kg/a

Für den **Eintrag aus der Abschwemmung** von exponierten Kupfer- und Zinkflächen ergibt sich folgende Berechnungsgrundlage:

$$E_D = \frac{A_{ges} * D}{1000}$$

Darin sind:  $E_{ex}$  = Metalleinträge durch exponierte (benetzte) Kupfer- und Zinkflächen pro Jahr [kg/a]

$A_{ex}$  = Exponierte benetzte Metallfläche [m<sup>2</sup>]

$D_M$  = Abschwemmrate der exponierten Metallflächen für Kupfer und Zink [g/m<sup>2</sup> a]

Hieraus berechnen sich folgende Gesamteinträge aus den exponierten Flächen für

**Kupfer:** ca. 90.000 kg/a

**Zink:** ca. 780.000 kg/a

Beim Vergleich der atmosphärischen Deposition mit der Abschwemmrate der exponierten Kupfer- und Zinkflächen selbst unter der unrealistischen Annahme, dass die gesamte Abschwemmung versickert, wird der verhältnismäßig geringe Umwelteintrag durch Metalldächer deutlich.

Für Kupfer würden über die atmosphärische Deposition ca. 95 % eingetragen und nur ca. 5 % über die Abschwemmung von Metalldächern. Für Zink liegen die Werte für die atmosphärische Deposition bei ca. 94 % und für die Abschwemmung von Metalldächern bei ca. 6 %. Tatsächlich sind die Einträge von Kupfer und Zink über die Abschwemmung sehr viel geringer, da bisher nur ein kleiner Teil des Regenwassers einer Versickerung zugeführt wird. Die Werte 5 % und 6 % sind auch zukünftig Maximalwerte der Abschwemmung.

Diese Werte werden daher den nachfolgenden Berechnungen als Maximalwerte zugrunde gelegt.

### 2.3 Metalleinträge über die Trennkanalisation am Beispiel der Stadt Duisburg

Am Beispiel der Stadt Duisburg wird untersucht, welche Folgen die Metalleinträge auf die Konzentration im Abwasser der Trennkanalisation haben. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Randbedingungen (u.a. Anteil der Metalldeckungen an der Gesamtdachfläche) den Verhältnissen in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt entsprechen. Die entsprechenden Relationen werden für Duisburg fiktiv übernommen. Um den Eintrag von Kupfer und Zink über die Trennkanalisation zu erfassen ist es wichtig, den Anschlußgrad an die Kanalisation sowie das Verhältnis zwischen Trenn- und Mischkanalisation in der BRD zu betrachten.<sup>20)</sup>

Anschlußgrad Kanalnetz:	90 %
Anschlußgrad Kläranlage:	86 %
Trennkanalisation:	46,5 %
Mischkanalisation:	53,5 %

Daraus folgt, dass etwa die Hälfte des Niederschlagswassers direkt über die Trennkanalisation ohne weitere Behandlung den Vorflutern zugeführt wird. Die Abschätzung dieses Eintrages wurde am Beispiel der Stadt Duisburg durchgeführt. Die Ausgangsdaten der Stadt Duisburg wurden aus dem Flächennutzungsplan für das Jahr 2000 entnommen. Zusätzlich wurden die Daten aus der entsprechenden Fachliteratur berücksichtigt.

Tabelle 6 Berechnungsgrundlagen für die Stadt Duisburg:

Duisburg	
Besiedelte Fläche	141,11 Mio. m <sup>2</sup>
Wohnungen, öffentliche Einrichtungen	76,79 Mio. m <sup>2</sup>
Verkehrsflächen	34,44 Mio. m <sup>2</sup>
Industrie	29,88 Mio. m <sup>2</sup>
Mittlerer Niederschlag	800 mm/a (UBA Daten zur Umwelt 2000)

<sup>20</sup> Statistisches Bundesamt, Umwelt, Fachserie 19, Seite 21. Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, Metzler, Poeschel, Stuttgart 1998

Für den Eintrag von Kupfer und Zink in die Umwelt durch die Trennkanalisation werden die Parameter Kupfer- bzw. Zinkflächen, Abschwemmrate, Deposition und Straßeneintrag berücksichtigt, die in den Tabellen 7 und 8 aufgeführt sind.

Tabelle 7 Berechnungsgrundlagen – Kupfereinträge(Außenanwendungen)

Kupfer	Daten	Quelle
Exponierte Kupferflächen	0,31 Mio. m <sup>2</sup>	Berechnung Anhang 1
Abschwemmrate Kupfer	1,34 g/m <sup>2</sup> a	s. Kap. 1.4.1
Depositionsrate Kupfer	0,00452 g/m <sup>2</sup> a	Böhm 2000
Straßeneintrag Kupfer	0,08 g/m <sup>2</sup> a	Stotz, 1999
Vergleichswerte für den Straßeneintrag		
	0,028 g/m <sup>2</sup> a	Nadler, Meißner, 2001
	0,389 g/m <sup>2</sup> a	Schweden, Berechnung Anhang 2

Tabelle 8 Berechnungsgrundlagen – Zinkeinträge(Außenanwendungen)

Zink	Daten	Quelle
Exponierte Zinkflächen	1,323 Mio. m <sup>2</sup>	Berechnung Anhang 1
Abschwemmrate Zink	3,0 g/m <sup>2</sup> a	Odnevall Wallinder: Zinc Runoff
Depositionsrate Zink	0,0346 g/m <sup>2</sup> a	Böhm 2000
Straßeneintrag Zink	0,27 g/m <sup>2</sup> a	Stotz, 1999
Vergleichswert für den Straßeneintrag		
	0,314 g/m <sup>2</sup> a	Nadler, Meißner, 2001

In Tabelle 9 erfolgt die Abschätzung des Gesamteintrages von Kupfer und Zink für Duisburg über die Trennkanalisation (Berechnung siehe Anhang 3). Daraus ergeben sich für die Einträge bei exponierten Kupferflächen von 0,31 Mio. m<sup>2</sup> und Zinkflächen von 1,323 Mio. m<sup>2</sup> (Berechnung s. Anhang 1) sowie für eine hypothetisch angenommene Verdoppelung der Kupfer- und Zinkflächen die unten dargestellten Werte.

Tabelle 9: Errechnete Kupfer- bzw. Zinkfrachten und Konzentrationen bei Trennkanalisation für Duisburg (Außenanwendung) vor der Einleitung in den Vorfluter

Trennkanalisation	Kupfer	Zink
Exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	0,31 Mio	1,323 Mio
Fracht [t/a]	3,81	18,15
Konzentration [mg/l]	0,034	0,161
Doppelte exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	0,62 Mio	2,646 Mio
Fracht [t/a]	4,22	22,12
Konzentration [mg/l]	0,037	0,196

Die Ergebnisse zeigen, dass bei sonst gleichen Randbedingungen eine Verdoppelung der exponierten Kupfer- und Zinkflächen zu erhöhten Konzentrationen und Frachten führen würde, jedoch die Steigerung der Konzentration im abfließenden



Niederschlagswasser für Kupfer bei ca. 0,003 mg/l und für Zink bei ca. 0,03 mg/l läge.

**Selbst ein hypothetischer Anstieg um 100 % der Außenanwendungen würde in der Trennkanalisation bei Kupfer nur zu einem Anstieg der Konzentration um ca. 8,8 %, bei Zink zu einem Anstieg der Konzentration um ca. 21,7 % führen. Dies verdeutlicht den geringen Beitrag der Außenanwendungen von Kupfer und Zink auf die Konzentration in Oberflächengewässer.**

Bei der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass alle Niederschlagswässer über die Trennkanalisation abgeleitet, also ohne weitere Behandlung in den Vorfluter geleitet wird. Bei der Betrachtung der gesamten BRD ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur ca. 50 % des Niederschlagswassers der Trennkanalisation zugeführt, hingegen 50 % über die Mischkanalisation abgeleitet und damit einer Behandlung in der Kläranlage unterworfen werden.

## 2.4 Metalleinträge über die Mischkanalisation am Beispiel der Stadt Duisburg

Um den Eintrag von Kupfer und Zink von Metalldächern zu demonstrieren, wurden wieder Daten der Stadt Duisburg herangezogen. Alle Eingangswerte sind in Kapitel 2.3 "Eintrag von Kupfer und Zink über die Trennkanalisation" aufgeführt. Zusätzlich wurden für die Mischkanalisation folgende Daten berücksichtigt:

Tabelle 10 Berechnungsgrundlagen - Mischkanalisation

Duisburg		Quelle
Einwohnerzahl	523.000 Einw.	
Wasserverbrauch pro Einwohner	150 l/d	Koppe, Stozek
Mittlere Abwasserkonzentration für Kupfer	0,15 mg/l	Koppe, Stozek
Mittlere Abwasserkonzentration für Zink	0,5 mg/l	Koppe, Stozek

Entsprechend den Ergebnissen aus Anhang 4 liegt der Eintrag von Kupfer und Zink über die Mischkanalisation bei einer Kupferfläche von 0,31 Mio. m<sup>2</sup> und einer Zinkfläche von 1,323 Mio. m<sup>2</sup> bei den in Tabelle 11 wiedergegebenen Werten. Auch hier wurde zusätzlich eine Verdoppelung der Kupfer- und Zinkflächen berechnet. Damit ergeben sich nach der Berechnung (Anhang 4) die aufgeführten Werte.

