

Inhalt**Seite 5**

F. Becker & S. Zeeh:
Untersuchungen zur Diagenese und Isotopengeochemie ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) der Zechstein I-Karbonate der Fossilagerstätte Korbacher Spalte und ihrer Umgebung (NW-Hessen)

Seite 19

S. Bökenschmidt, A. Braun, H. Heggemann & H. Zankl:
Oberpermische Spaltsedimente bei Dorffitter südlich von Korbach und ihre Beziehungen zur Fossilagerstätte Korbacher Spalte

Seite 33

J. Fichter, H. Heggemann & R. Kunz:

Neue bzw. bisher nicht veröffentlichte Tetrapodenfährten-Lokalitäten im Mittleren Buntsandstein Nordhessens und Südniedersachsens

Seite 57

C. Lampe:
Zur faziellen und sedimentologischen Entwicklung des Buntsandsteins in der östlichen Frankfurter Bucht

Seite 71

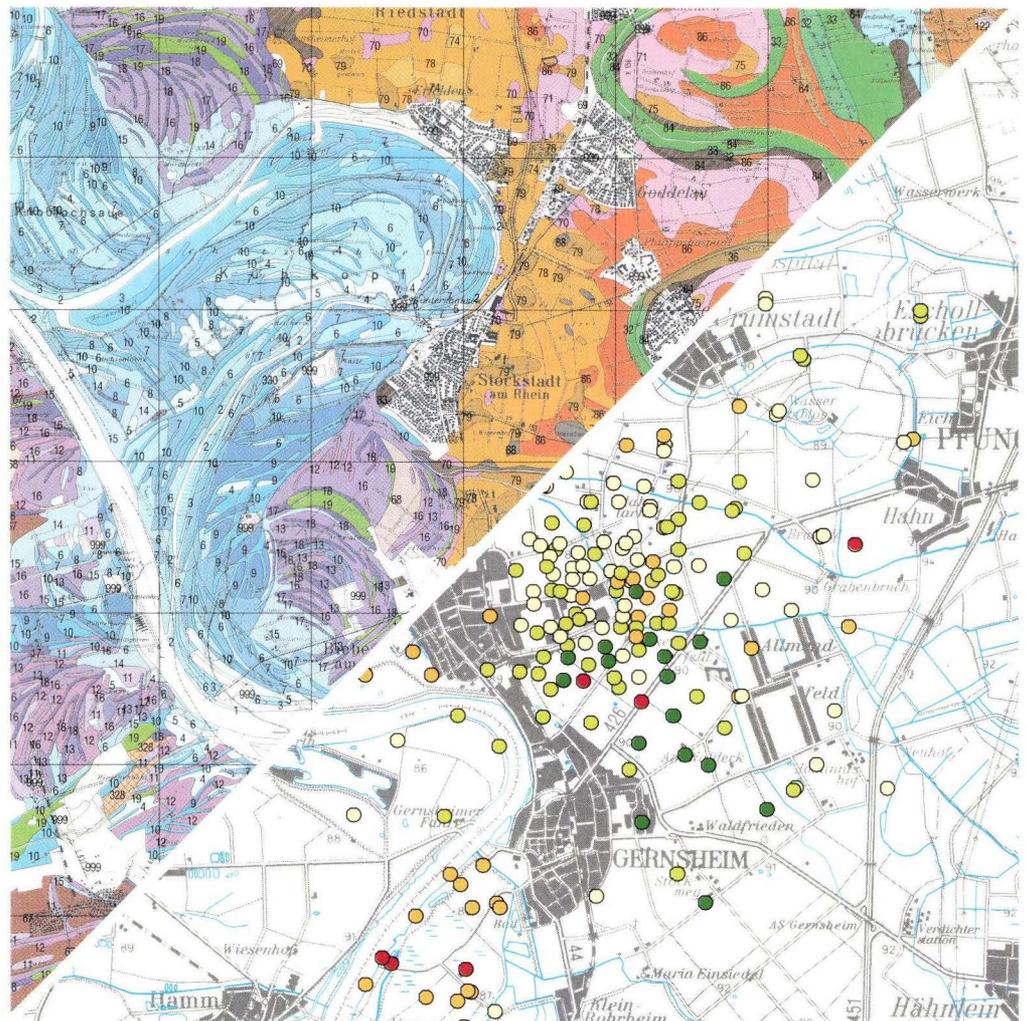
A. Garassino, H. Hagdorn & M. Schulz:

A decapod crustacean assemblage from the Middle Triassic Upper Muschelkalk of Großenlüder (Hessen, Germany)

Seite 83

K. Lügger & E. Weidner:
Schwermetalle und organische Schadstoffe in Böden der Region Biebesheim (nördliche Oberrheinebene)

Geologisches Jahrbuch Hessen 1999



Band 127/1999

150 Seiten, 69 Abbildungen, 9 Tabellen, 1 Tafel, Wiesbaden 1999

ISSN 0341-4027

Geologisches Jahrbuch Hessen 1999

Schriftleitung
Prof. Dr. Andreas Hoppe
Hessisches Landesamt für Bodenforschung
Leberberg 9, 65193 Wiesbaden

Titelbild aus Beitrag Lügger & Weidner
links: Ausschnitt aus der digitalen Bodenkarte von Hessen 1: 50 000,
Region Biebesheim
rechts: Nickelgehalte der Oberböden in der Region Biebesheim

Hinweis für Autoren
Manuskripte sind entsprechend den „Bonner Anweisungen“ abzufassen; Richtlinien für die Verfasser geowissenschaftlicher Veröffentlichungen.
Ausgearbeitet von S. Horatschek und T. Schubert, 51 S.; Hannover 1998.
[Zu beziehen durch E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller); Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart.

© Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden 1999
ISSN 0341-4027

Printed in Germany

Die in diesem Jahrbuch veröffentlichten Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without permission of the publisher.

Redaktion: Heinrich Abel, Hermann Brenner, Elisabeth Lommatzsch
Gestaltung: Oliver Aumann
Schrift: Schneider Libretto
Herstellung: Druckhaus „Thomas Müntzer“ GmbH
Neustädter Straße 1-4
99947 Bad Langensalza
gedruckt auf chlor- und säurefreiem Papier
Vertrieb: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
Leberberg 9, 65193 Wiesbaden
Telefon: 0611/53 70, Fax: 0611/53 73 27

Inhalt	Seite
Frank Becker & Stefan Zeeh: Untersuchungen zur Diagenese und Isotopengeochemie ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) der Zechstein 1-Karbonate der Fossilagerstätte Korbacher Spalte und ihrer Umgebung (NW-Hessen)	5
Sven Bökenschmidt, Andreas Braun, Heiner Heggemann & Heinrich Zankl: Oberpermische Spaltensedimente bei Dorffitter südlich von Korbach und ihre Beziehungen zur Fossilagerstätte Korbacher Spalte	19
Jürgen Fichter, Heiner Heggemann & Reiner Kunz: Neue bzw. bisher nicht veröffentlichte Tetrapodenfährten-Lokalitäten im Mittleren Buntsandstein Nordhessens und Südniedersachsens	33
Carolyn Lampe: Zur faziellen und sedimentologischen Entwicklung des Buntsandsteins in der östlichen Frankenberger Bucht	57
Alessandro Garassino, Hans Hagdorn & Manfred Schulz: A decapod crustacean assemblage from the Middle Triassic Upper Muschelkalk of Großlüder (Hessen, Germany)	71
Katrin Lügger & Erhard Weidner: Schwermetalle und organische Schadstoffe in Böden der Region Biebesheim (nördliche Oberrheinebene)	83
Arthur Golwer: Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit durch Straßenverkehr in Wasserschutzgebieten	131
Karl-Heinz Ehrenberg & Witigo Stengel-Rutkowski: Nachruf Manfred Horn	147

Frank Becker & Stefan Zeeh*

Untersuchungen zur Diagenese und Isotopengeochemie ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) der Zechstein 1-Karbonate der Fossilagerstätte Korbacher Spalte und ihrer Umgebung (NW-Hessen)

Kurzfassung

In einem stillgelegten Steinbruch bei Korbach (NW-Hessen) tritt in den Randkarbonaten des Zechstein 1 (Werra-Folge) eine mehr als 15 m tiefe Spalte auf, in der sich eine Fossilagerstätte, bestehend aus einer Vergesellschaftung oberpermischer, terrestrischer Tetrapoden, befindet. Mittels petrographischer (Dünnschliffmikroskopie, Kathodolumineszenz) und isotopengeochemischer ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$) Methoden wur-

de die diagenetische Entwicklung der Zechstein 1-Randkarbonate am Spaltenrandbereich sowie dessen näherer Umgebung untersucht.

Im Zechstein kam es in den Randkarbonaten zur Bildung von Calcit-Zementen, die im Zusammenhang mit einer Dedolomitierung zu sehen sind. Bei der Dedolomitierung waren hauptsächlich meteorische Lösungen beteiligt. Ihr Einfluss auf das Nebengestein ist in der Ände-

rung der Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopenzusammensetzungen mit zunehmender Entfernung zur Spalte erkennbar. Die Korbacher Spalte bot eine Abflussmöglichkeit für Oberflächenwässer. Die Dedolomitierung der Zechstein 1-Karbonate aus dem zentralen Becken ist hingegen auf Ca-reiche Lösungen aus der Gips-Anhydrit-Transformation zurückzuführen.

Abstract

A more than 15 m deep fissure is exposed within crossbedded ooid-onkoid-pack-grainstones of the first Zechstein cycle (Werra cycle or Z1) in an abandoned quarry near Korbach (NW-Hesse, Germany). The ooid-onkoid-pack-grainstone facies is restricted to the marginal areas of the Zechstein basin. The fissure has been filled largely with a mixture of purple mudstones, yellowbrown dolomitic siltstones, and brown dolomites. Further it contains an assemblage of Permian terrestrial tetrapods recently reported by Sues & Munk

(1996). Standard petrographic methods including cathodoluminescence microscopy and stable isotope analyses ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) were used to reveal the diagenetic evolution of the limestones in which the fissure occurs.

Within the ooid-onkoid-pack-grainstones various calcite cements formed during Zechstein time. The precipitation of these cements is related to a dedolomitization (recalcification) process. In marginal positions of the Zechstein basin meteoric fluids were responsible for dedolo-

mitization. Especially the carbonates close to the fissure are largely influenced by meteoric fluids. This is well expressed in the changing isotopic compositions (oxygen and carbon) of the limestones with increasing distance to the fissure. The fissure at the Korbach quarry served as a drainage for surface waters. In more central areas of the Zechstein basin dedolomitization is thought to result from Ca-rich fluids generated by the anhydrite-after-gypsum-transformation during compaction.

* Dipl.-Geol. F. Becker, Priv.-Doz. Dr. S. Zeeh, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität, Im Neuenheimer Feld 234, 69120 Heidelberg

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
1.1 Geologischer Rahmen	6
1.2 Korbacher Spalte	7
1.3 Probenauswahl und Methodik	8
2. Petrographie und stabile Isotope	8
2.1 Zechstein 1-Karbonate	8
2.2 Korbacher Spalte	11
3. Diskussion der diagenetischen Entwicklung	12
3.1 Zechstein 1-Karbonate	12
3.2 Korbacher Spalte	12
3.3 Calcit-Zemente	13
4. Ergebnisse	14
5. Schriftenverzeichnis	15

1. Einleitung

1.1 Geologischer Rahmen

Das hessische Zechstein-Becken bildete eine nach Süden reichende Ausbuchtung des sich von England bis nach Polen erstreckenden europäischen Zechstein-Beckens (Abb. 1). Zur Zeit des Zechsteins war der Rand des Rheinischen Schiefergebirges in mehrere Teilbuchten untergliedert. Eine davon, die Korbacher Bucht, dehnte sich als ca. 40 km langer Meeresarm zwischen der Upländer Schwelle im Nordwesten und der Waldecker Schwelle im Südosten (Kulick 1987) aus (Abb. 1).



Die lithostratigraphische Abfolge des Zechstein 1 (Werra-Folge) besteht in der Korbacher Bucht vom Liegenden zum Hangenden aus Productuskalk (T1Ca), Zechsteinkalk (Ca1) mit im basalen Teil eingeschalteten Kupfermergeln (TM), Randkarbonat (Ca1 bzw. AlCa) und dem Oberen Werra-Ton (T1r). Während der Transgression des Zechstein-Meeres wurden bioklastische Rud- und Floatstones des Productuskalks (T1Ca) auf Tonschiefern des Unterkarbons abgelagert. Die darauf folgenden schwach bituminösen calcitischen Mudstones des Zechsteinkalks (Ca1), in deren basalen Teil Cu-Pb-Zn-vererzte Mergel-

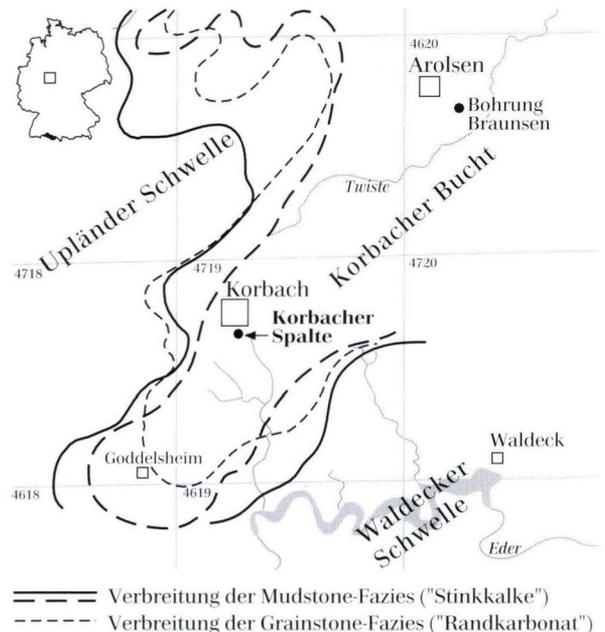


Abb. 1. Paläogeographie des europäischen Zechstein-Beckens (nach Smith 1980). Paläogeographie der Korbacher Bucht (verändert und ergänzt nach Richter-Bernburg 1950).

lagen eingeschaltet sind (Kulick 1987), werden auch als „Stinkkalke“ bezeichnet (Richter-Bernburg 1950, Kulick 1968). Bei den überlagernden Randkarbonaten handelt es sich vorwiegend um z.T. schräggeschichtete, calcitische Ooid-Onkoid-Pack- bis Grainstones, stellenweise treten auch dolomitische Mudstones auf. Am Schiefergebirgsrand findet sich eine karbonatisch-siliziklastische Entwicklung in der Werra-Folge ohne die für die zentralen Beckenbereiche charakteristischen Evaporite. Auf die Karbonat-Serien folgen hier die roten Tonsteine des Oberen (rezessiven) Werra-Tons (T1r). Hinsichtlich der lithostratigraphischen Einstufung der Randfazies und deren faziellen Korrelation mit den Ablagerungen des zentralen Beckens existieren unterschiedliche Auffassungen. Die Randkarbonate am Schiefergebirgsrand werden von Richter-Bernburg (1950) als fazielle Vertretung des im hessischen Zechstein-Becken entwickelten Werra-Anhydrits (A1) angesehen. Kulick et al. (1984) parallelisieren die Randkarbonate mit einer in den zentralen Beckenbereichen als Anhydritknotschiefer (A1Ca) bezeichneten karbonatisch-sulfatischen Übergangsfolge. Paul (1986) ordnet die Randkarbonate dem Zechsteinkalk (Ca1) zu.

