Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

Methode zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt

Gerd Rebernig









[redacted]

Methode zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt

Gerd Rebernig

Wien 2007

Methode zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt

© 2007 Gerd Rebernig und Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft

Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
1040 Wien, Österreich
Tel.: +43 1 58801 22669
Fax: +43 1 504 22 34
E-mail: g.rebernig@iwa.tuwien.ac.at
URL: http://www.iwa.tuwien.ac.at

DANKSAGUNG

Professor Paul H. Brunner ermöglichte mir das Verfassen einer Dissertation an der Technischen Universität Wien. Ich bin ihm für die dreijährige Betreuung und für zahlreiche wichtige Impulse sehr dankbar. Ganz besonders schätze ich auch, dass er mich in all meinen Vorhaben immer bestmöglich unterstützte.
Professor Ulrik Lohm bin ich für die zahlreichen wertvollen Hinweise im Zuge von Diskussionen zur Dissertation dankbar. Als sein Gast am Institut Tema Vatten hatte ich in mehr als sieben Monaten die Möglichkeit wertvolle Forschungserfahrung im Ausland zu sammeln und mich persönlich weiter zu entwickeln.

Einen großen Beitrag bei der Durchführung des Projektes IOS leisteten **Brigitte** und **Gerald**. Ohne deren Unterstützung wäre dieses Projekt nicht in diesem Umfang bearbeitbar gewesen.
Oliver danke ich dafür, dass er mich tatkräftig bei der Berechnung der Unsicherheiten unterstützte. **Inge** hat wesentlich an der Aufbereitung der Grafiken in dieser Arbeit mitgewirkt.

Das Land Kärnten finanzierte das Projekt „Zukünftige nachhaltige Entwicklung - Ideale Oberfläche einer Stadt (IOS)“. Ohne die Begeisterung von **Dr. Gernot Wurm** für dieses Thema und ohne die Finanzierung durch das **Land Kärnten**, wäre das Verfassen der Dissertation nicht möglich gewesen. Vielen Dank!

Schlussendlich danke ich von ganzem Herzen meiner Schwester, **Marina**, und meinen Eltern, **Rita** und **Rupert**, die mich während meiner gesamten Ausbildung begleiteten und mir vor allem in den schwierigen Phasen ganz tolle Unterstützung boten.

KURZFASSUNG

Die „Haut“ von Bauwerken wird durch geogene Prozesse wie Erosion und Korrosion dauernd abgebaut. Das Verständnis und die Kontrolle dieser Prozesse sind wichtig, einerseits aus Gründen der Ressourcenschonung, andererseits belasten die resultierenden Stoffflüsse die Umwelt und müssen deshalb minimiert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Analyse und Bewertung der von städtischen Oberflächen ausgehenden Stoffflüsse in die Umwelt. Ein weiteres Ziel ist das Anwenden dieser Methode auf die Stadt Villach. Die Schwierigkeit liegt darin, die unterschiedlichen Oberflächen so zu kategorisieren, dass sich die Stoffflüsse in ihrer Gesamtheit erfassen und bewerten lassen.

Zunächst werden die Flüsse von ausgewählten Oberflächen ermittelt und schließlich auf die gesamte Stadt mittels Bebauungsklassen und Verkehrsbelastungsklassen hochgerechnet. Anschließend wird die Verteilung der Schwermetalle über unterschiedliche Pfade bis hin zu ihren Senken beschrieben. Aufbauend auf die Ergebnisse dieses stoffflussbasierenden Ansatzes werden Bewertungskriterien entwickelt. Die „oberflächenbezogenen Emissionen pro Einwohner“ und das „einwohnerbezogene emissionswirksame Lager“ beurteilen die Emissionsquellen, das Kriterium „Anteil an erfassten Stoffflüssen“ die Pfade und die „Eintragsfracht und Eintragsfläche“ sowie der „Verdopplungszeitraum“ die Belastung der Senken.

Städtische Oberflächen sind die bedeutendsten Kupfer-, Blei- und Zinkquellen in Villach. 72 respektive 50% der Kupfer- und Zinkemissionen landen im Boden, 11 respektive 30% im Gewässer, 11 respektive 16% im Klärschlamm und 6 respektive 4% in der Luft. Durch die Art der Kanalisation in Villach gelangt die Hauptfracht der Schwermetalle ins Gewässer. Im Klärschlamm kann nur ein geringerer Teil fixiert werden. Der größte Teil der Emissionen wird nicht durch die Kanalisation gefasst, sondern akkumulieren direkt im Boden. In Anlagen zur Versickerung von Dachabwässern können die Grenzwerte von Zink in weniger als 2 Jahren überschritten werden. Deshalb sind bei dezentraler Versickerung von Dachwässern zum Schutz des Bodens vor rascher Schwermetallakkumulation Filteranlagen vorzusehen.

Besonders die Oberflächen von Immobilien stellen aufgrund ihrer langen Verwendungsdauer langzeitwirksame Emissionsquellen dar und sind zukünftig aus umweltverträglichen Stoffen zu gestalten.

ABSTRACT

Surfaces of buildings are continuously destroyed by erosion and corrosion. These processes cause material flows, for example of heavy metals, into the environment.

The aim of this thesis is to develop a method to analyse and evaluate material flows originating from the surface of a city into the environment. This method is applied using the city of Villach, Austria, as a case study.

In the first step the material flows from different surfaces are described. By means of defined building and traffic categories these emissions are calculated for the whole city. The next step is to describe paths and sinks of emitted particles within the urban system. The material flow analysis of the urban system as a result of the first steps forms the basis for the evaluation method.
The criteria “per capita emissions caused by surfaces” and “per capita emitting stock” evaluate the sources of emissions, the “rate of collected material flows” describes the paths within the system and the “load into soil and affected area” and the “doubling rates“ express the influence on sinks within the city.

City surfaces are the most important sources of copper and zinc emissions. 72% and 50% respectively of Villach’s copper and zinc emissions originating from surfaces end up in soils, 11% and 30% respectively in the river Drau, 11% and 16% respectively in the sewage sludge and 6% and 4% respectively in the atmosphere. The amount of heavy metals transported to water bodies by the sewer system is larger than the amount fixed in sewage sludge (which goes to landfills). The majority of the emissions are not transported into the sewer system but accumulates directly in the soil.
In soils, which are used for on–site infiltration of roof rainwater, limit values are exceeded within two years. To prevent rapid heavy metal accumulation in soils, filter systems should be used in case of on-site infiltration.

Metallic surfaces for roofing of buildings are in use for long time periods. Thus, they emit large amounts of heavy metals throughout their lifetime. Hence in the future, materials with low emission rates should be used for roofing.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG 1

1.1 Urbaner Metabolismus 1

1.2 Schwermetalle 2

1.3 Emissionen von Schwermetallen 2

2 ZIELE UND FRAGESTELLUNGEN 5

2.1 Ziele 5

2.2 Fragestellungen 7

3 STAND DES WISSENS UND WISSENSDEFIZITE 9

3.1 Stand des Wissens 9

3.1.1 Schwermetalle beeinträchtigen die menschliche Gesundheit 9

3.1.2 Diffuse Schwermetallemissionsquellen sind heute bedeutender als punktförmige Quellen 11

3.1.3 Kanalisation 21

3.1.4 Kläranlage 23

3.1.5 Böden und Sedimente als Senken für Schwermetalle 27

3.2 Wissensdefizite 32

4 METHODISCHES VORGEHEN/ ENTWICKLUNG EINER BEWERTUNGSMETHODE 33

4.1 Systemdefinition 33

4.2 Analyse der Stoffflüsse 38

4.2.1 Subsystem Immobilien 40

4.2.2 Subsystem Mobilien 51

4.2.3 Prozess Kanalisation 56

4.2.4 Prozess Kläranlage *63*

4.2.5 Prozess Boden *64*

4.2.6 Prozess Oberflächengewässer und Sediment *67*

4.3 Bewertung 68

4.3.1 Bewertungskriterien *68*

4.3.2 Anwendung der Kriterien für den Städtevergleich *92*

5 RESULTATE 97

5.1 Definition des Systems Bezirk Villach Stadt 97

5.2 Analyse der Stoffflüsse 98

5.2.1 Subsystem Immobilien *98*

5.2.2 Zusammenfassung der gesamten oberflächenbezogenen Emissionen *104*

5.2.3 Prozess Kanalisation *108*

5.2.4 Prozess Kläranlage *114*

5.2.5 Prozess Boden *115*

5.2.6 Prozess Oberflächengewässer und Sediment *118*

5.2.7 Zusammenfassung der Resultate *119*

5.3 Bewertung am Beispiel des Bezirkes Villach Stadt 125

5.3.1 Oberflächenbezogene Emission pro Einwohner *125*

5.3.2 Einwohnerspezifisches emissionswirksames Lager *127*

5.3.3 Anteil an erfassten Stoffflüssen *130*

5.3.4 Eintragsfracht und Eintragsfläche *131*

5.3.5 Verdopplungszeitraum *135*

6 ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN 139

6.1 Methodische Erkenntnisse 140

6.1.1 Das komplexe System Stadt lässt sich anhand der SFA derart vereinfachen, dass die von Oberflächen ausgehenden Emissionen genügend genau erfasst werden können *140*

6.1.2 Neue Indikatoren zur Bewertung von Emissionen 142

6.1.3 Das Verminderungspotential ermöglicht die Bewertung von Maßnahmen 143

6.1.4 Städtevergleich 144

6.2 Inhaltliche Erkenntnisse 145

6.2.1 Quantifizierung der Emissionen von Oberflächen der Stadt Villach 145

6.2.2 Frachten in die Umweltmedien 148

6.2.3 Vergleich der Ergebnisse 149

6.2.4 Bewertung 151

6.3 Folgerungen und Empfehlungen 155

6.3.1 Folgerungen für die Praxis 155

6.3.2 Empfehlungen 156

7 ANHANG 159

7.1 Analyse der Stoffflüsse 159

7.1.1 Subsystem Immobilien 159

7.1.2 Subsystem Mobilien 176

7.1.3 Prozess Kanalisation 182

7.2 Bewertung der Stoffflüsse 193

7.2.1 Nicht oberflächenbezogene Emissionen 193

7.3 Datenblätter zur Erhebung der metallischen Bauwerksoberfläche 197

8 VERZEICHNISSE 199

8.1 Abbildungen 199

8.2 Tabellen 201

9 GLOSSAR 205

10 LITERATUR 209

1 EINLEITUNG

1.1 Urbaner Metabolismus

Weltweit entwickelte sich in den letzten zwei Jahrhunderten ein Trend zur Urbanisierung. Die Ballungszentren wachsen derzeit ohne erkennbare Grenzen, heute leben schon zwei von drei Europäern in urbanen Regionen (Europäische Umweltagentur 2003).
Typisch für Städte sind die hohe Bevölkerungsdichte, der große Bedarf an Energie und an Rohstoffen und die hohe Konzentration von Materialien auf sehr kleinen Flächen.
Zur Deckung der menschlichen Grundbedürfnisse, darunter werden in diesem Zusammenhang die Aktivitäten „Ernähren", „Reinigen", „Wohnen", „Transport" und „Kommunikation" verstanden (Baccini und Brunner 1991), sind heute große Mengen an Rohstoffen und Energie notwendig. Die Versorgung mit Rohstoffen erfolgt entweder aus dem Umland oder über weite Transportrouten aus primären Lagerstätten außerhalb Europas. Das Umland urbaner Regionen dient jedoch nicht nur der Versorgung, sondern auch der Entsorgung von Abfällen und Abwässern aus den Ballungszentren. Analysen des Güterverbrauches pro Kopf zeigen außerdem, dass dieser in modernen Industrieländern vor allem im 20. Jahrhundert stark gestiegen ist (Brunner und Rechberger 2004).

Bei umfassenden Diskussionen des urbanen Metabolismus sind die Bereiche der Versorgung aber auch der Entsorgung zu berücksichtigen. Der Metabolismus von Städten wurde erstmals durch Abel Wolman im Jahre 1965 beschrieben (Wolman 1965). Im Zuge der Analysen des urbanen Metabolismus entdeckte man, dass es heute zum Aufbau enormer Lager in urbanen Regionen kommt (Lohm, Bergbäck et al. 1997). Den mengenmäßig größten Anteil an diesem Lager haben in Bauwerken und Infrastruktureinrichtungen gespeicherte Materialien. Im Fall der Bauwerke setzt sich dieses Lager aus Ziegeln, Mauerwerk, Beton, Holz, Eisen, Kunststoffe, Glas und Nichteisenmetalle zusammen. Neben großen Mengen an unproblematischen Materialien enthält dieses Lager aber auch Stoffe und Güter, die für die menschliche Gesundheit bedenklich sind und es kommt zu Emissionen dieser Stoffe und Güter aus dem urbanen Lager.

1.2 Schwermetalle

Als Folge der hohen Bevölkerungsdichten in urbanen Zentren entstehen hohe Stoff- und Güterumsätze. Diese verursachen wiederum genauso wie das bestehende Lager zahlreiche Emissionen. Neben organischen Verbindungen sind besonders Schwermetalle von Bedeutung. Metalle lassen sich in für den menschlichen Organismus essentielle und nicht essentielle einteilen. Essentiell für lebende Organismen sind beispielsweise Eisen, Zink oder Kupfer, zu den nicht essentiellen zählen unter anderem Blei, Cadmium und Quecksilber. Letztere sind schon in geringen Mengen toxisch. In hohen Konzentrationen vermögen auch essentielle Metalle, darunter beispielsweise Zink oder Kupfer, toxisch zu wirken (Merian, Geldmacher-v. Mallinckrodt et al. 1984).
Der Gestaltung eines städtischen Umfeldes, in dem die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit minimal ist, kommt eine ganz besondere Bedeutung zu. Daraus folgt die Forderung nach dem Schutz der Umweltmedien Luft, Wasser und Boden vor einer starken Belastung mit Schwermetallen.

1.3 Emissionen von Schwermetallen

Produktions- und Konsumemissionen

In der Vergangenheit waren es vor allem im Zuge des Produktionsprozesses entstehende Emissionen (Produktionsemissionen) durch Industrieanlagen, die für die Freisetzung der größten Menge an Metallen verantwortlich waren. In der Umgebung von metallverarbeitenden Industrien kam es folglich auch zu massiven Belastungen der Umwelt, vielerorts verursachten industrielle Tätigkeiten eine langfristige Kontaminierung des Bodens (Eklund 1995). Eine sich ständig verbessernde Technologie am Sektor der Industrieanlagentechnik und von Gesetzgebern vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte führten zu einer Änderung dieses Zustandes, sodass diese punktförmigen Quellen stark entschärft werden konnten.
Anfang der 90er Jahre kam man erstmals zu dem Ergebnis, dass bedeutendere Emissionen durch die Verwendung von Produkten als durch die Produktion derselben hervorgerufen werden (Bergbäck 1992). Das Produkt selbst ist demnach heute zum eigentlichen Problem geworden. Bergbäck zeigt, dass die Konsumemissionen von Cadmium in Schweden die Produktemissionen weit übertreffen (Bergbäck 1992). Unter Konsumemissionen wird in

diesem Zusammenhang jener Anteil eines Produktes verstanden, der früher oder später in der Umwelt verteilt wird (Anderberg, Bergbäck et al. 1989).
Ein weiteres Beispiel für die Bedeutung der Konsumemissionen ist der Vergleich der entstehenden Emissionen bei der Produktion und der Nutzung von Kupferdachbahnen. Die durch die Produktion entstehenden Emissionen in die Luft und ins Gewässer sind mehr als neun Mal geringer als die Emissionen, die durch den Korrosionsprozess während einer 50 - jährigen Nutzung dieser Kupferdachbahnen verursacht werden.

Punktförmige und diffuse Emissionen

Das Produkt als Emissionsquelle bedeutet, dass es eine große Anzahl von Quellen gibt, jede einzelne verursacht jedoch nur eine geringe Emission. Zusammengefasst werden diese Emissionen unter dem Begriff diffuse Emissionen. Sie stehen im Gegensatz zu punktförmigen Emissionen, darunter fallen beispielsweise jene von Industrieanlagen oder Kläranlagen.
Ende der 70er Jahre zeigten erste Studien die Bedeutung von diffusen Metallemissionen auf. In einem Bericht über die Verunreinigungsquellen des Hudson - Raritan Basin zeigten Tarr und Ayres, dass die Verwendung von Tetraethylblei als Treibstoffadditiv stärker zur Verunreinigung von Gewässer und Böden mit Blei beiträgt als punktförmige Emissionsquellen im Einzugsgebiet (Tarr und Ayres 1990).

Diffuse Emissionen treten in großen Mengen dort auf, wo es hohe Konzentrationen an Material und Energie gibt, also schwerpunktmäßig in urbanen Regionen. Konnte das Problem der punktförmigen Verunreinigungsquellen mit einer relativ einfachen Strategie - es handelt sich dabei zumeist um eine End-of-pipe-Strategie, beispielsweise durch den Einbau von Filtern bei Industrieanlagen - in den Griff bekommen werden, so ist die Entschärfung diffuser Emissionsquellen wesentlich komplexer (Bergbäck 1992). Um diffuse Emissionen analysieren und quantifizieren zu können, bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtungsweise des existierenden urbanen Systems, die Emissionsquellen, die Transportwege der emittierten Stoffe und deren letzte Senke sind zu inkludieren.

Folgen der Emission von Schwermetallen in urbanen Zentren

Die Senken dieser Schwermetalle sind Böden und Sedimente. Aus Böden können Schwermetalle ausgewaschen werden und ins Grundwasser gelangen. In Städten finden sich im Boden und Sediment stark erhöhte Konzentrationen dieser Stoffe, die nicht nur aus der

gegenwärtigen, sondern auch aus den Aktivitäten der Vergangenheit stammen (Sternbeck und Östlund 2001; Sviden und Jonsson 2001).

Schwermetalle sind biologisch nicht abbaubar, akkumulieren in Böden und Sedimenten, gelangen über diese in die Nahrungskette und verursachen damit eine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit (Lithner, Holm et al. 2001).

2 ZIELE UND FRAGESTELLUNGEN

2.1 Ziele

Das Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung einer Methode zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt.

Dieses Hauptziel lässt sich in drei Detailziele aufgliedern:

1. Die Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Analyse der gesamten Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt.
2. Die Bewertung der durch Oberflächen verursachten Stoffflüsse.
3. Die Anwendung des methodischen Vorgehens und der Bewertungsmethode auf ein urbanes System und die Ableitung von Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger aus dieser Fallstudie zur Unterstützung der Gestaltung urbaner Oberflächen und der Bewältigung der Emissionen.

Mit Hilfe der Bewertungskriterien muss schließlich der bestehende Zustand urbaner Regionen quantifizierbar und die Wirkung von baulichen und planerischen Veränderungen abschätzbar sein. Über die Abschätzung der Auswirkung gesetzter Maßnahmen sind jene mit der größten positiven Wirkung identifizierbar. Ihre Umsetzung bewirkt eine gezielte positive Stadtentwicklung durch eine proaktive Planung.
Die entwickelte Methode soll die Möglichkeit bieten, urbane Systeme über längere Zeitspannen zu bilanzieren und zu bewerten. Damit können bedeutende Veränderungen sowie die städtische Entwicklung der Vergangenheit bewertet werden. Die Analyse dieser Trends der vergangenen Jahrzehnte ermöglicht es, auf die zukünftige Entwicklung der jeweiligen Stadt zu schließen.
Schlussendlich soll es möglich sein, Städte unterschiedlicher Größe, Beschaffenheit topographischer und geographischer Lage miteinander zu vergleichen. Der Vergleich ermöglicht das Identifizieren positiv und negativ wirkender charakteristischer Eigenschaften der Systeme. Sind die positiv Wirkenden identifiziert, so können diese gezielt zur zukunftsfähigen Gestaltung von Städten eingesetzt werden.

Unter der Oberfläche einer Stadt wird die Oberfläche von Immobilien und Mobilien verstanden. Sie lässt sich in eine äußere und eine innere Oberfläche unterteilen.
Unter der äußeren Oberfläche wird jene Fläche einer Immobilie oder Mobilie verstanden, die das Objekt zur Umgebung hin abgrenzt. Beispiele sind die Dachhaut oder Fassade bei Immobilien und die Karosseriefläche oder Reifenlauffläche bei Mobilien.
Unter der inneren Oberfläche wird jene Fläche einer Immobilie oder Mobilie verstanden, die das Objekt zum Innenraum hin abgrenzt. Beispiele sind verputzte Innenwände von Bauwerken oder Wasserleitungen bei Immobilien und die Fläche des Innenraums von Kraftfahrzeugen oder die Oberfläche von Bremsbelägen bei Mobilien.

Oberflächen verursachen Emissionen. Sie entstehen durch die

- Wechselwirkung einer anthropogenen Oberfläche mit der Atmosphäre oder Hydrosphäre, beispielsweise die Korrosion von verzinkten Dachflächen, oder der
- Wechselwirkung von zwei anthropogenen Oberflächen, beispielsweise der Abrieb der Bremsbeläge von Kraftfahrzeugen.

In dieser Arbeit werden Emissionen von äußeren Oberflächen (Gebäudehülle, Verkehrsinfrastruktur, Reifenlaufflächen) und Emissionen von inneren Oberflächen (Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen, Bremsbeläge von Kraftfahrzeugen und Schienenfahrzeugen) diskutiert. Vergangene Studien, beispielsweise von Sörme (Sörme 2003), zeigten, dass sie die mengenmäßig bedeutendsten Zink-, Kupfer-, Blei- und Cadmiumquellen von Mobilien und Immobilien sind. Alle anderen Oberflächen werden in dieser Arbeit nicht behandelt.
Unter der Oberfläche einer Stadt werden in dieser Arbeit diese ausgewählten äußeren und inneren Oberflächen der Immobilien und Mobilien zusammengefasst.
Unter dem Begriff oberflächenbezogene Emission wird die von diesen ausgewählten Oberflächen verursachte Schwermetallemission verstanden.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Förderung einer ökologisch nachhaltigen urbanen Entwicklung liefern. Sie soll der Forderung zur Schaffung einer zukunftsfähigen urbanen Umwelt und zur langfristigen Gewährleistung einer dauerhaften Lebensqualität für die in den Ballungszentren lebenden Menschen Folge leisten.

2.2 Fragestellungen

Zum Erreichen der formulierten Ziele müssen in der vorliegenden Dissertation Antworten auf folgende Fragen gefunden werden:

1. Welche Prozesse, Güter, Stoffe und Flüsse sind in einer umfassenden Systemdefinition zur Beschreibung eines urbanen Systems notwendig? Welche Oberflächen der Immobilien und Mobilien erweisen sich im Hinblick auf ihre Emissionen als bedeutend und wie ist methodisch bei deren Analyse vorzugehen?
2. Wie können die bedeutendsten Emissionen von Oberflächen und die aus diesen resultierenden Stoffflüssen in städtischen Regionen quantifiziert werden?
3. Welches Ergebnis bringt der Vergleich der Emissionen von Oberflächen zu den gesamten Emissionen von Schwermetallen in urbanen Systemen? Wie bedeutend sind demnach die oberflächenbezogenen Emissionen?
4. Über welche Stoffflüsse gelangen die Schwermetalle in die Gewässer und in die Böden und wie ist methodisch bei der Bestimmung der Größenordnung dieser Frachten vorzugehen?
5. Wo in urbanen Regionen treten Schwermetalleinträge in den Boden und ins Sediment auf? Wie sieht das methodische Vorgehen zur Quantifizierung dieser aus und welche Vereinfachungen und Annahmen sind für eine Anwendung des Vorgehens notwendig?
6. Wie können die langfristig bedeutenden Einträge identifiziert werden und an welchen Richtwerten können sich akzeptable Belastungen von Senken orientieren?
7. Welche Kriterien sind für eine Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen zu wählen?
8. Wie können urbane Regionen unterschiedlicher Größe, Struktur, topographischer und geographischer Lage bezüglich ihrer oberflächenbezogenen Emissionen, der daraus resultierenden Stoffflüsse und der Beeinträchtigungen der Senken untereinander verglichen werden?
9. Wie lassen sich Maßnahmen bewerten?
10. Welche Empfehlungen für die Praxis lassen sich aus der Anwendung der entwickelten Methode auf ein urbanes System ableiten?

3 STAND DES WISSENS UND WISSENSDEFIZITE

3.1 Stand des Wissens

3.1.1 Schwermetalle beeinträchtigen die menschliche Gesundheit

Schwermetalle wie Eisen, Zinn, Kupfer oder Nickel sind in kleinen Mengen lebenswichtig für den Menschen. Viele Schwermetalle sind für den menschlichen Organismus gesundheitsschädlich oder giftig. Meist werden diese über die Nahrungskette aufgenommen und gelangen so in den menschlichen Körper. Vertreter dieser Gruppe sind beispielsweise Blei, Cadmium oder Quecksilber.

Blei verursacht beim Menschen Schädigungen im Blutsystem, im Magen-Darm-Trakt, im Zentralnervensystem und hat auch Entwicklungsstörungen bei Embryonen zur Folge. Bei Kindern sind ab 100 µg/l Blei im Blut geringfügig verringerte Intelligenz und psychomotorische Defizite feststellbar (Bernard, Vyskocil et al. 1995). Blei wird nur langsam ausgeschieden und reichert sich deshalb im Körper an. Es lagert sich vor allem in den Knochen anstelle von Calcium an. Eine zu hohe Aufnahme von metallischem Blei und Bleiverbindungen führt zu Vergiftungen.

Die chronische Aufnahme von Cadmium führt beim Menschen zu Blutarmut, Knochen- und Nierenschäden (Nriagu 1980). Die Niere ist das anfälligste Organ bei chronischer Cadmiumexposition, Nierenfunktionsstörungen sind die Folge dieser Exposition (Koch 1995).

Aber auch für den Menschen lebenswichtige Metalle können gesundheitsschädlich wirken. Kupfer ist ein essentielles Spurenelement, zu hohe Einnahmemengen gehen beim Menschen jedoch mit Leberzellenschäden einher (Koch 1995). Die Toleranz des menschlichen Körpers ist stark von der Art der Aufnahme abhängig. Über die Atemwege inhalierter Staub und Dämpfe wirken sich im Vergleich zur oralen Aufnahme von Kupfer über die Nahrung unterschiedlich auf die menschliche Gesundheit aus.

Soll die menschliche Gesundheit geschützt werden, so ist es notwendig, das Grundwasser, die Oberflächengewässer, die Luft und den Boden vor starken Verunreinigungen mit Schwermetallen zu schützen.

Menschen nehmen Schwermetalle auf verschiedenen Wegen auf:

- Aufnahme über das Trinkwasser und die Nahrung

  Pflanzen, die auf kontaminierten Böden wachsen, nehmen Schwermetalle aus diesen auf. Handelt es sich bei diesen Pflanzen um solche, die zur Herstellung von Nahrungsmitteln verwendet werden, so enthalten diese folglich höhere Konzentrationen an Schwermetallen. Durch den Verzehr der Nahrungsmittel oder durch den Konsum von Trinkwasser mit erhöhten Schwermetallgehalten kommt es zur Aufnahme und Anreicherung von Schwermetallen im menschlichen Körper.

  Niedere Organismen, die in einer schwermetallbelasteten Umgebung leben, nehmen ebenso Schwermetalle auf, wodurch diese in die Nahrungskette gelangen (Lithner, Holm et al. 2001). In Schweden reicherten sich auf diesem Weg solche Mengen an Quecksilber in Fischen aus Binnengewässern an, dass schwangeren Frauen vom Verzehr dieser abgeraten wurde (Naturvardsverket 2002).

- Einatmen und Verschlucken von Staub und Erde

  Kinder nehmen Schwermetalle durch das Einatmen und Verschlucken von schwermetallbelastetem Staub und –belasteter Erde beim Spielen in Parkanlagen und auf Kinderspielplätzen auf (Thornton 1991). Aber auch Erwachsene atmen in urbanen Zentren permanent Staub mit erhöhten Schwermetallkonzentrationen ein.

Das Europäische Parlament und der Europäische Rat verabschiedeten eine Verordnung zum Schutz der Gewässer vor gefährlichen Stoffen. Blei, Cadmium und Quecksilber zählen zu diesen gefährlichen Stoffen (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2001). Mit Maßnahmen an der Quelle sollen zukünftig Emissionen dieser Stoffe in die Umwelt unterbunden werden. Dazu wurde beispielsweise die Richtlinie zur Beschränkung des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen, die sich besonders auf Cadmium bezieht, erlassen. Sie regelt die Verwendung von Cadmium in Anstrichen und Lacken (Rat der Europäischen Union 1991).

Der Großteil der gesetzlichen Vorschriften bezieht sich jedoch nicht auf diffuse Emissionsquellen (Sörme, Lindqvist et al. 2003). Die Ursache dafür ist, dass es heute noch an Wissen über die Bedeutung diffuser Schwermetallemissionsquellen fehlt.

3.1.2 Diffuse Schwermetallemissionsquellen sind heute bedeutender als punktförmige Quellen

Zum ersten Mal aufmerksam auf die Bedeutung von diffusen Emissionen wurde man im Zuge einer Studie über die Verunreinigung des Sediments im Mündungsgebiet des Hudson Rivers in den USA (Tarr und Ayres 1990). Über den Zeitraum eines Jahrhunderts, von 1880 bis 1980, bilanzierte man in diesem Projekt die Emissionen von Pestiziden, Herbiziden, Schwermetallen und anderen Verunreinigungen im Einzugsgebiet des Flusses. Die Ergebnisse zeigen, dass bedeutende Mengen an Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink bereits vor 1900 emittiert wurden (Ayres und Rod 1986). Als Hauptpfade für die Emission von Schwermetallen zeigten sich metallurgische Aktivitäten, die Verbrennung von fossilen Energieträgern und Emissionen aus der Verwendung von Produkten verantwortlich. In den letzten 30 bis 40 Jahren verschoben sich die Schwermetallemissionen im Einzugsgebiet des Hudson Rivers ganz klar von produktionsbedingten hin zu konsumbedingten Quellen. Diese sind heute für den größten Teil der Schwermetallemissionen im Einzugsgebiet des Flusses verantwortlich.

Anderberg und Stigliani analysierten die Verschmutzung des Rheins mit Cadmium über die letzten 50 Jahre (Anderberg und Stigliani 1994). Mitte der 80er Jahre verringerte sich die gesamte Cadmiumbelastung auf etwa 20 % des Eintrages in den 70er Jahren. Der Hauptgrund ist die verbesserte Reinigung der Abwässer der metallverarbeitenden Industriebetriebe im Einzugsgebiet des Rheins. Die Gründe für die Verminderung liegen aber auch in den Reduktionen der diffusen Emissionen durch die Abnahme der atmosphärischen Deposition von Cadmium, die Abnahme der Korrosionsrate von galvanisiertem Zink und die Verringerung der Abschwemmung nicht versiegelter Flächen sowie der Sickerwassermenge von Deponien (Anderberg und Stigliani 1994).

Der zweite erkennbare Trend ist, dass die Belastung mit Schwermetallen aus diffusen Quellen zunehmend an Bedeutung gewinnt und punktförmige heute bereits deutlich übertreffen. Urbane Gebiete sind hauptverantwortlich für diffuse Emissionen. Der Verkehr, die Korrosion metallischer Werkstoffe und die atmosphärische Cadmiumdeposition auf versiegelten Flächen, die über das Regenwasser in den Rhein gelangt, sind heute die wesentlichen Quellen der Belastung des Rheins mit Cadmium.

Die Bedeutung unterschiedlicher Schwermetallemissionsquellen änderte sich aber nicht nur auf regionaler, sondern auch auf nationaler Ebene. In einem Vergleich von punktförmigen und diffusen Zinkquellen in Schweden wird gezeigt, dass über dissipative Verluste heute etwa dreimal soviel Zink in die Umwelt emittiert wird wie aus Punktquellen (Landner und Lindeström 1996).

3.1.2.1 Quellen diffuser Emissionen

Obgleich der steigenden Bedeutung diffuser Quellen gibt es wenige Studien, die das Ziel verfolgen, Emissionen aus diesen Städten und Regionen zu quantifizieren. Eine diesbezüglich relativ genau untersuchte urbane Region ist Stockholm. In der Studie „Stockhome" analysierte man das bestehende Metalllager der Stadt und identifizierte jene Güter, die in Wechselwirkung mit dem Boden, Wasser und der Luft stehen. Diese befinden sich in exponierter Lage und sorgen im Gegensatz zu in geschützter Lage befindlichen Gütern für Emissionen in die Umwelt (Lohm, Bergbäck et al. 1997). Auf diese Studie aufbauend ermittelte Louise Sörme die gesamten diffusen Emissionen der Stadt Stockholm in die Umwelt. Sie belaufen sich auf über 20000 kg Zink, 12000 kg Kupfer, 1300 kg Blei und 10 kg Cadmium pro Jahr. (Sörme 2003).

Aus den oben angeführten Projekten geht klar hervor, dass die bedeutendsten Emissionsquellen von Zink Reifenlaufflächen und galvanisierter Stahl, von Kupfer Wasserleitungen, Bremsbeläge und Dächer, von Blei Munition, Senkblei, Anstrichpigmente und Bremsbeläge, und von Cadmium Reifenlaufflächen, Künstlerfarben, galvanisierte Produkte und Gartendünger sind.

3.1.2.2 Gebäudehülle als Emissionsquelle

Mehr als 12000 kg Kupfer gelangen jährlich über diffuse Emissionen in Stockholms Umwelt (Sörme 2003). 1200 kg stammen von Dachflächen, davon werden allein in der Innenstadt jährlich etwa 900 kg Kupfer von Stockholms Dächern emittiert (Mroz 2003).

Um die Emissionen von Dächern und Fassaden bestimmen zu können, sind Daten über die Zusammensetzung der Gebäudehülle essentiell.

Zu diesem Themengebiet findet sich aber sehr wenig Literatur. Eine Ausnahme stellt das 1989 in Stockholm durchgeführte Projekt „Utvändiga byggnadsmaterial - mängder och nedbrytning" dar, das als Ziel die Erhebung der verwendeten Materialien zur Ausbildung der Gebäudehülle hatte. 500 Bauobjekte wurden im Detail untersucht, als Ergebnis erhielt man

die Anteile an Metall, Holz, Ziegel, Beton, Glas, Putz und anderen Materialien an den gesamten Fassaden- und Dachflächen der Stadt (Tolstoy, Andersson et al. 1989).
Die Quantifizierung der Kupferdachflächen ist auch durch die Auswertung von digitalen Luftbildaufnahmen möglich. Ekstrand, Östlund und Hansen entwickelten eine Methode zur Bestimmung der Kupferdachflächen einer Stadt mit Hilfe von Luftbildaufnahmen. Dabei werden die Aufnahmen automatisch klassifiziert und der Anteil an neuem und patiniertem Kupfer berechnet (Ekstrand, Östlund et al. 2001).
Die Gebäudehülle ist verantwortlich für wesentliche Schwermetallemissionen in die Umwelt. Dies belegt auch eine Studie von De Miguel, die zeigt, dass hohe Zink- und Cadmiumkonzentrationen, verursacht durch die Korrosion von galvanisierten Produkten, in der Nähe alter Bauwerke nachweisbar sind (De Miguel, Llamas et al. 1996).

Korrosion metallischer Werkstoffe

Korrosion bezeichnet die physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann (Europäisches Komitee für Normung 1999). Bei atmosphärischer Korrosion wird die Wechselwirkung durch die Gase und Dämpfe der Atmosphäre verursacht (Römpp 2006).

Zunächst werden die metallischen Verbindungen in ihre oxidierte Form übergeführt, bleiben aber in Form von löslichen oder nicht löslichen Korrosionsprodukten an der Materialoberfläche gebunden. Die Rate dieser Umsetzung bezeichnet man als Korrosionsrate. Im Gegensatz dazu bezeichnet die Abschwemmrate die Verluste der löslichen ionischen Metalle von der Patinaschicht durch den Niederschlag.

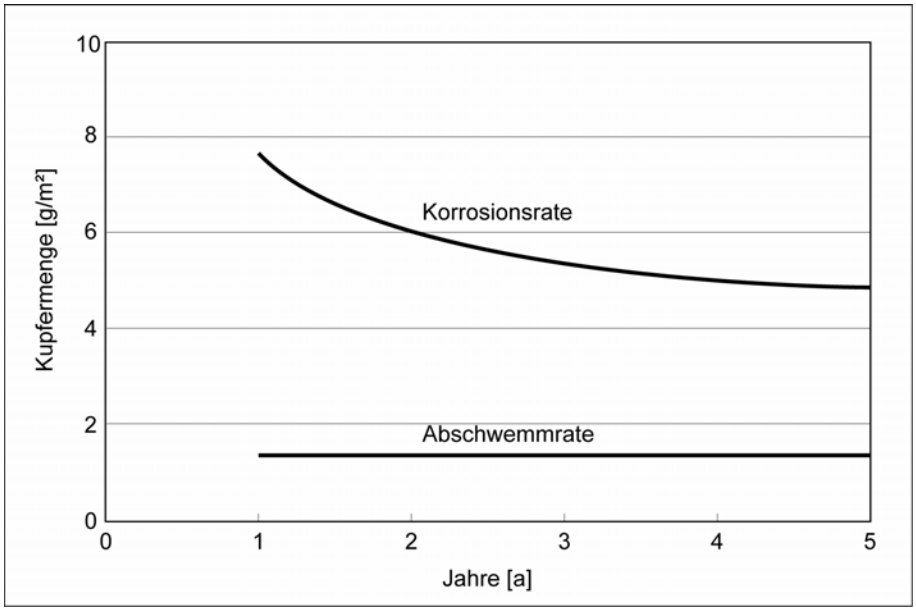


Abbildung 1: Veränderung der Korrosions- und Abschwemmrate bei Kupferdachbahnen über die Zeit (Faller 2003)

Korrosions- und Abschwemmraten sind gleich groß und verändern sich über die Zeit, dies zeigt Abbildung 1 am Beispiel von Kupferdachbahnen.

Zur Ausbildung der Dachhaut kommt eine breite Palette an Produkten zum Einsatz. Diese unterscheiden sich naturgemäß in ihren Korrosions- und Abschwemmraten. Tabelle 1 listet einige ausgewählte Materialien samt den von ihnen emittierten Metallmengen auf. Im Anhang finden sich weitere Angaben zu Korrosions- und Abschwemmraten dieser Werkstoffe.

Tabelle 1: Abschwemmrate ausgewählter metallischer Werkstoffe (Persson und Kucera 2000)

	Cu [mg/m²*a]	**Zn** [mg/m²*a]	**Pb** [mg/m²*a]
Kupferdach	*689-849*		
Galvanisierter Stahl		*2742-3014*	
Blei			*940*
Korrosionsschutzanstrich		*720*	

Einflussfaktoren auf die Korrosion metallischer Oberflächen

Die Korrosivität der Atmosphäre wird durch klimatische Faktoren wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie den Gehalt an Schadgasen wie Schwefeldioxid, Stickoxide oder Ozon beeinflusst (Sjöström und Henrikson 1987). Der Schwefeldioxidgehalt der Atmosphäre beeinflusst die Korrosionsgeschwindigkeit stark. Die Schwefeldioxidemissionen in die Luft verminderten sich in Europa seit 1990 um gut zwei Drittel und Hand in Hand damit

verringerten sich auch die Korrosionsraten von metallischen Oberflächen entsprechend stark (siehe dazu Abbildung 2).

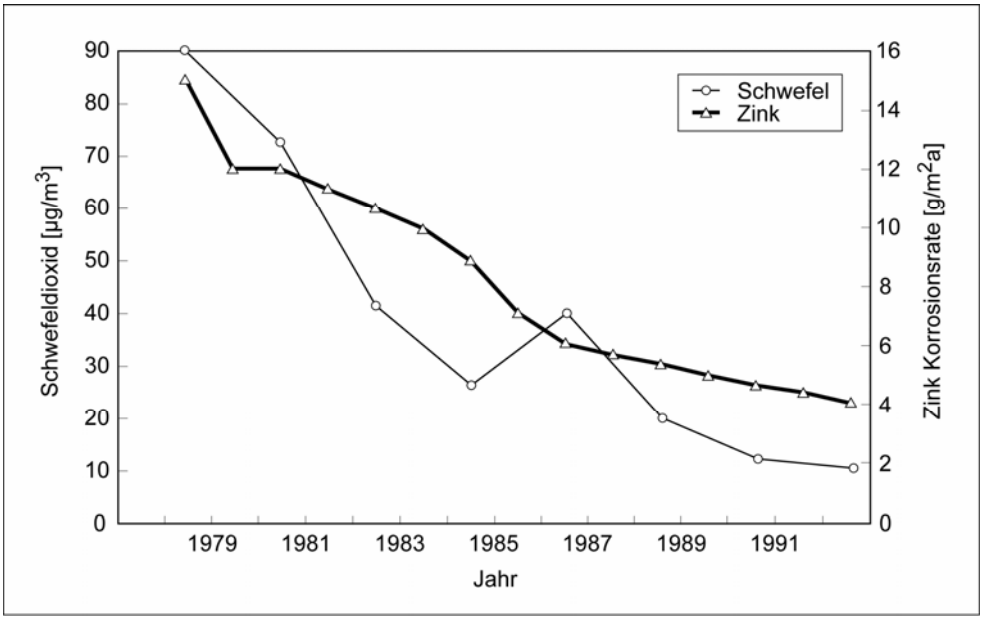


Abbildung 2: Veränderung der Zinkkorrosionsrate (Van Assche und Regoli 2003)

Weitere Einflussfaktoren sind die Regenintensität, Trockenperioden zwischen Regenereignissen, die Niederschlagsmenge und das Alter des Dachmaterials (Odnevall Wallinder, Verbiest et al. 1999).

Neigung

Mit zunehmender Neigung der Dachfläche von der Horizontalen nimmt die gesammelte Niederschlagsmenge durch die Dachfläche ab. Damit verringert sich auch die Abschwemmrate. Im Vergleich von 45° und 90° geneigter Zinkmodelldachflächen liegt die quadratmeterbezogene Abschwemmrate bei der 90° geneigten Fläche um die Hälfte bis zu drei Viertel niedriger als jene der 45° geneigten Fläche (Odnevall Wallinder, Verbiest et al. 1999).

Orientierung der Dachfläche und Windrichtung

Die Windrichtung hat direkten Einfluss auf die Niederschlagsmenge, welche auf die metallische Oberfläche trifft. Die Ausrichtung der Dachfläche beeinflusst somit die Abschwemmrate. Versuche an Kupferdachflächen in Stockholm zeigen beispielsweise, dass nördlich, östlich und südlich ausgerichtete Flächen Abschwemmraten von 1,5 g/m²*a,

westlich ausgerichtete Flächen jedoch von nur 1,3 g/m²*a besitzen (Odnevall Wallinder, Verbiest et al. 1999).

3.1.2.3 Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen

Als Rohrleitungswerkstoffe in Gebäuden kommen heute nichtrostender Stahl, Kupfer, innenverzinktes Kupfer, schmelztauchverzinkter oder feuerverzinkter Stahl, Polyethylen, Polypropylen, Polybuten, chloriertes Polyvinylchlorid oder Verbundrohre zum Einsatz (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches 2002). In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts dominierten metallische Werkstoffe. In manchen Regionen, beispielsweise in Wien, kamen auch erhebliche Mengen an Blei zum Einsatz, im Gegensatz dazu werden heute fast ausschließlich Kunststoffrohre verbaut. Die Korrosionsgeschwindigkeit in Wasserleitungsrohren wird bestimmt durch die chemische Beschaffenheit des genutzten Rohwassers, den Rohrleitungswerkstoff, die Standzeit des Wassers in den Rohrleitungen und den Fließbedingungen. Folge dieser Einflussfaktoren ist eine hohe Schwankungsbreite der Korrosions- und Abschwemmrate. Linder (Linder 1990) und Johansson und Hedberg (Johansson und Hedberg 1988) geben Richtwerte für Kupfer und verzinkten Stahl an (Tabelle 2).

Tabelle 2: Abschwemmrate ausgewählter Rohrleitungswerkstoffe

Material	Abschwemmrate [mg/m²*a]
Kupfer [1)]	*0,5 - 7,7*
Verzinkter Stahl [2)]	*3,7 - 37*

[1)]….Linder (1990)
[2)]….Johansson und Hedberg (1988)

3.1.2.4 Kraftfahrzeuge

Kraftfahrzeuge können durch den Abrieb von Reifengummi und Bremsbelägen, die Korrosion der Karosserie, die mechanische Beanspruchung und Korrosion des Unterbodenschutzes, die Verwendung von Katalysatoren sowie durch die Verbrennung von Kraftstoffgemischen und Motorölen Schwermetalle emittieren (Gustafsson 2001). Abhängig von den untersuchten Stoffen sind unterschiedliche Quellen signifikant. Die wichtigsten Emissionsquellen von Platin, Rhodium und Palladium sind beispielsweise Katalysatoren (Sternbeck 1998).

Reifenlaufflächen und Bremsbeläge als Quellen von Zink und Kupfer

Die bedeutendsten Quellen von Zink- und Kupferemissionen sind Reifenlaufflächen und Bremsbeläge. Kupfer, Zink und Blei sind mit etwa 100.000, 20.000 respektive 15.000 mg/kg in Bremsbelägen enthalten (Westerlund 2001). Seit 1998 verringerte sich der Blei- und Cadmiumgehalt in Bremsbelägen auf ein Zehntel des damals gemessenen Durchschnittswertes (Hjortenkrans, Bergbäck et al. 2006). Dies ist eine Folge der EU - Richtlinie über Altfahrzeuge (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2000). Diese Verordnung des Europäischen Parlaments bezieht sich auf die Reduktion und Kontrolle von gefährlichen Substanzen in Fahrzeugen. Insbesondere die Verwendung von Blei, Quecksilber, Cadmium und sechswertigem Chrom wird stark eingeschränkt.

Jüngste Forschungsergebnisse weisen auf die Bedeutung von Antimon in Bremsbelägen hin. Im Zuge des Bremsvorgangs kommt es nämlich zur Bildung von Sb_2O_3, einer vermutlich krebserregenden Verbindung (Uexküll, Skerfving et al. 2002). In den bisherigen Studien stand Zink, Kupfer und Blei im Mittelpunkt der Untersuchungen, Antimon schenkte man wenig Bedeutung. Obwohl Kupfer und Antimon erst wenige Jahrzehnte in Bremsbelägen eingesetzt werden, konnte man nachweisen, dass nicht nur Kupfer- sondern auch Antimonwerte in Bodenproben an stark frequentierten Straßen extrem überhöht sind (Hjortenkrans, Bergbäck et al. 2006).

Verteilung der Schwermetalle auf unterschiedliche Transportwege

Die von Kraftfahrzeugen emittierten Partikel können nach Hewitt (Hewitt und Rashed 1990) über drei verschiedene Transportwege weiterbefördert werden:

1. Sie werden über Deposition auf der Straßenoberfläche abgelagert und mit Straßenabwässern weitertransportiert,
2. in unmittelbarer Nähe der Straße über Deposition am Boden abgelagert oder
3. feinverteilt in die Atmosphäre dispergiert.

Ein Teil der Schwermetalle fällt an größere Partikel gebunden auf die Fahrbahn und sedimentiert auf der Straße. Über die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Straßensedimente lassen sich die Herkunftsquellen der Metalle identifizieren. Der Kraftfahrzeugverkehr ist natürlich nicht die einzige Quelle von Schwermetallen im Straßensediment. Analysen in Beijing zeigen, dass die Hauptquellen die Stahlindustrie, der Verkehr und private Feuerungen sowie die Baumaterialien Beton und Mörtel sind (Kuang,

Neumann et al. 2004). Ähnliche Ergebnisse zeigt eine Studie über die Zusammensetzung von Straßenstaub in Madrid und Oslo. Der Verkehr, die Konstruktion und Renovierung von Bauwerken, sowie die Korrosion von Baumaterialien sind dort die wesentlichen Herkunftsquellen von Barium, Cadmium, Kupfer, Magnesium, Blei, Antimon, Titan und Zink im Straßenstaub.

Legret und Pagotto bestimmten jenen Anteil der Emissionen von Fahrzeugen, der auf der Fahrbahn abgelagert und über das Abwasser wegtransportiert wird. Es sind dies 5% des emittierten Bleis, 2% des Kupfers und 37% des Zinks (Legret und Pagotto 1999).

Der weitere Transportweg der auf der Fahrbahn durch Deposition angesammelten Partikel führt über die Straßenentwässerung. Das Bankett wird bis zu einer Entfernung von zwei Meter vom Fahrbahnrand mit Stoffeinträgen aus dem Straßenabfluss und aus dem Spritzwasser sowie der lokalen Deposition belastet (Boller, Kaufmann et al. 2005). Der Boden mit einem Horizont von 30 cm fungiert im Bereich des Banketts als Senke für Schwermetalle und hält diese zurück. Das Auswaschpotential von Schwermetallen aus dieser Bodenschicht nimmt jedoch mit zunehmender Beladung des obersten Bodenhorizontes mit Schwermetallen zu (Boller, Kaufmann et al. 2005).

Insbesondere die Anreicherung der Metalle Blei, Zink und Kupfer in Böden wird heute sehr stark mit Verkehrsaktivitäten in Verbindung gebracht (Hjortenkrans, Bergbäck et al. 2006) und (Sutherland und Tolosa 2000). In straßennahen Böden nehmen die Konzentrationen mit zunehmender Entfernung zur Fahrbahn jedoch rasch ab. Erhöhte Kupferwerte konnten in einer Studie in Honolulu ab einer Entfernung von 5 m nicht mehr festgestellt werden (Sutherland und Tolosa 2000). Blei und Zink sind in Entfernungen von 10 m verglichen mit den lokalen Hintergrundkonzentrationen noch zwei- bis fünfmal höher. Die Abnahme der Depositionsmenge ist besonders für Blei gut untersucht. Wheeler und Rofe beschreiben die Abnahme mit zunehmender Entfernung mathematisch (Wheeler und Rofe 1979). Es ist jedoch schwierig, allgemeine Aussagen in diesem Zusammenhang zu treffen. Die Verfrachtung der durch den Verkehr verursachten Aerosole wird nämlich von der Temperatur, dem Luftdruck, der Windgeschwindigkeit und –richtung sowie den Regenereignissen und Feuchteverhältnissen des Standorts beeinflusst (Wrobel, Rokita et al. 2000).

Garg gibt an, dass im Schnitt 35 % des Bremsbelagverlustes als luftgebundener Feinstaub emittiert wird (Garg, Cadle et al. 2000). Als Folge verstärkter Bremsaktivitäten müsste es daher an Verkehrskreuzungen zu erhöhten Emissionen kommen. Untersuchungen über einen

Zusammenhang der emittierten Metallmenge im Zuge der Bremsaktivitäten an Verkehrskreuzungen mit erhöhten Konzentrationen im Boden brachten aber keine positiven Ergebnisse (Hjortenkrans, Bergbäck et al. 2006).
Untersuchungen der Aerosole in der Tunnelluft ermöglichen Rückschlüsse auf den in die Luft gelangenden Anteil der Emissionen von Kraftfahrzeugen. Der Abrieb von Bremsen und Reifenlaufflächen sind die bedeutenden Quellen der Emission von Kupfer, Zink, Blei und Cadmium (Sternbeck, Sjödin et al. 2002). Die Emissionsmengen von Zink, Kupfer und Blei in die Luft liegen im Bereich von 1 bis 35µg pro Kraftfahrzeugkilometer (Laschober, Limbeck et al. 2004). Untersuchungen der Tunnelluft zeigen weiters, dass vor allem die Resuspension von auf der Fahrbahn abgelagerter Partikel ein entscheidender Faktor für die Aerosolkonzentration größerer Partikel in der Tunnelluft ist (Sternbeck, Sjödin et al. 2002). In jüngsten Untersuchungen kommt Moos zum Nachweis von Luftverschmutzungen in Tunnels zum Einsatz. Moose reichern Schwermetalle und PAK aus der Luft an. Die akkumulierte Metallmenge im Moos lässt damit Rückschlüsse auf den Verschmutzungszustand der Tunnelluft und damit auf den Anteil an luftgebundenen Metallverunreinigungen zu (Zechmeister, Dullinger et al. 2006).

Ein bestimmter Anteil der emittierten Partikel verbleibt am Fahrzeug selbst. Ein Beispiel dafür ist jener Teil des Bremsbelagabriebs, der in den Bremstrommeln der hinteren Kraftfahrzeugbremsen verbleibt (Rogge, Hildemann et al. 1993).
Bisher ist es noch in keiner Studie gelungen, die gesamte Emissionsmenge nachweislich den einzelnen Pfaden zuzuordnen und damit eine grobe Abschätzung zu geben, welcher Anteil der Emission über welchen Pfad weitertransportiert wird.

3.1.2.5 Schienenfahrzeuge

Im Gegensatz zu diffusen Emissionen von Kraftfahrzeugen sind Schwermetallemissionen von Schienenfahrzeugen bisher wenig untersucht. In einer Studie des Deutschen Eisenbahnbundesamtes findet sich eine Aufstellung möglicher Schadstoffemissionsquellen der Trasse und Fahrzeuge, darunter auch der Schienen- und Leitungsabrieb, die Korrosion der Anlagen und Fahrzeuge und der Austrag von Metallen durch den Bremsabrieb. Eine Quantifizierung der Mengen und eine Beschreibung der Transportwege von Emissionsprodukten fehlt jedoch (Roll 2004).

3.1.2.6 Fahrbahnabrieb und Straßeninfrastruktur

Die im Winter verwendeten Spikereifen verursachen den wesentlichen Teil des Fahrbahnabriebs (Jacobson und Hornwall 1999). Die dabei freigesetzte Schwermetallmenge stammt größtenteils aus dem Gestein. Asphalt besteht aus einer Mischung von Gestein, Füllstoffen und Bitumen (etwa 5%) (Lindgren 1996). Bitumen weist jedoch verglichen mit dem Gestein sehr geringe Schwermetallkonzentrationen auf. Die Abriebsmenge hängt neben der Art der verwendeten Spikereifen auch von dem Steingehalt, der Qualität des Steinmaterials, der Verkehrsgeschwindigkeit und der aufgebrachten Asphaltart ab (Jacobson und Hornwall 1999).

Der relative Abrieb - darunter versteht man die Menge des freigesetzten Abriebmaterials bezogen auf ein Fahrzeug mit Spikereifen und einen zurückgelegten Kilometer - verminderte sich von 1990 bis 1998 auf die Hälfte des Wertes von 1990. Dies zeigen Untersuchungen in Göteborg. Der Wert liegt bei hochqualitativem Steinmaterial und einer Deckschicht aus Skelettasphalt bei 2 bis 4 g/Kfz-km (Jacobson und Hornwall 1999).

Eine weitere Quelle diffuser Metallemissionen ist die Straßeninfrastruktur. Zu ihr zählen unter anderem Leitschienen, Beleuchtungseinrichtungen, Straßenschilder samt Ständer und Lärmschutzwände. Die Oberfläche dieser Infrastruktureinrichtungen ist entweder lackiert oder verzinkt. In einem Bericht über die Emission der Straßeninfrastruktur von Autobahnen zeigen Roth und Eklund, dass auf einem Kilometer Autobahn innerhalb von 10 Jahren 10 bis 20 kg Zink von verzinkten Infrastrukturelementen emittiert werden (Roth und Eklund 2001).

3.1.2.7 Atmosphärische Deposition

Durch industrielle Tätigkeiten sowie der Verbrennung von Kohle und Treibstoffen kommt es zu beträchtlichen Emissionen von Blei, Cadmium und Quecksilber in die Luft (Johansson, Bergbäck et al. 2001). Die emittierten Schwermetalle besitzen lange Aufenthaltszeiten in der Atmosphäre und werden über weite Strecken transportiert, bevor sie sich in Form von nasser oder trockener Deposition wieder auf der Erdoberfläche ablagern. In niederschlagsfreien Zeiträumen erfolgt eine trockene Deposition dieser Partikel aus der Luft. Darunter versteht man den Transfer von Spurenelementen aus der Atmosphäre auf eine Oberfläche als Folge molekularer Diffusion oder gravitationsbedingtem Absetzen ohne Niederschlag (Leygraf und Graedel 2000). Große Frachten gelangen jedoch durch das Auswaschen von Luftschadstoffen im Zuge von Niederschlagsereignissen zu Boden. Unter der nassen Deposition versteht man den Transfer von Spurenelementen aus der Atmosphäre auf Oberflächen als Folge der

Adsorption dieser in atmosphärisch kondensierten Wasserpartikeln (Leygraf und Graedel 2000). Sowohl die trockene als auch die nasse Deposition verursacht damit die Ablagerung von Schwermetallen auf Dächern, Verkehrsflächen, Mobilien und urbanen Böden.
Messungen in Südschweden zeigen einen deutlichen Rückgang der jährlichen Schwermetalldepositionsmenge seit 1968/1970. 1995 betrug die Deposition von Blei 11%, von Cadmium 24%, von Zink 51% und von Kupfer 52% der Deposition im Jahre 1968 bzw. 1970 (Rühling und Tyler 2001). Grund dafür ist die Verbesserung der Luftqualität durch verminderte Emissionen von Schwermetallen der Industrie und auf dem Gebiet der Kraftstoffverbrennung (Rühling und Tyler 2001). Diese Depositionsmessungen stammen nicht aus dem städtischen Bereich. Um qualitative Aussagen zur Entwicklung der Deposition in urbanen Zentren machen zu können, sind daher kontinuierliche Messungen in Städten notwendig.

3.1.3 Kanalisation

Ein Großteil der diffusen Emissionen gelangt über das Regenwasser in die Kanalisation. Diese sorgt für die geregelte Ableitung von Regenwasser sowie von Schmutzwasser aus Haushalten und von Industrie und Gewerbe. Die Sammelkanäle der Kanalisation werden heute aus Faserbeton, Steinzeug, Kunststoff oder Beton errichtet (Schneider 1998) und stellen damit selbst nur eine wenig signifikante Quelle der Schwermetallfreisetzung dar.

Nach dem Abfluss unterscheidet man zwei Entwässerungssysteme, das Mischsystem, auch als Mischkanalisation bezeichnet, und das Trennsystem, auch als Trennkanalisation bezeichnet.
In Mischkanalisationen sind Regenüberläufe als Überlaufbauwerke zur Regenentlastung angeordnet. In Trennsystemen führen Regenwasserkanäle den gesamten Niederschlag samt Verunreinigungen in die Gewässer ab.

Mit dem Programm SEWSYS lassen sich die Stoffflüsse für Nährstoffe, Schwermetalle und organische Verunreinigungen sowohl bei Trockenwetter- als auch bei Regenwasserabflüssen in Misch- und Trennsystemen in städtischen Kanalsystemen modellieren. Mit einer entsprechenden Datengrundlage über die Beschaffenheit und Dimensionierung des städtischen Kanalsystems ist es damit möglich, die Verteilung der Schwermetallfrachten durch das Kanalsystem abzuschätzen (Ahlman 2006).

Über die Regenüberläufe in Mischsystemen, die Regenwasserkanäle in Trennsystemen und die Abläufe aus Kläranlagen werden beträchtliche Mengen an Schwermetallen in die Oberflächengewässer eingeleitet. Für Deutschland wurde für die Jahre 1985, 1995 und 2000 eine Quantifizierung der Emissionen von Schwermetallen in die Oberflächengewässer vorgenommen. Die Kupfereinträge in die Gewässer lagen 1985 bei etwa 1200 t/a, im Jahre 2000 aber nur mehr bei 600 t/a. Dies bedeutet eine Reduktion um über 45%. Die Bleieinträge in Deutschlands Oberflächengewässer verringerten sich von etwa 900 t 1985 auf etwa 300 t im Jahre 2000. Dies entspricht einer Minderung um fast 70%. Bei allen Metallen sanken die Einträge seit 1985, entscheidend dafür waren hauptsächlich gesetzte Maßnahmen im Bereich der Industrie. Heute spielen industrielle Direkteinträge eine untergeordnete Rolle, die Bedeutung der kommunalen Kläranlagen, der Eintragspfade über die Kanalisation, der Erosion und des Grundwasserzuflusses ist jedoch groß (Fuchs, Scherer et al. 2002).
Auf die Begrenzung der Verschmutzung der Gewässer durch Regenüberläufe wird in der Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Europäischer Rat 1991) eingegangen.
Seit 2000 gibt es auch eine Liste von zu prioritierenden Substanzen auf dem Gebiet der europaweiten Wasserpolitik. Blei, Quecksilber, Cadmium und deren Verbindungen scheinen darin auf, Ziel ist die Reduktion des Eintrages gefährlicher Substanzen aus punktförmigen und diffusen Einleitungen. Das Risiko für die aquatische Lebensgemeinschaft und die Beeinträchtigung von zur Trinkwassergewinnung verwendeter Wasserkörper sind zu minimieren. Innerhalb von 20 Jahren nach Inkrafttreten der Verordnung soll der Eintrag der oben angeführten Substanzen unterbunden sein (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2000).

Räumgut

Die im Schmutzwasser mitgeführten Feststoffe bilden bei geringen Fließgeschwindigkeiten, also in niederschlagsfreien Zeiten, Ablagerungen im Kanalsystem. Jüngste Studien zeigen auch, dass die Reinigung von Straßen in Trockenwetterperioden für einen erheblichen Anteil des Feststoffeintrages in das Kanalsystem verantwortlich ist (Rocher, Azimi et al. 2003). Diese Ablagerungen bestehen aus groben Sedimenten, einer organischen Schicht sowie einem Biofilm. Analysen zeigen, dass der Sedimentanteil zwischen 87 und 97%, der organische Anteil zwischen 2 und 13% und der Biofilm unter 1% liegt (Rocher, Azimi et al. 2003). Der

größte Anteil an Schwermetallen findet sich im Sedimentanteil und wird über Kanalspülungen als Räumgut entfernt und auf Deponien abgelagert.

Dezentrale Versickerung

Der hohe Anteil versiegelter Flächen in urbanen Zentren bringt gewisse Nachteile mit sich. Es entstehen dadurch einerseits hohe Abflussspitzen im Regenfall und hohe Einträge an Verunreinigungen ins Gewässer über Regenüberläufe, da die erhöhten Abflussmengen von der Kläranlage in so kurzer Zeit nicht behandelbar sind sowie andererseits eine kontinuierliche Absenkung des Grundwasserspiegels unter der Stadt. Dies führte Anfang der 90er Jahre zu einer Änderung der Entwässerungsstrategie in Österreich, Deutschland und der Schweiz. Die Abflüsse befestigter Oberflächen sollen zukünftig primär vor Ort versickert werden (Boller, Kaufmann et al. 2005). Grundvoraussetzung dafür ist jedoch, dass mögliche Schadstoffe aus Niederschlagsabflüssen vor der Versickerung entfernt werden, um eine Kontamination von Boden und Grundwasser zu verhindern. Dies ist beispielsweise mit einem Sickerschachtsystem, welches das Filtermedium Klinoptiolith enthält, entwickelt und getestet an der TU München (Athanasiadis, Helmreich et al. 2005), für Dachabwässer möglich. Die errichtete Pilotanlage mit Klinoptiolith als Barrierematerial ist in der Lage, Zink und Kupfer aus Dachabflüssen bis zu 97 respektive 98% zu eliminieren (Athanasiadis 2005). Ähnliche Anlagen gibt es außerdem von der Firma HydroCon (Betonschacht mit porösem Beton als Filter), der Firma Mall Umweltsysteme (Sammelfilter-System), der Firma KME (Fallrohrfiltersystem) und der Magistratsabteilung 45 in Wien (diverse Anlagen) (Hillenbrand, Fuchs et al. 2005).

3.1.4 Kläranlage

Über den Kläranlagenzulauf gelangt das sich aus Schmutzwasser und Regenwasser zusammensetzende Abwasser des urbanen Systems in die Kläranlage. Außer den in Kapitel 3.1.2.1 beschriebenen Quellen diffuser Schwermetallemissionen von Gebäudeoberflächen und Verkehrsflächen stammen erhebliche Frachten im Zulauf der Kläranlage aus der atmosphärischen Deposition und aus Haushaltsabwässern. Die Schwermetallfrachten in Haushaltsabwässern stammen aus dem Leitungswasser, von Reinigungswässern und aus Ausscheidungen und Speiseresten. Zessner gibt in Tabelle 3 angeführte Richtwerte für einwohnerspezifische Frachten aus diesen Quellen an.

Tabelle 3: Richtwerte für Frachten aus dem Haushaltsabwasser und aus der atmosphärischen Deposition (Zessner 1999)

	Cd	Cu	Pb	Zn
	[mg/EW*a]	[g/EW*a]	[g/EW*a]	[g/EW*a]
Ausscheidungen und Speisereste	*9-20*	*0,6-1,7*	*0,02-0,2*	*3-8*
Leitungswasser	*8-15*	*0,5-3*	*0,09-1,00*	*1-8*
Reinigungswässer	*5-171*	*0,8-9,5*	*0,5-7,3*	*5-26*
	[mg/m²*a]	[mg/m²*a]	[mg/m²*a]	[mg/m²*a]
Atmosphärische Deposition (Land)	*0,14*	*5*	*2*	*30*
Atmosphärische Deposition (Stadt)	*0,6*	*25*	*27*	*100*

Auf der Kläranlage werden im Zuge der Reinigungsmaßnahmen Fäll- und Konditionierungsmittel eingesetzt. Diese enthalten ebenso Schwermetalle und sind damit weitere Quellen des Schwermetalleintrages in den Klärschlamm und ins Abwasser aus der Kläranlage.