Auch diese Ergebnisse zeigen, dass bei sonst gleichen Randbedingungen bei der Verdoppelung der Kupfer- und Zinkflächen eine Steigerung der Frachten und Konzentrationen festzustellen ist. Die Steigerung der Konzentration im abfließenden Wasser liegt für Kupfer bei ca. 0,003 mg/l und für Zink bei ca. 0,028 mg/l. Sie sind damit niedriger als die berechnete Steigerung für die Trennkanalisation (Anhang 3).

**Unter Berücksichtigung eines hypothetischen Anstiegs um 100 % der Außenanwendungen würde in der Mischkanalisation die Konzentration bei Kupfer um maximal 5,3 % und bei Zink um 12,2 % steigen.**

Tabelle 11 Errechnete Kupfer- bzw. Zinkfrachten und Konzentrationen bei Mischkanalisation (Außenanwendungen)

Mischkanalisation	Kupfer	Zink
Exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	0,31 Mio	1,323 Mio
Fracht [t/a]	8,10	32,47
Konzentration [mg/l]	0,057	0,229
Doppelte exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	0,62 Mio	2,646 Mio
Fracht [t/a]	8,52	36,44
Konzentration [mg/l]	0,060	0,257

Für den Gesamteintrag von Kupfer und Zink über die Mischkanalisation bleibt abschließend noch zu berücksichtigen, dass eine erhebliche Reduzierung der Kupfer- und Zinkfracht in der Kläranlage stattfindet. Bei einem Abscheidegrad von ca. 80 % in der Kläranlage wird der überwiegende Anteil der Kupfer- und Zinkfracht im Klärschlamm verbleiben und nur ca. 20 % des Gesamteintrages über den Vorfluter abfließen.

## 2.5 Eintrag von Kupfer und Zink bei Trenn- und Mischkanalisation für die gesamte Bundesrepublik Deutschland

Die am Beispiel der Stadt Duisburg durchgeführten Rechnungen werden im Folgenden für die gesamte Fläche der Bundesrepublik Deutschland vorgenommen. Dafür stehen statistisch belegte Ausgangsgrößen zur Verfügung, so dass die Ergebnisse im Rahmen der statistischen Genauigkeit als sicher angesehen werden können.

Der Betrachtung des Eintrages von Kupfer und Zink bei Trenn- und Mischkanalisation für die gesamte Bundesrepublik Deutschland liegen die in Tabelle 12 benannten Daten zugrunde. Alle benötigten Werte für die Eintragspfade werden aus Kapitel 2.3 und Kapitel 2.4 entnommen. Nach den Berechnungen aus Anhang 6 ergeben sich die Werte der Tabelle 13 und Tabelle 14 für die Bundesrepublik Deutschland.

Tabelle 12 Berechnungsgrundlagen für die Bundesrepublik Deutschland

Bundesrepublik Deutschland		Quelle
Einwohnerzahl der BRD	82 Mio. Einw.	UBA Daten Umwelt 2000
Fläche der Wohn- und Industriegebiete der BRD	10.870 Mio. m <sup>2</sup>	Anhang 5
Verkehrsfläche mit Kanalschluß der BRD	3.500 Mio. m <sup>2</sup>	Anhang 5
Exponierte Kupferfläche der BRD	64,1 Mio. m <sup>2</sup>	s. Kap. 1.4.1
Exponierte Zinkfläche der BRD	260 Mio. m <sup>2</sup>	s. Kap. 1.4.2

Tabelle 13 Kupferfrachten und Kupferkonzentrationen bei Trenn- und Mischkanalisation (Außenanwendungen)

Kupfer	Trennkanalisation	Mischkanalisation
Exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	64,1 Mio	
Fracht [t/a]	431	1104
Konzentration [mg/l]	0,037	0,069
Doppelte exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	128,2 Mio	
Fracht [t/a]	517	1190
Konzentration [mg/l]	0,045	0,074

Tabelle 14 Zinkfrachten und Zinkkonzentrationen bei Trenn- und Mischkanalisation (Außenanwendungen)

Zink	Trennkanalisation	Mischkanalisation
Exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	260 Mio	
Fracht [t/a]	2222	4467
Konzentration [mg/l]	0,193	0,279
Doppelte exponierte Metallfläche [m <sup>2</sup> ]	520 Mio	
Fracht [t/a]	3002	5247
Konzentration [mg/l]	0,261	0,328

Bei dieser Gegenüberstellung zwischen Trennkanalisation und Mischkanalisation für Kupfer und Zink sowie dem Eintrag aus einer angenommenen Verdoppelung der exponierten Flächen zeigen die Ergebnisse den gleichen Trend wie bei den vorherigen Abschätzungen für die Stadt Duisburg. Die Konzentrationswerte für Kupfer würden bei der hypothetischen Verdopplung der Flächen in der Trennkanalisation um ca. 0,008 mg/l und in der Mischkanalisation um ca. 0,005 mg/l steigen. Einen ähnlichen Verlauf zeigen auch die Konzentrationswerte für Zink bei der Verdopplung der exponierten Fläche. Die Differenz liegt in der Trennkanalisation bei ca. 0,068 mg/l und in der Mischkanalisation bei ca. 0,049 mg/l.

**Eine hypothetische bundesweite Verdopplung der Außenanwendungen würde für Kupfer bei der Trennkanalisation lediglich zu einem Anstieg von ca. 22 % und bei der Mischkanalisation von ca. 7 % führen. Für Zink ergäbe sich eine Steigerung bei der Trennkanalisation von ca. 35 % und für die Mischkanalisation von ca. 18 %.**

**Dies bedeutet, dass eine Verdopplung der exponierten Fläche keineswegs eine Verdopplung der Frachten oder Konzentrationen für Kupfer und Zink im Vorfluter bedingt. Vielmehr kann man daraus schließen, dass trotz der angenommenen unrealistisch hohen Zuwachsraten (Verdoppelung der Kupfer- und Zinkflächen) andere Eintragspfade einen deutlich höheren Anteil am Kupfer- und Zinkeintrag haben. Damit ist auch die verhältnismäßig geringe Steigerung auf Grund einer hypothetisch vergrößerten Fläche zu erklären.**

**Die Betrachtung dieser anderen Eintragspfade war nicht Gegenstand dieser Studie.**

## 2.6 Metallkonzentrationen im Rhein

Zur Veranschaulichung der Problematik wird der Rhein als viel genutzter Vorfluter in Deutschland betrachtet. Die an den Rheinmessstellen gemessenen Konzentrationen für Kupfer und Zink (Ökobase Umweltatlas 2001 siehe Anhang 7) sind für die Jahre 1989 und 1998 in Abbildung 5 dargestellt.

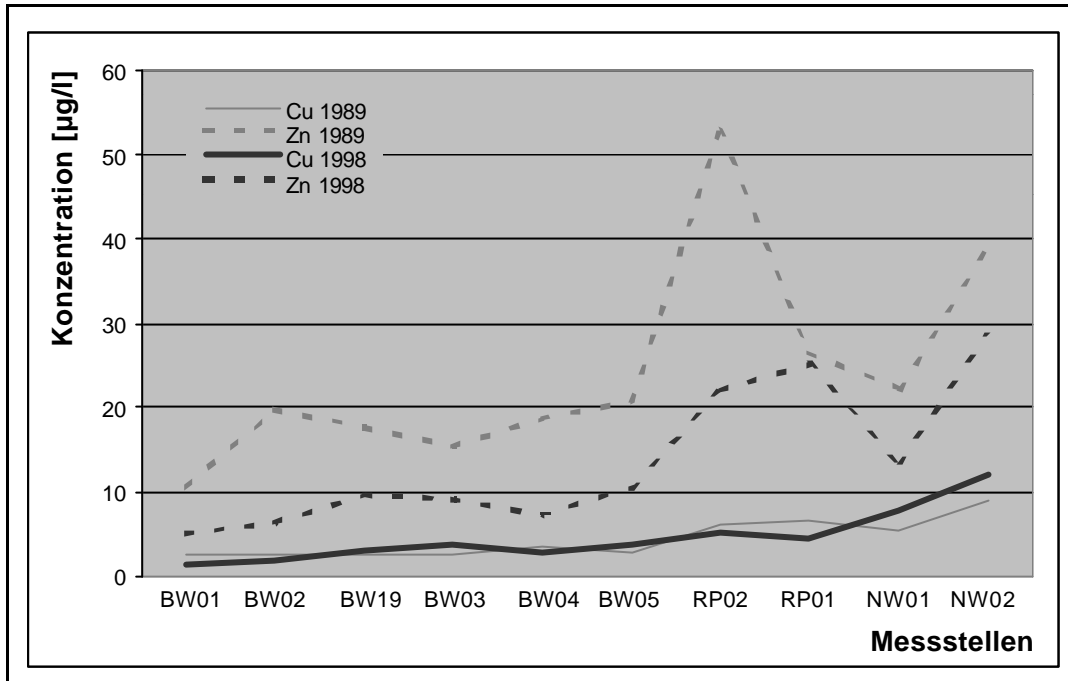


Abbildung 5: Konzentrationen im Rhein für 1989 und 1998 von Kupfer und Zink – Gemessene Werte an Messstellen rheinabwärts (s. Anhang 7)

Die darin erkennbaren Zunahmen der Konzentrationen von Kupfer und Zink stellen auf Grund der zahlreichen Zuflüsse in den Rhein einen Zusammenhang dar, der zu erwarten war. Gleichzeitig ist ablesbar, dass die Werte für Zink innerhalb dieser Zeit deutlich gesunken sind. Eventuelle Erhöhungen der Konzentrationen durch andere Flussläufe waren nicht Gegenstand dieser Studie.