1.2 Korbacher Spalte

Im stillgelegten Steinbruch Fisseler, 1 km südlich von Korbach (TK 4719 Korbach, R 34 91760, H 56 80 800), ist in den Randkarbonaten des Zechstein 1 eine mehr als 15 m tiefe Spalte aufgeschlossen (Abb. 2). Die Spalte ist überwiegend mit violetten, siltigen Tonsteinen und gelbbraunen, dolomitischen Siltsteinen verfüllt. Der kar-

bonatische Anteil der Spaltenfüllung besteht aus einem dunkelbraunen, kalkigen Dolomit. In der Spaltenfüllung findet sich eine Wirbeltier-Fossilagerstätte, bestehend aus einer Vergesellschaftung oberpermischer, terrestrischer Tetrapoden, die bisher nur aus Russland, Schottland sowie Süd- und Ostafrika bekannt ist. Die Fauna setzt sich aus Therapsiden, Archosauromorphen und Pareiasauriern zusammen (Sues & Munk 1996).

Über das genaue Alter der Bildung und Verfüllung der Spalte gibt es unterschiedliche Meinungen. Gegen Ende der Karbonatsedimentation fiel der Ablagerungsraum am Schiefergebirgsrand trocken (Kulick et al. 1984). Kulick (1987) ging daher davon aus, dass die Spalte in dieser Zeit durch Verkarstungsprozesse gebildet, verfüllt und anschließend vom Oberen Werra-Ton überdeckt wurde. Sues & Munk (1996) sehen am Schiefergebirgsrand keine Anzeichen für eine Sedimentationsunterbrechung zwischen der Karbonatsedimentationsphase und der Ablagerung der Tonsteine im Zechstein 1. Nach ihrer Auffassung fand die Spaltenbildung und ihre Verfüllung seit Beginn der Tonsteinsedimentation statt und dauerte maximal bis zur Ablagerung der Karbonate der Leine-Serie (Ca3).

Der Mechanismus der Spaltengenese ist ebenfalls noch nicht zweifelsfrei geklärt. Kulick (1987) sieht Verkarstungsprozesse als Ursache an. Mechanische Prozesse können jedoch ebenfalls in Betracht gezogen werden, wie die Aufschlussituation nahelegt. Die Teilscholle am nördlichen Rand der Korbacher Spalte fällt mit ca. 19° NNE ein, während die Scholle am südlichen Spaltenrand ein Einfallen von 10° ENE aufweist (Sues & Munk 1996; Abb. 2).



Abb. 2. Korbacher Spalte (Juli 1998). Erkennbar ist das geringfügig stärkere Einfallen der Teilscholle am nördlichen (rechten) Spaltenrand. Die Höhe der Leiter beträgt ca. 6 m.

In der Umgebung von Korbach treten in den Randkarbonaten des Zechstein 1 einige kleinere Spalten auf, die mit roten Tonen verfüllt sind und teilweise pleistozäne Wirbeltierbruchstücke enthalten (Kulick 1968, Sues & Munk 1996). Ihre Genese ist auf eine pleistozäne Verkarstung der Randkarbonate zurückzuführen.

1.3 Probenauswahl und Methodik

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Diagenese der Randkarbonate im Bereich der Korbacher Spalte. Die Beprobung der Z1-Karbonate erfolgte an einem vertikalen Profil am nördlichen Spaltenrandbereich von der Steinbruchbasis bis zur Steinbruchoberkante über die gesamte zugängliche Höhe von 14,5 m, wobei ein Probenabstand von ca. 1,5 m gewählt wurde. Zudem wurde in horizontaler Richtung ein Profil gelegt, das nördlich und südlich der Spalte jeweils bis in eine Entfernung von 15 m beprobt wurde. Das Horizontal-Profil verläuft auf einer Höhe von 12 bis 14 m unterhalb der Steinbruchoberkante. An den Karbonatproben wurden

die $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (‰ PDB) ermittelt. Das hierfür benötigte Probenmaterial wurde mittels eines Mikrobohrers aus den für Dünnschliff-Untersuchungen hergestellten Gesteinsklötzchen gewonnen. Die angefertigten Dünnschliffe wurden im Durchlichtmikroskop und mittels Kathodolumineszenz (Kaltkathode Technosyn 8200 MK II, Spannung 15 keV, Kathodenstrahl-Stromstärke 500–530 mA) untersucht.

Zusätzlich standen eine Reihe von Isotopen-Daten (Tab. 1, Anhang) und zahlreiche Dünnschliffe aus Zechstein-Bohrungen sowohl aus den Randbereichen als auch aus den zentralen Bereichen des hessischen Zechstein-Beckens zur Verfügung. Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung und des Geologisch-Paläontologischen Instituts der Universität Heidelberg erfolgten bereits Studien zur Fazies und Diagenese des Zechstein 1 im hessischen Becken (Becker et al. 1998). Die dabei gewonnenen Daten und Erkenntnisse sind für die Interpretation der Isotopen-Daten aus dem Bereich der Korbacher Spalte nützlich und ermöglichen eine Einordnung der lokalen Daten in ein grösseres Gesamtbild.

2. Petrographie und stabile Isotope

2.1 Zechstein 1-Karbonate

Brachiopodenschalen

Die überwiegend hohen $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Brachiopodenschalen (0,2–5,6 ‰) stimmen gut mit den aus der Literatur bekannten Daten für permische marine Karbonate überein (Given & Lohmann 1985, Veizer et al. 1986, Grossman 1994). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Brachiopodenschalen liegen mit -4,7 bis -0,5 ‰ annähernd zwischen den Werten der Dolomite (Abb. 3) und denen der Kalksteine aus dem Becken (Abb. 4).

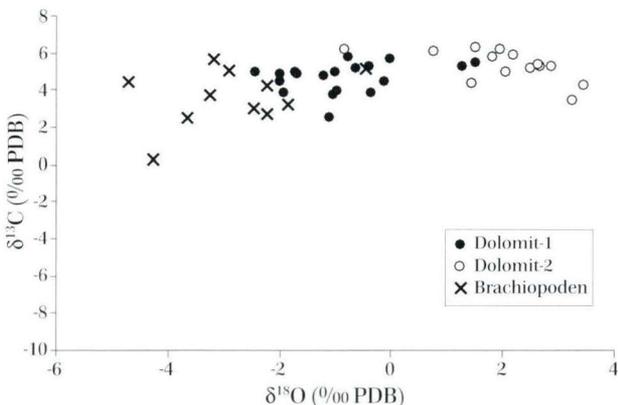


Abb. 3. Stabile Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopendaten der Dolomite und Brachiopoden.

Dolomit-1 und Dolomit-2

Bei den Dolomiten lassen sich petrographisch und isotopengeochemisch zwei Typen unterscheiden: Dolomit-1 ist mikrokristallin und zeigt eine orangerote bis schwach dunkelrote Lumineszenz; die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte betragen zwischen -2,4 und 1,5 ‰. Bei Dolomit-2 handelt es sich um einen Zement aus euhedralen, feinkristallinen Dolomithomboedern mit einer intensiven dunkelroten Lumineszenz. Die Verbreitung des Dolomit-2 ist auf die Beckenbereiche und auf den nördlichen Vorspessart beschränkt. Dolomit-2 ist durch überwiegend positive $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von -0,8 bis 3,4 ‰ charakterisiert (Abb. 3).

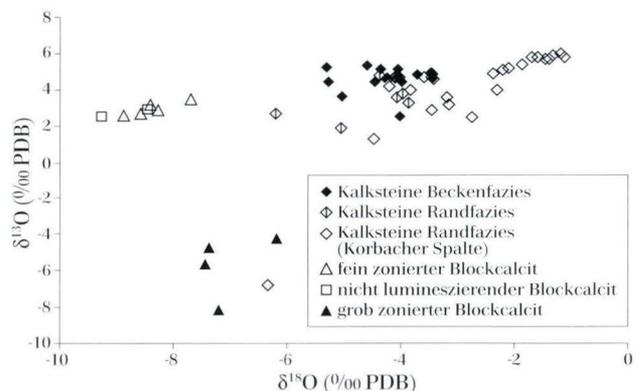


Abb. 4. Stabile Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopendaten der Kalksteine und Calcit-Zemente.

Kalksteine der Beckenfazies

Bei den Kalksteinen aus den zentralen Bereichen des hessischen Zechstein-Beckens handelt es sich überwiegend um Mikrosparite mit einer hellorangeroten Lumineszenz. In den Mikrospariten treten mitunter leistenförmige, z.T. calcitisierte Anhydritkristalle auf. Daneben finden sich auch Anhydritzemente innerhalb geringmächtiger Onkoid-Packstone-Horizonte, die in die Mikrosparite eingeschaltet sind. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Kalksteine liegen zwischen -5,3 und -3,4 ‰. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte sind ähnlich hoch wie diejenigen der Brachiopodenschalen (Abb. 3 und 4).

Kalksteine der Randfazies

Die Randkarbonate werden zum überwiegenden Teil von calcitischen Ooid-Onkoid-Pack- bis Grainstones mit einer hohen Inter- und Intrapartikelporosität aufgebaut. Zwischen den einzelnen Komponenten ist ein äquigranularer, feinkristalliner (< 0,03 mm), sub- bis euhedraler Zement ausgebildet (Abb. 5 a, b). Dieser zeigt unter der Kathode einen nicht lumineszierenden, rhomboederförmigen Kernbereich mit einem gelborange lumineszierenden Saum. Die Komponenten können vollständig rekristallisiert sein, so dass eine Unterscheidung von Kern und Hüllen nicht möglich ist. Oft sind jedoch die Kernbereiche der Ooide und Onkoide gelöst und nur noch ein randlicher Zement ist vorhanden. Bei den Isotopenanalysen konnte nur die Zusammensetzung des Gesamtgesteins (Komponenten und Zemente) bestimmt werden. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte liegen zwischen -6,2 und -3,6 ‰, die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen 1,8 und 4,8 ‰. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte sind in der Regel niedriger als diejenigen der Kalksteine aus der Beckenfazies (Abb. 4).

Calcit-Zemente

Petrographisch lassen sich mittels Kathodolumineszenz vier verschiedene Calcit-Zemente unterscheiden. Sie treten in den Ooid-Onkoid-Pack- bis Grainstones am unmittelbaren Randbereich des Zechstein-Beckens und auch in weiter beckenwärts gelegenen Lokationen auf (z.B. Bohrung Braunsen).

a) Fein zonierter Blockcalcit

Die fein- bis mittelkristallinen Kristalle dieses Calcit-Zements zeigen unter der Kathode eine ausgeprägte, engständige Zonierung mit gelborange lumineszierenden und schwach dunkelorange bis nicht lumineszierenden Abschnitten. Der Calcit kann als Zement an den Rändern rhomboederförmiger Poren auftreten (Abb. 5 c, d). Er lässt sich auch in einer Zementationsabfolge in einer Kluft am Top der Randkarbonate in der Bohrung Braunsen (Teufe 366,0 m) identifizieren (Abb. 5 e, f und Abb. 6). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte liegen mit -8,9 bis -7,7 ‰ relativ niedrig. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte betragen 2,6 bis 3,5 ‰.

b) Orange lumineszierender Blockcalcit

Auf den fein zonierten Calcit-Zement folgt innerhalb der Zementationsabfolge ein hellorange lumineszierender Calcit-Zement, der zahlreiche Fluideinschlüsse aufweist (Abb. 5 e, f und Abb. 6). Dieser tritt auch randlich in Drusen Hohlräumen mit zuweilen skalenoedrischen Kristallformen auf oder findet sich in Intra- und Interpartikelporen (Abb. 5 a, b). Zudem kommt er auch in Klüften und Rissen des karbonatischen Spaltensediments vor. Aus diesem Zement ließ sich für Isotopenuntersuchungen nicht genügend Material gewinnen.

c) Nicht lumineszierender Blockcalcit

Ein überwiegend nicht lumineszierender, mittel- bis grobkristalliner Calcit-Zement mit $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von -9,3 bis -8,4 ‰ und $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von 2,5 bis 2,8 ‰ verfüllt den verbleibenden Restporenraum (Abb. 5 e, f und Abb. 6). Bereichsweise sind hellgelb lumineszierende dünne Bänder in die nicht lumineszierenden Bereiche eingeschaltet. Innerhalb rhomboederförmiger Poren folgt dieser Zement direkt auf den fein zonierten Calcit-Zement (Abb. 5 c, d). Der Zement wurde nur in Proben aus beckenwärtig gelegenen Lokationen (Bohrung Braunsen) angetroffen und konnte in Proben aus dem Steinbruch Fisseler (Korbach) nicht nachgewiesen werden.

d) Grob zonierter Blockcalcit

Im Spaltenmaterial, im Spaltennebengestein und auch in weiteren Proben aus dem Randkarbonat tritt in mm- bis z.T. cm-großen Drusen ein mittel- bis grobkristalliner, klarer Calcit-Zement auf. In Proben aus der Steinbruchoberkante findet er sich als interkristalliner Zement, der den Restporenraum verfüllt. Der Calcit-Zement zeigt unter der Kathode eine weitständige Zonierung, wobei innerhalb nicht lumineszierender Bereiche zahlreiche dünne, hellgelb lumineszierende Zonen ausgebildet sind (Abb. 5 g, h). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Calcit-Zements liegen zwischen -7,4 und -6,2 ‰. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte betragen -8,2 bis -4,2 ‰.