Detaillierte Untersuchungen des Ursprungs der im Zulauf vorhandenen Schwermetallfracht der Stockholmer Kläranlage Henriksdal führte Louise Sörme durch (Sörme und Lagerkvist 2002). Abbildung 3 zeigt die Herkunft der Zinkfracht in der Kläranlage Henriksdal. Unter Drainagewasser wird jenes Wasser verstanden, welches von der Umgebung unkontrolliert in das Kanalsystem eindringt, unter Chemikalien versteht man die im Zuge der Abwasserreinigung in der Kläranlage zum Einsatz kommenden Güter.

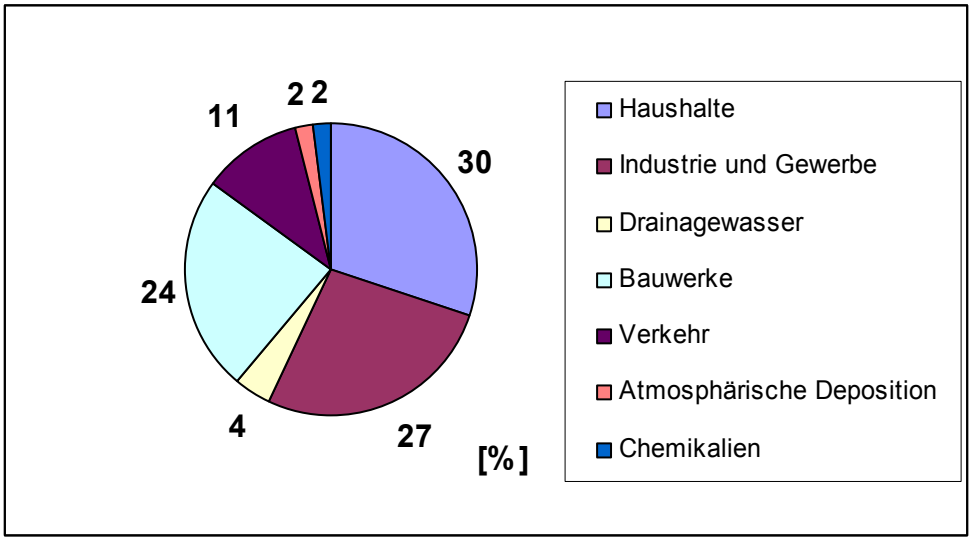


Abbildung 3: Prozentueller Beitrag der einzelnen Quellen zur gesamten Zinkfracht im Zulauf der Kläranlage Henriksdal (Sörme und Lagerkvist 2002)

Dieser berechneten Fracht wird schließlich die in der Kläranlage gemessene Fracht gegenübergestellt. Für Zink und Kupfer gibt es eine Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Fracht. Bei Cadmium, Blei und Chrom konnte man nur 60, 50 respektive 20 % der gemessenen Fracht in der Kläranlage auch emissionsseitig identifizieren.

In der Abwasserreinigungsanlage der Stadt Stockholm ist in den letzten 30 Jahren eine deutliche Abnahme der Schwermetallmenge im Zulauf der Kläranlage und demzufolge auch der Schwermetallkonzentration im Klärschlamm zu beobachten (Bergbäck 1998) und (Sörme und Lagerkvist 2002). Sie lag 1995 bei Blei nur mehr bei einem Fünftel des Wertes von 1977 und bei Kupfer bei einem Drittel des Wertes von 1975 (Bergbäck 1998). In Abbildung 4 ist diese Abnahme dargestellt.

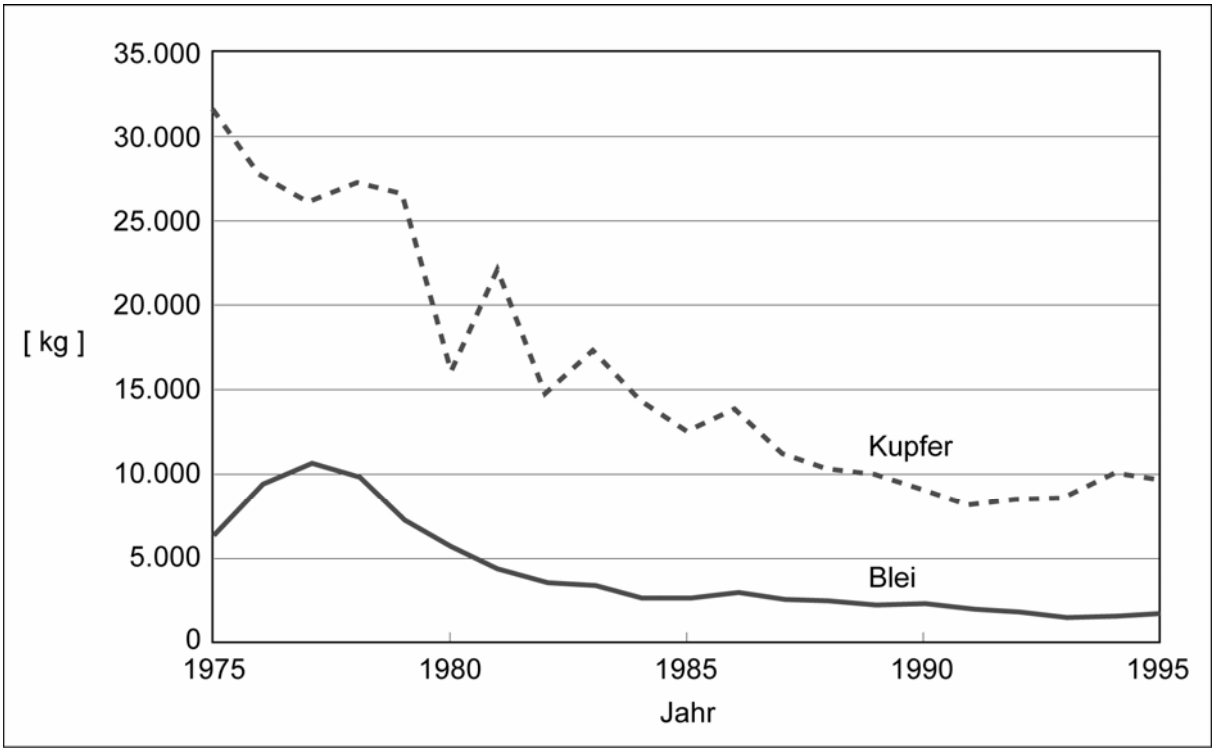


Abbildung 4: Schwermetallmengen im Zulauf der Stockholmer Kläranlagen von 1975 bis 1995 (Bergbäck 1998)

Diffus emittierte Schwermetalle gelangen über die Kanalisation in die Kläranlage. Ein Großteil davon wird im Klärschlamm konzentriert. Die Schwermetallmengen im Zulauf verteilen sich durch das Reinigungsverfahren auf zwei Exporte aus der Kläranlage, nämlich den Klärschlamm und das geklärte Abwasser. Zessner gibt einen Rückhalt der Schwermetalle

Kupfer und Blei im Klärschlamm von 80% und für Cadmium und Zink von 50 respektive 60% an (Zessner 1999).

Der in Kläranlagen anfallende Klärschlamm wird entweder deponiert, thermisch oder in der Landwirtschaft verwertet. Schwermetalle limitieren die Weiterverwertbarkeit von Klärschlamm. Die Europäische Union gibt Grenzwerte für jenen Klärschlamm, der in der Landwirtschaft Verwendung finden soll, vor (Rat der Europäischen Gemeinschaft 1986). Diese liegen beispielsweise für Blei zwischen 750 bis 1200 mg/kg und für Zink zwischen 2500 bis 4000 mg/kg Trockensubstanz. Grenzwerte limitieren auch die gesamte Menge an Schwermetallen, die im Zeitraum von 10 Jahren über den Klärschlamm in landwirtschaftliche Nutzflächen eingetragen werden dürfen. Der Grund für diese Grenzwerte ist der Schutz des Bodens vor einer übermäßig hohen Schwermetallanreicherung. In den gesetzlichen Verordnungen liegt der Schwerpunkt auf der Ausweisung von Schadstoffgrenzwerten ohne die Wertstoffe umfassend zu bewerten. Ein alternativer Ansatz zur Bewertung der Einsatzmenge von Klärschlamm in der Landwirtschaft über den Nährstoffnutzungsgrad wurde von Lampert entwickelt (Lampert 2001).

3.1.5 Böden und Sedimente als Senken für Schwermetalle

3.1.5.1 Böden

Der Schwermetallgehalt von Böden wird durch ihr bodenbildendes Gestein bestimmt (Thornton 1991). Verschiedenen Gesteinsarten unterscheiden sich in ihrem Gehalt an Spurenelementen. Tabelle 4 zeigt dies für die Gesteine Granit, Basalt, Schiefer sowie Kalkstein und stellt sie der Konzentration der kontinentalen Erdkruste gegenüber.

Tabelle 4: Durchschnittliche Menge an Spurenelementen in der kontinentalen Erdkruste und in vier häufig auftretenden Gesteinen (Krauskopf und Bird 1995) und (Adriano 1986)

	Erdkruste [1)] [ppm]	**Granit** [1)] [ppm]	**Basalt** [1)] [ppm]	**Schiefer** [1)] [ppm]	**Kalkstein** [2)] [ppm]
Cd	*0,2*	*0,03*	*0,15*	*0,3*	*0,05*
Cu	*55*	*13*	*110*	*45*	*4*
Pb	*13*	*48*	*7,8*	*20*	*9*
Zn	*70*	*45*	*86*	*95*	*20*

[1)] …. Krauskopf und Bird (1995)
[2)] …. Adriano (1986)

Zur Bestimmung der geogenen Hintergrundkonzentration von Böden und zur Quantifizierung der anthropogenen Bodenverunreinigung durch Schwermetalle müssen Bodenproben tiefer als 30 cm gezogen werden. Bis zu dieser Tiefe können anthropogene Verunreinigung durchwegs dominieren (Linde, Bengtsson et al. 2001).

Urbane Böden sind die wichtigste Senke diffuser Schwermetallemissionen. Thornton nennt neben den in Kapitel 3.1.2.1 beschriebenen Quellen die Aktivitäten in Hausgärten, die Ablagerung von Abfällen, metallverarbeitende und andere industrielle Tätigkeiten als Hauptverursacher von Bodenverunreinigungen in urbanen Zentren (Thornton 1991). Der Großteil der anthropogenen Metallverunreinigungen setzt sich in den obersten 15 cm des Bodens fest (Turer, Maynard et al. 2000).
Kontaminationen von Böden werden jedoch auch von im Boden befindlichen Infrastruktureinrichtungen verursacht. Im Boden der Stadt Wien sind beispielsweise über 60.000 t Kommunikations- und Elektrizitätsleitungen aus Blei verlegt. Obernosterer

berechnete einen jährlichen Bleieintrag in das diese Kabel umgebende Erdreich von 1 bis 80 t (Obernosterer und Brunner 1999).

Diffuse Schwermetalleinträge verursachen kontinuierliche Anreicherungen im Boden. Eine Reihe von Untersuchungen zeigt, dass besonders straßennahe Böden stark von diesen Akkumulationserscheinungen betroffen sind (Paterson, Sanka et al. 1996). Erhöhte Schwermetallkonzentrationen finden sich in den obersten Schichten straßennaher Böden sowie der dort vorhandenen Vegetation (Ho und Tai 1988) und (Paterson, Sanka et al. 1996). Es besteht ein nachgewiesener Zusammenhang zwischen der Verkehrsbelastung einer Straße und der daraus resultierenden Schwermetallkonzentration in den angrenzenden Böden. (Ho und Tai 1988). Die Metallgehalte in den Böden nehmen jedoch mit zunehmender Tiefe und abnehmendem organischen Kohlenstoff rasch ab. Die Korrelation zum organischen Kohlenstoff ist stärker als die Korrelation zur Tiefe (Turer, Maynard et al. 2000).

Blei und Kupfer verhalten sich im Boden ähnlich. Sie sind in Form von Komplexen stark fixiert, damit kaum mobil, und können als permanent verbleibend in Böden angesehen werden. Für die Aufnahme durch Pflanzen ist Blei verfügbar. Zink und Cadmium sind mobiler und leichter biologisch verfügbar als Kupfer und Blei (Alloway 1995). In verunreinigten Böden trifft man selten auf nur ein überhöhtes Metall, meist sind es Metallcocktails. Dies erschwert auch die Analyse des Einflusses eines Metalls auf die Vegetation sowie auf die Mikroorganismen.

Eklund analysierte die Böden in der Nähe von drei metallverarbeitenden Industriebetrieben, deren Produktionstätigkeit im 18., 19. und 20. Jahrhundert stattfand. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Dauer entstandener Bodenverschmutzungen abzuschätzen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die vergangene Zeit nach Beendigung der industriellen Tätigkeit ein entscheidender Faktor für die Metallkonzentration im kontaminierten Boden ist. Die Konzentrationen nehmen mit der Zeit ab, was insbesondere für Cadmium gezeigt werden konnte (Eklund 1995). Auch Jahrhunderte nach der Stilllegung der Anlagen bleibt der Grund und Boden aufgrund der erhöhten Schwermetallgehalte in der näheren Umgebung nur beschränkt nutzbar und ist für jede Art der Nahrungsmittelproduktion ungeeignet (Eklund 1995).

Es konnte auch gezeigt werden, dass durch die Auswaschung von Schwermetallen Böden nur bedingt eine letzte Senke für Metalle darstellen. Im Fall industrieller Verunreinigungen können sich die Umweltprobleme im Laufe der Zeit damit von einer lokalen auf eine regionale Ebene verschieben. Böden sind somit sekundäre Verunreinigungsquellen. Ihre Emissionswirkung bleibt auch lange nach Beendigung der industriellen Tätigkeit bestehen. Schwermetallverunreinigte Böden stellen damit Langzeitprobleme dar.
Es kommt als Folge des Austrags von Schwermetallen aus Böden zur Beeinträchtigung des Grundwassers. Das Grundwasser in urbanen Regionen weist deutlich höhere Schwermetallgehalte auf als jenes ländlicher Regionen. Im Stockholmer Grundwasser ist die Konzentration von Kupfer zehnmal höher und von Quecksilber etwa achtmal höher als im Umland (Aastrup und Thunholm 2001).

Hohe Schwermetallgehalte beeinflussen mikrobielle Vorgänge in den obersten Bodenschichten. Akerblom zeigt, dass die mikrobielle Aktivität in der obersten organischen Schicht von Waldböden durch Bleiverunreinigungen erheblich abnimmt (Akerblom 2006). Dasselbe konnte auch für Kupfer gezeigt werden, wenngleich die Beeinträchtigung schwächer ist.

Die in Deutschland 1999 erstellte Bundes - Bodenschutz- und Altlastenverordnung dient der Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen. In ihr finden sich Vorsorge- und Maßnahmenwerte für Cadmium und Blei für Kinderspielflächen, Wohngebiete sowie Park- und Freizeitanlagen (Deutsche Bundesregierung 1999).
Die Erhaltung und der Schutz von Böden ist die oberste Zielsetzung des 2001 in Salzburg in Kraft getretenen Bodenschutzgesetzes (Salzburger Landtag 2001). Die Verordnung bezieht sich auch auf öffentliche Grünflächen wie Parks und Kinderspielplätze, aber auch auf Straßenbegleitflächen (Salzburger Landtag 2001).
Der urbane Boden findet jedoch im Vergleich mit Gewässern oder der Luft derzeit noch die geringste Beachtung in der europaweiten Gesetzgebung.

3.1.5.2 Sediment

Im Gegensatz zu urbanen Böden gibt es wenige Sedimentuntersuchungen in urbanen Regionen. Sedimente stehender Gewässer, das heißt Gewässer, die sich durch geringe oder nahezu keine Turbulenz und keinen Geschiebetransport auszeichnen, eignen sich zur Analyse der Schwermetalleinträge. Die Schadstofffrachten werden in der Regel über Einleitungen von Regenwasser an Entlastungsbauwerken der Kanalisation oder durch die Einleitung des Abwassers von Kläranlagen verursacht. Die Belastung des Sediments mit Verunreinigungen ist an den Stellen der Einleitung am höchsten (Östlund und Sternbeck 2001).

Anhand von Sedimentproben in Stockholm wurde gezeigt, dass Sedimente stark mit Blei anthropogenen Ursprungs belastet sind. Bei dieser Art der Verschmutzung handelt es sich um ein urbanes Problem, da die Konzentrationen mit zunehmender Entfernung zur Stadt rasch abnehmen (Östlund und Sternbeck 2001). Weitere Untersuchungen des Sediments zeigen, dass Schwermetallkonzentrationen von Cadmium, Kupfer, Quecksilber und Blei fünfmal höher und von Zink dreimal höher als jene im Umland von Stockholm sind. Quecksilber und Blei werden dabei besser im Sediment akkumuliert, Nickel, Kupfer, Cadmium und Zink im Vergleich dazu zu einem höheren Anteil weitertransportiert (Lindström, Jonsson et al. 2001).

Im Gegensatz zum Boden lassen sich im Sediment die jährlichen Metalleinträge bestimmen. In Stockholm stiegen diese für Kupfer, Cadmium, und Quecksilber bis in die 70er Jahre an, erreichten zwischen 1970 und 1980 ihren Höhepunkt und sinken seitdem wieder (Sternbeck und Östlund 2001).

Ein Zusammenhang der Emissionsquellen und der Sedimentbelastung für Kupfer und Zink in der Stockholmer Region wurde erstmals von Arne Jonsson präsentiert (Jonsson 2000). Die größten Frachten in den Mälaren und die Ostsee stammen aus dem Ablauf der Kläranlagen und aus Regenüberläufen. Kupfer stammt dabei aus den Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen, aus Bremsbelägen und von Kupferdächern, Zink aus Reifenlaufflächen und von verzinkten Stahlteilen. Die berechneten Emissionen stimmen gut mit den gemessenen Einträgen ins Sediment des Mälaren und in die Ostsee überein (Jonsson 2000).

Hohe Schwermetallgehalte im Sediment beeinflussen die dort lebenden Organismen

Im Wasser lebende Organismen in innerstädtischen Gewässern weisen in Stockholm zwei- bis viermal höhere Konzentrationen wie jene von Referenzgewässern außerhalb der urbanen Region auf. Lithner und Holm konnten einen Zusammenhang zwischen erhöhten Gehalten im Wasser, Sediment und in Lebewesen nachweisen (Lithner, Holm et al. 2001). Metalle reichern sich in belasteten Gewässern in Lebewesen an und gelangen über diese in die Nahrungskette.

3.2 Wissensdefizite

Es fehlt an einem methodischen Vorgehen zur Analyse, Beschreibung und Berechnung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt.

Oberflächen haben großen Anteil an den Schwermetallemissionen urbaner Regionen. Das methodische Vorgehen soll in jeder beliebigen urbanen Region zur Quantifizierung der Emissionen von Oberflächen, der Transportwege von emittierten Schwermetallen und ihren Senken angewendet werden können. Es geht dabei um die Verknüpfung von Quellen und Senken zur Darstellung des Zusammenhangs von Ursache und Wirkung der Umweltbelastung von Gewässern, Böden und der Luft. Die Kenntnis dieses Zusammenhangs ist notwendig, um wirksame Maßnahmen definieren zu können.

Die Stoffflussanalyse als Ergebnis des methodischen Vorgehens ist Grundlage für die anschließende Bewertung.

Es fehlt an einer Methode zur Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen. Es gibt keine Kriterien zur Beurteilung der Emissionsquellen sowie der Transportwege und Senken der Emissionsprodukte.

Eine Bewertungsmethode ist die Grundlage zur Beurteilung und Gewichtung von wirksamen und wirkungslosen Maßnahmen. Die Umsetzung wirksamer Maßnahmen vermag durch die Verminderung des Schwermetalleintrags in Böden, Gewässer und die Luft eine positive urbane Entwicklung zu forcieren.

Mit Hilfe einer Bewertungsmethode ist der Vergleich von Städten unterschiedlicher Größe und Beschaffenheit möglich. Durch den Vergleich unterschiedlicher Städte können positiv wirkende Charakteristika urbaner Systeme herausgearbeitet werden.

Bewertet man eine Stadt über längere Zeitspannen mit dieser Methode, lässt sich erkennen, ob sie sich positiv oder negativ über diesen Zeitraum entwickelt hat und durch welche Veränderungen dies bedingt war.

Diese beiden Wissenslücken sollen in der gegenwärtigen Arbeit geschlossen werden.

4 METHODISCHES VORGEHEN/ ENTWICKLUNG EINER BEWERTUNGSMETHODE

Das methodische Vorgehen lässt sich in folgende Teilbereiche gliedern:

1. Systemdefinition
2. Analyse der Stoffflüsse
3. Bewertung der Stoffflüsse
4. Adaptierung der Bewertungskriterien für den Städtevergleich und zur Bewertung von Maßnahmen

4.1 Systemdefinition

Das Ziel dieses Kapitels ist, die notwendigen Schritte hin zu einer umfassenden Systemdefinition eines urbanen Systems anzuführen. Die normativ festgelegten Regeln der Stoffflussanalyse (ÖNORM 2005) werden dabei auf ein urbanes System adaptiert. Am Ende des Kapitels findet sich schließlich eine allgemeine Systemdefinition, die für jede beliebige Stadt angewendet werden kann.

Unter einer Stoffflussanalyse versteht man die Identifizierung und Quantifizierung aller relevanten Flüsse von Stoffen in einem zeitlich und räumlich exakt abgegrenzten System sowie die Bilanzierung der Stoffe innerhalb dieses Systems. Die Methode der Stoffflussanalyse ist eine naturwissenschaftliche Grundlage zur Beschreibung, Bewertung und Gestaltung beliebig komplexer Systeme (Brunner und Rechberger 2004). In zahlreichen Problemstellungen der Abfallwirtschaft und des Ressourcenmanagements konnte sie bisher erfolgreich angewandt werden.
Die Systemdefinition besteht aus folgenden Teilen:

- Festlegung der Systemgrenze (räumlich und zeitlich)
- Festlegung der Prozesse, Flüsse und Subsysteme
- Auswahl der Stoffe
- Festlegung der funktionalen Einheit und der angestrebten Genauigkeit der Untersuchung

Festlegung der Systemgrenzen

Unter den Systemgrenzen versteht man laut Definition die zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu untersuchenden Systems.

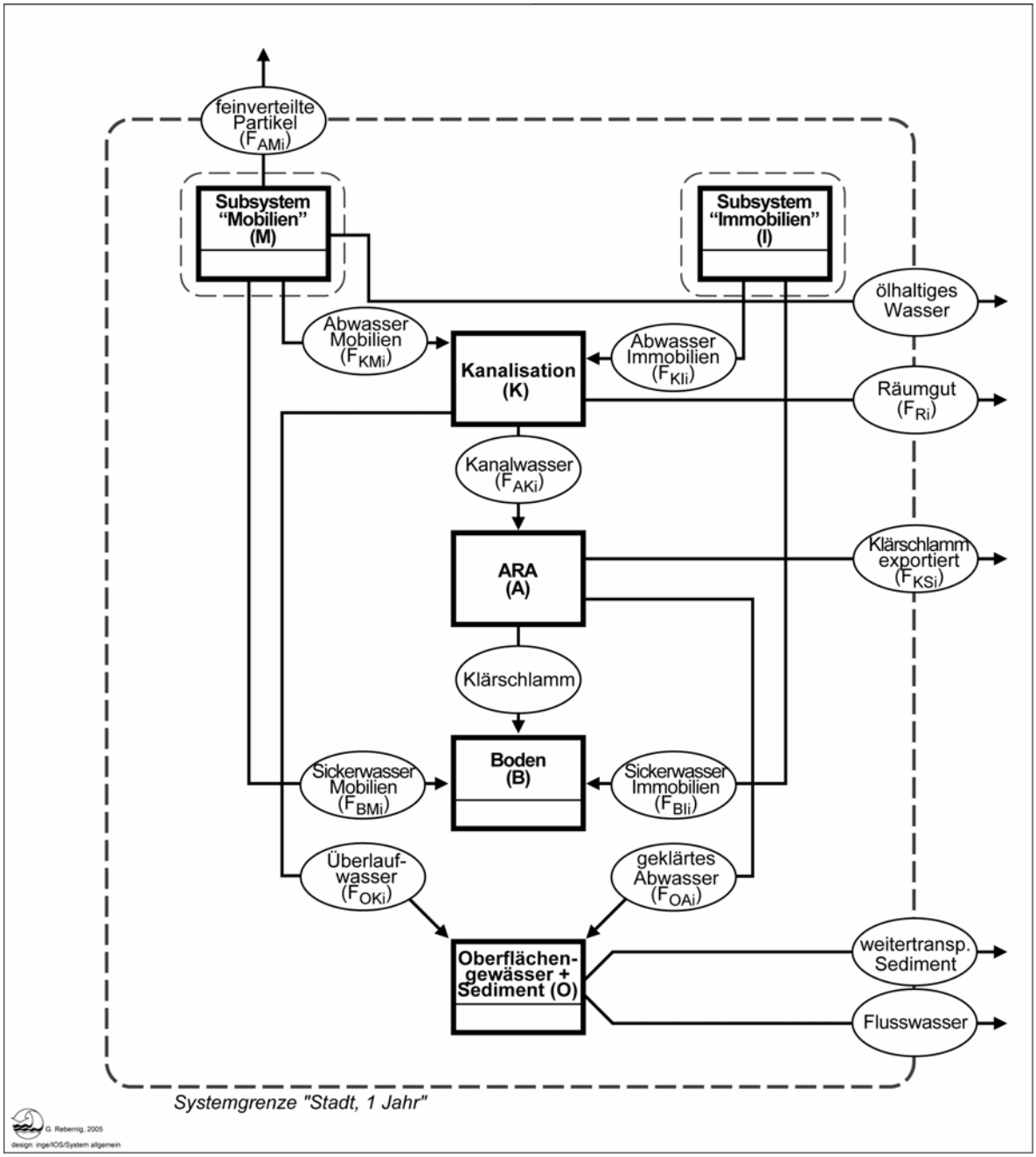


Abbildung 5: Systemdefinition

Räumliche Systemgrenze

Als räumliche Grenze des Systems eignet sich die Wahl einer politisch-administrativen Grenze, dies ist entweder die Stadtgrenze oder die Bezirksgrenze der untersuchten Region. Statistisch erhobene Daten beziehen sich in der Regel auf politisch- administrativ begrenzte

Bereiche. Politisch - administrative Grenzen sind auch im Hinblick auf die Umsetzung der am Ende einer Studie vorgeschlagenen Maßnahmen vorteilhaft, die Systemgrenze fällt damit nämlich mit dem Wirkungsbereich der lokalen Behörden zusammen.

Zeitliche Systemgrenze

Die zeitliche Grenze hängt wesentlich von den Zielen und der Problemstellung ab. Bei Stoffflussanalysen beträgt der Bilanzierungszeitraum in der Regel ein Jahr (ÖNORM 2005). Diese Zeitspanne eignet sich im Zusammenhang mit urbanen Regionen gut für die Darstellung eines momentanen Zustandes. Dabei sollte das Bezugsjahr möglichst aktuell sein, eine Randbedingung, welche jedoch entscheidend von der verfügbaren Datenlage bestimmt wird.

Ist das Ziel und die Problemstellung darauf ausgerichtet, vergangene Trends zu analysieren und zukünftige abzuschätzen, so muss der Bilanzierungszeitraum entsprechend lange gewählt werden. Eine dafür geeignete zeitliche Systemgrenze wäre für eine Stadt beispielsweise 100 Jahre. Der Grund für diesen langen Zeitraum liegt in den zahlreichen Veränderungen in urbanen Regionen im letzten Jahrhundert. Diese betreffen nicht nur die Emissionsquellen, beispielsweise die Verkehrsentwicklung, die stetig steigende Gebäudeanzahl oder die Veränderungen der Oberflächenmaterialien, sondern auch die Transportwege, beispielsweise durch die Errichtung von Kanalsystemen und Abwasserreinigungsanlagen, und vorhandene Senken, beispielsweise durch den Einsatz von Klärschlamm in der Landwirtschaft oder den Bau von Flusskraftwerken und den damit in Zusammenhang stehenden veränderten Sedimenttransport von Flüssen.

Festlegung der Prozesse, Flüsse und Subsysteme

Das urbane System umfasst die Subsysteme Immobilien und Mobilien und die Prozesse Kanalisation, Kläranlage, Boden sowie Sediment und Oberflächengewässer. Der Austrag von Schwermetallen aus dem Boden ins Grundwasser wird in dieser Arbeit nicht beschrieben. Eklund zeigt, dass der Austrag von Schwermetallen aus dem Boden durch das Sickerwasser ins Grundwasser für beträchtliche Verfrachtungen von Schwermetallen sorgen kann (Eklund 1995). Der Boden ist damit lediglich eine temporäre Senke für Schwermetalle. Stark kontaminierte Böden werden zu sekundären Verunreinigungsquellen, welche kontinuierlich das Grundwasser belasten. Das Grundwasser ist wiederum Ursprung von Oberflächengewässern, wodurch eine Beeinträchtigung dieser folgt. Studien mit einem

Zeithorizont von mehreren hundert Jahren sollten den Schwermetallaustrag aus dem Boden in das Grundwasser berücksichtigen.

In einem Subsystem werden mehrere Prozesse zusammengefasst. Der räumlichen und zeitlichen Systemgrenze entspricht jene des Gesamtsystems (ÖNORM 2005).

- **Subsystem Immobilien**

Das Subsystem Immobilien fasst die Prozesse Gebäudeoberfläche, Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen, und Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge zusammen.

- **Subsystem Mobilien**

Das Subsystem Mobilien besteht aus den Prozessen Kraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge.

- **Prozess Kanalisation**

Im Prozess Kanalisation werden die Anlagen zur geordneten Ableitung von Abwässern zusammengefasst. In dieser Arbeit wird zwischen Misch-, Trenn- und modifiziertem Mischsystem unterschieden.

- **Prozess Kläranlage (ARA)**

Im Prozess Kläranlage findet die Abwasserreinigung statt. Die über das Schmutz- und Mischwasser ankommenden Metallfrachten verteilen sich auf den Klärschlamm und das geklärte Abwasser.

- **Prozess Boden**

Der Boden fungiert als Senke für Schwermetalle im urbanen System. Diese Annahme ist zumindest für zeitliche Systemgrenzen von mehreren Jahren zulässig.

- **Prozess Sediment und Oberflächengewässer**

Über Regenüberlaufe beim Mischsystem oder durch die direkte Einleitung des Regenwassers beim Trennsystem gelangen Schwermetalle ins Oberflächengewässer und sedimentieren in stehenden Gewässern. Das Sediment ist in diesem Fall ebenso eine Senke für Schwermetalle wie der Boden.

Abbildung 5 enthält alle Prozesse und Subsysteme des Systems. Sie sind über die entsprechenden Flüsse miteinander verbunden.

Auswahl der Stoffe

Für die Auswahl der zu untersuchenden Stoffe gibt es zwei wesentliche Kriterien:

- Menge
- Toxizität

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode ist maßgeschneidert für Emissionen von Schwermetallen. Für mit dieser Methode durchgeführte Untersuchungen eignen sich insbesondere die mengenmäßig in zahlreichen Oberflächen vorkommenden Metalle Zink und Kupfer sowie die aufgrund ihrer Toxizität relevanten Metalle Blei und Cadmium. Die Analyse der Stoffflüsse von in großen Mengen emittierten Metallen, beispielsweise von Zink, vermag auch wichtige Aufschlüsse über die Pfade anderer höher toxischer Stoffe, die jedoch nur in geringeren Mengen emittiert werden und deren Verteilung auf unterschiedliche Pfade damit schwieriger ermittelbar ist, zu geben. Durch den Abrieb von Autoreifen werden neben Zink auch höher toxische Substanzen wie Cadmium oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) freigesetzt. Kennt man die Pfade für Zink, so erhält man zumindest einen Ansatz über mögliche Pfade von Cadmium und PAK.

Festlegung der angestrebten Genauigkeit der Untersuchungen und Berücksichtigung der Unsicherheiten

Die Genauigkeit der Untersuchungen hängt in der Regel von der jeweiligen Aufgabenstellung sowie den finanziellen und datenbezogenen Randbedingungen ab.

In dieser Arbeit soll die Unsicherheit der Daten mitberücksichtigt werden. Dazu wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Ausgangsdaten

   Im Zuge der Datenerhebung wird allen Daten eine geschätzte Unsicherheit zugeordnet.
2. Berechnung

   Diese Unsicherheiten werden verwendet, um in Matlab mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes die Unsicherheiten der Zwischen- und Endergebnisse zu ermitteln.
3. Darstellung der Ergebnisse

   Die Berechnung der Unsicherheiten steht nicht im Zentrum dieser Arbeit, darum werden nur die bedeutendsten Ergebnisse mit Unsicherheiten angeführt.

4.2 Analyse der Stoffflüsse

Das Ziel dieses Kapitels ist die Beschreibung des methodischen Vorgehens zur Analyse der bedeutendsten Emission der Immobilien- und Mobilienoberflächen und die Beschreibung der Pfade der Emissionsprodukte bis hin zu ihren letzten Senken.
Bei dem methodischen Vorgehen zur Identifizierung und Quantifizierung der Stoffflüsse von Oberflächen in urbanen Regionen handelt es sich um einen stoffflussbasierenden Ansatz gemäß Brunner und Rechberger (Brunner und Rechberger 2004) und ÖNORM (ÖNORM 2005).

Methodisches Vorgehen zur Analyse der Stoffflüsse
Im ersten Schritt sind die Schwermetallemissionen von ausgewählten Oberflächen zu bestimmen. Die Emissionsprodukte dieser Oberflächen werden durch das Wasser oder über den Wind verfrachtet.

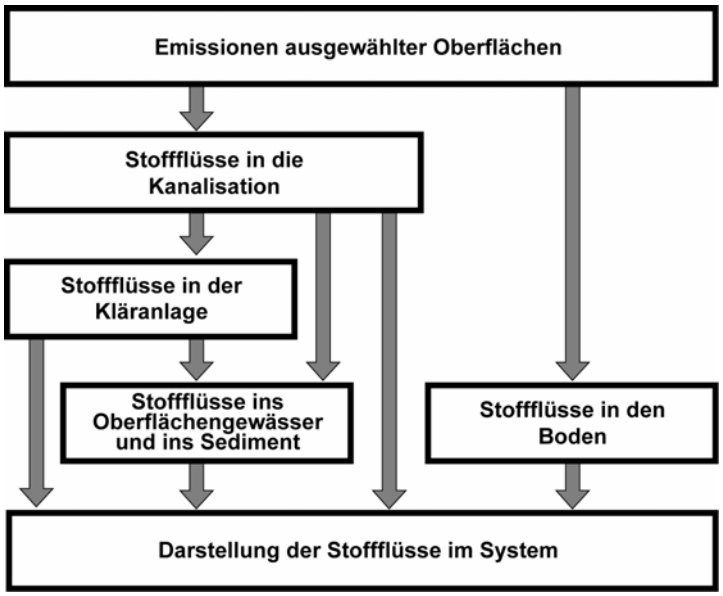


Abbildung 6: Methodisches Vorgehen zur Analyse der Stoffflüsse

Jene Stoffflüsse, welche in die Kanalisation führen, werden im Prozess Kanalisation quantifiziert. Die Frachten teilen sich im Kanalsystem anschließend auf. Anteile gelangen ins Gewässer, in die Kläranlage und der Rest lagert sich in der Kanalisation ab. Die Transferkoeffizienten im Prozess Kanalisation sind zu definieren.
Im Prozess Kläranlage werden die berechneten Inputflüsse auf die Outputflüsse, den Klärschlamm und das geklärte Abwasser, verteilt.

Schließlich werden noch die Inputflüsse in die Prozesse Boden sowie Oberflächengewässer und Sediment ermittelt.
Die Ergebnisse sind letztendlich in Form einer Stoffflussanalyse darzustellen. Diese Stoffflussanalyse dient als Grundlage für die in Kapitel 4.3 beschriebene Bewertung.
Die fünf Schritte des methodischen Vorgehens sind in Abbildung 6 zusammengefasst.

In dieser Arbeit werden Emissionen von äußeren Oberflächen (Gebäudehülle, Verkehrsinfrastruktur, Reifenlaufflächen) und Emissionen von inneren Oberflächen (Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen, Bremsbeläge von Kraftfahrzeugen und Schienenfahrzeugen) diskutiert. Alle anderen Oberflächen werden in dieser Arbeit nicht behandelt.
Ein methodisches Vorgehen wird exemplarisch für die Gebäudehülle, Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen, Reifenlaufflächen und Bremsbeläge entwickelt.

4.2.1 Subsystem Immobilien

Das Ziel dieses Kapitels ist die Beschreibung einer Vorgehensweise zur Quantifizierung der durch Oberflächen von Immobilien verursachten Schwermetallemissionen einer urbanen Region. In Abbildung 7 findet sich die Systemdefinition des Subsystems Immobilien.

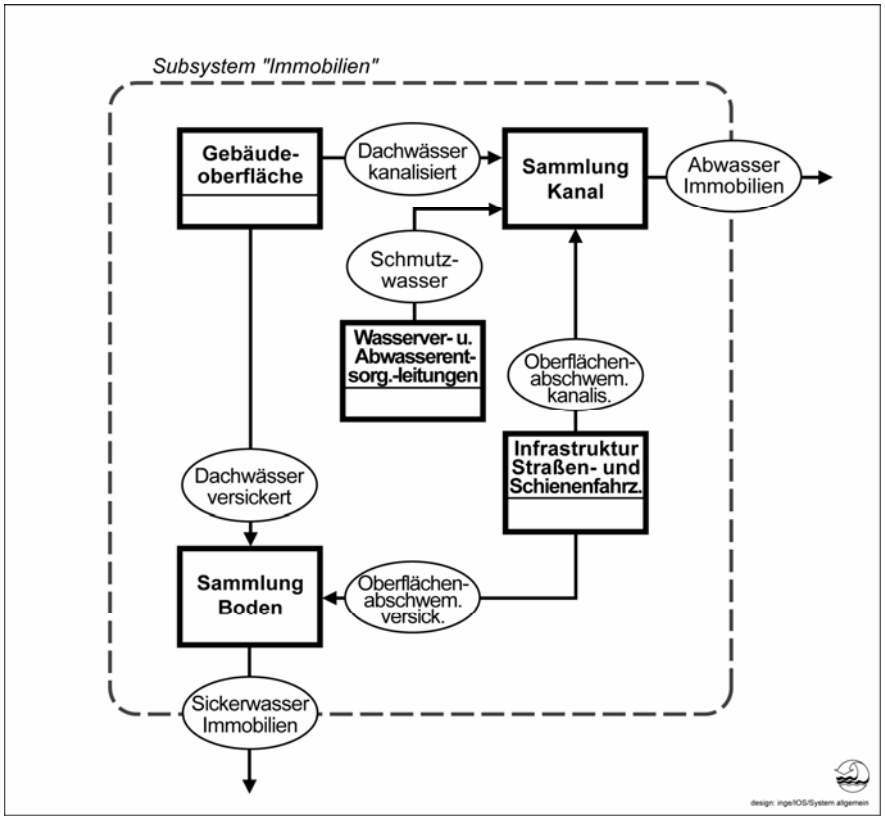


Abbildung 7: Subsystem Immobilien

4.2.1.1 Prozess Gebäudeoberfläche

Unter der Gebäudeoberfläche wird die äußere Oberfläche von Gebäuden verstanden. Sie inkludiert aber auch die äußere Oberfläche von allen anderen baulichen Konstruktionen, beispielsweise von Gartenzäunen, die sich am Grundstück des Gebäudes befinden. Diese werden unter dem Begriff „sonstige Konstruktionen“ zusammengefasst.

(i) Erfassung und Quantifizierung von Gebäudeoberflächen

Der erste Schritt ist die Ermittlung der metallischen Gebäudeoberfläche und der Oberfläche von Korrosionsschutzanstrichen. Prinzipiell lassen sich hierbei zwei Wege unterscheiden:

1. Anwendung vorhandener Literatur und Methoden

   Im Kapitel 3 sind die bekannten Methoden und Studien zu diesem Thema zusammengefasst.
2. Eigene Erhebungen

   In der Regel gibt es jedoch keinerlei Daten über die Menge an verwendeten Baustoffen zur Ausbildung der Bauwerksoberfläche.

Aus diesem Grund wird hier ein neues methodisches Vorgehen vorgestellt:

Einteilung in Bebauungsklassen (BBKL)

Um die nahezu unendliche Vielfalt an Gebäuden in einer effizienten Form behandeln zu können, ist eine Aufteilung in gewisse Klassen unumgänglich. Die Kriterien bei dieser Kategorisierung sind

- die Grundfläche der Gebäude,
- eine grobe Abschätzung des Anteils der Gebäudefläche an der Gesamtfläche (Gebäudeflächenanteil) und
- der Verwendungszweck der Gebäude.

Als Grundlage für diese Einteilung eignen sich Luftbildaufnahmen, geographische Informationssysteme, Karten und Bebauungspläne. Anhand dieser drei Kriterien werden alle bebauten Flächen einer Bebauungsklasse zugeordnet.

Weiters sind

- die gesamte bebaute Fläche der Stadt,
- die Flächen der einzelnen BBKL und
- die Gebäudeflächenanteile einzelner BBKL zu erheben.

Das Ergebnis dieses Abschnittes ist eine Aufteilung des bebauten Stadtgebietes in Bebauungsklassen (BBKLen).

Auswahl von Untersuchungsgebieten und Referenzgebäude

Aus jeder Bebauungsklasse sind repräsentative Flächen auszuwählen und anhand von Orthofotos im Detail zu untersuchen. Es ist notwendig, von all den in diesen Flächen liegenden Gebäuden Grundrisse und Grundstücksgrößen zu bestimmen.

Im Zuge von vor - Ort - Erhebungen sind anschließend von diesen Bauwerken

- die Geschosszahl,
- das ungefähre Alter der Gebäude und
- die metallische Oberfläche von Dachflächen, Fassadenflächen und sonstiger Konstruktionen zu bestimmen.

Die Geschosszahl wird infolge zur Berechnung der Emissionen von Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen benötigt und daher hier im Zuge der vor - Ort - Erhebungen mitbestimmt.

Auswertung der Erhebungen zur Gebäudeoberfläche

Im Zuge der Auswertung ist anschließend für jede Bebauungsklasse ein repräsentatives Referenzgebäude zu definieren. Die Grundfläche, Geschosszahl und metallische Oberfläche dieses Referenzgebäudes ergeben sich aus dem Mittel aller untersuchten Gebäude einer Bebauungsklasse (Formel 1 und Formel 2).

Formel 1: Mittlere Grundfläche des Referenzgebäudes der BBKL j

$$\overline{A}_{Rj} = \frac{\sum_{x=1}^{n} A_{Gjx}}{B_U}$$

$\bar{A}_{Rj}$ *Mittlere Grundfläche des Referenzgebäudes der BBKL j [m²]*

A_{Gjx} *Grundfläche des Gebäudes x in der BBKL j [m²]*

B_U *Anzahl der untersuchten Gebäude*

Formel 2: Mittlere metallische Oberfläche des Referenzgebäudes der BBKL j

$$\overline{A}_{Oij} = \frac{\sum_{x=1}^{n} A_{Oijx}}{B_U}$$

$\bar{A}_{Oij}$ *Mittlere metallische Oberfläche, die das Metall i enthält, des Referenzgebäudes der Bebauungsklasse j [m²]*

A_{Oijx} *Metallische Oberfläche, die das Metall i enthält, des Gebäudes x in der Bebauungsklasse j [m²]*

B_U *Anzahl der untersuchten Gebäude [-]*

Die metallische Oberfläche des Gebäudes x setzt sich aus den Oberflächen des Daches (A_{ODijx}), der Fassade (A_{OFijx}) und der sonstigen Konstruktionen (A_{OSKijx}) zusammen (Formel 3).

Formel 3: Metallische Oberfläche eines Bauwerkes x in der BBKL j

$$A_{Oijx} = A_{ODijx} + A_{OFijx} + A_{OSKijx}$$

A_{Oijx} *Metallische Oberfläche, die das Metall i enthält, des Gebäudes x in der Bebauungsklasse j [m²]*

A_{ODijx} *Metallische Dachfläche, die das Metall i enthält, des Gebäudes x in der Bebauungsklasse j [m²]*

A_{OFijx} *Metallische Fassadenfläche, die das Metall i enthält, des Gebäudes x in der Bebauungsklasse j [m²]*

A_{OSKijx} *Metallische Oberfläche sonstiger Konstruktionen, die das Metall i enthält, des Gebäudes x in der Bebauungsklasse j [m²]*

Der Gebäudeflächenanteilsfaktor (Formel 4) stellt die bebaute Fläche einer Bebauungsklasse der Gesamtfläche dieser gegenüber.

Formel 4: Gebäudeflächenanteilsfaktor

$$f_{Aj} = \frac{A_{Bj}}{A_j}$$

f_{Aj} *Gebäudeflächenanteilsfaktor der BBKL j [-]*

A_{Bj} *Bebaute Fläche der BBKL j [m²]*

A_j *Fläche der BBKL j [m²]*

Das Ergebnis ist ein definiertes Referenzgebäude für jede Bebauungsklasse, dessen metallische Oberfläche bekannt ist, die Fläche der BBKLen sowie deren Gebäudeflächenanteile.

(ii) Korrosions- und Abschwemmraten

Die Korrosions- und Abschwemmraten für unterschiedliche Materialien sind der Literatur zu entnehmen. Einen Überblick über einschlägige Literatur bietet das Kapitel 3.1 (Stand des Wissens) sowie Kapitel 7.1.1 (Subsystem Immobilien).

(iii) Flächenspezifische Emission

Mit Hilfe der Formel 5 lassen sich die flächenspezifischen Emissionen der einzelnen Bebauungsklassen berechnen.

Formel 5: Berechnung der flächenspezifischen Emissionen

$$e_{Bij} = \frac{\overline{A}_{Oij}}{\overline{A}_{Rj}} * a_{Bi} * c_e * f_{Aj}$$

e_{Bij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der BBKL j [g/m²*a]*

$\bar{A}_{Oij}$ *Mittlere metallische Oberfläche, die das Metall i enthält, des Referenzgebäudes der Bebauungsklasse j [m²]*

$\bar{A}_{Rj}$ *Mittlere Grundfläche des Referenzgebäudes der BBKL j [m²]*

a_{Bi} *Abschwemmrate der metallischen Oberfläche [g/m²*a]*

c_e *Koeffizient zur Berücksichtigung der Exponiertheit der Oberflächen [-]*

f_{Aj} *Gebäudeflächenanteilsfaktor der BBKL j [-]*

Der Koeffizient zur Berücksichtigung der Exponiertheit einer Fläche ist notwendig, da beispielsweise Fassaden im Vergleich zu Dachflächen wesentlich schwächer bewittert werden. Die Abschwemmrate ist daher auch entsprechend abzumindern.

Die flächenspezifischen Emissionen der Dachflächen, Fassaden und sonstigen Konstruktionen berechnen sich mit Formel 5, wenn man anstatt $\bar{A}_{Oij}$ $\bar{A}_{ODij}$, $\bar{A}_{OFij}$ beziehungsweise $\bar{A}_{OSKij}$ ansetzt. Ihre Summe ergibt die gesamte flächenspezifische Emission (Formel 6).

Formel 6: Zusammensetzung der flächenspezifischen Emission des Metalls i der BBKL j

$$e_{Bij} = e_{BDij} + e_{BFij} + e_{BSKij}$$

e_{Bij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der BBKL j [g/m²*a]*

e_{BDij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der Dachflächen in der BBKL j [g/m²*a]*

e_{BFij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der Fassaden in der BBKL j [g/m²*a]*

e_{BSKij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i sonstiger Konstruktionen in der BBKL j [g/m²*a]*

(iv) Gesamte Emission der Gebäudeoberfläche

Die gesamte durch die Gebäudeoberfläche verursachte Emission eines Metalls i lässt sich mit Formel 7 und Formel 8 berechnen.

Formel 7: Gesamte Emission der Gebäudeoberfläche einer BBKL j

$$E_{Bij} = e_{Bij} * A_j$$

E_{Bij} *Gesamte Emission eines Metalls i der Gebäudeoberfläche der Bebauungsklasse j [g/a]*

e_{Bij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der BBKL j [g/m²*a]*

A_j *Fläche der BBKL j [m²]*

Formel 8: Gesamte Emission eines Metalls i der Gebäudeoberfläche der Stadt

$$E_{Bi} = \sum_{j=1}^{n} E_{Bij}$$

E_{Bi} *Gesamte Emission des Metalls i durch die Gebäudeoberfläche [g/a]*

E_{Bij} *Gesamte Emission eines Metalls i der Gebäudeoberfläche der Bebauungsklasse j [g/a]*

Resultate dieses Kapitels sind die gesamten Emissionen von der Gebäudehülle sowie die Verteilung dieser auf die einzelnen Bebauungsklassen. Durch die Aufteilung der Gebäudehülle in Dach- und Fassadenbereiche sowie in sonstige Konstruktionen kann der Beitrag dieser zur gesamten Emission abgeschätzt werden.

4.2.1.2 Prozess Wasser- und Abwasserentsorgungsleitungen

Das Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Bestimmung der Emissionen von Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen.

Die Rohrleitungen des öffentlichen Wasserver- und Abwasserentsorgungsnetzes bestehen aus Stahl, Gusseisen, Beton, Stahlbeton oder Kunststoff (Schneider 1998) und sind daher für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen nicht relevant.

Ermittlung der metallischen Rohroberfläche

In Kapitel 4.2.1.1 wurde für jede BBKL ein Referenzgebäude definiert. Als Referenzgebäude dieses Kapitels ist eines der in Kapitel 4.2.1.1 definierten Referenzgebäude auszuwählen. Es wird als ausgewähltes Referenzgebäude bezeichnet. Idealerweise ist jenes zu nehmen, das einem durchschnittlichen Einfamilienhaus am stärksten ähnelt. Für dieses ausgewählte Referenzgebäude kann mit Hilfe von Interviews mit Fachleuten von Installateurbetrieben eine Abschätzung über die mittlere Rohrlänge und den mittleren Rohrdurchmesser der Leitungen gemacht werden. Praktische Erfahrungen zeigen, dass Unternehmen in der Regel gute Angaben zu konkreten Bauvorhaben machen können, da solche Problemstellungen ihrem Arbeitsgebiet angehören.

Aus den Angaben zum Rohrdurchmesser und der durchschnittlichen Rohrlänge kann die durchschnittliche Rohroberfläche für das ausgewählte Referenzgebäude berechnet werden (Formel 9).

Formel 9: Mittlere Rohroberfläche des ausgewählten Referenzgebäudes

$$\overline{O}_R = \overline{D}_R * \pi * \overline{L}_R$$

$\bar{O}_R$	*Mittlere Rohroberfläche des ausgewählten Referenzgebäudes [m²]*
$\overline{D}_R$	*Mittlerer Rohrdurchmesser des ausgewählten Referenzgebäudes [m]*
$\overline{L}_R$	*Mittlere Rohrlänge im ausgewählten Referenzgebäude [m]*
$\bar{A}_R$	*Mittlere Gebäudegrundfläche des ausgewählten Referenzgebäudes [m²]*

Korrosionsraten

Die Korrosions- und Abschwemmraten sind der Literatur zu entnehmen.

Flächenspezifische Emission

Die Referenzgebäude der einzelnen BBKL unterscheiden sich in ihrer Geschossanzahl und ihrer Grundfläche. Diese Werte wirken sich direkt auf die in den Gebäuden verlegte Länge der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen aus. Über den Geschoss- und Gebäudeflächenanteilsfaktor werden diese Unterschiede in den Bebauungsklassen ausgeglichen.

Der Geschossfaktor gibt an, inwieweit die durchschnittliche Geschosszahl des Referenzgebäudes einer Bebauungsklasse von jener des ausgewählten Referenzgebäudes abweicht. Die durchschnittliche Geschosszahl der Referenzgebäude der Bebauungsklassen wurden bereits in Kapitel 4.2.1.1 im Zuge der praktischen Erhebungen ermittelt. Die Bestimmung der Geschossfaktoren der Bebauungsklassen erfolgt nach Formel 10.

Formel 10: Geschossfaktor

$$f_{Gj} = \frac{\overline{g}_j}{g_R}$$

f_{Gj}	*Geschossfaktor [-]*
$\overline{g}_j$	*Geschosszahl des Referenzgebäudes der BBKL j [-]*
g_R	*Geschosszahl des ausgewählten Referenzgebäudes [-]*

Der Gebäudeflächenanteilsfaktor wurde bereits in Kapitel 4.2.1.1 berechnet.

Das Alter des Gebäudes ist ebenso zu berücksichtigen. Die zur Herstellung der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen verwendeten Materialien änderten sich im Laufe des

letzten Jahrhunderts stark. Diesem Umstand wird durch den Bauwerksalters- und Materialfaktor Rechnung getragen.

Der Bauwerksaltersfaktor gibt das Alter der untersuchten Gebäude an. Die durch Trinkwasserleitungen verursachten Metallemissionen sind abhängig vom Alter der Gebäude. Es empfiehlt sich hierbei für gewisse Zeiträume charakteristische Materialverteilungen zu definieren. Je genauere Informationen zu den Baumaterialtrends des vergangenen Jahrhunderts vorliegen, desto kürzer sind die Zeitintervalle zu wählen. Das Alter der Gebäude wurde im Zuge der Erhebungen (siehe dazu Kapitel 4.2.1.1) festgestellt. Für jede Bebauungsklasse ergibt sich somit ein eigenes Profil bezüglich der Alterszusammensetzung des Gebäudebestandes. Der Bauwerksaltersfaktor ist der Quotient aus der Anzahl der untersuchten Gebäude, die in ein definiertes Zeitintervall fallen, und der gesamten Anzahl der untersuchten Gebäude der Bebauungsklasse (Formel 11).

Formel 11: Bauwerksaltersfaktor

$$f_{Bjt} = \frac{B_{Ujt}}{B_{Uj}}$$

f_{Bjt}	*Bauwerksaltersfaktor [-]*
B_{Ujt}	*Anzahl der untersuchten, in der Zeitspanne t errichteten Gebäude in der BBKL j [-]*
B_{Uj}	*Anzahl der untersuchten Gebäude der BBKL j [-]*

Der Materialfaktor gibt die Materialverteilung in den definierten Zeitspannen an. Er gibt den Anteil eines bestimmten Materials an der gesamten verwendeten Materialmenge an (Formel 12). Die Summe der Materialfaktoren eines Zeitintervalls ergibt eins.

Formel 12: Materialfaktor

$$f_{Mit} = \frac{M_{it}}{M_{tges}}$$

f_{Mit}	*Materialfaktor [-]*
M_{it}	*Material, welches das Metall i enthält, verbaut in der Zeitspanne t [-]*
M_{tges}	*Gesamte in der Zeitspanne t verbaute Materialmenge*

Der Summenfaktor fasst den Gebäudeflächenanteilsfaktor, den Geschossfaktor, den Bauwerksaltersfaktor und den Materialfaktor einer Bebauungsklasse zu einem Faktor zusammen (Formel 13).

Formel 13: Summenfaktor

$$f_{Sij} = \left(\sum_{t=1}^{n} f_{Mit} * f_{Bjt} \right) * f_{Gj} * f_{Aj}$$

f_{Sij} *Summenfaktor des Metalls i der Bebauungsklasse j [-]*

f_{Mit} *Materialfaktor [-]*

f_{Bjt} *Bauwerksaltersfaktor [-]*

f_{Gj} *Geschossfaktor [-]*

f_{Aj} *Gebäudeflächenanteilsfaktor der BBKL j [-]*

Flächenspezifische Emission

Die flächenspezifische Emission eines Metalls i der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen einer Bebauungsklasse lässt sich mit Formel 14 berechnen. In der Regel wird die flächenspezifische Emission in Richtung Stadtzentrum größer. Im vorwiegend aus älteren Bauwerken bestehenden Stadtzentrum finden sich nach wie vor erhebliche Mengen an metallischen Rohrleitungsmaterialien, außerdem nimmt die durchschnittliche Geschosszahl in Richtung Zentrum zu.

Formel 14: Flächenspezifische Emission der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen der BBKL j

$$e_{Rij} = \frac{\bar{O}_R}{\bar{A}_R} * a_{Ri} * f_{Sij}$$

e_{Rij} *Flächenspezifische Emission aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen des Metalls i der BBKL j [g/m²*a]*

$\bar{O}_R$ *Mittlere Rohroberfläche des ausgewählten Referenzgebäudes [m²]*

$\bar{A}_R$ *Mittlere Gebäudegrundfläche des ausgewählten Referenzgebäudes [m²]*

a_{Ri} *Abschwemmrate des Metalls i an der Rohrinnenseite [g/m²*a]*

f_{Sij} *Summenfaktor des Metalls i der Bebauungsklasse j [-]*

Gesamte Emission des urbanen Systems

Die gesamte Emission eines Metalls i einer Bebauungsklasse lässt sich mit Formel 15 berechnen.

Formel 15: Gesamte Emission der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen einer BBKL j

$$E_{Rij} = e_{Rij} * A_j$$

E_{Rij} *Gesamte Emission aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen des Metalls i der BBKL j [g/a]*

e_{Rij} *Flächenspezifische Emission aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen des Metalls i der BBKL j [g/m²*a]*

A_j *Fläche der BBKL j [m²]*

Die gesamte Emission der urbanen Region ergibt sich durch Summierung der Emissionen der Bebauungsklassen mit Formel 16.

Formel 16: Gesamte Emission des Metalls i durch die Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen der Stadt

$$E_{Ri} = \sum_{j=1}^{n} E_{Rij}$$

E_{Ri} *Gesamte Emission des Metalls i der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen des urbanen Systems [g/a]*

E_{Rij} *Gesamte Emission aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen des Metalls i der BBKL j [g/a]*

4.2.1.3 Verteilung der Emissionsprodukte

Die durch Korrosion von Gebäudeoberflächen freigesetzten metallischen Partikel und gelösten Ionen werden entweder durch den Wind verfrachtet oder im Zuge von Regenereignissen durch das Wasser abgespült. Es gibt heute keine Angaben über die mengenmäßige Aufteilung der Emissionen auf diese Transportwege. Im methodischen Vorgehen wird davon ausgegangen, dass der mit dem Wind verfrachtete Anteil gering ist. Aus diesem Grund wird nur der über das Regenwasser verfrachtete Anteil weiterbetrachtet.

4.2.2 Subsystem Mobilien

Das Ziel dieses Kapitels ist die Beschreibung einer Vorgehensweise zur Quantifizierung der durch Oberflächen von Mobilien verursachten Schwermetallemissionen einer urbanen Region. Die Mobilien werden in Kraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge aufgeteilt. Aufgrund der größeren Relevanz von Kraftfahrzeugemissionen wird in diesem Kapitel ein methodisches Vorgehen für diese entwickelt. Das Systembild des Subsystems Mobilien ist der Abbildung 8 zu entnehmen.

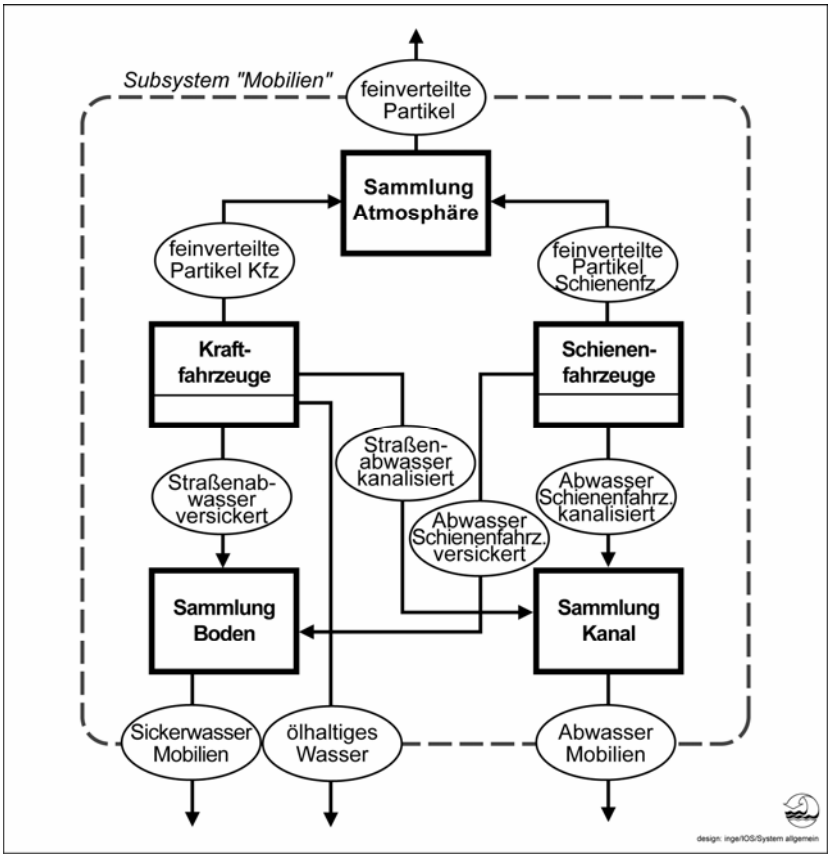


Abbildung 8: Subsystem Mobilien

4.2.2.1 Prozess Kraftfahrzeuge

Im Prozess Kraftfahrzeuge werden die Emissionen der beiden Oberflächen Reifenlaufflächen und Bremsbeläge zusammengefasst. Aus bisherigen Projekten, beispielsweise von Sörme (Sörme 2003), Hillenbrand und Fuchs (Hillenbrand, Fuchs et al. 2005) oder Fuchs und Scherer (Fuchs, Scherer et al. 2002), geht hervor, dass diese die mengenmäßig bedeutendsten Quellen der Zink- und Kupferemissionen von Mobilien sind.

Massenspezifische Metallmengen in Verschleißteilen

Die Metallkonzentrationen können in heute verwendeten Reifengummis und Bremsbelägen stark schwanken.

Der mittlere Massenverlust des Reifengummis sowie die mittlere zurückgelegte Kilometeranzahl bis zur Auswechslung des Reifensatzes sind in der Literatur zu finden, beispielsweise in Haider (Haider 1999) oder Krömer und Kreipe (Krömer, Kreipe et al. 1999). Der kilometerspezifische Massenverlust des Reifengummis lässt sich mit Formel 17 ermitteln.

Formel 17: Kilometerspezifischer Massenverlust des Reifengummis

$$m_{KR} = \frac{M_{KR}}{l_R}$$

m_{KR} *Kilometerspezifischer Massenverlust des Reifengummis [kg/km]*

M_{KR} *Mittlerer Massenverlust des Reifengummis eines Reifens über seine Lebensdauer [kg]*

l_R *Mittlere mit einem Reifen zurückgelegte Kilometeranzahl bis zum Austausch [km]*

Die Berechnung des mittleren kilometerspezifischen Bremsabriebs erfolgt mit Formel 18 und Formel 19.

Die Daten zum mittleren Massenverlust und der mittleren zurückgelegten Kilometeranzahl bis zur Auswechslung der Bremsbeläge sind der Literatur zu entnehmen, beispielsweise aus Westerlund (Westerlund 2001) oder Stellpflug (Stellpflug 2002).

Formel 18: Kilometerspezifischer Massenverlust der vorderen Bremsbeläge

$$m_{KBV} = \frac{M_{KBV}}{l_{BV}}$$

m_{KBV} *Kilometerspezifischer Massenverlust der vorderen Bremsbeläge [kg/km]*

M_{KBV} *Mittlerer Massenverlust der vorderen Bremsbeläge über ihre Lebensdauer [kg]*

l_{BV} *Mittlere mit einem Satz vorderer Bremsbeläge zurückgelegte Kilometeranzahl [km]*

Formel 19:Kilometerspezifischer Massenverlust der hinteren Bremsbeläge

$$m_{KBH} = \frac{M_{KBH}}{l_{BH}}$$

m_{KBH} *Kilometerspezifischer Massenverlust der hinteren Bremsbeläge [kg/km]*

M_{KBH} *Mittlerer Massenverlust der hinteren Bremsbeläge über ihre Lebensdauer [kg]*

l_{BH} *Mittlere mit einem Satz hinterer Bremsbeläge zurückgelegte Kilometeranzahl [km]*

Kilometerspezifische Emissionen

Kennt man die Menge eines Metalls i im Reifengummi und verknüpft diese mit dem kilometerspezifischen Massenverlust des Reifengummis, so lässt sich die kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges abschätzen (Formel 20). In analoger Weise wird bei den Bremsbelägen vorgegangen (Formel 21).