Für detailliertere Betrachtungen wird beispielhaft auf die Kupferdaten der Messstelle Klee-Bimmen (Abbildung 6) zurückgegriffen.

Unter der Annahme, dass die verbauten Flächen an Kupfer Hauptverursacher für den gemessenen Anstieg der Konzentrationen im Rhein wären, kann man über die Jahresabschwemmfraucht der Kupferflächen (90 t/a, s. Kap. 2.2) eine Relation zwischen der Jahresfracht für Kupfer im Rhein und dem Gesamteintrag der Kupferflächen herstellen. Die Frachtwerte in der Tabelle 15 sind unter der Annahme eines mittleren Abflusses des Rheins von 2.270 m<sup>3</sup>/s bestimmt worden<sup>21</sup>).

<sup>21</sup> Jahresbericht UBA 1995 S. 174

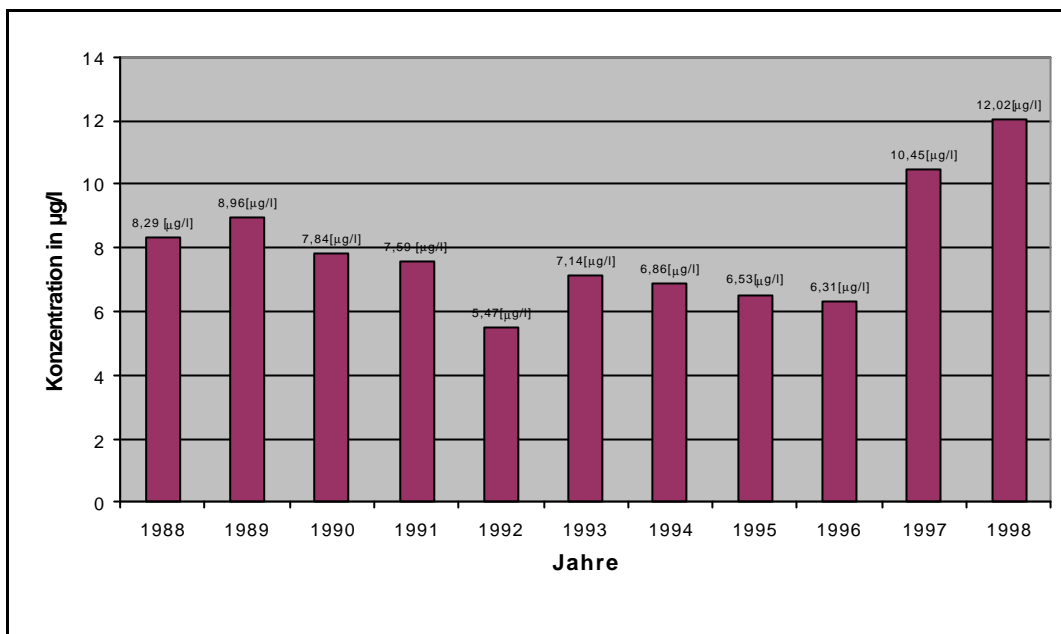


Abbildung 6 Cu-Konzentration im Rhein - Jahresmittelwerte Messstelle Kleve-Bimmen (nach: Ökobase Umweltatlas 2001)

Tabelle 15 Errechnete Jahresfracht aus der Cu-Konzentration im Rhein (Messstelle Kleve-Bimmen)

Jahr	Cu-Konzentration im Rhein [µg/l]	Jahresfracht Kupfer [t/a]	Zuwachs gegen Vorjahr [t/a]
1996	6,31	450	
1997	10,45	747	297
1998	12,02	861	114

Für Kupfer liegen die Gesamteinträge über die exponierten Flächen bei max. 90 t/a für die gesamte Bundesrepublik Deutschland (s. Kap. 2.2). Der Zuwachs der Kupferfracht von 1996 bis 1997 liegt bei 297 t/a. Er ist damit um den Faktor 3,3 höher als der tatsächliche Gesamteintrag von 90 t/a über die exponierten Flächen.

Der Höhe und den Schwankungen der Konzentration von Kupfer im Rhein müssen also andere, im Rahmen dieser Studie nicht betrachtete Eintragspfade zugrunde liegen.

### 3. Biologische Wirkungen von Kupfer und Zink

#### 3.1 Begriffsbestimmungen

Die Toxikologie ist die Lehre von den biologischen Wirkungen chemischer Substanzen auf lebende Organismen. Der Begriff der Toxizität beschreibt hierbei substanzspezifisch, die grundsätzlich von der Dosis (aufgenommene Menge, sowohl zu wenig als auch zu viel) abhängige Eigenschaft und Wirkung von chemischen Substanzen. Hierzu gehören auch die Metalle, die Metallsalze und die Metallverbindungen.

Kupfer und Zink sind ubiquitär, das heißt überall in unserer Umwelt natürlich verbreitet (natürliche Hintergrundkonzentration). Beide Metalle sind für nahezu alle Organismen, insbesondere für den Menschen essentiell, also lebensnotwendige Nahrungsstoffe, die zugeführt werden müssen, da sie im Organismus nicht gebildet werden können. Damit müssen die Metalle beim Menschen und in lebenden Organismen in unterschiedlicher Konzentration vorhanden sein, um die Funktion einer Vielzahl von kupfer- und zinkabhängigen Enzymsystemen zu gewährleisten.

Die toxikologische Bewertung des anthropogenen (durch den Menschen verursachten) Eintrags von Zink und Kupfer in die Umwelt erfolgt durch die Ökotoxikologie. Die Grundlage der Ökotoxikologie ist die exakte Erfassung von Konzentrationen in Boden und Wasser, der Aufnahme in verschiedene Organismen und der jeweiligen biologischen Wirkung, sowie der Rückwirkung von möglichen Veränderungen auf den Menschen.

Da eine wissenschaftlich exakte Erfassung auf der Basis von Dosis-Wirkungsbeziehungen, vor allem bei essentiellen Stoffen schwierig ist, kommt der Risikoabschätzung eine besondere Bedeutung zu. Bei der Risikoabschätzung wird die zu erwartende Häufigkeit an biologischen Effekten im Verhältnis zur Exposition (einwirkende Dosis), auf der Basis experimenteller Daten abgeschätzt.

### **3.2 Risikoabschätzung in der Toxikologie**

Die Basis einer validen toxikologischen Risikoabschätzung stellen aussagekräftige Daten aus kontrollierten Studien dar. In Übersichtsarbeiten, die der Abschätzung und Darstellung toxikologischer Zusammenhänge dienen, ist grundsätzlich die Originalarbeit unter kritischer Würdigung heranzuziehen, um eine ausreichende Wissenschaftlichkeit der Aussage zu erhalten.

Die Aussagekraft experimenteller aber auch klinischer Studien wird oft bereits durch die statistischen Gegebenheiten (Fallzahlen) wesentlich limitiert. Ohne Sicherung der Höhe der Exposition und der Belastung, sowie der Erfassung von konkurrierenden Einflüssen (Konfoundern) fehlt die Basis für eine Darstellung biologischer Effekte. Zudem sind ausgeprägte Effekte leicht nachzuweisen, für geringe Effekte fehlen meist geeignete Endpunkte für die Bewertung. Die Übertragung von Wirkungen bei hoher Exposition, wie sie üblicherweise in Experimenten angewandt wird, auf ubiquitäre Konzentrationen ist bekannterweise problematisch.

Bei Substanzen wie Kupfer und Zink, die ubiquitär vorkommen und die zudem, als essentielle Spurenelemente eine lebenswichtige Bedeutung besitzen, muss die Abschätzung von biologischen Effekten im Bereich der natürlichen Hintergrundkonzentrationen zumindest als toxikologisch fragwürdig bezeichnet werden.

Die Darstellung eines Dosis-Schwellenbereiches (noch keine Wirkung), eines Dosisbereiches mit fehlender Wirkung aber auch eines Bereiches der erwünschten Exposition und Aufnahme wäre zwar wünschenswert, es ist aber bei verschiedenen Spezies, sogar bei unterschiedlichen Stämmen der selben Spezies, eine quantitativ und qualitativ unterschiedliche Reaktionsweise zu erwarten.