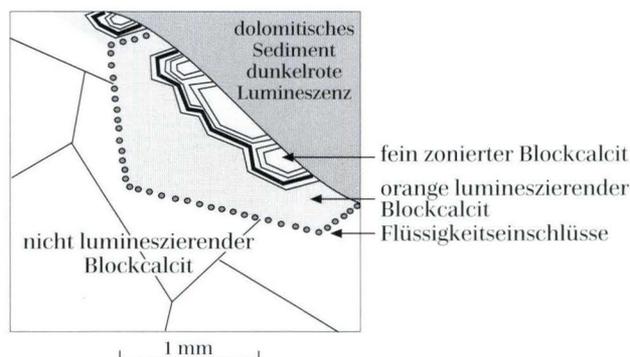
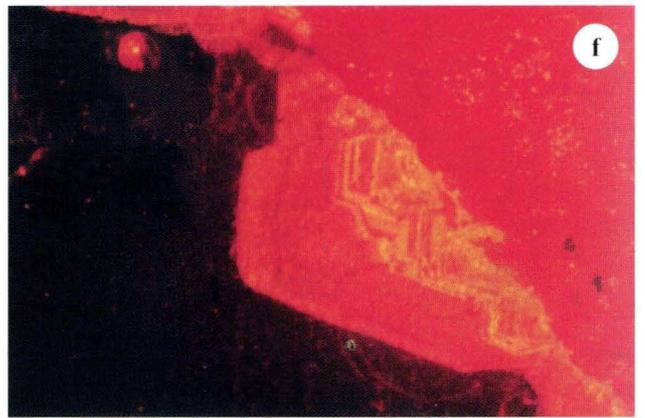
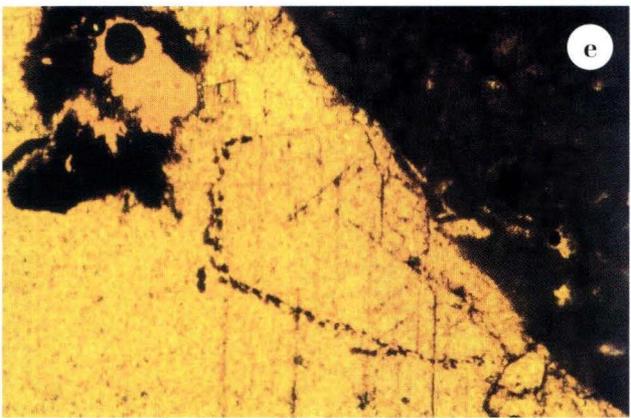
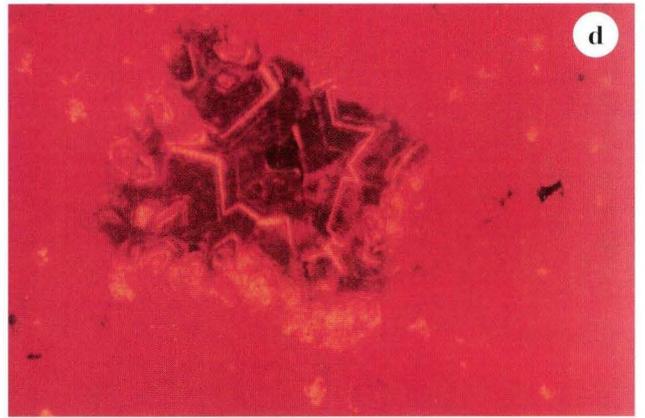
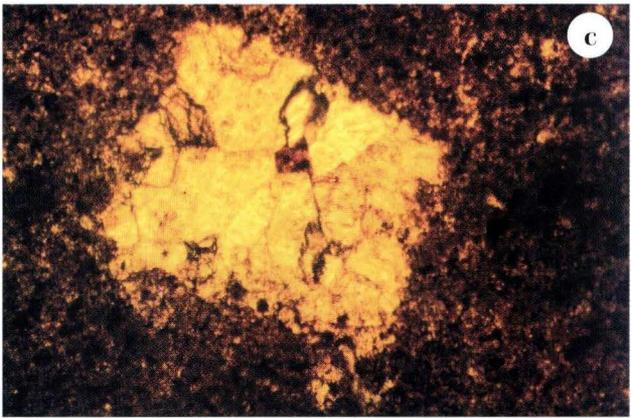
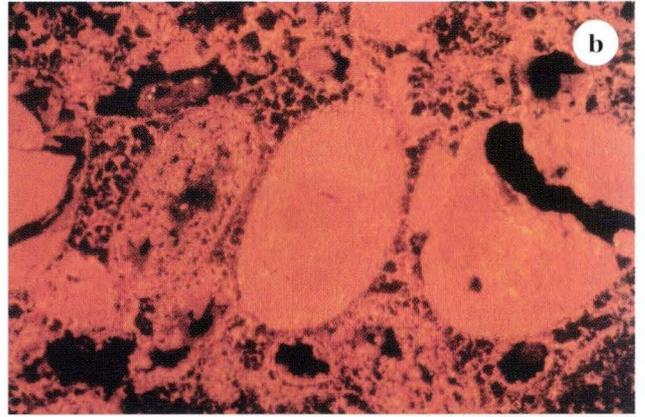
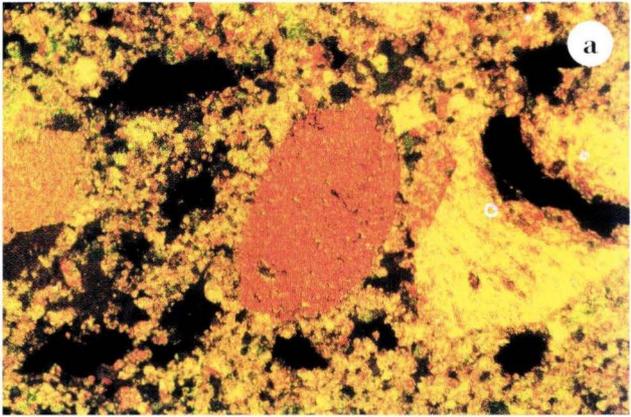


Abb. 6. Zementabfolge in einer Kluft des Zechstein 1-Randkarbonats in der Bohrung Braunsen. Vergleiche Abb. 5 e und f.



2.2 Korbacher Spalte

Karbonate an der Korbacher Spalte

Das Nebengestein der Korbacher Spalte besteht aus den bereits zuvor petrographisch beschriebenen calcitischen Ooid-Onkoid-Pack- bis Grainstones. Zusammenfassend betrachtet zeigen die Isotopenwerte des Spaltennebensgesteins eine große Spannweite von -6,8 bis 6,0 ‰ für $\delta^{13}\text{C}$ und von -6,3 bis -1,1 ‰ für $\delta^{18}\text{O}$. Die stabilen Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopenverhältnisse aus dem Bereich der Korbacher Spalte sind im allgemeinen höher als in den übrigen untersuchten Proben aus den Randkarbonaten (Abb. 4).

Horizontal-Profil

Die Korbacher Spalte sowie deren unmittelbarer Randbereich zeichnen sich isotopengeochemisch im horizontalen Profil deutlich ab (Abb. 7). Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der calcitischen Ooid-Onkoid-Pack- bis Grainstones betragen außerhalb des unmittelbaren Spaltenrandbereiches zwischen 5,4 und 6,0 ‰; die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte liegen hier zwischen -1,9 und -1,1 ‰. Sowohl die $\delta^{13}\text{C}$ - als auch die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Karbonate des Zechstein 1 nehmen im direkten Randbereich zur Spalte um ca. 1,5 ‰ bzw. 2,5 ‰ ab. Nördlich der Spalte ist eine allmähliche Abnahme der Isotopenwerte mit Annäherung an den Spaltenrand

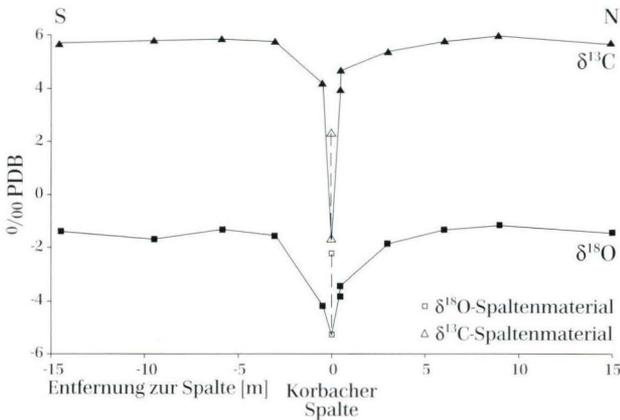


Abb. 7. Horizontales Isotopen-Profil ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) an der Korbacher Spalte.

sichtbar; hingegen scheint südlich der Spalte eine abrupte Erniedrigung der Isotopenwerte vorzuliegen.

Vertikal-Profil

Von der Steinbruchbasis bis 12 m darüber schwanken die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Z1-Karbonate zwischen -3,8 und -2,1 ‰ (Abb. 8). Am Steinbruchtop nehmen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte schließlich bis auf -6,3 ‰ ab. Noch deutlicher erkennbar ist die Abnahme der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte über nahezu die gesamte Profilhöhe. Vom Profilmullpunkt bis zu 9 m über der Steinbruchbasis liegen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen 3,6 und 5,2 ‰. Einer allmählichen Abnahme auf 1,3 ‰ bei 0,5 m unter der Steinbruchoberkante folgt direkt an der Oberfläche eine extreme Erniedrigung des $\delta^{13}\text{C}$ -Wert auf -6,8 ‰.

Karbonatisches Spaltenmaterial

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der karbonatischen Spaltenfüllung sind mit -1,7 bzw. 2,3 ‰ gegenüber den Kohlenstoffisotopen-Werten des Nebengesteins und den Werten des direkten Spaltenrandbereiches deutlich niedriger; dies trifft auch auf die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit -5,3 und -2,2 ‰ zu.

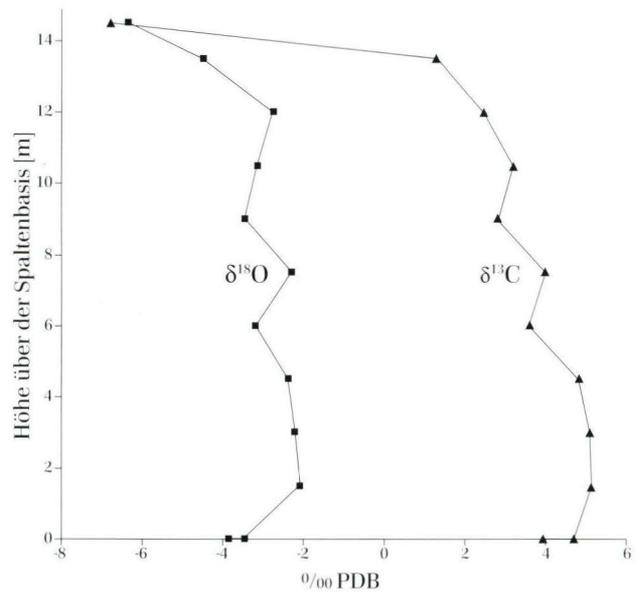


Abb. 8. Vertikales Isotopen-Profil ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) an der Korbacher Spalte.

Abb. 5. Dünnschliff- und Kathodolumineszenzaufnahmen.

- a, b: Ooid-Pack- bis Grainstone. Zwischen den Komponenten ist ein feinkristalliner, sub- bis euhedraler Calcit-Zement mit nicht lumineszierendem, rhomboederförmigem Kernbereich und gelborange lumineszierendem Saum ausgebildet. Der orange lumineszierende Blockcalcit verfüllt Intrapartikelporen und Oomolds (Korbacher Spalte, Bildbreite 1,4 mm).
- c, d.: Fein zonierter Blockcalcit (randlich) und nicht lumineszierender Blockcalcit als Zemente innerhalb einer rhomboederförmigen Pore (Bohrung Braunsen, Bildbreite 1,4 mm).
- e, f: Zementabfolge bestehend aus fein zoniertem Blockcalcit, orange lumineszierendem Blockcalcit mit Fluideinschlüssen und nicht lumineszierendem Blockcalcit (Bohrung Braunsen, Bildbreite 2,8 mm).
- g, h: Grob zonierter Blockcalcit als Zement in einer Druse (Korbacher Spalte, Bildbreite 5,5 mm).

3. Diskussion der diagenetischen Entwicklung

3.1 Zechstein 1-Karbonate

Die Dolomitisierung der Zechstein1-Karbonate kann als frühdiagenetisch betrachtet werden. Es ist anzunehmen, dass der Dolomit-1 sich aus einer Lösung mit ähnlicher Zusammensetzung wie das permische Meerwasser abgeschieden hat. Eine spätere Rekristallisation/Stabilisierung des Dolomits im Laufe der Diagenese bewirkte eine leichte Verschiebung zu negativen Sauerstoff-Isotopenwerten, wie dies von Kupez et al. (1993) an verschiedenen Beispielen allgemein aufgezeigt wurde. Im Vergleich zu den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Brachiopodenschalen liegen die Werte des Dolomit-1 um 1–3 ‰ höher (Abb. 3). Darin spiegelt sich die Fraktionierung des Sauerstoffs beim Ausfällen von Calcit und Dolomit aus einer Lösung wider, wobei Dolomit 2–4 ‰ mehr ^{18}O enthält als Calcit (Land 1980). Die hohen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Dolomit-2 bis zu 3,4 ‰ können in Verbindung mit den Evaporiten des höheren Zechstein 1 gesehen werden. Bei der Bildung des Unteren Werra-Anhydrits im hessischen Zechsteinbecken entstanden an Mg^{2+} und ^{18}O angereicherte Restlösungen, die ins Unterlager sanken und dort zur Dolomitisierung führten. Während der flachen Versenkungsdiagenese kam es weiterhin zur Anhydritzementation in den Beckenkarbonaten.