Formel 20: Kilometerspezifische Emission des Metalls i des Reifengummis

$$e_{KRi} = m_{KR} * c_{KRi}$$

e_{KRi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i des Reifengummis [mg/km]*

m_{KR} *Kilometerspezifischer Massenverlust des Reifengummis [kg/km]*

c_{KRi} *Massenbezogener Anteil des Metalls i im Reifengummi [mg/kg]*

Formel 21: Kilometerspezifische Emission des Metalls i der Bremsbeläge

$$e_{KBi} = m_{KBV} * c_{KBVi} + m_{KBH} * c_{KBHi}$$

e_{KBi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i der Bremsebeläge [mg/km]*

m_{KBV} *Kilometerspezifischer Massenverlust der vorderen Bremsbeläge [kg/km]*

c_{KBVi} *Massenbezogener Anteil des Metalls i in den vorderen Bremsbelägen [mg/kg]*

m_{KBH} *Kilometerspezifischer Massenverlust der hinteren Bremsbeläge [kg/km]*

c_{KBHi} *Massenbezogener Anteil des Metalls i in den hinteren Bremsbelägen [mg/kg]*

Die kilometerspezifische Emission des Kraftfahrzeuges ergibt sich aus der Summe aller kilometerspezifischen Emissionen des Fahrzeuges (Formel 22).

Formel 22: Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges

$$e_{Ki} = e_{KRi} + e_{KBi}$$

e_{Ki} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges [mg/km]*

e_{KRi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i des Reifengummis [mg/km]*

e_{KBi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i der Bremsebeläge [mg/km]*

Gesamte Emission des urbanen Systems

In der Regel existiert für jedes größere urbane System ein Verkehrskonzept. Dieses enthält eine Aufteilung des gesamten Straßennetzes in ein primäres und sekundäres Netz sowie Informationen über die täglich durch Kraftfahrzeuge in dem jeweiligen Straßennetz zurückgelegte Kilometeranzahl. Die gesamte Emission ist das Produkt der gesamten täglich zurückgelegten Kilometeranzahl und der kilometerspezifischen Emission eines Metalls i (Formel 23).

Formel 23: Gesamte Emission des Kraftfahrzeugverkehrs in einem urbanen System

$$E_{Ki} = e_{Ki} * (L_{KP} + L_{KS})$$

E_{Ki} *Gesamte Emission des Metalls i durch den Kraftfahrzeugverkehr [kg/a]*

e_{Ki} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeugs [kg/km]*

L_{KP} *Anzahl der auf dem primären Straßennetz zurückgelegten Kraftfahrzeugkilometer innerhalb eines Jahres [km/a]*

L_{KS} *Anzahl der auf dem sekundären Straßennetz zurückgelegten Kraftfahrzeugkilometer innerhalb eines Jahres [km/a]*

4.2.2.2 Verteilung der Emissionen auf einzelne Transportwege

Die von Kraftfahrzeugen verursachten Schwermetallemissionen verteilen sich auf drei Pfade:

- Sie verbleiben am Fahrzeug.
- Sie fallen an große Partikel gebunden auf die Fahrbahn.
- Sie werde an kleinste Partikel gebunden über die Luft kurze oder lange Strecken transportiert (Hewitt und Rashed 1990). In dieser Arbeit wird unterschieden zwischen jenem Emissionsanteil, der über die Luft weite Strecken transportiert wird, und jenem, der über kurze Strecken transportiert und am straßennahen Boden durch Deposition abgelagert wird (Formel 24).

Diese Verteilung ist naturgemäß eine sehr starke Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse. In der Literatur findet sich sehr wenig Information darüber, welche Menge über die einzelnen Transportwege verfrachtet wird. Aus diesem Grund können nur Annahmen über die Verteilung der freigesetzten Metalle getroffen werden. Die Verteilung ist unter anderem von der Fahrgeschwindigkeit, den vorherrschenden geographischen, vegetativen und lokalen atmosphärischen Einwirkungen abhängig (Wrobel, Rokita et al. 2000). Weiters verhalten sich die Metalle, da sie in unterschiedlichen Mengen von einzelnen Quellen stammen, nicht gleich.

Formel 24: Aufteilung der Emissionen eines Kraftfahrzeuges auf unterschiedliche Transportwege

$$e_{Ki} = e_{KSi} + e_{KKi} + e_{KDSi} + e_{KLi}$$

e_{Ki} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges [mg/km]*

e_{KSi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges auf die Fahrbahn [mg/km]*

e_{KKi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges, die am Fahrzeug verbleibt [mg/km]*

e_{KDSi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges, die am straßennahen Boden abgelagert wird [mg/km]*

e_{KLi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges in die Luft [mg/km]*

4.2.3 Prozess Kanalisation

Ziel dieses Abschnittes ist die Beschreibung des methodischen Vorgehens zur Bestimmung der Frachten von Oberflächen in die Kanalisation.

Die Kanalisation einer Stadt setzt sich meist aus verschiedenen Entwässerungssystemen zusammen. Nach dem Abfluss werden in dieser Arbeit folgende Entwässerungssysteme unterschieden:

- Trennkanalisation (Trennsystem)
- Mischkanalisation (Mischsystem)
- Modifizierte Mischkanalisation

Neben dem Trenn- und Mischsystem ist die modifizierte Mischkanalisation von Bedeutung. Häufig wird diese im ländlichen Raum so ausgeführt, dass Schmutzwasser und behandlungsbedürftige Niederschlagsabwässer von Straßen zusammen abgeführt werden. Das über Dächer gesammelte Regenwasser versickert hingegen vor Ort.

4.2.3.1 Fracht von Oberflächen in die Kanalisation

(i) Gesamte Fracht aus dem Subsystem Immobilien in die Kanalisation

Gebäudeoberflächen

Die Analyse der Verteilung von metallischen Oberflächen auf Fassade und Dächer zeigt eindeutig, dass sich mehr als 90% der emittierenden Flächen im Dachbereich von Gebäuden befinden (Rebernig, Schöller et al. 2006). Der Dachbereich wird zudem stark bewittert, da der konstruktive Schutz entfällt.

In die Kanalisation gelangen nur Emissionen aus dem Dachbereich. Die Emissionen der Fassade und sonstigen Konstruktionen werden in den Boden eingetragen.

Die Berechnung der in die Kanalisation gelangenden Frachten von Gebäudeoberflächen erfolgt mit Formel 25, Formel 26 und Formel 27.

Formel 25:Jährliche Fracht von den Gebäudeoberflächen einer BBKL j in die Kanalisation

$$F_{KIBij} = e_{BDij} * A_j * k_{TMj}$$

F_{KIBij} *Jährliche Fracht eines Metalls i der Gebäudeoberfläche einer BBKL j in die Kanalisation [g/a]]*

e_{BDij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der Dachfläche in der BBKL j [g/m²*a]*

A_j *Fläche der BBKL j [m²]*

k_{TMj} *Anteil des Trenn- und Mischsystems am gesamten Entwässerungssystem der BBKL j [-]*

Es kann heute davon ausgegangen werden, dass alle bebauten Bereiche in urbanen Regionen an ein Entwässerungssystem angeschlossen sind. Die gesamte entwässerte Fläche ist damit gleich der gesamten bebauten Fläche.

Formel 26: Koeffizient zur Berücksichtigung des Anteils von Trenn- und Mischsystem an dem gesamten Entwässerungssystems der BBKL j

$$k_{TMj} = \frac{A_{TMj}}{A_j}$$

k_{TMj} *Anteil des Trenn- und Mischsystems am gesamten Entwässerungssystem der BBKL j [-]*

A_{TMj} *Einzugsgebiet des Trenn- und Mischsystems in der BBKL j [m²]*

A_j *Fläche der BBKL j [m²]*

Formel 27: Gesamte jährliche Fracht des Metalls i von Gebäudeoberflächen in die Kanalisation

$$F_{KIBi} = \sum_{j=1}^{n} F_{KIBij}$$

F_{KIBi} *Gesamte jährliche Fracht eines Metalls i der Gebäudeoberflächen in die Kanalisation [g/a]*

F_{KIBij} *Jährliche Fracht eines Metalls i der Gebäudeoberfläche einer BBKL j in die Kanalisation [g/a]*

Die von dem Trenn- und Mischsystem entwässerten Flächen (A_{TMi}) sind entweder graphisch zu bestimmen oder Detailplänen der Kläranlagenplanung zu entnehmen. Prinzipiell sind zwei Karten heranzuziehen. Eine zeigt die nach Bebauungsklassen gegliederte urbane Region, die andere die Einzugsgebiete der Entwässerungssysteme des bebauten Gebietes.

Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen

Die gesamten durch Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen verursachten diffusen Schwermetallemissionen gelangen zur Gänze in die Kanalisation. Damit ist die gesamte Emission, berechnet in Kapitel 4.2.1.2, gleich der Fracht in die Kanalisation (Formel 28).

Formel 28: Gesamte Fracht in die Kanalisation aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen

$$F_{KIRi} = E_{Ri}$$

F_{KIRi} *Jährliche Fracht eines Metalls i aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen in die Kanalisation [g/a]*

E_{Ri} *Gesamte Emission des Metalls i der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen des urbanen Systems [g/a]*

Subsystem Immobilien

Die gesamte Fracht eines Metalls i in die Kanalisation setzt sich damit aus der Fracht der Gebäudeoberfläche und der Fracht aus den Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen zusammen (Formel 29).

Formel 29: Gesamte Fracht aus dem Subsystem Immobilien in die Kanalisation

$$F_{KIi} = F_{KIBi} + F_{KIRi}$$

F_{KIi} *Fracht eines Metalls i aus dem Subsystem Immobilien in die Kanalisation [g/a]*

F_{KIBi} *Gesamte jährliche Fracht eines Metalls i der Gebäudeoberflächen in die Kanalisation [g/a]*

F_{KIRi} *Jährliche Fracht eines Metalls i aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen in die Kanalisation [g/a]*

(ii) Gesamte Fracht aus dem Subsystem Mobilien in die Kanalisation

Kraftfahrzeuge

Jener Anteil der Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs, der auf der Fahrbahn landet, wird über die Straßenabwässer ins Bankett oder in die Kanalisation eingetragen.

Definition von Verkehrsbelastungsklassen

Im ersten Schritt teilt man die Straßen des primären Straßennetzes in Verkehrsbelastungsklassen ein (VBKL). Die Einheit dieser VBKL ist Kraftfahrzeuge pro Tag. Jede Verkehrsbelastungsklasse beschreibt einen definierten Verkehrsbelastungsbereich, beispielsweise 10000 bis 20000 Kfz/d.

Ermittlung der Straßenlängen

Händisch oder mit computerunterstützter Software (AUTOCAD) sind die Längen der Straßen, die einer VBKL angehören, aus dem Verkehrskonzept zu ermitteln. Bei dieser Ermittlung soll auch die Länge der in die Kanalisation entwässernden Straßenteile bestimmt werden. Voraussetzung dafür sind wiederum zwei Karten, eine über das Entwässerungssystem der Stadt, die zweite über das in VBKL gegliederte primäre Straßennetz.

Berechnung eines Korrekturfaktors

Für jede VBKL wird zunächst die mittlere Kraftfahrzeugbelastung dieser angesetzt. Dies ist eine Näherung, da es zu umfangreich wäre, jeden einzelnen Verkehrsweg mit seiner Verkehrsbelastung und seinen Entwässerungssystems separat zu erfassen. Da es sich um eine Näherung handelt, wird ein Korrekturfaktor eingeführt. Der Korrekturfaktor lässt sich mit Formel 30 berechnen.

Formel 30: Berechnung des Korrekturfaktors v

$$L_{PP} = v * \sum_{v=1}^{n} \overline{V}_v * (l_{Kv} * l_{Bv})$$

L_{PP}	*Anzahl der auf dem primären Straßennetz zurückgelegten Kraftfahrzeugkilometer innerhalb eines Jahres [Kfz*km/a]*
v	*Korrekturfaktor der mittleren Verkehrsbelastung [-]*
$\overline{V}_v$	*Mittlere Verkehrsbelastung der VBKL v [Kfz/a]*
l_{Bv}	*Länge der Straßen der VBKL v, die in den Boden entwässern [km]*
l_{Kv}	*Länge der Straßen der VBKL v, die ins Kanalsystem entwässern [km]*

Eintragsfrachten

Die gesamte ins Kanalsystem gelangende Fracht errechnet sich mit Formel 31 und Formel 32.

Formel 31: Fracht der VBKL v ins Kanalsystem

$$F_{KMSiv} = V_v * l_{kv} * e_{KSi} * v$$

F_{KMSiv}	*Gesamte Fracht des Metalls i von der Fahrbahn der VBKL v in die Kanalisation [kg/a]*
$\overline{V}_v$	*Mittlere Verkehrsbelastung der VBKL v [Kfz/a]*
l_{Kv}	*Länge der Straßen der VBKL v, die ins Kanalsystem entwässern [km]*
e_{KSi}	*Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges auf die Fahrbahn [mg/Kfz*km]*
v	*Korrekturfaktor der mittleren Verkehrsbelastung [-]*

Formel 32: Gesamte Fracht des Metalls i von Kraftfahrzeugen in die Kanalisation

$$F_{KMSi} = \sum_{v=1}^{n} F_{KMSij}$$

F_{KMSi}	*Gesamte Fracht des Metalls i von der Fahrbahn in die Kanalisation [kg/a]*
F_{KMSiv}	*Gesamte Fracht des Metalls i von der Fahrbahn der VBKL v in die Kanalisation [kg/a]*

4.2.3.2 Verteilung der Fracht in der Kanalisation

Ein Teil der Fracht in die Kanalisation gelangt über das Überlaufwasser in die Oberflächengewässer (F_{OKi}), ein weiterer lagert sich in der Kanalisation ab und wird im Zuge von Kanalspülungen als Räumgut entfernt (F_{Ri}) und die übrige Fracht gelangt in die Kläranlage (F_{AKi}).

Zur Ermittlung der Transferkoeffizienten dieses Prozesses ist es notwendig, Daten über die Kanalisation zu erheben. Mit Hilfe von Kanalnetzsimulationsprogrammen, beispielsweise SEWSYS (Ahlman 2006), und der erhobenen Daten zur Kanalisation können die Transferkoeffizienten berechnet werden.

Je komplexer der Aufbau des Kanalnetzes und je mehr unterschiedliche Entwässerungssysteme in der untersuchten urbanen Region vorhanden sind, desto schwieriger gestaltet sich auch die Bestimmung der Transferkoeffizienten.

Zur groben Abschätzung der Transferkoeffizienten können jedoch auch die folgenden Ansätze gewählt werden:

Regenüberläufe in Mischsystemen

Regenüberläufe entlasten in Mischkanalisationen die nicht behandel- bzw. speicherbare Wassermenge in die Gewässer. Diese Wassermenge ist von einer Reihe von Randbedingungen - zu diesen gehören unter anderen das verfügbare Speichervolumen und die Betriebsweise des Systems - abhängig (Hillenbrand, Fuchs et al. 2005). Die Gewässerbelastung, das heißt die eingetragene Metallfracht in die Gewässer, ist abhängig von der jährlichen Überlaufdauer. Der Anteil der jährlich über Regenüberläufe entlasteten Mischwassermenge ist bei lokalen Kläranlagenbetreibern zu erfragen oder anhand von Bemessungsplänen der Kläranlage abzuschätzen.

Regenwasserkanäle in Trennsystemen

Regenwasserkanäle im Trennsystem sammeln die Dach- und Straßenabwässer und leiten diese bei Regenereignissen in Oberflächengewässer ein. Die Metallfracht von den Gebäudeoberflächen lässt sich mit Formel 25 berechnen, wenn man statt k_{TMj} k_{TSj} ansetzt. k_{TSj} gibt den Anteil des Trennsystems am gesamten Entwässerungssystem einer BBKL j an. Die Fracht aus den Straßenabwässern lässt sich mit Formel 31 berechnen, wenn man für l_{Kv} nur jene Länge der Straßen der VBKL v ansetzt, die durch ein Trennsystem entwässert werden.

Räumgut

Die jährlich anfallende Menge an Räumgut und deren Schwermetallgehalt kann am ehesten bei lokalen Behörden erfragt werden. Werte für eine grobe Abschätzung der Schwermetallfracht findet man in der Literatur, beispielsweise in Rocher und Azimi (Rocher, Azimi et al. 2003)

Ergebnisse dieser Berechnungen sind die Frachten der Schwermetalle ins Oberflächengewässer (F_{OKi}), in die Kläranlage (F_{AKi}) und über das Räumgut auf die Deponie (F_{Ri}).

4.2.4 Prozess Kläranlage

Das Ziel ist die Bestimmung der Frachten in den Klärschlamm und ins geklärte Abwasser.
Die Zulauffracht zur Kläranlage (F_{AKi}) wird im Prozess Kanalisation ermittelt. Sie verteilt sich nach den jeweiligen Transferkoeffizienten des Prozesses auf den Klärschlamm und das geklärte Abwasser. Die Transferkoeffizienten können entweder über Messungen des Schwermetallgehaltes im Klärschlamm und im Ablauf der Kläranlage berechnet oder der Literatur entnommen werden.
In der Literatur finden sich Werte über die Reinigungsleistung von Kläranlagen (Zessner 1999). Die Schwermetallfixierung im Klärschlamm ist jedoch stark von lokalen Verhältnissen geprägt und schwankt damit stark, dies ist bei der Verwendung von Literaturwerten als Kontrolle der Messwerte zu berücksichtigen.
Mit Formel 33 lassen sich die Frachten im Klärschlamm und geklärten Abwasser berechnen.

Formel 33: Schwermetallfrachten im Klärschlamm und geklärtem Abwasser

$$F_{KSi} = F_{AKi} * TK_{KSi}$$

$$F_{OAi} = F_{AKi} * (1 - TK_{KSi})$$

F_{KSi} *Fracht des Metalls i im Klärschlamm [kg/a]*

F_{AKi} *Fracht des Metalls i im Zulauf der Kläranlage [kg/a]*

F_{OAi} *Fracht des Metalls i im geklärten Abwasser [kg/a]*

TK_{KSi} *Transferkoeffizient in den Klärschlamm [-]*

In der Kläranlage einer Stadt bietet sich die Möglichkeit der Kontrolle der berechneten Stoffflüsse. Soll der Klärschlamm einer landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt werden, ist eine Messung der Schwermetallgehalte durch die EU-Verordnung 86/278/EEC ohnehin vorgeschrieben (Rat der Europäischen Gemeinschaft 1986). Die gemessenen Schwermetallgehalte können damit zur Kontrolle der in Formel 33 berechneten Frachten herangezogen werden. Damit die Berechnung der Schwermetallfrachten im Klärschlamm mit den Messungen vergleichbar wird, sind auch die Metalleinträge aus dem Abwasser von Haushalten, die atmosphärische Deposition sowie die Einträge der Industrie und des Gewerbes im Einzugsgebiet mit zu berücksichtigen. Diese lassen sich aus der Literatur abschätzen. Zessner gibt Richtwerte an (Zessner 1999).

4.2.5 Prozess Boden

Das Ziel dieses Prozesses ist die Bestimmung der Frachten aus den Subsystemen Immobilien und Mobilien in den Boden.

4.2.5.1 Gesamte Fracht aus dem Subsystem Immobilien in den Boden

Die Fracht aus dem Prozess Gebäudeoberfläche in den Boden (F_{BIB}) lässt sich mit Formel 34 und Formel 35 berechnen.

Formel 34: Frachten des Metalls i von der Gebäudeoberfläche einer BBKL j in den Boden

$$F_{BIBij} = e_{BDij} * A_j * k_{MMj} + A_j * (e_{BFij} + e_{BSKij})$$

F_{BIBij} *Fracht des Metalls i von der Gebäudeoberfläche einer BBKL j in den Boden [g/a]*

e_{BDij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der Dachfläche in der BBKL j [g/m²*a]*

A_j *Fläche der BBKL j [m²]*

k_{MMj} *Anteil des modifizierten Mischsystems am gesamten Entwässerungssystem der BBKL j [-]*

e_{BFij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i der Fassaden in der BBKL j [g/m²*a]*

e_{BSKij} *Flächenspezifische Emission des Metalls i sonstiger Konstruktionen in der BBKL j [g/m²*a]*

Formel 35: Gesamte Fracht des Metalls i aus dem Subsystem Immobilien in den Boden

$$F_{BIi} = F_{BIBi} = \sum_{j=1}^{n} F_{BIBij}$$

F_{BIi} *Fracht des Metalls i aus dem Subsystem Immobilien in den Boden [g/a]*

F_{BIBi} *Fracht des Metalls i von der Gebäudeoberfläche in den Boden [g/a]*

F_{BIBij} *Fracht des Metalls i von der Gebäudeoberfläche einer BBKL j in den Boden [g/a]*

Die gesamte Fracht aus den Immobilien in den Boden setzt sich aus den Emissionen der Fassaden und den sonstigen Konstruktionen zusammen und bezieht auch jene Teile der Emissionen von Dachflächen ein, welche über dezentrale Versickerungsanlagen in den Boden eingetragen werden. Dezentrale Versickerungsanlagen werden in Gebieten mit modifizierter Mischkanalisation ausgeführt. Da die Emissionen des Prozesses Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen zur Gänze in die Kanalisation gelangen, ist die Fracht F_{BIBi} der gesamten Fracht F_{BIi} der Immobilien in den Boden gleichzusetzen.

4.2.5.2 Gesamte Fracht aus dem Subsystem Mobilien in den Boden

Durch Kraftfahrzeuge emittierte Metalle gelangen auf zwei Pfaden in den Boden. Sie werden auf der Fahrbahn abgelagert und über Straßenabwässer ins Bankett eingetragen. Der zweite Pfad ist die Emission in die Luft und die Deposition dieser Partikel am straßennahen Boden. Die gesamte in den Boden eingetragene Fracht durch Kraftfahrzeuge lässt sich mit Formel 36, Formel 37 und Formel 38 berechnen.

Formel 36: Frachten von der Fahrbahn in den Boden

$$F_{BMSi} = \sum_{v=1}^{n} \overline{V}_v * l_{Bv} * e_{KSi} * v$$

F_{BMSi} *Gesamte Fracht des Metalls i von der Fahrbahn in den Boden [kg/a]*

$\overline{V}_v$ *Mittlere Verkehrsbelastung der VBKL v [Kfz/a]*

l_{Bv} *Länge der Straßen der VBKL v, die in den Boden entwässern [km]*

e_{KSi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges auf die Fahrbahn [mg/Kfz*km]*

v *Korrekturfaktor der mittleren Verkehrsbelastung [-]*

Formel 37: Durch straßennahe Deposition verursachte Fracht in den Boden

$$F_{BMDSi} = \sum_{v=1}^{n} \overline{V}_v * (l_{Kv} + l_{Bv}) * e_{KDSi} * v$$

F_{BMDSi} *Gesamte Fracht des Metalls i in den straßennahen Boden durch Deposition verursacht [kg/a]*

$\overline{V}_v$ *Mittlere Verkehrsbelastung der VBKL v [Kfz/a]*

l_{Kv} *Länge der Straßen der VBKL v, die ins Kanalsystem entwässern [km]*

l_{Bv} *Länge der Straßen der VBKL v, die in den Boden entwässern [km]*

e_{KDSi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges, die am straßennahen Boden abgelagert wird [mg/km]*

v *Korrekturfaktor der mittleren Verkehrsbelastung [-]*

Formel 38: Frachten aus dem Subsystem Mobilien in den Boden

$$F_{BMi} = F_{BMSi} + F_{BMDSi}$$

F_{BMi} *Fracht des Metalls i aus dem Subsystem Mobilien in den Boden [kg/a]*

F_{BMSi} *Gesamte Fracht des Metalls i von der Fahrbahn in den Boden [kg/a]*

F_{BMDSi} *Gesamte Fracht des Metalls i in den straßennahen Boden durch Deposition verursacht [kg/a]*

4.2.5.3 Gesamte Fracht in den Boden

Die gesamte Fracht in den Boden setzt sich aus jener des Subsystems Mobilien und Immobilien zusammen (Formel 39).

Formel 39: Gesamte Fracht in den Boden

$$F_{Bi} = F_{BMi} + F_{BIi}$$

F_{Bi} *Fracht des Metalls i in den Boden [g/a]*

F_{BMi} *Fracht des Metalls i aus dem Subsystem Mobilien in den Boden [g/a]*

F_{BIi} *Fracht des Metalls i aus dem Subsystem Immobilien in den Boden [g/a]*

4.2.6 Prozess Oberflächengewässer und Sediment

Die Fracht ins Oberflächengewässer ergibt sich aus jener im geklärten Abwasser (F_{OAi}) und jener im Überlaufwasser (F_{OKi}) (Formel 40). Bei ruhenden Gewässern akkumulieren diese Frachten im Sediment, bei Fließgewässern werden sie aus dem System exportiert.

Formel 40: Gesamte Fracht des Metalls i ins Oberflächengewässer

$$F_{Oi} = F_{OKi} + F_{OAi}$$

F_{Oi} *Gesamte Fracht des Metalls i ins Oberflächengewässer [g/a]*

F_{OKi} *Fracht des Metalls i im Überlaufwasser [g/a]*

F_{OAi} *Fracht des Metalls i im geklärten Abwasser [g/a]*

Resultate der Analyse von Stoffflüssen im urbanen System

Zur Darstellung der Flüsse eignet sich die Software „STAN“ (Cencic und Rechberger 2006), welche auf die in Brunner und Rechberger (Brunner und Rechberger 2004) beschriebenen Grundlagen aufbaut. Die Stoffflussdiagramme sind Grundlage der folgenden Bewertung.

4.3 Bewertung

Im ersten Teil werden zur Bewertung des urbanen Systems fünf Kriterien formuliert. Es ist dies

1. die oberflächenbezogene Emission pro Einwohner,
2. das einwohnerbezogene emissionswirksame Lager,
3. der Anteil an erfassten Stoffflüssen,
4. die Eintragsfracht und Eintragsfläche und
5. die Verdopplungszeit.

Im zweiten Teil des Bewertungskapitels wird - von diesen fünf Kriterien ausgehend - eine Aggregierung vorgenommen, um schlussendlich zwei miteinander in Zusammenhang stehende Kriterien für den Vergleich von Städten zu erhalten. Diese Kriterien sind

1. die gesamte Fracht in die Umwelt pro Kopf und
2. die pro - Kopf - Fläche mit geogener Schwermetallkonzentrationsverdopplung.

4.3.1 Bewertungskriterien

4.3.1.1 Oberflächenbezogene Emission pro Einwohner

Ziel

Das Ziel dieses Kriteriums ist die Beurteilung der Bedeutung von oberflächenbezogenen Emissionen eines urbanen Systems.

Bedeutung

Im Zusammenhang mit diffusen Schwermetallemissionen wurden bisher zwei Lösungsansätze diskutiert,

1. ein proaktiver Ansatz und der
2. End-of-pipe Lösungsansatz.

Die Lösung des Problems kann ausschließlich mit Hilfe eines proaktiven Ansatzes gelingen. End - of - pipe Strategien versagen aufgrund der großen Anzahl und der geringen Emissionsmengen der Quellen. In einer proaktiven Weise kann aber nur dann vorgegangen

werden, wenn man die Emissionsquellen kennt und deren Relevanz auch bewerten kann. Im Zuge dieses Kriteriums wird eine einwohnerspezifische Emission, verursacht durch Oberflächen, ermittelt. Dieser Wert eignet sich zur Charakterisierung von Städten bezüglich ihrer Emissionen von Oberflächen und ist Entscheidungsträgern, die oftmals nicht mit der Problematik vertraut, aber für die positive Entwicklung einer urbanen Region verantwortlich sind, einfach erklärbar.

Die Bedeutung der oberflächenbezogenen Emissionen kann aber erst dann beurteilt werden, wenn man diese in Bezug zu den gesamten Schwermetallemissionen der Stadt setzt. Ein alternativer Ansatz ist, die einwohnerspezifische Emission von Oberflächen mit den durch den menschlichen Stoffwechsel verursachten Emissionen an Schwermetallen zu vergleichen.

Bestimmung

1. **Emissionen von Oberflächen (E_{Oi})**

Im Kapitel 4.2 wird das methodische Vorgehen zur Bestimmung der Emissionen aus den Prozessen Gebäudeoberfläche, Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen sowie der Kraftfahrzeuge beschrieben. Weitere bedeutende oberflächenbezogene Emissionsquellen von Kupfer, Zink, Blei und Cadmium stellen

- der Abrieb von Bremsbelägen von Schienenfahrzeugen,
- der Abrieb des Fahrdrahtes bei Bahntrassen,
- die Korrosion der Infrastruktur von Bahntrassen,
- die Korrosion der Karosserie von Schienenfahrzeugen,
- die Korrosion der Straßeninfrastruktur,
- die Korrosion der Kraftfahrzeugkarosserie,
- der Verschleiß von Auswuchtgewichten in Kraftfahrzeugen (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2000) und
- der Abrieb der Fahrbahndeckschicht durch Spikereifenverwendung dar.

2. **Einwohner**

Im Kapitel 4.1 wurde vorgeschlagen, bei der Definition der räumlichen Systemgrenzen die politischen Grenzen des urbanen Systems zu wählen. Damit lässt sich aus Statistiken die Einwohnerzahl relativ unproblematisch erheben.

3. Einwohnerspezifische Emission von Oberflächen ($E_{Oi\,(EW)}$)

Der Bezug der gesamten Emission auf die im System lebenden Einwohner ist bedeutend für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Studien (Formel 41). Sollten in Zukunft aus der Diskussion der diffusen Emissionen Vorgaben für Städte abgeleitet werden, so lässt sich über die einwohnerspezifische Emission relativ einfach ein Richt- und Grenzwert vorgeben.

Formel 41: Berechnung der einwohnerspezifischen Emission von Oberflächen

$$E_{Oi(EW)} = \frac{E_{Oi}}{EW}$$

$E_{Oi(EW)}$ *Einwohnerspezifische Emission von Oberflächen des Metalls i [kg/EW*a]*

E_{Oi} *Gesamte jährliche oberflächenbezogene Emission des Metalls i der Stadt [kg/a]*

EW *Einwohner der urbanen Region [EW]*

4.3.1.2 Einwohnerbezogenes emissionswirksames Lager

Ziel

Das emissionswirksame Lager ist ein Kriterium zur Bewertung zukünftig zu erwartender Emissionen von Oberflächen. Es gibt die einwohnerspezifische Menge an emittierbaren Metallen von Oberflächen eines urbanen Systems an.

Bedeutung

Die Bedeutung dieses Kriteriums liegt in der Abschätzung des zukünftigen Emissionspotentials von Oberflächen. Das emissionswirksame Lager gibt jene Menge eines Metalls an, welche von den Oberflächen einer Stadt über deren Verwendungsdauer emittiert werden kann. Oberflächen, die nur kurze Zeiträume in Gebrauch sind, findet man vor allem in Mobilien. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei Immobilien zumeist um langlebige Güter, beispielsweise bei Dachflächen oder Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen. Dies ist zu berücksichtigen, wenn man Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen setzen möchte. Der Austausch von langlebigen Gütern ist in der Regel mit entsprechend großen Aufwendungen verbunden.

Bestimmung

1. Emissionswirksames Lager

Oberflächen von Mobilien sind gekennzeichnet durch eine kurze Lebensdauer. Das emissionswirksame Lager berechnet sich mit Formel 42. Die Oberfläche x kann beispielsweise für alle im System verwendeten Reifenlaufflächen stehen. Bei Reifenlaufflächen ist eine Mindestprofiltiefe vorgegeben, ist diese erreicht, wird der Reifen ersetzt.

Formel 42: Emissionswirksames Lager der Oberflächen von Mobilien

$$L_{OMi} = \sum_{x=1}^{n} M_{vx} * c_{vmx} * c_{ix} * L_x$$

L_{OMi} *Emissionswirksames Lager des Metalls i von Oberflächen der Mobilien [kg]*

M_{vx} *Verlustmasse der Oberfläche x über ihre Lebensdauer [kg/a]*

c_{vmx} *Koeffizient zur Beschreibung des bereits abgebauten Anteils des emissionswirksamen Lagers der Mobilienoberfläche x [-]*

c_{ix} *Konzentration des Metalls i einer Oberfläche x [kg/kg]*

L_x *Lebensdauer der Oberfläche x [a]*

Oberflächen von Immobilien sind geprägt durch eine lange Lebensdauer, der emittierbare Teil der Oberfläche wird nicht zur Gänze freigesetzt. Ein Kupferdach wird ausgetauscht, bevor es zur Gänze korrodiert ist und die Korrosionsprodukte durch das Regenwasser und den Wind verfrachtet wurden. Es wird erneuert, sobald es seinen funktionellen oder ästhetischen Aufgaben nicht mehr nachkommt. Darum wird in der Berechnung des emissionswirksamen Lagers die mittlere Verwendungsdauer inkludiert (Formel 43).

Formel 43: Emissionswirksames Lager der Oberflächen von Immobilien

$$L_{OIi} = \sum_{x=1}^{n} c_{ix} * A_{ix} * a_{ix} * t_x * c_{vx}$$

L_{OIi} *Emissionswirksames Lager des Metalls i von Oberflächen der Immobilien [kg]*

c_{ix} *Konzentration des Metalls i einer Oberfläche x [kg/kg]*

A_{ix} *Oberfläche x, die das Metall i enthält [m²]*

a_{ix} *Abschwemmrate der Korrosionsprodukte der Oberfläche x [kg/m²*a]*

t_x *Mittlere Verwendungsdauer der Oberfläche x [a]*

c_{vx} *Koeffizient zur Beschreibung des bereits abgebauten Anteils des emissionswirksamen Lagers der Immobilienoberfläche x [-]*

Die Oberfläche x kann beispielsweise für die Oberfläche der Gebäudehülle oder die Oberfläche der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen stehen. Die Summe des emissionswirksamen Lagers von Immobilien und Mobilien ergibt das gesamte emissionswirksame Lager der Stadt (Formel 44).

Formel 44: Emissionswirksames Lager des Metalls i der Oberflächen einer Stadt

$$L_{Oi} = L_{OMi} + L_{OIi}$$

L_{Oi} *Emissionswirksames Lager des Metalls i von Oberflächen der Stadt [kg]*

L_{OMi} *Emissionswirksames Lager des Metalls i von Oberflächen der Mobilien [kg]*

L_{OIi} *Emissionswirksames Lager des Metalls i von Oberflächen der Immobilien [kg]*

2. Einwohner

Die Einwohnerzahlen wurden bereits in Kapitel 4.3.1.1 ermittelt.

3. Einwohnerspezifisches emissionswirksames Lager

Das gesamte emissionswirksame Lager ist auf die im urbanen System lebenden Einwohner zu beziehen, um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher urbaner Regionen zu ermöglichen (Formel 45).

Formel 45: Einwohnerbezogenes emissionswirksames Lager des urbanen Systems

$$L_{Oi(EW)} = \frac{L_{Oi}}{EW}$$

$L_{Oi(EW)}$ *Einwohnerspezifisches emissionswirksames Lager des Metalls i von Oberflächen der Stadt [kg/EW]*

L_{Oi} *Emissionswirksames Lager des Metalls i von Oberflächen der Stadt [kg]*

EW *Einwohner der urbanen Region [EW]*

4.3.1.3 Anteil an erfassten Stoffflüssen

Ziel

Das Ziel dieses Kriterium ist die Beurteilung des urbanen Systems hinsichtlich der Vorgabe, von den oberflächenbezogenen Emissionen verursachte Stoffflüsse gezielt in dafür vorgesehene letzte Senken zu lenken.

Bedeutung

Bedeutende Eckpfeiler eines zukunftsfähigen Ressourcenmanagements sind die Schaffung von geschlossenen Stoffkreisläufen und die gezielte Speicherung von problematischen Stoffen in dafür vorgesehenen letzten Senken (Brunner und Rechberger 2004). Berücksichtigt man diese Vorgaben auf dem Gebiet oberflächenbezogener Emissionen so ergeben sich daraus zwei Schlüsse:

1. Diffuse Schwermetallemissionen sind aus einer ressourcenmäßigen Betrachtungsweise von untergeordneter Bedeutung. Dies gilt dann, wenn man sich auf die gesamten Metallinputs, Lager und Outputs einer urbanen Region bezieht.
2. Aus Sicht des Gewässer- und Bodenschutzes spielen die Emissionen aber sehr wohl eine Rolle, weil sie, wie in Kapitel 5.2 im Zuge der Fallstudie des Bezirks Villach Stadt gezeigt wird, wesentliche Quellen der Schwermetallfreisetzungen in urbanen Regionen repräsentieren.

Mit derzeitigen Verfahren nach dem Stand der Technik ist die Schaffung von geschlossenen Stoffkreisläufen im Bereich der diffusen Emissionen von Schwermetallen nicht möglich.

Die Schwermetallflüsse von Oberflächen in urbanen Systemen sind daher in dafür vorgesehene letzte Senken zu lenken. Sie sollen nicht in Gewässer und Böden eingetragen werden.

Die Stoffflüsse des Systems lassen sich in zwei Klassen teilen:

1. Erfasste Schwermetallflüsse
   Diese lassen sich gezielt in dafür vorgesehene letzte Senken lenken.
2. Nicht erfasste Flüsse
   Darunter werden all jene Schwermetallflüsse zusammengefasst, die ihre Frachten letztendlich auf solche Weise in der Luft, im Wasser oder Boden verteilen, dass deren weiterer Transportweg und damit die letzte Senke in der die Metalle schlussendlich akkumulieren nicht mehr beeinflussbar sind.

Jeder Fluss im in Kapitel 4.1 definierten System ist somit entweder erfasst und oder nicht erfasst. Die Bedeutung des Kriteriums liegt darin, anzugeben, welcher Anteil der Stoffflüsse einer entsprechenden Senke zugeführt werden kann.

Bestimmung

1. Letzte Senke

Unter einer letzten Senke versteht man einen Ort, wo Stoffe zumindest 10.000 Jahre verweilen (Döberl, Huber et al. 2001). Geeignete letzte Senken sind in diesem Zusammenhang jene, in denen die Schwermetalle keine Bedrohung für die menschliche Gesundheit und die Natur darstellen und deren Verbleib bekannt und damit auch in Zukunft kontrollierbar ist. Als geeignete letzte Senken erweisen sich nach dem heutigen Stand der Technik Deponien.

Für oberflächenbezogene Emissionen als nicht geeignete Senken erweisen sich Böden und Sedimente. In Böden und in Sedimenten kommt es zur Akkumulation von Schwermetallen, diese führt zu einer erhöhten Schwermetallaufnahme durch Pflanzen und Mikroorganismen oder zu einer Beeinträchtigung von lokalen Grundwasservorkommen durch die Auswaschung von Schwermetallen aus Böden.

2. Beeinflussbare Prozesse und erfasste Flüsse

Die Subsysteme Mobilien und Immobilien sowie die Prozesse Kanalisation und ARA lassen sich beeinflussen. Daraus ergibt sich natürlich auch, dass all jene Flüsse zwischen diesen Prozessen beeinflussbar werden (Abbildung 9). Alle anderen Flüsse, also jene in einen nicht beeinflussbaren Prozess oder als Export aus dem System, können erfasst oder nicht erfasst werden.

In Abbildung 9 wird die Zone der beeinflussbaren Prozesse und Flüsse grau hinterlegt dargestellt, die erfassten Flüsse aus dieser Zone heraus sind schwarz hinterlegt.

Folgende Flüsse im System werden erfasst (F_{Ei}):

- Ölhaltiges Wasser (aus dem Mineralölabscheider der Autowaschanlagen)
- Räumgut
- Klärschlamm exportiert
- Klärschlamm (im System weiter verwendet)

Folgende Flüsse werden nicht erfasst (F_{NEi}):

- Feinverteilte Partikel
- Sickerwasser Mobilien
- Sickerwasser Immobilien
- Überlaufwasser
- Geklärtes Abwasser

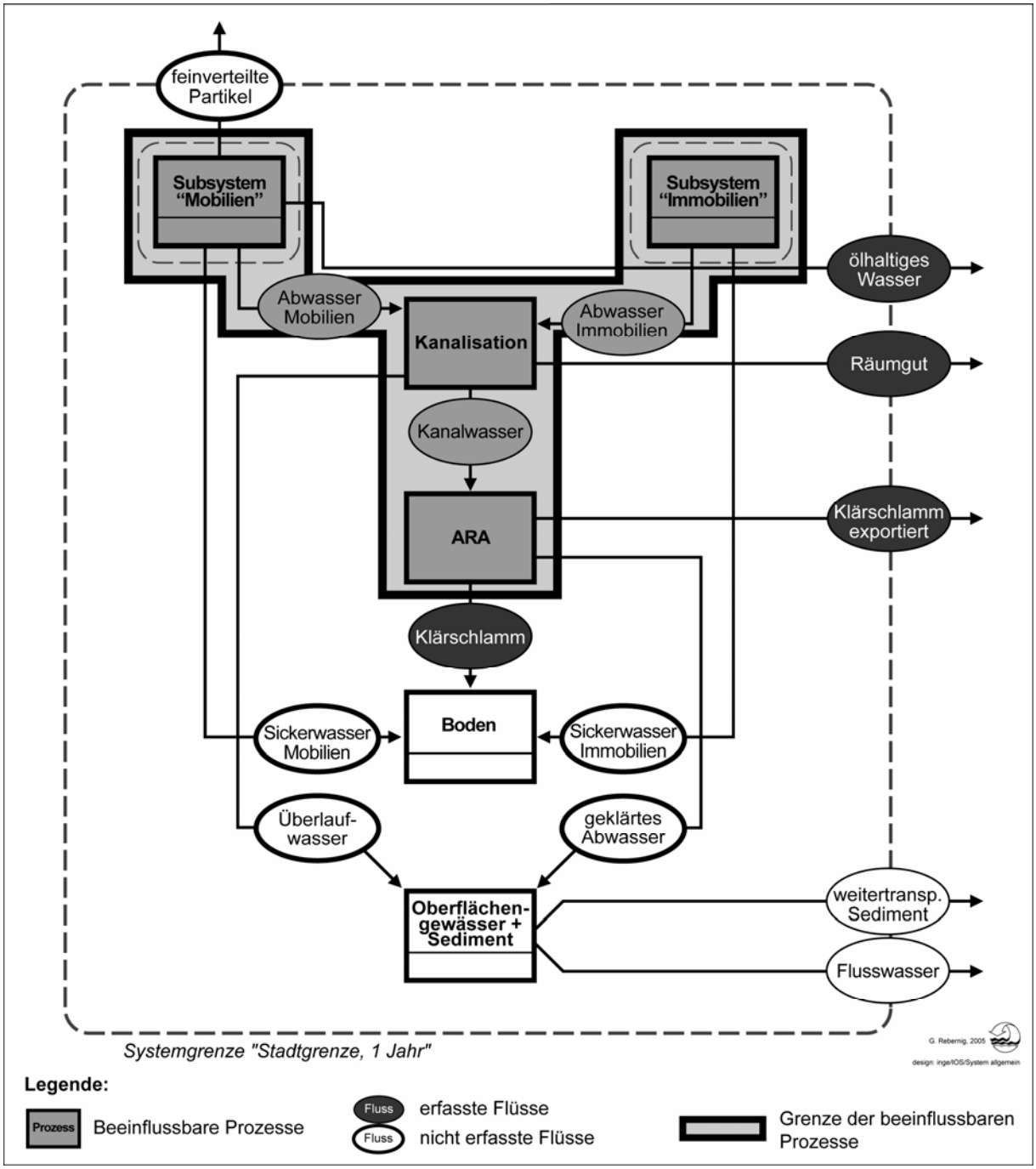


Abbildung 9: Beeinflussbare Prozesse, erfasste und nicht erfasste Flüsse im System

3. Anteil an erfassten Flüssen (c_{Ei})

Zur Bewertung der Stoffflüsse wird der Anteil an erfassten Flüssen (c_{Ei}) definiert, dieser ist in Formel 46 mathematisch beschrieben. Der Anteil bezeichnet jenen Teil der oberflächenbezogenen Emissionen, der gezielt in eine dafür vorgesehene letzte Senke lenkbar ist.

Formel 46: Anteil an erfassten Stoffflüssen im System

$$c_{Ei} = \frac{F_{Ei}}{E_{Oi}}$$

c_{Ei} *Anteil an erfassten oberflächenbezogenen Stoffflüssen des Metalls i im urbanen System [-]*

F_{Ei} *Erfasste Stoffflüsse eines Metalls i im System [kg/a]*

E_{Oi} *Gesamte jährliche oberflächenbezogene Emission des Metalls i der Stadt [kg/a]*

Die erfassten Frachten lassen sich lediglich durch entsprechende logistische Maßnahmen in geeignete letzte Senken führen. Es sind dafür keine baulichen Veränderungen im System notwendig.

4. Idealzustand

Der optimierte Fall in einem urbanen System tritt dann ein, wenn die gesamte Emission von Oberflächen in dafür vorgesehene letzte Senken geführt wird.

Die in der Praxis in entsprechende letzte Senken gelangende Fracht ist meist nur ein Anteil der erfassten Schwermetallfracht. Oftmals finden beispielsweise Klärschlämme in der Landwirtschaft oder im Landschaftsbau außerhalb der urbanen Region Verwendung. Eine Rückführung der Wertstoffe im Klärschlamm ist natürlich erstrebenswert (Lampert 2001), führt jedoch zu einer diffusen Verteilung der Schwermetalle und widerspricht somit der Forderung dieses Kriteriums.

4.3.1.4 Eintragsfracht und Eintragsfläche

Ziel

Das Ziel dieses Kriteriums ist die Beurteilung der Belastung der Senken des urbanen Systems durch den Eintrag von Schwermetallen. Es wird eine methodische Vorgehensweise zur Identifizierung jener Flächen, in denen es zu signifikanten Einträgen von Schwermetallen kommt, und zur Quantifizierung dieser Eintragsfrachten in diesen Flächen beschrieben.

Bedeutung

Die Bioverfügbarkeit der Metalle im Boden wird neben der Metallart von den bodenspezifischen Eigenschaften, beispielsweise dem pH-Wert oder der Kationenaustauschkapazität, bestimmt. Über die Pflanzen und durch das Sickerwasser werden Schwermetalle aus dem Boden ausgetragen, doch der größte Anteil der eingebrachten Schwermetalle bleibt in der obersten Bodenschicht gebunden. Das entscheidende Problem - darauf wurde bereits in Kapitel 3.1 hingewiesen - im Zusammenhang mit Schwermetallen ist deren Eigenschaft, in Böden und Sedimenten zu akkumulieren.

In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie Eintragsfrachten und Eintragsflächen in Sickeranlagen und im Bankett sowie in straßennahen Böden stark befahrener Verkehrswege ermittelbar sind.

(i) Eintragsfracht und Eintragsfläche in Sickeranlagen

1. Gebäudeanzahl unterschiedlicher BBKLen

In Kapitel 4.2.1.1 wird die Aufteilung der gesamten bebauten städtischen Fläche in verschiedene Bebauungsklassen beschrieben. Für jede Bebauungsklasse gibt es schlussendlich ein Referenzgebäude, außerdem ist die gesamte Fläche jeder BBKL, die Gebäudeflächenanteile jeder BBKL und die gesamte bebaute Fläche des urbanen Systems bekannt.

Die Referenzgebäude der Bebauungsklassen sind Ausgangspunkt des weiteren methodischen Vorgehens. Zunächst wird mit Hilfe der vorhandenen Daten und Formel 47 für jede BBKL die Anzahl der dort vorhandenen Gebäude bestimmt.

Formel 47: Berechnung der Gebäudeanzahl der BBKL j

$$B_j = \frac{A_{Bj}}{\bar{A}_{Rj}}$$

B_j *Anzahl der Gebäude der BBKL j [-]*

A_{Bj} *Bebaute Fläche der BBKL j [m²]*

$\bar{A}_{Rj}$ *Mittlere Grundfläche des Referenzgebäudes der BBKL j [m²]*

2. Eintragsfläche

Zunächst ist zwischen Emissionen von Dächern, Fassaden und sonstigen Konstruktionen im Hinblick auf die Transportwege der Emissionsprodukte zu unterscheiden. Emissionen von Dächern werden gesammelt und über Regenrinnen und Fallrohre punktförmig abgeführt. Im Gegensatz dazu gibt es für Emissionen von Fassadenelementen zwei wesentliche Transportwege über das Medium Wasser. Es ist dies

- der direkte Eintrag und die Festsetzung in angrenzenden Fassadenelementen, beispielsweise in Putz (Brasholz 2002), oder
- der Eintrag in den an das Bauwerk angrenzenden Boden durch Tropf- und Spritzwasser.

Die Bestimmung der Eintragsfracht und Eintragsfläche in dieser Arbeit bezieht sich ausschließlich auf die von den Dachflächen stammenden Emissionen. Die im Zuge des Projektes IOS durchgeführten Analysen zeigen nämlich, dass die Emission der Dachflächen den bedeutenden Teil der Emissionen der Gebäudeoberfläche ausmacht (Rebernig, Schöller et al. 2006).

Laut ÖNORM B 2506-1 (ÖNORM 2000) werden zur Versickerung von Regenwasser aus Dachabläufen Sickermulden, Sickerschächte und unterirdische Sickerleitungen verwendet. In diesem Kapitel wird angenommen, dass vor allem Sickermulden und Sickerschächte als Sickeranlagen Verwendung finden. In dieser Norm finden sich auch Angaben zur hydraulischen Bemessung dieser Sickeranlagen, woraus sich die erforderliche gebäudespezifische Versickerungsfläche ($\bar{A}_{Ij}$) ermitteln lässt.

3. Eintragsfracht

Die berechnete jährliche Emission der Dachflächen eines Bauwerkes der BBKL j aus Kapitel 4.2.1 ist gleichzusetzen mit der über die Fallrohre abgeführten Schwermetallfracht (Formel 48). Dies gilt natürlich nur unter der Annahme, dass die Verluste durch Windverfrachtung in

Trockenperioden und die Verluste beim Transport durch die Fallrohre vernachlässigt werden. In beiden Fällen fehlen jedoch fundierte Forschungsergebnisse, sodass nach dem derzeitigen Stand des Wissens eine Quantifizierung nicht möglich ist.

Formel 48: Eintragsfracht in die Sickeranlage eines Bauwerkes der BBKL j

$$I_{ij(BW)} = E_{ij(BW)} = \frac{E_{BDij}}{B_j}$$

$I_{ij(BW)}$ *Eintragsfracht des Metalls i in die Sickeranlage des Referenzgebäudes der BBKL j [kg/a]*

$E_{ij(BW)}$ *Emission des Metalls i der Dachfläche des Referenzgebäudes der BBKL j [kg/a]*

E_{BDij} *Emission des Metalls i von den Dachflächen aller Gebäude der BBKL j [kg/a]*

B_j *Anzahl der Gebäude der BBKL j [-]*

E_{BDij} ergibt sich aus Formel 7 unter Verwendung von e_{BDij} anstatt von e_{Bij}.

4. Entwässerungssysteme der BBKLen

Zur Berechnung der gesamten Eintragsfracht in die Böden ist die Kenntnis des Entwässerungssystems notwendig. Zu unterscheiden ist in diesem Zusammenhang zwischen Gebieten mit

- Trenn- und Mischkanalisation, hier wird die Emission der Dachflächen gesammelt und gelangt ins Kanalsystem, und der
- modifizierten Mischkanalisation, hier wird die Emission der Dächer gesammelt und dezentral über Sickeranlagen im Boden versickert.

Einträge in die Böden an den Gebäuden treten also nur bei modifizierter Mischkanalisation auf. In diesem Zusammenhang sei festgehalten, dass aus Gründen des Erhaltens des natürlichen Wasserkreislaufes, der Entlastung von Kanalnetzen und Kläranlagen und zur Entschärfung der hydraulischen Belastungsspitzen des als Vorfluter dienenden Gewässers eine Änderung der Entwässerungsstrategie hin zur dezentralen Versickerung in Deutschland, der Schweiz und in Österreich zu verfolgen ist (Boller, Kaufmann et al. 2005).

5. Gesamte Eintragsfläche und flächenspezifische Eintragsfracht

Mit Formel 49 lässt sich die gesamte Eintragsfläche einer BBKL j, mit Formel 50 der zugehörige flächenspezifische Schwermetalleintrag berechnen.

Formel 49: Gesamte Eintragsfläche der BBKL j

$$A_{Igesj} = \overline{A}_{Ij} * B_j * k_{MMj}$$

A_{Igesj}	*Gesamte Eintragsfläche der BBKL j [m²]*
$\overline{A}_{Ij}$	*Durchschnittliche Eintragsfläche des Referenzgebäudes der BBKL j [m²]*
B_j	*Anzahl der Gebäude der BBKL j [-]*
k_{MMj}	*Anteil des modifizierten Mischsystems am gesamten Entwässerungssystem der BBKL j [-]*

Formel 50: Flächenspezifische Eintragsfracht

$$i_{ij} = \frac{I_{ij(BW)}}{\overline{A}_{Ij}}$$

i_{ij}	*Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i in die Sickeranlagen der BBKL j [mg/m²*a]*
$I_{ij(BW)}$	*Eintragsfracht des Metalls i in die Sickeranlage des Referenzgebäudes der BBKL j [kg/a]*
$\overline{A}_{Ij}$	*Durchschnittliche Eintragsfläche des Referenzgebäudes der BBKL j [m²]*

Auf der Fläche von A_{Igesj} kommt es zu einem flächenspezifischen Schwermetalleintrag von i_{ij}. Für ein urbanes System mit j BBKLen gibt es somit j unterschiedliche flächenspezifische Eintragsfrachten.

(ii) Eintragsfrachten ins Bankett und den straßennahen Boden

1. Schwermetallpfade

Die Schwermetallemission der Kraftfahrzeuge verteilt sich auf folgende Pfade:

1. Fahrzeug: Ein Teil der Emissionen verbleiben am Fahrzeug.
2. Bankett: Ein weiterer Anteil fällt in Form von größeren Partikeln auf die Fahrbahn und wird von dort beim nächsten Regenereignis durch das abfließende Straßenwasser oder über das Spritzwasser ins Bankett eingetragen.
3. Straßennahe Deposition: Über Kurzstreckentransport luftgebundener Partikel und deren Deposition werden Schwermetalle in straßennahe Böden eingetragen.
4. Atmosphäre: Luftgebundene Partikel gelangen in die Luft und werden über weite Strecken verfrachtet, bis sie durch nasse oder trockene atmosphärische Deposition ablagert werden.

Für die Einträge in die an die Verkehrswege angrenzenden Böden sind primär der direkte Schwermetallfluss auf die Fahrbahn und der Kurzstreckentransport und die damit verbundene Deposition dieser Partikel auf straßennahen Böden bedeutend.

Bankett

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der Ableitung des Straßenabwassers. Es wird ins lokale Kanalsystem eingeleitet oder versickert im Bankett. Für die Berechnung der Belastung des Bodens ist ausschließlich der zweite Fall relevant.

Straßennahe Deposition

Zu einer beträchtlichen Belastung der an Straßen angrenzenden Böden kann es durch die Deposition von luftgebundenen Partikeln in Trockenwetterperioden kommen.

2. Eintragsflächen

Um die Einträge in den Boden quantifizieren zu können, müssen zunächst Eintragsflächen definiert werden.

Bankett

Die sich auf der Fahrbahn befindenden Schwermetallpartikel werden entweder durch das abfließende Regenwasser abtransportiert oder mit dem Spritzwasser verfrachtet. Es wird die Annahme getroffen, dass die gesamte, sich zwischen Regenereignissen ansammelnde Schwermetallfracht abtransportiert wird. Das abfließende Regenwasser sowie das Spritzwasser versickert im Bankett in den Boden. Das Bankett besitzt die Breite b_{BAv}

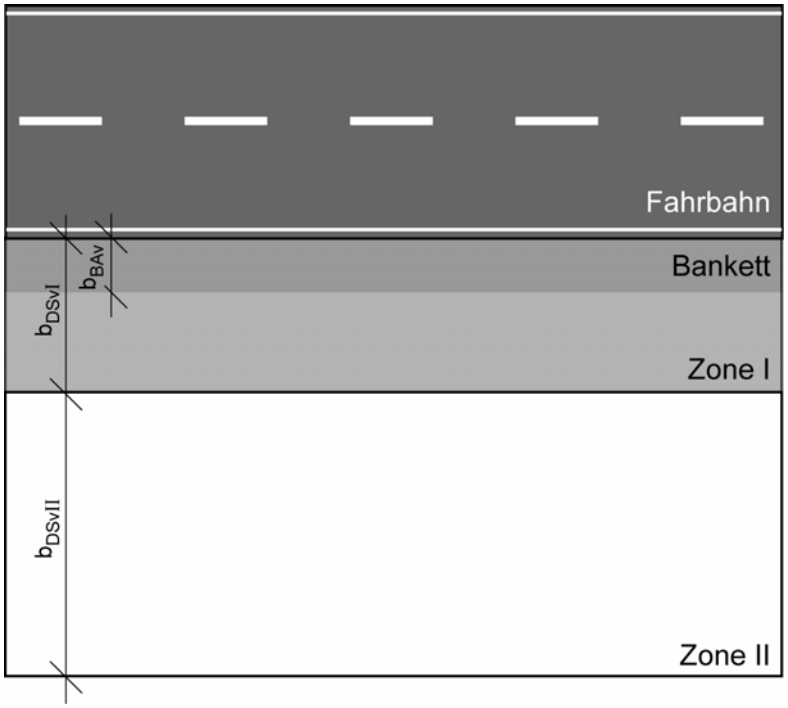


Abbildung 10: Eintragsflächen an Verkehrswegen

Formel 51 beschreibt die kilometerspezifische Bankettfläche zu beiden Seiten der Straße.

Formel 51: Kilometerspezifische Fläche des Banketts

$$A_{BAv} = b_{BAv} * 1000 * 2$$

A_{BAv} *Kilometerspezifische Fläche des Bankettes einer Straße der VBKL v [m²]*

b_{BAv} *Angenommene Breite des Bankettes [m]*

Straßennahe Deposition

Die Depositionsmengen nehmen mit zunehmendem Abstand vom Verkehrsweg ab. Abhängig von dieser Abnahme sind verschiedene Zonen zu definieren, siehe dazu Abbildung 10. Um die Anzahl der Eintragsflächen in einem überschaubaren Rahmen zu halten, wird hier vorgeschlagen, zunächst zwei unterschiedliche Zonen (z) zu definieren (Formel 52).

Formel 52: Kilometerspezifische Fläche der Zone z

$$A_{DSvz} = b_{DSvz} * 1000 * 2$$

A_{DSvz} *Kilometerspezifische Fläche der Zone z von Straßen der VBKL v [m²]*

b_{DSvz} *Angenommene Breite der Zone z [m]*

3. Eintragsfracht

Bankett

Die kilometerspezifische Emission, welche auf die Fahrbahn gelangt, ist bekannt, ihre Ermittlung wurde bereits in Kapitel 4.2 beschrieben. Diese kilometerspezifische Emission entspricht der Summe der Einträge ins Bankett über Straßenabwasser und Spritzwasser (Formel 53).

Formel 53: Kilometerspezifische Eintragsfracht in das Bankett

$$I_{BAiv} = E_{KSiv} = e_{KSi} * \overline{V}_v * v$$

I_{BAiv} *Kilometerspezifische Eintragsfracht des Metalls i von Straßen der Verkehrsbelastungsklasse v in das Bankett [mg/km*a]*

E_{KSiv} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i von Straßen der Verkehrsbelastungsklasse v auf die Fahrbahn [mg/km*a]*

e_{KSi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges auf die Fahrbahn [mg/km]*

$\overline{V}_v$ *Mittlere Verkehrsbelastung der VBKL v [Kfz/a]*

v *Korrekturfaktor der mittleren Verkehrsbelastung [-]*

Straßennahe Deposition

Die gesamte Eintragsfracht in den straßennahen Boden wird mit Formel 54 berechnet.

Formel 54: Kilometerspezifische Eintragsfracht in den straßennahen Boden durch Deposition

$$I_{DSiv} = E_{KDSiv} = e_{KDSi} * \overline{V}_v * v$$

I_{DSiv} *Kilometerspezifische Eintragsfracht des Metalls i von Straßen der Verkehrsbelastungsklasse v in den straßennahen Boden durch Deposition [mg/km*a]*

E_{KDSiv} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i von Straßen der Verkehrsbelastungsklasse v, die am straßennahen Boden abgelagert wird [mg/km*a]*

e_{KDSi} *Kilometerspezifische Emission des Metalls i eines Kraftfahrzeuges, die am straßennahen Boden abgelagert wird [mg/km]*

$\overline{V}_v$ *Mittlere Verkehrsbelastung der VBKL v [Kfz/a]*

v *Korrekturfaktor der mittleren Verkehrsbelastung [-]*

4. Flächenspezifische Eintragsfracht

Bankett

Die flächenspezifische Eintragsfracht ins Bankett - durch Straßenabwässer und Spritzwasser verursacht- lässt sich mit Formel 55 ermitteln. Diese Berechnung inkludiert die Annahme, dass die Eintragsfracht sich gleichmäßig auf die Eintragsfläche verteilt.

Formel 55: Flächenspezifische Eintragsfracht ins Bankett durch Straßenabwasser und Spritzwasser

$$i_{BAiv} = \frac{I_{BAiv}}{A_{BAv}}$$

i_{BAiv} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i von Straßen der VBKL v in das Bankett durch Straßenabwasser und Spritzwasser [mg/m²*a]*

I_{BAiv} *Kilometerspezifische Eintragsfracht des Metalls i von Straßen der Verkehrsbelastungsklasse v in das Bankett [mg/km*a]*

A_{BAv} *Kilometerspezifische Fläche des Bankettes einer Straße der VBKL v [m²]*

Straßennahe Deposition

Die Abnahme der Depositionsmenge mit zunehmender Entfernung von der Fahrbahn wird nur in sehr wenigen Studien diskutiert. Ein gutes Bild über diesen Zusammenhang besitzt man für das aus Verbrennungsprozessen stammende Blei.

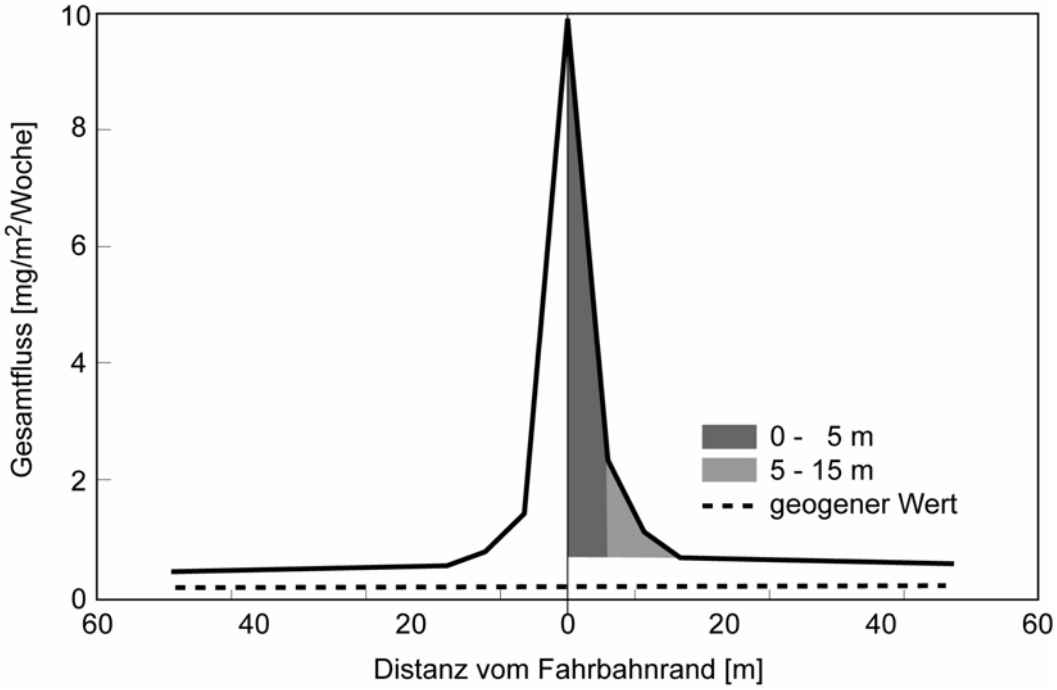


Abbildung 11: Abnahme der Depositionsmenge mit zunehmendem Abstand vom Fahrbahnrand (Hewitt und Rashed 1990)

Abbildung 11 zeigt die Abnahme der Deposition für aus Verbrennungsprozessen stammendes Blei mit zunehmender Entfernung vom Fahrbahnrand (Hewitt und Rashed 1990). Für weitere Berechnungen wird angenommen, dass sich die von Oberflächen emittierten Partikel wie in der in Abbildung 11 angegebenen Kurve verteilen. Es wird vorgeschlagen, die Eintragsmenge, I_{DSiv}, auf die Zonen z aufzuteilen und in den verschiedenen Zonen mit der mittleren Eintragsfracht zu rechnen. Die Berechnung der flächenspezifischen Eintragsfracht durch Deposition im straßennahen Bereich erfolgt mittels Formel 56.

