

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 ooo

v/dlf

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Zusammenfassung

Bisher sind die geogenen Lagerstätten in den Geowissenschaften systematisch untersucht worden, nicht aber die anthropogenen Lagerstätten. Letztere befinden sich im Wachstum, solange die Inputflüsse die Outputflüsse übersteigen. Es fehlen bis heute geeignete Werkzeuge, die eine umfassende Erfassung und Beurteilung dieser Lagerstätten ermöglichen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Exploration von nicht-regenerierbaren Ressourcen im urbanen Raum am Beispiel des Kupfers, basierend auf umweltingenieur- und geowissenschaftlichen Ansätzen. Kupfer ist wegen seines starken technischen Profils ein essentielles Metall im Stoffhaushalt der Anthroposphäre. Es wird in zahlreichen Anwendungen in Gebäuden (Aussenbereich, Haustechnik), in der Infrastruktur (Strom- und Informationsübertragung) sowie in elektrischen und elektronischen Produkten und weiteren Mobilien in reiner Form oder in Legierungen eingesetzt. In der Schweiz sind die resultierenden urbanen Lagerstätten pro Kopf bereits grösser als die weltweit vorhandenen geogenen Lagerstätten. Hier setzt diese Arbeit an.

Für die Exploration im urbanen Raum wird die Methode der Stoffflussanalyse (BACCINI und BADER 1996) mit einer eigenständig entwickelten, geowissenschaftlich geprägten Methode zur Lagererfassung kombiniert. Dadurch ist eine differenziertere Betrachtung der Lagerstättenmengen und -qualitäten möglich.

Der Betrachtungsraum ist die Schweiz. Die urbanen Kupferlagerstätten werden in den drei Hauptlagern Gebäude, Infrastruktur und Mobilien modular erfasst. Zur Untersuchung der Lager hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Rollen im regionalen Kupferhaushalt bedarf es eines geeigneten Instrumentariums. Der erste Teil der Arbeit zielt auf die Erfassung der relevanten Güter aus Kupfer bzw. Kupferlegierungen oder mit gewissen Anteilen davon. Der zweite Teil verifiziert den Aufbau der zugehörigen Lager in einem dynamischen Modell und schafft die Basis für die Entwicklung von Bewirtschaftungsszenarien. Die Ergebnisse der beiden Teile sind folgende:

Teil I Zur differenzierten Erfassung der Lager werden die Schlüsselgrössen ermittelt und quantitativ bestimmt. Neben den Güter- bzw. Produktmengen (inkl. Häufigkeit und Korrelationsfaktoren) sind dies die Güter-Dimensionen (inkl. Kupferkonzentration). In der Regel sind die Produktmengen nicht bedarfsgerecht dokumentiert und müssen indirekt bestimmt werden. Der Aufbau des Hauptlagers in den Gebäuden wird wegen seiner heterogenen Zusammensetzung gegenüber den anderen Hauptlagern vertieft untersucht, eingebettet in das Projekt ARK04 der Forschungsabteilung Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik der Eawag und der ETH Zürich: Ein Projekt, das die Sekundärlager der Massenrohstoffe in den Gebäuden der Schweiz analysiert. Zur Bestimmung der Güter-Häufigkeiten und -Dimensionen werden Erhebungen an Gebäuden durchgeführt. Zudem werden Studien der Bautechnik oder der Technikgeschichte interpretiert, um Modellgebäude, so genannte ARK-Häuser, zu kreieren. Jedes ARK-Haus repräsentiert einen der vier Teilbestände, in die der Gebäudebestand nach Nutzungstypen unterteilt wurde, und unterscheidet sich demnach in Summe und Verteilmuster der Materialgehalte signifikant von den anderen ARK-Häusern.