Die Kalksteine im Zechstein 1 sind zum überwiegenden Teil als Dedolomite zu interpretieren. Es können mehrere Prozesse, die zu einer Dedolomitisierung führten, in Abhängigkeit von der jeweiligen Position im hessischen Zechstein-Becken unterschieden werden. Die im Vergleich zu den Dolomiten und den Brachiopodenschalen niedrigen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der mikritischen Kalksteine aus den Beckenbereichen sind auf höher temperierte, an ^{18}O abgereicherte Lösungen zurückzuführen, die eine Dedolomitisierung im Becken bewirkten. Diese Lösungen als auch das für die Dedolomitisierung nötige Ca^{2+} stammen, vergleichbar mit den Annahmen von Strohmenger et al. (1996) für die Z2-Karbonate Norddeutschlands, wahrscheinlich aus der Transformation von Gips zu Anhydrit bei der Kompaktion. Calcitisierte, leistenförmige Anhydrit-Kristalle in den Becken-Karbonaten deuten ebenfalls auf eine sekundäre Calcitierungsphase hin.

Im Übergangsbereich von den Beckenkarbonaten zu den Randkarbonaten und vor allem in den Randkarbonaten lässt sich eine Dedolomitisierung im Zusammenhang mit den oben beschriebenen Calcit-Zementen (fein zonierter, orange lumineszierender und nicht lumineszierender Blockcalcit) erkennen. Die innerhalb von rhomboederförmigen Poren kristallisierten Calcit-Zemente sind als Folge der Dedolomitisierung zu sehen. Bei den rhomboederförmigen Poren handelt es sich wahrscheinlich um ehemalige Dolomit-Kristalle, die vor der Zemen-

tation gelöst wurden. In den Ooid-Onkoid-Pack- bis Grainstones wurden die Dolomitekristalle direkt von einem Calcit verdrängt, gleichzeitig wurde ein Calcit-Saum (orange lumineszierender Blockcalcit) um die Dolomit-Rhomboeder ausgefällt. Der verbleibende Porenraum wurde durch den orange lumineszierenden Blockcalcit und/oder den grob zonierten Blockcalcit verfüllt. Die im allgemeinen etwas niedrigeren $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Randkarbonate (mit Ausnahme des Nebengesteins der Korbacher Spalte) im Vergleich zu den Werten der Beckenkarbonate geben einen Hinweis auf einen meteorischen Einfluss bei der Dedolomitisierung der Randkarbonate.

3.2 Korbacher Spalte

Spaltenfüllung

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des karbonatischen Anteils der Spaltenfüllung liefern keine Hinweise auf eine Beteiligung permischen Meerwassers, da die entsprechenden Isotopenzusammensetzungen permischer Brachiopodenschalen und permischer mariner Karbonate im allgemeinen isotopisch schwerer sind. Nur ein ausreichend hoher Lösungsdurchfluss mit gelöstem, isotopisch leichtem CO_2 , wie z.B. aus der Bodenluft (Zerfall organischer Substanz im Boden), bewirkt eine starke Erniedrigung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte. Ein möglicher Anteil isotopisch leichten Kohlenstoffs aus der Zersetzung organischer Substanz aus dem Nebengestein kann jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden.

Karbonatisches Nebengestein (Randkarbonate des Zechstein)

Die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des dedolomitierten, karbonatischen Nebengesteins der Korbacher Spalte, und damit der Calcit-Zemente (fein zonierter, orange lumineszierender und grob zonierter Blockcalcit), lassen eine deutliche „inverted J-shaped curve“ (Lohmann 1982, Meyers & Lohmann 1985) erkennen (Abb. 9). Diese Form der Isotopenverteilung resultiert aus der unterschiedlichen Verfügbarkeit von isotopisch unterschiedlich zusammengesetztem CO_2 in einer meteorisch-phreatischen Zone. So werden nach Allan & Matthews (1982) in der meteorisch-phreatischen Zone isotopisch (Kohlenstoff, Sauerstoff) sehr leichte Zemente in der Nähe zur vadosen Zone gebildet, da hier der Anteil von isotopisch leichtem CO_2 aus der Bodenluft noch sehr hoch ist. Mit zunehmender Entfernung von der vadosen Zone nehmen zunächst die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zu, in noch größerer Entfernung auch die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, bis schließlich die Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotopenzusammensetzungen ähnlich der des Nebengesteins sind.

Diese Effekte auf die Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotopenzusammensetzungen der Karbonatzemente in einer meteorisch-phreatischen Zone spiegeln sich auch in dem Horizontal- und dem Vertikalprofil durch das dedolomitierte, karbonatische Nebengestein der Korbacher Spalte wider. So treten an der Oberkante des Vertikalprofils, die einer vadosen Zone am nächsten gelegen haben sollte, die niedrigsten $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte auf. Die ca. 0,5 m darunter genommene Probe zeigt einen sehr stark erhöhten $\delta^{13}\text{C}$ -Wert und einen etwas weniger erhöhten $\delta^{18}\text{O}$ -Wert. Etwa 4 m unterhalb des Tops liegen die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der dedolomitierten Pack-Grainstones in einem Bereich der ungefähr der Zusammensetzung des primären, dolomitischen Gesteins (Dolomit-1) entspricht. Im Horizontalprofil zeigt sich der Rückgang der $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte erst in unmittelbarer Nähe zur Korbacher Spalte, wobei nicht ganz so niedrige $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte erreicht werden, wie im oberen Bereich des Vertikalprofils. Dies deutet auf einen etwas schwächeren Einfluss von isotopisch leichtem CO_2 aus der Bodenluft hin, d.h. eine etwas größere Entfernung zur vadosen Zone. In einer Entfernung von ca. 3 m liegen die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bereits wieder in einem Bereich der auch für den Dolomit-1 charakteristisch ist.

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Karbonate im Spaltenrandbereich

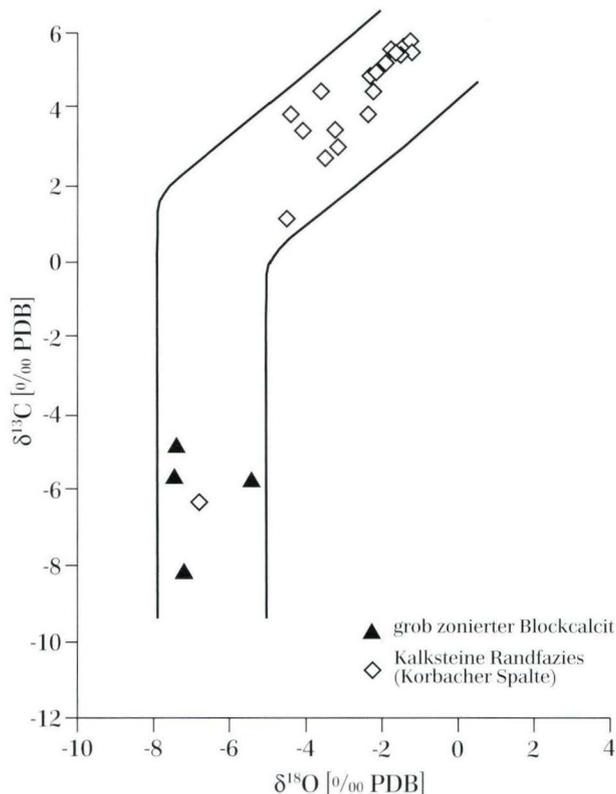


Abb. 9. Verteilung der stabilen Isotope ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) des grob zonierten Blockcalcits und der Z1-Kalksteine der Korbacher Spalte. Erkennbar ist eine „inverted J-shaped curve“.

und an der Steinbruchoberkante konnten, ähnlich wie bei der Spaltenfüllung (s.o.), nur durch einen ausreichend hohen Lösungsdurchfluss mit gelöstem, isotopisch leichtem CO_2 aus der Bodenluft signifikant erniedrigt werden. Dieser war nur in unmittelbarer Nähe zur Korbacher Spalte und am Top der Randkarbonate gewährleistet. Die Isotopentrends spiegeln daher den Übergang von einem lösungsdominierten System direkt an der Korbacher Spalte zu einem gesteinsdominierten System mit zunehmender Entfernung zur Spalte und zur Steinbruchoberkante wider.

Unterschiede in der Wegsamkeit für die meteorischen Lösungen mögen sich auch in dem etwas unterschiedlichen Isotopenverlauf im dedolomitierten Nebengestein nördlich und südlich der Korbacher Spalte abzeichnen. So ist nördlich der Spalte eine allmähliche Erhöhung der Isotopensignale im Nebengestein mit zunehmenden Abstand zur Spalte im Horizontalprofil erkennbar. Im südlichen Teil hingegen liegt ein etwas abrupterer Anstieg der Isotopen-Werte vor. Eventuell dokumentiert sich in der unterschiedlichen Änderung der Isotopensignale nördlich und südlich der Spalte ein differenziertes Fließverhalten der Wässer im Spaltenrandbereich. Durch das stärkere Einfallen der Teilscholle am nördlichen Spaltenrand mit 19° NNE gegenüber dem Einfallen der Scholle am südlichen Spaltenrand mit 10° ENE (Sues & Munk 1996) war möglicherweise eine verbesserte laterale Lösungswegsamkeit in nördlicher Richtung gegeben.

3.3 Calcit-Zemente

Die unterschiedlichen Lumineszenzen der Calcit-Zemente weisen auf Variationen ihrer Fe- und/oder Mn-Gehalte hin. Die Veränderungen im Spurenelementgehalt können auf die verschiedensten Faktoren zurückzuführen sein (z.B. Änderung des Spurenelementgehaltes der Lösung, Änderung des Eh, Änderung der Ionenaktivitätskoeffizienten; vgl. Machel & Burton 1991). Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotopendaten des fein zonierten und des nicht lumineszierenden Blockcalcits liegen nur aus der Bohrung Braunsen vor, die sich paläogeographisch im Übergangsbereich vom Zechsteinrand zum Becken befindet (Abb. 1). Die recht niedrigen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des fein zonierten und des nicht lumineszierenden Blockcalcits deuten auf höher temperierte, isotopisch leichte Lösungen hin. Höher temperierte Lösungen könnten beispielweise als Kompaktionswässer vom Beckenzentrum in Richtung Beckenrand migriert sein.

Sowohl in dem Nebengestein der Korbacher Spalte als auch in Klüften und Lösungsporen der Bohrung Braunsen liegt eine sehr ähnliche Zementabfolge vor, die sich aber in ihrem Isotopensignal stark unterscheidet. Die

doch recht ähnlichen petrographischen Eigenschaften des nicht lumineszierenden und des grob zonierten Blockcalcits als auch deren relative Stellung in der Zementabfolge, nämlich nach dem orange lumineszierenden Blockcalcit, schließen bei einer gleichzeitigen räumlichen Trennung dieser beiden Zemente eine genetische Verbindung nicht aus. Hierbei wäre vorstellbar, dass meteorische Lösungen von Westen nach Osten migrierten und dabei im Bereich der Korbacher Spalte ein deutliches meteorisches Isotopensignal in den ausgefällten Calcit-Zementen und den Dedolomiten hinterließen. Der grob zonierte Blockcalcit aus den Randkarbonaten ist auf Grund der negativen $\delta^{13}\text{C}$ -Werte und der Lumineszenz als ein meteorischer Zement zu interpretieren (vgl. Allen & Matthwes 1982, Tucker & Wright 1990). Im Übergangsbereich zum Becken vermischten sich diese Wässer mit höher temperierten Kompaktionswässern. Die in diesem Mischbereich (z.B. Bohrung Braunsen) ausgefällten Zemente weisen daher etwas niedrigere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als die rein meteorischen Zemente auf. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte liegen im Bereich des Nebengesteins, da hier kein isotopisch leichtes CO_2 aus der Bodenluft mehr vorgelegen haben dürfte und das System für den Kohlenstoffhaushalt gesteinsdominiert war.

Bildungszeitraum

Das Auftreten des orange lumineszierenden Blockcalcits in Klüften des Spaltenmaterials macht deutlich, dass das Spaltensediment zu diesem Zeitpunkt bereits lithifiziert war und die Zementation und die Dedolomitisierung nach der Verfüllung der Spalte stattfanden. Ein hoher Wasserdruck in der Spalte und im unmittelbaren Nebengestein war dabei wahrscheinlich für die Bildung von Klüften und Rissen im Spaltensediment verantwortlich („hydraulic fracturing“).

4. Ergebnisse

Die Korbacher Spalte bildet einen Bereich erhöhter Wasserwegsamkeit für meteorische Lösungen. Der Einfluss meteorischer Lösungen auf das Nebengestein geht eindeutig von der Korbacher Spalte aus. Dies drückt sich nicht nur in der starken Verkarstung des Spaltenrandbereichs aus, sondern lässt sich auch in den Änderungen der Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotopenzusammensetzungen des Nebengesteins mit zunehmender Entfernung von der Spalte erkennen. Die Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotopenzusammensetzungen des dedolomitierten Nebengesteins zeigen einen für den meteorisch-vados-phreatischen Bereich typischen Verlauf. Die Isotopenwerte des karbonatischen Spaltenmaterials weisen ebenfalls ein meteorisches Isotopensignal auf.