Formel 56: Flächenspezifische Eintragsfracht durch Deposition in der Zone z

$$i_{DSivz} = \frac{I_{DSivz}}{A_{DSvz}}$$

i_{DSivz} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i einer Straße der VBKL v in der Zone z des straßennahen Bodens durch Deposition [mg/m²*a]*

I_{DSivz} *Kilometerspezifische Eintragsfracht des Metalls i von Straßen der Verkehrsbelastungsklasse v in die Zone z des straßennahen Bodens durch Deposition [mg/km*a]*

A_{DSvz} *Kilometerspezifische Fläche der Zone z von Straßen der VBKL v [m²]*

Summierung der Einträge ins Bankett

Ins Bankett wird die Schwermetallfracht aus dem Straßenabwasser und Spritzwasser sowie die Fracht aus der Deposition eingetragen. Die flächenspezifische Eintragsfracht durch Deposition in der der Fahrbahn am nächsten gelegenen Zone, hier exemplarisch als Zone I bezeichnet, ist der Fracht aus dem Straßenabwasser und Spritzwasser zu addieren (Formel 57).

Formel 57: Flächenspezifische Eintragsfracht ins Bankett

$$i'_{BAiv} = i_{BAiv} + i_{BSivI}$$

i'_{BAiv} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i einer Straße der VBKL v in das Bankett [mg/m²*a]*

i_{BAiv} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i einer Straße der VBKL v in das Bankett durch Straßenabwasser und Spritzwasser [mg/m²*a]*

i_{DSivI} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i einer Straße der VBKL v in die Zone I des straßennahen Bodens durch Deposition [mg/m²*a]*

5. Bilanzierung des gesamten urbanen Systems

Bankett

Zur Ermittlung der gesamten Eintragsfläche einer flächenspezifischen Eintragsfracht, i'_{BAiv}, sind Daten zur Länge der Straßen aller Verkehrsbelastungsklassen notwendig. Mit Formel 58 kann dann die gesamte Eintragsfläche der unterschiedlichen spezifischen Eintragsfrachten ermittelt werden.

Formel 58: Gesamte Banketteintragsfläche der Straßen der VBKL v

$$A_{BA\,ges\,v} = b_{BAv} * l_{Bv}$$

A_{BAgesv}	*Gesamte Eintragsfläche mit der flächenspezifischen Eintragsfracht des Metalls von i'_{BAiv} [m²]*
b_{BAv}	*Angenommene Breite des Bankettes [m]*
l_{Bv}	*Länge der Straßen der VBKl v, die in den Boden entwässern [m]*

Straßennahe Deposition

Die gesamte Eintragsfläche einer flächenspezifischen Eintragsfracht i_{DSivz} ist mit Formel 59 zu berechnen.

Formel 59: Gesamte Eintragsfläche der Zone z von Straßen der VBKL v

$$A_{DS\,gesvz} = b_{DSvz} * l_{gesv}$$

$A_{DSgesvz}$	*Gesamte Eintragsfläche der Zone z des urbanen Systems mit der flächenspezifischen Eintragsfracht von i_{DSivz} [m²]*
b_{DSvz}	*Angenommene Breite der Zone z [m]*
l_{gesv}	*Gesamte Länge der Straßen der VBKL v [m]*

4.3.1.5 Verdopplungszeitraum

Ziel

Das Ziel dieses Kriteriums ist die Beurteilung der Relevanz von Eintragsfrachten.

Bedeutung

Das Kriterium „Eintragsfracht und Eintragsfläche“ bietet schlussendlich eine Zusammenstellung all jener Flächen an Gebäuden und Verkehrswegen mit erhöhten Schwermetalleinträgen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass all diese ausgewiesenen Flächen zugleich zu Problemflächen zu erklären sind. Um beurteilen zu können, ob Schwermetalleinträge langfristig bedeutend sind, ist es notwendig, diese mit bestimmten Referenzwerten zu vergleichen. In diesem Kriterium wird die Eintragsfracht den geogenen Hintergrundkonzentrationen gegenübergestellt. Schlussendlich wird ein Zeitraum bis zur Verdopplung der geogenen Hintergrundkonzentration durch den zusätzlichen Eintrag berechnet. Damit sollen schlussendlich jene Eintragsflächen identifiziert werden, in denen es zur raschen Akkumulation kommt.

Bestimmung

1. **Geogene Hintergrundkonzentration**

Die geogene Hintergrundkonzentration eines Bodens ist abhängig vom Metallgehalt des bodenbildenden Gesteins (Thornton 1991). Als geogene Hintergrundkonzentration wird in diesem Zusammenhang der Metallgehalt des bodenbildenden Gesteins bezeichnet. In einschlägiger Literatur finden sich Angaben zu diesen Gehalten, beispielsweise in Krauskopf (Krauskopf und Bird 1995). In einem ersten Schritt sind also die geologischen Verhältnisse der urbanen Region zu klären und weiters dem bodenbildenden Gestein aus der Literatur Schwermetallgehalte zuzuordnen. Da sich urbane Regionen über unterschiedliche geologische Zonen erstrecken, kann es mehrere geogene Hintergrundkonzentrationen geben.

2. **Verdopplungszeitraum**

Unter dem Verdopplungszeitraum wird jene Zeitspanne verstanden, in der sich in einer mit bestimmter Mächtigkeit definierten Bodenschicht des Oberbodens die geogene Hintergrundkonzentration eines Schwermetalls verdoppelt. Der Verdopplungszeitraum wird mit Formel 60 berechnet, die geogene Hintergrundkonzentration der Böden ist zuvor mit Formel 61 jedoch auf flächenbezogene Werte umzurechnen.

Formel 60: Verdopplungszeitraumes des Metalls i in BBKL j

$$VZ_{bij} = \frac{g_{bi}}{i_{ij}}$$

VZ_{bij}	*Verdopplungszeitraum für das Metall i im Boden b der BBKL j [a]*
g_{bi}	*Flächenspezifische geogene Hintergrundkonzentration des Metalls i im Boden b [mg/m²]*
i_{ij}	*Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i in die Sickeranlagen der BBKL j [mg/m²*a]*

Formel 61: Flächenbezogener Metallgehalt des Metalls i des Oberbodens

$$g_{bi} = g_{hi} * h * \rho$$

g_{bi}	*Flächenspezifische geogene Hintergrundkonzentration des Metalls i im Boden b [mg/m²]*
g_{hi}	*Geogene Hintergrundkonzentration des Metalls i im bodenbildenden Gestein des Bodens b [mg/t]*
h	*Gewählte Schichtdicke des Oberbodens [m]*
ρ	*Dichte des Oberbodens [t/m³]*

Die Formel 60 ist auf Böden in Sickeranlagen ausgerichtet, für Straßen ist diese Formel zu adaptieren.

Zu den höchsten Schwermetallakkumulationen kommt es zumeist in der obersten Schicht des Bodens. Abhängig von der Bodenzusammensetzung und der Bodenart erfolgt der Transport in tiefer liegende Schichten und der Austrag aus dem Boden ins Grundwasser unterschiedlich schnell (Turer, Maynard et al. 2000). In dieser Arbeit wird vereinfacht angenommen, dass die Akkumulation in der obersten Bodenschicht mit dem Abstand h zur Bodenoberfläche stattfindet. Der Austrag in tiefer gelegenen Schichten und die daraus resultierende Beeinträchtigung des Grundwassers nach entsprechend langen Aufenthaltszeiten der Schwermetalle im Boden werden nicht berücksichtigt.

3. Definition akzeptabler Verdopplungszeiträume

Der Verdopplungszeitraum bezieht sich nur auf die jährlichen Einträge aus Oberflächen und berücksichtigt in keiner Weise die in der Vergangenheit eingetragenen anthropogenen Schwermetallfrachten. Im Zentrum dieses Kriteriums steht jedoch keine Bilanzierung urbaner Böden, sondern eine Beurteilung der Eintragsfracht in die Senken.

Die Akzeptanz von entsprechenden Verdopplungszeiträumen hängt von gesellschaftlichen Wertvorstellungen ab. Diesbezüglich werden hier keine Empfehlungen abgegeben. Als Anhaltspunkte bei der Festsetzung akzeptierter Verdopplungszeiträume könnten entweder nur durch atmosphärische Deposition beeinträchtigte Flächen oder Grenzwerte bestehender Gesetze und Vorschriften, beispielsweise jene zum Einsatz von Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Böden (Rat der Europäischen Gemeinschaft 1986) (Kärntner Landesregierung 2000) oder jene der deutschen Bodenschutzverordnung (Deutsche Bundesregierung 1999), herangezogen werden.

4. Identifizierung von Problemflächen

Die Verdopplungszeiträume von akkumulationsgefährdeten Flächen, in denen es langfristig zu hohen Schwermetallanreicherungen kommt, liegen demnach unter dem akzeptierten Verdopplungszeitraum (Formel 62).

Formel 62: Vergleich der berechneten Verdopplungszeiträume eines Metalls i in der BBKL j mit den aktzeptierten

$$VZ_{bij} \langle VZ_{Ai}$$

VZ_{bij} *Verdopplungszeitraum für das Metall i im Oberboden b der BBKL j [a]*

VZ_{Ai} *Akzeptierter Verdopplungszeitraum für das Metall i [a]*

All jene Flächen, deren Verdopplungszeitraum kleiner als der akzeptierte ist, zeichnen sich langfristig als Problemflächen aus.

4.3.2 Anwendung der Kriterien für den Städtevergleich

Ziel

Das Ziel des zweiten Abschnittes ist, die bisher beschriebenen Kriterien sinnvoll zu aggregieren, dass es möglich wird, Städte miteinander zu vergleichen. Diese Städte können sich in ihrer Charakteristik, Größe, topographischen und geographischen Lage voneinander unterscheiden.

Schlussendlich soll der Vergleich mit Hilfe folgender Kriterien durchgeführt werden:

1. **Fracht in die Umwelt pro Kopf**
2. **Pro – Kopf - Fläche mit geogener Schwermetallkonzentrationsverdopplung**

4.3.2.1 Frachten in die Umwelt pro Kopf

Ziel

Das Ziel ist die Beurteilung der Emissionen aus Oberflächen in die Umweltmedien und die Beurteilung der Wirksamkeit von gesetzten Maßnahmen.

Bedeutung

Aus der Perspektive des Umweltschutzes liegt das Hauptaugenmerk auf dem Schutz der Gewässer, des Bodens und der Luft vor anthropogenen Schwermetalleinträgen. Dies kann durch die Verminderung der Emission oder der Erhöhung des Anteils an erfassten Stoffflüssen bewirkt werden. Dieses Kriterium quantifiziert die Belastung der Gewässer, der Böden und der Luft. Im Vergleich zweier Städte wirkt jene ökologisch nachhaltiger, deren einwohnerspezifische Emission in die Umweltmedien geringer ist.

Bestimmung

1. Fracht in die Umwelt pro Kopf

Die einwohnerspezifische Fracht von Oberflächen in die Umwelt lässt sich mit Formel 63 berechnen.

Formel 63: Fracht in die Umwelt pro Kopf

$$F_{Ui(EW)} = E_{Oi(EW)} * (1 - c_{Ei})$$

$F_{Ui(EW)}$ *Einwohnerspezifische Fracht des Metalls i von Oberflächen in die Umwelt [kg/EW*a]*

$E_{Oi(EW)}$ *Einwohnerspezifische Emission von Oberflächen des Metalls i [kg/EW*a]*

c_{Ei} *Anteil an erfassten oberflächenbezogenen Stoffflüssen des Metalls i im urbanen System [-]*

2. Verminderungspotential

Unter dem Verminderungspotential (VP) einer Maßnahme versteht man jenen Prozentsatz, um den eine gesetzte Maßnahme die Fracht eines Metalls i in ein Umweltmedium oder in die Umwelt zu vermindern vermag. Das Verminderungspotential wird zur Beurteilung von Maßnahmen herangezogen. Die Berechnung erfolgt mit Formel 64.

Formel 64: Verminderungspotential einer Maßnahme

$$VP = \frac{\Delta F_{Ui(EW)}}{F_{Ui(EW)}} * 100$$

VP *Verminderungspotential einer Maßnahme [%]*

$\Delta F_{Ui\,(EW)}$ *Durch eine bestimmte Maßnahme reduzierte einwohnerspezifische Fracht des Metalls i von Oberflächen in die Umwelt [kg/EW*a]*

$F_{Ui(EW)}$ *Einwohnerspezifische Fracht des Metalls i von Oberflächen in die Umwelt [kg/EW*a]*

4.3.2.2 Pro - Kopf - Fläche mit geogener Schwermetallkonzentrationsverdopplung

Ziel

Das Ziel dieses Kriteriums ist die Beschreibung der Belastung des Bodens im gesamten System mit einem aggregierten Wert.

Bedeutung

Die Kriterien „Eintragsfracht und Eintragsfläche“ und „Verdopplungszeitraum“ ermöglichen eine Beurteilung der Belastung des Bodens in qualitativer und quantitativer Hinsicht. Die akkumulationsgefährdeten Flächen sind identifizierbar, damit können gezielte Maßnahmen gesetzt werden. Die Ergebnisse dieser Bewertungskriterien ermöglichen jedoch den Vergleich unterschiedlicher urbaner Systeme nicht. Dazu muss eine weitere Aggregation vorgenommen werden. Dieses Kriterium aggregiert die Werte der Bewertungskriterien zur durchschnittlichen jährlichen pro - Kopf - Fläche mit geogener Schwermetall-konzentrationsverdopplung.

Bestimmung

1. **Akzeptierter Verdopplungszeitraum**

Zunächst sind all jene Flächen im urbanen System zu identifizieren, deren Verdopplungszeitraum kleiner als der im Kapitel 4.3.1.5 festgesetzte und akzeptierte Verdopplungszeitraum VZ_{Ai} in den Böden ist. Siehe dazu Formel 62.

2. **Akzeptierte flächenspezifische Eintragsfracht**

Mit Kenntnis des akzeptierten Verdopplungszeitraums lässt sich eine akzeptierte flächenspezifische Eintragsfracht berechnen (Formel 65).

Formel 65: Akzeptierte flächenspezifische Eintragsfracht

$$i_{Ai} = VZ_{Ai} * g_{bi}$$

i_{Ai} *Akzeptierte flächenspezifische Eintragsfracht in den Boden [mg/m²*a]*

VZ_{Ai} *Akzeptierter Verdopplungszeitraum für das Metall i [a]*

g_{bi} *Flächenspezifische geogene Hintergrundkonzentration des Metalls i im Boden b [mg/m²]*

Im weiteren Verlauf sind all jene Flächen (A_{Igesi}, A_{BAgesv} und $A_{DSgesvz}$) zu beachten, deren flächenspezifische Eintragsfrachten (i_{ij}, i'_{BAiv} und i_{DSivz}) höher als die akzeptierten sind.

3. Eintragsfrachten in Böden

Die gesamte Eintragsfracht aus Flächen, deren flächenspezifische Eintragsfracht über der akzeptierten liegt, ergibt sich durch die Multiplikation der Fläche mit der flächenspezifischen Eintragsfracht, siehe dazu Formel 66, Formel 67 und Formel 68.

Formel 66: Gesamte Eintragsfracht in akkumulationsgefährdete Böden

$$I_{gesi} = I_{Bgesi} + I_{Sgesi}$$

Formel 67: Gesamte Eintragsfracht in akkumulationsgefährdete Böden in Sickeranlagen von Gebäuden

$$I_{Bgesi} = \sum_{j=1}^{n} i_{ij} * A_{Igesj}$$

Formel 68: Gesamte Eintragsfracht in akkumulationsgefährdete Bereiche des Banketts und des straßennahen Bodens

$$I_{Sgesi} = \sum_{v=1}^{n} i'_{BAiv} * A_{BAgesv} + \sum_{z=1}^{n} i_{DSivz} * A_{DSgesvz}$$

I_{gesi} *Gesamte Eintragsfracht in akkumulationsgefährdete Böden [kg/a]*

I_{Bgesi} *Gesamte Eintragsfracht in akkumulationsgefährdete Böden in Sickeranlagen von Gebäuden [kg/a]*

I_{Sgesi} *Gesamte Eintragsfracht in akkumulationsgefährdete Bereiche des Banketts und des straßennahen Bodens [kg/a]*

i_{ij} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i in die Sickeranlagen der BBKL j [mg/m²*a]*

A_{Igesj} *Gesamte Eintragsfläche der BBKL j [m²]*

i'_{BAiv} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i einer Straße der VBKL v in das Bankett [mg/m²*a]*

A_{BAgesv} *Gesamte Eintragsfläche mit der flächenspezifischen Eintragsfracht des Metalls von i'_{BAiv} [m²]*

i_{DSivz} *Flächenspezifische Eintragsfracht des Metalls i einer Straße der VBKL v in der Zone z des straßennahen Bodens durch Deposition [mg/m²*a]*

$A_{DSgesvz}$ *Gesamte Eintragsfläche der Zone z des urbanen Systems mit der flächenspezifischen Eintragsfracht von i_{DSivz} [m²]*

4. Pro – Kopf - Fläche der geogenen Schwermetallkonzentrationsverdopplung

Bei einem jährlichen Eintrag von I_{gesi} lässt sich eine theoretische Fläche, auf der es zu einer Schwermetallkonzentrationsverdopplung der geogenen Hintergrundkonzentration kommt, errechnen. Diese Fläche ist für jedes Metall i zu ermitteln und wird auch für jedes Metall unterschiedlich groß sein. Sie kann als Indikator für die Belastung von Senken in urbanen Systemen herangezogen werden. Durch einen Bezug auf die Einwohner wird sie schlussendlich zu einem geeigneten Parameter für einen Vergleich von Städten.

Formel 69: Pro – Kopf -Fläche mit Schwermetallkonzentrationsverdopplung des Metalls i im urbanen System

$$A_{VDi(EW)} = \frac{I_{gesi}}{g_{bi} * EW}$$

$A_{VD\,i(EW)}$	*Theoretische jährliche pro – Kopf - Fläche mit geogener Schwermetall-konzentrationsverdopplung des Metalls i im urbanen System [m²/EW*a]*
I_{gesi}	*Gesamte Eintragsfracht in akkumulationsgefährdete Böden [kg/a]*
g_{bi}	*Flächenspezifische geogene Hintergrundkonzentration des Metalls i im Boden b [mg/m²]*
EW	*Einwohner der urbanen Region [EW]*

5 RESULTATE

Ziel dieses Kapitels ist, das entwickelte methodische Vorgehen zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse auf den Bezirk Villach Stadt anzuwenden.

5.1 Definition des Systems Bezirk Villach Stadt

Räumliche und zeitliche Systemgrenze

Die räumliche Begrenzung des Systems ist die politische Grenze des Bezirks Villach Stadt (siehe Abbildung 12). Als zeitliche Systemgrenze wird ein Jahr gewählt. Das Bezugsjahr der Untersuchungen ist das Jahr 2000.

Prozesse, Flüsse und Subsysteme

Die notwendigen Prozesse lassen sich gut in drei Gruppen einteilen:

- Emissionsquellen (Gebäudeoberfläche, Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen, Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge, Kraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge)
- Transport und Transformation (Kanalisation und Kläranlage)
- Senken (Boden und Sediment)

Es bietet sich an, die Emissionsquellen in zwei Subsystemen zusammenzufassen:

- Subsystem Immobilien (Gebäudeoberfläche, Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen und Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge)
- Subsystem Mobilien (Kraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge)

Die beiden Subsysteme sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt, die Systemdefinition findet sich in Abbildung 5.

Stoffe

Es werden die Stoffe Kupfer, Zink, Blei und Cadmium betrachtet. Kupfer und Zink werden in großen Mengen zur Ausbildung von Oberflächen verwendet. Blei und Cadmium kommen heute in geringeren Mengen, teilweise auch als Beimetall zum Einsatz, sind jedoch aufgrund ihrer Toxizität von großer Bedeutung.

Funktionale Einheit der Stoffflüsse

Die funktionale Einheit der Stoffflüsse ist kg/a. Es können damit die gesamten Stoffflüsse und Belastungen der Umweltmedien durch Oberflächen im Bezirk Villach Stadt mittels der Stoffflussanalyse dargestellt werden. Im Bewertungsteil werden die Ergebnisse schließlich auf Einwohner bezogen, sie sind damit mit anderen Studien vergleichbar.

5.2 Analyse der Stoffflüsse

5.2.1 Subsystem Immobilien

Das Subsystem Immobilien umfasst die Prozesse Gebäudeoberfläche, Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen sowie Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge. Um die Flüsse im und aus dem Subsystem bestimmen zu können, müssen im ersten Schritt die Emissionen dieser Prozesse quantifiziert werden.

5.2.1.1 Prozess Gebäudeoberfläche

(i) Erfassung und Quantifizierung der metallischen Gebäudeoberfläche

Einteilung in Bebauungsklassen

Zunächst werden vier unterschiedliche Bebauungsklassen im Bezirk Villach Stadt definiert. Als Kriterien für die Kategorisierung der Gebäude dienen die Gebäudehöhe (bestimmt über die Geschossanzahl), der Gebäudeflächenanteil und der Verwendungszweck der Gebäude (Tabelle 5).

Tabelle 5:Definition der unterschiedlichen Bebauungsklassen

BBKL	Charakteristik	Geschoss-anzahl	Gebäudeflächen-anteil [%]	Verwendungszweck
1	freistehende Häuser (städtische Randgebiete und dörflicher Charakter)	2	< 10	hauptsächlich Wohngebäude
2	Reihenhäuser (städtische Randgebiete)	2-3	10-20	hauptsächlich Wohngebäude
3	mehrgeschossige Wohnhäuser (Stadtzentrum)	3-4	20-40	Wohngebäude
4	Sonstige (Fabriks- und Industriegebäude, Schulen,…)	1-2	20-40	Fabriksgebäude, Industrie-gebäude, Bahnhöfe

Alle bebauten Flächen werden einer dieser Bebauungsklassen zugeordnet (Abbildung 12).

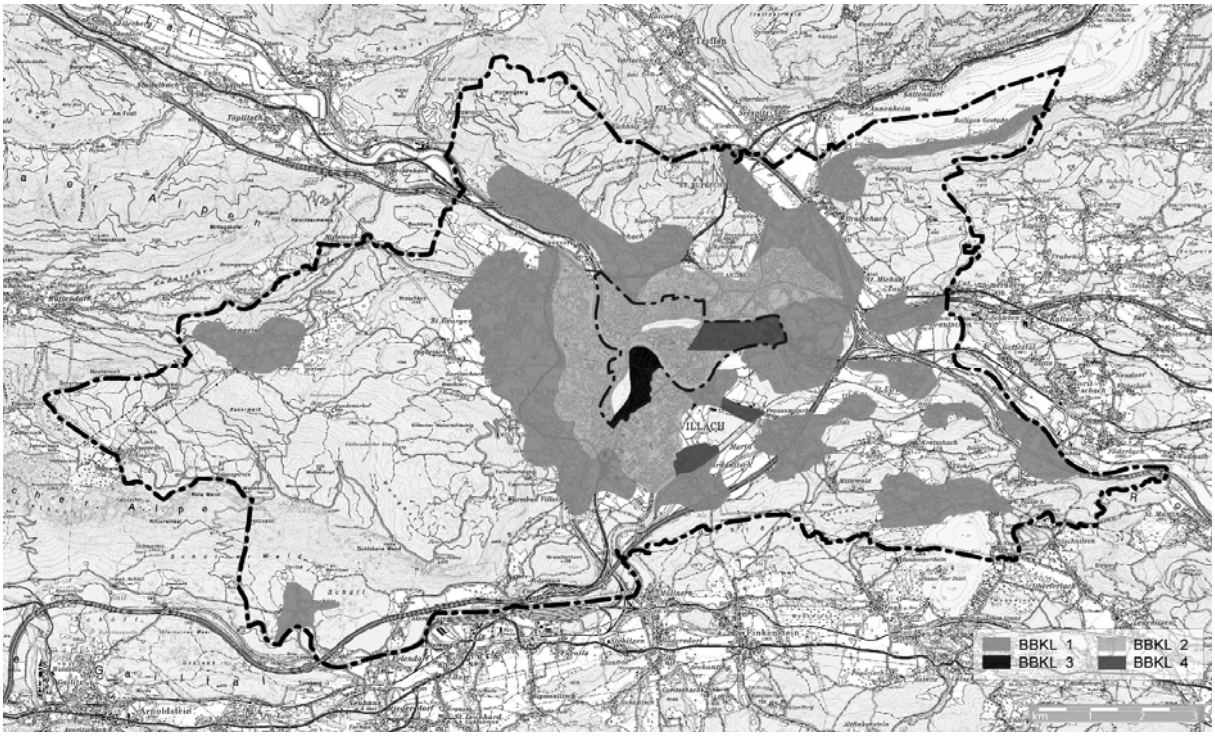


Abbildung 12 : Bebaute Fläche eingeteilt nach Bebauungsklassen

Die gesamte Fläche der BBKLen wird graphisch anhand der Österreichischen Karte (ÖK 50) ermittelt. Aus jeder dieser Bebauungsklassen werden charakteristische Flächen ausgewählt und näher analysiert. Über im Internet verfügbare Orthofotos des Kärntner Geografischen Informationssystems (KAGIS 2005) lassen sich die Gebäudegrundflächen repräsentativer Bauwerke und die Bebauungsdichten, also der Anteil der Gebäudegrundfläche an der gesamten Grundfläche verschiedener Stadtteile, für diese ausgewählten Referenzflächen ermitteln. Daraus ergibt sich der Gebäudeflächenanteilsfaktor (f_{Aj}) einzelner BBKLen.
Die Gesamtfläche der Bebauungsklassen sowie deren Gebäudeflächenanteilsfaktor sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Bebaute Fläche und Gebäudeflächenanteil im Bezirk Villach Stadt

Gebäudeflächenanteil im Bezirk Villach Stadt				
Bebauungsklasse	**bebaute Fläche A_i** *[ha]*	**Gebäudeflächenanteil** *[%]*	*[ha]*	**Gebäudeflächen-anteilsfaktor f_{Ai}** *[ha/ha]*
BBKL 1	1.804	7,9%	142	0,08
BBKL 2	1.140	15,6%	178	0,16
BBKL 3	76	32,3%	25	0,32
BBKL 4	134	31,9%	43	0,32
Summe	**3.153**	**12,3%**	**387**	

Auswahl von Untersuchungsgebieten und Bestimmung der Referenzgebäude

Aus jeder Bebauungsklasse werden mehrere Untersuchungsgebiete ausgewählt, innerhalb derer vor Ort die Gebäudeoberfläche einzelner repräsentativer Bauwerke erfasst wird.

Aus den Analysen repräsentativer Gebäude mittels KAGIS und der anschließenden vor Ort Analysen mittels Datenblätter und deren Auswertung lässt sich für jede Bebauungsklasse ein charakteristisches Referenzgebäude definieren. Die in Tabelle 7 angegebene mittlere Grundfläche der Referenzgebäude wird mit Formel 1 berechnet. Der Bauwerksgrundriss wird als quadratisch angenommen. Diese Annahme beeinflusst die weiteren Berechnungen nicht.

Tabelle 7: Referenzgebäude der Bebauungsklassen

BBKL	Fläche $\bar{A}_{Rj}$ [1)] *[m²]*	Breite [2)] *[m]*	∅ Geschoße [1)]	Bauwerke B_j
BBKL 1	230	15,0	2,00	6.179
BBKL 2	305	17,5	2,25	5.824
BBKL 3	360	19,0	3,00	682
BBKL 4	1.850	43,0	1,50	230

[1)] ….. Durchschnittswert aus der Gebäudeerhebung

[2)] ….. Quadratischer Grundriss angenommen

Auswertung der Erhebungen zur Gebäudeoberfläche

Neben der Überprüfung der Abschätzung von Länge, Breite und Geschossanzahl der ausgewählten Bauwerke dienen die vor Ort Untersuchungen vor allem der Analyse der Art und Größe von Oberflächen der Gebäudehülle. Für die Emission von Schwermetallen sind metallische und lackierte oder gestrichene Oberflächen relevant. Die metallischen und lackierten oder gestrichenen Oberflächen werden bei den Erhebungen der Dachfläche, der Fassade oder sonstigen Konstruktionen zugeordnet.

Diese Erhebungen sind Ausgangspunkt der Berechnung der mittleren metallischen und gestrichenen Oberflächen der Referenzgebäude (Formel 2). Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Verteilung von Kupfer-, Zink- und Anstrichoberflächen bezogen auf das Referenzgebäude der jeweiligen Bebauungsklasse.

Tabelle 8: Schwermetallemittierende Oberflächen der BBKLen pro Referenzgebäude ($\bar{A}_{Oij}$) im Bezirk Villach Stadt

BBKL	Kupferoberflächen $\bar{A}_{OCuj}$ [m²/Gebäude]			Zink-/Anstrichoberflächen $\bar{A}_{OZnj}$					
				verzinkt [m²/Gebäude]			*Anstrich* [m²/Gebäude]		
Villach Stadt	***Dach***	***Fassade***	***Sonstiges***	***Dach***	***Fassade***	***Sonstiges***	***Dach***	***Fassade***	***Sonstiges***
BBKL 1	3,3	-	-	19,1	1,0	3,7	42,1	5,1	12,9
BBKL 2	-	-	-	18,5	0,1	11,6	73,7	5,5	10,7
BBKL 3	-	-	-	36,5	13,5	1,2	57,9	7,3	10,2
BBKL 4	-	-	-	297,0	1,3	19,7	34,3	210,8	38,5

(ii) Korrosions- und Abschwemmraten

Fassaden unterscheiden sich in ihrer Exponiertheit von Dächern und sonstigen Konstruktionen erheblich. Die Exponiertheit muss daher bei den angesetzten Abschwemmraten mitberücksichtigt werden.

Aus diesem Grund werden folgende Annahmen getroffen:

- 100 % bewittert: Dächer und sonstige Konstruktionen (c_e=1)
- 50 % bewittert: Fassaden (vor allem Tropfbleche oder Fensterbänke) (c_e=0,5)

Im Anhang findet sich eine Übersicht gemessener Abschwemmraten in Europa. Für die weiteren Berechnungen werden die in Tabelle 9 angeführten Werte verwendet. Es wird mit konstanten Abschwemmraten gerechnet. Diese sind nicht nur im ersten Jahr stabil, wie von He für Zink und Kupfer gezeigt werden konnte (He, Odnevall Wallinder et al. 2000), sondern auch über die Folgejahre, wie von Faller gezeigt wurde (Faller 2003).

Tabelle 9: Abschwemmraten (a_{Bi}) unterschiedlicher Oberflächenmaterialien in [g/m².a]

Oberfläche	**Kupfer** *[g/m².a]*	**Zink** *[g/m².a]*	**Cadmium** *[g/m².a]*
Anstrich (Korrosionsschutzfarbe)		0,72 [2)]	
Kupferblech (Dach)	1,3 [1)]		
Zinkblech (Dach)		3,1 [1)]	0,0009 [3)]

[1)] ….. He, Odnevall Wallinder et al., 2000

[2)] ….. Persson und Kucera, 2000

[3)] ….. Cadmiumanteil im Zink 0,03% (Sörme, 2003)

(iii) Flächenspezifische Emission

Mit Formel 5 erhält man die in Tabelle 10 angegebenen flächenspezifischen Emissionen der einzelnen BBKL. Diese flächenspezifischen Emissionen sind auf einen Quadratmeter der BBKL bezogen.

Tabelle 10: Flächenspezifische Emission der Bebauungsklassen

BBKL	flächenspezif. Kupferemission e_{BCuj}				flächenspezif. Zinkemission e_{BZnj}			
	Dach *[g/m².a]*	Fassade *[g/m².a]*	Sonstige Konstrukt. *[g/m².a]*	**Gesamt** *[g/m².a]*	Dach *[g/m².a]*	Fassade *[g/m².a]*	Sonstige Konstrukt. *[g/m².a]*	**Gesamt** *[g/m².a]*
BBKL 1	0,001	0	0	**0,001**	0,03	0	0,01	**0,04**
BBKL 2	0	0	0	**0**	0,06	0	0,02	**0,08**
BBKL 3	0	0	0	**0**	0,14	0,02	0,01	**0,17**
BBKL 4	0	0	0	**0**	0,16	0,01	0,02	**0,19**

Die Resultate zeigen deutlich, dass in BBKL 3 (Stadtzentrum) und in BBKL 4 (hauptsächlich Industrie- und Gewerbegebiete) die flächenspezifischen Zinkemissionen wesentlich höher als in den BBKL 1 und 2 sind. Von Dachflächen verursachte Kupferemissionen treten nur in BBKL 1 auf.

(iv) Gesamte Emission der Gebäudeoberfläche

Die gesamte Emission eines Metalls i lässt sich mit Formel 7 und Formel 8 berechnen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen finden sich in Tabelle 11 und sind für Zink in Abbildung 13 graphisch dargestellt. Die gesamte jährliche Zinkemission der Gebäudeoberfläche wird mit 75% hauptsächlich von den Dachflächen verursacht. Alle sonstigen Konstruktionen machen etwa das Sechsfache der Emissionen von Fassaden aus und sind besonders in BBKL 1 und 2 zu berücksichtigen. Die BBKL 1 und 2 besitzen relativ geringe flächenspezifische Emissionen, durch ihre große Fläche ergibt sich aber eine hohe gesamte Emission. Für die BBKL 3 und 4 ist dies genau umgekehrt. Cadmium tritt als Zinkverunreinigungen auf, die Ergebnisse zeigen demnach dieselben Trends wie jene von Zink.

Tabelle 11: Gesamte Emissionen der Gebäudeoberfläche

BBKL	Kupfer [kg/a]				Zink [kg/a]				Cadmium [kg/a]			
Villach Stadt	***Dach***	***Fassade***	***Sonstige Konstr.***	***Gesamt***	***Dach***	***Fassade***	***Sonstige Konstr.***	***Gesamt***	***Dach***	***Fassade***	***Sonstige Konstr.***	***Gesamt***
BBKL 1	*27*	*0*	*0*	*27*	*553*	*21*	*128*	*702*	*0,2*	*0,0*	*0,0*	*0,2*
BBKL 2	*0*	*0*	*0*	*0*	*644*	*13*	*255*	*911*	*0,2*	*0,0*	*0,1*	*0,3*
BBKL 3	*0*	*0*	*0*	*0*	*106*	*16*	*7*	*129*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*
BBKL 4	*0*	*0*	*0*	*0*	*217*	*18*	*20*	*256*	*0,1*	*0,0*	*0,0*	*0,1*
Summe	***27***	***0***	***0***	***27***	***1.519***	***68***	***410***	***1.997***	***0,5***	***0,0***	***0,1***	***0,6***

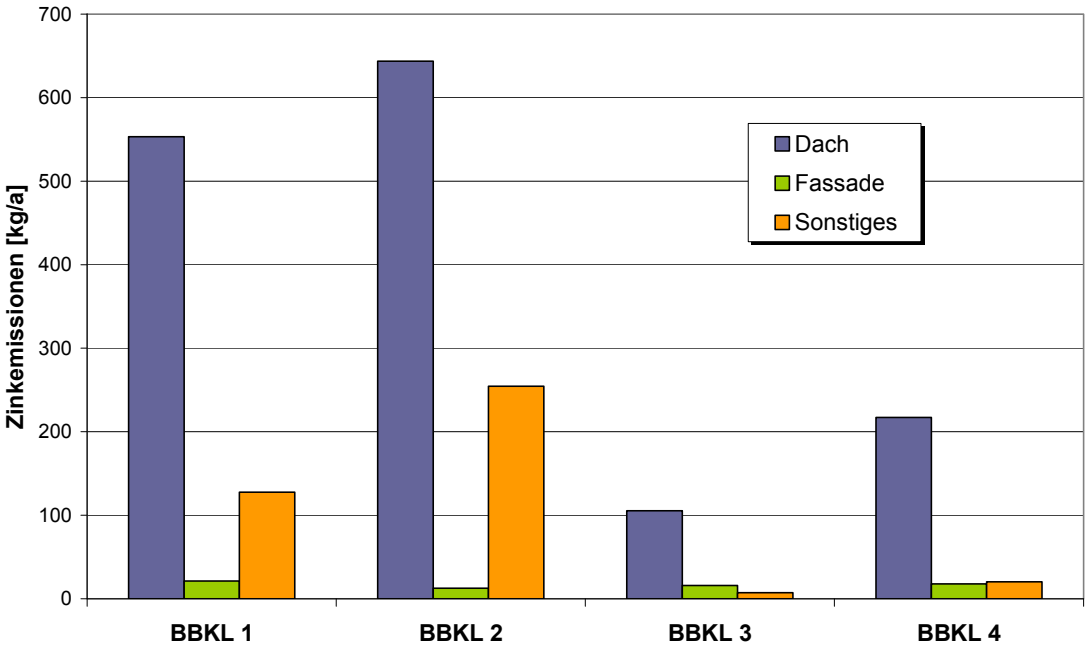


Abbildung 13: Gesamte Zinkemissionen der Gebäudeoberflächen aufgeteilt nach BBKLen

5.2.2 Zusammenfassung der gesamten oberflächenbezogenen Emissionen

Abbildung 14 bis Abbildung 17 zeigt, aus welchen Prozessen die oberflächenbezogenen Emissionen im Bezirk Villach Stadt stammen.

Die Berechnung der Emissionen aus den Prozessen Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen sowie Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge der Immobilien und aus den Prozessen Kraftfahrzeuge sowie Schienenfahrzeuge der Mobilien finden sich im Anhang.

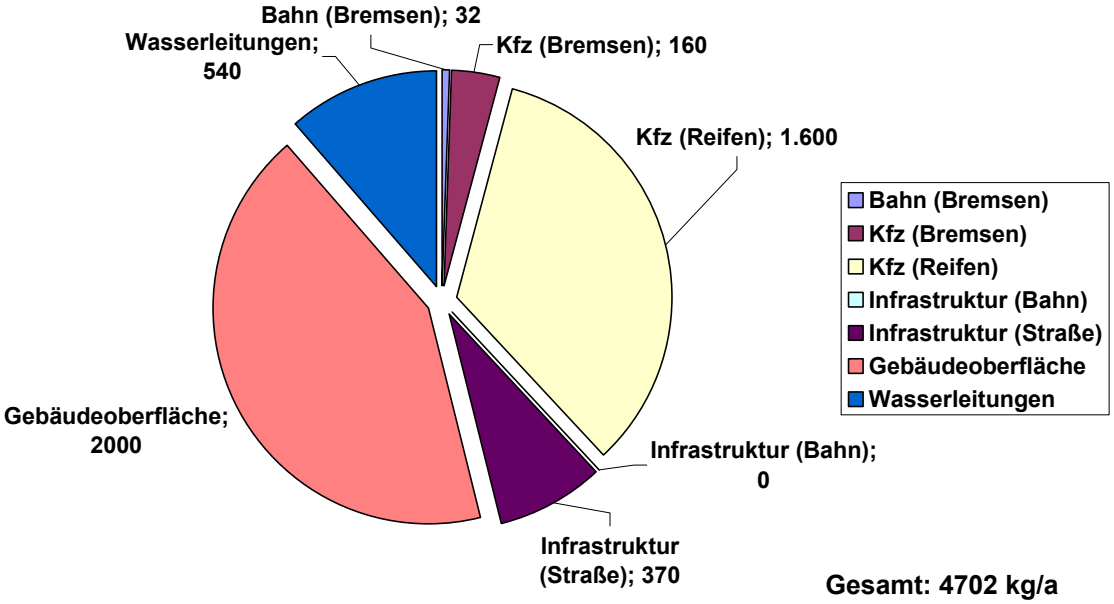


Abbildung 14: Oberflächenbezogene Zinkemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a]

Die Emissionen der Gebäudeoberfläche (2000 kg ± 17%), der Wasserleitungen (540 kg ± 41%) und der Straßeninfrastruktur (370 kg ± 22%) sind die bedeutendsten Zinkquellen der Immobilien, der Abrieb von Reifenlaufflächen (1600 kg ± 23%) und der Kraftfahrzeugbremsen (160 kg ± 21%) dominieren auf Seite der Mobilien. Im Vergleich zu Kupfer und Blei sind die Zinkemissionen auf mehrere große Quellen verteilt, was eine Entschärfung aufgrund der notwendigen Vielfalt von Maßnahmen erschwert. Von geringer Bedeutung sind die Bremsen der Schienenfahrzeuge (32 kg ± 44%) und die Infrastruktur der Schienenfahrzeuge (0,1 kg ± 10%).

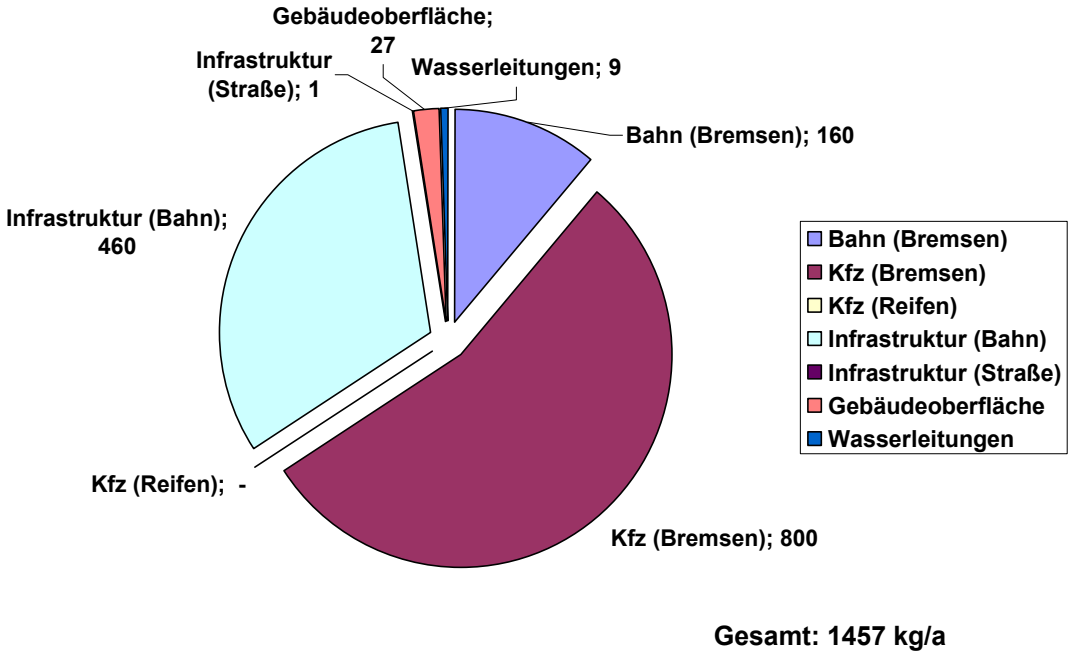


Abbildung 15: Oberflächenbezogene Kupferemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a]

Die Mobilien zeichnen sich in Villach verantwortlich für einen großen Teil der Kupferemission. Etwa 800 kg (± 21%) stammen von den Bremsbelägen der Kraftfahrzeuge, 160 kg (± 44%) von jenen der Schienenfahrzeuge und 460 kg (± 15%) vom Abrieb des Fahrdrahtes der Oberleitung. Im Gegensatz dazu stammen nur sehr geringe Kupferemissionen von den Gebäudeoberflächen (27 kg ± 17%), von der Korrosion der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen (9 kg ± 41%) und von der Infrastruktur der Straße (1 kg ± 22%).

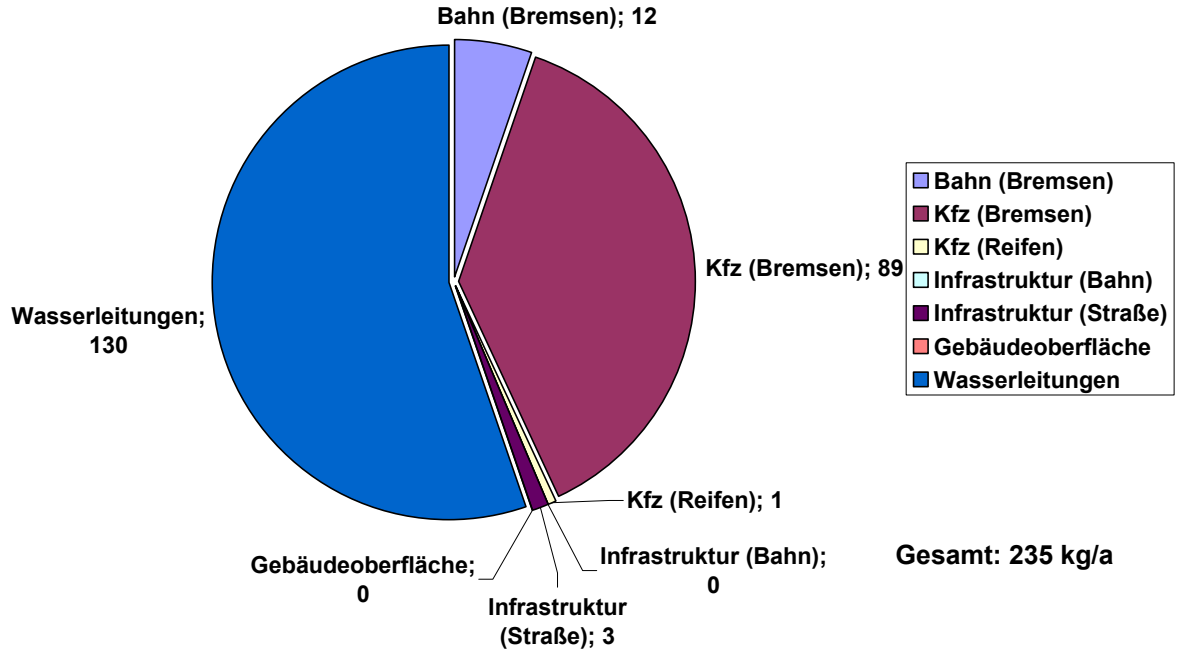


Abbildung 16: Oberflächenbezogene Bleiemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a]

Die Bremsbeläge der Kraftfahrzeuge setzen etwa 90 kg (±21%) Blei frei, die Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen emittieren etwa 130 kg (±41%). Beide Quellen zusammen sind damit für etwa 90% der gesamten Bleiemission von Mobilien und Immobilien verantwortlich. Die mengenmäßig unbedeutenden Quellen sind der Abrieb der Bremsbeläge von Schienenfahrzeugen mit etwa 12 kg (±44%), der Abrieb von Reifenlaufflächen mit etwa 1 kg (± 23%) und der Abrieb der Fahrbahn mit etwa 3 kg (± 22%).

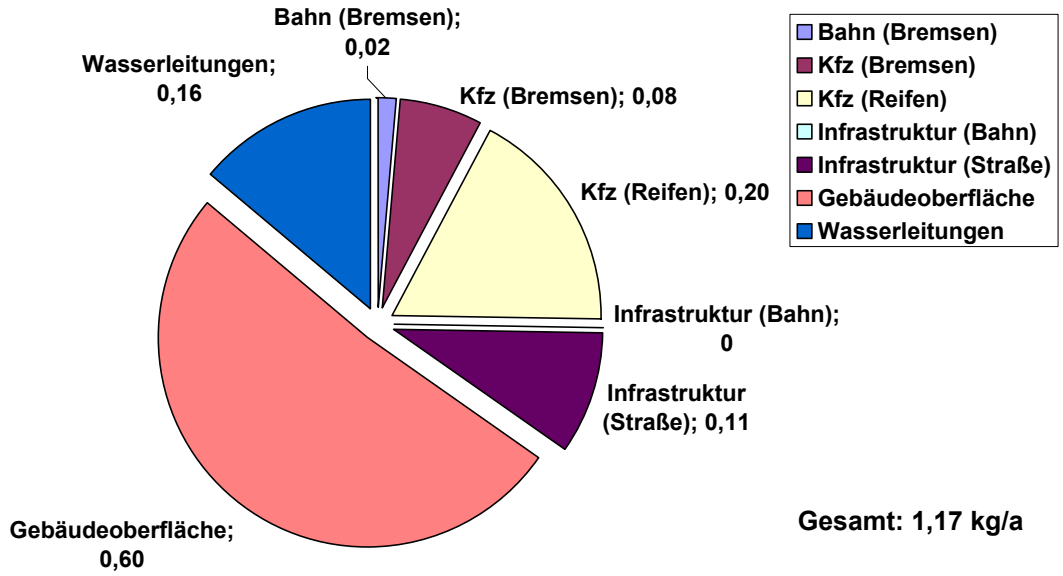


Abbildung 17: Oberflächenbezogene Cadmiumemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a]

Die oberflächenbezogene Cadmiumfracht beläuft sich im Bezirk Villach Stadt auf etwa 1,2 kg/a und entstammt den Gebäudeoberflächen (0,6 kg ± 17%), dem Abrieb der Reifenlaufflächen (0,2 kg ±23%), der Korrosion der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen (0,16 kg ± 41%), der Infrastruktur der Straßenfahrzeuge (0,11 kg ± 10%) sowie dem Abrieb der Bremsbeläge (0,08 kg ± 21%).

5.2.3 Prozess Kanalisation

Im Bezirk Villach Stadt gibt es drei Kanalverbände, jenen der Stadt Villach, den Abwasserverband Faaker See und den Wasserverband Ossiacher See (Abbildung 18). In Tabelle 12 sind diese Kanalverbände nach Entwässerungssystemen aufgeteilt.

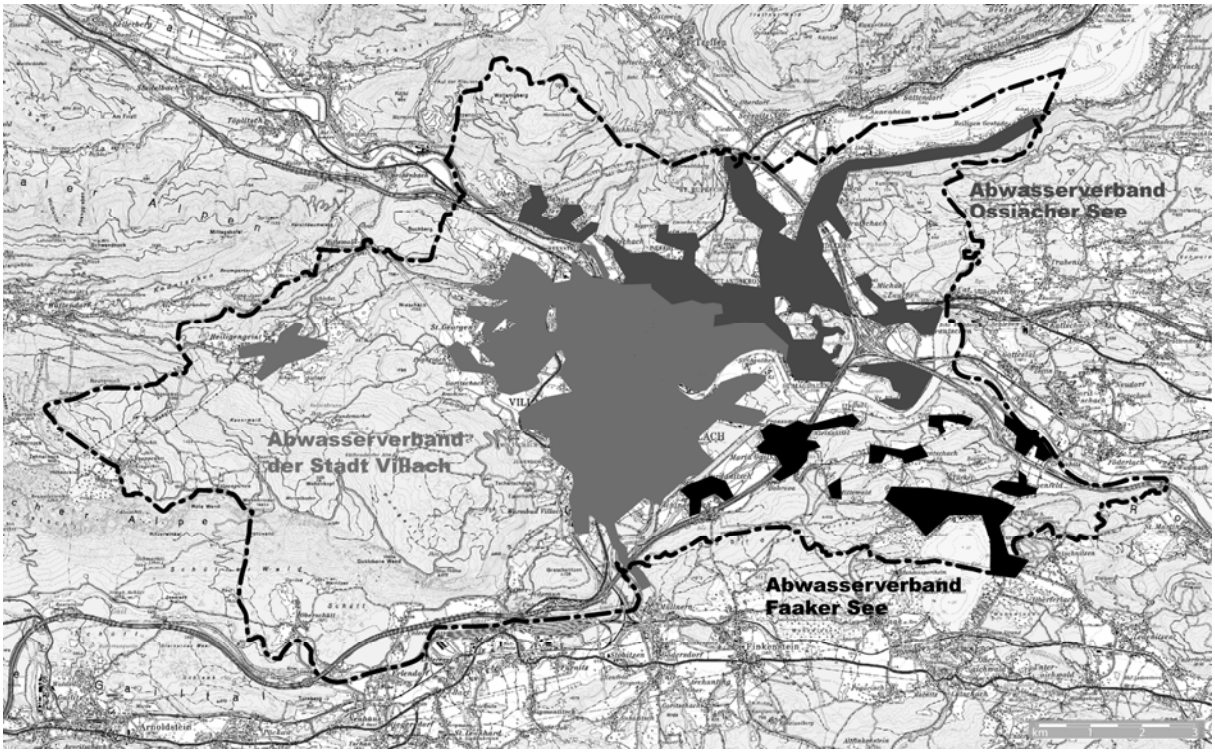


Abbildung 18: Abwasserverbände und deren Entsorgungsgebiet

Abwasserverband Villach

Der innerstädtische Bereich (BBKL 2 und 3) - die Grenzen sind die Tiroler Straße, Triester Straße, Ossiacher Zeile und Italiener Straße - wird zur Gänze über ein Mischsystem entwässert. Außerhalb dieser Grenze herrscht ein Teilmischsystem vor. Im ländlichen Bereich (BBKL 1) dominiert das Teilmischsystem. Ein bestimmter Anteil der BBKLen wird dort jedoch auch mittels Trennsystem entwässert. Basierend auf Auskünfte der lokalen Verwaltung und den Plänen aus dem Kanalprojekt Villach (Büro Dr. Lengyel ZT GmbH 1979) wird die in Tabelle 12 angegebene Aufteilung der Bebauungsklassen in die einzelnen Entwässerungssysteme abgeschätzt. In der Stadt Villach sind 16 Regenüberläufe angeordnet, die dafür sorgen, dass bei zu starkem Regen das vom Kanalsystem und der Kläranlage nicht aufnehmbare Wasser in die Drau abgeleitet wird.

Abwasserverband Faaker See und Wasserverband Ossiacher See

Die Anteile des Abwasserverbandes Faaker See und des Wasserverbandes Ossiacher See, welche sich auf dem Gebiet des Bezirks Villach Stadt befinden, sind den BBKLen 1 und 2 zuzuordnen. Es dominiert das Teilmischsystem (64% im Abwasserverband Faaker See und 50% im Wasserverband Ossiacher See) gefolgt von dem Trennsystem (Tabelle 12). Im Bereich des St. Magdalenensees befindet sich ein Überlauf, der das überschüssige Wasser vom Wasserverband Ossiacher See im Regenwetterfall entlastet.

Tabelle 12:Entwässerungssysteme im Bezirk Villach Stadt

BBKL	Flächenverteilung			Gebäudeflächenentw.			Straßenflächenentw.		
	verbaute	undurchlässige Fläche		Entwässerungssysteme [1]			Entwässerungssysteme [1]		
	Fläche [ha]	Gebäude [ha]	Straßen [ha]	MS [-]	TS [-]	T-MS [-]	MS [-]	TS [-]	T-MS [-]
Abwasserverband Villach									
BBKL 1	754	58	75	*0,00*	*0,25*	*0,75*	*0,75*	*0,06*	*0,19*
BBKL 2	815	128	98	*0,55*	*0,23*	*0,23*	*1,00*	*0,00*	*0,00*
BBKL 3	76	24	11	*1,00*	*0,00*	*0,00*	*1,00*	*0,00*	*0,00*
BBKL 4	134	43	16	*0,20*	*0,40*	*0,40*	*1,00*	*0,00*	*0,00*
	1.778	253	200						
Abwasserverband Ossiacher See									
BBKL 1	650	52	65	*0,25*	*0,19*	*0,56*	*0,50*	*0,13*	*0,37*
BBKL 2	325	49	39	*0,25*	*0,38*	*0,38*	*0,50*	*0,25*	*0,25*
	975	101	104						
Abwasserverband Faaker See									
BBKL 1	400	32	40	*0,15*	*0,21*	*0,64*	*0,50*	*0,13*	*0,37*
	400	32	40						
Summe	**3.153**	**386**	**344**						

[1] Entwässerungssysteme:

MS ……. Mischsystem
T-MS ……. Teilmischsystem (Ableitung der Straßenwässer im Mischkanal, Dachwässer versickert)
TS ……..…. Trennsystem (Oberflächenwässer über Regenwasserkanal in den Vorfluter geleitet)

Die in Tabelle 12 angegebenen Daten zur verbauten Fläche ergeben sich aus der Zuordnung der gesamten Fläche einer BBKL aus Tabelle 6 zu einzelnen Abwasserverbänden. Analog wird auch bei der undurchlässigen Fläche von Gebäuden vorgegangen, hier wird jedoch die verbaute Fläche aufgeteilt. Die undurchlässige Fläche der Straßen wird mit den in Tabelle 12 angeführten Abschätzungen festgesetzt.

5.2.3.1 Gesamte Fracht aus dem Subsystem Immobilien in die Kanalisation

Gebäudeoberfläche

Handelt es sich beim Kanalsystem um ein Mischsystem, gelangt die gesamte Fracht aus den Dachabwässern in die Kanalisation, beim Teilmischsystem versickern die Dachabwässer vor Ort und beim Trennsystem gelangen sie zunächst in die Kanalisation und anschließend ins Gewässer.

Aus Tabelle 12 lassen sich die (nach der jeweiligen bebauten Fläche der einzelnen Bebauungsklassen gewichteten) mittleren Anteilsfaktoren der Gebäudeentwässerung errechnen. Diese sind in Tabelle 13, aufgegliedert in Mischsystem, Teilmischsystem und Trennsystem der einzelnen BBKLen, zusammengefasst.

Tabelle 13: Mittlere Anteilsfaktoren k_{TMi} und k_{MMi} der Gebäudeentwässerung nach Bebauungsklassen

BBKL	Fläche A_j	Entwässerungssystem			
		MS	TS	MS+TS (k_{TMj})	T-MS (K_{MMj})
	[ha]	*[-]*	*[-]*	*[-]*	*[-]*
BBKL 1	1.804	*0,12*	*0,22*	**0,34**	**0,66**
BBKL 2	1.140	*0,46*	*0,27*	**0,73**	**0,27**
BBKL 3	76	*1,00*	*0,00*	**1,00**	**0,00**
BBKL 4	134	*0,20*	*0,40*	**0,60**	**0,40**
Gesamt	**3.153**	*0,34*	*0,25*	**0,59**	**0,41**

Die jährliche Fracht in die Kanalisation einer BBKL j lässt sich mit Formel 25 berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Diese enthält weiters die mit Formel 27 berechnete gesamte jährliche Fracht der Gebäudeoberfläche in die Kanalisation.

Tabelle 14: Frachten der Gebäudeoberfläche (F_{KIBi}) in die Kanalisation

BBKL	bebaute Fläche A_j [ha]	Fracht (F_{KIBCu}) in die Kanalisation MS [kg/a]	TS [kg/a]	MS+TS [kg/a]
BBKL 1	1.804	*3*	*6*	9
BBKL 2	1.140	*0*	*0*	0
BBKL 3	76	*0*	*0*	0
BBKL 4	134	*0*	*0*	0
Summe	**3153**	***3***	***6***	**9**

BBKL	bebaute Fläche A_j [ha]	Fracht (F_{KIBZn}) in die Kanalisation MS [kg/a]	TS [kg/a]	MS+TS [kg/a]
BBKL 1	1.804	*68*	*121*	189
BBKL 2	1.140	*299*	*172*	471
BBKL 3	76	*106*	*0*	106
BBKL 4	134	*43*	*87*	130
Summe	**3.153**	***516***	***380***	**897**

BBKL	bebaute Fläche A_j [ha]	Fracht (F_{KIBCd}) in die Kanalisation MS [g/a]	TS [g/a]	MS+TS [g/a]
BBKL 1	1.804	*20*	*36*	57
BBKL 2	1.140	*90*	*52*	141
BBKL 3	76	*32*	*0*	32
BBKL 4	134	*13*	*26*	39
Summe	**3.153**	***155***	***114***	**269**

Etwa 900 kg Zink, 9 kg Kupfer und 0,3 kg Cadmium gelangen jährlich von der Gebäudeoberfläche in die Kanalisation. Die Zinkfracht ins Kanalsystem kommt hauptsächlich aus BBKL 2 (rund 470 kg) und aus BBKL 1 (rund 190 kg). Die Frachten aus BBKL 3 (rund 100 kg) und BBKL 4 (etwa 130 kg) sind bedeutend kleiner. In BBKL 4 (Industrie- und Gewerbegebiet) werden hauptsächlich fabrikslackierte Flächen zur Ausbildung der Gebäudehülle verwendet, diese besitzen sehr geringe Emissionen. Je mehr man sich in Richtung des Stadtzentrums bewegt, desto größer wird die spezifische Fracht in die

Kanalisation von der Gebäudehülle. Für die Beeinträchtigung der Böden sind demnach hauptsächlich die ländlichen Regionen und Dörfer verantwortlich, während die Gewässerbelastung vor allem aus dem stark urbanen Zentrum stammt.

Die gesamte Fracht aus dem Subsystem Immobilien in die Kanalisation ist in Tabelle 15 zusammengefasst. Die Berechnung der Fracht aus den Prozessen Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen sowie Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge ist dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 15: Zusammensetzung der Fracht in die Kanalisation (F_{KIi}) aus dem Subsystem Immobilien

	Gebäude-oberfläche	**Wasserver- und Abwasserentsorgungs-leitungen**	**Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge**				**Summe**
			Infrastruktur Straßen	Fahrbahn	Oberleitung	Fahrdraht	
	F_{KIBi} [kg/a]	F_{KIRi} [kg/a]	F_{KIVi} [kg/a]	F_{KISi} [kg/a]	F_{KIISi} [kg/a]	F_{KIISFi} [kg/a]	F_{KIi} [kg/a]
Kupfer	*9*	*9*	*0*	*0*	*0*	*0*	***18***
Zink	*897*	*545*	*42*	*0*	*0*	*0*	***1484***
Blei	*0*	*126*	*0*	*0*	*0*	*0*	***126***
Cadmium	*0,27*	*0,16*	*0,01*	*0*	*0*	*0*	***0,44***

Etwa 1500 kg Zink, 130 kg Blei, 18 kg Kupfer und 0,4 kg Cadmium werden jährlich im Bezirk Villach Stadt aus dem Subsystem Immobilien in die Kanalisation eingetragen. Die Unsicherheit dieses Ergebnisses liegt bei ± 20%. Die Gebäudeoberfläche und die Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen sind die maßgebenden Quellen.

5.2.3.2 Gesamte Fracht aus dem Subsystem Mobilien in die Kanalisation

Die gesamte Fracht aus dem Subsystem Mobilien in die Kanalisation ist in Tabelle 16 zusammengefasst. Die Berechnungen sind dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 16: Frachten aus dem Subsystem Mobilien in die Kanalisation

Kanalisation			**Kupfer** *[kg/a]*	**Zink** *[kg/a]*	**Blei** *[kg/a]*	**Cadmium** *[kg/a]*
Fahrbahn	Primäres Straßennetz	F_{KMSivp}	*141*	*311*	*16*	*0,05*
	Sekundäres Straßennetz	F_{KMSivs}	*44*	*97*	*5*	*0,02*
Straßennaher Bereich	Primäres Straßennetz	F_{KMDivp}	*28*	*61*	*3*	*0,01*
	Sekundäres Straßennetz	F_{KMDivs}	*5*	*11*	*1*	*0,00*
Fahrzeug		F_{KMKi}	*91*	*201*	*10*	*0,03*
Summe		**F_{KMi}**	***308***	***681***	***34***	***0,11***

Die Fracht der Mobilien in die Kanalisation kommt ausschließlich aus dem Prozess Kraftfahrzeuge. Sie beläuft sich jährlich auf etwa 680 kg Zink, 310 kg Kupfer, 35 kg Blei und 0,1 kg Cadmium (Unsicherheit ± 21%).

5.2.3.3 Verteilung der Frachten in der Kanalisation

Die Ermittlung der Metallfracht im Schmutz-, Regen- und Mischwasser ist im Anhang nachzulesen. Diese Frachten verteilen sich auf das Überlaufwasser, den Zulauf in die Kläranlage und das Räumgut (Tabelle 17).

Regenüberläufe in Mischsystemen

Mangels Messwerte zur Entlastungsmenge an den Villacher Regenüberläufen, wird angenommen, dass 50 % des in der Mischkanalisation abfließenden Regenwassers und der darin transportierten Schmutzfrachten ins Gewässer abgeschlagen werden. Da Anzahl und Dauer der Überlaufereignisse nicht bekannt sind, wird der Schmutzwasseranteil im Überlaufwasser vernachlässigt. Anhand dieser Annahmen lassen sich die jährlich über die Kanalisation verfrachteten Schwermetallmengen des Mischwassers über Regenüberläufe ins Gewässer ermitteln.

Regenwasserkanäle in Trennsystemen

Die gesamte Fracht der Regenwasserkanäle des Trennsystems gelangt ins Gewässer.

Räumgut

Im Kanalsystem der Stadt Villach fallen jährlich etwa 400 Tonnen (Feuchtsubstanz) an Kanalräumgut an, die der Eluatklasse 2 angehören und in Spittal an der Drau deponiert werden. Die Ablagerungen in der Kanalisation stammen zum großen Teil aus dem Schmutzwasser. Die Frachten von den Oberflächen der Immobilien und Mobilien werden aber mit Ausnahme der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen im Regenwetterfall transportiert. Es wird daher angenommen, dass die Metallfrachten im Räumgut vollständig aus häuslichen Abwässern stammen.