Diese Dissertation fokussiert auf die methodischen Besonderheiten, die es bei der Untersuchung von „Spurenstoffen“ wie Kupfer zu berücksichtigen gilt. Kupfer liegt unter 1 Gew.% der Gebäudemasse und gilt somit als Spurenstoff. Die kupferführenden Gebäudebauteile werden zur Ermittlung der Kupfergehalte in 5 Funktionsbereiche und 14 Produktgruppen geordnet. Die wichtigsten Funktionsbereiche sind der Dachbereich (40 %), die Stromanlagen (30 %), gefolgt von den Heizungs- und Sanitäreanlagen. Die dominierenden Produktgruppen sind im Dachbereich die Dachrinnen und Dachgaupen, in den Heizungsanlagen sind es die Flächenheizungen und in den Sanitäreanlagen die Roharmaturen. Die Eigenschaften des Lagers in der Infrastruktur werden durch die Starkstromkabel der Nieder- und Mittelspannung bestimmt, da sie über $\frac{2}{3}$ des Lagers ausmachen. Nach der Berech-

nung betragen die Kupferlager insgesamt in den Gebäuden 80 ± 15 kg/capita, in der Infrastruktur 105 ± 25 kg/capita, in den Mobilien 35 ± 10 kg/capita und in den Deponien 50 ± 10 kg/capita.

Die Unsicherheiten wurden nach der Monte-Carlo-Methode berechnet. Ausgehend von den heutigen Lagern wird der Aufbauprozess grob rekonstruiert (Zeitintervall 25 a bzw. 10 a).

Teil II Im zweiten Teil wird das dynamische Kupferhaushaltsmodell *Cuprum* entwickelt, das den Aufbau der sekundären Lagerstätte in der Schweiz für den Zeitraum 1900 bis 2000 nachzeichnet. Dazu werden die Kenntnisse über die Zusammensetzung der Hauptlager aus *Teil I* genutzt. Die Datenreihen werden durch Wachstumskurven gefittet, welche durch Kombination logistischer und linearer Funktionen gebildet werden. Mit diesem Vorgehen können die Wachstumskurven mit Hilfe der Kurvenparameter miteinander verglichen und diskutiert werden, wodurch ihre Bedeutung anschaulich wird. Als Ergebnis der dynamischen Modellierung erhält man die Entwicklung des Kupferhaushaltes der Schweiz im 20. Jahrhundert. Die berechneten Lager und Flüsse sind mit den ermittelten Unsicherheiten gekennzeichnet. Das Modell zum regionalen Kupferhaushalt wird mit Datenreihen zum historischen Aussenhandel validiert. Mit Hilfe von gebildeten Bewertungskriterien wird die Entwicklung des Systems beurteilt. Sie verdeutlichen, welche Ressourcenverluste und Umwelteinträge zu erwarten sind, wenn keine Korrekturmassnahmen ergriffen werden. Auch der Einfluss der Lebensdauer-Verlängerung oder -verkürzung der Güter bzw. Produkte wird diskutiert.

In zwei Szenarien wird untersucht, welche Auswirkungen ein mittelfristiger Umbau der Produktionsgebäude in Mehrfamilienhäuser bzw. Dienstleistungsgebäude hinsichtlich der Lagerentwicklung und der zugehörigen Kupfernachfrage oder Emissionen bewirkt. Die Arbeit zeigt exemplarisch auf, wie das dynamische Modell für solche „Wenn-dann“-Szenarien künftig eingesetzt werden kann: Wenn die Umnutzung zugunsten der Dienstleistungsgebäude verläuft, dann wird entsprechend der gebäude-spezifischen Nutzungsmuster des Kupfers ein Rohstoffmehrbedarf erzeugt. Wenn bei dem Umbauprozess bei den neuen Dienstleistungsgebäuden konsequent auf Kupferbleche verzichtet wird, dann sinken die Emissionen um circa 20 %, obwohl das gesamte Kupferlager in den Gebäuden (einschliesslich des Kupfers in der Haustechnik) eine leichte Zunahme bewirkt.

Abstract

Geogenic deposits have been investigated in detail by diverse geological research methods and mining experience. However, anthropogenic material deposits have not experienced such a systematic investigation yet, in spite of their ongoing growth. Adequate methodical tools are missing for a comprehensive recording and evaluation of these deposits. This thesis contributes a method for the exploration of non-renewable resources in urban areas using copper as an example. The method developed is based on approaches of both environmental engineering and geosciences.

Due to its strong technical profile, copper is an essential metal in the metabolism of the anthroposphere. It is used in several building applications (cladding, in-house use), in infrastructure (transmission of current and information), and in electric and electronic products and further movables – both in pure and alloyed form. The per capita urban deposits in Switzerland already exceed the global per capita geogenic deposits.

