

Diss. ETH Nr. 16'325

# Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt

Ein methodischer Beitrag zur Exploration  
urbaner Lagerstätten

## Abhandlung

zur Erlangung des Titels

**Doktor der technischen Wissenschaften**

der

**Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich**

vorgelegt von

Dominic Marcus Alexander Günter Wittmer

Dipl.-Geol., Johannes Gutenberg-Universität Mainz

geboren am 18. August 1972

aus Deutschland

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Hans-Rudolf Schalcher, Referent

Prof. Dr. Peter Baccini, Korreferent (Leiter der Dissertation)

Dr. Thomas Lichtensteiger, Korreferent

Prof. Dr. Niklaus Kohler, Korreferent

Zürich, 2006

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Swiss Federal Institute of Technology Zurich

**eawag**  
aquatic research 000

**vdf**

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Bibliothek Wasser und Umwelt  
(TU Darmstadt)



61619402

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Einleitung</b> .....                                      | <b>3</b>  |
| 1.1 Ausgangslage und Motivation.....                           | 3         |
| 1.2 Die Ressource Kupfer.....                                  | 6         |
| 1.3 Ziel und Forschungsfragen.....                             | 8         |
| 1.4 Aufbau der Arbeit.....                                     | 8         |
| <b>2 Methoden</b> .....  | <b>9</b>  |
| 2.1 Methodisches Konzept.....                                  | 9         |
| 2.2 Stoffflussanalyse für den regionalen Kupferhaushalt.....   | 12        |
| 2.2.1 Systemgrenze.....  | 12        |
| 2.2.2 Systemwahl.....  | 12        |
| 2.2.3 Beschreibung der Prozesse, Lager und Flüsse.....         | 14        |
| 2.3 Charakterisierung der Lager im Gebäudebereich.....         | 18        |
| 2.3.1 Heterogenität des Gebäudebestandes.....                  | 18        |
| 2.3.2 Bisherige Studien zur Zusammensetzung von Gebäuden.....  | 18        |
| 2.3.3 Aufbau von Gebäuden.....                                 | 20        |
| 2.4 Erfassung der Lager im Gebäudebereich.....                 | 26        |
| 2.4.1 Das ARK-Haus-Konzept.....                                | 26        |
| 2.4.2 Ermittlung der Kupfergehalte der ARK-Häuser.....         | 32        |
| 2.4.3 Datenerhebung.....                                       | 36        |
| 2.4.4 Datenqualität.....                                       | 39        |
| 2.5 Charakterisierung der Lager im Infrastrukturbereich.....   | 41        |
| 2.5.1 Aufbau von Infrastrukturnetzen.....                      | 41        |
| 2.5.2 Die Leitungsnetze.....                                   | 42        |
| 2.6 Erfassung der Lager im Infrastrukturbereich.....           | 46        |
| 2.6.1 Starkstrom.....  | 47        |
| 2.6.2 Telekommunikation.....                                   | 51        |
| 2.6.3 Stromversorgung von Transportmitteln.....                | 52        |
| 2.7 Charakterisierung und Erfassung weiterer Lager.....        | 54        |
| 2.7.1 Mobilien.....  | 54        |
| 2.7.2 Deponien.....  | 54        |
| 2.8 Historische Entwicklung der anthropogenen Kupferlager..... | 56        |
| 2.8.1 Gebäudebereich.....                                      | 56        |
| 2.8.2 Infrastrukturbereich.....                                | 59        |
| 2.8.3 Mobilien.....  | 60        |
| 2.8.4 Bedeutung des Aussenhandels.....                         | 60        |
| <b>3 Resultate</b> .....                                       | <b>61</b> |
| 3.1 Die historische Aussenhandelsbilanz.....                   | 61        |