Die Fracht im Überlaufwasser setzt sich in Villach damit aus der Fracht des Regenwassers und aus 50% der Fracht des Mischwassers zusammen. Die Fracht im Kläranlagenzulauf ergibt sich aus jener im Schmutzwasser und aus 50% der Fracht des Mischwassers. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Verteilung der Schwermetallfrachten durch die Kanalisation

	Schmutzwasser	Regenwasser	Mischwasser	Überlaufwasser	Kläranlage	Räumgut
				F_{OKi}	F_{AKi}	F_{Ri}
	[kg/a]	*[kg/a]*	*[kg/a]*	*[kg/a]*	*[kg/a]*	*[kg/a]*
Kupfer	*100*	*27*	*199*	*127*	*199*	*0*
Zink	*746*	*431*	*988*	*925*	*1240*	*0*
Blei	*136*	*2*	*22*	*14*	*147*	*0*
Cadmium	*0,19*	*0,12*	*0,23*	*0,24*	*0,31*	*0*

Über die Kanalisation gelangen jährlich schließlich etwa 150 kg Blei in die Kläranlage, dies entspricht etwa 92% der gesamten Fracht von Oberflächen in die Kanalisation. Die Frachten an Kupfer, Zink und Cadmium in die Kläranlage und ins Gewässer sind hingegen in etwa gleich groß.

5.2.4 Prozess Kläranlage

Die Fracht im Zulauf der Kläranlage (F_{AKi}) wurde im Prozess Kanalisation bestimmt. Die Transferkoeffizienten in der Kläranlage werden der Literatur (Zessner 1999) entnommen. Sie schwanken stark, bei Kupfer und Cadmium gelangen 80% der Fracht des Zulaufes in den Klärschlamm, bei Blei sind es nur 50%. Die Berechnung der Fracht im Klärschlamm und im geklärten Abwasser erfolgt nach Formel 33 und führt zu den in Tabelle 18 angeführten Ergebnissen.

Tabelle 18: Aufteilung der Fracht des Zulaufes auf den Klärschlamm und das geklärte Abwasser

	Kläranlage Zulauf	Transferkoeffizienten		Klärschlamm	geklärtes Abwasser
	F_{AKi}	Klärschlamm	geklärtes Abw.	F_{KSi}	F_{OAi}
	[kg/a]	[-]	[-]	[kg/a]	[kg/a]
Kupfer	*199 ± 22%*	*0,8*	*0,2*	*129 ± 30%*	*40*
Zink	*1240 ± 22%*	*0,6*	*0,4*	*744 ± 30%*	*496*
Blei	*147 ± 22%*	*0,5*	*0,5*	*74 ± 30%*	*74*
Cadmium	*0,31 ± 22%*	*0,8*	*0,2*	*0,25 ± 30%*	*0,06*

Im Klärschlamm enden schließlich etwa 130 kg Kupfer, 740 kg Zink und 75 kg Blei. Die jährlichen Frachten im geklärten Abwasser sind bei Kupfer und Zink geringer (etwa 40 kg Kupfer, etwa 500 kg Zink) und bei Blei gleich groß.

5.2.5 Prozess Boden

5.2.5.1 Frachten aus dem Subsystem Immobilien in den Boden

Gebäudeoberfläche

Die gesamte Fracht der Gebäudeoberfläche in den Boden ergibt sich schlussendlich aus den gesamten Emissionen der Fassade und sonstigen Konstruktionen sowie Anteilen der Fracht von Dachflächen. Diese Fracht berechnet sich mit Formel 34. Tabelle 19 enthält die nach Quellen aufgegliederten Ergebnisse sowie die gesamte Fracht eines Metalls in den Boden.

Tabelle 19: Fracht der Gebäudeoberfläche (F_{BIBi}) in den Boden

BBKL	bebaute Fläche A_j [ha]	Frachten (Cu) in den Boden			
		Dach F_{BIBD} [kg/a]	Fassade F_{BIBF} [kg/a]	sonst. K. F_{BIBS} [kg/a]	Gesamt F_{BIB} [kg/a]
BBKL 1	1.804	*18*	*0*	0	18
BBKL 2	1.140	*0*	*0*	0	0
BBKL 3	76	*0*	*0*	0	0
BBKL 4	134	*0*	*0*	0	0
Summe	**3153**	***18***	***0***	**0**	**18**

BBKL	bebaute Fläche A_j [ha]	Frachten (Zn) in den Boden			
		Dach F_{BIBD} [kg/a]	Fassade F_{BIBF} [kg/a]	sonst. K. F_{BIBS} [kg/a]	Gesamt F_{BIB} [kg/a]
BBKL 1	1.804	*365*	*21*	128	514
BBKL 2	1.140	*174*	*13*	255	441
BBKL 3	76	*0*	*16*	7	24
BBKL 4	134	*87*	*18*	20	125
Summe	**3.153**	***626***	***68***	**410**	**1104**

BBKL	bebaute Fläche A_j [ha]	Frachten (Cd) in den Boden			
		Dach F_{BIBD} [kg/a]	Fassade F_{BIBF} [kg/a]	sonst. K. F_{BIBS} [kg/a]	Gesamt F_{BIB} [kg/a]
BBKL 1	1.804	*0,11*	*0,01*	0,04	0,15
BBKL 2	1.140	*0,05*	*0,00*	0,08	0,13
BBKL 3	76	*0,00*	*0,00*	0,00	0,01
BBKL 4	134	*0,03*	*0,01*	0,01	0,04
Summe	**3.153**	***0,19***	***0,02***	**0,13**	**0,33**

Die gesamte Kupferfracht in den Boden beläuft sich auf 18 kg/a und stammt von den Dächern der BBKL 1. Die Zinkfracht liegt bei 1100 kg/a, die Cadmiumfracht bei 0,3 kg/a. Sie stammt bei Zink hauptsächlich aus der BBKL 1 (510 kg/a) und BBKL 2 (440 kg/a). BBKL 3 und 4 spielen hier nur eine untergeordnete Rolle. Der größte Anteil der Zinkfracht stammt von den Dächern (etwa 625 kg/a), gefolgt von jenen der sonstigen Konstruktionen (410 kg/a). Die Emissionen der Fassade betragen etwa 70 kg/a. Cadmium als Verunreinigung von Zink teilt sich im selben Verhältnis auf die verschiedenen Emissionsquellen und BBKLen auf.

Gesamte Fracht aus dem Subsystem Immobilien in den Boden

Die Tabelle 20 führt alle Schwermetallfrachten aus den Prozessen des Subsystems Immobilien in den Boden an. Die Berechnung dieser sind mit Ausnahme der Gebäudeoberfläche dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 20: Zusammensetzung der Fracht aus dem Subsystem Immobilien in den Boden

	Gebäude-oberfläche	**Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge**				**Summe**
		Infrastruktur Straßen	Fahrbahn	Oberleitung	Fahrdraht	Immobilien
	F_{BIBi} [kg/a]	F_{BIVi} [kg/a]	F_{BISi} [kg/a]	F_{BIISi} [kg/a]	F_{BIISFi} [kg/a]	F_{BIi} [kg/a]
Kupfer	*18*	*0*	*1*	*4*	*453*	***475***
Zink	*1104*	*325*	*2*	*0*	*0*	***1431***
Blei	*0*	*0*	*3*	*0*	*0*	***3***
Cadmium	*0,33*	*0,10*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	***0,43***

Die Immobilien tragen jährlich etwa 480 kg Kupfer, 1400 kg Zink, 3 kg Blei und 0,4 kg Cadmium in den Boden ein. Die bedeutendste Kupferquelle (450 kg/a) ist der Fahrdraht von Schienenfahrzeugen. Die bedeutendsten Zink- und Cadmiumquellen sind die Gebäudeoberfläche (1100 kg/a respektive 0,3 kg/a) und die Straßeninfrastruktur (325 kg/a respektiver 0,1 kg/a). Das Blei stammt fast zur Gänze aus dem Abrieb der Fahrbahnen (3 kg/a).

5.2.5.2 Gesamte Fracht aus dem Subsystem Mobilien in den Boden

Die durch die Prozesse Kraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge verursachte Fracht des Subsystems Mobilien in den Boden wird in Tabelle 21 angeführt. Die Berechnung dieser Frachten findet sich im Anhang.

Tabelle 21: Zusammensetzung der Fracht aus dem Subsystem Mobilien in den Boden

Boden			Kupfer [kg/a]	Zink [kg/a]	Blei [kg/a]	Cadmium [kg/a]
Fahrbahn	Primäres Straßennetz	F_{BMSivp}	*128*	*283*	*14*	*0,04*
	Sekundäres Straßennetz	F_{BMSivs}	*10*	*22*	*1*	*0,00*
Straßennaher Bereich	Primäres Straßennetz	F_{BMDivp}	*174*	*385*	*19*	*0,06*
	Sekundäres Straßennetz	F_{BMDivs}	*35*	*78*	*4*	*0,01*
Fahrzeug		F_{BMKi}	*71*	*156*	*8*	*0,03*
Summe Kraftfahrzeuge		F_{BMKi}	*417*	*924*	*47*	*0,15*
Summe Schienenfahrzeuge		F_{BMSi}	*158*	*32*	*12*	*0,02*
Summe Mobilien		F_{BMi}	***575***	***956***	***59***	***0,17***

Kraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge verursachen jährlich den Eintrag von etwa 580 kg Kupfer, 1000 kg Zink, 60 kg Blei und etwa 0,17 kg Cadmium in Villachs Böden. Über 70% des Kupfers stammt aus dem Kraftfahrzeugverkehr. Bei Zink und Cadmium kommen etwa 90% von den Kraftfahrzeugen, bei Blei sind es 80%.

5.2.5.3 Gesamte Fracht in den Boden

Die gesamte Fracht in den Boden berechnet sich mit Formel 39. Sie beträgt jährlich etwa 1050 kg Kupfer, 2400 kg Zink, etwa 60 kg Blei und 0,6 kg Cadmium. Kupfer und Zink stammen etwa zum gleichen Anteil aus Immobilien und Mobilien. Mobilien verursachen nahezu den gesamten Eintrag von Blei. 80% des Cadmiums stammt hingegen von den Immobilien (Tabelle 22). Die Unsicherheiten der Flüsse F_{BI} und F_{BM} betragen ± 16% respektive 22%.

Tabelle 22: Zusammensetzung der Fracht in den Boden

	Immobilien F_{BIi} [kg/a]	Mobilien F_{BMi} [kg/a]	Gesamte Fracht F_{Bi} [kg/a]
Kupfer	*475*	*575*	*1051*
Zink	*1431*	*956*	*2387*
Blei	*3*	*59*	*62*
Cadmium	*0,43*	*0,17*	*0,59*

5.2.6 Prozess Oberflächengewässer und Sediment

Die Fracht im Überlaufwasser wurde im Prozess Kanalisation, jene im geklärten Abwasser im Prozess Kläranlage berechnet. Zur Ermittlung der gesamten Fracht ins Oberflächengewässer und Sediment wird Formel 40 herangezogen.

Tabelle 23: Zusammensetzung der Schwermetallfracht ins Oberflächengewässer und Sediment

	geklärtes Abwasser F_{OAi} [kg/a]	**Überlaufwasser** F_{OKi} [kg/a]	**Gesamte Fracht** F_{Oi} [kg/a]
Kupfer	*40*	*127*	*167*
Zink	*496*	*925*	*1421*
Blei	*74*	*14*	*87*
Cadmium	*0,06*	*0,24*	*0,30*

Im Bezirk Villach Stadt gelangen jährlich etwa 1400 kg Zink, etwa 165 kg Kupfer, etwa 90 kg Blei und etwa 0,3 kg Cadmium in die Drau. Der größte Anteil der Zink- und Kupferfracht stammt aus dem Überlaufwasser der Kanalisation. Sie sind bei Kupfer dreimal höher als die Fracht im geklärten Abwasser und bei Zink doppelt so hoch. Bei Blei ist die Fracht im geklärten Abwasser fünfmal so hoch wie jene im Überlaufwasser, bei Cadmium hingegen viermal höher im Überlaufwasser (Tabelle 23). Die Unsicherheiten der Flüsse F_{OA} und F_{OK} belaufen sich auf ± 37% respektive ± 20%.

5.2.7 Zusammenfassung der Resultate

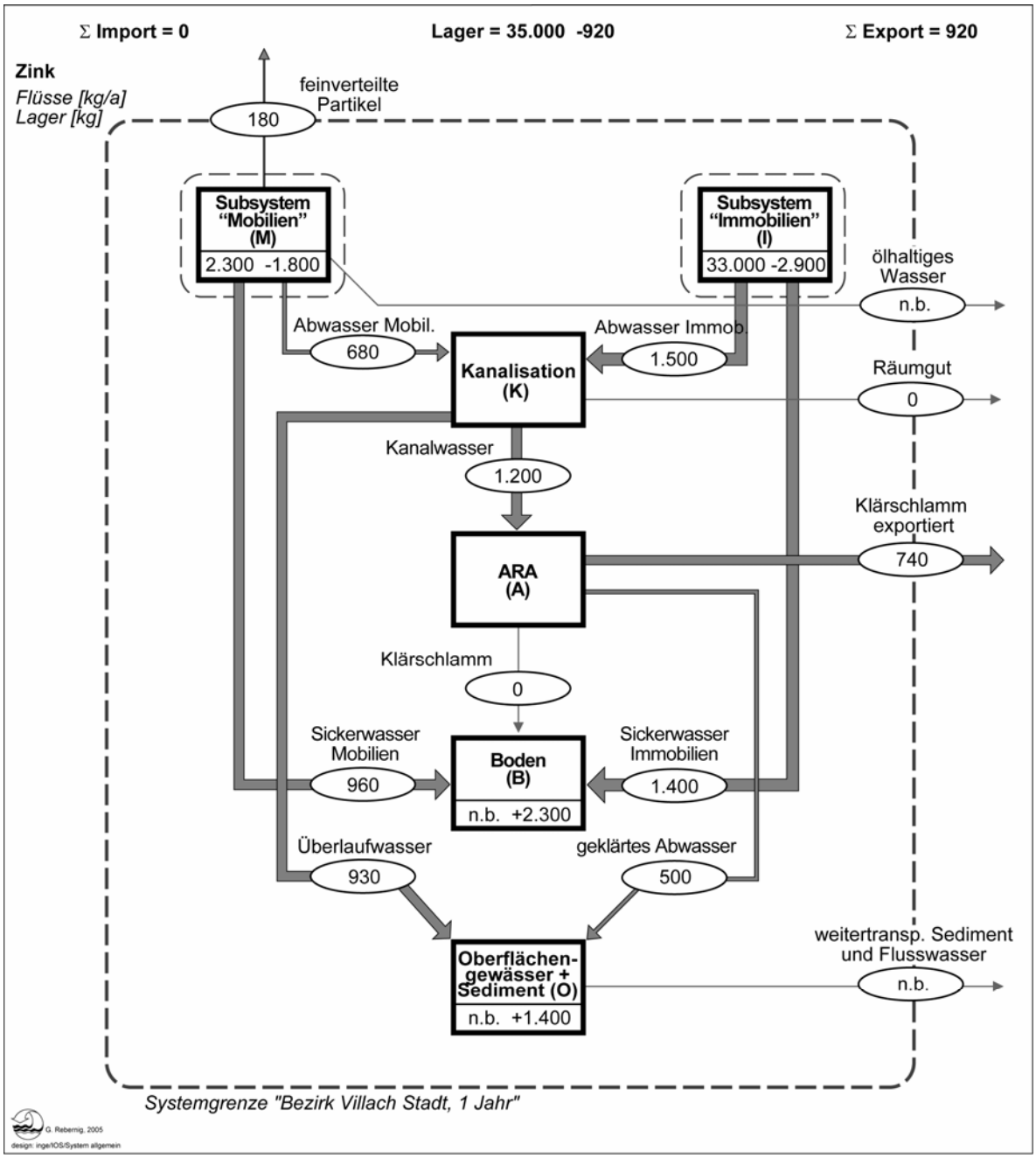


Abbildung 19: Zinkflüsse im Bezirk Villach Stadt

Die Immobilien dominieren die Zinkemissionen mit etwa 2900 kg. Die Mobilien liegen bei etwa 1800 kg. Die gesamte Emission teilt sich etwa zu gleichen Teilen auf die Kanalisation und den Boden auf. Etwa 2200 kg gelangen in die Kanalisation und 2400 kg in den Boden. Schlussendlich landen 1400 kg in der Drau (Abbildung 19). Diese Fracht setzt sich aus dem geklärten Abwasser (500 kg) und aus dem Überlaufwasser (930 kg) zusammen. 740 kg

werden über den Klärschlamm aus dem System exportiert. Die Belastung der Böden ist etwa doppelt so groß wie jene des Gewässers.

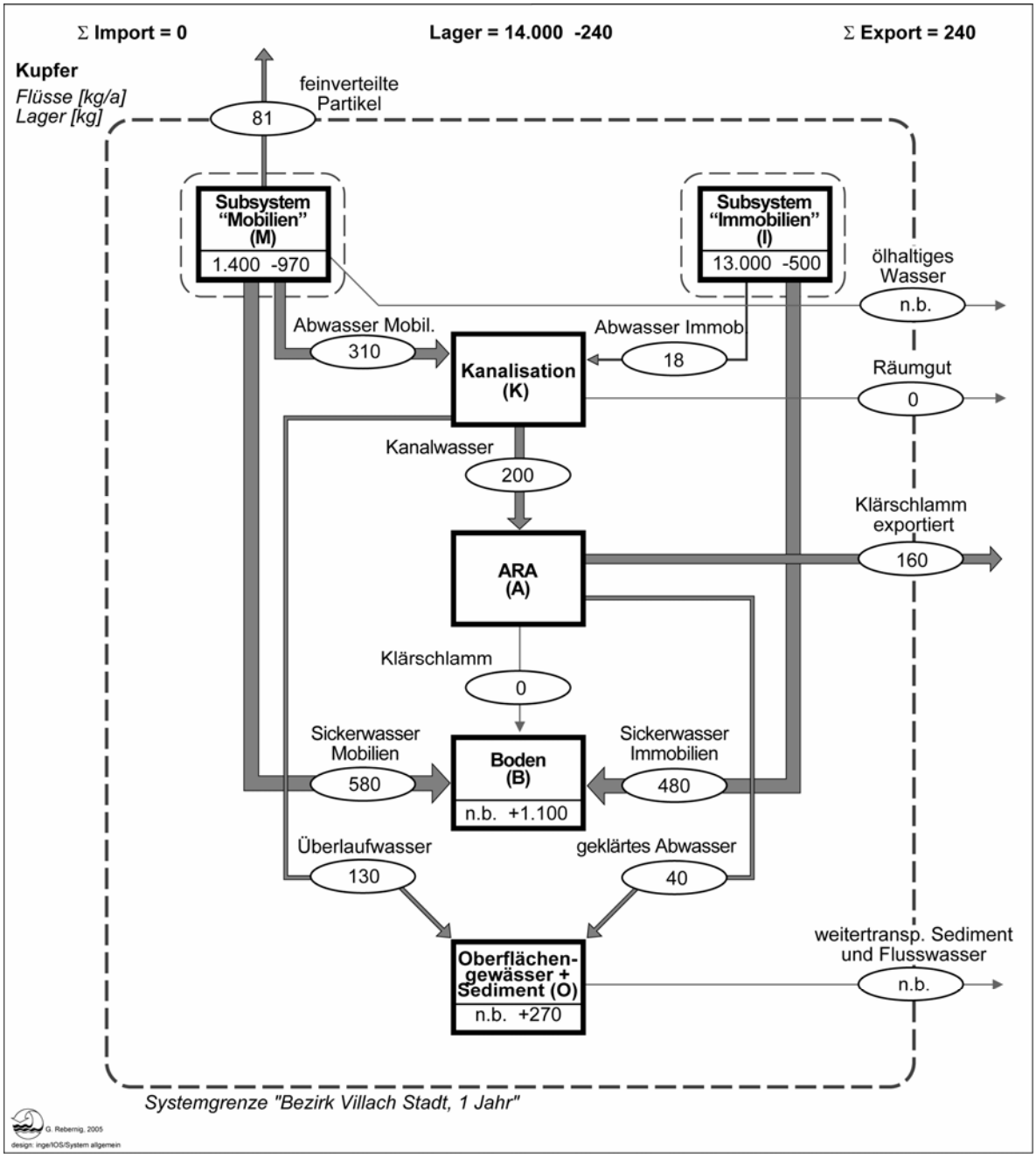


Abbildung 20: Kupferflüsse im Bezirk Villach Stadt

Die Emissionen der Mobilien sind deutlich höher als jene der Immobilien. Von diesen Emissionen landen etwa 1100 kg im Boden, 170 kg im Gewässer und 160 kg im Klärschlamm (Abbildung 20). Über das Überlaufwasser (130 kg) und das geklärte Abwasser (40 kg) gelangt das Kupfer in die Drau. Das am stärksten belastete Umweltmedium ist jedoch der Boden.

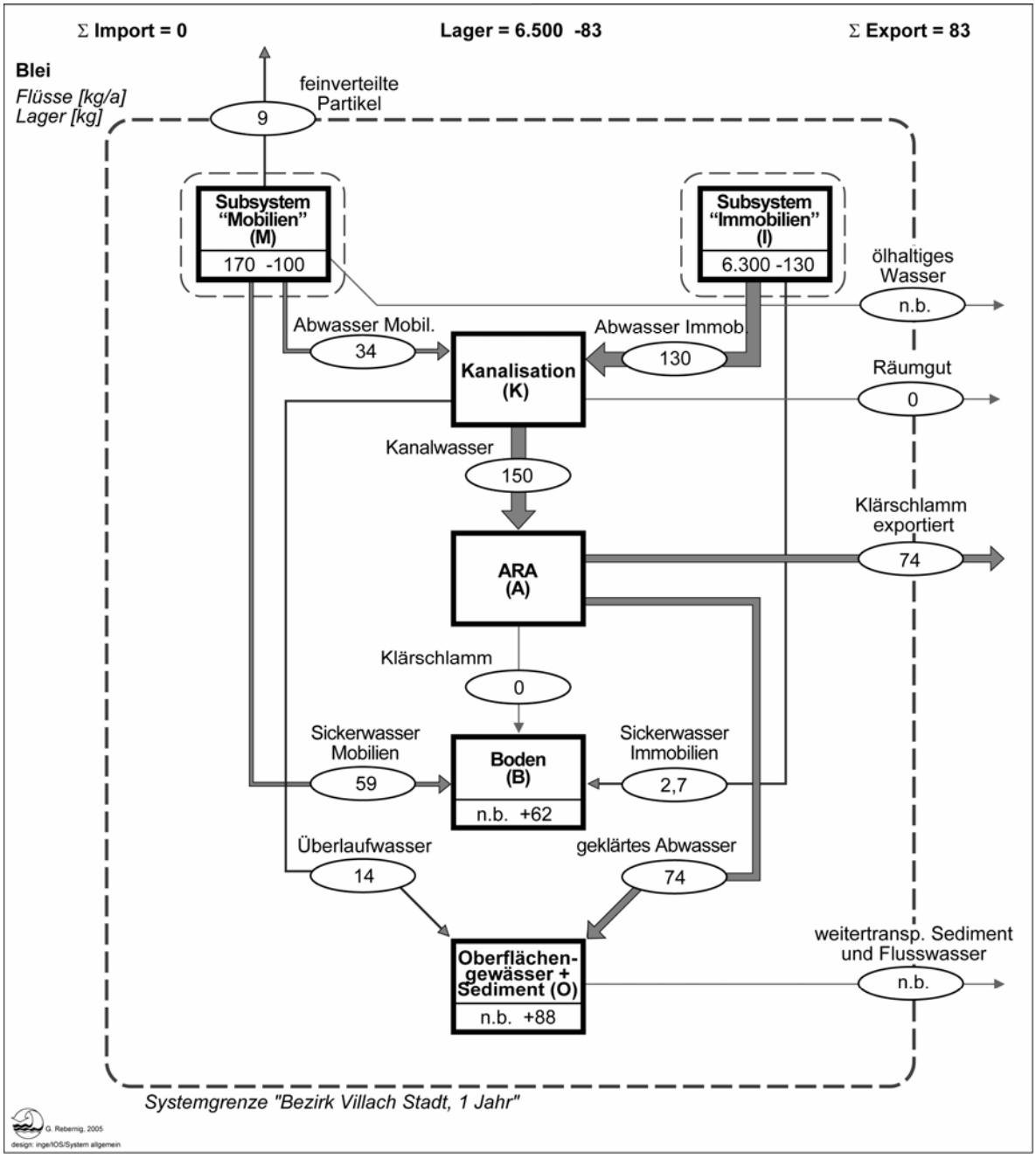


Abbildung 21: Bleiflüsse im Bezirk Villach Stadt

Die bedeutendsten Bleiquellen sind die Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen mit einer jährlichen Emission von 130 kg und die Kraftfahrzeuge mit etwa 90 kg. Die Fracht aus den Mobilien in die Kanalisation beträgt 34 kg, jene aus den Immobilien 130 kg. In die Kläranlage gelangen in Summe schließlich etwa 150 kg (Abbildung 21). In Summe enden etwa 90 kg Blei im Gewässer, über 60 kg im Boden und 75 kg im Klärschlamm. Im Fall von Kupfer und Zink ist der Boden der stärksten Belastung ausgesetzt, im Fall von Blei Boden und Gewässer im selben Ausmaß.

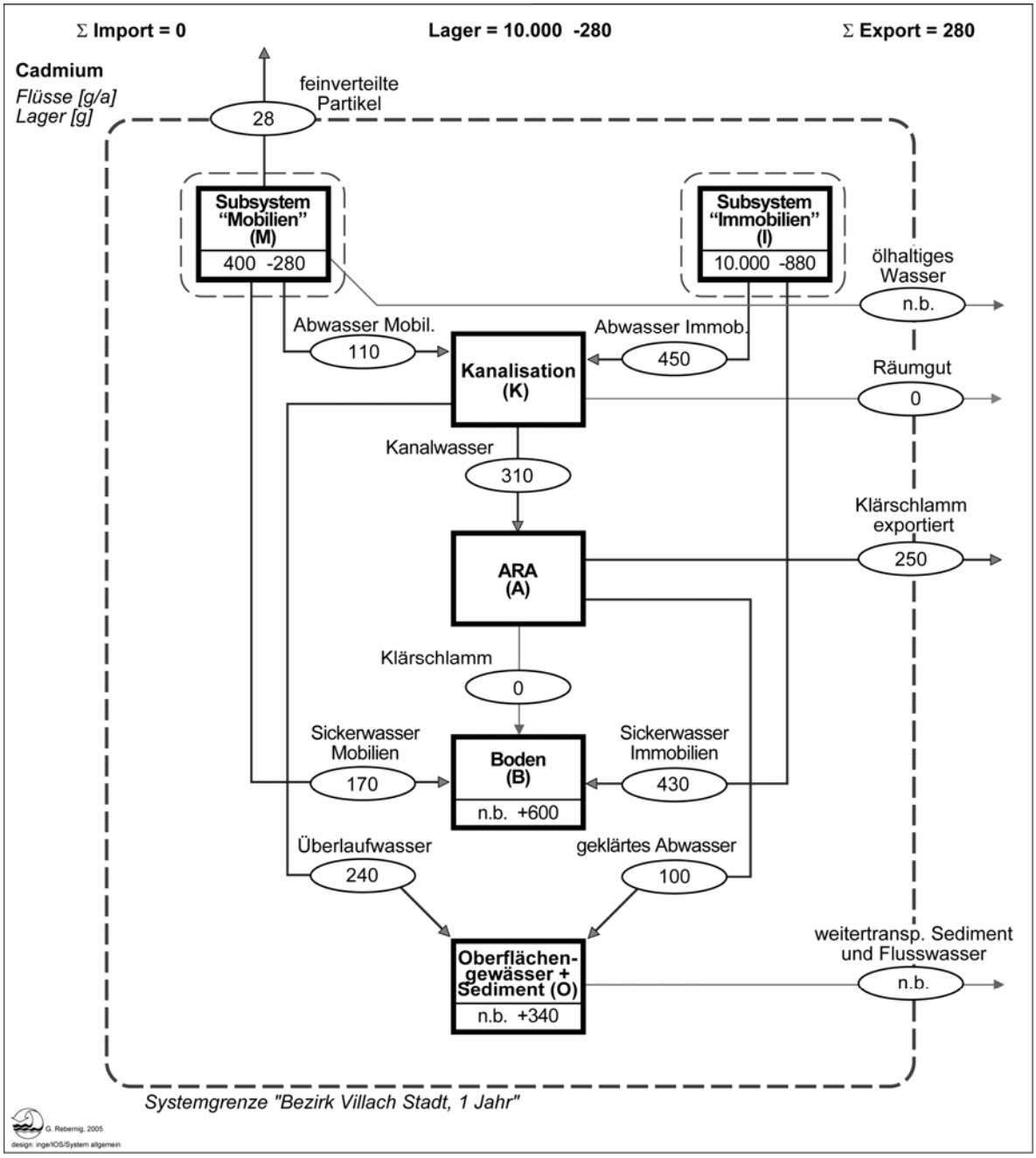


Abbildung 22: Cadmiumflüsse im Bezirk Villach Stadt

Oberflächenbezogene Emissionen führen zu einer jährlichen Belastung der Gewässer mit 0,34 kg, der Böden mit 0,6 kg und des Klärschlamms mit 0,25 kg. Immobilien emittieren dreimal mehr Cadmium als Mobilien (Abbildung 22).

In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind die Flüsse in die Umweltmedien Boden, Gewässer und Luft nochmals zusammengefasst. Bei den Gewässern wird unterschieden zwischen Frachten aus dem geklärten Abwasser und dem Überlaufwasser, bei den Frachten in den

Boden zwischen jenen, die auf bestimmten Flächen landen und jenen, die auf nicht bestimmten Flächen landen. Die Sickeranlagen bei dezentraler Versickerung und die Deponie im Fall der Klärschlammentsorgung sind unter bestimmten Flächen zusammengefasst. Bestimmte Flächen zeichnen sich dadurch aus, dass ganz klar bekannt ist, wo sich welche Mengen an Schwermetallen befinden.

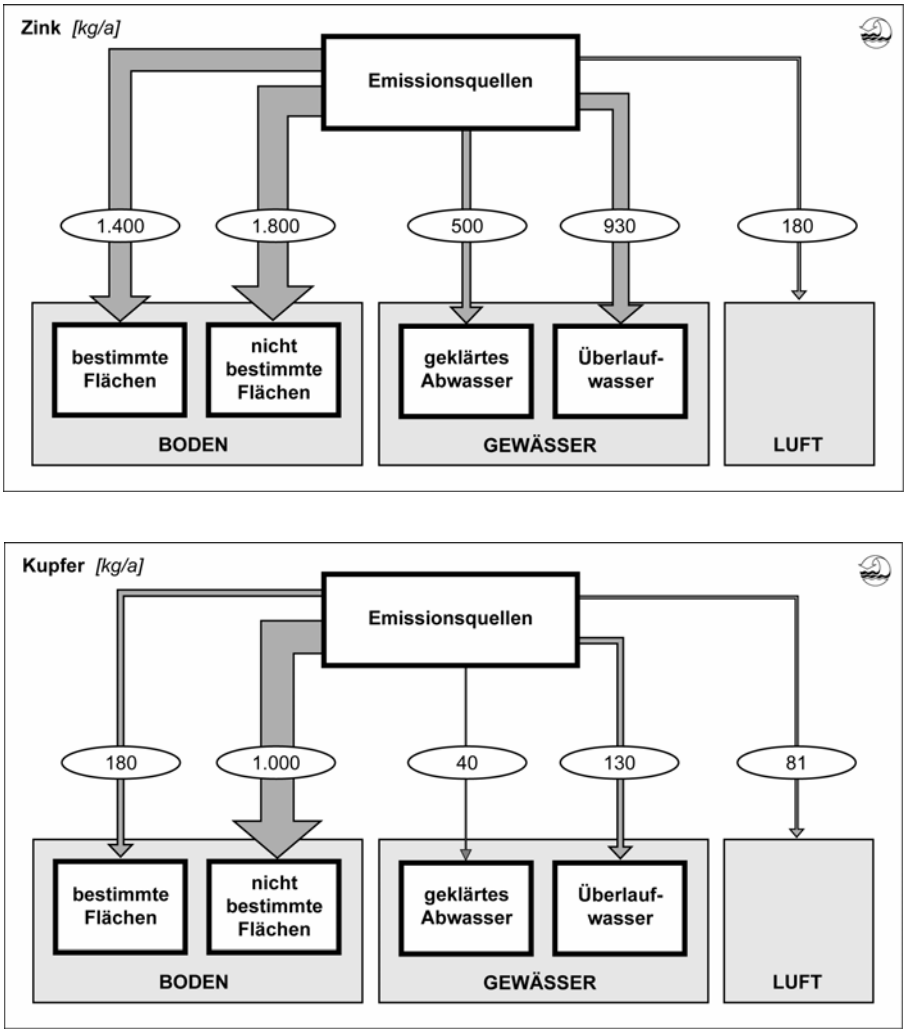


Abbildung 23: Zink- und Kupferflüsse in die Umweltmedien

Bei Zink, Blei und Cadmium akkumuliert in etwa dieselbe Menge an Schwermetallen in bestimmten und nicht bestimmten Flächen. Bei der Hälfte der Einträge in den Boden ist damit zumindest in den nächsten Jahrzehnten ganz klar, wo sich die Schwermetalle befinden. Im Gegensatz dazu ist die Eintragsfracht von Kupfer in nicht bestimmte Flächen fünfmal höher. Der Grund dafür ist die diffuse Verteilung von Kupfer durch den Verkehr.

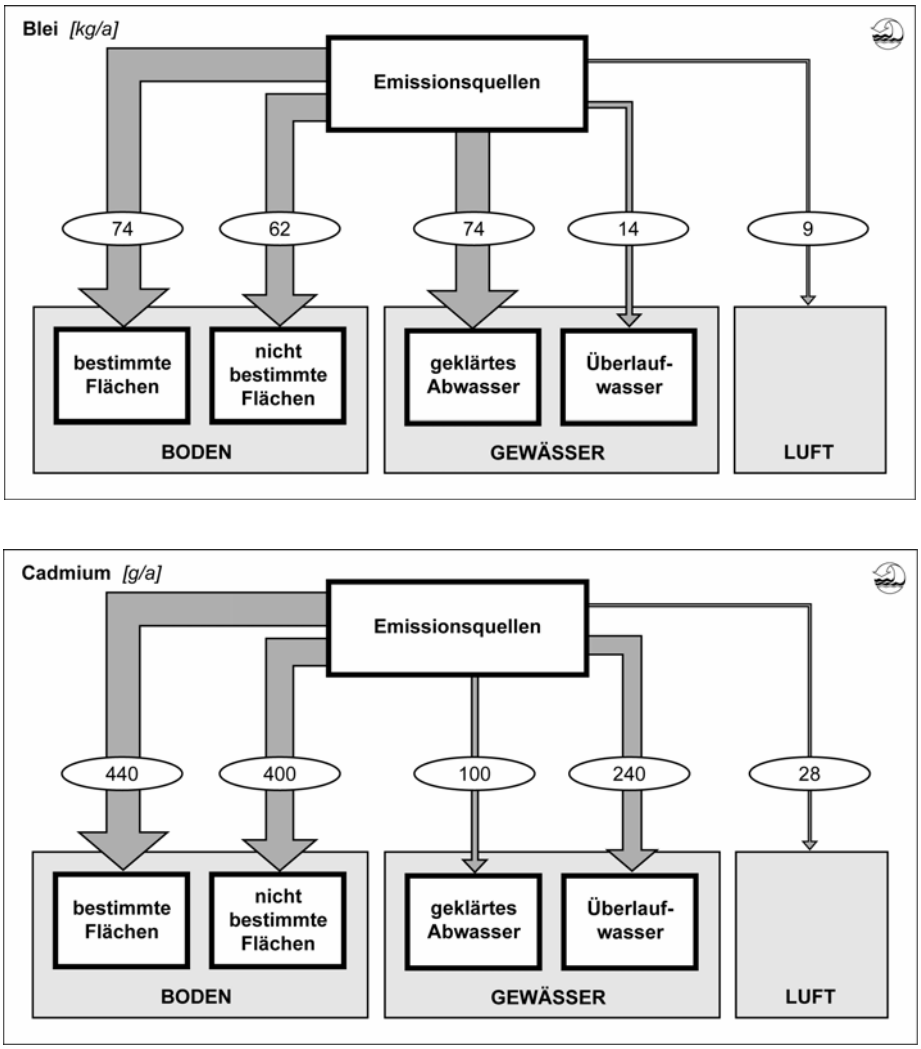


Abbildung 24: Blei- und Cadmiumflüsse in die Umweltmedien

Die Frachten ins Gewässer sind über das Überlaufwasser bei Zink und Cadmium zweimal und bei Kupfer dreimal höher als jene aus dem geklärten Abwasser. Bei Blei sind sie jedoch nur ein Fünftel von jenen des Überlaufwassers. Maßnahmen, die darauf abzielen den Anteil der zur Kläranlage geleiteten Mischwassermenge zu erhöhen, besitzen damit ein Potential die Einträge von Zink, Kupfer und Cadmium weiter zu verringern. Die bedeutende Gewässerbelastung mit Blei stammt aus der Kläranlage. Sie kann nur durch eine Verbesserung der Schwermetallfixierung in der Kläranlage gesenkt werden.

5.3 Bewertung am Beispiel des Bezirkes Villach Stadt

5.3.1 Oberflächenbezogene Emission pro Einwohner

Die gesamten oberflächenbezogenen Emissionen (E_{Oi}) wurden in Kapitel 5.2 berechnet. Sie betragen für Zink 4728 kg/a, für Kupfer 1457 kg/a, für Blei 231 kg/a und für Cadmium 1,1 kg/a. Im Bezirk Villach Stadt lebten im Jahre 2000 etwa 57.500 Einwohner (Statistik 2006). Die Berechnung der einwohnerspezifischen Emission von Oberflächen erfolgt mit Formel 41. Im Durchschnitt verursacht jeder Villacher jährlich die Emission von 82 g Zink, 25 g Kupfer, 4 g Blei und weniger als 0,02 g Cadmium (Abbildung 25).

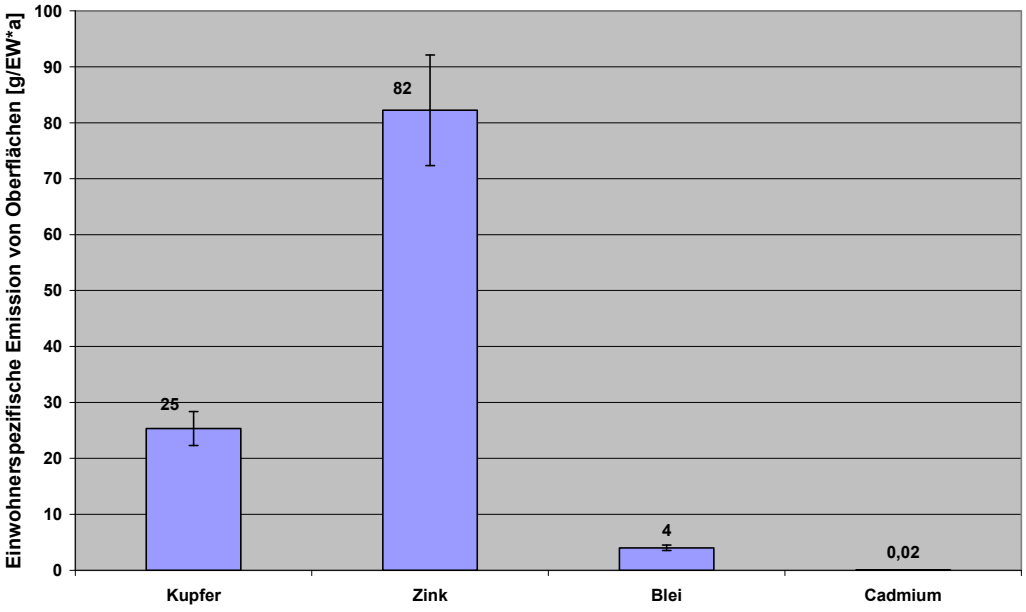


Abbildung 25: Einwohnerbezogene jährliche Emission der Metalle Zink, Kupfer, Blei und Cadmium von Oberflächen

Anteil der oberflächenbezogenen an den gesamten Emissionen

Zu den nicht oberflächenbezogenen Emissionen im Bezirk Villach Stadt zählen Schwermetallfreisetzungen durch den Hausbrand, die Verbrennung von Treibstoffen und das häusliche Abwasser. In Villach gibt es keine metallverarbeitende Industrie. Im Anhang werden die nicht oberflächenbezogenen Emissionen berechnet. In Tabelle 24 werden diesen noch die oberflächenbezogenen Emissionen hinzugefügt, sodass die gesamten

Schwermetallemissionen der Stadt Villach abgeschätzt werden können. Sie betragen jährlich etwa 6300 kg Zink, 1800 kg Kupfer, 380 kg Blei und 7,4 kg Cadmium (Unsicherheit ±10%).

Tabelle 24: Nicht oberflächenbezogene und oberflächenbezogene Emissionen in die Luft, die Kanalisation und den Boden im Bezirk Villach Stadt

	Hausbrand [1] [kg/a]	**Treibstoff** [1] [kg/a]	**Kommunales Abwasser** [2] [kg/a]	**Immobilien und Mobilien** [1) 2) 3)] [kg/a]	**Summe** [kg/a]
Kupfer	*39*	*3*	*338*	*1457*	***1837***
Zink	*105*	*8*	*1422*	*4728*	***6263***
Blei	*6*	*3*	*142*	*231*	***382***
Cadmium	*1,2*	*0,0*	*5,1*	*1,1*	***7,4***

[1] ..... in die Luft
[2] ..... in die Kanalisation
[3] ..... in den Boden

Abbildung 26 stellt das Verhältnis der oberflächenbezogenen zu den gesamten Emissionen dar. An die 80% des Kupfers, über 75% des Zinks, 60% des Bleis und 15% des Cadmiums stammen von Oberflächen.

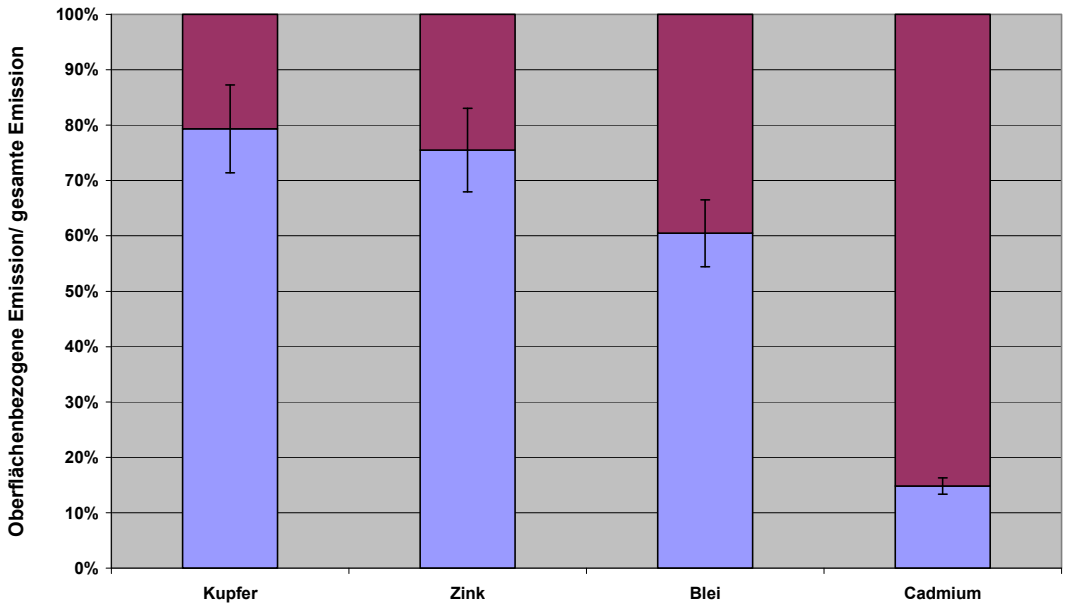


Abbildung 26: Anteil der oberflächenbezogenen an den gesamten Emissionen im Bezirk Villach Stadt

Oberflächen sind damit die bedeutendsten Kupfer-, Zink- und Bleiemissionsquellen. Diese sind zu entschärfen, soll die Fracht in die Umweltmedien erheblich reduziert werden. Das häusliche Abwasser (5,1 kg/a), gefolgt von den Emissionen des Hausbrandes (1,2 kg/a), stellt die bedeutendste Cadmiumquelle dar. Eine erhebliche Verringerung der Cadmiumemissionen bedingt damit detaillierte Untersuchungen und Maßnahmen im Bereich des häuslichen Abwassers und der Brennstoffe. In zukünftigen Diskussionen der Quellen und Stoffflüsse von Cadmium sind die kommunalen Abwässer zu inkludieren.

5.3.2 Einwohnerspezifisches emissionswirksames Lager

Das emissionswirksame Lager wird in diesem Kapitel exemplarisch für verzinkte Gebäudeoberflächen und Bremsbeläge berechnet.

Emissionswirksames Lager verzinkter Gebäudeoberflächen

Zur Ermittlung des gesamten emissionswirksamen Lagers verzinkter Gebäudeoberflächen kommt Formel 43 zur Anwendung. Die Zinkoberflächen der einzelnen Referenzgebäude stammen aus Tabelle 8. Die gesamte verzinkte Gebäudeoberfläche ergibt sich aus der Multiplikation gebäudebezogener Zinkoberflächen mit der Bauwerksanzahl in den einzelnen BBKLen aus Tabelle 7. Die Abschwemmrate stammt aus Tabelle 9, die Zinkkonzentration der Verzinkung (c_{ZnG}) ist 1. Es wird angenommen, dass verzinkte Bauteile im Durchschnitt 30 Jahre Verwendung finden und danach zu ersetzen sind. Weiters wird angenommen, dass sich das Alter verzinkter Materialien im Bezirk Villach Stadt gleichmäßig über die letzten 30 Jahre verteilt. Daraus ergibt sich der Koeffizient zur Beschreibung des bereits abgebauten Lageranteils zu 0,5.

Tabelle 25: Emissionswirksames Lager verzinkter Gebäudeoberflächen im Bezirk Villach Stadt

	Zinkoberfläche A_{ZnG} [m²]	Abschwemmrate a_{ZnG} [g/m²*a]	Konzentration c_{ZnG} [-]	Verwendungs-dauer t_G [a]	Koeffizient (Verlust) c_{VG} [-]	Lager L_{OGZn} [kg]
Dach	*318.966*	*3,1*				*14.832*
Fassade	*16.267*	*1,6*	*1*	*30*	*0,5*	*378*
Sonstige Konstruktionen	*95.770*	*3,1*				*4.453*
Summe						***19.663***

Das emissionswirksame Zinklager von verzinkten Bauteilen der Gebäudehülle beträgt im Bezirk Villach Stadt etwa 20 t. Der größte Teil dieses Lagers findet sich in den

Dachmaterialien (etwa 15 t), 4,5 t sind in Form von sonstigen Konstruktionen und nur 0,4 t in Fassadenmaterialien gebunden.

Emissionswirksames Lager von Bremsbelägen

Der Masseverlust pro zurückgelegten Kraftfahrzeugkilometer wird in Kapitel 7.1.2 berechnet. Der gesamte tägliche Masseverlust im Bezirk Villach Stadt ergibt sich aus dem kilometerspezifischen Masseverlust multipliziert mit der täglich zurückgelegten Kraftfahrzeugkilometeranzahl aus Kapitel 7.1.2. Tabelle 55 gibt den Kupfergehalt von Bremsbelägen an, für die Lebensdauer der Bremsbeläge werden drei Jahre angesetzt. Das Alter der Bremsbeläge verteilt sich gleichmäßig über die letzten drei Jahre. Daraus resultiert ein Koeffizient zur Beschreibung des bereits abgebauten Anteils der Oberfläche mit 0,5. Aus diesen Annahmen errechnet sich ein emissionswirksames Lager von 1,2 t Kupfer (Tabelle 26).

Tabelle 26: Emissionswirksames Lager der Bremsbeläge im Bezirk Villach Stadt

	Kilometersp. Massenverlust m_{KB} [mg/Kfz-km*a]	**Konzentration** c_{CuB} [mg/kg]	**Lebensdauer** l_B [a]	**Koeffizient (Verlust)** c_{vmB} [-]	**Emissionswirksames Lager** L_{OBCu} [kg]
Bremsbeläge (Vorderbremsen)	*10*	*117.941*	*3*	*0,5*	*881*
Bremsbeläge (Hinterbremsen)	*5*	*92.198*			*323*
Summe					*1.204*

Gesamtes emissionswirksames Lager

Werden die Formel 42 und Formel 43 auf alle in Kapitel 5.2.1 und 7.1 beschriebenen Emissionsquellen angewendet, so erhält man das gesamte emissionswirksame Lager der Oberflächen im Bezirk Villach Stadt. Die Tabelle 27 zeigt, dass das Lager der Immobilien auch das gesamte emissionswirksame Zink-, Kupfer-, Blei- und Cadmiumlager der Stadt bestimmt.

Tabelle 27: Gesamtes emissionswirksames Lager im Bezirk Villach Stadt

	Immobilien L_{OIi} [kg]	**Mobilien** L_{OMi} [kg]	**Gesamtes emissionswirksames Lager** L_{Oi} [kg]
Zn	*33000*	*2300*	*35300*
Cu	*13000*	*1400*	*14400*
Pb	*6300*	*170*	*6470*
Cd	*10,0*	*0,4*	*10,4*

An die 33000 kg Zink, 13000 kg Kupfer und 6300 kg Blei, dies entspricht nahezu 100% des gesamten emissionswirksamen Lagers, ist in Immobilien gebunden. Bei Cadmium ist das emissionswirksame Lager der Immobilien etwa 20-mal größer als jenes der Mobilien (Tabelle 27).

Einwohnerbezogenes emissionswirksames Lager

Das einwohnerbezogene emissionswirksame Lager beträgt für Zink, Kupfer und Blei etwa 600, 250 respektive 110 g/EW (Abbildung 27). Die Emissionsquellen der Immobilien, beispielsweise Bleirohre oder Zinkdächer, besitzen im Vergleich zu jenen der Mobilien, beispielsweise Bremsbeläge oder Reifen, eine lange Lebensdauer. Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen durch die Substitution von Oberflächenmaterialien sind zudem in der bestehenden Bausubstanz aufwendiger und kostenintensiver als die Modifizierung von Verbrauchsgütern, beispielsweise von Bremsbelägen. Kupferfreie Bremsbeläge würden demnach innerhalb von einem Jahr bereits im Hinblick auf eine Verminderung der Kupferflüsse im Bezirk Villach Stadt Wirkung zeigen. Die Substitution langlebiger baulicher Infrastruktur, beispielsweise von Bleirohren, bedarf hoher Kosten und kann erst in Jahrzehnten umgesetzt werden und messbare Reduktionen bewirken.

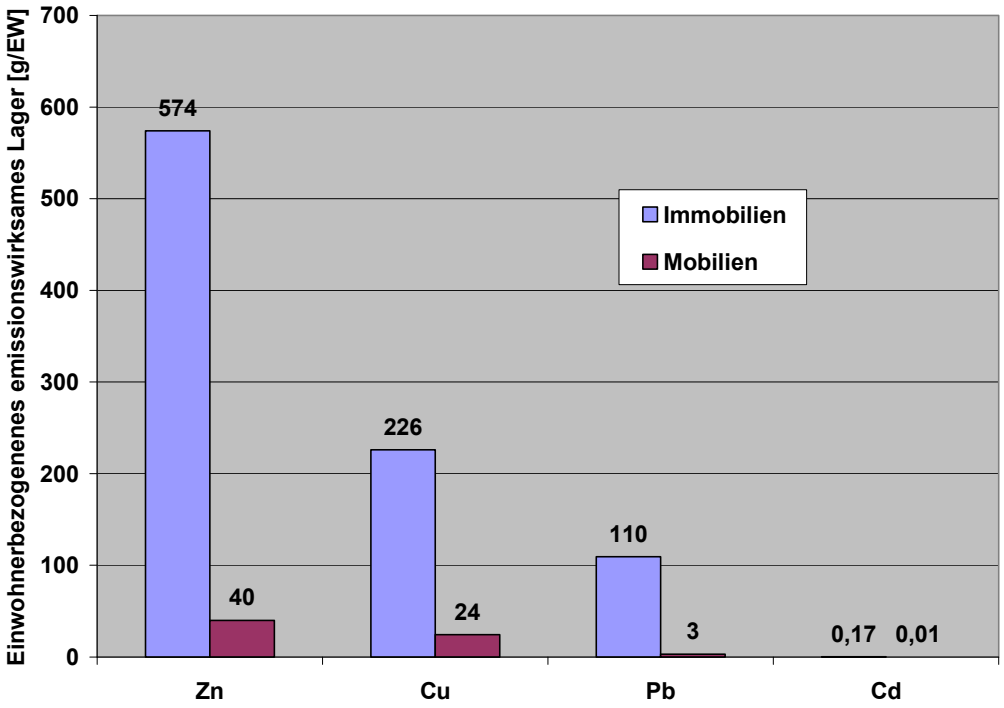


Abbildung 27: Einwohnerbezogenes emissionswirksames Lager von Immobilien und Mobilien

5.3.3 Anteil an erfassten Stoffflüssen

Als geeignete letzte Senke für Schwermetalle werden Deponien angesehen. Zu den erfassten Flüssen zählen im Bezirk Villach Stadt die Fracht im Klärschlamm und Räumgut. Nicht erfasst sind die Flüsse „feinverteilte Partikel“, „Überlaufwasser“, „geklärtes Abwasser“ sowie „Sickerwasser Mobilien und Immobilien“. Der Anteil der erfassten Flüsse berechnet sich mit Formel 46, die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 28 angeführt und in Abbildung 28 dargestellt.

Tabelle 28: Erfasster Anteil der Stoffflüsse im Bezirk Villach Stadt

	Erfasste Flüsse	**Nicht erfasste Flüsse**			
	Klärschlamm	**Feinverteilte Partikel**	**Sickerwasser Mobilien und Immobilien**	**Überlaufwasser und geklärtes Abwasser**	**Erfasster Anteil**
	F_{KSi} [kg/a]	F_{AMi} [kg/a]	$F_{BMi} + F_{Bli}$ [kg/a]	$F_{OKi} + F_{OAi}$ [kg/a]	c_{Ei}
Kupfer	*159*	*81*	*1051*	*167*	*0,11*
Zink	*744*	*178*	*2387*	*1421*	*0,16*
Blei	*74*	*9*	*62*	*87*	*0,32*
Cadmium	*0,25*	*0,03*	*0,59*	*0,30*	*0,22*

In Villach können an die 32% der Bleiemissionen von Oberflächen erfasst und damit in entsprechende letzte Senken geführt werden. Die Anteile der erfassten Cadmium-, Zink- und Kupferfrachten liegen niedriger, bei 22, 16 respektive 11%. Die absolute Fracht von Zink und Kupfer ist, wie in Kapitel 5.2.7 gezeigt werden konnte, jedoch höher. Es tritt hier also der schlechteste Fall für eine Stadt ein, nämlich eine hohe Emission und ein geringer Anteil an erfassten Flüssen.

In Hinblick auf das für den Menschen bestehende Gefahrenpotential sind Cadmium und Blei trotz der geringeren Stofffrachten ob ihrer Toxizität zu beachten.

Ein urbanes System sollte demnach niedrige oberflächenbezogene Emissionen und einen hohen Anteil an erfassten Stoffflüssen aufweisen. Damit kann die Gewässer-, Boden- und Luftbeeinträchtigung auf ein Minimum reduziert und die Schwermetalle können im Klärschlamm konzentriert werden.

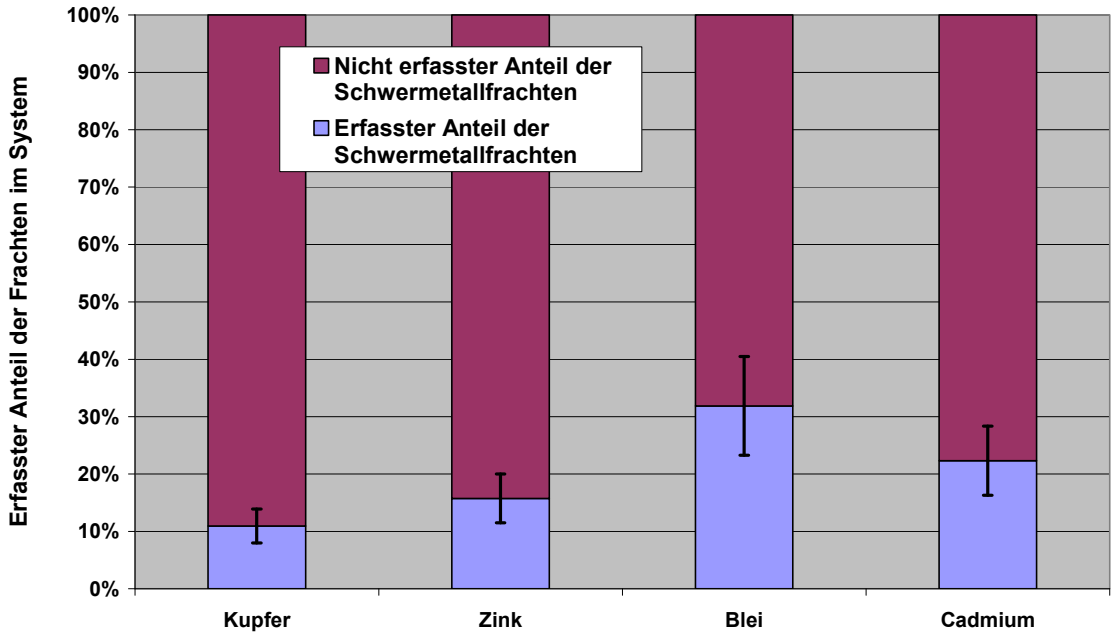


Abbildung 28: Anteil der in Villach über den Klärschlamm erfassten Schwermetallfracht

5.3.4 Eintragsfracht und Eintragsfläche

Für die Berechnung der Eintragsfrachten und Eintragsflächen in der Nähe von Bauwerken werden in dieser Arbeit nur die Dachflächen berücksichtigt. Sie machen, wie in Kapitel 5.2.1.1 gezeigt wurde, mehr als drei Viertel der Emission von Gebäudeoberflächen aus und sind damit für den bedeutendsten Teil der Emissionen verantwortlich.

Prinzipiell gibt es zwei Wege der Ableitung von Dachabwässern, nämlich

- die Einleitung ins Kanalsystem oder
- die dezentrale Versickerung.

Eintragsflächen

Für die Belastung des Bodens ist nur die dezentrale Versickerung relevant. In der Praxis gibt es mehrere Möglichkeiten die Versickerungsanlagen auszubilden. In dieser Studie werden unter dem Begriff Sickeranlage Sickerschächte und Sickermulden verstanden. Zu Einträgen in den Boden kommt es daher entweder in den Sickerschächten oder im obersten Bodenhorizont der Sickermulden. Die erforderliche Eintragsfläche für die Sickerschächte des jeweiligen Referenzbauwerkes kann nach ÖNORM B2506-1 (ÖNORM 2000) für ein 5-jähriges

Regenereignis berechnet werden (Tabelle 29). Es wird eine Versickerung über Sohle und Mantel des Sickerschachtes angenommen.

Tabelle 29: Erforderliche Sickerfläche für die Referenzgebäude nach ÖNORM B 2506-1

BBKL	Mittlere Dachfläche *[m²]*	Schacht-anzahl *[-]*	wirksame Sicker-fläche je Schacht *[m²]*	Sickerfläche je Gebäude $\bar{A}_{ij}$ *[m²]*
BBKL 1	230	2	5	9
BBKL 2	305	2	6	12
BBKL 3	360	2	7	13
BBKL 4	1.850	4	14	56

Flächenspezifische Eintragsfracht

Es wird angenommen, dass die Emission der Dachflächen der gesamten Eintragsfracht in die Sickeranlage entspricht. Durch den Wind werden keine Korrosionsprodukte verfrachtet und auf dem Transport über das Regenwasser in die Sickeranlagen treten keine Verluste auf. Die Eintragsfracht in die Sickeranlage der jeweiligen BBKL und die flächenspezifische Eintragsfracht werden mit Formel 48 und Formel 50 berechnet. Tabelle 30 zeigt, dass in BBKL 3 und 4 die größte Zink- und Cadmiumfracht abtransportiert wird. Die flächenspezifische Zinkeintragsfracht in die Sickeranlage beträgt jährlich in BBKL 3 12 g/m² und in BBKL 4 etwa 17 g/m². In BBKL 1 und 2 liegt diese etwa bei 9 g/m²*a.

Tabelle 30: Gesamte und flächenspezifische Eintragsfracht der BBKLen

BBKL	Metall	Emissionsfracht der Dächer E_{BDij} *[kg/a]*	Anzahl Gebäude B_j	Eintragsfracht I_{ij} *[g/a]*	Eintragsfläche je Gebäude A_{ij} *[m²]*	Flächenspezifische Eintragsfracht i_{ij} *[g/m²*a]*
1	Cu	27	6.179	4	9	0,5
	Zn	553		89		9,6
	Cd	0,17		0,03		0,003
2	Cu	0	5.824	0	12	0
	Zn	644		110		9,2
	Cd	0,19		0,03		0,003
3	Cu	0	682	0	13	0
	Zn	106		155		12
	Cd	0,03		0,05		0,004
4	Cu	0	230	0	56	0
	Zn	217		945		17
	Cd	0,07		0,28		0,005

Entwässerungssysteme der BBKLen und gesamte Eintragsfläche

Die Einteilung der BBKLen in unterschiedliche Entwässerungssysteme ist der Tabelle 12 zu entnehmen. Mit Formel 49 berechnet sich die in Tabelle 31 angeführte gesamte Eintragsfläche in den einzelnen Bebauungsklassen.

Tabelle 31: Gesamte Eintragsfläche in den BBKLen

BBKL	Abwasser-verband	Eintragsfläche A_{Ij} (gebäudebezogen) *[m²]*	Anzahl der Gebäude B_j *[-]*	Koeffizient k_{MMj} *[-]*	Eintrags-fläche *[m²]*	Gesamte Eintrags-fläche A_{Igesj} ***[m²]***
1	SV	9	2.524	0,75	17.037	**36.462**
	OS	9	2.263	0,56	11.405	
	FS	9	1.393	0,64	8.021	
2	SV	12	4.212	0,23	11.624	**18.976**
	OS	12	1.612	0,38	7.352	
3	SV	13	682	0,00	0	**0**
4	SV	56	230	0,40	5.149	**5.149**

SV ….. Stadt Villach
OS ….. Ossiachersee
FS ….. Faaker See

Die flächenspezifische Eintragsfracht und die gesamte Eintragsfläche werden in Tabelle 32 miteinander in Verbindung gebracht. Für Zink sind die Ergebnisse in Abbildung 29 dargestellt. Die flächenspezifische Eintragsfracht nimmt mit zunehmender Entfernung zum Stadtzentrum ab, die Eintragsflächen in den BBKlen jedoch zu.

In den Sickeranlagen kommt es zu Akkumulationen von Schwermetallen. Über mehrere Jahrzehnte kann die Sohle der Schächte mit Schwermetallen verunreinigt werden und damit als Quelle sekundärer Verunreinigungen fungieren. Es ist dies vor allem dann relevant, wenn im Bereich der Sickerschächte der Grundwasserspiegel sehr hoch liegt und damit die Bodenschicht mit ihrer Funktion als Filtermedium zwischen Sickerschachtsohle und Grundwasserspiegel gering ist. Damit kann es unter Umständen langfristig zu einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch Dachabwässer kommen.

Tabelle 32: Gesamte Eintragsfläche in den BBKLen und deren flächenspezifische Eintragsfracht

BBKL	Gesamte Eintrags-fläche A_{lgesj} [m²]	Flächenspezifische Eintragsfracht i_{ij} [g/m²*a]	[g/m²*a]	[g/m²*a]
		Kupfer	Zink	Cadmium
1	36.462	0,47	10	0,003
2	18.976	0	9	0,003
3	0	0	12	0,004
4	5.149	0	17	0,005

Versickert das Dachwasser in Sickermulden, so akkumulieren Schwermetalle vor allem der obersten Bodenschicht (0-10 cm). Die Schwermetallfracht der Dachoberfläche und der durch atmosphärische Deposition abgelagerten Metalle wird damit konzentriert in den Boden eingetragen. Diffus emittierte Schwermetalle werden also wieder gesammelt und auf einer geringen Fläche konzentriert. Bei entsprechend großen metallischen Dachflächen und einer hohen atmosphärischen Deposition kommt es langfristig zu einer lokalen Verunreinigung des Bodens in Sickermulden.