Einen Hinweis auf eine permische, meteorische Beeinflussung der Karbonate bildet die hohe Intra- und Interpartikelporosität in den Pack-bis Grainstones. So deuten Hovorka et al. (1994) die Bildung von Intrapartikelporosität in Grainstones der San Andres- und Greyburg Formation der Guadalupe Mountains (New Mexico) als einen Effekt meteorischer Lösungsvorgänge, wobei gleichzeitig an anderen Stellen des Grundwasserleiters intergranulare Zementation ablaufen kann.

Einen weiteren Hinweis auf eine permische meteorische Beeinflussung der Randkarbonate liefern die Sauerstoff- und Kohlenstoff-Isotopenzusammensetzungen. Unter Berücksichtigung der Lage der beprobten Randkarbonate zur permischen Paläogeographie (der Aufschluss in Korbach liegt im Vergleich zu den übrigen Lokationen weiter beckenwärts) zeigt sich, dass mit Annäherung an das Festland die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte abnehmen. Dies lässt sich auf den Wechsel von einem lösungsdominierten, dem Festland und damit dem Herkunftsgebiet der Lösungen sehr nahen Bereich (niedrigere $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte), zu einem dem Festland fernen und gesteinsdominierten Bereich erklären.

Trotz all dieser Hinweise ist es nicht völlig auszuschließen, dass auch eine jüngere meteorische Beeinflussung der Randkarbonate stattfand (z.B. während der pleistozänen Verkarstung) und die vorliegenden Isotopenprofile im Bereich der Korbacher Spalte auf diesen jungen Einfluss zurückzuführen sind. So ist für den grob zonierten Blockcalcit die relative Stellung zu Zementen, die eindeutig der tiefen Versenkungsdiagenese (z.B. Satteldolomit) zugeordnet werden können, nicht geklärt. Auch die Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotopenzusammensetzungen des Zementes lassen sowohl eine permische als auch rezente oder subrezente Bildung möglich erscheinen.

Der zur Dedolomitisierung des Nebengesteins führende meteorische Einfluss fand nach der Lithifizierung des Spaltenmaterials statt, wahrscheinlich noch während des Perms. Jedoch kann auch eine jüngere meteorische Überprägung nicht ausgeschlossen werden.

Danksagung: Herrn Prof. Dr. A. Hoppe, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden, danken wir für die Anregung zu dieser Studie. Die Analyse der stabilen Sauerstoff- und Kohlenstoff-Isotope erfolgte durch die Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben, Sektion 3, Hannover. Herrn Prof. Dr. M. A. Geyh, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover,

sei für die Durchführung der Isotopenuntersuchungen gedankt. Herrn Dr. H. Heggemann, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden, und Herrn Dr. W. Völcker-Janssen, Museum Korbach, danken wir für die

logistische Unterstützung bei der Probennahme. Herr W. Munk, Staatliches Museum für Naturkunde Karlsruhe, stellte dankenswerterweise Brachiopoden aus seiner Sammlung zur Verfügung.

5. Schriftenverzeichnis

- Allan, J. R. & Matthews, R. K. (1982): Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis. – *Sedimentology*, **29**: 797–817; Oxford.
- Becker, F., Zeeh, S., Bechstadt, T. & Hoppe, A. (1998): Isotopengeochemische ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) und diagenetische Untersuchungen an Zechstein 1-Karbonaten (Werra-Folge) des hessischen Zechstein-Beckens. – *Erlanger geol. Abh., Sonderband 2*: 5–6; Erlangen.
- Given, R. K. & Lohmann, K. C. (1985): Derivation of the original isotopic composition of Permian marine cements. – *J. Sediment. Petrol.*, **55** (3): 430–439; Tulsa.
- Grossman, E. L. (1994): The carbon and oxygen isotope record during the evolution of Pangea: Carboniferous to Triassic. – In: Klein, G. D. (Hg.): *Pangea: Paleoclimate, tectonics, and sedimentation during accretion, zenith, and breakup of a supercontinent*, *Spec. Paper Geol. Soc. Amer.*, **288**: 207–228; Boulder.
- Hovorka, S., Nance, H. S. & Kerans, C. (1994): Parasequence geometry as a control on permeability evolution: examples from the San Andres and Greyburg Formations in the Guadalupe Mountains, New Mexico. – In: Loucks, R. G. & Sarg, J. E. (Hg.): *Carbonate sequence stratigraphy*, *Mem. Amer. Assoc. Petroleum Geol.*, **57**: 493–514; Tulsa.
- Kulick, J. (1968): Perm. – *Erl. Geol. Kt. Hessen 1*: 25000; Bl. 4719 Korbach: 272 S.; Wiesbaden.
- Kulick, J. (1987): Die Randfazies des Zechsteins in der Korbacher Bucht und im Frankenberger Raum. – In: Kulick, J. & Paul, J. (Hg.): *Internationales Symposium Zechstein 1987, Exkursionsführer II*: 141–169; Wiesbaden.
- Kulick, J., Leifeld, D., Meisl, S., Pöschl, W., Stellmacher, R., Strecker, G., Theuerjahr, A.-K. & Wolf, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. – *Geol. Jb.*, **D 68**: 3–223; Hannover.
- Kupez, J. A., Montanez, I. P. & Gao, G. (1993): Recrystallization of dolomite with time. – In: Rezak, R. & Lavoie, D. (Hg.): *Carbonate microfabrics*, *Frontiers in sedimentary geology*: 187–194; Berlin.
- Land, L. S. (1980): The isotope and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art. – In: Zenger, D. H., Dunham, J. B. & Ethington, R. C. (Hg.): *Concepts and models of dolomitization*, *Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Mineral.*, **28**: 87–110; Tulsa.
- Lohmann, K. C. (1982): „Inverted J“ carbon and oxygen isotopic trends: a criterion for shallow meteoric phreatic diagenesis. – *Geol. Soc. Amer., Abstracts with Programs*, **14**: 548; Boulder.
- Machel, H. G. & Burton, E. A. (1991): Factors governing cathodoluminescence in calcite and dolomite, and their implications for studies of carbonate diagenesis. – In: Barker, C. E. & Kopp, O. C. (Hg.): *Luminescence microscopy and spectroscopy: Qualitative and quantitative applications*, *Soc. Econ. Paleont. Mineral., Short Course*, **25**: 37–57; Tulsa.
- Meyers, W. J. & Lohmann, K. C. (1985): Isotope geochemistry of regionally extensive calcite cement zones and marine components in Mississippian limestones, New Mexico. – In: Schneidermann, N. & Harris, P. M. (Hg.): *Carbonate cements*, *Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Mineral.*, **36**: 223–239; Tulsa.
- Paul, J. (1986): Stratigraphy of the Lower Werra Cycle (Z1) in West Germany (preliminary results). – In: Harwood, G. M. & Smith, D. B. (Hg.): *The English Zechstein and related topics*, *Spec. Publ. Geol. Soc. London*, **22**: 149–156; Oxford.
- Rebelle, M. (1986): *Sédimentologie, géochimie et palynologie du bassin évaporitique du Zechstein à partir de donnée de subsurface (Mer du Nord, Hesse-RFA)*. – *Documents du GRECO-52, Nature et Genèse des facies confines*, **8**: 301 S.; Paris.
- Richter-Bernburg, G. (1950): Zwei Beiträge zur Fazies, Tektonik und Kupferführung des Zechsteins: I. Waldeck, II. Nordsudeten. – *Geol. Jb.*, **65**: 145–212; Hannover.
- Smith, D. B. (1980): The evolution of the English Zechstein basin. – In: Füchtbauer, H. & Peryt, T. (Hg.): *The Zechstein basin with emphasis on carbonate sequence sequences*, *Contr. Sedimentology*, **9**: 7–34; Berlin.
- Strohmeier, C., Antonini, M., Jäger, G., Rockenbauch, K. & Strauss, C. (1996): Zechstein 2 carbonate reservoir facies distribution in relation to Zechstein sequence stratigraphy (Upper Permian, Northwest Germany): an integrated approach. – *Bull. Centres Rech. Explor. – Prod. Elf Aquitaine*, **20** (1): 1–35; Pau.
- Sues, H.-D. & Munk, W. (1996): A remarkable assemblage of terrestrial tetrapods from the Zechstein (Upper Permian: Tatarian) near Korbach (northwestern Hesse). – *Paläont. Z.*, **70**: 213–223; Stuttgart.
- Tucker, M. E. & Wright, V. P. (1990): *Carbonate sedimentology*. – 482 S.; Blackwell, Oxford.
- Veizer, J., Fritz, P. & Jones, B. (1986): Geochemistry of brachiopods: Oxygen and carbon isotopic records of Paleozoic oceans. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**: 1679–1696; Oxford.

Manuskript eingegangen am 27. 5. 1999, angenommen am 8. 6. 1999

Tab. 1: Stabile Isotopen-Daten ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) von Zechstein I-Karbonaten aus dem hessischen Becken

Petrologie/Lithologie	Bohrung/Spezies/Profil	TK	R	H	Teufe (m)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
Dolomit-1	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	405,40	-1,99	4,84
Dolomit-1	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	515,60	-0,62	5,14
Dolomit-1	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	515,58	-1,19	4,73
Dolomit-1	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	515,57	-0,39	5,26
Dolomit-1	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	472,82	-1,97	4,4
Dolomit-1	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	471,85	-1,02	3,73
Dolomit-1	Brg. Gershhausen	5123	3538582	5633962	402,45	1,29	5,26
Dolomit-1	Brg. Lehrbach	5220	3505700	5626770	494,87	-1,69	4,86
Dolomit-1	Brg. Mörshausen	4823	3543400	5663670	362,96	-0,34	3,82
Dolomit-1	Brg. Mörshausen	4823	3543400	5663670	362,95	-0,97	3,97
Dolomit-1	Brg. Rohrbach	5024	3550580	5641600	510,02	1,52	5,49
Dolomit-1	Brg. Ronshausen 17*	5025	3559630	5644380	467,25	0,00	5,63
Dolomit-1	Brg. Sterkelshausen	4923	3543600	5652800	219,55	-2,43	4,94
Dolomit-1	Brg. SR 8	5823	3544555	5561550	291,83	-0,75	5,73
Dolomit-1	Brg. Ufhausen	5225	3560720	5628532	1164,24	-1,93	3,88
Dolomit-1	Brg. Ufhausen	5225	3560720	5628532	1163,15	-1,72	5,00
Dolomit-1	Brg. Ützhausen	5322	3535260	5612690	330,71	-1,09	2,54
Dolomit-1	Brg. Wallersdorf	5222	3533550	5624000	352,42	-0,13	4,44
Dolomit-1	Brg. Wallersdorf	5222	3533550	5624000	350,45	-1,01	4,94
Dolomit-2	Brg. Burgjoß	5723	3536080	5565500	481,36	1,82	5,77
Dolomit-2	Brg. Escherode	4624	3552180	5687200	658,67	3,44	4,27
Dolomit-2	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	507,76	0,77	6,10
Dolomit-2	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	500,42	1,51	6,25
Dolomit-2	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	477,77	-0,82	6,12
Dolomit-2	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	475,71	1,95	6,14
Dolomit-2	Brg. Gelnhaar	5620	3510450	5579480	471,91	2,19	5,86
Dolomit-2	Brg. Lüdersdorf	5024	3551660	5647250	411,95	1,45	4,32
Dolomit-2	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	469,75	2,63	5,38
Dolomit-2	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	468,46	2,69	5,29
Dolomit-2	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	468,34	2,87	5,27
Dolomit-2	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	468,34	2,05	4,96
Dolomit-2	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	468,33	2,51	5,18
Dolomit-2	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	462,94	3,25	3,42
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	420,66	-5,26	4,41
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Kleba	5123	3541510	5631150	460,25	-4,33	5,04
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Kleba	5123	3541510	5631150	458,07	-3,43	4,75
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Küchen	4823	3557910	5673110	512,01	-4,03	5,10
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Küchen	4823	3557910	5673110	505,87	-5,28	5,19
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	476,26	-3,45	4,87
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	472,84	-4,44	4,40
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	472,83	-4,43	4,38
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	472,82	-4,25	4,54
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	472,80	-4,03	4,67
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	474,75	-3,44	4,57
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	474,68	-3,71	4,76
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	471,88	-3,97	4,38
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	465,60	-4,59	5,25
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Ronshausen 17	5025	3559630	5644380	461,52	-5,03	3,55
Kalksteine Beckenfazies	Brg. Wallersdorf	5222	3533550	5624000	352,34	-4,01	2,50
Kalksteine Randfazies	Brg. A92/B5	4718	3487670	5677210	29,92	-3,85	3,24
Kalksteine Randfazies	Brg. A92/B5	4718	3487670	5677210	13,76	-3,58	4,66
Kalksteine Randfazies	Brg. A92/B5	4718	3487670	5677210	7,96	-5,04	1,82
Kalksteine Randfazies	Brg. A92/B4	4718	3487860	5674320	3,98	-4,06	3,58
Kalksteine Randfazies	Brg. A95/B2	4718	3486985	5682735	5,13	-3,96	3,81
Kalksteine Randfazies	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	390,84	-4,38	4,82
Kalksteine Randfazies	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	374,61	-4,11	4,69