The thesis prepares for the exploration of these stocks in urban areas by combining the method of “substance flow analysis” (BACCINI und BADER 1996) with an independently developed, geoscientifically based method for the recording and evaluation of the copper stocks. This procedure allows a more adequate inspection of both quantities and qualities of the stocks.

The area of examination is Switzerland. The urban copper deposits are recorded in the three main stocks buildings, infrastructure and movables in a modular way. For the examination of the stocks regarding both structure and importance in the copper budget, there is need for an appropriate “tool box”. In the first part of the thesis, the stocks of copper and of cuprous alloys are recorded in accordance with their size. The second part verifies the building-up of the affiliated stocks within a dynamic model and thus provides the basis for the development of material management scenarios. The findings from the two parts are as follows:

Part I For an adequate recording of the stocks, the key sizes are defined and quantitatively determined. These are the “amounts of goods and products” (including frequency and correlation factors) and the “goods dimensions” (including copper concentration). Generally, the amounts of products are not available ready-to-use, but have to be determined indirectly. Due to its heterogeneous assembly, the structure of the stock in the buildings is dealt with in greater detail than the other main stocks. This research is part of the project ARK04 of the research department “Resource and Waste Management” at Eawag and ETH Zürich (Switzerland): ARK04 analyses the secondary stocks of the bulk raw materials within the buildings of Switzerland. Surveys on selected buildings are carried out to determine the frequencies and dimensions of the goods-in-use. In addition, studies of construction technology and technical history are interpreted in order to create model buildings, so-called ARK-buildings. The buildings of Switzerland are subdivided into four partial stocks according to their utilisation, each of them represented by a specific ARK-building. Therefore, the ARK-buildings differ significantly from each other in material amount and distribution patterns of the substance contents.

Based on copper, this thesis focuses on the methodical particularities that are to be taken into consideration in the examination of “trace substances”. Copper is below 1 wt.% of the building mass and is taken for a trace substance. The copper-bearing building components are grouped into 5 “application ranges” and 14 “product groups” in order to investigate the copper contents. Regarding the copper amount, the most important application ranges are the roofs (40 %) and the power systems (30 %), followed by the heating systems and the water systems. For roofs, the gutters and the sheets on dormer windows are the dominant product groups. For heating systems, it is the panel heating, and in the water systems it is the raw armatures. The stock in the infrastructure consists mainly of low and middle voltage power-cables (about $\frac{2}{3}$ of the infrastructure stock). The results of the copper stock calculation total as follows: in the buildings 80 ± 15 kg/capita, in the infrastructure 105 ± 25 kg/capita,

in the movables 35 ± 10 kg/capita and in the landfills 50 ± 10 kg/capita. The uncertainties of the stocks were calculated according to the Monte Carlo method. Starting from the present stocks, the building-up process is roughly reconstructed (time interval 25 a or 10 a, respectively).

Part II In the second part, a dynamic model describes the building-up of the secondary deposits in Switzerland for the period from 1900 to 2000. It is based on the knowledge about the assembly of the main stocks in *part I* with the uncertainties. The data is fitted by growth curves that are determined by a combination of logistic and linear functions. This procedure enables the comparison of the growth curves with each other and their discussion by the use of curve parameters. The dynamic modelling results in the development of the copper budget including an uncertainty analysis. The model of the regional copper budget is validated with data of the historical foreign trade statistics. The development of the system is assessed by self-made assessment criteria. These show the amounts of copper expected as resource losses and environmental pollution, unless correction steps are taken. The influence of life time extension and reduction, respectively, of goods or products is also discussed.

An urban redesign affects the copper budget. Two scenarios dealing with the conversion of production buildings into multi-family buildings or service buildings focus on the consequences regarding copper stocks and related market issues or environmental impacts. The thesis shows by example, how the dynamic model may be used in future: If the conversion process develops in favour of the service buildings, this results in an additional demand for copper due to a different use pattern of copper. If this process is accompanied by a complete prevention from installing new copper sheets, then the emissions will decline by 20 %, although the overall copper stocks in buildings (including in-house use) will increase slightly.