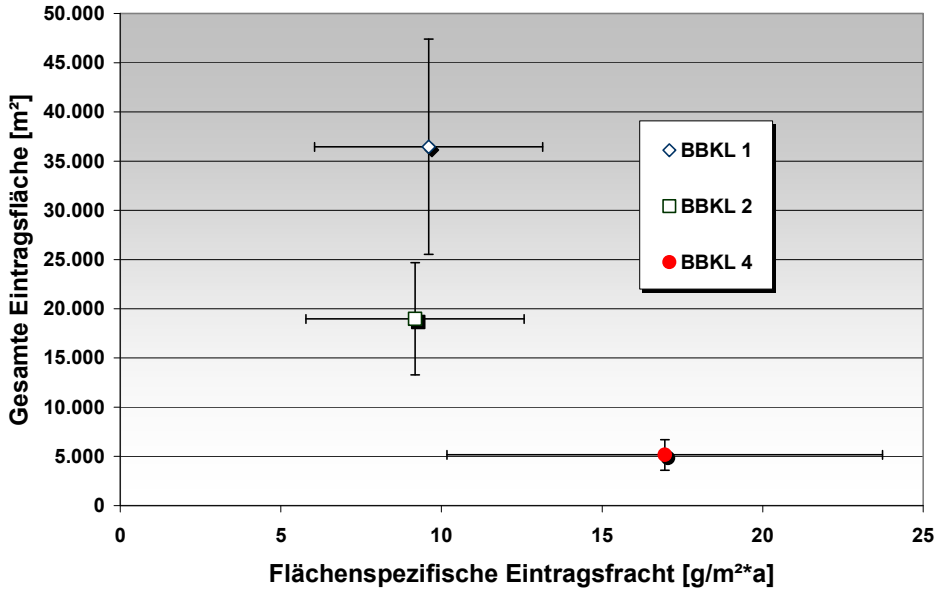


Abbildung 29: Flächenspezifische Eintragsfracht und Eintragsfläche in Sickeranlagen an Gebäuden für Zink im Bezirk Villach Stadt

5.3.5 Verdopplungszeitraum

Referenzwerte (1999)

Anstatt der geogenen Hintergrundkonzentration werden als Bezugswerte Messwerte für Grünland aus der Kärntner Bodenzustandsinventur aus dem Jahre 1999 (Amt der Kärntner Landesregierung 1999), in dieser Arbeit als Referenzwerte (1999) bezeichnet, herangezogen (Tabelle 33). Die Proben stammen von Böden außerhalb der Stadt Villach. Der flächenspezifische Schwermetallgehalt des Referenzbodens (g_{bi}) lässt sich mit Formel 61 berechnen. Für die weiteren Berechnungen werden folgende Annahmen getroffen:

- Dichte des Oberbodens = 1,3 t/m³
- Gewählte Horizonthöhe = 10 cm

Schwermetalle setzen sich in der obersten Bodenschicht fest (Thornton 1991). Es wird eine Horizonthöhe von 10 cm angesetzt, in der die Schwermetalle akkumulieren.

Tabelle 33: Referenzwerte (Amt der Kärntner Landesregierung 1999) und Grenzwerte (Kärntner Landesregierung 2000) für Schwermetallgehalte in Böden

	Referenzwerte (1999) g_{hi} *[mg/kg]*	**Flächenspezifischer Referenzwert** g_{bi} *[mg/m²]*	**Grenzwerte** *[mg/kg]*
Kupfer	30	3.900	50
Zink	110	14.300	150
Blei	50	6.500	70
Cadmium	0,3	39	1

Verdopplungszeitraum in Sickeranlagen

Die berechneten Verdopplungszeiträume beziehen sich auf die Sickerfläche in Sickeranlagen. Zur Berechnung dieser wird Formel 60 herangezogen. Bei Zink sind die Verdopplungszeiträume erstaunlich kurz. In BBKL 1, 2 und 3 dauert es weniger als 2 Jahre bis es zur Verdopplung des Schwermetallgehaltes kommt, in BBKL 4 weniger als ein Jahr. Für Kupfer beträgt die Verdopplungszeit in BBKL 1 etwa 8 Jahre, bei Cadmium liegt sie in BBKL 1, 2 und 3 zwischen 10 und 14 Jahren (Tabelle 34).

Tabelle 34: Verdopplungszeitraum in den Böden der Sickeranlagen

BBKL	Flächenspezifische Eintragsfracht i_{ij}			Flächenspezifischer Referenzwert g_{bi}			Verdopplungs-zeitraum VZ_{ij}		
	Kupfer [g/m²*a]	*Zink* [g/m²*a]	*Cadmium* [g/m²*a]	*Kupfer* [g/m²]	*Zink* [g/m²]	*Cadmium* [g/m²]	*Kupfer* [a]	*Zink* [a]	*Cadmium* [a]
BBKL 1	*0,5*	*10*	*0,003*	*3,9*	*14,3*	*0,04*	*8*	*1,5*	*14*
BBKL 2	-	*9*	*0,003*				-	*1,6*	*14*
BBKL 3	-	*12*	*0,004*				-	*1,2*	*11*
BBKL 4	-	*17*	*0,005*				-	*0,8*	*8*

Abbildung 30 stellt einen Zusammenhang zwischen der von der spezifischen Eintragsfracht betroffenen Fläche und dem Verdopplungszeitraum her. Der Verdopplungszeitraum verkürzt sich mit zunehmender Nähe zum Stadtzentrum. Im Gegensatz dazu steigt die Akkumulationsfläche mit größerer Entfernung zum Stadtzentrum an. Grund dafür ist, dass im Zentrum nur geringe Mengen der Dachwässer im Boden versickern. Im ländlichen Bereich ist das Gegenteil der Fall. In Zukunft wird sich dieser Unterschied zunehmend verstärken, da es im ländlichen Raum den Trend zur dezentralen Versickerung gibt.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Wahl emissionsarmer Dachmaterialien bei Neubauten und die Beschränkung von auf Dächern eingesetzten metallischen Oberflächen. Sollen in Zukunft Boden und Gewässer geschützt werden, muss auf emissionsarme Materialien gesetzt werden oder es sind Anlagen zur Reinigung der Dachwässer vor Eintritt dieser in die Kanalisation oder den Boden vorzusehen.

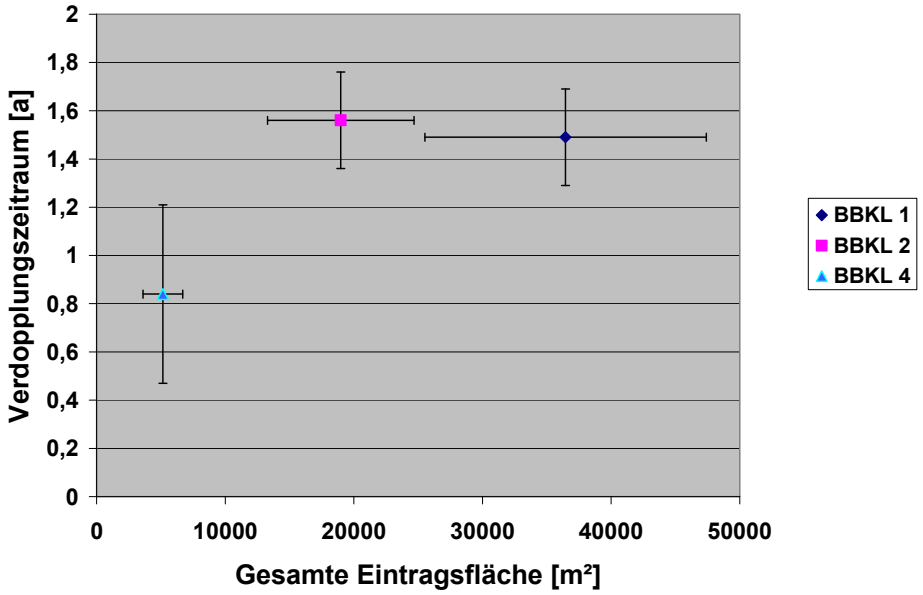


Abbildung 30: Verdopplungszeitraum in Sickeranlagen für Zink

Identifizierung von Problemflächen

Referenzwerte (1999)

Lokale Referenzwerte unterscheiden sich voneinander, wenn das bodenbildende Gestein unterschiedlich ist. Dies ist in Villach sehr häufig der Fall. Über die Referenzwerte (1999) kann eine Abschätzung der Relevanz von Schwermetalleinträgen in Sickeranlagen durchgeführt werden.

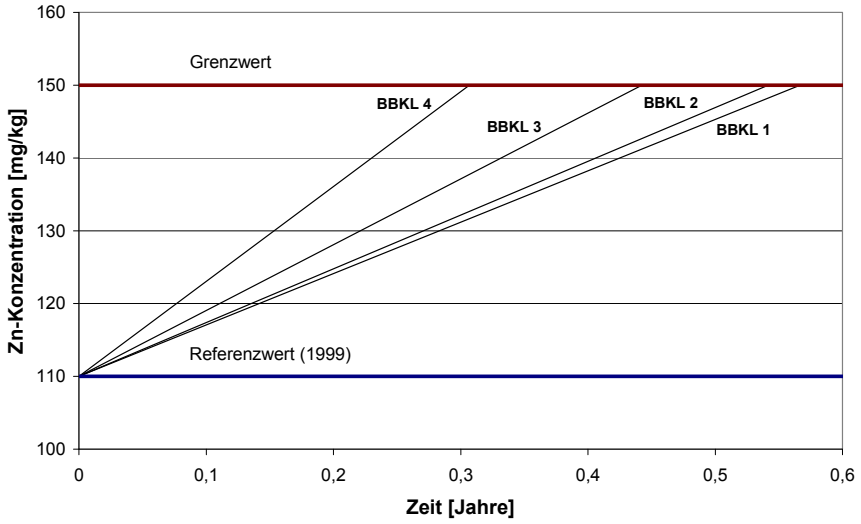
Grenzwerte

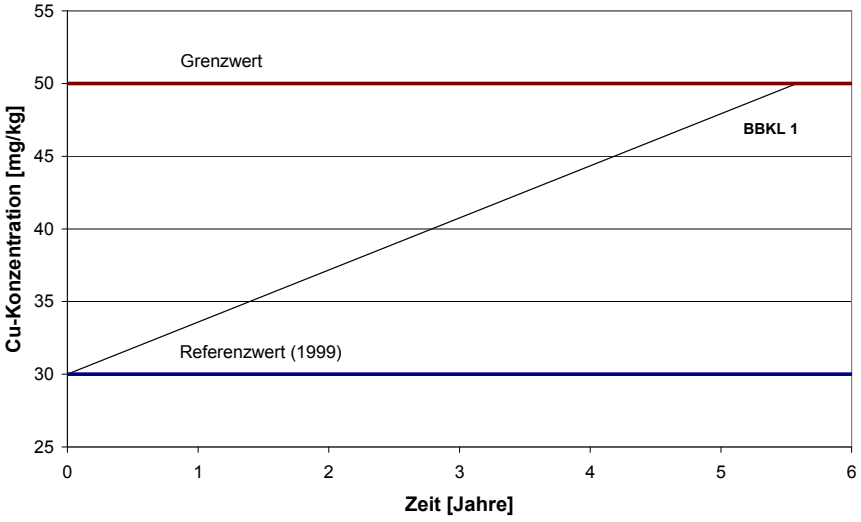
Unter der Annahme, dass in Villach heute alle Böden die Schwermetallkonzentrationen des Referenzwertes (1999) besitzen, kann die Zeitspanne bis zur Grenzwertüberschreitung errechnet werden. Es werden die laut Kärntner Klärschlammverordnung vorgeschlagenen Grenzwerte für landwirtschaftliche Böden herangezogen (Kärntner Landesregierung 2000) (Tabelle 33). Dies ist eine Näherung, doch es gibt derzeit in Österreich keine Grenzwerte für urbane Böden. Den in Tabelle 33 angeführten Referenzwerten (1999) ist die jährliche flächenspezifische Eintragsfracht hinzuzufügen. Unter der Annahme einer konstant bleibenden Eintragsfracht lässt sich das Überschreiten des angesetzten Grenzwertes berechnen.

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnung für Sickermulden und Sickerschächte an Gebäuden. Die Zeitspannen bis zur Grenzwertüberschreitung liegen für Zink in allen BBKLen unter einem Jahr.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind jedoch durch das Ziehen von Bodenproben zu bestätigen. Langfristig gesehen kommt es damit in den Bereichen der Sickeranlagen zu beträchtlichen Zinkakkumulationen.

Bei Cadmium liegt die Zeitspanne bis zur Grenzwertüberschreitung in BBKL 1 und 2 bei ca. 30 Jahren. Die Böden in den Sickeranlagen sind zwar nicht unmittelbar von hohen Cadmiumeinträgen betroffen, über längere Zeiträume kann es jedoch auch zu erhöhten Cadmiumkonzentrationen im Boden kommen.





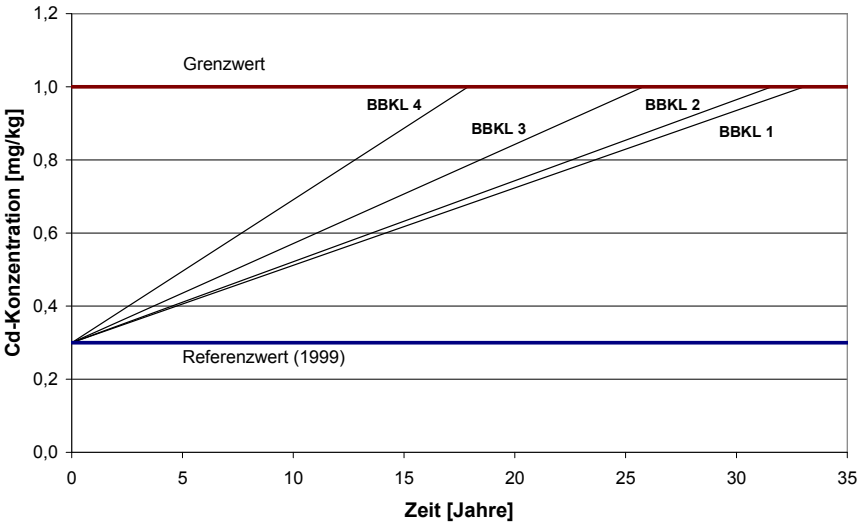


Abbildung 31: Zeitspanne bis der Grenzwert für Kupfer, Zink und Cadmium in Sickeranlagen überschritten wird

6 ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN

Die Ziele dieser Arbeit waren

1. die Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Analyse und Bewertung von Stoffflüssen von Oberflächen der Immobilien und Mobilien einer Stadt und
2. die Anwendung des methodischen Vorgehens und der Bewertungsmethode auf eine Stadt, sowie
3. die Ableitung von Handlungsempfehlungen aus dieser Fallstudie für Entscheidungsträger zur Unterstützung einer zukunftsfähigen städtischen Entwicklung.

Die Studie konzentriert sich auf die durch die Oberfläche von Immobilien und Mobilien entstandenen Schwermetallemissionen und berücksichtigt nicht die Schwermetallemissionen durch die Verwendung von Motorölen, Frostschutzmitteln, Bremsflüssigkeiten, Holzimprägnierungsmitteln, Düngemitteln und Streumitteln im Winterdienst. Weiters werden die Emissionen von im Boden befindlichen Bleikabeln, Telefon- und Elektrizitätsleitungen sowie die Emissionen von schwermetallhaltigen Stabilisatoren in Plastik und die Einträge in die Gewässer und Böden durch das Verwenden von Senkblei in der Fischerei und bleihältiger Munition in der Jagd nicht bestimmt.
Die Oberfläche von Mobilien und Immobilien lässt sich in eine äußere und eine innere Oberfläche unterteilen. Unter der äußeren Oberfläche wird jene Fläche einer Immobilie oder Mobilie verstanden, die das Objekt zur Umgebung hin abgrenzt. Beispiele sind die Dachhaut oder Fassade bei Immobilien und die Karosseriefläche oder Reifenlauffläche bei Mobilien.
Unter der inneren Oberfläche wird jene Fläche einer Immobilie oder Mobilie verstanden, die das Objekt zum Innenraum hin abgrenzt. Beispiele sind verputzte Innenwände von Gebäuden oder Wasserleitungen bei Immobilien und die Fläche des Innenraums von Kraftfahrzeugen oder die Oberfläche von Bremsbelägen bei Mobilien.

Oberflächen verursachen Emissionen. Sie entstehen durch die

- Wechselwirkung einer anthropogenen Oberfläche mit der Atmosphäre oder Hydrosphäre, beispielsweise die Korrosion von verzinkten Dachflächen, oder der
- Wechselwirkung von zwei anthropogenen Oberflächen, beispielsweise der Abrieb der Bremsbeläge von Kraftfahrzeugen.

In dieser Arbeit wird der Begriff oberflächenbezogene Emission definiert. Darunter werden die von ausgewählten Oberflächen verursachten Schwermetallemissionen verstanden.
Folgende Resultate, unterteilt in methodische und inhaltliche Erkenntnisse, wurden erhalten:

6.1 Methodische Erkenntnisse

6.1.1 Das komplexe System Stadt lässt sich anhand der SFA derart vereinfachen, dass die von Oberflächen ausgehenden Emissionen genügend genau erfasst werden können

Städte sind komplexe Systeme. Zur Analyse der Schwermetallemissionen von Oberflächen ist es notwendig, diese Systeme auf die wesentlichen Prozesse und Flüsse zu reduzieren. Die Stoffflussanalyse erweist sich zur Lösung dieser Problemstellung als geeignetes Instrument. In der vorliegenden Arbeit wird deutlich, dass sie zur verständlichen Darstellung und Quantifizierung der Flüsse angewendet werden kann.

Zur Berechnung der Emissionen der Gebäudeoberfläche wird die bebaute Fläche der Stadt Villach vier definierten Bebauungsklassen (BBKL) zugeordnet. Für jede dieser Bebauungsklassen kann ein repräsentatives Referenzhaus definiert und schließlich eine flächenspezifische Emission ermittelt werden. In diesen Bebauungsklassen lassen sich die gesamten Emissionen der Gebäudehülle bestimmen.
Durch den Bezug der Gesamtemission der Gebäudehülle der urbanen Region auf die dort lebenden Einwohner lassen sich grobe Richtwerte für ähnliche Städte gleicher Größe und Bebauungsstruktur generieren. Durch den Bezug der Gesamtemission unterschiedlicher Bebauungsklassen auf die dort lebenden Einwohner lassen sich jene Siedlungstypen identifizieren, von denen die größten Emissionen ausgehen.

Die Aufschlüsselung der gesamten Emissionsmenge nach Oberflächenmaterialien ermöglicht die Identifizierung von stark emittierenden Materialien und zeigt zugleich deren mengenmäßige Bedeutung in der jeweiligen Stadt.
Beachtet man zusätzlich zu den Dachflächen auch die metallischen Fassadenteile, so lässt sich das Verhältnis der beiden Emissionsflächen zueinander abschätzen. Damit können Schlüsse

auf die Bedeutung von Fassadenfläche und Dachfläche im Hinblick auf die Belastung der Umwelt mit Schwermetallen gezogen werden.

Alle Straßen des primären Straßennetzes lassen sich einer von drei definierten Verkehrsbelastungsklassen (VBKL), welche sich durch ihr Verkehrsaufkommen unterscheiden, zuweisen. Für jede dieser VBKLen wird die kilometerspezifische Schwermetallemission errechnet.

Zur Berechnung der Frachten aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen ist es notwendig, das unterschiedliche Alter, die verwendeten Materialien und die Größe der Bauwerke zu berücksichtigen. Dies erfolgt über den Bauwerksalters-, Material- und Geschossfaktor. Über den Bezug auf das Referenzgebäude der BBKL kann eine flächenspezifische Emission aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen bestimmt werden.

Diese BBKLen, VBKLen, bauwerks- und materialspezifischen Faktoren lassen sich auf jede beliebige Stadt übertragen. Sie können in Zukunft zum Aufbau einer Datenbasis und zur Entwicklung einer Software herangezogen werden, die es ermöglicht, die Schwermetallemissionen der Gebäudehülle, Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen sowie der Kraftfahrzeuge unterschiedlicher Städte effizient zu quantifizieren.

Sind die Emissionen aus den verschiedenen Quellen bekannt, kann über die Analyse der Transportwege die Verteilung der Emissionen beschrieben werden. Wasser als das wichtigste Transportmedium verfrachtet Schwermetalle direkt in Böden oder in das Kanalsystem. Die Herstellung des Zusammenhangs von Entwässerungssystemen und BBKLen bzw. VBKLen ist deshalb für die quantitative Bestimmung der Frachten in die Kanalisation und deren Verteilung innerhalb dieser von essentieller Bedeutung. Kennt man Bestand und Betrieb der Kanalisationsanlagen, erlaubt dies eine Abschätzung der im Falle von Regenereignissen direkt ins Gewässer entlasteten Misch- und Regenwassermengen, des zur Kläranlage weitergeleiteten Anteils sowie der über periodische Kanalspülungen entnommenen Räumgutmengen. In der Kläranlage selbst gelangt ein beträchtlicher Teil der Schwermetallfrachten in den Klärschlamm, der Rest wird über den Kläranlagenablauf in den Vorfluter eingetragen. Über Klärschlammmenge, Schwermetallkonzentrationen im

Klärschlamm sowie stoffspezifische Transferkoeffizienten besteht hier auch die Möglichkeit zur Überprüfung der berechneten mit den tatsächlich zur Kläranlage abgeleiteten Schwermetallfrachten.

6.1.2 Neue Indikatoren zur Bewertung von Emissionen

Zur Bewertung werden die Kriterien „Oberflächenbezogene Emission pro Einwohner“, „Einwohnerbezogenes emissionswirksames Lager“, „Anteil an erfassten Stoffflüssen“, „Eintragsfracht und Eintragsfläche“ und „Verdopplungszeitraum“ entwickelt.

- „Oberflächenbezogene Emission pro Einwohner“: Dieses Kriterium beurteilt die Bedeutung von oberflächenbezogenen Emissionen eines urbanen Systems. Dazu werden diese in Bezug zu den gesamten Schwermetallemissionen der Stadt gesetzt.
- „Einwohnerbezogenes emissionswirksames Lager“: Das emissionswirksame Lager ist ein Kriterium zur Bewertung zukünftig zu erwartender Emissionen von Oberflächen. Es gibt die einwohnerspezifische Menge an emittierbaren Metallen von Oberflächen eines urbanen Systems an.
- „Anteil an erfassten Stoffflüssen“: Dies ist ein Kriterium zur Beurteilung des urbanen Systems hinsichtlich der Vorgabe, durch oberflächenbezogene Emissionen verursachte Stoffflüsse gezielt in dafür vorgesehene Senken zu lenken. Unter erfassten Schwermetallflüssen werden jene verstanden, die gesammelt und in dafür vorgesehene Senken gelenkt werden. Nicht erfasste Schwermetallflüsse verteilen ihre Frachten auf solche Weise in der Luft, im Wasser oder Boden, dass deren weiterer Transportweg und damit die Senke, in der die Metalle schlussendlich akkumulieren, nicht mehr beeinflussbar ist. Deponien werden als geeignete Senken angesehen.
- „Eintragsfracht und Eintragsfläche“: Dieses Kriterium ist ein Indikator für die Belastung der Böden durch den Eintrag von Schwermetallen. Es gibt an, wie groß die Einträge in Sickeranlagen an Gebäuden und ins Bankett von Straßen und in straßennahe Böden sind und wie groß die davon betroffenen Flächen im System sind.
- „Verdopplungszeitraum“: Dieses Kriterium beurteilt die Relevanz der Eintragsfrachten. Unter dem Verdopplungszeitraum wird jene Zeitspanne verstanden, in der sich in einer mit bestimmter Mächtigkeit definierten Bodenschicht des Oberbodens die geogene Hintergrundkonzentration eines Schwermetalls verdoppelt. Eine kurze Verdopplungszeit zeigt an, dass der Eintrag an Schwermetallen näher untersucht werden muss, da die Gefahr besteht, dass früher oder später z.B. die

gesetzlichen Grenzwerte überschritten werden können. Da es derzeit keine gesetzlichen Grenzwerte für städtische Böden in Österreich gibt, werden in dieser Arbeit Grenzwerte des landwirtschaftlich genutzten Bodens für städtische Böden angewendet. Zusätzlich zum Verdopplungszeitraum wird auch jene Zeitspanne errechnet, nach der, ausgehend von regionalen Referenzwerten, der Grenzwert für landwirtschaftliche Böden erreicht und überschritten wird.

Die fünf Bewertungskriterien beziehen sich auf Emissionsquellen, die Transportwege der Emissionsprodukte und die Belastung der Senken durch Emissionen von Oberflächen. Die Beurteilung des gegenwärtigen Zustandes einer Stadt wird damit möglich. Die Transparenz der Ergebnisse ist von großer Bedeutung, um in Zukunft planerische Entscheidungen auf diese Kriterien abstützen zu können.
Anhand der gewählten Kriterien können Veränderungen in der vergangenen Entwicklung einer Stadt positiv oder negativ bewertet werden. Über die Analyse des Entwicklungstrends einer Stadt in den vergangenen Jahrzehnten kann auf die Entwicklungstendenz der Zukunft geschlossen werden.

6.1.3 Das Verminderungspotential ermöglicht die Bewertung von Maßnahmen

Der Begriff Verminderungspotential wird in dieser Arbeit definiert und dient der Bewertung von Maßnahmen. Unter dem Verminderungspotential (VP) einer Maßnahme versteht man jenen Prozentsatz, um welchen eine Maßnahme die Fracht eines Metalls in ein Umweltmedium oder in die Umwelt zu vermindern vermag.
Die Berechnung des Verminderungspotentials ermöglicht eine Reihung der Maßnahmen nach ihrer Wirksamkeit. Wirksame Maßnahmen lassen sich damit identifizieren und ihre Folgen auf die Belastung der Umweltmedien quantifizieren, damit wird der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung hergestellt. Ein nächster Schritt wäre die Einbeziehung von Kosten und damit die Identifizierung der kostengünstigsten Maßnahmen mit der besten Wirkung.

6.1.4 Städtevergleich

Der Vergleich von Städten unterschiedlicher Charakteristik, Größe, topographischer und geographischer Lage wird durch die beiden Kriterien „Fracht in die Umwelt pro Kopf“ und „pro - Kopf - Fläche mit geogener Schwermetallkonzentrationsverdopplung“ möglich.

- „Fracht in die Umwelt pro Kopf“: Dieses Kriterium beschreibt die durch Oberflächen verursachten Frachten in die Umweltmedien. Es entsteht aus der Aggregierung der Kriterien „oberflächenbezogene Emission pro Einwohner“ und „Anteil an erfassten Stoffflüssen“.
- „Pro - Kopf - Fläche mit geogener Schwermetallkonzentrationsverdopplung“: Dieses Kriterium beschreibt die Belastung der Senke Boden im urbanen System. Es aggregiert die Bewertungskriterien „Eintragsfracht und Eintragsfläche“ und „Verdopplungszeitraum“. Durch das Ergebnis ist es möglich, die Schwermetallbelastung des Bodens in unterschiedlichen Städten miteinander zu vergleichen.

Im Vergleich zweier Städte wirkt jeweils jene Stadt ökologisch nachhaltiger, deren Fracht in die Umwelt pro Kopf und deren pro - Kopf - Fläche mit geogener Schwermetall-konzentrationsverdopplung geringer ist.

6.2 Inhaltliche Erkenntnisse

Die entwickelte Methode wird auf den Bezirk Villach Stadt angewendet. Die Emissionen der Oberflächen von Mobilien und Immobilien werden quantifiziert. In einer Literaturstudie können zunächst die bedeutendsten Emissionsquellen von Zink, Kupfer, Blei und Cadmium identifiziert werden. Diese Voruntersuchung ist Grundlage für die Auswahl der zu diskutierenden äußeren und inneren Oberflächen des Systems. In dieser Arbeit werden die Emissionen der äußeren Oberflächen (Gebäudehülle, Verkehrsinfrastruktur, Reifenlaufflächen) und jene der inneren Oberflächen (Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen, Bremsbeläge von Kraftfahrzeugen und Schienenfahrzeugen) behandelt.

6.2.1 Quantifizierung der Emissionen von Oberflächen der Stadt Villach

Aus der Berechnung der Emissionen stammen die in Abbildung 32 bis Abbildung 35 dargestellten Resultate.

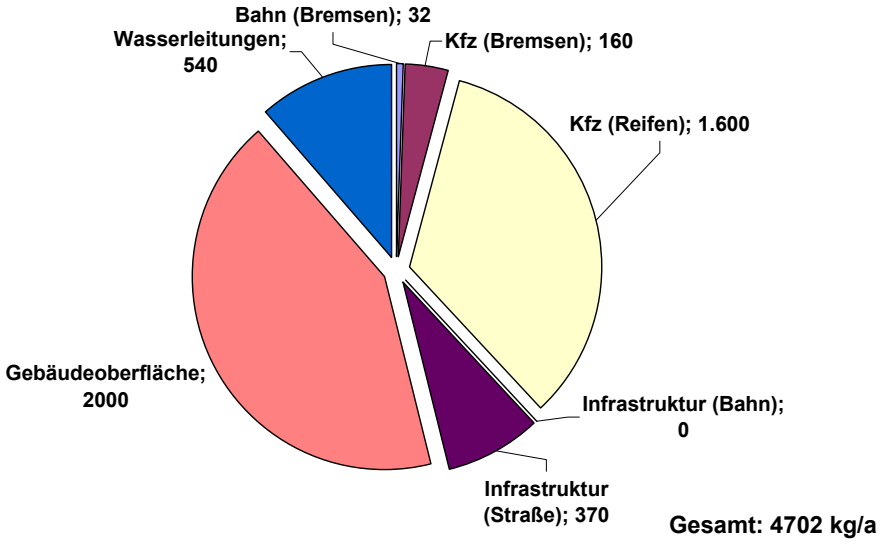


Abbildung 32: Oberflächenbezogene Zinkemissionen

42 % der Zinkemissionen haben ihren Ursprung in der Korrosion der Gebäudeoberflächen, 34 % im Abrieb der Reifenlaufflächen und 19% respektive 11% in der Korrosion von Straßeninfrastruktureinrichtungen und Wasserleitungen.

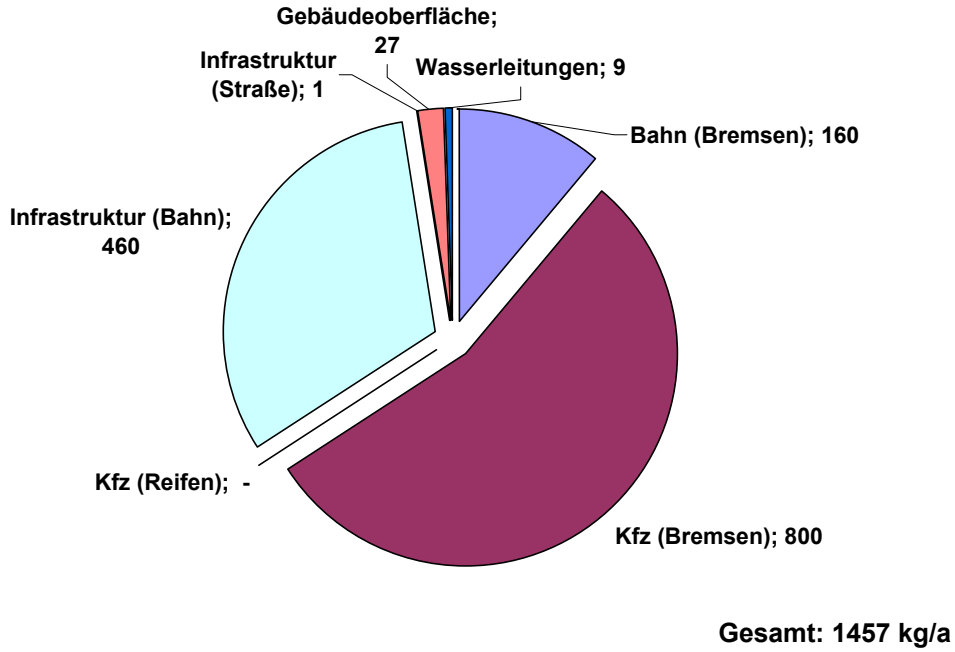


Abbildung 33: Oberflächenbezogene Kupferemissionen

Die dominierenden Kupferquellen in Villach sind Mobilien. Der Abrieb von Kraftfahrzeug- und Schienenfahrzeugbremsbelägen trägt mit 55 respektive 11% zu den gesamten Emissionen bei. Beträchtliche Kupfermengen stammen auch aus dem Fahrdrahtabrieb (31%).

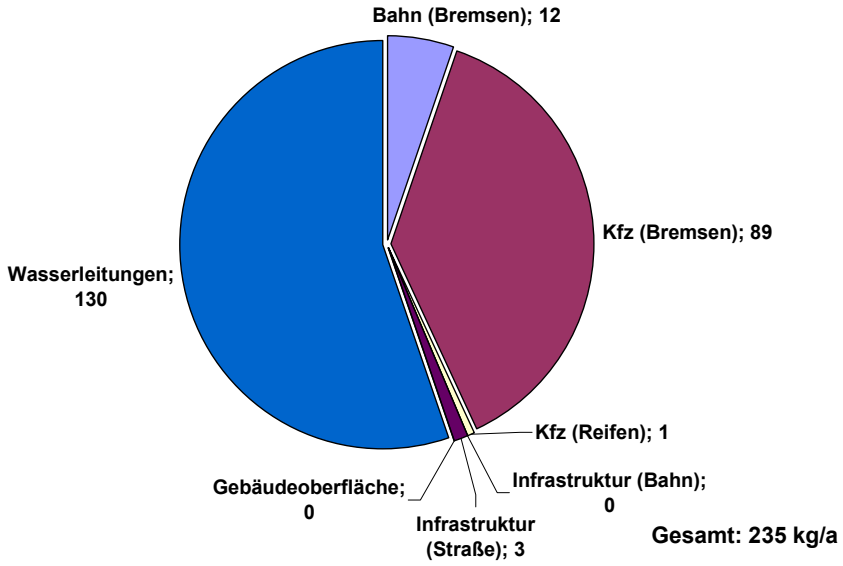


Abbildung 34: Oberflächenbezogene Bleiemissionen

Die in Kraftfahrzeugen und in Schienenfahrzeugen verwendeten Bremsbeläge sorgen für 38 respektive 5% der Bleiemissionen. Die Emissionen aus verbleiten Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen verursachen jedoch die größten Bleiemissionen von Oberflächen im Bezirk Villach Stadt (55%).

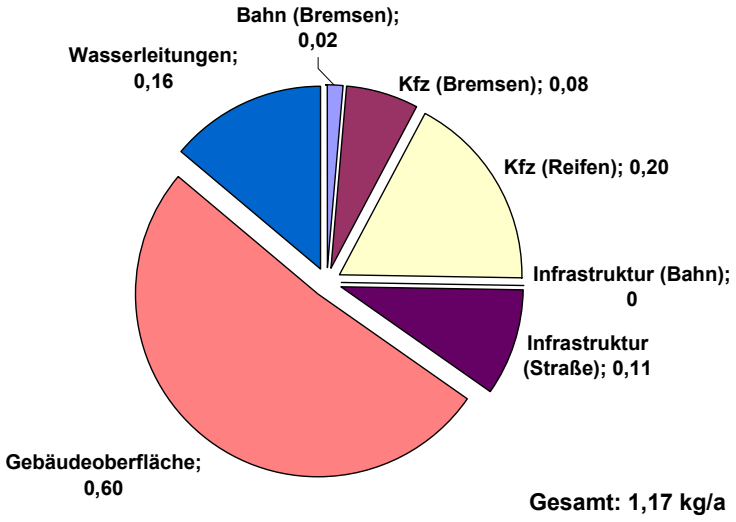


Abbildung 35: Oberflächenbezogene Cadmiumemissionen

Die bedeutendsten Cadmiumemissionen stammen von den Gebäudeoberflächen (50%), aus dem Abrieb von Reifenlaufflächen (18%) und aus der Korrosion von Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen (15%).

Verkehrsinfrastruktur

Die Straßeninfrastruktur ist eine heute noch wenig diskutierte Zinkquelle. In Villach werden jährlich an die 370 kg Zink durch sie emittiert. Über 60% der Emissionen von Straßeninfrastruktureinrichtungen stammen von den 32 Kilometern der Autobahn (dies entspricht etwa 6% des gesamten Straßennetzes). Der Grund sind die im Vergleich zu anderen Straßenkategorien (Landesstraßen, Gemeindestraßen) kilometerspezifisch überdurchschnittlich großen Flächen von Verkehrsleit-, Verkehrssicherheits- und Lärmschutzeinrichtungen aus verzinktem Stahl.

Schienenfahrzeuge und Fahrdrahtabrieb

Die Summe der Kupferemissionen aus dem Fahrdrahtabrieb der Oberleitung (450 kg) und aus dem Abrieb der Bremsbeläge von Schienenfahrzeugen (160 kg) liegt in derselben Größenordnung wie die Abriebsemissionen von Kraftfahrzeugbremsbelägen (800 kg/a). Es fehlt jedoch noch an spezifischen Untersuchungen zum Schienenverkehr als Kupferemissionsquelle, zur Verteilung der Emissionen auf die einzelnen Transportwege und deren Senken.

6.2.2 Frachten in die Umweltmedien

Die Tabelle 35 bietet einen Überblick über die oberflächenbezogenen Frachten in den Boden, die Gewässer und den Klärschlamm.

Große Anteile der Schwermetallfrachten gelangen über die Kanalisation ins Gewässer

Die Kupfer-, Blei- und Cadmiumfrachten in die Kanalisation teilen sich annähernd im selben Verhältnis auf den Klärschlamm und die Gewässer auf. Bei Zink gelangen zwei Drittel ins Gewässer. Erhebliche Anteile jener Frachten, welche sich durch das Kanalsystem fassen lassen, gelangen damit entweder über Regenüberläufe direkt ins Gewässer oder können durch eine zu geringe Schwermetallfixierung in der Kläranlage nicht im Klärschlamm gebunden werden und gelangen über das geklärte Abwasser ins Gewässer.

Tabelle 35: Oberflächenbezogene Frachten in den Boden, den Klärschlamm, ins Gewässer und in die Luft

	Oberflächenbezogene Fracht in							
	Boden F_{Bi}		Gewässer F_{Oi}		Klärschlamm F_{KSi}		Luft F_{AMi}	
	[kg/a]	[%]	[kg/a]	[%]	[kg/a]	[%]	[kg/a]	[%]
Kupfer	*1051 ± 13%*	*72*	*167* ± 21%	*11*	*159* ± 30%	*11*	*81* ± 35%	*6*
Zink	2387 ± *13%*	*50*	1421 ± 21%	*30*	744 ± 30%	*16*	*178* ± 35%	*4*
Blei	62 ± *13%*	*27*	*87* ± 21%	*38*	74 ± 30%	*32*	*9* ± 35%	*4*
Cadmium	0,59 ± *13%*	*51*	0,3 ± 21%	*26*	0,25 ± 30%	*21*	*0,03* ± 35%	*2*
	Einwohnerbezogene Fracht von Oberflächen in							
	Boden [g/EW*a]		**Gewässer** [g/EW*a]		**Klärschlamm** [g/EW*a]		**Luft** [g/EW*a]	
Kupfer	*18*		*2,9*		*2,7*		*1,4*	
Zink	*41*		*25*		*13*		*3,1*	
Blei	*1*		*1,5*		*1,3*		*0,2*	
Cadmium	*0,01*		*0,01*		*0*		*0*	

Der größte Anteil der Kupferemissionen gelangt direkt in den Boden

Bisherige Studien konzentrierten sich hauptsächlich auf die Schwermetallfracht aus diffusen Quellen in die Kanalisation. Ziel dieser Studien war es, die Herkunft der in Abwasserreinigungsanlagen ankommenden Schwermetallfrachten zu erklären. Die gegenwärtige Arbeit zeigt, dass die Frachten aus Mobilien und Immobilien in den Boden beispielsweise für Kupfer wesentlich höher als jene in die Kanalisation sind. Vergleicht man bei Kupfer die Einträge in den Boden mit jenen in die Kanalisation, so übersteigen die Frachten in den Boden diese um das Dreifache. Im Fall von Zink und Cadmium sind sie gleich groß, bei Blei halb so groß.

6.2.3 Vergleich der Ergebnisse

Es gibt wenige Studien, die sich mit Schwermetallemissionen aus diffusen Quellen in Städten beschäftigen. Die umfangreichsten wurden über Stockholm durchgeführt, diese sollen zum Vergleich mit den in dieser Arbeit erhaltenen Ergebnissen herangezogen werden.

Sörme ermittelte die Frachten im Zulauf der Stockholmer Kläranlage Henriksdal (Sörme und Lagerkvist 2002). Im Einzugsgebiet leben etwa 630.000 Einwohner. Die Fracht zur Villacher Kläranlage St. Agathen (im Bezirk Villach Stadt leben 57.500 Einwohner) setzt sich aus den oberflächenbezogenen und den nicht oberflächenbezogenen Emissionen in die Kanalisation (Tabelle 24) zusammen. Die Fracht aus der atmosphärischen Deposition wird nicht ermittelt.

In Tabelle 36 werden die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Zusätzlich sind noch die oberflächenbezogenen Zulauffrachten getrennt angeführt.

Tabelle 36: Vergleich der Zulauffracht der Kläranlage Henriksdal in Stockholm mit jener der Kläranlage St. Agathen in Villach

	Henriksdal		**Villach St. Agathen**			
	gesamt [1)]		gesamt [2)]		oberflächenbezogen	
	[kg/a]	[g/EW*a]	[kg/a]	[g/EW*a]	[kg/a]	[g/EW*a]
Kupfer	*5560*	***8,8***	*538*	***9,4***	*200*	***3,5***
Zink	*10300*	***16,3***	*2662*	***46,3***	*1240*	***21,6***
Blei	*680*	***1,1***	*289*	***5,0***	*147*	***2,6***
Cadmium	*25,6*	***0,04***	*5,4*	***0,1***	*0,31*	***0,005***

[1)] …. Sörme und Lagerkvist (2002)
[2)] …. oberflächenbezogenen und nicht oberflächenbezogenen Emissionen

Die einwohnerspezifischen Frachten von Kupfer sind annähernd gleich groß (etwa 9 g/EW*a). Hierbei sei festgehalten, dass in Villach kaum Dachflächen aus Kupfer vorkommen, dies ist vor allem für Stadtzentren sehr untypisch. Die einwohnerspezifischen Bleifrachten in Villach sind etwa fünfmal höher als jene in Stockholm. In Stockholm gibt es keine Wasserleitungen aus Blei, dies ist jedoch eine ganz bedeutende Emissionsquelle in Villach. Nahe Villach liegt Arnoldstein mit bleiverarbeitender Industrie, die vor allem in der Vergangenheit beträchtliche Emissionen verursachte. Die geogene Hintergrundkonzentration von Blei ist in dieser Region überdurchschnittlich hoch. Die einwohnerbezogene Zinkfracht übersteigt jene aus Stockholm um das Dreifache. Ein Grund könnte das starke Verkehrsaufkommen im Bezirk Villach Stadt sein. Dies liegt daran, dass in Villach Süd- und Tauernautobahn zusammenkommen und der Verkehr nach Italien und Slowenien an der Stadt vorbeiführt. Die Emissionen aus den Reifenlaufflächen der Kraftfahrzeuge sind nämlich neben den Gebäudeoberflächen die bedeutendsten Zinkemissionsquellen. Nachdem in Villach kaum Kupferdachflächen vorkommen ist der Schluss naheliegend, dass hier verstärkt verzinkte Stahlteile als Alternative herangezogen werden. Auch das könnte eine Ursache für die im Vergleich höheren Zinkfrachten im Kläranlagenzulauf sein. Die Cadmiumfracht ist etwa doppelt so groß wie in Stockholm. Grund dafür ist der Umstand, dass Cadmium als Zinkverunreinigung vorkommt und mit Zink gemeinsam emittiert wird.

6.2.4 Bewertung

Oberflächenbezogene Emissionen pro Einwohner

Neben den oberflächenbezogenen Emissionen werden im Bezirk Villach Stadt über den Hausbrand, die Verbrennung von Kraftstoffen und die Haushaltsabwässer Schwermetalle freigesetzt. Die oberflächenbezogenen Emissionen machen etwa 80%, 75% und 60% der gesamten Kupfer-, Zink- und Bleiemissionen eines Einwohners von Villach aus (Tabelle 37).
Zink und Kupfer besitzen die höchsten oberflächenbezogenen Emissionen pro Kopf. Mit etwa 25 g/EW*a und über 80 g/EW*a wird deutlich mehr Kupfer und Zink als Blei (4 g/EW*a) emittiert. Im Gegensatz dazu liegt die einwohnerspezifische Cadmiumemission von Oberflächen um zwei bis drei Größenordnungen niedriger.

Tabelle 37: Oberflächenbezogene Emissionen pro Einwohner

	Gesamte Emission [1] [kg/a]	**Oberflächenbezogene Emissionen** [kg/a]	**Oberflächenbezogene Emissionen pro Einwohner** [g/EW*a]	**Anteil oberflächenbezogener Emissionen an den gesamten Emissionen** [1] [-]
Kupfer	*1837* ± 9%	*1457* ±12%	*25*	*0,79* ± 5
Zink	*6263* ± 9%	*4728* ±12%	*82*	*0,75* ± 5
Blei	*382* ± 9%	231±12%	*4*	*0,60* ± 5
Cadmium	*7* ± 9%	*1,1* ±12%	*0,02*	*0,15* ± 5

[1]…. Gesamte Emission = Oberflächenb. Emissionen + Hausbrand + Treibstoff + Kommunales Abwasser

Das kommunale Abwasser ist bei zukünftigen Cadmiumbilanzen zu inkludieren. Bei Cadmium sind Oberflächen nur für 15% der gesamten Emissionen verantwortlich. Das kommunale Abwasser emittiert 5,1 kg Cadmium in die Kanalisation, dies ist etwa die fünffache Menge der gesamten Emissionen von Oberflächen im Bezirk Villach Stadt.

Anteil an erfassten Stoffflüssen

Im Bezirk Villach Stadt werden etwa 10, 15, 30 und 20 % der Zink-, Kupfer-, Blei- und Cadmiumfrachten erfasst und deponiert. Es handelt sich dabei um jenen Anteil der Stoffflüsse, der in den Klärschlamm gelangt.
Primäres Ziel ist, die Emissionen von Oberflächen bestmöglich zu minimieren. Ist dies nicht möglich, so muss ein möglichst hoher Anteil der Schwermetallfracht im urbanen System erfasst werden, um die Belastung der Gewässer und Böden minimieren zu können. Sind durch die Stadtverwaltung die Emissionsquellen nicht beeinflussbar, so ist die Kanalisation so

auszubilden, dass der erfasste Anteil maximal wird. Die Schwermetalle lassen sich damit im Klärschlamm konzentrieren und dieser wird deponiert.

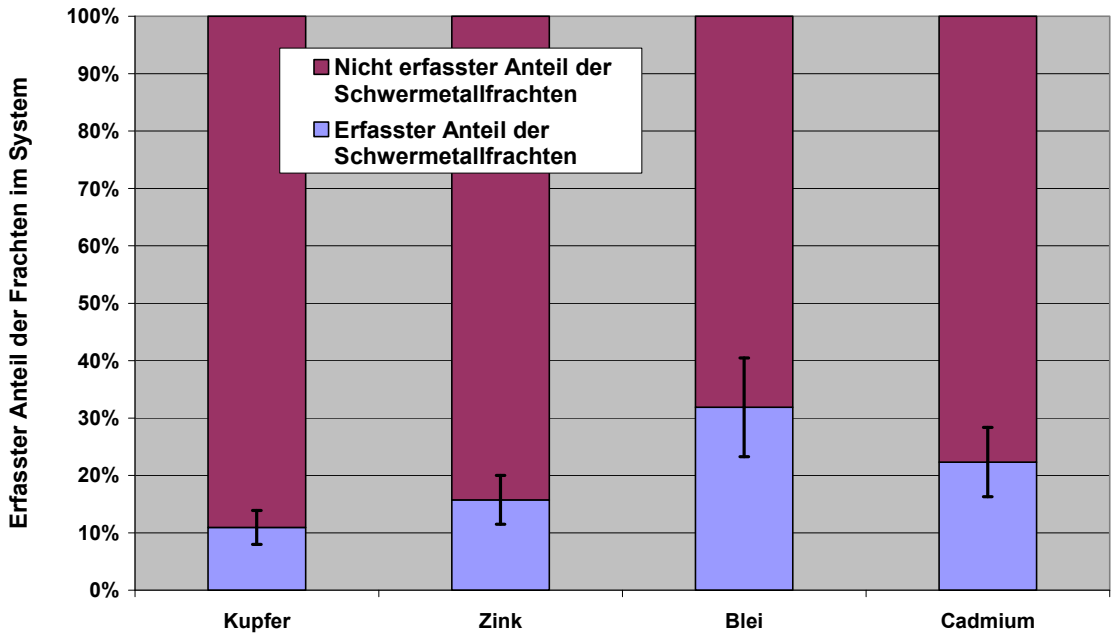


Abbildung 36: Erfasster Anteil der Schwermetallfrachten im Bezirk Villach Stadt

Im Vergleich unterschiedlicher Städte kann der Fall eintreten, dass in jenen mit hohen einwohnerspezifischen Emissionen und einem hohen Anteil an erfassten Stoffflüssen die Belastung der Böden und Gewässer geringer als in Städten mit niedrigeren Emissionen und einem geringeren Anteil an erfassten Stoffflüssen ist.

Eintragsfracht, Eintragsfläche und Verdopplungszeitraum in Sickeranlagen

An Bauwerken kommt es bei dezentraler Versickerung des Regenwassers in Sickeranlagen zu Schwermetalleinträgen in den Boden. Die Fracht akkumuliert entweder in der Infiltrationsschicht von Sickerschächten oder in der obersten Bodenschicht (0-10 cm) von Sickermulden. Im Fall von Zink und Cadmium erreichen die flächenspezifischen Einträge in BBKL 1 und 2 Werte von rund 10 g/m²*a respektive 3 mg/m²*a. Bezogen auf die Referenzwerte (1999) ergibt sich daraus eine Verdopplung der Zinkgehalte im Boden innerhalb von 2 Jahren (Abbildung 37) und der Cadmiumgehalte innerhalb von 14 Jahren. Unter dem Referenzwert (1999) wird der mittlere Schwermetallgehalt des unbelasteten

Bodens in Villach, ermittelt durch die Auswertung von Messwerten für Grünland aus der Kärntner Bodenzustandsinventur (Amt der Kärntner Landesregierung 1999), verstanden.

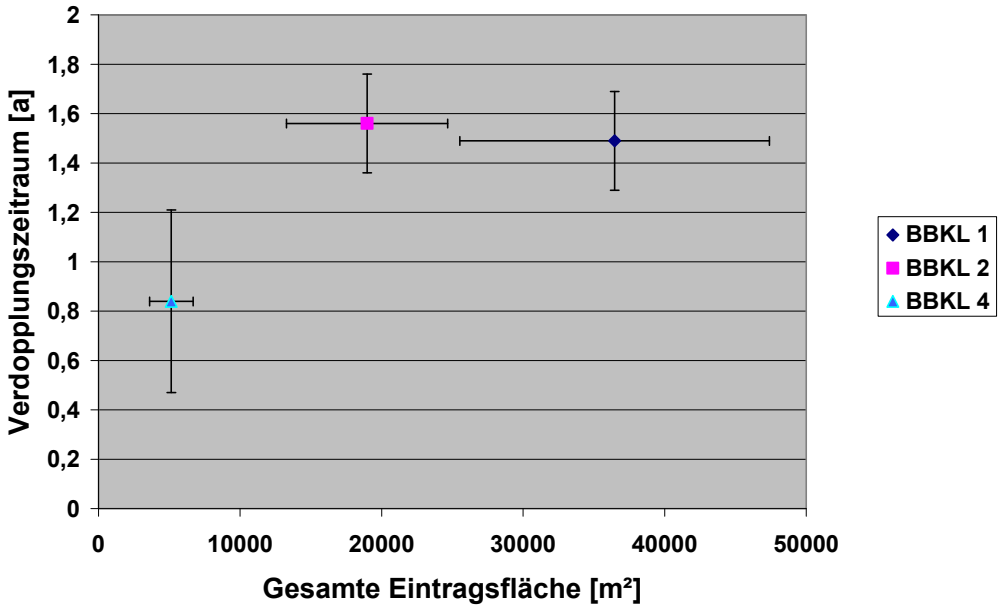


Abbildung 37: Verdopplungszeitraum von Zink in Sickeranlagen unterschiedlicher BBKLen

Grenzwerte

In Kärnten bestehen für den Einsatz von Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Böden mit einem pH-Wert zwischen 5,5 und 6,5 gesetzlich vorgeschriebene Grenzwerte von 150 mg/kg für Zink, 50 mg/kg für Kupfer, 70 mg/kg für Blei und 1 mg/kg für Cadmium. Auf Böden, die eine höhere Schwermetallkonzentration aufweisen, darf kein Klärschlamm aufgebracht werden (hierbei ist anzumerken, dass bereits aus der Atmosphäre erhebliche Mengen an Schwermetallen auf dem Boden sedimentieren). Es existieren in Kärnten keine Richtwerte und keine Grenzwerte einzuhaltender Schwermetallkonzentrationen in urbane Böden. Aus diesem Grund werden die für Klärschlamm geltenden Grenzwerte zur Beurteilung der Relevanz von Schwermetalleinträgen herangezogen.

In BBKL 1 und 2 werden diese Werte, ausgehend von den Referenzwerten (1999), mit den oben angeführten flächenspezifischen Einträgen für Zink nach einem halben Jahr (Abbildung 38) und für Cadmium nach etwa 30 Jahren überschritten (Unsicherheit ±100%).

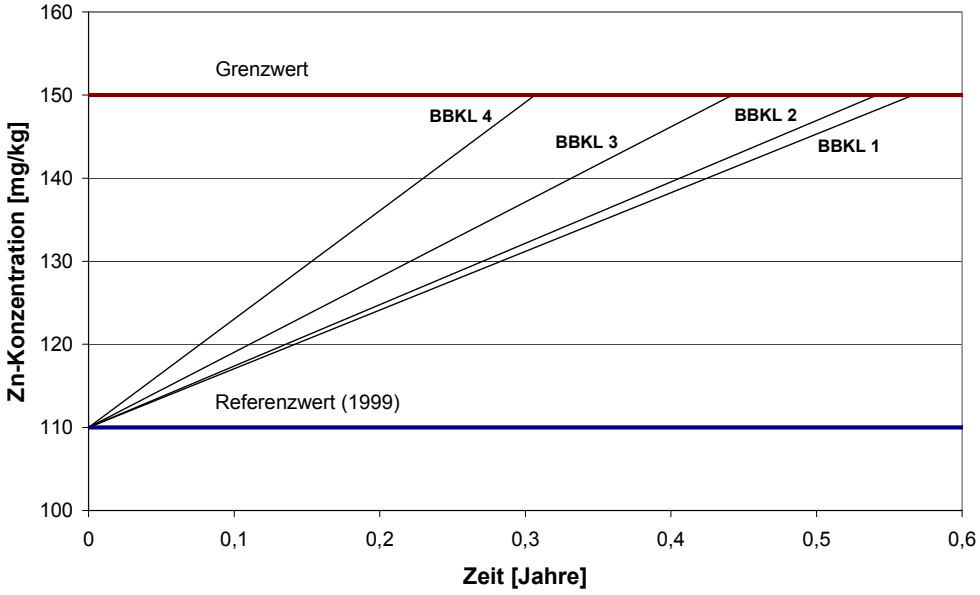


Abbildung 38: Berechneter Zeitraum bis zur Grenzwertüberschreitung des Zinkgehaltes in Sickeranlagen

Konzentrierung oberflächenbezogener Emissionen in Sickeranlagen von Gebäuden

Durch natürliche wie auch technische Prozesse können Emissionen von Oberflächen oftmals wieder gesammelt und danach konzentriert in einer Senke akkumuliert werden. Ein Beispiel dafür ist die punktförmige Einleitung und Versickerung von Dachabwässern in Sickeranlagen. Auf der Dachfläche sammeln sich durch trockene Deposition zwischen Regenereignissen Schwermetalle. Gemeinsam mit den Korrosionsprodukten und den Metallfrachten der nassen Deposition werden diese Schwermetalle im Falle eines Regenereignisses durch das Regenwasser abgespült, über die Dachrinnen und Fallrohre abgeführt und in Sickeranlagen eingetragen. Durch diesen Prozess kommt es zu einer Konzentrierung diffus abgelagerter Metallfrachten aus der Atmosphäre auf der Dachfläche und durch Oberflächen verursachte Emissionen der Dachhaut auf einer kleinen Fläche im Boden.

Relevanz von oberflächenbezogenen Emissionen

Diffuse Schwermetalleinträge in Böden und Gewässer finden überall statt. Ob es durch Einträge zu langfristig problematischen Akkumulationen kommt, hängt von den flächenspezifischen Einträgen ab. Sind die flächenspezifischen Einträge sehr hoch und damit die Verdopplungszeiträume der lokalen Referenzwerte sehr kurz, so können, wie im Fall von Sickeranlagen an Gebäuden in Villach gezeigt wurde, auf lange Sicht starke Schwermetallanreicherungen auftreten.

6.3 Folgerungen und Empfehlungen

6.3.1 Folgerungen für die Praxis

Langlebige Oberflächen aus schwermetallfreien Produkten gestalten

Oberflächen von Immobilien, beispielsweise Dachmaterialien oder Wasserleitungen, besitzen eine lange Lebensdauer und emittieren Schwermetalle über ihre gesamte Lebensdauer. Die Substitution dieser Güter ist mit hohen technischen und monetären Aufwendungen verbunden. Darum sollten zukünftig keine zink-, kupfer- und bleihaltigen Dachmaterialien in der Stadt Villach verwendet werden.

Erfassten Anteil der Schwermetallfracht maximieren

Die Verwaltung der Stadt Villach hat keine Möglichkeit die Emissionen kurzlebiger Güter, beispielsweise von Bremsbelägen und Reifenlaufflächen, genauso wie jene der langlebigen Güter zu verhindern. Sie kann nur deren Weg in die Umwelt regeln. Große Anteile der durch die Kanalisation erfassten Schwermetallfracht gelangt über Überläufe direkt in die Drau. 33% der Zinkfracht und etwa 50% der Kupfer- und Bleifracht in die Kanalisation kann im Klärschlamm fixiert und über diesen auf der Deponie in Spital an der Drau in eine geeignete Senke geführt werden. Können Emissionen nicht verhindert werden, so ist der erfasste Anteil der Schwermetalle im System zu maximieren.

In der Stadt Villach sollte durch Kanalraumbewirtschaftung oder durch Anlagen zur Zwischenspeicherung von Mischwasser die Fracht zur Kläranlage und damit der über den Klärschlamm erfasste Anteil maximiert werden. Durch diese Maßnahme lässt sich die Belastung der Drau minimieren.

Messungen im Klärschlamm und geklärten Abwasser

In der Kläranlage besteht die beste Möglichkeit, die berechneten Schwermetallflüsse durch Messungen im System zu überprüfen. Dazu sind Messungen im Klärschlamm und gereinigten Abwasser erforderlich. Um die mittlere Schwermetallkonzentration über ein Jahr erfassen zu können, sollten Untersuchungen bei unterschiedlicher hydraulischer Belastung der Kläranlage (Trockenwetter, Regenwetter) an Klärschlamm und gereinigtem Abwasser durchgeführt werden.

Dezentrale Versickerung mit Filteranlagen

In Deutschland, Österreich und der Schweiz ist in den letzten Jahren eine Änderung der Entwässerungsstrategie im ländlichen Raum weg von der kanalisierten Ableitung von Dachflächenabwässern hin zur dezentralen Versickerung erkennbar. Auf den Dachflächen lagern sich über trockene und nasse Deposition Schwermetalle aus der Atmosphäre ab. Außerdem werden über die Korrosion von metallischen Dachflächen Zink, Kupfer und Blei freigesetzt. Durch eine dezentrale Versickerung kommt es in den Sickeranlagen (Sickermulden und Sickerschächten) zu Akkumulationen. Die Verdopplungszeiträume liegen für Zink in Sickermulden und Sickerschächten in allen Bebauungsklassen unter zwei Jahren. Die Sickerflächen werden damit in kurzen Zeitspannen mit Zink, Kupfer, Blei und Cadmium verunreinigt. Zumindest bei metallischen Deckungen sind Filteranlagen vorzusehen, die diese Schwermetallakkumulation im Boden verhindert. In Villach kann durch den Einbau von Filteranlagen bei dezentraler Versickerung der Dachabwässer die Belastung des Bodens mit Zink jährlich um 625 kg verringert werden.

6.3.2 Empfehlungen

Empfehlungen an Unternehmer

- Verwendung langlebiger, zink-, kupfer- und bleifreier Beschichtungen zur Ausbildung von Dachinstallationen.
- Entwicklung von neuen konstruktiven Lösungen zur Vermeidung von schwermetallhaltigen, korrosionsgefährdeten Dachinstallationen bei der Gestaltung der Dachhaut und deren Erprobung in Pilotprojekten.
- Entwicklung von Filtersystemen zur Reinigung zink- und kupferhältiger Dachwässer an bestehenden Bauten und von Filteranlagen für Neubauten.
- Entwicklung zinkfreier Reifenlaufflächen und kupferfreier Bremsbeläge.

Empfehlungen an Behörden und Politik

- Verhinderung der weiteren Zersiedelung im Bezirk Villach Stadt.
  Zersiedelte Strukturen erfordern zusätzliche Infrastruktureinrichtungen und steigern das Verkehrsaufkommen. Dadurch kommt es auch zu steigenden Schwermetallemissionen.

- Kopplung der Wohnbauförderung an die Wahl der Dachhaut.
  Begünstigt werden solche Lösungen, die keine großflächigen verzinkte oder verkupferte Oberflächen enthalten. Damit soll die Verwendung schwermetallfreier Bauteile gefördert und das Bewusstsein in der Bevölkerung für dieses Thema gestärkt werden.
- Beschränkung von metallischen Dachflächen bei Neubauten.

Empfehlungen an Private

- Substitution von verbleiten Oberflächen durch schwermetallfreie Produkte im Zuge von Renovierungsarbeiten.
- Verzicht auf großflächige, metallische Dachdeckungen bei Neubauten.
- Austausch von Bleileitungen in Wasserver- und Abwasserentsorgungseinrichtungen in Altbauten im Zuge von Renovierungen und Umbauten.
- Errichtung von Filteranlagen bei dezentraler Versickerung der Dachabwässer, sollte die Dachhaut aus metallischer Deckung bestehen.

7 ANHANG

7.1 Analyse der Stoffflüsse

7.1.1 Subsystem Immobilien

In Tabelle 38 findet sich eine Übersicht zu mittleren Abschwemmraten kupfer- und zinkhaltiger Dachmaterialien.

Tabelle 38: Abschwemmraten zink- und kupferhaltiger Materialien

	Abschwemmrate [g/m²*a]	**Ort der Messung**	**Quelle**
Kupferhaltige Materialien			
Kupfer	1,3	Stockholm	He (2000)
Kupfer	1,3	Dübendorf (Schweiz)	Faller (2003)
Kupfer	1,2	St. Denis	Priggemeyer (2003)
Zinkhaltige Materialien			
Zink	3,1	Stockholm	He (2000)
Zink grau	3,2	Dübendorf (Schweiz)	Faller (2003)
Titanium-Zink	2,6	Dübendorf (Schweiz)	Faller (2003)
Galvanisierter Stahl	2,74	Stockholm	Persson (2000)
Galvanisierter Stahl	2,4	Dübendorf (Schweiz)	Faller (2003)
Sonstige Oberflächenmaterialien			
Anstrich (Alkydfarbe Zinkphosphat enthaltend)	0,72 (Zn)	Stockholm	Persson (2000)

7.1.1.1 Prozess Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen

In diesem Kapitel werden die Emissionen aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen im Bezirk Villach Stadt bestimmt.

(i) Ermittlung der metallischen Rohroberflächen

Werte für die durchschnittliche Rohrlänge und den Rohrdurchmesser der Wasserleitungen eines Einfamilienhauses werden durch Interviews mit Installateurbetrieben in Villach ermittelt. Dieses Einfamilienhaus wird als das ausgewählte Referenzhaus bezeichnet. Aus den Daten kann die mittlere Rohroberfläche berechnet werden. Die Gebäudegrundfläche und Geschosszahl eines durchschnittlichen Einfamilienhauses ergeben sich aus den Interviews und eigenen Annahmen.

Mittlere Werte eines Einfamilienhauses:

Mittlere Rohrlänge	69 m
Mittlerer Rohrdurchmesser	19 mm
Mittlere Rohroberfläche	4 m²
Mittlere Gebäudegrundfläche	170 m²
Mittlere Geschosszahl	2

(ii) Abschwemmraten

In Villach kommen hauptsächlich Kupferrohre, verzinkte Rohre, Bleirohre, Polyethylen-, Polypropylen- und Polyvinylchloridrohre zum Einsatz. Im Hinblick auf die Verteilung der verwendeten Materialmengen muss zwischen Alt- (vor 1950) und Neubauten (1950 - 2000) unterschieden werden.