Petrologie/Lithologie	Bohrung/Spezies/Profil	TK	R	H	Teufe (m)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	
Kalksteine Randfazies	Brg. Nordenbeck 1	4719	3489260	5680360	82,03	-6,21	2,69	
Fein zonierter Blockcalcit	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	413,43	-8,56	2,68	
Fein zonierter Blockcalcit	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	413,42	-7,71	3,46	
Fein zonierter Blockcalcit	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	405,40	-8,39	3,15	
Fein zonierter Blockcalcit	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	404,78	-8,88	2,57	
Fein zonierter Blockcalcit	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	366,00	-8,27	2,86	
Nicht lumin. Blockcalcit	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	366,00	-9,26	2,46	
Nicht lumin. Blockcalcit	Brg. Braunsen	4620	3503320	5691210	366,00	-8,44	2,83	
Grob zonierter Blockcalcit	Brg. A95/B2	4718	3486985	5682735	5,12	-6,16	-4,22	
Grob zonierter Blockcalcit	Brg. EAU/B6	4718	3487920	5679000	9,67	-7,18	-8,17	
Grob zonierter Blockcalcit	Korbacher Spalte	4719	3491760	5680800		-7,37	-4,80	
Grob zonierter Blockcalcit	Korbacher Spalte	4719	3491760	5680800		-7,44	-5,66	
Brachiopoden	<i>Horridonia horrida</i> (SOWERBY)	5720	3510200	5567950		-2,21	4,26	
Brachiopoden	<i>Horridonia horrida</i> (SOWERBY)	5720	3510200	5567950		-2,45	2,97	
Brachiopoden	<i>Horridonia horrida</i> (SOWERBY)	5720	3510150	5567920		-1,86	3,20	
Brachiopoden	<i>Horridonia horrida</i> (SOWERBY)	4725	3565640	5567600		-3,67	2,47	
Brachiopoden	<i>Stenocisma schlotheimi</i> (BUCH)	5720	3508700	5569100		-0,46	5,20	
Brachiopoden	<i>Stenocisma humbletonensis</i> (HOWSE)	4925	3560760	5656660		-2,24	2,71	
Brachiopoden	<i>Craspedalosa lamellosa</i> (GEINITZ)	4719	3491900	5675660		-3,23	3,74	
Brachiopoden	<i>Strophalosia morrisiana</i> (KING)	5720	3508700	5569100		-4,25	0,24	
Brachiopoden	<i>Strophalosia</i> sp.	Erzberg bei Pößneck, Thüringen					-2,90	5,05
Brachiopoden	<i>Strophalosia</i> sp.	Erzberg bei Pößneck, Thüringen					-3,18	5,63
Brachiopoden	<i>Dielasma elongata</i> (SCHLOTH.)	Tunstall Hills, England					-4,70	4,42
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	Nullpunkt-Nord (NPN)	-3,45	4,70	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	Nullpunkt-Nord (NPN)	-3,83	3,96	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	1,5 m über NPN	-2,09	5,17	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	3 m über NPN	-2,21	5,08	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	4,5 m über NPN	-2,36	4,85	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	6 m über NPN	-3,19	3,60	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	7,5 m über NPN	-2,30	4,02	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	9 m über NPN	-3,45	2,84	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	10,5 m über NPN	-3,14	3,20	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	12 m über NPN	-2,74	2,48	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	13,5 m über NPN	-4,48	1,31	
Korbacher Spalte	Vertikal-Profil	4719	3491760	5680800	14,5 m über NPN	-6,34	-6,77	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Norden	4719	3491760	5680800	3 m nördlich NPN	-1,86	5,38	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Norden	4719	3491760	5680800	6 m nördlich NPN	-1,13	5,77	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Norden	4719	3491760	5680800	9 m nördlich NPN	-1,17	5,98	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Norden	4719	3491760	5680800	15 m nördlich NPN	-1,45	5,66	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Süden	4719	3491760	5680800	Nullpunkt-Süd (NPS)	-4,19	4,14	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Süden	4719	3491760	5680800	3 m südlich NPS	-1,58	5,75	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Süden	4719	3491760	5680800	5,8 m südlich NPS	-1,32	5,85	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Süden	4719	3491760	5680800	9,5 m südlich NPS	-1,70	5,79	
Korbacher Spalte	Horizontal-Profil, Süden	4719	3491760	5680800	14,5 m südlich NPS	-1,40	5,69	
Korbacher Spalte	Spaltenmaterial	4719	3491760	5680800	Probe 1	-2,23	2,31	
Korbacher Spalte	Spaltenmaterial	4719	3491760	5680800	Probe 2	-5,28	-1,73	

* Analysenwert aus Rebelle (1986)

Sven Bökenschmidt¹, Andreas Braun², Heiner Heggemann³ & Heinrich Zankl¹

Oberpermische Spaltensedimente bei Dorfitter südlich von Korbach und ihre Beziehungen zur Fossilagerstätte Korbacher Spalte

Kurzfassung

Südlich von Korbach konnte bei Dorfitter ein gut erschlossenes Straßenprofil mit einer Abfolge von Zechsteinsedimenten der Oberen Werra-Folge (z1) bearbeitet werden. Über eine Länge von etwa 60 m sind der Randkalk und der Obere Werra-Ton aufgeschlossen. Innerhalb des Randkalkes befindet sich ein Spaltensystem, das mit gelben karbonatischen Schluffsteinen gefüllt ist. Aus den Sedimenten der Spaltenfüllung konnten Knochenfragmente geborgen werden, die mit den Knochenfunden aus der etwa 2,5 km entfernt liegenden Fossilagerstätte Korbacher Spalte vergleichbar sind. In Korbach wurde eine Vergesellschaftung

oberpermischer, terrestrischer Saurier bekannt.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Spalten mit einem oberpermzeitlichen Sediment gefüllt sind und somit neben der Korbacher Spalte ein weiteres Spaltensystem mit erhaltenen Knochenresten aus dieser Zeit darstellen.

Petrographisch sehr ähnliche Sedimente bilden den Grenzhorizont zwischen dem Randkalk und dem Oberen Werra-Ton. Dieser Horizont ist im Profil Dorfitter durch einen gelben karbonatischen Schluffstein markiert, der nicht nur hier ausgebildet ist, sondern auch in einer Bohrung des Hessischen Landesamtes

für Bodenforschung (A/99-BK1 Korbacher Spalte) beobachtet werden konnte. Diese Grenzlage repräsentiert vermutlich einen Verwitterungshorizont, der nach der Regression des Zechsteinmeeres in der Werra-Folge auf der damaligen Landoberfläche entstanden ist. Die Sedimente der Spaltenfüllungen bei Korbach und Dorfitter sind die Umlagerungsprodukte aus diesem Horizont. Damit ist die Zeit der Entstehung der Korbacher Spalte und der Spaltenfüllungen von Dorfitter wahrscheinlich enger begrenzt und auf den Zeitraum nach Ablagerung des Randkalkes und vor Ablagerung des Oberen Werra-Tones festzulegen.

Abstract

Near Dorfitter, 2,5 km south of Korbach, sedimentary rocks of the lower Zechstein (Werra Formation, Upper Permian) are preserved in a new roadcut-section. The 60 m long section traverses marine carbonates of the Randkalk (A1Ca) and an approximately 40 cm thick carbonaceous yellow siltstone representing the transition to the overlying red claystone of the Upper Werra Clay (T1r). Within the carbonates of the Randkalk, fissures filled with a yellowish carbonaceous siltstone were found. From these sediments bone-fragments could be extracted and were correlated with the assemblage

of bones of terrestrial tetrapods from the fossil-bearing fissure exposed in a limestone quarry south of Korbach (Korbacher Spalte).

Our investigations indicate that the fissures and their sediment filling must be of Upper Permian age. This means that beside the fossil-bearing fissure of Korbach we found a second place in this region with Upper Permian fossil-bearing fissures including bone-fragments of terrestrial tetrapods.

The boundary between the Randkalk and the Upper Werra Clay is marked by a yellow carbonaceous siltstone which is very similar to the

sediment filling of the fissures. We observed this sediment again in the same stratigraphic position in the core A/99-BK1 Korbacher Spalte drilled by the Geological Survey of Hesse. This layer can be interpreted as the former land surface exposed after the regression of the Zechstein 1 sea. In this case the fissure filling must be the product of erosion and transportation of this layer. Therefore the age of the fissures must probably be older than the overlying red Upper Werra Clay (T1r) and younger than the subjacent Randkalk (A1Ca).

¹ Dipl.-Geol. S. Bökenschmidt & Prof. Dr. H. Zankl, Geologisches Institut der Philipps-Universität Marburg, Hans-Meerwein-Str., 35043 Marburg;

² Dr. A. Braun, Institut für Paläontologie der Universität Bonn, Nussallee 8, 53115 Bonn;

³ Dr. H. Heggemann, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Leberberg 9, 65193 Wiesbaden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	20
2. Geologische Situation	20
3. Profil von Dorffitter	23
3.1 Randkalk (A1Ca)	23
3.2 Spaltenfüllungen	24
3.2.1 Fossilführung	26
3.3 Grenzbereich Randkalk / Oberer Werra-Ton (A1Ca / T1r)	27
3.4 Oberer Werra-Ton (T1r)	27
3.5 Tektonik	28
4. Vergleich mit der Spaltenfüllung der Fossilagerstätte Korbacher Spalte	29
5. Die Bohrung A/99-BK1 Korbacher Spalte	29
6. Schlussfolgerungen	31
7. Schriftenverzeichnis	31

1. Einleitung

Am Südhang des Knappenberges, nordwestlich von Dorffitter, befindet sich ein frisches Straßenprofil, das vom Ortsausgangsschild über etwa 60 m nach N 30 Grad E aufgeschlossen ist (R 34 91 790, H 56 78 320; Abb. 1). Der Straßenanschnitt zeigt an der Basis der anstehenden Schichtenfolge die Kalksteine des Randkalkes. Bei etwa 55 m Profillänge ist die Grenze zum Oberen Werra-Ton aufgeschlossen, der den Randkalk mit einer Erosionsdiskordanz überlagert. Der Bereich des Randkalkes ist von mehreren engen Spalten durchzogen, die mit einem gelben karbonatischen Schluffstein gefüllt sind. Bei der Profilaufnahme konnten in den Spaltenfüllungen kleine Knochensplinter gefunden werden. Aufgrund der Nähe dieses Fundpunktes zur Korbacher Spalte (Luftlinie etwa 2,5 km, Abb. 1) und dem gleichen stratigraphischen Niveau, in dem sich die mit Sediment gefüllten Spalten befinden, wurde schon bei der Profilaufnahme vermutet, dass es sich bei den Spalten und deren Sedimentfüllung im Randkalk von Dorffitter ebenfalls um oberpermzeit-

liche Bildungen handelt, in denen Knochenfragmente der damals lebenden Therapsiden, Archosauria und Pareiasauria konserviert wurden. Weitere Untersuchungen am Sedimentmaterial der Spalten und den gefundenen Knochensplintern haben diese Vermutung bestätigt.

Mit dieser Publikation möchten wir den neuen Fundpunkt eines Spaltensystems mit Knochenfunden aus dem Oberperm bei Dorffitter, südlich von Korbach, vorstellen und erste Ergebnisse zur Petrographie der Sedimentfüllung sowie zu den Knochenfunden darstellen.

Dabei nehmen wir auch Bezug auf die bisherigen Ergebnisse zur Geologie der Korbacher Spalte (Kulick 1997, Kulick & Paul 1987, Sues & Boy 1988, Sues & Munk 1996, Becker & Zeeh 1999a, 1999b) und zu einer im Sommer 1999 abgeteufte Bohrung des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung (A/99-BK1 Korbacher Spalte), die etwa 300 m südwestlich der Korbacher Spalte angesetzt war.

2. Geologische Situation

Das hier beschriebene Profil befindet sich in Vöhl-Dorffitter zwischen den geologischen Großeinheiten des nordwestlichen Kellerwaldes und des Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges im Bereich der Enscholle, die im Südwesten der Waldecker Tafel liegt. Während des Oberperms war hier eine Meeresbucht, die Korbacher Bucht, entstanden, in der sich die Sedimente des Zechsteins diskordant über das gefaltete Paläozoikum des Variszischen Gebirges abgelagert hatten. Die flache Bucht erstreckte sich von Korbach in süd-

westlicher Richtung bis nach Frankenberg, wo sie von der Waldecker Schwelle begrenzt wurde.

Richter-Bernburg (1950, 1955), Kulick & Paul (1987) und Kulick (1997) haben die Zechsteinsedimente im Raum Korbach detailliert beschrieben und mit der Zechsteinstratigraphie der Hessischen Senke bzw. des Norddeutschen Beckens korreliert. Größte Verbreitung im Korbacher Raum haben die Werra-Folge (z1) und die Leine-Folge (z3), sowie die jüngeren Zechsteinfolgen des Bröckelschiefers (Grenzsannde), während die Sedimente

der Staßfurt- (z2) und der Aller- bis Friesland-Folge (z4-z6) aufgrund ihrer reduzierten Mächtigkeiten nur geringe Ausstrichbreiten haben (Abb. 1).

Bei Dorfitter ist in vielen ehemaligen bzw. heute noch genutzten Steinbrüchen besonders die Werra-Folge und ihre diskordante Auflage auf die gefalteten Tonschiefer und Grauwacken-Serien des Unterkarbons aufgeschlos-

sen. Das nachfolgend beschriebene Profil Dorfitter befindet sich am Knappenberg, dessen Südhang sich nach der geologischen Karte, GK 25 Blatt 4719 Korbach (Kulick 1997), aus den Sedimenten des Unterkarbons (am Hangfuß) und des Zechsteins (Werra-Folge z1 bis Leine-Folge z3) aufbaut (Abb. 1).