Die jeweilige chemisch-physikalische Form von Kupfer und Zink (in der Regel sind die Anteile messtechnisch nicht zu differenzieren) ist ausschlaggebend für die Höhe der Aufnahme der Metalle in Organismen (Bioverfügbarkeit) und damit die biologische Wirkung<sup>22</sup>). Als weitere bedeutsame Faktoren sind die Mechanismen der Adaptation (Gewöhnung) von Organismen an höhere oder geringere Umgebungskonzentrationen von Kupfer und Zink aufzuführen. Relativ geringe Konzentrationsänderungen des Untersuchungs-Milieus können damit bereits zu fassbaren biologischen Effekten führen<sup>23</sup>).

### 3.3 Verteilung von Kupfer und Zink

Bei der toxikologischen Risikoabschätzung von Kupfer und Zink ist die Bioverfügbarkeit der Metalle und nicht die aquatisch bestimmbare Gesamtkonzentration von ausschlaggebender Bedeutung. Eine Vielzahl von Untersuchungen belegt die variable, von Randbedingungen abhängige, Korrelation von Gesamtmetallkonzentration und der tatsächlichen Bioverfügbarkeit<sup>22</sup>). Zur Abschätzung der Bioverfügbarkeit von Metallen in der aquatischen Umwelt hat sich das „Biotic ligand model“ bewährt<sup>24</sup>).

Kupfer und Zink können in Grund- und Oberflächenwasser in verschiedenen Formen vorliegen:

- mechanisch oder chemisch gebunden in Böden, Sedimenten sowie an Mineralien
- als Lösung dissoziiert oder komplexiert mit organischen oder anorganischen Liganden
- eingelagert in Mikroorganismen, Pflanzen oder Tieren.

Suspendierte Metallpartikel können durch „natürliche Filterung“ mechanisch im Boden gebunden werden. Gelöste Metalle (Salze) werden in einem Fließgleichgewicht an Tonmineralien (z.B. Kaolinit, Illite) sowie Eisen- und Aluminiumoxiden adsorbiert. Des Weiteren besteht die Möglichkeit der chemischen Bindung mit bodeneigenen Substanzen, vorrangig mit Huminsäuren. Eine organisch-chemische Komplexbildung ist ebenfalls zu berücksichtigen. Damit verbleibt ein schwer abschätzbarer, aber im Vergleich zur Gesamtkonzentration geringer Anteil der Metalle in der gelösten, mobilen und biologisch verfügbaren Phase (Salz).

Der Hauptanteil von Kupfer und Zink ist in den oberen Schichten des Bodens zu erwarten. Bei der Flächenerosion können somit die adsorbierten Schwermetalle in die oberirdischen Gewässer eingetragen werden. Die wesentliche Rolle spielen hierbei die Niederschlagsmenge sowie die Eigenschaften und die Bearbeitung des Bodens.

Die Mobilität von Metallen wie Kupfer und Zink wird durch die Wassereigenschaften (Redoxpotential; pH-Wert, Ionenkonzentration (Wasserhärte)) sowie die

---

<sup>22</sup> WHO: Copper 1998 sowie ICME: Persistence 1995

<sup>23</sup> Neubert 1997

<sup>24</sup> DiToro et al.: biotic ligand model, 2000

Bodeneigenschaften (Redoxpotential; pH-Wert; Gehalt an Adsorbentien wie organische Verbindungen, Eisen- und Aluminiumoxide, Tonminerale und Karbonate) beeinflusst<sup>25</sup>).

### 3.4 Grundlagen der biologischen Wirkung von Kupfer und Zink

Zur Verdeutlichung des Konzentrationsbereiches der biologischen Wirkung von Kupfer und Zink werden humantoxikologische Daten angeführt. Sie besitzen keine Bedeutung im Hinblick auf die Freisetzung von Metallen aus den hier betrachteten Anwendungsbereichen von Kupfer und Zink in der Außenhaut von Gebäuden.

Kupfer und Zink sind lebensnotwendige Spurenelemente. Sie sind bedeutsame Bestandteile oder Kofaktoren bei einer Vielzahl von Enzymsystemen beim Menschen, bei Tieren und bei Mikroorganismen<sup>26</sup>) und werden fast ausschließlich mit der Nahrung in Form von Salzen und organischen Verbindungen aufgenommen.

Die akuten und die chronischen Wirkungen von Zink und Kupfer sind von der Dosis, aber auch wesentlich von der chemischen Zustandsform und vor allem der jeweiligen Wasserlöslichkeit einer Verbindung abhängig. Für die Abschätzung der Toxizität von Zink und Kupfer ist damit die Expositionshöhe und die spezies- und verbindungsabhängige Resorptionsrate von wesentlicher Bedeutung. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass selbst gelöste Verbindungen durch Komplexbildung einer biologischen Resorption entzogen werden können.

#### 3.4.1 Kupfer

Kupfer gehört zu den biologisch essentiellen Metallen. Es ist nach Eisen und Zink das dritthäufigste Spurenmetall im menschlichen Organismus. Der tägliche Bedarf an Kupfer wird von der WHO mit etwa 2 mg/Tag für einen Erwachsenen angegeben. Die Duplikatstudie des Umweltbundesamtes erbringt eine tägliche Kupferzufuhr in Deutschland mit der Nahrung, deren Median bei 0,8 mg/Tag (Bereich 0,2 bis 3,7 mg/Tag) liegt<sup>27</sup>). Damit wird für Kupfer der tägliche essentielle Bedarf durch die Nahrung auf der Basis der Hintergrundkonzentration unserer Umwelt teilweise nur unzureichend gedeckt. So kann dem Kupfer aus Dachabläufen primär keine humantoxikologische Bedeutung beigemessen werden.

#### 3.4.2 Zink

Berücksichtigt man, dass auch Zink ein essentielles Spurenelement darstellt, das üblicherweise in Salzform aufgenommen wird, so kann im Einklang mit den bisherigen toxikologischen Erkenntnissen zu Zink auf Grenzwerte zum Schutz des Menschen vor übermäßigen Belastungen verzichtet werden. Dies gilt nicht für

---

<sup>25</sup> WHO: Copper, 1998 sowie ICME: Persistence 1995

<sup>26</sup> Mills: Zinc in human biology, 1989

<sup>27</sup> Becker et al.: Zufuhr von Spurenelementen, 1996



organische und anorganische Zinkverbindungen in der Produktion und der Verarbeitung.

So hatte auch die Festlegung eines Trinkwasserrichtwertes (kein Grenzwert) auf 5 mg/l (derzeit gültige Trinkwasserverordnung) keinen toxikologischen Hintergrund. Sie erfolgte vielmehr wegen der möglichen Geschmacksbeeinträchtigung des Wassers durch Zink. Durch die Novellierung der Trinkwasserverordnung entfällt ab 2003 ein entsprechender Richtwert vollständig.

Der ADI (acceptable daily intake) der von der WHO mit 0,3 bis 1,0 mg/kg Körpergewicht (KG) und Tag angegeben wird, kann nicht im toxikologischen Sinn einer noch duldbaren Zufuhr begründet sein, da der untere Wert unter der empfohlenen Zufuhrmenge liegt, der obere darüber. Die Duplikatstudie des Umweltbundesamtes erbringt eine tägliche Zinkzufuhr in Deutschland mit der Nahrung, deren Median bei 9,3 mg/Tag (Bereich 1,6 bis 32,0 mg/Tag) liegt<sup>28</sup>). Folgt man den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) so ist mindestens eine tägliche Zinkzufuhr von 7 mg für Frauen und 10 mg für Männer anzustreben. Die Tagesdosis sollte jedoch 30 mg/Tag nicht übersteigen.

### 3.4.3 Wirkungen auf aquatische Lebewesen

Zu Wirkungen von Zink und Kupfer, auf Lebewesen aus dem aquatischen Bereich liegen eine Vielzahl von Untersuchungen vor. Hierbei ist zunächst auf die allgemeinen Ausführungen zur Toxikologie zu verweisen.

In einigen Publikationen wird empfohlen, zum Schutz der aquatischen Lebewesen die „natürliche regionale Hintergrundkonzentration“ für Kupfer und Zink anzustreben. Die ist jedoch aufgrund der kleinräumigen Konzentrations-Verteilung regional stark unterschiedlich<sup>29</sup>). Damit bleibt eine Zielvorgabe zunächst wirkungslos.

Der Eintrag von Kupfer und Zink in die Umwelt erfolgt aus natürlichen und anthropogenen Quelle. Bekannt ist, dass Adaptationsphänomene, vor allem bei Kleinlebewesen und Mikroorganismen artspezifisch und milieuabhängig (z.B. pH-Wert, Wasserhärte) zu einem unterschiedlichen essentiellen biologischen Bedarf an Kupfer und Zink führen können. Eine Verminderung oder Erhöhung auf eine empirische Zielkonzentration (Über- oder Unterladung mit Kupfer und Zink) kann unmittelbar eine Gefährdung von lokalen Biosystemen bedeuten, da der ortsständige Bedarf verändert wird<sup>30</sup>).