Zur Bestimmung der Abschwemmrate unterschiedlicher Materialien wird eine Studie von Persson und Kucera herangezogen (Persson und Kucera, 1996). Die Abschwemmraten sind der Tabelle 39 zu entnehmen.

Tabelle 39: Abschwemmrate (a_{Ri}) unterschiedlicher Materialien

Rohrmaterial	Kupfer[1] *[g/m².a]*	Zink[1] *[g/m².a]*	Blei *[g/m².a]*
Kupferrohre	4		
Verzinkte Rohre		14	
Bleirohre			4,5

[1] Persson & Kucera, 1996

Bauwerksspezifische Faktoren

Der Geschossfaktor, der Bauwerksaltersfaktor und der Gebäudeflächenanteilsfaktor sind bauwerksspezifische Faktoren (siehe Tabelle 40). Der mittlere Geschossfaktor und der Bauwerksaltersfaktor konnte bei den Gebäudeanalysen ermittelt werden. Der Gebäudeflächenanteilsfaktor stammt aus Tabelle 6.

Tabelle 40: Bauwerksspezifische Faktoren

BBKL	Geschoss-faktor f_{Gj}	Bauwerksaltersfaktor f_{Bjt}		Gebäudeflächen-anteilsfaktor f_{Aj}
	[-]	*0-50 Jahre*	*über 50 Jahre*	*[ha/ha]*
BBKL 1	1,00	0,75	0,25	0,079
BBKL 2	1,13	0,25	0,75	0,156
BBKL 3	1,50	0,71	0,29	0,323
BBKL 4	0,75	1,00	0,00	0,319

Materialspezifischer Faktor

In Tabelle 41 sind die Materialienverteilungen in Neu- und Altbauten im Bezirk Villach Stadt aufgelistet. Diese Daten wurden durch Interviews mit Fachleuten von Installateurbetrieben ermittelt.

Tabelle 41:Materialspezifischer Faktor(f_{Mit})

Rohrmaterial	Materialspezifischer Faktor	
	Neubau (0-50 Jahre)	*Altbau (über 50 Jahre)*
Kupfer (Cu)	0,01	0,03
Zink (Zn)	0,27	0,56
Blei (Pb)	0,18	0,41
Kunststoff	0,54	0,00

(iii) Flächenspezifische Emission

Die flächenspezifische Emission einer Bebauungsklasse ergibt sich aus Formel 13 und Formel 14. Die Ergebnisse für die vier Bebauungsklassen finden sich in Tabelle 42. Die flächenspezifische Zinkemission liegt höher als jene der anderen Metalle. In BBKL 3 sind die flächenspezifischen Emissionen aller Metalle etwa doppelt so groß wie in BBKL 2 und 4 und etwa sechs- bis siebenmal größer als in BBKL 1.

Tabelle 42:Flächenspezifische Emission (e_{Rij}) der Bebauungsklassen

BBKL	Kupfer [mg/m².a]	Zink [mg/m².a]	Blei [mg/m².a]	Cadmium [mg/m².a]
BBKL 1	*0,1*	*9*	*2*	*0,003*
BBKL 2	*0,5*	*28*	*7*	*0,008*
BBKL 3	*0,9*	*56*	*13*	*0,017*
BBKL 4	*0,3*	*21*	*4*	*0,006*

(iv) Gesamte Emission aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen

Mit Hilfe der vorhandenen Daten kann die Berechnung der gesamten Emission der einzelnen Bebauungsklassen durch Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen durchgeführt werden. Die gesamte Emission erhält man mit Formel 15 und Formel 16, die Ergebnisse sind in Tabelle 43 zusammengestellt. Die gesamte Zinkemission aus Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen beläuft sich auf 545 kg/a, die Bleiemission auf 126 kg/a und die Kupferemission auf 9 kg/a. Die Aufteilung der Emissionen auf die einzelnen Bebauungsklassen zeigt, dass rund 50% aus BBKL 2 bzw. rund 25% aus BBKL 1 stammen. BBKL 4 besteht hauptsächlich aus modernen Bauwerken. In diesen wurden vor allem Kunststoffrohre verwendet, weshalb die Schwermetallemissionen sehr gering sind.

Tabelle 43: Gesamte Emission (E_{Ri}) der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen

BBKL	**Kupfer** [kg/a]	**Zink** [kg/a]	**Blei** [kg/a]	**Cadmium** [g/a]
BBKL 1	*3*	*158*	*35*	*48*
BBKL 2	*5*	*316*	*75*	*95*
BBKL 3	*1*	*43*	*10*	*13*
BBKL 4	*0*	*28*	*6*	*8*
Summe	***9 ± 41%***	***545 ± 41%***	***126 ± 41%***	***164 ± 41%***

7.1.1.2 Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge

Dieser Prozess lässt sich in die Teile „Infrastruktur Straßenfahrzeuge“ (Infrastruktur Straßen, Fahrbahn) und „Infrastruktur Schienenfahrzeuge“ (Oberleitung, Fahrdraht) aufteilen.

(i) Infrastruktur Straßenfahrzeuge

Leit- und Sicherheitseinrichtungen sowie Brücken

Verzinkte und lackierte Oberflächen verschiedener Infrastrukturelemente sind in hohem Maße Wind- und Wasserangriff (Regen- bzw. Spritzwasser) ausgesetzt. Zur Infrastruktur zählen Einzelelemente (Verkehrszeichenträger, Ampelanlagen, Leittafeln und Straßenbeleuchtungen) sowie Linienelemente (Leitschienen und Lärmschutzwände). Neben diesen Leit-, Sicherheits- und Schutzeinrichtungen werden in diesem Kapitel auch Brückenkonstruktionen (Geländer) als Straßeninfrastruktur behandelt. Zur Abschätzung der Metallemissionen ist sowohl die Ermittlung der exponierten Oberflächen der Infrastrukturelemente als auch die Bestimmung der Anzahl entlang der gesamten Verkehrswege innerhalb des Untersuchungsgebietes erforderlich.

Zu diesem Zweck wird wie folgt vorgegangen:

Einteilung der Verkehrswege in Kategorien und Abschätzung der Straßenlängen

Um den unterschiedlichen Ausstattungen der Bundes-, Landes- und Gemeindestraßen sowie der Autobahnen Rechnung zu tragen, wird das gesamte Straßennetz innerhalb des Bezirks Villach Stadt in verschiedene Kategorien unterteilt. Da davon auszugehen ist, dass zwischen ländlichen und innerstädtischen Bereichen ein erheblicher Unterschied in Art und Anzahl der Infrastruktureinrichtungen besteht, müssen die Verkehrswege dieser beiden Bereiche getrennt behandelt werden.

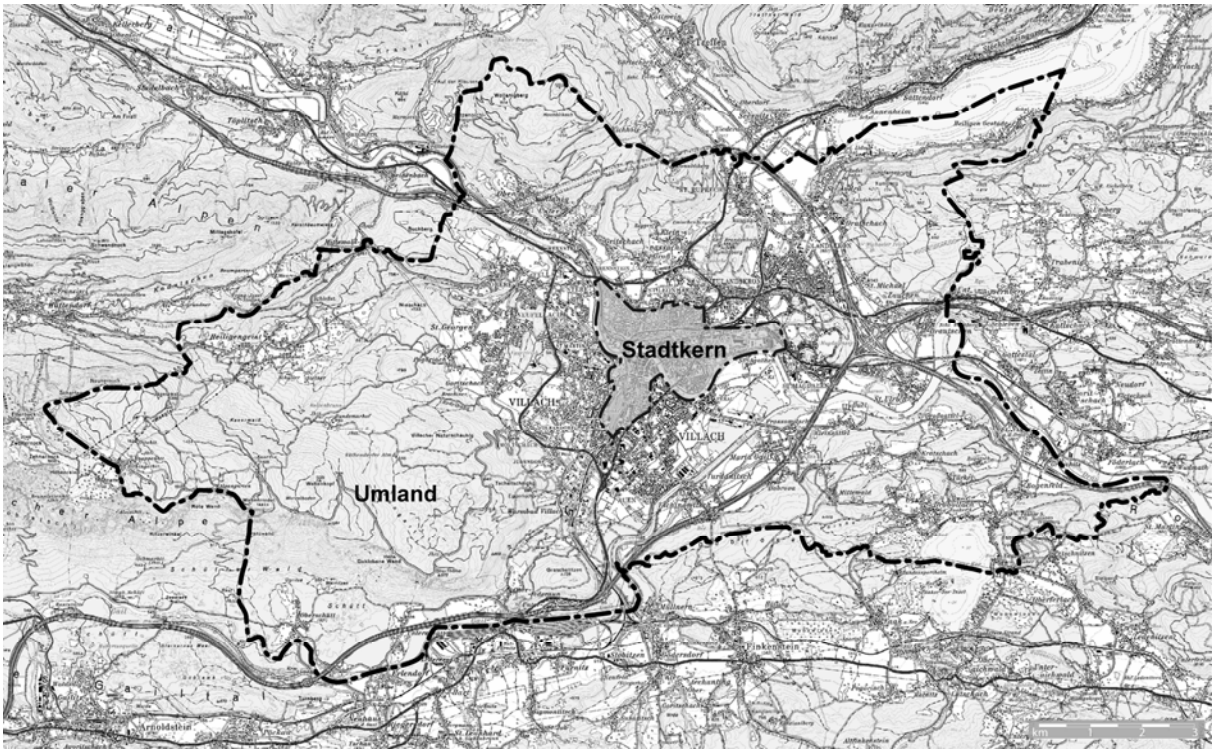


Abbildung 39: Aufteilung des Bezirks Villach Stadt in Stadtkern und Umland

Die Ermittlung der Straßenlängen erfolgt analog zur Bestimmung der Gebäudegrundflächen. Für ländliche und urbane Bereiche werden einige Referenzgebiete mit der Größe von 1 km² festgelegt und innerhalb dieser die Straßenlängen für jede Kategorie ermittelt. Über die bebaute Fläche kann auf die Gesamtlängen hochgerechnet werden. Die Längen sonstiger Überlandstraßen (Bundes-, Landes- und Gemeindestraßen) sowie der Autobahnabschnitte werden separat ermittelt. Als Basis für diese grafische Abschätzung dient die Österreichische Karte (ÖK 50) sowie das Kärntner Geografische Informationssystem (KAGIS 2005).

Damit ergibt sich für das Villacher Straßennetz die in Tabelle 44 beschriebene Aufteilung. In Abbildung 39 ist ersichtlich, was unter dem Stadtkern Villach und unter dem Umland verstanden wird.

Tabelle 44: Straßenlängen nach Kategorien im Bezirk Villach Stadt

Straßenkategorien und deren Längen [km]									
Untersuchungsgebiet	**Autobahn [1)]**		**Landesstraßen [2)]**			**Gemeindestraßen [3)]**		**Wege [3)]**	**Gesamt**
	Autobahn	Auffahrten	"B"	"L"	Auffahrten	"a"	"b"		
Stadtkern Villach	0	0	3	0	0	17	43	3	**66**
Umland	32	8	31	35	5	85	220	17	**433**
Bezirk Villach-Stadt	32	8	34	35	5	102	263	20	**498**

Quellen:
[1)] ….. KAGIS (Autobahnkilometrierung)
[2)] ….. Auskunft Straßenmeisterei Villach Süd bzw. Feistritz/Drau
[3)] ….. eigene Abschätzung

Festlegung von „Standard"-Infrastrukturelementen und Berechnung der Oberflächen

Die verschiedenen Infrastrukturelemente, insbesondere Verkehrszeichenträger, aber auch Leiteinrichtungen und Ampelanlagen, treten in einer Vielzahl unterschiedlichster Ausführungen (Größe und Geometrie) auf. Da nicht alle diese Variationen erfassbar sind, werden „Standard"-Elemente definiert und deren Oberflächen abgeschätzt. Grundlage dafür bilden die Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (FSV 2002), in welchen Anforderungen an die Straßenausrüstung festgelegt sind. Die Abmessungen für Sicherheitsleitschienen wurden Typenblättern der VOEST Alpine (Voest Alpine 2000) entnommen, jene für Lärmschutzwände und Brückengeländer entstammen eigenen Abschätzungen. Die Punkt- und Linienelemente können somit entsprechend der in Tabelle 45 beschriebenen Aufteilung festgelegt werden.

Tabelle 45:Festlegung der Infrastrukturelemente für die Straßenkategorien

Infrastruktureinrichtungen je Straßenkategorie *)								
Infrastruktur	**Autobahn**		**Landesstraßen**			**Gemeindestraßen**		**Wege**
	Autobahn	Auffahrten	"B"	"L"	Auffahrten	"a"	"b"	
Punktuelle Elemente								
Stadtkern Villach								
Leittafeln								
VZ-Träger (Größe 1-8)			✓			✓	✓	✓
Beleuchtung			✓			✓	✓	✓
Ampelanlagen			✓			✓		
Umland								
Leittafeln		✓			✓			
VZ-Träger (Größe 1-8)	✓		✓	✓		✓	✓	✓
Beleuchtung	✓	✓	✓	✓		✓		
Ampelanlagen			✓			(✓)		
Linienelemente								
Stadtkern Villach								
Leitschienen (System 1-5)			✓			✓		
Lärmschutzwände			✓					
Brücken			✓			✓	✓	
Umland								
Leitschienen (System 1-5)	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Lärmschutzwände	✓	✓	✓	✓	✓			
Brücken	✓		✓	✓		✓		

*) ….. grau unterlegt = Straßenkategorie im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden

Zuordnung einer „charakteristischen Ausstattung“ zu jeder Straßenkategorie

Stichprobenhafte Kontrolle der getroffenen Annahmen vor Ort

Die bestehende Infrastruktur einzelner Straßenabschnitte wird dokumentiert, um die getroffenen Annahmen auf ihre Plausibilität hin überprüfen zu können.

Berechnung der Metallfreisetzung von verzinkten und lackierten Oberflächen

Der Ermittlung der Emissionen aus der Verkehrsinfrastruktur werden folgende Zinkabschwemmraten zu Grunde gelegt (vgl. Tabelle 9):

Verzinkte Oberflächen: 3,1 g/m².a

Lackierte Oberflächen: 0,7 g/m².a

Für den Bezirk Villach Stadt können somit Zinkemissionen von verzinkten sowie lackierten Flächen aus der Verkehrsinfrastruktur von rund 400 kg/a abgeschätzt werden. Bei einem Cadmiumanteil von rund 0,03 % (Tabelle 9) ergibt sich somit eine Cadmiumemission von rund 0,12 kg/a.

Knapp 90 % der gesamten Zinkemissionen entfallen dabei auf die ländlichen Gebiete und hier wiederum mehr als 50 % auf Zinkabschwemmungen von Leitschienenoberflächen. Die Oberflächen von Beleuchtungsmasten stellen einen Anteil von knapp einem Viertel an diesen Emissionen, während die zahlenmäßig am häufigsten vertretenen Infrastrukturelemente wie

Verkehrszeichenträger oder Ampelanlagen (aufgrund der kleinen Oberflächen) nur vergleichsweise geringe Emissionen verursachen.

Tabelle 46: Infrastrukturemissionen Bezirk Villach Stadt - Stadtkern

Bezirk Villach Stadt Stadtkern		**Straßentyp**																**Summen**	
		Autobahn				**Landesstraßen**						**Gemeindestraßen**				**Wege**			
		Autobahn		Auf-/abfahrten		Landesstraße "B"		Landesstraße "L"		Auf-/abfahrten		Kategorie "a"		Kategorie "b"				absolut	Anteil
Länge	**km**	**0,00**		**0,00**		**2,50**		**0,00**		**0,00**		**17,00**		**43,00**		**3,00**			
Punktuelle Elemente		sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]		
Leittafeln																			
Größe 1	0,36 m²/ST	0,0	0	0,0	0		0		0		0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Größe 2	1,53 m²/ST	0,0	0	0,0	0		0		0		0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0**	**0,00%**
VZ-Träger																			
Größe 1 (einfaches VZ)	0,60 m²/ST	0,0	0	0,0	0	12,0	18	12,0	0	0,0	0	16,0	162	12,0	308	8,0	14	503	3,81%
Größe 2 (Geschwindigkeit)	1,37 m²/ST	0,0	0	0,0	0	2,0	7	2,0	0	0,0	0	0,3	6	0,1	6	0,1	0	19	0,14%
Größe 3 (Ortschild)	1,58 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,5	2	0,5	0	0,0	0	0,3	7	0,1	7	0,0	0	15	0,12%
Größe 4 (Wegweiser 1-zeilig)	1,41 m²/ST	0,0	0	0,0	0	8,0	28	8,0	0	0,0	0	2,0	48	1,0	61	0,0	0	137	1,04%
Größe 5 (Wegweiser 2-zeilig)	1,62 m²/ST	0,0	0	0,0	0	4,0	16	4,0	0	0,0	0	2,0	55	1,0	70	0,0	0	141	1,07%
Größe 6 (AB, SS - 2 Steher)	2,59 m²/ST	0,0	0	0,0	0	2,0	13	2,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	13	0,10%
Größe 7 (AB, SS - 3 Steher)	4,24 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Größe 8 (Rahmen - Autobahn)	33,60 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**71,3**	**84**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**348,5**	**278**	**610,6**	**451**	**24,3**	**15**	**828**	**6,27%**
Beleuchtung																			
mittig	0,63 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	8,0	85	8,0	216	8,0	15	317	2,40%
Mast (einfach)	3,97 m²/ST	0,0	0	0,0	0	40,0	397	0,0	0	0,0	0	32,0	2.160	32,0	5.463	32,0	381	8.400	63,63%
Mast (doppelt)	5,11 m²/ST	0,0	0	0,0	0		0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**100,0**	**397**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**680,0**	**2.245**	**1720,0**	**5.679**	**120,0**	**396**	**8.717**	**66,03%**
Ampelanlagen																			
Fußgänger	1,18 m²/ST	0,0	0	0,0	0	6,0	18	0,0	0	0,0	0	6,0	120	0,0	0	0,0	0	138	1,04%
Mast	5,11 m²/ST	0,0	0	0,0	0	4,0	51	0,0	0	0,0	0	2,0	174	0,0	0	0,0	0	225	1,70%
Rahmen	28,00 m²/ST	0,0	0	0,0	0		0	0,0	0	0,0	0		0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**25,0**	**69**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**136,0**	**294**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**362**	**2,75%**
Linienelemente		sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	[m²]	[%]
Leitschienen																			
System 1	1,08 m²/m	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	50,0	918	0,0	0	0,0	0	918	6,95%
System 2	1,18 m²/m	0,0	0	0,0	0	50,0	147	0,0	0	0,0	0	50,0	1.001	0,0	0	0,0	0	1.148	8,70%
System 3 (4 Schienen)	5,29 m²/m	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
System 4 (2 Schienen)	2,30 m²/m	0,0	0	0,0	0	50,0	287	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	287	2,18%
System 5 (2 Schienen)	2,82 m²/m	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**250,0**	**434**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**1700,0**	**1.919**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**2.353**	**17,83%**
Lärmschutzwände																			
Größe 1	0,28 m²/m	0,0	0	0,0	0	60,0	42	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	42	0,32%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**150,0**	**42**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**42**	**0,32%**
Brücken																			
Größe 1	0,83 m²/m	0,0	0	0,0	0	60,0	124		0	0,0	0	30,0	421	10,0	355	0,0	0	899	6,81%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**150,0**	**124**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**510,0**	**421**	**430,0**	**355**	**0,0**	**0**	**899**	**6,81%**
Gesamtflächen			**0**		**0**		**1.150**		**0**		**0**		**5.157**		**6.485**		**411**	**13.202**	**100,00%**
Anstrich																			
Punktuelle Elemente		sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]		
VZ-Träger																			
Rahmen LKW-Maut	40,00 m²/ST	0,2	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	0	**0,00%**
Beleuchtung																			
mittig	0,63 m²/ST	0,0	0	0,0	0	34,0	89	34,0	89	0,0	0	34,0	89	0,0	0	0,0	0	266	24,39%
Mast (einfach)	3,97 m²/ST	0,0	0	0,0	0	15,0	247	0,0	0	0,0	0	10,0	165	10,0	165	0,0	0	577	52,88%
Mast (doppelt)	5,11 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,5	11	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	11	0,97%
Summen		**0**	**0**	**0**	**0**	**205**	**346**	**141**	**89**	**0**	**0**	**0**	**253**	**0**	**165**	**0**	**0**	853	**78,24%**
Ampelanlagen																			
Fußgänger	1,18 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,5	2	0,0	0	0,0	0	0,5	2	0,0	0	0,0	0	5	0,45%
Mast	5,11 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Rahmen	28,00 m²/ST	0,0	0	0,0	0	2,0	232	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	232	21,31%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**10,4**	**235**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**2**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	237	**21,76%**
Linienelemente		sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]		
Lärmschutzwände																			
Größe 1	7,00 m²/m	200,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	0	**0,00%**
Gesamtflächen			**0**		**0**		**581**		**89**		**0**		**256**		**165**		**0**	**1.090**	**100,00%**

verzinkte Fläche:

	3,10 g/m².a	40,93 kg/a
Anstrich:		
	0,72 g/m².a	0,79 kg/a
Zinkerosion		**41,71 kg/a**
Cadmium		**0,01 kg/a**

sL.....spezifische Länge (m/km)
sST...spezifische Stückzahl (ST/km)
A.....Fläche

Bezirk Villach Stadt Umland		Straßentyp																								Summen	
		Autobahn		Landesstraßen												Gemeindestraßen				Gemeindestraßen				Gemeindestraßen		Wege		
				städtisch:		75,0 %		ländlich:		10,0 %		sonstige:		15,0 %		städtisch:				ländlich:				sonstige:				
		Autobahn	Auf-/abfahrten	"B"		"L"		"B"		"L"		"B"		"L"		Auf-/abfahrten		Kategorie "a"		Kategorie "b"		Kategorie "a"		Kategorie "b"				absolut	Anteil
Länge	**km**	**32,00**	**8,00**	**23,33**		**25,95**		**3,11**		**3,46**		**4,67**		**5,19**		**5,00**		**55,00**		**175,00**		**5,00**		**20,00**		**25,00**		**17,00**		**0**	**309**
Verzinkte Oberfläche																													
Punktuelle Elemente		sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]		
Leittafeln																													
Größe 1	0,36 m²/ST	0,0	0	12,0	34	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	12,0	21	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	56	0,06%
Größe 2	1,53 m²/ST	0,0	0		0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0**	**0**	**96**	**34**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**34**	**0,04%**
VZ-Träger																													
Größe 1	0,60 m²/ST	0,0	0	0,0	0	10,0	139	10,0	155	4,0	7	4,0	8	0,0	0	0,0	0	0,0	0	10,0	328	10,0	1045	2,0	6	2,0	209	0,0	0	0,0	0	7,0	71	1.969	2,26%
Größe 2	1,37 m²/ST	1,0	44	0,0	0	2,0	64	2,0	71	0,0	0	0,0	0	0,5	3	0,5	4	0,0	0	0,5	38	0,5	120	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,5	12	354	0,41%
Größe 3 (Ortschild)	1,58 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,5	18	0,5	20	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,5	43	0,5	138	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	220	0,25%
Größe 4 (Wegweiser 1-zeilig)	1,41 m²/ST	0,0	0	0,0	0	3,0	99	3,0	110	1,0	4	1,0	5	0,0	0	0,0	0	0,0	0	2,0	155	2,0	493	1,0	7	1,0	247	0,0	0	0,0	0	0,0	0	1.119	1,28%
Größe 5 (Wegweiser 2-zeilig)	1,62 m²/ST	0,0	0	0,0	0	3,0	114	3,0	126	1,0	5	1,0	6	0,0	0	0,0	0	0,0	0	2,0	179	2,0	568	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	998	1,15%
Größe 6 (AB, SS - 2 Steher)	2,59 m²/ST	0,3	25	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	25	0,03%
Größe 7 (AB, SS - 3 Steher)	4,24 m²/ST	0,3	41	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	41	0,05%
Größe 8 (Rahmen - Autobahn)	33,60 m²/ST	0,3	323	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	323	0,37%
Summen		**61**	**432**	**0**	**0**	**432**	**434**	**480**	**482**	**19**	**17**	**21**	**19**	**2**	**3**	**3**	**4**	**0**	**0**	**825**	**743**	**2.625**	**2.363**	**15**	**13**	**60**	**455**	**0**	**0**	**0**	**0**	**128**	**83**	**5.048**	**5,80%**
Beleuchtung																													
mittig	0,63 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Mast (einfach)	3,97 m²/ST	7,0	889	7,0	222	25,0	2315	25,0	2575	33,0	407	33,0	453	0,0	0	0,0	0	0,0	0	25,0	5459	0,0	0	33,0	655	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	12.976	14,90%
Mast (doppelt)	5,11 m²/ST	27,0	4417	27,0	1104	8,0	954	8,0	1061	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	8,0	2249	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	9.786	11,24%
Summen		**1.088**	**5.306**	**272**	**1.327**	**770**	**3.269**	**856**	**3.637**	**103**	**407**	**114**	**453**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1.815**	**7.708**	**0**	**0**	**165**	**655**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**22.763**	**26,13%**
Ampelanlagen																													
Fußgänger	1,18 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,8	21	0,8	23	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,8	49	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	92	0,11%
Mast	5,11 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,5	60	0,5	66	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,5	140	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	266	0,31%
Rahmen	28,00 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**29,2**	**80**	**32,4**	**89**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**68,8**	**189**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**358**	**0,41%**
Linienelemente		sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	[m²]	[%]
Leitschienen																													
System 1	1,08 m²/m	0,0	0	0,0	0	60,0	1511	60,0	1681	60,0	202	60,0	224	60,0	302	60,0	336	114,6	619	50,0	2970	0,0	0	50,0	270	0,0	0	50,0	1350	0,0	0	0,0	0	9.465	10,87%
System 2	1,18 m²/m	0,0	0	500,0	4711	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	50,0	3239	0,0	0	50,0	294	0,0	0	50,0	1472	0,0	0	0,0	0	9.717	11,16%
System 3 (4 Schienen)	5,29 m²/m	62,5	10586	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	10.586	12,15%
System 4 (2 Schienen)	2,30 m²/m	62,5	4596	0,0	0	60,0	3216	60,0	3578	60,0	429	60,0	477	60,0	643	60,0	716	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	13.654	15,68%
System 5 (2 Schienen)	2,82 m²/m	125,0	11264	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	11.264	12,93%
Summen		**8.000**	**26.445**	**4.000**	**4.711**	**2.799**	**4.727**	**3.114**	**5.259**	**373**	**630**	**415**	**701**	**560**	**945**	**623**	**1.052**	**573**	**619**	**5.500**	**6.209**	**0**	**0**	**500**	**564**	**0**	**0**	**2.500**	**2.822**	**0**	**0**	**0**	**0**	**54.686**	**62,79%**
Lärmschutzwände																													
Größe 1	0,28 m²/m	250,0	2240	250,0	560	70,7	461	70,7	513	70,7	62	70,7	68	70,7	92	70,7	103	70,7	99	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	4.199	4,82%
Summen		**8.000**	**2.240**	**2.000**	**560**	**1.648**	**461**	**1.833**	**513**	**220**	**62**	**244**	**68**	**330**	**92**	**367**	**103**	**353**	**99**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**4.199**	**4,82%**
Gesamtflächen			**34.424**		**6.632**		**8.971**		**9.981**		**1.116**		**1.242**		**1.041**		**1.158**		**728**		**14.848**		**2.363**		**1.232**		**455**		**2.822**		**0**		**83**	**87.098**	**100,00%**
Anstrich																													
Punktuelle Elemente		sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]	sST [ST/km]	A [m²]		
VZ-Träger																													
Rahmen LKW-Maut	40,00 m²/ST	0,2	256	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	256	0,29%
Summen		**6**	**256**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**256**	**0,33%**
Beleuchtung																													
mittig	0,63 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Mast (einfach)	3,97 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	15,0	3275	10,0	6947	15,0	298	10,0	6947	0,0	0	0,0	0	0,0	0	17.468	20,06%
Mast (doppelt)	5,11 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,00%
Summen		**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**825**	**3.275**	**1.750**	**6.947**	**75**	**298**	**200**	**6.947**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**17.468**	**22,75%**
Ampelanlagen																													
Fußgänger	1,18 m²/ST	0,0	0	0,0	0	0,5	14	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,5	32	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	46	0,05%
Mast	5,11 m²/ST	0,0	0	0,0	0	2,0	238	2,0	265	2,0	32	2,0	35	0,0	0	0,0	0	0,0	0	2,0	562	0,0	0	2,0	51	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	1.183	1,36%
Rahmen	28,00 m²/ST	0,2	179	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	179	0,21%
Summen		**6,4**	**179**	**0,0**	**0**	**58,3**	**252**	**51,9**	**265**	**6,2**	**32**	**6,9**	**35**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**137,5**	**594**	**0,0**	**0**	**10,0**	**51**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0**	**1.408**	**1,63%**
Linienelemente		sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	sL [m/km]	A [m²]	[m²]	[%]
Lärmschutzwände																													
Größe 1	7,00 m²/m	200,0	44800	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	44.800	51,44%
Summen		**6.400**	**44.800**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**44.800**	**58,36%**
Brücken																													
Größe 1	0,83 m²/m	310,0	8184	0,0	0	60,0	1155	60,0	1285	60,0	154	60,0	171	60,0	231	60,0	257	0,0	0	20,0	908	0,0	0	20,0	83	0,0	0	20,0	413	0,0	0	0,0	0	12.839	14,74%
Summen		**9.920**	**8.184**	**0**	**0**	**1.400**	**1.155**	**1.557**	**1.285**	**187**	**154**	**208**	**171**	**280**	**231**	**311**	**257**	**0**	**0**	**1.100**	**908**	**0**	**0**	**100**	**83**	**0**	**0**	**500**	**413**	**0**	**0**	**0**	**0**	**12.839**	**14,74%**
Gesamtflächen			**53.419**		**0**		**1.406**		**1.549**		**186**		**207**		**231**		**257**		**0**		**4.777**		**6.947**		**431**		**6.947**		**413**		**0**		**0**	**76.770**	**100,00%**

verzinkte Fläche:

3,10 g/m².a	270,0 kg/a
Anstrich:	
0,72 g/m².a	55,3 kg/a
Zinkerosion	**325,3 kg/a**
Cadmium	**0,10 kg/a**

sL……spezifische Länge (m/km)
sST…spezifische Stückzahl (ST/km)
A…….Fläche

Die Infrastruktur der innerstädtischen Gebiete ist aufgrund des geringen Anteils übergeordneter Verkehrswege (Autobahnen und Landesstraßen stellen lediglich rund 4 % des Straßennetzes – vgl. Tabelle 44) nur für rund 10 % der Zink- und Cadmiumemissionen der Verkehrsinfrastruktur verantwortlich. Im Stadtkern überwiegen die Emissionen der Beleuchtungseinrichtungen, welche rund zwei Drittel der gesamten Emission ausmachen. Die Zinkemissionen von lackierten Oberflächen sind hier nahezu bedeutungslos.

Tabelle 48 gibt eine Übersicht der wichtigsten Zinkemissionsquellen der Straßeninfrastruktur. Eine detaillierte Emissionsberechnung, gegliedert nach den verschiedenen Straßenkategorien und Infrastrukturelementen, findet sich in Tabelle 46 und Tabelle 47.

Tabelle 48: Gesamtemissionen aus der Straßeninfrastruktur

Infrastruktur	Zink						Cadmium *)	
	Stadtkern		Umland		Bezirk Villach Stadt		Bezirk Villach Stadt	
	[kg/a]	[%]	[kg/a]	[%]	[kg/a]	[%]	[g/a]	[%]
Punktuelle Elemente								
Leittafeln	0	0	0	0	0	0	0	0
VZ-Träger (Größe 1-8)	3	6	16	5	18	5	6	5
Beleuchtung	28	66	83	26	111	30	33	30
Ampelanlagen	1	3	2	1	3	1	1	1
Linienelemente								
Leitschienen (System 1-5)	7	17	170	52	177	48	53	48
Lärmschutzwände	0	0	45	14	45	12	14	12
Brücken	3	7	9	3	12	3	4	3
Summe	**42**	100	**325**	100	**367 ± 22%**	100	**110 ± 22%**	100

(ii) Fahrbahn

Durch den Abrieb der Farhbahndeckschicht, hauptsächlich durch Spikereifen verursacht, kommt es zur Freisetzung von Schwermetallen. Der gesetzlich erlaubte Verwendungszeitraum von Spikereifen dauert in Österreich etwa 5 Monate. Der Anteil an Spikereifen an allen im Winter verwendeten Reifen liegt bei maximal 10% (Breit 2005). Es wird angenommen, dass in Villach im Winter 10% aller Kraftfahrzeuge mit Spikereifen ausgerüstet sind. Der durch Spikereifen verursachte Abrieb beträgt in etwa 3 g/Kfz-km (Jacobson und Hornwall 1999).

Deckschichtzusammensetzung

In der Regel setzt sich Asphalt aus etwa 95% Steinfraktionen und 5% Bitumen zusammen.

Für die Stadt Villach wird angenommen, dass für die Errichtung aller Straßen Granit zur Anwendung kam.

Kilometerspezifische Emission

Die kilometerspezifische Emission lässt sich mit Formel 70 berechnen, die Ergebnisse dieser Berechnung enthält Tabelle 49.

Formel 70: Kilometerspezifische Emission durch den Abrieb der Deckschicht

$$e_{si} = c_i * a * 0{,}95$$

e_{Si}	*Kilometerspezifische Emission durch den Abrieb der Deckschicht [mg/Kfz-km]*
c_i	*Gehalt des Metalls i in der Gesteinfraktion [-]*
a	*Abrieb pro Fahrzeugkilometer [mg/Kfz-km]*
0,95	*Anteil der Steinfraktion im Asphalt [-]*

Gesamte Emissionen

Die gesamte Emission ergibt sich durch die Verwendung von Formel 71. Im Bezirk Villach Stadt werden täglich 1.392.000 Kfz-km (Kermer, Sammer et al. 1994) zurückgelegt.

Formel 71: Gesamte Emission durch den Abrieb der Deckschicht

$$E_{si} = e_{si} * a_{sp} * t * s/365$$

Es_i	*Gesamte Emission des Metalls i durch den Abrieb der Deckschicht im Bezirk Villach Stadt [mg/a]*
e_{Si}	*Kilometerspezifische Emission durch den Abrieb der Deckschicht [mg/Kfz-km]*
a_{sp}	*Anteil der verwendeten Spikereifen an den Gesamtfahrzeugen [-]*
t	*Festgelegter Zeitraum der Spikereifenbenützung [d/a]*
s	*Jährlich im Bezirk Villach Stadt zurückgelegte Kraftfahrzeugkilometer [Kfz-km/a]*

Tabelle 49: Kilometerspezifische Emission durch den Abrieb der Deckschicht

Metall	Asphaltabrieb a [g/Kfz-km]	Metallgehalt [1)] c_i [mg/kg]	Kilometerspez. Emission e_{si} [mg/Kfz-km]	Gesamte Emission E_{si} [kg/a]
Kupfer	*3*	*13*	*0,04*	*0,8*
Zink		*45*	*0,13*	*2,7*
Blei		*48*	*0,14*	*2,9*
Cadmium		*0,03*	*0,00009*	*0,002*

[1)] ….. Werte für Granit aus Krauskopf and Bird, 1995

Im Bezirk Villach Stadt werden jährlich etwa 2,9 kg Blei, 2,7 kg Zink, 0,8 kg Kupfer und 2 g Cadmium über den Abrieb der Fahrbahndeckschicht freigesetzt (Tabelle 49). Die Unsicherheit dieser Ergebnisse liegt bei ± 22%.

(iii) Oberleitung

Ermittlung der metallischen Oberfläche

Im Fahrdraht, dem Tragseil, dem Y-Seil und den Hängern der Oberleitung finden sich Kupfer, Zink, Blei und Cadmium. Tabelle 50 zeigt die chemische Zusammensetzung der Konstruktionselemente und deren Oberfläche auf einem Kilometer zweigleisiger Strecke. Grundlagen für die Berechnung sind Konstruktionspläne und Auskünfte der ÖBB (ÖBB 2005). Der Fahrdraht wird neben Korrosion vor allem durch mechanische und elektrische Einwirkungen bei der Stromübertragung beansprucht und im nächsten Kapitel gesondert diskutiert.

Tabelle 50: Ausgewählte Konstruktionselemente der Oberleitung

Konstruktionselement	Material [1)]	Oberfläche A_{lSi} *je km 2-gleisiger Strecke*
Tragseil	CuAg 0,1	60 m²
Y-Seil	Bronze (CuSn6Pb7Zn5)	34 m²
Hänger	Bronze (CuSn6Pb7Zn5)	3 m²

[1)] ….. ÖBB, 2003

Abschwemmraten

Die Abschwemmraten für Kupfer stammen aus Tabelle 9. Für Bronze liegt die Abschwemmrate zwischen 0,6 und 4,8g/m²*a (Kucera, Tidblad et al. 2003). Für die im Zuge dieses Projektes durchgeführten Berechnungen wird für Bronze eine Abschwemmrate von 2,0 g/m²*a angenommen.

Tabelle 51: Chemische Zusammensetzung und Abschwemmrate ausgewählter Konstruktionsmaterialien

Konstruktionselement	Material	Abschwemmrate [g/m².a]
Tragseil	CuAg0,1	1,3
Y-Seil	Bronze (CuSn6Pb7Zn5)	2,0
Hänger	Bronze (CuSn6Pb7Zn5)	2,0

Kilometerspezifische Emission

Die kilometerspezifische Kupfer-, Blei-, Cadmium- und Zinkemission einer zweigleisigen Strecke wird in Formel 72 berechnet.

Formel 72: Kilometerspezifische Emission einer zweigleisigen Strecke

$$e_{ISi} = A_{ISi} * a_i * c_{ISi}$$

e_{ISi} *Kilometerspezifische Emission der Oberleitung einer zweigleisigen Strecke [g/km*a]*

A_{ISi} *Oberfläche des Metalls i pro Kilometer zweigleisiger Strecke [m²/km]*

a_i *Abschwemmrate des Metalls i [g/m²*a]*

c_{ISi} *Anteil des Metalls i [-]*

Die berechnete kilometerspezifische Emission ist in Tabelle 53 zusammengefasst.

Gesamte Emission

Durch Multiplikation der kilometerspezifischen Emission einer zweigleisigen Strecke mit der Streckenlänge im Bezirk Villach Stadt erhält man die gesamte Emission in die Umwelt (Formel 73).

Formel 73: Gesamte Emission der Oberleitung

$$E_{ISi} = e_{ISi} * L_F$$

E_{ISi} *Gesamte Emission der Oberleitung im Bezirk Villach Stadt [kg/a]*

e_{ISi} *Kilometerspezifische Emission der Oberleitung einer zweigleisigen Strecke [g/km*a]*

L_F *Länge der zweigleisigen Strecke [km]*

Die Längen der Eisenbahnstrecke im Bezirk Villach Stadt sind der Österreichischen Karte (ÖK 50 - West) entnommen. Es wird zwischen ein- und zweigleisiger Strecke unterschieden, wobei angenommen wird, dass für die Errichtung einer zweigleisigen Anlage dieselben Materialien wie für eingleisige Strecken verwendet werden, jedoch in doppelter Menge. Im Bezirk Villach Stadt gibt es 28 km zweigleisige Bahnstrecke (Tabelle 52).

Tabelle 52: Länge der Gleisanlagen im Bezirk Villach Stadt

Untersuchungsgebiet	**Streckenlänge**		**Bahnhöfe (Abstellgleise)**	**Summe**
	zweigleisig [km]	*eingleisig [km]*	*eingleisig [km]*	*als zweigleisige Strecke [km]*
Stadtkern	*8*	*0*	*12*	*14*
Umland	*12*	*4*	*0*	*14*
Summe	*20*	*4*	*12*	*28*

In Tabelle 53 sind die gesamten Emissionen der Oberleitung zusammengefasst. Durch Korrosion der Konstruktionselemente der Oberleitung wird in erster Linie Kupfer (etwa 4 kg/a) freigesetzt. Alle anderen Metallemissionen sind gering.

Tabelle 53: Kilometerspezifische Emissionen und gesamte Emission (E_{ISi}) der Oberleitung

Metall	**Konstruktionselemente** *Metall-Anteil [%]*			**kilometerspezif. Emission e_{ISi}**	**Gesamte Emission E_{ISi}**
	Tragseil	Y-Seil	Hänger	*[g/km]*	*[kg/a]*
Kupfer	99,9	82	82	139	3,9 ± 10%
Zink	0	5	5	4	0,1 ± 10%
Blei	0	7	7	5	0,1 ± 10%
Cadmium	0,03 % von Zink [1)]			0,001	0,03 ± 10%

[1)] ….. Sörme, 2003

(iv) Fahrdraht

Im Zusammenhang mit den Kupferemissionen des Fahrdrahtes unterscheidet man zwei Phänomene. Es sind dies die Korrosion und der Verschleiß durch die Stromabnehmer der Schienenfahrzeuge. Mechanischer Verschleiß wird durch das Schleifen des Stromabnehmers am Fahrdraht verursacht. Mengenmäßig bedeutender ist jedoch der elektrisch induzierte Verschleiß am Fahrdraht, der an der Kontaktstelle auftritt. Bei kurzen Unterbrechungen der Stromzufuhr, beispielsweise durch Schwingungen oder Vereisungen der Oberleitung, bilden sich Funken und Lichtbögen, durch die Teile des Kupfermaterials schmelzen (Hillenbrand, Fuchs et al. 2005).

Die von den ÖBB in Österreich verwendeten Fahrdrähte besitzen eine Querschnittsfläche von 120 mm² (ÖBB 2005).

Kilometerspezifische Emissionen

Das mittlere Austauschintervall des Fahrdrahtes liegt in etwa bei 20 Jahren (Hillenbrand, Fuchs et al. 2005). Laut ÖBB - Konstruktionsplänen beträgt der maximale zulässige Verschleiß 20 % der Querschnittsfläche des Fahrdrahtes. Danach ist dieser durch einen neuen zu ersetzen (ÖBB 2005).

Folgende Annahmen werden getroffen:

Der Austausch erfolgt in Villach jeweils nach 20 Jahren, die Querschnittsverminderung beträgt nach 20 Jahren durchschnittlich 15%.

Formel 74: Kilometerspezifische Emission durch den Verschleiß des Fahrdrahtes

$$e_{ISFi} = \frac{A_F * 0{,}15 * \rho_{CU}}{t_N}$$

e_{ISFi} *Kilometerspezifische Emission durch Fahrdrahtverschleiß [g/km*a]*

A_F *Fahrdraht-Querschnittsfläche [mm²]*

ρ_{Cu} *Dichte Kupfer [t/m³] (= 8,92 t/m³)*

t_N *Mittlere Nutzungsdauer des Fahrdrahtes [a]*

Aus Formel 74 ergibt sich die kilometerspezifische jährliche Kupferemission zu 8 kg/km*a.

Gesamte Emission

Mit Formel 75 ergibt sich die gesamte Emission. Unter der Annahme, dass die gesamten Gleisanlagen mit Oberleitungen versehen sind (auch die Abstellgleise), beträgt die Fahrdrahtlänge in Villach etwa 56 km.

Formel 75: Gesamte Emission durch den Verschleiß des Fahrdrahtes

$$E_{ISF\,i} = e_{ISF\,i} * L_F$$

$E_{ISF\,i}$ *Gesamte Emission durch Fahrdrahtverschleiß [g/km*a]*

$e_{ISF\,i}$ *Kilometerspezifische Emission durch Fahrdrahtverschleiß [g/km*a]*

L_F *Länge der zweigleisigen Strecke [km]*

Die durch Korrosion verursachte gesamte Emission wird nach der im Abschnitt „Oberleitung" angewendeten Vorgehensweise ermittelt. Sie beträgt jährlich in etwa 4 kg.

Die gesamte jährliche Kupferemissionsfracht beträgt etwa 450 kg/a (± 15%). Einen Vergleich der Emissionen aus Korrosion mit jenen aus mechanischem und elektrisch induziertem Verschleiß zeigt Tabelle 54.

Tabelle 54: Kupferemission aus Korrosion und dem Verschleiß von Fahrdrähten

Beanspruchung	**Material**	**kilometerspezif. Emission e_{ISFi}**	**Gesamte Emission E_{ISFi}**
Korrosion [1)]	CuAg0,1	*[kg/km.a]*	*[kg/a]*
		0,1	**4**
Mechanischer und elektr. induzierter Verschleiß		*[kg/km.a]*	*[kg/a]*
		8	**450**

[1)] ….. je km 2-gleisiger Strecke

7.1.2 Subsystem Mobilien

7.1.2.1 Prozess Kraftfahrzeuge

(i) Emittierende Oberflächen

Die mengenmäßig wichtigsten Emissionsquellen sind der Abrieb von Reifenlaufflächen und Bremsbelägen (Sörme 2003). Es wird nicht zwischen Bussen, Lastkraftwagen und Personenkraftwagen unterschieden. Der Überbegriff „Kraftfahrzeuge“ fasst in dieser Studie diese drei Kategorien zusammen. Die Emissionen werden aufgrund der schlechten Datenlage nicht gemittelt, sondern es werden jene der Personenkraftfahrzeuge angesetzt.

Reifenlaufflächen

Die SEMPERIT Reifen AG gibt einen fahrleistungsspezifischen Reifenlaufflächenabrieb von 0,2 g/Kfz-km in Städten an (Semperit Reifen AG 1989).

Bremsbeläge

Im Durchschnitt werden die Bremsbeläge der Vorderachse alle 40.000 km, jene der Hinterachse alle 60.000 km getauscht (Westerlund 2001). Die vorderen Bremsbeläge wiegen 0,13-0,15 kg, die hinteren 0,09-0,11 kg. In den folgenden Berechnungen wird das Gewicht der vorderen Bremsbeläge mit 0,14 kg, das der hinteren Bremsbeläge mit 0,1 kg angenommen. Sie werden in der Regel zu 70 % abgefahren, bevor man sie austauscht. Insgesamt gibt es vier Bremsbeläge im vorderen Wagenbereich und vier im hinteren (Westerlund 2001). Der kilometerspezifische Massenverlust berechnet sich mit Formel 18 und Formel 19. Er beträgt für die vorderen Bremsbeläge 9,8 mg/Kfz-km und für die hinteren Bremsbeläge 4,6 mg/Kfz-km.

(ii) Metallgehalt der Verschleißteile

Tabelle 55 gibt die durchschnittlichen Schwermetallkonzentrationen von PKW-Reifenlaufflächen und Bremsbelägen an.

Tabelle 55: Mittlere Schwermetallkonzentration von Reifenlaufflächen und Bremsbelägen

Schwermetallgehalte		**Kupfer** *[mg/kg]*	**Zink** *[mg/kg]*	**Blei** *[mg/kg]*	**Cadmium** *[mg/kg]*	**Quelle**
Reifenlaufflächen		-	16.000	-	-	Lohm und Bergbäck 1997
		-	-	10	2	Krömer et al. 1999
Bremsbeläge	vorne $c_{KBV\,i}$	117.941	23.830	9.052	12	Westerlund 2001
	hinten $c_{KBH\,i}$	92.198	16.498	18.655	8	Westerlund 2001

(iii) Kilometerspezifische Emission

Die kilometerspezifische Emission des Reifengummis lässt sich mit Formel 20, jene der Bremsbeläge mit Formel 21 berechnen. Die in Tabelle 56 angeführte kilometerbezogene Emission eines Kraftfahrzeuges ergibt sich aus der Addition der Metallemission von Reifenlaufflächen und Bremsbelägen (Formel 22). Die kilometerspezifische Zinkemission beläuft sich auf 3,5 mg/Kfz-km. Sie ist damit doppelt so hoch wie die kilometerspezifische Kupferemission. Das Kupfer stammt aus den Bremsbelägen, im Gegensatz dazu sind die Reifenlaufflächen die bedeutendsten Zinkquellen, sie emittieren 3,2 mg/Kfz-km.

Tabelle 56: Kilometerspezifische Emission (e_{Ki}) durch Abrieb von Reifenlaufflächen und Bremsbelägen

Metallemissionen	**Kupfer** *[mg/Kfz-km]*	**Zink** *[mg/Kfz-km]*	**Blei** *[mg/Kfz-km]*	**Cadmium** *[mg/Kfz-km]*
Reifenlauffläche	0,00	3,20	0,00	0,0004
Bremsbeläge (Vorderbremsen)	1,16	0,23	0,09	0,0001
Bremsbeläge (Hinterbremsen)	0,43	0,08	0,09	0,0000
Summe	**1,6**	**3,5**	**0,2**	**0,0006**

(iv) Gesamte Emission

Im Villacher Verkehrskonzept sind die täglich zurückgelegten Kraftfahrzeugkilometer mit etwa 1.392.000 Kfz-km beziffert (Kermer, Sammer et al. 1994). Davon entfallen circa

1.160.000 Kfz-km auf das primäre und etwa 232.000 Kfz-km auf das sekundäre Straßennetz (Röschl 2005). Mit Formel 23 errechnet sich die gesamte Emission des Kraftfahrzeugverkehrs im Bezirk Villach Stadt.

Das Ergebnis ist in Tabelle 57 dargestellt. Im Bezirk Villach Stadt werden jährlich etwa 1800 kg Zink, 800 kg Kupfer, 90 kg Blei und 0,3 kg Cadmium durch den Kraftfahrzeugverkehr emittiert. Mehr als 80% der gesamten Emission stammt aus dem primären Straßennetz.

Tabelle 57: Gesamte durch den Kraftfahrzeugverkehr verursachten Emissionen

Metallemissionen	**Kupfer** *[kg/a]*	**Zink** *[kg/a]*	**Blei** *[kg/a]*	**Cadmium** *[kg/a]*
Reifen	0	1626	1	0,2
Bremsen	806	158	89	0,1
Summe	**806 ± 21%**	**1784 ± 21%**	**90 ± 21%**	**0,28 ± 21%**

7.1.2.2 Prozess Schienenfahrzeuge

Auch bei Schienenfahrzeugen werden im Zuge dieser Arbeit nur Bremsbeläge als Emissionsquellen diskutiert.

Zum Bremsen von Güterwagen der ÖBB werden Bremsklötze aus Grauguss verwendet, diese enthalten jedoch keine erheblichen Anteile an Zink, Kupfer, Blei oder Cadmium. Bei etwa einem Fünftel aller Lokomotiven und allen Reisezugwagen werden Bremsbeläge aus organischem Reibmaterial eingesetzt.

(i) Metallgehalte der Verschleißteile

Laut Angaben der ÖBB (ÖBB 2005) ähnelt das organische Reibmaterial der Bremsbeläge der Zusammensetzung von Kraftfahrzeugbremsbelägen. Aus diesem Grund werden die von Westerlund (Westerlund 2001) ermittelten Schwermetallgehalte für Bremsbeläge von Kraftfahrzeugen verwendet (siehe dazu Tabelle 55).

(ii) Kilometerspezifische Emissionen

Zur Berechnung der Verlustmasse eines Bremsbelages (Formel 76) werden die in Tabelle 58 angegebenen Daten herangezogen. Die Differenz der Dicke von neuen und ausgewechselten Bremsbelägen wird mit 20 mm angenommen. Als Bremsbelagsdichte wird 2,5 g/cm³ angenommen.

Tabelle 58: Charakteristik der Bremsbeläge eines Reisezugwagens der ÖBB (Körber 2005)

Radsätze pro Wagen	4 Stück
Bremsbeläge pro Radsatz	4 Stück
Fläche pro Bremsbelag	200 cm²
Auswechslung im Schnitt nach	30.000 km
Bremsbelagdicke neuer Bremsbeläge	35 mm
Mindestdicke der Bremsbeläge	10 mm
Zusammensetzung	Organisches Material ähnlich dem PKW
Durchschnittliche **Dichte**	2-3 g/cm³

Formel 76: Verlustmasse der Bremsbeläge eines Reisezugwagens

$$M_V = b * a_b * d * \rho_B$$

M_v *Verlustmasse der Bremsbeläge eines Reisezugwagens über seine Verwendungsdauer [kg]*

b *Bremsbeläge pro Reisezugwagen [-]*

a_b *Reibfläche pro Bremsbelag [cm²]*

d *Differenz der Dicke von neuen und ausgewechselten Bremsbelägen [cm]*

ρ_B *Dichte des Bremsbelagmaterials [g/cm³]*

Formel 77: Kilometerspezifische Emission eines Wagens

$$e_{BBi} = \frac{M_V * c_{KBVi}}{l}$$

e_{BBi} *Kilometerspezifische Emission eines Wagens [kg/km]*

M_v *Verlustmasse der Bremsbeläge eines Reisezugwagens über seine Verwendungsdauer [kg]*

c_{KBVi} *Massenbezogener Anteil des Metalls i in den vorderen Bremsbelägen [mg/kg]*

l *mit einem Bremsbelag bis zur Auswechslung zurückgelegte Kilometeranzahl [km]*

Die kilometerspezifische Emission wird mit Formel 77 berechnet. Es ergeben sich die in Tabelle 59 angeführten Resultate. Die Kupferemissionen betragen 63 mg/km, die Zinkemissionen 13 mg/km.

Tabelle 59: Kilometerspezifische Emissionen (e_{BBi})

Metall	Verlustmasse [kg/km]	Metallgehalte [1] [mg/kg]	kilometerspezif. Emission [mg/km]
Kupfer	0,00053	117.941	63
Zink		23.830	13
Blei		9.052	5
Cadmium		12	0,01

[1] ….. Westerlund, 2001

(iii) Gesamte Emission

Die gesamte jährliche Emission erhält man mit Formel 78. Die Anzahl der Reisezüge pro Jahr und die zurückgelegte Fahrstrecke findet sich in Tabelle 60.

Tabelle 60: Täglich in Villach von Personenzügen zurückgelegte Wegstrecke

Streckenabschnitt	Länge [1] [km]	Anzahl der Züge [2] [1/d]	gesamte Fahrtstrecke [km/d]
Villach Hbf - Velden	5	40	200
Villach Hbf - Spittal	7	24	168
Villach Hbf - Arnoldstein	7	19	124
Velden - Villach Hbf	5	40	200
Spittal - Villach Hbf	7	24	168
Arnoldstein - Villach Hbf	7	19	124
Summe			**983**

[1] ….. Längen aus ÖK 50 ermittelt
[2] ….. Anzahl der Züge aus ÖBB Fahrplänen ermittelt

Bei dieser Berechnung wird angenommen, dass ein Reisezug aus durchschnittlich 7 Wagen besteht. Die Schienenfahrzeuge emittieren etwa 160 kg Kupfer, 32 kg Zink und 12 kg Blei auf dem Bezirksgebiet der Stadt Villach (Tabelle 61).

Formel 78: Gesamte Emission (E_{BBi}) der Schienenfahrzeuge im Bezirk Villach Stadt

$$E_{BBi} = e_{BBi} * a * w * L$$

E_{BBi}	*Gesamte Emission der Schienenfahrzeuge im Bezirk Villach Stadt [kg/a]*
e_{BBi}	*Kilometerspezifische Emission eines Wagens [kg/km]*
a	*Reisezüge/Jahr [1/a]*
w	*Reisewagen/Reisezug [-]*
L	*Zurückgelegte Fahrstrecke der Reisezugwagen innerhalb des Bezirkes Villach Stadt [km]*

Tabelle 61: Gesamte Emission (E_{BBi}) der Schienenfahrzeuge im Bezirk Villach Stadt

Metall	kilometerspezif. Emission *[mg/km]*	gesamte Fahrtstrecke *[km/d]*	Gesamtemission *[kg/a]*
Kupfer	63	983	158 ± 44%
Zink	13		32 ± 44%
Blei	5		12 ± 44%
Cadmium	0,01		0,02 ± 44%

7.1.3 Prozess Kanalisation

7.1.3.1 Fracht in die Kanalisation aus dem Subsystem Immobilien

(i) Prozess Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen

Die gesamten Zink-, Kupfer-, Blei- und Cadmiumemissionen (E_{Ri} aus Tabelle 43) gelangen über das Abwasser in die Kanalisation. Die Emission E_{Ri} entspricht damit der Fracht F_{KIRi} in die Kanalisation.

(ii) Prozess Infrastruktur Straßen- und Schienenfahrzeuge

Infrastruktur Straßenfahrzeuge und Straßenabrieb

Aufgrund der unterschiedlichen Infrastruktur und der unterschiedlichen Entwässerungsbedingungen wird zwischen den Bereichen Stadtkern und Umland unterschieden (siehe dazu Abbildung 39).

- Stadtkern: Die gesamte Verkehrsinfrastruktur befindet sich auf versiegelter Fläche, 100% der Emission gelangt in die Kanalisation.
- Umland: Die Emissionen versickern im Boden.

Durch den Straßenabrieb werden verhältnismäßig geringe Schwermetallmengen emittiert. Es wird angenommen, dass die Emissionen sich im selben Verhältnis auf Kanalisation und Boden aufteilen wie die Emissionen aus der Straßenverkehrsinfrastruktur (Tabelle 62).

Tabelle 62: Aufteilung der Emissionen der Infrastruktur Straßen und des Straßenabriebs auf die Kanalisation und den Boden

	Infrastruktur Straße		**Straßenabrieb**	
	Kanalisation F_{KIVi} [kg/a]	**Boden** F_{BIVi} [kg/a]	**Kanalisation** F_{KISi} [kg/a]	**Boden** F_{BISi} [kg/a]
Kupfer	*0*	*0*	*0*	*1*
Zink	*42*	*325*	*0*	*2*
Blei	*0*	*0*	*0*	*3*
Cadmium	*0*	*0*	*0*	*0*

Oberleitung und Fahrdraht

Es wird angenommen, dass die gesamte Emission (Tabelle 53 und Tabelle 54) in den Boden gelangt (Tabelle 63).

Tabelle 63: Aufteilung der Emissionen von Oberleitung und Fahrdraht auf die Kanalisation und den Boden

	Oberleitung		Fahrdraht	
	Kanalisation F_{KIISi} [kg/a]	**Boden** F_{BIISi} [kg/a]	**Kanalisation** F_{KIIFi} [kg/a]	**Boden** F_{BIISFi} [kg/a]
Kupfer	*0*	*4*	*0*	*453*
Zink	*0*	*0*	*0*	*0*
Blei	*0*	*0*	*0*	*0*
Cadmium	*0*	*0*	*0*	*0*

7.1.3.2 Gesamte Fracht in die Kanalisation aus dem Subsystem Mobilien

(i) Prozess Kraftfahrzeuge

Verteilung der kilometerspezifischen Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs auf die unterschiedlichen Transportwege

Die freigesetzten Schwermetallmengen verbleiben entweder auf der Fahrbahn, am Fahrzeug oder werden mit der Luft unterschiedlich weit transportiert. Diese über die Luft verfrachteten Partikel finden sich im straßennahen Bereich (innerhalb von 50 Meter Entfernung vom Fahrbahnrand) wieder oder werden über atmosphärische Prozesse in größerer Entfernung von der Emissionsquelle abgelagert. Unter dem „straßennahen Bereich**“** wird in diesem Zusammenhang der Bereich im Abstand von maximal 50 Metern, normal zur Fahrbahnachse gemessen, verstanden.

Der schlechten Datenlage zufolge können nur Annahmen über die Verteilung getroffen werden. Grundlage für diese Annahmen bilden Arbeiten von Hewitt (Hewitt und Rashed 1990), Legret (Legret und Pagotto 1999) und Boller (Boller, Kaufmann et al. 2005) zu diesem Thema.

Demnach verteilen sich die Schwermetalle folgendermaßen auf:

- den Verbleib am Kraftfahrzeug 20%
- die Fahrbahn 40%
- den straßennahen Bereich 30%
- den Langstreckentransport über die Luft 10%

Geht man von der in Tabelle 56 angeführten Emissionen aus und teilt diese auf die verschiedenen Transportwege auf, so ergeben sich die in Tabelle 64 angeführten Werte.

Tabelle 64: Verteilung der Emissionen aus dem Kraftfahrzeugverkehr auf die einzelnen Transportwege

Emissionsverteilung	**Anteil** *[%]*	**Cu**	**Zn**	**Pb**	**Cd**
		[mg/Kfz-km]			
Fahrzeug (e_{KKi})	20	0,3	0,7	0,04	0,0001
Fahrbahn (e_{KSi})	40	0,6	1,4	0,07	0,0002
Straßennaher Bereich (e_{KDSi})	30	0,5	1,1	0,05	0,0002
Atmosphäre (e_{KLi})	10	0,2	0,4	0,02	0,0001
Gesamtemission (e_{Ki})	**100**	**1,6**	**3,5**	**0,18**	**0,0006**

Definition von Verkehrsbelastungsklassen und Ermittlung der Straßenlängen

Primäres Straßennetz

Für das primäre Straßennetz werden drei Verkehrsbelastungsklassen (VBKL) definiert (Tabelle 65).

Tabelle 65: Verkehrsbelastungsklassen

Klasse	**Verkehrsbelastung** *[Kfz/d]*	**angenommener Mittelwert** *[Kfz/d]*
VBKL I	1.000 - 10.000	5.000
VBKL II	10.000 - 20.000	15.000
VBKL III	20.000 - 30.000	25.000

Jeder Straßenzug des Primärstraßennetzes wird einer dieser Klassen zugeordnet (Abbildung 40). Die Verkehrsdaten im Villacher Verkehrskonzept stammen aus dem Jahre 1992. Der prognostizierte Verkehrszuwachs liegt weit unter der tatsächlichen Zunahme. Für das Jahr

2000 werden aus diesem Grund die im Verkehrskonzept für das Szenario 2010 berechneten Daten herangezogen.

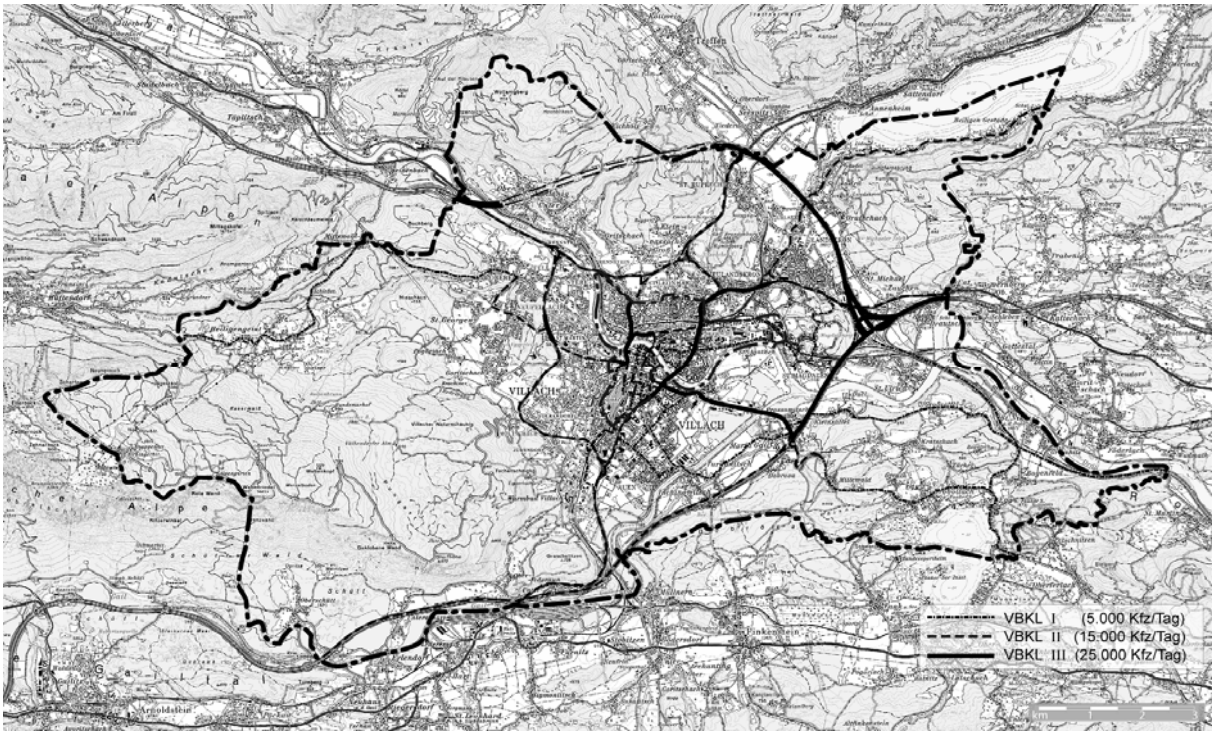


Abbildung 40:Primärstraßennetz aufgeteilt nach Verkehrsbelastungsklassen

Sekundäres Straßennetz

Die gesamte Verkehrsbelastung des sekundären Straßennetzes beträgt in etwa 20% der Belastung des primären Straßennetzes, dies entspricht rund 232.000 Kfz-km/Tag (Röschl 2005). Die Länge von 391,8 km ergibt sich aus der Differenz von Autobahn, Landes-, Gemeindestraßen und Wegen im Bezirk Villach Stadt (etwa 498,20 km aus Tabelle 44) und dem Primärstraßennetz (etwa 106,4 km - Summe aller in Tabelle 66 angeführten Straßen).
Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Verkehrsbelastung von etwa 592 Kfz/km*d.