Das Zechsteinmeer überflutete eine Landschaft, in der

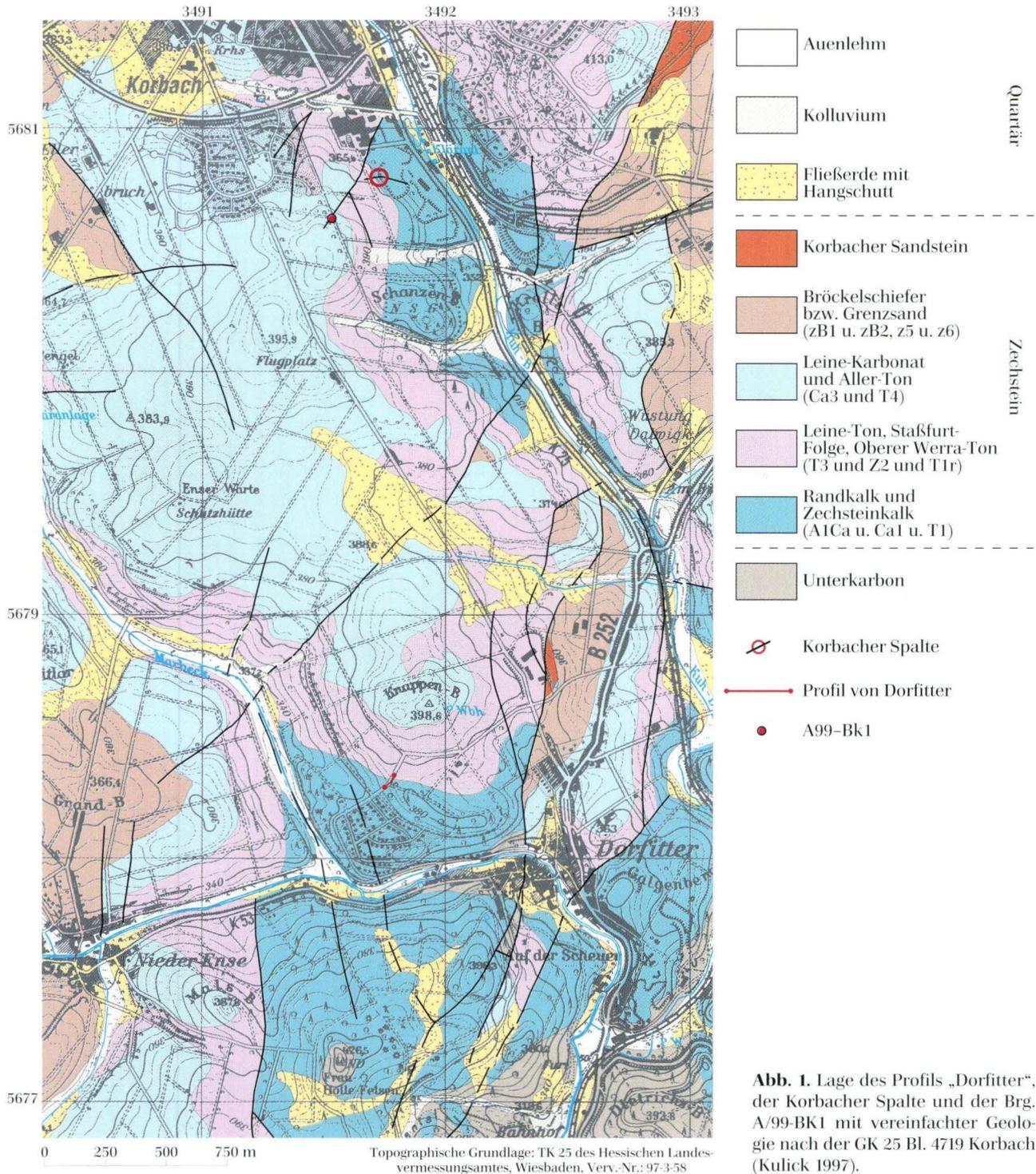


Abb. 1. Lage des Profils „Dorfitter“, der Korbacher Spalte und der Brg. A/99-BK1 mit vereinfachter Geologie nach der GK 25 Bl. 4719 Korbach (Kulick 1997).

sich ein Relief ausgebildet hatte, das dem Relief der heutigen Mittelgebirge ähnlich war (Kulick 1997). Daher wechseln gerade im Bereich der unteren Werra-Folge, dem Kupferschiefer (T1) und dem Zechsteinkalk (Ca1), die Lithofaziestypen der abgelagerten Sedimente auf engem Raum. Über dem Unterkarbon befindet sich die Zechstein-Transgressionsfläche, mit Basisbrekzien und im Bereich des damaligen Küstensaumes, wie z. B. am Eisenberg westlich von Korbach, mit Konglomeraten eines Brandungsschuttes. Darüber sind je nach morphologischer Situation in Schwellenpositionen fossilreiche *Productus*-Kalke abgelagert, die wiederum von der Randfazies des Kupferschiefers, bzw. des Kupfermergels überlagert werden. In Muldenpositionen konnten sich infolge der ruhigeren Ablagerungsbedingungen laminierte graue Mergel absetzen, die in den zentralen, tieferen Bereichen der Korbacher Bucht an der Basis in Schwarzschiefer der Kupferschiefer-Fazies übergehen.

Innerhalb des Zechsteinkalkes (Ca1) sind die Mineralisationshorizonte der „Roten Fäule“ sowie eine Kupfermineralisation ausgebildet (Kulick et al. 1984). Die Kalksteine und Mergel des Zechsteinkalkes werden vom Randkalk (A1Ca) überlagert, einem bis zu 100 m mächtigen oolithischen Kalk- und Dolomitgestein

Nach Ablagerung des Randkalkes erfolgte eine Regression des Zechsteinmeeres, bei der die Randbereiche des Meeresraumes zur Landoberfläche wurden. Kulick (1991) beschreibt, dass sich auf dieser Landoberfläche Verschlottungen, Bodenbildungen und Anreicherungen von Manganerz gebildet haben.

Es bildete sich nachfolgend ein Sabkha-Milieu aus, in dem vorwiegend rote Tone, Schluffe und Sande des Obe-

ren Werra-Tons zur Ablagerung kamen. Der darauf folgende zweite Sedimentationszyklus des Zechsteins (z2, Staßfurt-Folge) ist im Raum Korbach mit dem Unteren Staßfurt-Ton (T2), dem geringmächtigen Staßfurt-Karbonat (Ca2) und dem Oberen Staßfurt-Ton (T2r) ausgebildet.

Ebenso ist die Leine-Folge (z3) mit Unterem Leine-Ton (T3), Leine-Karbonat (Ca3) und Oberem Leine-Ton (T3r) vorhanden. Der Übergang zur Aller-Folge (z4) ist fließend und nicht eindeutig festzulegen. Die Aller-Folge wird jedoch nur durch einen Aller-Ton (T4) vertreten (Kulick 1997). Die Grenzsande (zs), als randfazielle Bildungen des Bröckelschiefers interpretiert (Kulick 1997), sind auf der geologischen Karte von Korbach mit ihrem sandig-konglomeratischen Sedimenten auf weiten Flächen auskartiert worden und bilden den jüngsten Abschnitt des Zechsteins.

Durch die mesozoisch-känozoische Bruchtektonik sind die Gesteine der Waldecker Tafel und des Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges in einzelne Schollen zerteilt worden. Die Extensionsbewegungen führten zu großen Nord-Süd streichenden Abschiebungen, zu denen in der Umgebung von Korbach vor allem der Eisenberger Abbruch und der Westheimer Abbruch gehören (Kulick 1997). Zwischen diesen übergeordneten Bruchstrukturen liegt die Ense-Scholle, auf der sich die Profilkalokität Dorffitter befindet. Neben den großen Störungssystemen sind viele untergeordnete Störungen mit Nord-Süd- bzw. Nordost-Südwest-Verlauf ausgebildet. Entlang der Störungen können die Sedimente des Zechsteins mit bis zu 30 Grad verstellt sein (Kulick 1997).

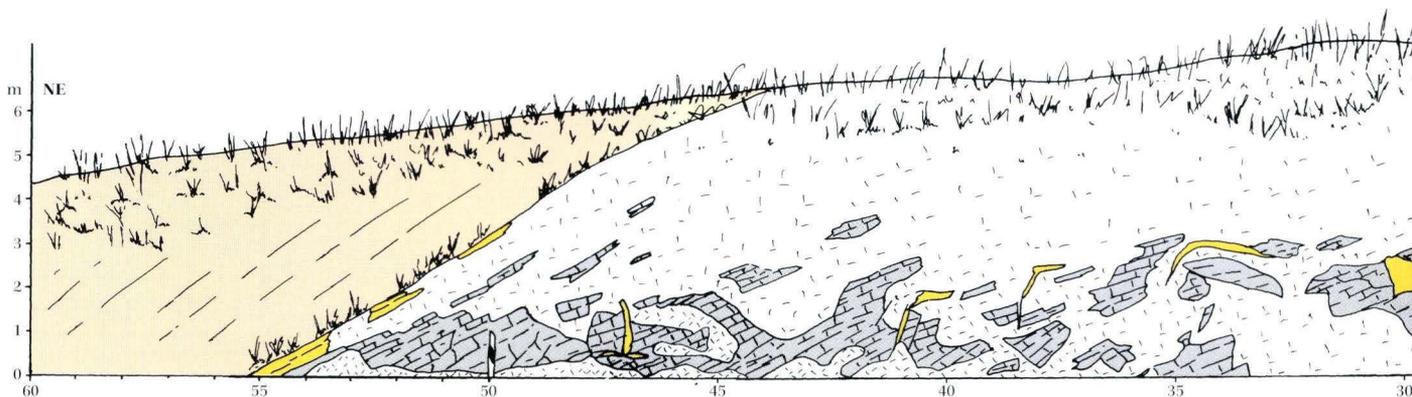


Abb. 2. Profilskizze, Straßenprofil am nordöstlichen Ortsausgang von Dorffitter.

3. Profil von Dorfitter

Das Straßenprofil wurde im Rahmen einer Profilbegehung aufgenommen, dabei wurde versucht eine maßstabgetreue Skizze anzufertigen, was aufgrund der z.T. sehr starken Klüftigkeit des Randkalkes und der starken Überdeckung des Anstehenden mit Hangschuttmassen einige Probleme bereitet hat. In dem Profil am Ortsausgang von Dorfitter sind vom Älteren zum Jüngeren folgende geologische Einheiten aufgeschlossen (Abb. 2):

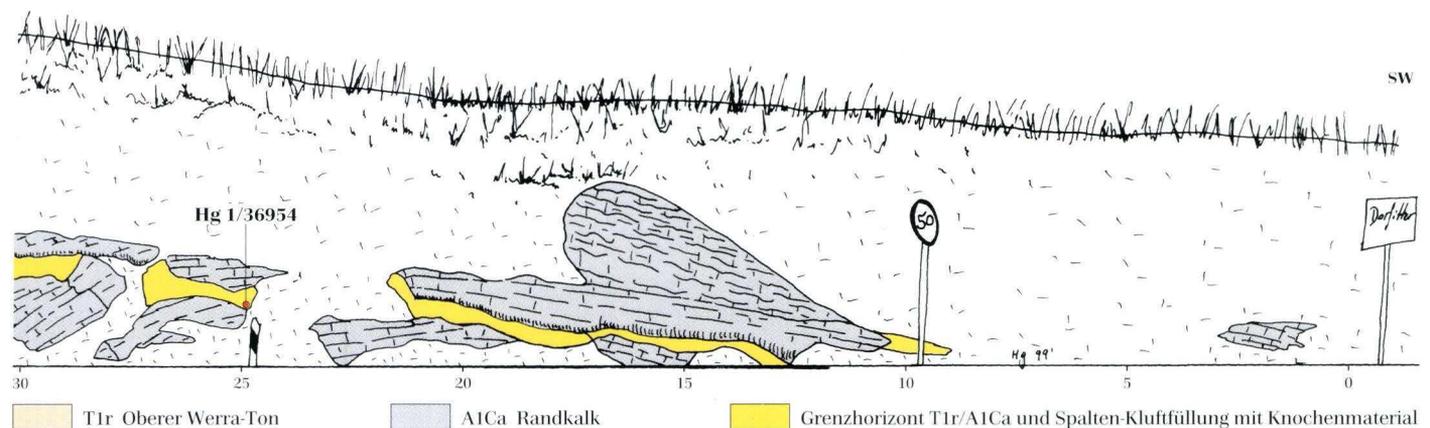
- der Randkalk
- der Grenzbereich zwischen dem Oberen Werra-Ton und dem Randkalk
- der Obere Werra-Ton

Im Bereich des Randkalkes befinden sich mehrere Spalten, die mit einem gelben, z.T. auch graugrünen bis violetten karbonatischen Schluff gefüllt sind. Mit bis zu 20 cm Öffnungsweite sind die Spalten mit ihrer gelben Füllung zwischen Profilmeter 13 bis 31 besonders deutlich zu erkennen. Darin erhaltene Knochensplitter konnten zwischen Profilmeter 25 und 30 an verschiedenen Punkten geborgen werden (Abb. 2). Zwischen Profilmeter 31 und 55 sind nur noch kleinere Klüfte vorhanden, die bis zu 10 cm weit geöffnet sind und eine geringe Menge an Sedimentfüllung enthalten. Zwischen Profilmeter 55 und 56 ist ein gelber Schluffstein aufgeschlossen, der als etwa 40 cm mächtiger Grenzhorizont zwischen dem Randkalk und dem Oberen Werra-Ton eingeschaltet ist. Dieser Schluffstein ist petrographisch vergleichbar mit der Sedimentfüllung der Spalten. Er liegt mit einer Erosionsdiskordanz auf dem Randkalk und wird konkordant vom Oberen Werra-Ton überlagert.

3.1 Randkalk (A1Ca)

Der Randkalk (A1Ca) ist in der Korbacher Bucht in einer küstennahen Randfazies entwickelt. Sowohl im ehemaligen Steinbruch der Firma Fisseler an der Korbacher Spalte, als auch in dem Profil bei Dorfitter befinden sich die mit Sediment gefüllten Spalten innerhalb der Abfolge des Randkalkes. Die Gesamtmächtigkeit beträgt in der Umgebung von Korbach max. 45 m.

Petrographisch handelt es sich um eine Folge aus sich verzahnenden und wechsellagernden dichten oder oolithischen grauweißen Kalk- und Dolomitsteinen (calcitische Ooid-Pack- bis Grainstones, siehe detaillierte petrographische Beschreibung bei Becker & Zeeh 1999). Aus den oolithischen Kalksteinen sind die Ooide meist diagenetisch herausgelöst, so dass der Kalkstein ein schaumiges Aussehen erhält, woraus sich der für dieses Gestein häufig benutzte Name Schaumkalk ableitet. Die mehrschaligen Kalkooide haben Durchmesser von 0,02–0,5 mm und sind meist in fein- oder groboolithischen Lagen angereichert. Teilweise können Quarzkörner lagenweise eingeschwemmt sein. Der Randkalk weist eine Bankung mit Mächtigkeiten zwischen 2 bis 80 cm auf. Oftmals ist eine deutliche Feinschichtung zu erkennen. In den oolithischen Bereichen lassen sich Schrägschichtunggefüge nachweisen; sie zeigen die aquatische Umlagerung der Ooide während der Sedimentation an. Biodetritruslagen mit den Resten von Zweischalern (*Bakewellia* sp., *Liebea hausmanni* und *Turbonilla* sp.) treten lagenweise auf (Kulick 1997). Es handelt sich bei dem Randkalk um ein Sediment, das in einem hochenergetischen Flachwassermilieu entstanden ist.