In-vitro-Untersuchungen mit einzelnen Spezies sind nur unter Vorbehalt auf reale Ökosysteme zu übertragen. Besonders bei Substanzen, die prinzipiell einen vital essentiellen Charakter besitzen, gelten ermittelte Dosis-Wirkungs-Beziehungen unter nur geringfügig veränderten Randbedingungen nicht mehr. Relative Veränderungen von Lebensbedingungen, wie sie durch den Übergang von Zuchtbedin-

---

<sup>28</sup> Becker et al.: Zufuhr von Spurenelementen, 1996

<sup>29</sup> DiToro et al.: biotic ligand model, 2000

<sup>30</sup> WHO: Copper, 1998

gungen auf Testbedingungen gegeben sind, können bereits biologische Effekte hervorrufen.

Vor allem bei empfindlichen aquatischen Lebewesen wie Daphnien (Wasserflöhe) reicht bereits eine Erhöhung der Wassertemperatur von 25 auf 35°C aus, dass die Hälfte der Population verstirbt. Damit ist eine in Laboruntersuchungen beobachtete Herabsetzung der Beweglichkeit von Daphnien bei höheren Zink oder Kupferkonzentrationen nur wenig bedeutsam. Zudem ist der komplizierte Mechanismus der Aufnahme von Kupfer und Zink durch gegenseitig fördernde und auch hemmende Effekte der beiden Metalle geprägt<sup>31</sup>).

Die Randbedingungen des Milieus sind ebenso von richtungsweisender Bedeutung. Bedeutsam sind vor allem der pH-Wert, die Kalzium- und Kaliumkonzentration, die Temperatur und die Gesamtionenkonzentration. In diesem Zusammenhang wird nochmals darauf verwiesen, dass die Gesamtkonzentration an Kupfer oder Zink nicht der resorbierbaren und damit biologisch aktiven Menge entspricht.

Zu der Wirkung von Kupfer und Zink auf aquatische Lebewesen, liegen eine Vielzahl von Laboruntersuchungen sowie Studien zu kontaminierten Umweltbereichen vor (Übersicht siehe <sup>32</sup>). Zusammenfassend lässt sich aus den in-vitro-Versuchen festhalten, dass für empfindliche aquatische Organismen Konzentrationen über 0,01 mg/l Kupfer möglicherweise einen Einfluss besitzen könnten. Hierbei handelt es sich jedoch einhellig nicht um das Absterben der Lebewesen, sondern beispielsweise um Veränderungen der Biochemie oder von Parametern der Beweglichkeit. Explizit wird darauf hingewiesen, dass sich die Ergebnisse nur auf gelöstes Kupfer in Ionenform beziehen, das eine biologische Wirkung verursachen kann.

Einschränkend müssen jedoch je nach Lebensform unterschiedlich hohe tolerierbare Konzentrationen angenommen werden <sup>33</sup>). Zieht man zur Beurteilung die Berechnung der Kupferfrachten aus Dächern heran, so ist festzustellen, dass nur etwa 20 % der Fracht, die sich in der Mischkanalisation findet, über den Vorfluter abfließen. Dies würde rechnerisch eine Konzentration von 0,0068 mg/l Kupfer im Vorfluter bedeuten (20 % von 0,034 mg/l entsprechend Tabelle 9). Berücksichtigt man hierbei, dass nur ein Bruchteil der Menge bioverfügbar ist, werden die Kupferfrachten aus Dachabläufen für eine toxikologische Bewertung nachrangig.

Bei einer vergleichbaren Berechnung für Zink kann eine resultierende Konzentration aus den Dächern im Vorfluter mit 0,0322 mg/l Zink bestimmt werden (20 % von 0,161 mg/l entsprechend Tabelle 9). Berücksichtigt man hierbei ebenfalls dass nur ein Bruchteil der Zinkmenge bioverfügbar ist, so trägt die aus Dächern resultierende Konzentration nur zu einem geringen Prozentsatz zur Hintergrundkonzentration bei <sup>34</sup>). Aufgrund der heterogenen Laborwerte zu biologischen Wirkungen auf aquatische Organismen ist eine direkte Bewertung allenfalls für ein-

---

<sup>31</sup> WHO: Zinc, 1996 sowie WHO: Copper, 1998

<sup>32</sup> WHO: Zinc, 1996 sowie WHO 2000

<sup>33</sup> WHO 2000

<sup>34</sup> WHO 1996

zelne Spezies möglich. Dies erbringt aber keine Aussage, die eine generelle Empfehlung zu Zink aus Dächern begründen würde <sup>35</sup>).

**Damit ist eine generelle Vorgabe für Zink- und Kupferkonzentrationen in der aquatischen Umwelt problematisch und lässt sich aus den bisher vorliegenden Studiendaten nicht ausreichend begründen.** Eine Limitierung des anthropogenen Eintrags aus Zink- und Kupferflächen kann beim derzeitigen Kenntnisstand auch aus toxikologischer Sicht nicht ausreichend wissenschaftlich begründet werden und erfordert eine differenzierte Betrachtung anhand von toxikologischen Modellen.

## 4. Fazit

Das Maß des Eintrags von Fremdstoffen in die Umwelt und damit die Frage ihrer Schädlichkeit wird derzeit kontrovers diskutiert, insbesondere auch im Hinblick auf die in der Außenhaut von Gebäuden eingebauten Metalle Kupfer und Zink. Ein wichtiger Aspekt in dieser Diskussion ist die Abschwemmung als Ablösung der äußeren Schicht der Korrosionsprodukte durch Bewitterung.

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 ist die entscheidende Größe für Auswirkungen in der Umwelt. Sie ist abhängig von der in den vergangenen Jahren wesentlich reduzierten SO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft und hat dementsprechend erheblich abgenommen.

Für Kupfer kann man heute von einer durchschnittlichen Abschwemmrate in der Größe von 0,15 µm/a entsprechend 1,3 g/m<sup>2</sup>a ausgehen. Bei Zink gilt ein Wert von durchschnittlich 0,40 µm/a entsprechend 3,0 g/m<sup>2</sup>a.

Im Gebäudebestand der Bundesrepublik Deutschland sind ca. 64,1 Mio. m<sup>2</sup> als bewitterte Fläche von Dächern und Dachentwässerungen aus Kupfer der Bewitterung ausgesetzt. Bei Zink sind es ca. 260 Mio. m<sup>2</sup>. Hieraus berechnen sich Gesamteinträge aus der Abschwemmung von Kupfer in Höhe von ca. 90.000 kg/a, von Zink in Höhe von ca. 780.000 kg/a. Damit beträgt die Abschwemmung bei Kupfer in der Gebäudehülle nur ca. 5 % der atmosphärischen Deposition, bei Zink ca. 6 %.

Würde man die exponierten Flächen verdoppeln, so würde dies nicht auch eine Verdopplung der Frachten oder Konzentrationen von Kupfer und Zink im Vorfluter bedeuten. Vielmehr hätten trotz dieser angenommenen unrealistisch hohen Zuwachsraten (Verdoppelung der Kupfer- und Zinkflächen) andere Eintragspfade einen deutlich höheren Anteil an dem Eintrag von Kupfer und Zink.

Eine ähnliche Erkenntnis ergibt sich, wenn man von der Konzentration von Kupfer und Zink im Rhein auf die exponierten Dachflächen schließt. Aus Schwankungen in der Konzentration wurde errechnet, wie groß die exponierte Fläche sein

---

<sup>35</sup> WHO: Zinc, 1996

müsste, wenn sie allein Ursache der Schwankungen wäre. Die so errechneten Werte liegen um Größenordnungen über dem Marktvolumen der entsprechenden Jahre. Den Schwankungen der Konzentration von Kupfer und Zink im Rhein müssen also andere, im Rahmen dieser Studie nicht erklärbare Phänomene zugrunde liegen.

Aus toxikologischer Sicht sind Zink und Kupfer ubiquitär, das heißt überall in unserer Umwelt natürlich verbreitet. Beide Metalle sind für den Menschen und fast alle Organismen essentiell, also lebensnotwendige Nahrungsstoffe, die zugeführt werden müssen, da sie im Organismus nicht gebildet werden können. Die Metalle sind beim Menschen und in lebenden Organismen in unterschiedlicher Konzentration vorhanden. Die Funktion einer Vielzahl von Enzymsystemen ist abhängig von Zink und Kupfer. Die Metallkonzentration von Grund- und Oberflächenwasser wird von der Art des Metalls, der Eintragsmenge, der Bindungsmöglichkeiten in Böden und Sedimenten, dem chemischen Zustand des Metalls und den Wassereigenschaften bestimmt.

Berücksichtigt man dass Zink ein essentielles Spurenelement darstellt, so kann im Einklang mit den bisherigen toxikologischen Erkenntnissen zu Zink auf Grenzwerte zum Schutz des Menschen vor übermäßigen Belastungen verzichtet werden. Dies gilt nicht für organische und anorganische Zinkverbindungen (z.B. Zinkchromate und zinkhaltige Pestizide).

Kupfer gehört ebenfalls zu den biologisch essentiellen Metallen. Es ist nach Eisen und Zink das dritthäufigste Spurenmetall im menschlichen Organismus. Sowohl die Unter- als auch die Überversorgung können zur Ausbildung von Krankheitssymptomen führen.