Berechnung eines Korrekturfaktors

Der Korrekturfaktor ergibt sich aus Formel 30 zu 0,76.

Eintragsfracht über die Fahrbahn in die Kanalisation

Primäres Straßennetz

Die Straßenabwässer gelangen entweder in den Boden oder in die Kanalisation. Die Straßenlängen in unterschiedlichen Verkehrsbelastungsklassen, welche in die Kanalisation

entwässern, können graphisch ermittelt werden. Dies erfolgt durch die „Überdeckung“ der Karten aus Abbildung 18 und Abbildung 40. Das Ergebnis ist der Tabelle 66 zu entnehmen.

Tabelle 66: Straßenentwässerung des Primärstraßennetzes

Entwässerung des Primärstraßennetzes	**Fahrbahnbereich**			**Straßennaher Bereich**		
	Klasse I *[km]*	**Klasse II** *[km]*	**Klasse III** *[km]*	**Klasse I** *[km]*	**Klasse II** *[km]*	**Klasse III** *[km]*
Stadtkern						
Kanal	8	4	5	8	4	5
Boden	0	0	0	0	0	0
Umland						
Kanal	14	27	5	0	0	0
Boden	12	17	17	26	43	21
Bezirk Villach Stadt						
Kanal	22	30	9	8	4	5
Boden	12	17	17	26	43	21
Gesamt	**34**	**47**	**26**	**34**	**47**	**26**

Die gesamte, in die Kanalisation gelangende Metallfracht (Tabelle 67), errechnet sich mit Formel 31 und Formel 32.

Tabelle 67: Frachten der Fahrbahn des primären Straßennetzes in die Kanalisation

Kupfer	V_v	e_{KSCu}	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMSCuvp}$	l_{bv}	$F_{BMSCuvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			22	20	12	10
VBKL 2	15.000	0,6	0,8	30	80	17	44
VBKL 3	25.000			9	41	17	74
Summen					**141**		**128**
Zink	V_v	e_{KSZn}	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMSZnvp}$	l_{bv}	$F_{BMSZnvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			22	44	12	23
VBKL 2	15.000	1,4	0,8	30	177	17	98
VBKL 3	25.000			9	90	17	163
Summen					**311**		**283**
Blei	V_v	e_{KSPb}	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMSPbvp}$	l_{bv}	$F_{BMSPbvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			22	2	12	1
VBKL 2	15.000	0,1	0,8	30	9	17	5
VBKL 3	25.000			9	5	17	8
Summen					**16**		**14**
Cadmium	V_v	e_{KSCd}	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMSCdvp}$	l_{bv}	$F_{BMSCdvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			22	0,01	12	0,00
VBKL 2	15.000	0,0002	0,8	30	0,03	17	0,02
VBKL 3	25.000			9	0,01	17	0,03
Summen					**0,05**		**0,04**

Sekundäres Straßennetz

Für das sekundäre Straßennetz lassen sich die mittleren Anteilsfaktoren des Entwässerungssystems der Straßenflächen für die Bebauungsklassen 1 bis 4 errechnen (Tabelle 12). Die Anteilsfaktoren werden analog zu jenen aus Tabelle 13 ermittelt. Diese sind in Tabelle 68 zusammengefasst.

Etwa 82 % des sekundären Straßennetzes (oder rund 315 km) sind an die Kanalisation angeschlossen, ihre Abwässer werden über Misch- und Regenwasserkanäle abgeführt. Etwa 18 % (oder rund 77 km) sind nicht an das Kanalsystem angeschlossen, die Straßenabwässer dieser Bereiche versickern vor Ort im Boden.

Tabelle 68: Mittlere Anteilsfaktoren der Entwässerungssysteme von Straßenflächen in den unterschiedlichen Bebauungsklassen

BBKL	Fläche Aj [ha]	Straßenflächenentwässerung			
		MS [-]	TS [-]	MS+TS [-]	VS [-]
BBKL 1	1.804	*0,60*	*0,10*	**0,70**	0,30
BBKL 2	1.140	*0,86*	*0,07*	**0,93**	0,07
BBKL 3	76	*1,00*	*0,00*	**1,00**	0,00
BBKL 4	134	*1,00*	*0,00*	**1,00**	0,00
Gesamt	**3.153**	*0,74*	*0,08*	**0,82**	0,18

Die kilometerspezifische Emission (e_{KSi}) auf die Fahrbahn wird der Tabelle 64 entnommen. Der Korrekturfaktor ist im sekundären Straßennetz 1 (v=1). Zur Berechnung wird die Formel 31 herangezogen, die Ergebnisse sind in Tabelle 69 aufgelistet.

Tabelle 69: Fracht der Fahrbahn des sekundären Straßennetzes in die Kanalisation und den Boden

Entwässerung	Kupfer [kg/a]	Zink [kg/a]	Blei [kg/a]	Cadmium [kg/a]
Kanalisation (F_{KMSivs})	44	97	5	0,015
Boden (F_{BMSivs})	10	22	1	0,003
Summe	**54**	**119**	**6**	**0,019**

Eintragsfracht über den straßennahen Bereich in die Kanalisation

Primäres Straßennetz

Es wird angenommen, dass alle Schwermetallemissionen des Stadtkerns auf versiegelter Fläche landen und über das Regenwasser in den Kanal gelangen. Im Umland kommt es zur Deposition auf den an die Straße angrenzenden nicht versiegelten Flächen (Wiesen, Äcker, Wälder).

Zur Berechnung wird Formel 31 herangezogen, wobei für e_{KSi} die Emission in den straßennahen Bereich aus Tabelle 64 angesetzt wird. Für l_{kv} wird die Summe der Straßenlänge der jeweiligen VBKL im Stadtkern aus Tabelle 66 angesetzt. Für l_{Bv}, und damit zur Berechnung der Frachten in den Boden, wird die Summe der Straßenlänge der jeweiligen VBKL im Umland (Tabelle 66) angesetzt. Das Ergebnis findet sich in Tabelle 70.

Tabelle 70: Fracht des primären Straßennetzes über den straßennahen Bereich in die Kanalisation und den Boden

Kupfer	V_v	e_{KDSCu}	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMDCuvp}$	l_{bv}	$F_{BMDCuvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			8	5	26	17
VBKL 2	15.000	0,5	0,8	4	7	43	86
VBKL 3	25.000			5	15	21	70
Summen					**28**		**174**
Zink	V_v	$e_{KDS\ Zn}$	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMDZnvp}$	l_{bv}	$F_{BMDZnvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			8	12	26	38
VBKL 2	15.000	1,1	0,8	4	15	43	191
VBKL 3	25.000			5	34	21	156
Summen					**61**		**385**
Blei	V_v	$e_{KDS\ Pb}$	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMDPbvp}$	l_{bv}	$F_{BMDPbvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			8	1	26	2
VBKL 2	15.000	0,1	0,8	4	1	43	10
VBKL 3	25.000			5	2	21	8
Summen					**3**		**19**
Cadmium	V_v	$e_{KDS\ Cd}$	v	**Kanalisation**		**Versickerung**	
				l_{kv}	$F_{KMDCdvp}$	l_{bv}	$F_{BMDCdvp}$
	[Kfz/d]	*[mg/km]*	*[-]*	*[km]*	*[kg/a]*	*[km]*	*[kg/a]*
VBKL 1	5.000			8	0,00	26	0,01
VBKL 2	15.000	0,0002	0,8	4	0,00	43	0,03
VBKL 3	25.000			5	0,01	21	0,02
Summen					**0,01**		**0,06**

Sekundäres Straßennetz

Die Länge des sekundären Straßennetzes im Stadtkern ergibt sich aus der Differenz der Länge des Gesamtstraßennetzes im Stadtkern (65,5 km aus Tabelle 44) und dem Primärstraßennetz (16,1 km aus Tabelle 66) zu 49,4 km. Für die im straßennahen Bereich stattfindenden Einträge wird angenommen, dass die im Stadtkern auftretenden Emissionen alle über das Regenwasser ins Kanalsystem gelangen.

Die Länge des sekundären Straßennetzes im Umland ergibt sich aus der Differenz der Länge des Gesamtstraßennetzes im Umland (432,7 km aus Tabelle 44) und dem Primärstraßennetz

(90,3 km aus Tabelle 66) zu 342,4 km. Bei allen im Umland liegenden Straßen gelangen die Metalle in den Boden.

Die kilometerspezifische Emission in den straßennahen Bereich stammt aus Tabelle 64. Der Korrekturfaktor ist eins. Die Berechnung wird mit Formel 31 durchgeführt, die Ergebnisse sind in Tabelle 71 zusammengefasst.

Tabelle 71: Fracht aus der straßennahen Deposition des sekundären Straßennetzes in die Kanalisation und den Boden

Entwässerung	**Kupfer** *[kg/a]*	**Zink** *[kg/a]*	**Blei** *[kg/a]*	**Cadmium** *[kg/a]*
Kanalisation (F_{KMDivs})	5	11	1	0,00
Boden (F_{BMDivs})	35	78	4	0,01
Summe	**40**	**89**	**5**	**0,01**

Eintrag über das Fahrzeug in die Kanalisation

Emittierte Metalle lagern sich am Fahrzeug ab. Durch den Niederschlag oder im Zuge der Autowäsche wird ein Großteil der Partikel abgewaschen und gelangt über das Abwasser in den Kanal oder in den Boden.

Aufgrund der schlechten Datenlage können hierzu nur grobe Annahmen getroffen werden:

- über Autowäschen gelangen 75% der Metallfracht in die Umwelt
- über den Regen gelangen die restlichen 25% der Fracht in die Umwelt

Autowäsche

Schwedische Studien zeigen, dass etwa 33% aller Autowäschen in dafür vorgesehenen Anlagen stattfinden (Naturvardsverket 1996). Villach ist ein städtisches Gebiet, angenommen wird daher, es seien hier 50%. Die anderen 50% werden am privaten Grundstück durchgeführt, dort versickert das Abwasser direkt in den Boden.

Regenereignisse

Nahezu alle Fahrzeuge befinden sich auf versiegelten Flächen, deren Abwasser zur Kläranlage gelangt (75%), 25% der Fahrzeuge befinden sich auf Flächen, deren Abwasser im Boden versickert.

Fasst man die oben getroffenen Annahmen für Regenereignisse und für die Autowäsche zusammen, so teilen sich die am Fahrzeug verbleibenden Schwermetallmengen der Tabelle 64 auf Kanal und Boden im Verhältnis von 56 zu 44 auf. Die Ergebnisse der Berechnung sind in

Tabelle 72 zusammengestellt. Sie ergeben sich durch Formel 23, wobei für e_{Ki} e_{KKi} anzusetzen ist und der oben angeführte Abminderungsfaktor (0,56 für die Kanalisation und 0,44 für den Boden) multiplikativ zu inkludieren ist.

Tabelle 72: Fracht von Ablagerungen am Kraftfahrzeug in die Kanalisation und den Boden

	Kupfer *[kg/a]*	**Zink** *[kg/a]*	**Blei** *[kg/a]*	**Cadmium** *[kg/a]*
Kanalisation (F_{KMKi})	91	201	10	0,03
Boden (F_{BMKi})	71	156	8	0,02
Summe	**161**	**357**	**18**	**0,06**

Frachten in die Atmosphäre

Die in die Luft emittierte Metallmenge macht 10 % der Gesamtemission aus (Tabelle 64).

Die Fracht in die Atmosphäre errechnet sich mit Formel 23, wobei anstatt e_{Ki} e_{KLi} anzusetzen ist. Es ergeben sich die in Tabelle 73 angegebenen Frachten, diese besitzen eine Unsicherheit von ± 35%.

Tabelle 73: Frachten in die Atmosphäre

	Kupfer *[kg/a]*	**Zink** *[kg/a]*	**Blei** *[kg/a]*	**Cadmium** *[kg/a]*
Atmosphäre (F_{AMi})	81	178	9	0,03

(ii) Prozess Schienenfahrzeuge

Bei den Schienenfahrzeugen wird angenommen, dass sämtliche Emissionen in den Boden gelangen. Damit entspricht die gesamte Emission (E_{BBi}) der Fracht aus dem Prozess Schienenfahrzeuge in den Boden (F_{BMSi}).

Die gesamte Fracht aus dem Subsystem Mobilien in die Kanalisation ist in Tabelle 16 zusammengefasst.

7.1.3.3 Verteilung der Frachten durch die Kanalisation

Regen- und Mischwasser

Die Fracht der Gebäudeoberfläche ins Trenn- bzw. Mischsystem wurde bereits in Tabelle 14 ermittelt. Die Fracht der Infrastruktur Straße, Fahrbahn und der Kraftfahrzeuge in die Kanalisation (Tabelle 15 und Tabelle 16) verteilt sich laut dem in Tabelle 68 angegebenen

Verhältnis von Misch- zu Trennsystem auf beide Entwässerungssysteme. Bei den Frachten aus dem Prozess Kraftfahrzeuge in die Kanalisation (Tabelle 16) ist zu beachten, dass die am Fahrzeug verbleibenden Frachten F_{KMKi} ins Schmutzwasser gelangen. Es verteilt sich damit nur die Fracht der Fahrbahn und des straßennahen Bereichs auf das Regen- und Mischwasser. Die Zusammensetzung der Frachten im Misch- und Regenwasser ist in Tabelle 74 und Tabelle 75 aufgeschlüsselt.

Tabelle 74: Schwermetallfracht im Mischwasser

	Gebäude-oberfläche	Infrastruktur Straße	Fahrbahn	Kraftfahrzeuge	Summe
	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]
Kupfer	*3*	*0*	*0*	*196*	***199***
Zink	*516*	*38*	*0*	*434*	***988***
Blei	*0*	*0*	*0*	*22*	***22***
Cadmium	*0,15*	*0,01*	*0*	*0,07*	***0,23***

Tabelle 75: Schwermetallfracht im Regenwasser

	Gebäude-oberfläche	Infrastruktur Straße	Fahrbahn	Kraftfahrzeuge	Summe
	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]
Kupfer	*6*	*0*	*0*	*21*	***27***
Zink	*380*	*4*	*0*	*47*	***431***
Blei	*0*	*0*	*0*	*2*	***2***
Cadmium	*0,11*	*0*	*0*	*0,01*	***0,12***

Schmutzwasser

Die oberflächenbezogenen Schwermetalleinträge ins Schmutzwasser werden durch Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen und durch die Autowäsche verursacht (Tabelle 76).

Tabelle 76: Zusammensetzung der Schmutzwasserfracht von Oberflächen in die Kanalisation

	Fahrzeug (Autowäsche)	Wasserver- und Abwasserentsorgungsl.	Gesamt
	F_{KMKi} [kg/a]	F_{KlRi} [kg/a]	[kg/a]
Kupfer	*91*	*9*	***100***
Zink	*201*	*545*	***746***
Blei	*10*	*126*	***136***
Cadmium	*0,03*	*0,16*	***0,19***

7.2 Bewertung der Stoffflüsse

7.2.1 Nicht oberflächenbezogene Emissionen

7.2.1.1 Hausbrand

Über die Verbrennung von Holz, Kohle und Erdöl in Privathaushalten gelangen Schwermetalle in die Atmosphäre. Diese jährlichen Emissionen sollen nachfolgend anhand von Energiebilanzen für den Bezirk Villach Stadt grob abgeschätzt werden.

Laut Statistik Austria (Statistik 2006) beträgt das Energieaufkommen für den Betrieb von Raumheizungen, Klimaanlagen sowie zur Warmwassererzeugung in privaten Haushalten im Jahr 2004 österreichweit rund 130.000 TJ. Für den Bezirk Villach Stadt lässt sich daraus ein jährlicher Verbrauch von rund 2,2 kt Kohle, 2,0 kt Erdöl sowie 5,1 kt Brennholz in privaten Haushalten ermitteln.

Anhand spezifischer Schwermetallgehalte und Emissionsfaktoren der jeweiligen Brennstoffe (Tabelle 77) können die jährlichen Schwermetallemissionen aus dem Hausbrand errechnet werden.

Tabelle 77: Schwermetallgehalte und Emissionsfaktoren von Brennstoffen

Schwermetall	Mittelwerte [1) 2) 3)]			Emissionsfaktoren [4)]		
	Holz [mg/kg]	Kohle [mg/kg]	Öl [mg/kg]	Holz [mg/kg]	Kohle [mg/kg]	Öl [mg/kg]
Kupfer	*k.A.*	17	*k.A.*	2	14	0,2
Zink	51	33	*k.A.*	*k.A.*	*k.A.*	*k.A.*
Blei	2	*k.A.*	*k.A.*	*k.A.*	*k.A.*	*k.A.*
Cadmium	0,35	0,3	0,1	*k.A.*	*k.A.*	*k.A.*

1)….(Fehringer, Rechberger et al. 1997)
2)….(Karlsson, Fredrikson et al. 2004)
3)….(Itkonen und Jantunen 1986)
4)….(Svidén, Hedbrant et al. 2000)

Die Kupferemissionen werden über die in Tabelle 77 angegebenen Emissionsfaktoren in die Luft berechnet. Für Zink, Blei und Cadmium sind keine Emissionsfaktoren vorhanden, daher werden die in Tabelle 78 angeführten Transferkoeffizienten benutzt. Der mittlere Schwermetallgehalt der Brennstoffe aus Tabelle 77 wird mit dem Transferkoeffizienten in die Luft multipliziert, damit ergeben sich die spezifischen Emissionen in die Atmosphäre.

Tabelle 78: Transferkoeffizienten in die Asche und Abluft von Biomassefeuerungen (Fehringer, Rechberger et al. 1997)

	Asche [-]	**Abluft** [-]
Zn	0,68	0,32
Pb	0,46	0,54
Cd	0,53	0,47

Tabelle 79 zeigt die durch Hausbrand bedingten gesamten Schwermetallemissionen. Sie ergeben sich durch die Multiplikation des jährlichen Brennstoffbedarfs mit den spezifischen Emissionen in die Atmosphäre.

Tabelle 79: Gesamte jährliche Schwermetallemission aus dem Hausbrand

Schwermetall	**Emissionen**			**Gesamte Emission**
	Holz *[kg/a]*	**Kohle** *[kg/a]*	**Öl** *[kg/a]*	*[kg/a]*
Kupfer	9	30	0	**39**
Zink	82	23	k.A.	**105**
Blei	6	k.A.	k.A.	**6**
Cadmium	0,8	0,3	0,1	**1,2**

7.2.1.2 Treibstoff

Treibstoff enthält Schwermetallverunreinigungen. Im Zuge des Verbrennungsprozesses gelangen diese in die Atmosphäre. Es wird angenommen, dass der Treibstoffverbrauch auf 100 km in etwa 8 Liter ausmacht. Die Emissionen über den Treibstoff belaufen sind auf etwa 2,8 kg Kupfer und Blei sowie 8 kg Zink (Tabelle 80).

Tabelle 80: Schwermetallemission über den Treibstoff

	Schwermetall-gehalt [1)] [mg/l]	**Treibstoffverbrauch auf 100km** [l/100km]	**Täglich zurückgelegte Kilometer im System** [km/d]	**Emission** [kg/a]
Kupfer	*0,07*			*3*
Zink	*0,20*	*8*	*1392000*	*8*
Blei	*0,07*			*3*

[1)]….Bergbäck et al., 1998

7.2.1.3 Kommunales Abwasser

Das Gesamteinzugsgebiet der Kläranlage St. Agathen umfasst neben dem Einzugsgebiet des Bezirks Villach Stadt die verbleibenden Anteile des Wasserverbandes Ossiacher See sowie des Abwasserverbandes Faaker See. Die Abwässer der Kanalisationen Arnoldstein und Bad Bleiberg werden ebenfalls in der ARA St. Agathen gereinigt. Die Kläranlage ist auf eine maximale Auslastung von 200.000 EGW (Einwohnergleichwerten) bemessen (Büro Dr. Lengyel ZT GmbH 1979). Derzeit sind rund 86.000 Einwohner an die Kläranlage angeschlossen. Unter Berücksichtigung des industriellen und gewerblichen Abwassers ergibt sich eine Auslastung von rund 125.000 EGW (Wernitznig 2005). Anhand der Einwohnerzahlen der jeweiligen Gemeinden kann der Anteil des Bezirkes Villach Stadt am Zulauf zur Kläranlage mit rund 71 % abgeschätzt werden. Demnach ist mit einer Schmutzwasserfracht (inklusive Industrie und Gewerbe) von rund 89.000 EGW aus dem Untersuchungsgebiet zu rechnen (Tabelle 81).

Tabelle 81: Einwohnergleichwerte der Kläranlage St. Agathen

Einzugsgebiet	ARA St. Agathen			System Bezirk Villach Stadt	
	EW	EGW [1]		EW	EGW [2]
		Bemessung	Auslastung		
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
AWV Villach	42.600	116.000	70.000	42.600	70.000
WV Ossiacher See	23.650	34.000	30.000	12.600	16.000
AWV Faaker See	10.500	30.000	13.000	2.300	2.900
Arnoldstein+Bad Bleiberg	9.600	20.000	12.000	-	-
Gesamt	**86.350**	**200.000**	**125.000**	**57.500**	**88.900**

[1] ….. Bemessungswert aus Kanalprojekt Villach (Büro Dr. Lengyel ZT GmbH, 1979)
Gesamtauslastung: entsprechend CSB_{110} - Fracht (Aufteilung abgeschätzt)

[2] ….. EW + Zuschlag für Gewerbe und Industrie (abgeschätzt)

Multipliziert man die Einwohnergleichwerte im Bezirk Villach Stadt mit der einwohnerspezifischen Fracht aus Haushaltsabwässern, so ergibt sich die gesamte Fracht aus den kommunalen Abwässern. Tabelle 82 zeigt, dass jährlich etwa 340 kg Kupfer, 1400 kg Zink, 140 kg Blei und 5 kg Cadmium über kommunale Abwässer in die Kanalisation gelangen.

Tabelle 82: Jährliche Schwermetallemission aus kommunalem Abwasser

Schwermetall	**einwohnerspezifische Frachten** [1)]				**Frachten (EGW)**	
	Ausscheid. u. Speisereste *[g/E.a]*	Leitungs-wasser *[g/E.a]*	Reinigungs-wasser *[g/E.a]*	**Summe** *[g/E.a]*	**Villach** *[kg/a]*	Gesamt *[kg/a]*
Kupfer	1,1	1,5	1,2	**3,8**	**338**	*475*
Zink	5	6	5	**16**	**1422**	*2000*
Blei	0,15	0,15	1,3	**1,6**	**142**	*200*
Cadmium	0,02	0,01	0,03	**0,06**	**5**	*7*

[1)] ….. Datenquelle: Zessner, 1999

7.3 Datenblätter zur Erhebung der metallischen Bauwerksoberfläche

Kategorie[1]: …….…….. **Haustyp[2]:** ……..…… Datenblatt: ……

Geschoßzahl: …… **Alter:** …… **Ort:** ……..……...

Bemerkung: ……

Dach	***Material***	***Maße***	***Bemerkung [3]***
Kamin	verzinktes Blech ☐ Aluminium ☐ Kupfer ☐ Ziegel ☐ Beton ☐ **Anstrich** ☐ Sonstiges ☐ …….....		
Dach	Kupfer ☐ Zinkblech ☐ verzinktes Blech ☐ Eternit u.ä. ☐ Ziegel ☐ Bitumenbahn ☐ **Anstrich** ☐ Sonstiges ☐ …….....	LxB: ……	
Vordach	Kupfer ☐ Zinkblech ☐ verzinktes Blech ☐ Eternit u.ä. ☐ Ziegel ☐ Bitumenbahn ☐ **Anstrich** ☐ Sonstiges ☐ …….....	LxB: ……	
Dachrinnen	Kupfer ☐ Zinkblech ☐ verzinktes Blech ☐ Aluminium ☐ Kunststoff ☐ **Anstrich** ☐ Sonstiges ☐ …….....	L:……..…(horiz.) L: ……..……(vertikal)	4)
Balkon/Loggia	Geländer (Holme) ☐ flächig ☐ Material: …….	LxH: ……	
Dachabschluss	Kupfer ☐ Zinkblech ☐ verzinktes Blech ☐ Eternit u.ä. ☐ Ziegel ☐ Bitumenbahn ☐ **Anstrich** ☐ Sonstiges ☐ …….....		
Blitzableiter			
"Dachlawinen-sicherung"			
Sonstiges			

1) Kategorien entsprechend Bebauungsklassen:

1a … freistehende Häuser (entspr. 1 Stock)
1b … freistehende Häuser - dörflicher Charakter (enstpr. 1 Stock)
2 ….. Reihenhaus - städtische Randgebiete (enstpr. 2 Stöcke)
3 ….. Stadtzentrum (entspr. ≥ 3 Stöcke)
4 ….. Sonstige (Fabrik, Industriepark, Schulen, öffentliche Gebäude,…)

2) Häusertyp:

Einfamilienhaus, Wohnblock, Öffentliche Gebäude, Industriegebäude, Sonstige Nutzung

3) Exponierung der Fläche (prozentuell)

4) Einmündung:

a ….. Kanalisation
b ….. Versickerung
c ….. RW-Zisterne, etc.

Fassade	***Material***	***Maße***	***Bemerkung***
Fensterbänke	Holz (beschichtet) ☐ Holz (lackiert) ☐ **Anstrich** ☐ Zinkblech ☐ verzinktes Blech ☐ Kunststoff ☐ Aluminium ☐ Sonstiges ☐ …….....	LxB: …….. Anzahl: ……	
Tropfbleche	Holz (beschichtet) ☐ Holz (lackiert) ☐ **Anstrich** ☐ Zinkblech ☐ verzinktes Blech ☐ Kunststoff ☐ Aluminium ☐ Sonstiges ☐ …….....		
Sonstiges			

Sonstiges	***Material***	***Maße***	***Bemerkung***
Zaun	Holz (lackiert) ☐ verzinkter Draht ☐ geschmiedet ☐ Aluminium ☐ **Anstrich** ☐ Sonstiges ☐ …….....	LxH: ……	
Sonstiges			

Anmerkungen (Skizzen):

8 VERZEICHNISSE

8.1 Abbildungen

Abbildung 1: Veränderung der Korrosions- und Abschwemmrate bei Kupferdachbahnen über die Zeit (Faller 2003) *14*
Abbildung 2: Veränderung der Zinkkorrosionsrate (Van Assche und Regoli 2003) *15*
Abbildung 3: Prozentueller Beitrag der einzelnen Quellen zur gesamten Zinkfracht im Zulauf der Kläranlage Henriksdal (Sörme und Lagerkvist 2002) *24*
Abbildung 4: Schwermetallmengen im Zulauf der Stockholmer Kläranlagen von 1975 bis 1995 (Bergbäck 1998) *25*
Abbildung 5: Systemdefinition *34*
Abbildung 6: Methodisches Vorgehen zur Analyse der Stoffflüsse *38*
Abbildung 7: Subsystem Immobilien *40*
Abbildung 8: Subsystem Mobilien *51*
Abbildung 9: Beeinflussbare Prozesse, erfasste und nicht erfasste Flüsse im System *76*
Abbildung 10: Eintragsflächen an Verkehrswegen *83*
Abbildung 11: Abnahme der Depositionsmenge mit zunehmendem Abstand vom Fahrbahnrand (Hewitt und Rashed 1990) *86*
Abbildung 12 : Bebaute Fläche eingeteilt nach Bebauungsklassen *99*
Abbildung 13: Gesamte Zinkemissionen der Gebäudeoberflächen aufgeteilt nach BBKLen *103*
Abbildung 14: Oberflächenbezogene Zinkemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a] *104*
Abbildung 15: Oberflächenbezogene Kupferemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a] *105*
Abbildung 16: Oberflächenbezogene Bleiemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a] *106*
Abbildung 17: Oberflächenbezogene Cadmiumemission im Bezirk Stadt Villach (gerundete Werte) [kg/a] *107*
Abbildung 18: Abwasserverbände und deren Entsorgungsgebiet *108*
Abbildung 19: Zinkflüsse im Bezirk Villach Stadt *119*

Abbildung 20: Kupferflüsse im Bezirk Villach Stadt *120*
Abbildung 21: Bleiflüsse im Bezirk Villach Stadt *121*
Abbildung 22: Cadmiumflüsse im Bezirk Villach Stadt *122*
Abbildung 23: Zink- und Kupferflüsse in die Umweltmedien *123*
Abbildung 24: Blei- und Cadmiumflüsse in die Umweltmedien *124*
Abbildung 25: Einwohnerbezogene jährliche Emission der Metalle Zink, Kupfer, Blei und Cadmium von Oberflächen *125*
Abbildung 26: Anteil der oberflächenbezogenen an den gesamten Emissionen im Bezirk Villach Stadt *126*
Abbildung 27: Einwohnerbezogenes emissionswirksames Lager von Immobilien und Mobilien *129*
Abbildung 28: Anteil der in Villach über den Klärschlamm erfassten Schwermetallfracht *131*
Abbildung 29: Flächenspezifische Eintragsfracht und Eintragsfläche in Sickeranlagen an Gebäuden für Zink im Bezirk Villach Stadt *134*
Abbildung 30: Verdopplungszeitraum in Sickeranlagen für Zink *136*
Abbildung 31: Zeitspanne bis der Grenzwert für Kupfer, Zink und Cadmium in Sickeranlagen überschritten wird *138*
Abbildung 32: Oberflächenbezogene Zinkemissionen *145*
Abbildung 33: Oberflächenbezogene Kupferemissionen *146*
Abbildung 34: Oberflächenbezogene Bleiemissionen *147*
Abbildung 35: Oberflächenbezogene Cadmiumemissionen *147*
Abbildung 36: Erfasster Anteil der Schwermetallfrachten im Bezirk Villach Stadt *152*
Abbildung 37: Verdopplungszeitraum von Zink in Sickeranlagen unterschiedlicher BBKLen *153*
Abbildung 38: Berechneter Zeitraum bis zur Grenzwertüberschreitung des Zinkgehaltes in Sickeranlagen *154*
Abbildung 39: Aufteilung des Bezirks Villach Stadt in Stadtkern und Umland *164*
Abbildung 40:Primärstraßennetz aufgeteilt nach Verkehrsbelastungsklassen *185*

8.2 Tabellen

Tabelle 1: Abschwemmrate ausgewählter metallischer Werkstoffe (Persson und Kucera 2000) *14*

Tabelle 2: Abschwemmrate ausgewählter Rohrleitungswerkstoffe *16*

Tabelle 3: Richtwerte für Frachten aus dem Haushaltsabwasser und aus der atmosphärischen Deposition (Zessner 1999) *24*

Tabelle 4: Durchschnittliche Menge an Spurenelementen in der kontinentalen Erdkruste und in vier häufig auftretenden Gesteinen (Krauskopf und Bird 1995) und (Adriano 1986) *27*

Tabelle 5:Definition der unterschiedlichen Bebauungsklassen *98*

Tabelle 6: Bebaute Fläche und Gebäudeflächenanteil im Bezirk Villach Stadt *99*

Tabelle 7: Referenzgebäude der Bebauungsklassen *100*

Tabelle 8: Schwermetallemittierende Oberflächen der BBKLen pro Referenzgebäude ($\overline{A}_{Oij}$) im Bezirk Villach Stadt *101*

Tabelle 9: Abschwemmraten (a_{Bi}) unterschiedlicher Oberflächenmaterialien in [g/m².a] *101*

Tabelle 10: Flächenspezifische Emission der Bebauungsklassen *102*

Tabelle 11: Gesamte Emissionen der Gebäudeoberfläche *103*

Tabelle 12:Entwässerungssysteme im Bezirk Villach Stadt *109*

Tabelle 13: Mittlere Anteilsfaktoren k_{TMi} und k_{MMi} der Gebäudeentwässerung nach Bebauungsklassen *110*

Tabelle 14: Frachten der Gebäudeoberfläche (F_{KIBi}) in die Kanalisation *111*

Tabelle 15: Zusammensetzung der Fracht in die Kanalisation (F_{KIi}) aus dem Subsystem Immobilien *112*

Tabelle 16: Frachten aus dem Subsystem Mobilien in die Kanalisation *112*

Tabelle 17: Verteilung der Schwermetallfrachten durch die Kanalisation *114*

Tabelle 18: Aufteilung der Fracht des Zulaufes auf den Klärschlamm und das geklärte Abwasser *114*

Tabelle 19: Fracht der Gebäudeoberfläche (F_{BIBi}) in den Boden *115*

Tabelle 20: Zusammensetzung der Fracht aus dem Subsystem Immobilien in den Boden *116*

Tabelle 21: Zusammensetzung der Fracht aus dem Subsystem Mobilien in den Boden ... *117*
Tabelle 22: Zusammensetzung der Fracht in den Boden ... *117*
Tabelle 23: Zusammensetzung der Schwermetallfracht ins Oberflächengewässer und Sediment ... *118*
Tabelle 24: Nicht oberflächenbezogene und oberflächenbezogene Emissionen in die Luft, die Kanalisation und den Boden im Bezirk Villach Stadt ... *126*
Tabelle 25: Emissionswirksames Lager verzinkter Gebäudeoberflächen im Bezirk Villach Stadt ... *127*
Tabelle 26: Emissionswirksames Lager der Bremsbeläge im Bezirk Villach Stadt ... *128*
Tabelle 27: Gesamtes emissionswirksames Lager im Bezirk Villach Stadt ... *128*
Tabelle 28: Erfasster Anteil der Stoffflüsse im Bezirk Villach Stadt ... *130*
Tabelle 29: Erforderliche Sickerfläche für die Referenzgebäude nach ÖNORM B 2506-1 ... *132*
Tabelle 30: Gesamte und flächenspezifische Eintragsfracht der BBKLen ... *132*
Tabelle 31: Gesamte Eintragsfläche in den BBKLen ... *133*
Tabelle 32: Gesamte Eintragsfläche in den BBKLen und deren flächenspezifische Eintragsfracht ... *134*
Tabelle 33: Referenzwerte (Amt der Kärntner Landesregierung 1999) und Grenzwerte (Kärntner Landesregierung 2000) für Schwermetallgehalte in Böden ... *135*
Tabelle 34: Verdopplungszeitraum in den Böden der Sickeranlagen ... *136*
Tabelle 35: Oberflächenbezogene Frachten in den Boden, den Klärschlamm, ins Gewässer und in die Luft ... *149*
Tabelle 36: Vergleich der Zulauffracht der Kläranlage Henriksdal in Stockholm mit jener der Kläranlage St. Agathen in Villach ... *150*
Tabelle 37: Oberflächenbezogene Emissionen pro Einwohner ... *151*
Tabelle 38: Abschwemmraten zink- und kupferhaltiger Materialien ... *159*
Tabelle 39: Abschwemmrate (a_{Ri}) unterschiedlicher Materialien ... *160*
Tabelle 40: Bauwerksspezifische Faktoren ... *161*
Tabelle 41:Materialspezifischer Faktor(f_{Mit}) ... *161*
Tabelle 42:Flächenspezifische Emission (e_{Rij}) der Bebauungsklassen ... *161*

Tabelle 43: Gesamte Emission (E_{Ri}) der Wasserver- und Abwasserentsorgungsleitungen ... 162
Tabelle 44: Straßenlängen nach Kategorien im Bezirk Villach Stadt ... 165
Tabelle 45:Festlegung der Infrastrukturelemente für die Straßenkategorien ... 166
Tabelle 46: Infrastrukturemissionen Bezirk Villach Stadt - Stadtkern ... 167
Tabelle 47: Infrastrukturemissionen Bezirk Villach Stadt - Umland ... 168
Tabelle 48: Gesamtemissionen aus der Straßeninfrastruktur ... 169
Tabelle 49: Kilometerspezifische Emission durch den Abrieb der Deckschicht ... 171
Tabelle 50: Ausgewählte Konstruktionselemente der Oberleitung ... 171
Tabelle 51: Chemische Zusammensetzung und Abschwemmrate ausgewählter Konstruktionsmaterialien ... 172
Tabelle 52: Länge der Gleisanlagen im Bezirk Villach Stadt ... 173
Tabelle 53: Kilometerspezifische Emissionen und gesamte Emission (E_{ISi}) der Oberleitung ... 173
Tabelle 54: Kupferemission aus Korrosion und dem Verschleiß von Fahrdrähten ... 175
Tabelle 55: Mittlere Schwermetallkonzentration von Reifenlaufflächen und Bremsbelägen ... 177
Tabelle 56: Kilometerspezifische Emission (e_{Ki}) durch Abrieb von Reifenlaufflächen und Bremsbelägen ... 177
Tabelle 57: Gesamte durch den Kraftfahrzeugverkehr verursachten Emissionen ... 178
Tabelle 58: Charakteristik der Bremsbeläge eines Reisezugwagens der ÖBB (Körber 2005) ... 179
Tabelle 59: Kilometerspezifische Emissionen (e_{BBi}) ... 180
Tabelle 60: Täglich in Villach von Personenzügen zurückgelegte Wegstrecke ... 180
Tabelle 61: Gesamte Emission (E_{BBi}) der Schienenfahrzeuge im Bezirk Villach Stadt ... 181
Tabelle 62: Aufteilung der Emissionen der Infrastruktur Straßen und des Straßenabriebs auf die Kanalisation und den Boden ... 182
Tabelle 63: Aufteilung der Emissionen von Oberleitung und Fahrdraht auf die Kanalisation und den Boden ... 183
Tabelle 64: Verteilung der Emissionen aus dem Kraftfahrzeugverkehr auf die einzelnen Transportwege ... 184
Tabelle 65: Verkehrsbelastungsklassen ... 184
Tabelle 66: Straßenentwässerung des Primärstraßennetzes ... 186

Tabelle 67: Frachten der Fahrbahn des primären Straßennetzes in die Kanalisation 187
Tabelle 68: Mittlere Anteilsfaktoren der Entwässerungssysteme von Straßenflächen in den unterschiedlichen Bebauungsklassen 188
Tabelle 69: Fracht der Fahrbahn des sekundären Straßennetzes in die Kanalisation und den Boden 188
Tabelle 70: Fracht des primären Straßennetzes über den straßennahen Bereich in die Kanalisation und den Boden 189
Tabelle 71: Fracht aus der straßennahen Deposition des sekundären Straßennetzes in die Kanalisation und den Boden 190
Tabelle 72: Fracht von Ablagerungen am Kraftfahrzeug in die Kanalisation und den Boden 191
Tabelle 73: Frachten in die Atmosphäre 191
Tabelle 74: Schwermetallfracht im Mischwasser 192
Tabelle 75: Schwermetallfracht im Regenwasser 192
Tabelle 76: Zusammensetzung der Schmutzwasserfracht von Oberflächen in die Kanalisation 192
Tabelle 77: Schwermetallgehalte und Emissionsfaktoren von Brennstoffen 193
Tabelle 78: Transferkoeffizienten in die Asche und Abluft von Biomassefeuerungen (Fehringer, Rechberger et al. 1997) 194
Tabelle 79: Gesamte jährliche Schwermetallemission aus dem Hausbrand 194
Tabelle 80: Schwermetallemission über den Treibstoff 194
Tabelle 81: Einwohnergleichwerte der Kläranlage St. Agathen 195
Tabelle 82: Jährliche Schwermetallemission aus kommunalem Abwasser 196

9 GLOSSAR

Äußere Oberfläche

Unter der äußeren Oberfläche wird jene Fläche einer Immobilie oder Mobilie verstanden, die das Objekt zur Umgebung hin abgrenzt.

Bilanz

Gegenüberstellung der innerhalb der zeitlichen Systemgrenzen in das System gelangenden Flüsse an Gütern und Stoffen (Import) und der entsprechenden Flüsse aus dem System hinaus (Export) unter Berücksichtigung etwaiger Lagerveränderungen (ÖNORM 2005).

Fluss

Bewegung der unterschiedlichen Güter oder Stoffe zwischen Prozessen oder in das System hinein oder aus dem System heraus mit der Einheit zB Masse oder Volumen pro Zeit (ÖNORM 2005).

Gut

Material, das aus einem oder mehreren Stoffen besteht und handelbar ist (ÖNORM 2005).

Häusliches Abwasser

Abwasser aus Wohngebieten und den dazugehörigen Einrichtungen, vorwiegend menschlichen Ursprungs und der Tätigkeit in Haushaltungen (Europäischer Rat 1991).

Innere Oberfläche

Unter der inneren Oberfläche wird jene Fläche einer Immobilie oder Mobilie verstanden, die das Objekt zum Innenraum hin abgrenzt.

Kanalisation

Leitungssystem, in dem kommunales Abwasser gesammelt und transportiert wird (Europäischer Rat 1991).

Klärschlamm

Behandelter oder unbehandelter Schlamm aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen (Europäischer Rat 1991).

Kommunales Abwasser

Häusliches Abwasser oder Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser und/oder Niederschlagswasser (Europäischer Rat 1991).

In dieser Arbeit wird unter kommunalem Abwasser das häusliche und industrielle Abwasser verstanden.

Lager

Bestand von Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses (ÖNORM 2005).

Letzte Senke

Unter einer letzten Senke versteht man einen Ort, wo Stoffe zumindest 10.000 Jahre verweilen (Döberl, Huber et al. 2001).

Mischkanalisation (Mischsystem)

Haus-, Industrie- und Niederschlagsabwässer werden gemeinsam abgeführt (Wikipedia 2006).

Modifizierte Mischkanalisation

Schmutzwässer sowie behandlungsbedürftige Niederschlagsabwässer werden zusammen abgeführt. Nicht behandlungsbedürftige Niederschlagsabwässer werden vor Ort versickert (Wikipedia 2006).

Oberflächenbezogene Emissionen

Die von ausgewählten Oberflächen verursachten Schwermetallemissionen.

Prozess

Vorgang der Umwandlung (biologisch, chemisch, physikalisch), des Transportes oder der Lagerung von Gütern oder Stoffen (ÖNORM 2005).

Referenzwert (1999)

Als Referenzwert (1999) wird in dieser Arbeit der mittlere Schwermetallgehalt des unbelasteten Bodens in Villach, ermittelt durch die Auswertung von Messwerten für Grünland aus der Kärntner Bodenzustandsinventur (Amt der Kärntner Landesregierung 1999), bezeichnet.

Senke

In dieser Arbeit wird unter einer Senke ein Umweltkompartiment, das in der Lage ist, einen Stoff entweder zu umweltverträglichen Stoffen abzubauen oder diesen aufzunehmen und über lange Zeiträume bis zu einem Zeitraum von 10.000 Jahren zu beherbergen, verstanden.

Stoff

Material, das aus identischen Einzelteilen besteht und entweder ein chemisches Element oder eine chemische Verbindung in reiner Form ist (ÖNORM 2005).

System

Sammelbezeichnung für eine Menge von Prozessen (einschließlich Lager), die miteinander über Flüsse in Beziehung stehen, und die Abgrenzung nach außen (ÖNORM 2005).

Systemgrenze

Zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu untersuchenden Systems (ÖNORM 2005).

Transferkoeffizient

Anteil des gesamten in den Prozess eingeführten Gutes oder Stoffes, der in den Output x transferiert wird (ÖNORM 2005).

Trennkanalisation (Trennsystem)

Schmutzwässer werden in einen Kanal abgeführt, Niederschlagsabwässer in einen separaten Kanal. Wegen der in der Regel geringen Schmutzfracht von Regenwässern werden diese meistens direkt in Gewässer eingeleitet und nicht in Kläranlagen behandelt (Wikipedia 2006).

Verdopplungszeitraum

Unter dem Verdopplungszeitraum wird jene Zeitspanne verstanden, in der sich in einer mit bestimmter Mächtigkeit definierten Bodenschicht des Oberbodens die geogene Hintergrundkonzentration eines Schwermetalls verdoppelt.

Anmerkung: In der Fallstudie wird nicht die geogene Hintergrundkonzentration, sondern der Referenzwert (1999) als Bezugswert verwendet.

Verminderungspotential einer Maßnahme

Unter dem Verminderungspotential (VP) einer Maßnahme versteht man jenen Prozentsatz, um welchen eine Maßnahme die Fracht eines Metalls in ein Umweltmedium oder in die Umwelt zu vermindern vermag.

10 LITERATUR

Aastrup, M. und Thunholm, B. (2001). "Heavy metals in Stockholm groundwater - concentrations and fluxes." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 43-53.

Adriano, D. C. (1986). Trace elements in the terrestrial environment. Springer - Verlag New York Inc.

Ahlman, S. (2006). Modelling of substance flows in urban drainage systems. Department of Civil and Environmental Engineering. Chalmers University of Technology. Göteborg.

Akerblom, S. (2006). Anthropogenic heavy metals in organic forest soils - distribution, microbial risk assessment and Hg mobility. Faculty of Natural Resources and Agricultural Science. Swedish University of Agricultural Science. Uppsala.

Alloway, B. J. (1995). Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional.

Amt der Kärntner Landesregierung (1999). Bodenzustandsinventur Kärnten. Abteilung 15 - Umweltschutz und Technik. Klagenfurt.

Anderberg, S., Bergbäck, B. und Lohm, U. (1989). "Flow and distribution of chromium in the Swedish environment: a new approach to studying environmental pollution." Ambio 18(4): 216 - 220.

Anderberg, S. und Stigliani, W. M. (1994). "An integrated approach for identifying sources of pollution: the example of cadmium pollution in the Rhine river basin." Water, Science and Technology 3: 61 - 67.

Athanasiadis, K. (2005). On - site infiltration of roof runoff by using clinoptilolite as an artifical barrier material. Lehrstuhl für Wassergüte- und Abfallwirtschaft. Technische Universität München. München.

Athanasiadis, K., Helmreich, B. und Wilderer, P. A. (2005). Infiltration of a copper runoff through artificial barriers. 10th International Conference on Urban Drainage. Copenhagen.

Ayres, R. U. und Rod, S. R. (1986). "Patterns of Pollution in the Hudson - Raritan Basin." Environment 28(4): 14-43.

Baccini, P. und Brunner, P. H. (1991). Metabolism of the Anthroposphere. Springer Verlag.

Bergbäck, B. (1992). Industrial metabolismn: the emerging landscape of heavy metal immission in Sweden. Tema Vatten. Linköping University. Linköping.

Bergbäck, B. (1998). Metaller i Stockholm: kunskapssammanställningar av metallflöden via olika verksamheter i Stockholm. Statens Naturvardsverk. Stockholm.

Bernard, A. M., Vyskocil, A., Roels, H., Kriz, J., Kodl, M. und Lauwerys, R. (1995). "Renal effects in children living in the vicinity of a lead smelter." Environmental Research 68: 91-95.

Boller, M., Kaufmann, P. und Ochsenbein, U. (2005). Bankette bestehender Straßen - Untersuchung der Versickerung von Straßenabwasser über Straßenrandstreifen an einer bestehenden Straße. Eawag Siedlungswasserwirtschaft. Dübendorf.

Boller, M., Kaufmann, P. und Ochsenbein, U. (2005). Wasser- und Materialflüsse bei der Entwässerung von Metall-, Ziegel-, Kies- und Gründächern. Eawag Siedlungswasserwirtschaft. Dübendorf.

Brasholz, A. (2002). Anstrichschäden im Bild. Frauenhofer IRB Verlag. Stuttgart.

Breit (2005). Maximaler Anteil an Spikereifen in Österreich im Winter. Mündliche Mitteilung an G. Rebernig. Wien.

Brunner, P. H. und Rechberger, H. (2004). Practical Handbook of Material Flow Analysis. Lewis Publishers. Boca Raton, London, New York, Washington DC.

Büro Dr. Lengyel ZT GmbH (1979). Kanalprojekt Villach. Wien.

Cencic, O. und Rechberger, H. (2006). Entwicklung eines Computerprogramms zur Unterstützung der Stoffflussanalyse (Projekt ECUS). Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien. Wien.

De Miguel, E., Llamas, J. F., Chacon, E., Berg, T., Larssen, S., Royset, O. und Vadset, M. (1996). "Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead." Atmospheric Environment 31: 2733-2740.

Deutsche Bundesregierung (1999). Bundes - Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV).

Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (2002). Werkstoffe in der Trinkwasser - Installation. Dezember 2006. www.dvgw.de.

Döberl, G., Huber, R. und Brunner, P. H. (2001). Final storage quality as a necessary goal for waste management. Conference: Waste in a Competitive World. Stavanger. ISWA.

Eklund, M. (1995). Reconstructions of historical metal emissions and their dispersion in the environment. Department of Water and Environmental Studies. Linköping University. Linköping.

Ekstrand, S., Östlund, P. und Hansen, C. (2001). "Digital air photo processing for mapping of copper roof distribution and estimation of related copper pollution." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 267 - 278.

Europäische Umweltagentur (2003). Die Umwelt in Europa: Der Dritte Lagebericht. Kopenhagen.

Europäischer Rat (1991). Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser. (91/271/EWG).

Europäisches Komitee für Normung (1999). Korrosion von Metallen und Legierungen: Grundbegriffe und Definitionen. ISO 8044: 1999.

Europäisches Parlament und Europäischer Rat (2000). Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge.

Europäisches Parlament und Europäischer Rat (2001). Decision No 2455/2001/EC of the European Parliament and of the council of 20 November 2001 establishing the list of priority substances in the field of water policy and amending Directive 2000/60/EC.

Faller, M. (2003). Runoff behaviour of different materials used for roofing and facades - 5 years exposure study in Switzerland. Conference: Release of Metals due to Corrosion of Materials. Munich. Swedish Corrosion Institute.

Fehringer, R., Rechberger, H., Pesonen, H. und Brunner, P. H. (1997). Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (Projekt ASTRA). Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien. Wien.

FSV (2002). Straßenausrüstung (Kapitel 5.2). Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr. Wien.

Fuchs, S., Scherer, U. und Hillenbrand, T. (2002). Schwermetalleinträge in die Oberflächengewässer Deutschlands. Umweltbundesamt. Berlin.

Garg, B., Cadle, S., Mulawa, P. und Groblicki, P. (2000). "Break wear particulate matter emissions." Environmental Science and Technology 34: 4463-4469.

Gustafsson, M. (2001). Icke - avgasrelaterade partiklar i vägmiljö. Statens Väg- och Transportforskningsinstitutet. Linköping.

Haider, R. (1999). Verunreinigungen von Straßenoberflächenwässern im Freilandgebiet: Übersicht mit detaillierter Analyse der Verschmutzungsquellen Fahrbahnverschleiß, Reifenabrieb und Winterdienst. Institut für Verkehrswesen. Universität für Bodenkultur. Wien.

He, W., Odnevall Wallinder, I. und Leygraf, C. (2000). "A comparison between corrosion rates and runoff rates from new and aged copper and zinc as roofing material." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 67-82.

Hewitt, C. N. und Rashed, M. B. (1990). "An integrated budget for selected pollutants for a major rural highway." The Science of the Total Environment 93: 375-384.

Hillenbrand, T., Fuchs, S. und Rudolphi, A. (2005). Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden - Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. Umweltbundesamt. Dessau.

Hjortenkrans, D., Bergbäck, B. und Häggerud, A. (2006). "Metallemission fran trafik i Stockholm - bromsbelägg."

Hjortenkrans, D., Bergbäck, B. und Häggerud, A. (2006). "New metal emission patterns in road traffic environments." Environmental Monitoring and Assessment 117: 85-98.

Ho, Y. B. und Tai, K. M. (1988). "Elevated levels of lead and other metals in roadside soil and grass and their use to monitor aerial metal deposition in Hong Kong." Environmental Pollution 49: 37-51.

Itkonen, A. O. und Jantunen, M. J. (1986). "Emissions and particle-size distribution of some metallic elements of two peat/oil fired boilers." Environmental Science and Technology 20(4): 335-341.

Jacobson, T. und Hornwall, F. (1999). Dubbslitage pa asfaltbeläggning: Sammanställning av resultat fran provvägar och kontrollsträckor 1990 - 1998. Statens Väg- och Transportforskningsinstitut. Linköping.

Johansson, E. und Hedberg, T. (1988). Rapport 2: 88. Institutet för Vattenförsörjnings- och avloppsteknik. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.

Johansson, K., Bergbäck, B. und Tyler, G. (2001). "Impact of atmospheric long range transport of lead, mercury and cadmium on the Swedish forest environment." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 279-297.

Jonsson, A. (2000). The trace of metals: use, emissions and sediment load of urban heavy metals. Department of Water and Environmental Studies. Linköping University. Linköping.

KAGIS (2005). Kärntner Geografisches Informationssystem. Dezember 2006. http://www.kagis.ktn.gv.at/kagis/.

Karlsson, S., Fredrikson, F. und Holmberg, J. (2004). "Future redistribution of cadmium to arable Swedish soils: a substance stock analysis." Journal of Industrial Ecology 8(4): 41-57.

Kärntner Landesregierung (2000). Kärntner Klärschlamm- und Kompostverordnung.

Kermer, F., Sammer, G., Fallast, K. und Röschel, G. (1994). Gesamtverkehrskonzept Stadt Villach. Ingenieurbüros Kermer - Sammer. Villach, Graz.

Koch, R. (1995). Umweltchemikalien - Physikalisch-chemische Daten, Toxizität, Grenz- und Richtwerte, Umweltverhalten. VCH Verlagsgesellschaft mbH. Weinheim.

Krauskopf, K. B. und Bird, D. K. (1995). Introduction to geochemistry. McGraw - Hill, Inc. New York.

Krömer, S., Kreipe, E., Reichenbach, D. und Stark, R. (1999). Produkt - Ökobilanz eines PKW-Reifens. Continental AG. Hannover.

Kuang, C., Neumann, T., Norra, S. und Stüben, D. (2004). "Land use-related chemical composition of street sediments in Beijing." Environmental Science and Pollution Research 11: 73-83.

Kucera, V., Tidblad, J., Mikhailov, A. A., Doktor, A. und Faller, M. (2003). Heavy metals release by corrosion of structural materials: results from UN/ECE ICP Materials. Conference: Release of metals due to corrosion of materials. Munich. Korrosionsinstitutet.

Lampert, C. (2001). Entscheidungshilfen für die Bewirtschaftung biogener Materialien nach ressourcenschonenden und umweltverträglichen Aspekten. Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft. Technische Universität Wien. Wien.

Landner, L. und Lindeström, L. (1996). Zink - resurs och / eller hot? Miljöforskargruppen (MFG, F96/34). Karlstad.

Laschober, C., Limbeck, A., Rendl, J. und Puxbaum, H. (2004). "Particulate emissions from on - road vehicles in the Kaisermühlen - tunnel (Vienna, Austria)." Atmospheric Environment 38: 2187-2195.

Legret, M. und Pagotto, C. (1999). "Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway." The Science of the Total Environment 235: 143-150.

Leygraf, C. und Graedel, T. E. (2000). Atmospheric Corrosion. John Wiley & Sons. New York.

Linde, H., Bengtsson, H. und Öborn, I. (2001). "Concentrations and pools of heavy metals in urban soils in Stockholm, Sweden." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 83-101.

Linder, M. (1990). Bedömningskriterier för provning av vattenbehandlingsutrustning för sma vattentäkter. Korrosionsinstitutet. Stockholm.

Lindgren, A. (1996). "Asphalt wear and pollution transport." The Science of the Total Environment 189/190: 281-286.

Lindström, M., Jonsson, A., Brolin, A. und Hakanson, L. (2001). "Heavy metal sediment load from the city of Stockholm." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 103-118.

Lithner, G., Holm, K. und Ekström, C. (2001). Metaller och organiska miljögifter i vattenlevande organismer och deras miljö i Stockholm. Institutet för Tillämpad Miljöforskning (ITM), Stockholm Miljöförvaltning, Stockhom Vatten AB. Stockholm.

Lohm, U., Bergbäck, B., Hedbrant, J., Jonsson, A., Sviden, J., Sörme, L. und Östlund, C. (1997). Databasen Stockhome: Flöden och ackumulation av metaller i Stockholms teknosfär. Tema Vatten i Natur och Samhälle. Linköping.

Merian, E., Geldmacher-v. Mallinckrodt, M., Machata, G., Nürnberg, H. W., Schlipköter, H. W. und Stumm, W. (1984). Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. Verlag Chemie GmbH. Weinheim, Deerfield Beach Florida, Basel.

Mroz, A. (2003). Stockholms koppartak - kulturarv och föroreningskälla. Miljöförvaltningen. Stockholm.

Naturvardsverket (1996). Allmänna Rad 96:1 (AR 96:1), Fordonstvätt. Swedish Environmental Protection Agency. Stockholm.

Naturvardsverket (2002). Rapport 5184: Metaller i stad och land. Swedish Environmental Protection Agency. Stockholm.

Nriagu, J. O. (1980). Cadmium in the environment. John Wiley& Sons. New York.

ÖBB (2005). Konstruktionspläne - Übersicht über die geschwindigkeitsabhängigen Ausführungsmerkmale der Oberleitungsanlagen. Mündliche Mitteilung an G. Rebernig. Wien.

Obernosterer, R. und Brunner, P. H. (1999). "Urban metal management: the example of lead." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 241-253.

Odnevall Wallinder, I., Verbiest, P., He, W. und Leygraf, C. (1999). "Effects of exposure direction and inclination on the runoff rates of zinc and copper roofs." Corrosion Science 42: 1471-1487.

ÖNORM (2000). Regenwasser - Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Anwendung, hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb. B 2506-1.

ÖNORM (2005). Stoffflussanalyse Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft - Begriffe. S 2096 -1.

Östlund, P. und Sternbeck, J. (2001). "Total lead and stable lead isotopes in Stockholm sediments." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 229-239.

Paterson, E., Sanka, M. und Clark, L. (1996). "Urban soils as pollutant sinks - a case study from Aberdeen, Scotland." Applied Geochemistry 11: 129-131.

Persson, D. und Kucera, V. (2000). "Release of metals from buildings, constructions and products during atmospheric exposure in Stockholm." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 133-150.

Rat der Europäischen Gemeinschaft (1986). Richtlinie des Rates vom 12. Juni 1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft. (86/278/EEC).

Rat der Europäischen Union (1991). Richtlinie 91/338/EWG des Rates vom 18. Juni 1991 zur zehnten Änderung der Richtlinie 76/769/EWG zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen.

Rebernig, G., Schöller, G., Müller, B. und Brunner, P. H. (2006). Nachhaltige urbane Entwicklung - Ideale Oberfläche einer Stadt (Projekt IOS). Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien. Wien.

Rocher, V., Azimi, S., Moilleron, R. und Chebbo, G. (2003). "Hydrocarbons and heavy metals in the different sewer deposits in the "Le Marais"catchment (Paris, France): stocks, distributions and origins." Science of the Total Environment 323: 107-122.

Rogge, W. F., Hildemann, L. M., Mazurek, M. A., Cass, G. R. und Simoneit, B. R. T. (1993). "Sources of fine organic aerosol. 3. road dust, tire debris, and organometallic break lining dust: roads as sources and sinks." Environmental Science and Technology 27: 1892 - 1904.

Roll, E. (2004). Hinweise zur ökologischen Wirkungsprognose in UVP, LBP und FFH-Verträglichkeitsprüfungen bei Aus- und Neubaumaßnahmen von Eisenbahnen des Bundes. Eisenbahn - Bundesamt. Köln.

Römpp (2006). Atmosphärische Korrosion. Georg Thieme Verlag KG. Dezember 2006. www.roempp.com.

Röschl (2005). Verkehrsaufkommen im sekundären Straßennetz in Villach. Mündliche Mitteilung an G. Rebernig. Wien.

Roth, L. und Eklund, M. (2001). A systems analysis approach to the study of environmental pollution in the road environment. Industriell Miljöteknik, Linköpings Universitetet. Linköping.

Rühling, A. und Tyler, G. (2001). "Changes in atmospheric deposition rates of heavy metals in Sweden." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 311-323.

Salzburger Landtag (2001). Gesetz vom 4. Juli 2001 zum Schutz der Böden vor schädlichen Einflüssen (Bodenschutzgesetz).

Schneider, K.-J. (1998). Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Werner Verlag GmbH & Co. KG. Düsseldorf.

Semperit Reifen AG (1989). Abschätzung der Cd- Ablagerung in Böden neben Autobahnen hervorgerufen durch Reifenabrieb. Unveröffentlichtes Schreiben an die Kammer der gewerblichen Wirtschaft für Tirol. Traiskirchen.

Sjöström, C. und Henrikson, J. (1987). Paverkan pa fasadytor fran yttre miljö (Projekt fasadytor- förnyad ytbehandling). Statens Institut för Byggnadsforskning. Gävle.

Sörme, L. (2003). "Goods in the anthroposphere as a metal emission source." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 213-227.

Sörme, L. (2003). Urban heavy metals stocks and flows. Department of Water and Environmental Studies. Linköping University. Linköping.

Sörme, L. und Lagerkvist, R. (2002). "Sources of heavy metals in urban wastewater in Stockholm." The Science of the Total Environment 298: 131-145.

Sörme, L., Lindqvist, A. und Söderberg, H. (2003). "Capacity to influence sources of heavy metals to wastewater treatment sludge." Environmental Management 31: 421-428.

Statistik, A. (2006). Statistisches Jahrbuch Österreichs 2006. Statistik Austria. 2006. http://www.statistik.at.

Stellpflug, J. (2002). Ausgebremst. Öko - Test Magazin. August 2006. www.oekotest.de.

Sternbeck, J. (1998). Antimon, selen, tellur, indium, gallium och palladium: mängder, trender och fördelning i teknosfären. Institutet för Vatten- och Luftvardsforskning (IVL Svenska Miljöinstitutet AB). Stockholm.

Sternbeck, J. und Östlund, P. (2001). "Metals in sediments from the Stockholm region: geographical pollution patterns and time trends." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 151-165.

Sternbeck, J., Sjödin, A. und Andreasson, K. (2002). "Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension - results from two tunnel studies." Atmospheric Environment 36: 4735-4744.

Sutherland, R. und Tolosa, C. (2000). "Variation in total and extractable elements with distance from roads in an urban watershed, Honolulu, Hawaii." Water, Air and Soil Pollution 127: 315-338.

Svidén, J., Hedbrant, J. und Lohm, U. (2000). "Copper emissions from fuel combustion, consumption and industry in two urban areas 1900-1980." Water, Air and Soil Pollution 1(3-4): 167-177.

Sviden, J. und Jonsson, A. (2001). "Urban metabolism of mercury turnover, emissions and stock in Stockholm 1795-1995." Water, Air and Soil Pollution: Focus 1: 179-196.

Tarr, J. A. und Ayres, R. U. (1990). The Hudson - Raritan Basin. Book: The earth as transformed by human action: Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years. B. L. Turner, W. C. Clark and R. W. Kates. Cambridge. Cambridge Press.

Thornton, I. (1991). Metal contamination of soils in urban areas. Book: Soils in the urban environment. P. Bullock and P. J. Gregory. Oxford. Blackwell Scientific Publications.

Tolstoy, N., Andersson, G., Kucera, V. und Sjöström, C. (1989). Utvändiga byggnadsmaterial - mängder och nedbrytning. Statens Institut för Byggnadsforskning, Korrosionsinstitutet. Gävle, Stockholm.

Turer, D., Maynard, J. B. und Sansalone, J. J. (2000). "Heavy metal contamination in soils of urban highways: comparison between runoff and soil concentrations at Cincinnati, Ohio." Water, Air and Soil Pollution 132: 293-314.

Uexküll, O., Skerfving, S., Doyle, R. und Braungart, M. (2002). "Antimony in brake pads - a carcinogenic component?" Journal of Cleaner Production 13: 19-31.

Van Assche, F. und Regoli, L. (2003). Atmospheric zinc run - off in a general perspective of diffuse zinc emissions to surface water. Conference: Release of Metals due to Corrosion of Materials. Munich. Swedish Corrosion Institute.

Voest Alpine (2000). Leitschienen - Stahl für alle Wege. Krems Finaltechnik GmbH. Krems.

Wernitznig, A. (2005). Auslastung der Kläranlage St.Agathen. Mündliche Mitteilung an G. Schöller. Wien.

Westerlund, K.-G. (2001). Metal emissions from Stockholm traffic - wear of brake linings. The Stockholm Environment and Health Protection Administration. Stockholm.

Wheeler, G. L. und Rofe, G. L. (1979). "The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and vegetation." Environmental Pollution 18: 265-274.

Wikipedia (2006). Kanalisation. Wikimedia Foundation. Juli 2006. www.wikipedia.org.

Wolman, A. (1965). "The metabolism of cities." Scientific American 213: 179.

Wrobel, A., Rokita, E. und Maenhaut, W. (2000). "Transport of traffic - related aerosols in urban areas." The Science of the Total Environment 257: 199-211.

Zechmeister, H., Dullinger, S., Hohenwallner, D., Riss, A., Hanuss- Illnar, A. und Scharf, S. (2006). "Pilot study on road traffic emissions (PAHs, heavy metals) measured by using mosses in a tunnel experiment in Vienna, Austria." Environmental Science and Pollution Research 13(6): 398-405.

Zessner, M. (1999). Bedeutung und Steuerung von Nährstoff - und Schwermetallflüssen des Abwassers. Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft. Technische Universität Wien. Wien.