| 3.2 Kupferlager im Gebäudebereich.....                         | 64        |
| 3.2.1 Potentielle Kupfergehalte.....                           | 64        |
| 3.2.2 Kupfergehalte der ARK-Häuser.....                        | 72        |
| 3.2.3 Gesamtmengen an Kupfer in Gebäuden.....                  | 75        |
| 3.3 Kupferlager im Infrastrukturbereich.....                   | 78        |
| 3.3.1 Starkstrom.....  | 78        |
| 3.3.2 Telekommunikation.....                                   | 84        |
| 3.3.3 Stromversorgung von Transportmitteln.....                | 85        |
| 3.3.4 Gesamtmengen an Kupfer in der Infrastruktur.....         | 85        |
| 3.4 Weitere Kupferlager.....                                   | 86        |
| 3.4.1 Mobilien.....  | 86        |
| 3.4.2 Deponien.....  | 86        |
| 3.5 Historische Entwicklung der anthropogenen Kupferlager..... | 88        |
| 3.5.1 Gebäudebereich.....                                      | 88        |
| 3.5.2 Infrastrukturbereich.....                                | 95        |
| 3.5.3 Mobilien.....  | 96        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>4 Diskussion</b> .....                                      | 97  |
| 4.1 Aufbau der urbanen Kupferlagerstätten der Schweiz .....    | 97  |
| 4.2 Qualitative Ursachen für den Aufbau eines Teillagers ..... | 106 |
| 4.3 Unsicherheiten der Kupferlager .....                       | 108 |
| 4.3.1 Methode .....  | 108 |
| 4.3.2 Resultate .....  | 109 |
| 4.4 Vergleich mit anderen Stoffen .....                        | 113 |
| 4.4.1 Haupt- und Spurenstoffe .....                            | 113 |
| 4.4.2 Übertragbarkeit des Vorgehens auf andere Stoffe .....    | 114 |
| 4.5 Regionale Unterschiede urbaner Kupferlagerstätten .....    | 115 |
| 4.6 Evaluation von Abrieb- und Abschwemmpotentialen .....      | 118 |
| <br>   |     |
| <b>5 Dynamisches Modell Cuprum</b> .....                       | 121 |
| 5.1 Einleitung .....   | 121 |
| 5.2 Mathematische Beschreibung .....                           | 123 |
| 5.2.1 Konfiguration des Systems .....                          | 123 |
| 5.2.2 Systemvariablen .....                                    | 124 |
| 5.2.3 Systemgleichungen .....                                  | 126 |
| 5.2.4 Bewertungskriterien .....                                | 133 |
| 5.3 Kalibrierung .....   | 134 |
| 5.3.1 Direkte Kalibrierung .....                               | 134 |
| 5.3.2 Indirekte Kalibrierung .....                             | 136 |
| 5.4 Resultate .....  | 140 |
| 5.4.1 Dynamik der Lager .....                                  | 146 |
| 5.4.2 Induzierte Flüsse .....                                  | 147 |
| 5.4.3 Bewertung .....  | 148 |
| 5.4.4 Diskussion des dynamischen Modells .....                 | 150 |
| 5.5 Szenarien zum Umbau des Gebäudebestandes .....             | 155 |
| 5.5.1 Szenario I .....   | 155 |
| 5.5.2 Szenario II .....  | 158 |
| 5.5.3 Diskussion der Szenarien .....                           | 160 |
| 5.5.4 Ausblick zur dynamischen Modellierung .....              | 162 |
| <br>   |     |
| <b>6 Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....                 | 163 |
| 6.1 Zur Methode der Exploration urbaner Lagerstätten .....     | 163 |
| 6.2 Zum Entwurf einer Bewirtschaftungsstrategie .....          | 165 |
| <br>   |     |
| <b>7 Abkürzungen</b> .....                                     | 167 |
| <br>   |     |
| <b>8 Glossar</b> .....   | 169 |
| <br>   |     |
| <b>9 Literaturverzeichnis</b> .....                            | 175 |
| <br>   |     |
| <b>Anhang</b> .....  | 189 |