Eine generelle Vorgabe für Zink- und Kupferkonzentrationen in der aquatischen Umwelt ist problematisch und lässt sich aus den vorliegenden Studiendaten nicht ausreichend begründen. Eine Limitierung des anthropogenen Eintrags aus Zink- und Kupferflächen kann beim derzeitigen Kenntnisstand auch aus toxikologischer Sicht nicht ausreichend wissenschaftlich begründet werden.

## 5. Literatur

### 5.1 Zu Abschwemmraten (Kap. 1)

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt:  
Wasseruntersuchungen und Korrosionsprüfungen  
Dübendorf: EMPA Prüfbericht Nr. 402092, 2000

Faller, Markus:  
Metallabtrag und Metallabschwemmung von Metaldächern – Untersuchungsergebnisse der Freibewitterungsversuche in der Schweiz  
In: BAUMETALL 4/2001

Faller, Markus; Richner, Peter:  
Umwelteinflüsse auf Werkstoffe  
In: Chimia 52 (1998) Nr. 5

Korenromp, R.H.J.; Hollander, J.C.Th.:  
Diffuse emissions of zinc due to atmospheric corrosion of zinc and zinc coated (galvanised) materials  
Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), TNO-MEP-99/441, 1999

- Orzessek, K.; van Tilborg, W.J.M.; Reimerink, G.H.J.:  
Zink-Abtrag deutlich vermindert  
In: Metall 5/96
- Priggemeyer, Sonja:  
System zur Verbesserung der Umweltqualität von Dachablaufwässern  
Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Abschlußbericht AZ 10730, 1998
- van Tilborg, W.J.M.:  
Emissies van Bouwmetallen in Nederland in perspectief  
VTBC-Bericht 0103, Juli 2001
- Verbiest, P.; Janssen, C.R.; Odnevall Wallinder, I.; Leygraf, C.:  
Environmental Effects of Zinc Runoff from Phosphated Zinc Sheets used for Building Applications  
14<sup>th</sup> International Corrosion Congress 1999, Cape Town

## **Zu Auswirkungen (Kap. 2)**

- ATV (Hrsg.):  
Merkblatt ATV-DVWK-M 153  
ATV-DVWK-Regelwerk: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser  
Hennef: ATV, Februar 2000
- Böhm, Eberhard; Hillenbrand, Thomas; Marscheider-Weidemann, Frank; Schempp, Christian;  
Fuchs, Stephan; Scherer, Ulrike:  
Bilanzierung des Eintrags prioritärer Schwermetalle in Gewässer  
Berlin: Umweltbundesamt, 2000 – Forschungsvorhaben 298 22 243
- Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt:  
Wasseruntersuchungen und Korrosionsprüfungen  
Dübendorf: EMPA Prüfbericht Nr. 402092, 2000
- Koppe P, Stozek A.:  
Kommunales Abwasser..  
Essen: 4. Aufl., 1999
- MFG-Swedish Environmental Research Group:  
Copper in Society and in the Environment  
Västeras Schweden: 2<sup>nd</sup> revised Edition, 1999
- Nadler A, Meißner E.:  
Ergebnisse einer Versuchsanlage zur Versickerung des Niederschlagswassers von Straßen.  
KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2001; 48: 624-38
- Odnevall 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  
14<sup>th</sup> International Corrosion Congress 1999, Cape Town
- Stadt Duisburg. Amt für Statistik:  
Stadtforschung und Europaangelegenheiten. Flächennutzungsplan.  
Duisburg, 2000
- 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, November 1999; 121-23
- Umweltbundesamt (Hrsg.):  
Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000  
Berlin: Umweltbundesamt, 2001
- Umweltbundesamt (Hrsg.):  
Ökobase Umweltatlas Version 4.0  
Haan: Clemens Hölter GmbH, 2001

## 5.2 Zu Toxizität (Kap. 3)

- Becker K., Nöllke F., Hermann-Kunz E., Krause C., Schenker D., Schulz C.:  
Zufuhr von Spurenelementen und Schadstoffen mit der Nahrung (Duplikate und Diet History) in den alten Bundesländern  
In: WaBoLu 3/96
- Bundesministerium für Gesundheit.  
Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser-  
verordnung - TrinkwV 2000)
- Caffrey, P.B.; K.I. Keating:  
Daphnid zinc requirements.  
Environmental Toxicology and Chemistry. 1996.
- DiToro, D.M.; Allen, H.E.; Bergmann, H.L.; Meyer, J.S.; Santore R.C.; Paquin, P.:  
The biotic ligand Model.  
International Copper Association. Environmental program.  
New York, 2000
- Doherty, F.G.:  
Standard Operating Difficulties and Practical Limitations in the Conductance of Effluent  
Toxicity Tests (Abstract)  
TAPPI Proceedings Environmental Conference Book 1. p.89-95. 1993
- International Council on Metals and the Environment (Hrsg.):  
Persistence, bioaccumulation and toxicity of elements and metal compounds. council on  
Metals and the environment.  
Washington: ICME, 1995
- Keating, K.I.; Caffrey, P.B.:  
Zinc uptake by daphnids: Food vs. water as a source.  
Bulletin of the New Jersey Academy of Science 32:36., 1987
- Magliette, R.J.; Doherty, F.G.; McKinney, D. and E.S. Venkataramani:  
Need for Environmental Quality Guidelines Based on Ambient Freshwater Quality Criteria  
in Natural Waters-Case Study "Zinc" (Edited Abstract) Bulletin of Environmental  
Contamination and Toxicology 54(4):626-632, 1995
- Mills C.F.:  
Zinc in human biology  
London: Springer, 1989
- Neubert D.:  
Möglichkeiten und Methoden der quantitativen Risikoabschätzung.  
In: Lehrbuch der Toxikologie. Hrsg.: Marquardt H, Schäfer S.G.  
Mannheim, Leipzig, Wien. Zürich: Wissenschaftsverlag, 1997
- WHO: International Programme on Chemical Safety. Environmental Health Criteria 200. Copper  
Geneva, 1998
- WHO: International Programme on Chemical Safety. Environmental Health Criteria for zinc  
Geneva 1996

## Anhang 1

### Abschätzung der Kupferflächen in Duisburg

Exponierte Kupferflächen der BRD:  $64,1 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  (s. Kap. 1.4.1)

Bebaute Flächen der BRD:  $21.700 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  (UBA Daten Umwelt 2000)

Bebaute Flächen Stadt Duisburg:  $106,7 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  (Flächennutzungsplan 2000)

Der prozentuale Anteil der Kupferflächen in der BRD errechnet sich aus:

$$Cu_{\text{Flächen BRD}} = \frac{64.100.000 \text{ m}^2 \cdot 100\%}{21.700.000.000 \text{ m}^2} = 0,29\%$$

Dies entspricht einer Kupferfläche [m<sup>2</sup>] in Duisburg von:

$$Cu_{\text{Flächen Duisburg}} = \frac{106,67 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot 0,29\%}{100\%} = 0,31 \cdot 10^6 \text{ m}^2$$

### Abschätzung der Zinkflächen in Duisburg:

Exponierte Zinkflächen der BRD:  $260 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  (Racek)

Bebaute Flächen der BRD:  $21700 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  (UBA Daten Umwelt 2000)

Bebaute Flächen Stadt Duisburg:  $106,7 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  (Flächennutzungsplan 2000)

Der prozentuale Anteil der Zinkflächen in der BRD ergibt sich demnach aus:

$$Zn_{\text{Flächen BRD}} = \frac{260 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot 100\%}{21.738 \cdot 10^6 \text{ m}^2} = 1,24\%$$

Dies entspricht einer Zinkfläche [m<sup>2</sup>] in Duisburg von:

$$Zn_{\text{Flächen Duisburg}} = \frac{106,67 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot 1,24\%}{100\%} = 1,32 \cdot 10^6 \text{ m}^2$$

## Anhang 2

### Straßeneintrag Kupfer aus Bremsbelägen

Abriebrate Kupfer Bremsbeläge: 1 – 2 mg/km (Quelle Schweden)

Gefahrene Kilometer in der BRD:  $681.000 \cdot 10^6$  km/a (UBA 2000)

Fläche der öffentlichen Straßen:  $3.500 \cdot 10^6$  m<sup>2</sup> (UBA 2000)

Der Eintrag von Kupfer aus Bremsbelägen ( $E_{ges,Cu}$ ) errechnet sich aus dem Produkt von Abrieb und Kilometerleistung pro Jahr nach folgender Gleichung:

$$E_{ges,Cu} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ g} * 681.000 \cdot 10^6 \text{ km}}{\text{km} * a} = 1.362 * 10^6 \frac{\text{g}}{a}$$

Aus dem errechneten Wert  $E_{ges,Cu}$  und mit der Fläche an öffentlichen Straßen läßt sich ein spezifischer Straßenabfluß errechnen:

$$\text{spez. Straßenabfluß}_{Cu} = \frac{E_{ges,Cu}}{A_{\text{öff. Straße}}}$$

Mit eingesetzten Werten:

$$\text{spez. Straßenabfluß}_{Cu} = \frac{1.362 * 10^6 \text{ g}}{3.500 * 10^6 \text{ m}^2 * a} = 0,389 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 * a}$$



## Anhang 3

### Beispiel für Duisburg Trennkanalisation Kupfer

Versiegelte Fläche	141,11	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Wohnungen	76,79	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Straßen	34,44	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Industrie	29,88	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>

<b>Kupfer</b>	Fläche		Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>		g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer	0,31	* 10 <sup>6</sup>	1,34	415400	0,42	248000	1,675
Straßen	34,44	* 10 <sup>6</sup>	0,08	2755200	2,76	27552000	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	106,36	* 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	85088000	0,000
Deposition	141,11	* 10 <sup>6</sup>	0,00452	637817	0,64	112888000	0,006
<b>Summe</b>				<b>3808417</b>	<b>3,81</b>	<b>112888000</b>	<b>0,034</b>

### Annahme: Verdopplung der Kupferfläche

<b>Kupfer</b>	Fläche		Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>		g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer	0,62	* 10 <sup>6</sup>	1,34	830800	0,83	496000	1,675
Straßen	34,44	* 10 <sup>6</sup>	0,08	2755200	2,76	27552000	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	106,05	* 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	84840000	0,000
Deposition	141,11	* 10 <sup>6</sup>	0,00452	637817	0,64	112888000	0,006
<b>Summe</b>				<b>4223817</b>	<b>4,22</b>	<b>112888000</b>	<b>0,037</b>

**Beispiel für Duisburg Trennkanalisation Zink**

Versiegelte Fläche	141,11 * 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Wohnungen	76,79 * 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Straßen	34,44 * 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Industrie	29,88 * 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer	1,323 * 10 <sup>6</sup>	3	3969000	3,97	1058400	3,750
Straßen	34,44 * 10 <sup>6</sup>	0,27	9298800	9,30	27552000	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	105,347 * 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	84277600	0,000
Deposition	141,11 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	4882406	4,88	112888000	0,043
<b>Summe</b>			<b>18150206</b>	<b>18,15</b>	<b>112888000</b>	<b>0,161</b>

**Annahme: Verdopplung der Zinkfläche**

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer	2,646 * 10 <sup>6</sup>	3	7938000	7,94	2116800	3,750
Straßen	34,44 * 10 <sup>6</sup>	0,27	9298800	9,30	27552000	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	104,024 * 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	83219200	0,000
Deposition	141,11 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	4882406	4,88	112888000	0,043
<b>Summe</b>			<b>22119206</b>	<b>22,12</b>	<b>112888000</b>	<b>0,196</b>

## Anhang 4

### Beispiel für Duisburg Mischkanalisation Kupfer

Einwohnerzahl	523000		
Wasserverbrauch	150	l/d	
Versiegelte Fläche	141,11	*	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
Wohnungen	76,79	*	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
Straßen	34,44	*	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
Industrie	29,88	*	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>

Kupfer	Fläche		Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>		g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer	0,31	* 10 <sup>6</sup>	1,34	415400	0,42	248000	1,675
Straßen	34,44	* 10 <sup>6</sup>	0,08	2755200	2,76	27552000	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	106,36	* 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	85088000	0,000
Deposition	141,11	* 10 <sup>6</sup>	0,00452	637817	0,64	112888000	0,006
Trennkanalisation				3808417	3,81	112888000	0,034

Kupfer	Fracht	Wasserverbrauch	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	mg/l
<b>Mischkanalisation ohne Regen</b>	<b>4295138</b>	<b>4,30</b>	<b>28634250</b>

Kupfer	Fracht	Wasserabfluß	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	mg/l
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>	<b>8103555</b>	<b>8,10</b>	<b>141522250</b>

### Annahme: Verdopplung der Kupferfläche

Kupfer	Fläche		Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>		g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer	0,62	* 10 <sup>6</sup>	1,34	830800	0,83	496000	1,675
Straßen	34,44	* 10 <sup>6</sup>	0,08	2755200	2,76	27552000	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	106,05	* 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	84840000	0,000
Deposition	141,11	* 10 <sup>6</sup>	0,00452	637817	0,64	112888000	0,006
Trennkanalisation				4223817	4,22	112888000	0,037

Kupfer	Fracht	Wasserverbrauch	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	mg/l
<b>Mischkanalisation ohne Regen</b>	<b>4295138</b>	<b>4,30</b>	<b>28634250</b>

Kupfer	Fracht	Wasserabfluß	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	mg/l
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>	<b>8518955</b>	<b>8,52</b>	<b>141522250</b>

## Beispiel für Duisburg Mischkanalisation Zink

Einwohnerzahl	523000		
Wasserverbrauch	150	l/d	
Versiegelte Fläche	141,11	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Wohnungen	76,79	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Straßen	34,44	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Industrie	29,88	* 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer	1,323 * 10 <sup>6</sup>	3	3969000	3,97	1058400	3,750
Straßen	34,44 * 10 <sup>6</sup>	0,27	9298800	9,30	27552000	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	105,347 * 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	84277600	0,000
Deposition	141,11 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	4882406	4,88	112888000	0,043

Trennkanalisation	18150206	18,15	112888000	0,161
-------------------	----------	-------	-----------	-------

Zink	Fracht		Wasserverbrauch	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
<b>Mischkanalisation ohne Regen</b>	<b>14317125</b>	<b>14,32</b>	<b>28634250</b>	<b>0,500</b>

Zink	Fracht		Wasserabfluß	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>	<b>32467331</b>	<b>32,47</b>	<b>141522250</b>	<b>0,229</b>

## Annahme: Verdopplung der Zinkfläche

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer	2,646 * 10 <sup>6</sup>	3	7938000	7,94	2116800	3,750
Straßen	34,44 * 10 <sup>6</sup>	0,27	9298800	9,30	27552000	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	104,024 * 10 <sup>6</sup>	0	0	0,00	83219200	0,000
Deposition	141,11 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	4882406	4,88	112888000	0,043

Trennkanalisation	22119206	22,12	112888000	0,196
-------------------	----------	-------	-----------	-------

Zink	Fracht		Wasserverbrauch	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
<b>Mischkanalisation ohne Regen</b>	<b>14317125</b>	<b>14,32</b>	<b>28634250</b>	<b>0,500</b>

Zink	Fracht		Wasserabfluß	Konzentration
Einheit	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>	<b>36436331</b>	<b>36,44</b>	<b>141522250</b>	<b>0,257</b>

## Anhang 5

### Flächenberechnung für Kap. 2.5

Gesamtfläche BRD:	$35,7 * 10^6$	ha	100 %
Siedlungs- und Verkehrsfläche:	$4,205 * 10^6$	ha	11,8 %
Gebäude- dazugehörige Freifläche:	$2,174 * 10^6$	ha	6,1 %
Verkehrsfläche:	$1,675 * 10^6$	ha	4,7 %
Freifläche	$2,5 * 10^6$	ha	0,7 %

(Alle Daten aus UBA-Daten zur Umwelt 2000)

Wobei 50 % der Gebäude- und Verkehrsfläche versiegelt sind (UBA- Daten zur Umwelt 2000), mit obigen Werten ergibt sich dann:

Gebäude- dazugehörige Freifläche:	$1,087 * 10^6$	ha
Verkehrsfläche:	$0,837 * 10^6$	ha

Der Anteil von Überörtliche- und Gemeindestraßen ist angegeben mit (UBA- Daten zur Umwelt 2000):

Überörtliche Straßen	36 %
Gemeindestraßen	64 %

Es wird angenommen, dass von den Gemeindestraßen 65 % an die Kanalisation angeschlossen sind, dies entspricht:

$$3,5 * 10^6 \text{ ha} \quad \text{bzw.} \\ 3.500 * 10^6 \text{ m}^2$$

## Anhang 6

### Beispiel für die BRD Trennkanalisation

Einwohner	82 * 10 <sup>6</sup>	
Niederschlagsmenge	800	mm/a
Wasserverbrauch pro Einwohner	150	l/d
Versiegelte Fläche	14370 * 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Wohnungen + Industrie	10870 * 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Verkehr (Stadtstraßen)	3500 * 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>

### Trennkanalisation Kupfer

Kupfer	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer	64,1 * 10 <sup>6</sup>	1,34	86 * 10 <sup>6</sup>	86	51,28 * 10 <sup>6</sup>	1,675
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,08	280 * 10 <sup>6</sup>	280	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	10806 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8644,72 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,00452	65 * 10 <sup>6</sup>	65	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,006
<b>Summe</b>			<b>431 * 10<sup>6</sup></b>	<b>431</b>	<b>11496 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,037</b>

### Trennkanalisation doppelte Kupferfläche

Kupfer	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer doppelte Fläche	128,2 * 10 <sup>6</sup>	1,34	172 * 10 <sup>6</sup>	172	102,56 * 10 <sup>6</sup>	1,675
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,08	280 * 10 <sup>6</sup>	280	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	10742 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8593,44 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,00452	65 * 10 <sup>6</sup>	65	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,006
<b>Summe</b>			<b>517 * 10<sup>6</sup></b>	<b>517</b>	<b>11496 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,045</b>

### Trennkanalisation Zink

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer	260 * 10 <sup>6</sup>	3	780 * 10 <sup>6</sup>	780	208 * 10 <sup>6</sup>	3,750
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,27	945 * 10 <sup>6</sup>	945	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	10610 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8488 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	497 * 10 <sup>6</sup>	497	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,043
<b>Summe</b>			<b>2222 * 10<sup>6</sup></b>	<b>2222</b>	<b>11496 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,193</b>

### Trennkanalisation doppelte Zinkfläche

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer doppelte Fläche	520 * 10 <sup>6</sup>	3	1560 * 10 <sup>6</sup>	1560	416 * 10 <sup>6</sup>	3,750
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,27	945 * 10 <sup>6</sup>	945	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	10350 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8280 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	497 * 10 <sup>6</sup>	497	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,043
<b>Summe</b>			<b>3002 * 10<sup>6</sup></b>	<b>3002</b>	<b>11496 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,261</b>

## Beispiel für die BRD Mischkanalisation

Einwohner	82	*	10 <sup>6</sup>	
Niederschlagsmenge	800			mm/a
Wasserverbrauch pro Einwohner	150			l/d
Versiegelte Fläche	14370	*	10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Wohnungen + Industrie	10870	*	10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>
Verkehr (Stadtstraßen)	3500	*	10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup>

## Mischkanalisation Kupfer

Kupfer	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer	64,1 * 10 <sup>6</sup>	1,34	86 * 10 <sup>6</sup>	86	51,28 * 10 <sup>6</sup>	1,675
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,08	280 * 10 <sup>6</sup>	280	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	10806 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8644,72 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,00452	65 * 10 <sup>6</sup>	65	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,006

Trennkanalisation			431 * 10 <sup>6</sup>	431	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,037
Mischkanalisation ohne Regen			673 * 10 <sup>6</sup>	673	4490 * 10 <sup>6</sup>	0,150
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>			<b>1104 * 10<sup>6</sup></b>	<b>1104</b>	<b>15986 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,069</b>

## Mischkanalisation doppelte Kupferfläche

Kupfer	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Kupferdächer doppelte Fläche	128,2 * 10 <sup>6</sup>	1,34	172 * 10 <sup>6</sup>	172	102,56 * 10 <sup>6</sup>	1,675
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,08	280 * 10 <sup>6</sup>	280	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,100
Bebauung ohne Kupferdächer	10742 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8593,44 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,00452	65 * 10 <sup>6</sup>	65	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,006

Trennkanalisation			517 * 10 <sup>6</sup>	517	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,045
Mischkanalisation ohne Regen			673 * 10 <sup>6</sup>	673	4490 * 10 <sup>6</sup>	0,150
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>			<b>1190 * 10<sup>6</sup></b>	<b>1190</b>	<b>15986 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,074</b>

## Mischkanalisation Zink

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer	260 * 10 <sup>6</sup>	3	780 * 10 <sup>6</sup>	780	208 * 10 <sup>6</sup>	3,750
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,27	945 * 10 <sup>6</sup>	945	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	10610 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8488 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	497 * 10 <sup>6</sup>	497	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,043

Trennkanalisation			2222 * 10 <sup>6</sup>	2222	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,193
Mischkanalisation ohne Regen			2245 * 10 <sup>6</sup>	2245	4490 * 10 <sup>6</sup>	0,500
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>			<b>4467 * 10<sup>6</sup></b>	<b>4467</b>	<b>15986 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,279</b>

## Mischkanalisation doppelte Zinkfläche

Zink	Fläche	Eintrag	Fracht		Niederschlagsabfluß	Konzentration
Einheit	m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> a	g/a	t/a	m <sup>3</sup>	mg/l
Zinkdächer doppelte Fläche	520 * 10 <sup>6</sup>	3	1560 * 10 <sup>6</sup>	1560	416 * 10 <sup>6</sup>	3,750
Straßen	3500 * 10 <sup>6</sup>	0,27	945 * 10 <sup>6</sup>	945	2800 * 10 <sup>6</sup>	0,338
Bebauung ohne Zinkdächer	10350 * 10 <sup>6</sup>	0	0 * 10 <sup>6</sup>	0	8280 * 10 <sup>6</sup>	0,000
Deposition	14370 * 10 <sup>6</sup>	0,0346	497 * 10 <sup>6</sup>	497	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,043

Trennkanalisation			3002 * 10 <sup>6</sup>	3002	11496 * 10 <sup>6</sup>	0,261
Mischkanalisation ohne Regen			2245 * 10 <sup>6</sup>	2245	4490 * 10 <sup>6</sup>	0,500
<b>Mischkanalisation mit Regen</b>			<b>5247 * 10<sup>6</sup></b>	<b>5247</b>	<b>15986 * 10<sup>6</sup></b>	<b>0,328</b>

## Anhang 7

Messwerte der Konzentration im Rhein für Kupfer und Zink für das Jahr 1989 und 1998 (Quelle: Ökobase Umweltatlas 2001).

Messstellen		1989	1989	1998	1998
		Kupfer in µg/l	Zink in µg/l	Kupfer in µg/l	Zink in µg/l
Öhnungen	BW01	2,50	10,50	1,34	5
Dogern	BW02	2,50	19,80	1,89	6,3
Vogelgrün	BW19			2,91	9,6
Weisweil	BW03	2,50	15,30	3,64	9,1
Karlsruhe	BW04	3,49	18,70	2,66	7,2
Mannheim/Rhein	BW05	2,87	20,80	3,68	10,5
Mainz	RP02	6,00	53,00	5,2	22
Koblenz	RP01	6,63	26,50	4,4	25,2
Bad Honnef	NW01	5,39	22,20	7,69	13,5
Kleve-Bimmen	NW02	8,96	38,80	12,02	28,6



## Anhang 8

### Annahmen für durchschnittliche Abschwemmraten

In neueren Untersuchungen werden für Kupfer die folgenden Abschwemmraten angegeben:

	Standort	Neigung	Orientierung	Abschwemmrate		Quelle
				[g/m <sup>2</sup> a]	[µm/a]	
1.	Luzern	45°	S	1,19	0,13	EMPA: Wasseruntersuchungen - Korrosionsprüfungen, 2000
2.	Dübendorf	45°	S	1,8	0,20	Faller, M.: Metallabtrag und Metallabschwemmung, 2001
3.	Stockholm	45°	S	1,1 bis 1,5	0,15	Odnevall Wallinder, I. et al.: Effects of exposure, 2000
4.	Osnabrück	45°	S	1,1 bis 1,3	0,12 bis 0,15	Priggemeyer, S.: System zur Verbesserung, 1998

zu Zeile 1 Der Messwert stammt von einem Korrosionsversuch, zu dem auf dem großen, flach geneigten Kupferdach des Kongress- und Kulturzentrums Luzern ein gesonderter Teststand aufgestellt wurde. Das Kupferdach selbst wurde im Hinblick auf die Konzentrationen im Dachablaufwasser ausführlich untersucht. In dem Bericht, der auf einer Freibewitterung von 1,5 Jahren ab Mai 1998 beruht, wird der Messwert des Teststandes als „etwas zu tief“ bezeichnet und für die Schweiz die Annahme einer Abschwemmrate von 1,8 g/m<sup>2</sup>a entsprechend 0,2 µm/a empfohlen (s.a. Zeile 2.).

zu Zeile 2 Die Messungen wurden in Dübendorf, einem Ort im Ballungsgebiet (Nordschweiz) und mit feuchtem Klima, durchgeführt.

zu Zeile 3 Die Messwerte für Abschwemmraten liegen zwischen 1,1 (Laborbedingungen) und 1,5 g/m<sup>2</sup>a (Freibewitterung). Odnevall Wallinder gibt den Wert von 1,3 g/m<sup>2</sup>a für um 45° gegen die Horizontale nach Süden geneigte Flächen an und weist darauf hin, dass dieser unter Standardbedingungen (45°, S) anzunehmende Wert für einen Durchschnitt, der einer Verteilung der Flächen nach Neigung und Orientierung auf Dächern in der Baupraxis entspricht, noch zu reduzieren sei.

zu Zeile 4 Gemessen wurden Metallkonzentrationen in Dachablaufwässern von Versuchsdächern. Die Abschwemmraten sind aus den durch-

schnittlichen Konzentrationen mit den folgenden Parametern ermittelt:

Metalloberfläche Versuchsdach:	2,0 m <sup>2</sup>
Niederschlagsfläche:	0,625 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> Metalloberfläche
Niederschlag:	800 l/m <sup>2</sup> a

Daraus ergibt sich eine Niederschlagsmenge von 500 l/m<sup>2</sup>a bezogen auf die unter 45° exponierte Metallfläche. Die Werte beziehen sich auf unbehandeltes (TECU<sup>®</sup>-Classic, 2,6 mg/l entsprechend 1,3 g/m<sup>2</sup>a) und vorpatiniertes Kupfer (TECU<sup>®</sup>-Patina, 2,2 mg/l entsprechend 1,1 g/m<sup>2</sup>a).