3.2 Spaltenfüllungen

Die Spalten bei Dorfitter sind bis zu 20 cm breit und z.T. parallel zur Profilinie über mehrere Meter abgeschlossen (Abb. 2). Die Spalten sind entweder mit einem gelben, karbonatischen Schluffstein oder mit einem rot- bis grauviolett gefärbten tonigen Schluffstein gefüllt.

Der Karbonatanteil des gelben Schluffsteins schwankt zwischen 30 und 65 Vol.-%. Neben Karbonat tritt in geringeren Mengen Quarz, Illit und Kaolinit auf (Abb.3).

Im nichtkarbonatischen Anteil der Sedimente ist Quarz mit einem Anteil zwischen 60 bis 95 Vol.-% das dominierende Mineral. Der Anteil des Tonminerals Illit kann 5 bis 40 Vol.-% des nichtkarbonatischen Sedimentes betragen und Kaolinit ist mit max. 3 Vol.-% vorhanden. In diesem Schluffstein schwimmen Bruchstücke aus z.T. oolithischem Randkalk, die teilweise zu einem braunen Mulm verwittert sind.

Im Dünnschliff zeigen die gelblichen Schluffsteine der Spaltenfüllungen sowohl von Korbach als auch von Dorfitter die gleichen Merkmale wie die unter Kap. 3.3 beschriebenen Sedimente des Grenzhorizontes. Es handelt

sich um dicht gepackte, schlecht gerundete und gut sortierte Quarzkörner im Schluffbereich, die von einer karbonatisch-mergeligen Matrix umgeben werden (Abb. 4, Dünnschlifffoto 2).

Die dunkelbraunen, z.T. oolithischen, aus verwittertem Randkalk bestehenden Bruchstücke treten in den Spaltenfüllungssedimenten häufiger auf, als es im Grenzhorizont der Fall ist. Der Schluffstein der Spaltenfüllung ist mit Calcit verheilten kleinen Klüften durchzogen und durch Mangandendriten gekennzeichnet.

Das seltener auftretende rot- bis grauviolette Füllungssediment enthält mit bis zu 25 Vol.-% deutlich weniger karbonatische Anteile, die Zusammensetzung des nichtkarbonatischen Anteils des Sedimentes ist in diesem Bereich jedoch analog zu den gelben Sedimentfüllungen. Die violette Färbung des Sedimentes ist auf einen erhöhten Hämatit-Anteil zurückzuführen. Im Vergleich zu den gelben Sedimenten enthält die rot- bis grauviolette Spaltenfüllung keine Bruchstücke des Randkalkes. Es könnte sich bei diesem Material um eingespülte ehemalige Bodenhorizonte (?) handeln.

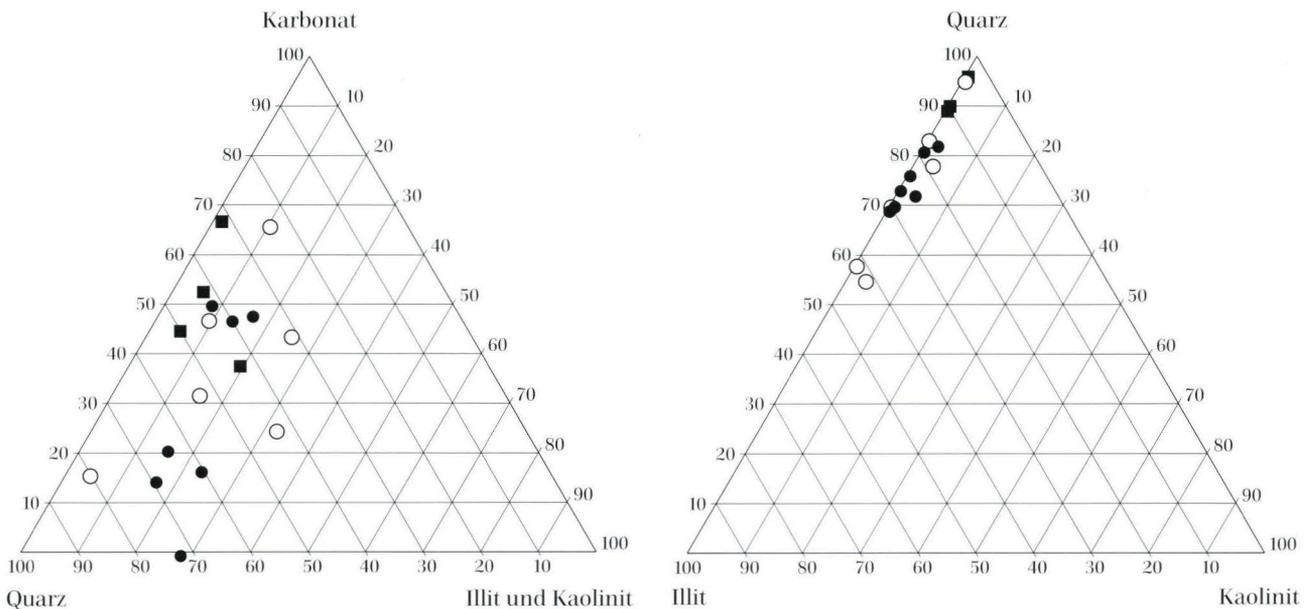
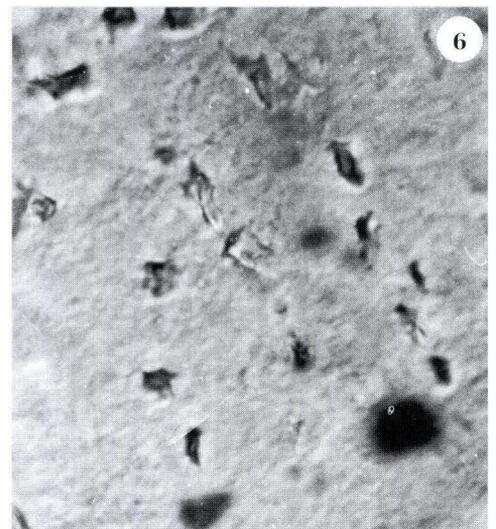
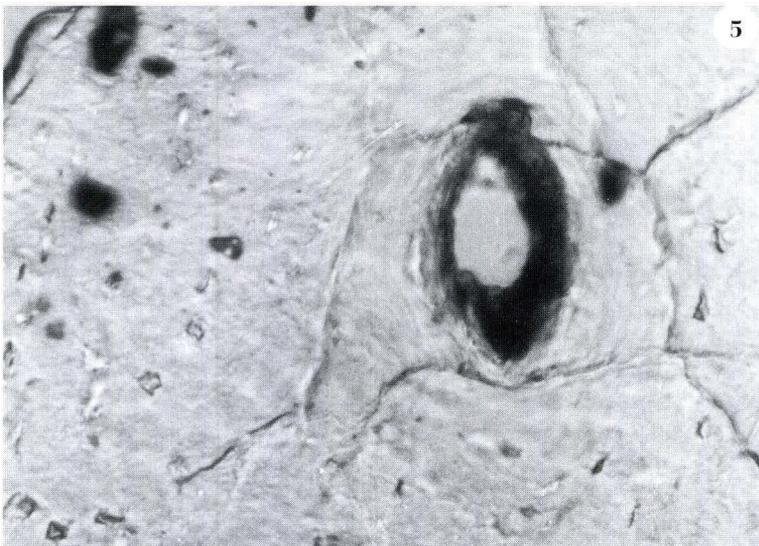
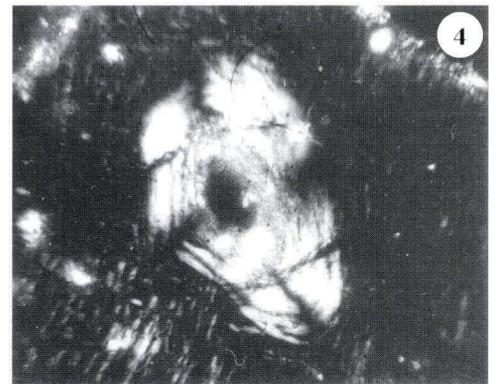
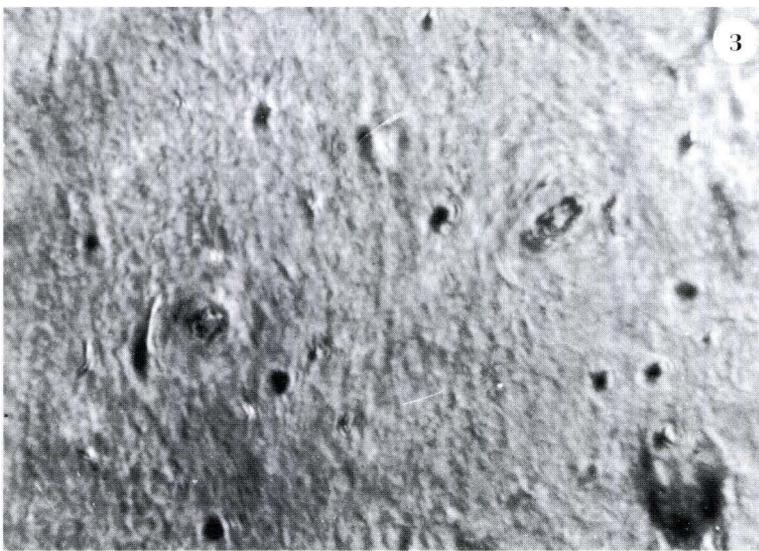
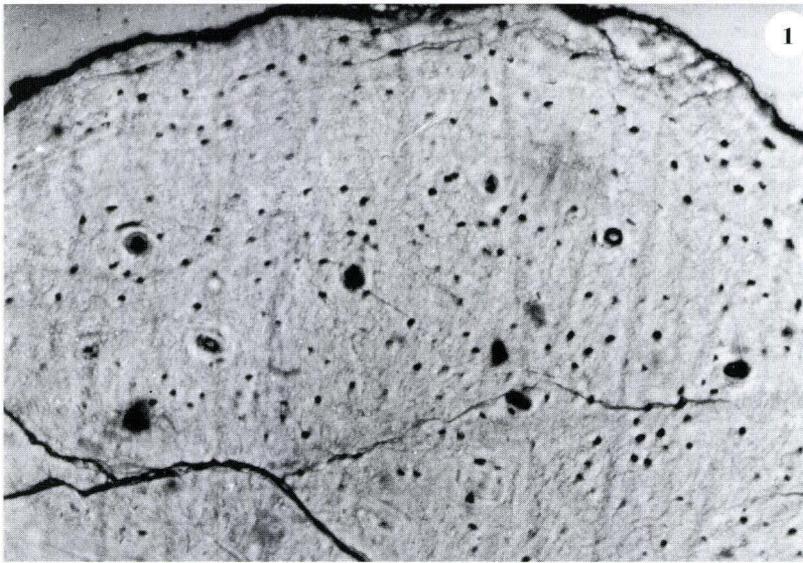


Abb. 3. Diagramme zur mineralogischen Zusammensetzung der Sedimente aus den Spalten und dem Grenzhorizont. a) unter Berücksichtigung des Karbonat-Anteils, b) ohne Berücksichtigung des Karbonatgehaltes. ○ Proben aus den Spalten bei Dorfitter; ■ Proben aus dem Grenzhorizont A1Ca/T1r aus Dorfitter und der Bohrung A/99-BK1, ● Proben aus der Korbacher Spalte.

Tafel 1

Dünnschliff-Aufnahmen von Knochensplintern der Spaltenfüllungen bei Dorfitter.

- 1, 3: Schliff 36954/2: Übersicht (1) und Detail (3): Endocorticaler Bereich fibro-lamellär mit primären Osteonen und zahlreichen, dunkel gefärbten Knochenzellen, äußere Cortex (1, oben) avaskulär mit lamellar-zonarem Bau. Länge des Maßstabsbalkens: 60 µm (1), 20 µm (3)
- 2, 4, 5, 6: Schliff 36954/3. Fibro-lamellärer Knochen mit großlumigeren Gefäßkanälen, möglicherweise sekundären Osteonen. (6): multipolare Knochenzellen, (4): Osteon unter gekreuzten Polarisatoren. Länge des Maßstabsbalkens: 60 µm (2), 32 µm (4,5), 20 µm (6)



3.2.1 Fossilführung

Im Schlämmrückstand aus dem Sediment der Spaltenfüllungen wurden kleine, 2–3 mm im Durchmesser messende Knochensplitter gefunden, die in Dichte, Transparenz und Farbe sehr den Knochenresten aus der Korbacher Spalte gleichen. Winzige Bruch- und Kluftflächen, die die kleinen Splitter durchziehen, sind von feinen bräunlichen Dendriten belegt. Hohlraum-Wände in den Splintern sind von sehr feinem, gelblichen Sediment der Lithologie des umgebenden Sediments besetzt. Um den Nachweis zu führen, dass es sich hier tatsächlich um Knochenmaterial handelt, wurden von diesen Splintern Dünnschliffe angefertigt (Taf. 1; Schliffe hinterlegt im Hessischen Landesamt für Bodenforschung). Einige Stücke sind, z.T. schon unter Binokularvergrößerung sichtbar, von kleinen Kanälen einheitlicher Orientierung durchzogen. An ihnen (als mutmaßlichen Gefäßkanälen) konnte man sich zur weitergehenden Anfertigung orientierter Schliffe orientieren.

Im Ergebnis belegen 1) die für Phosphat charakteristische Doppelbrechung und 2) die Mikrostrukturen in diesen Schliffen unzweifelhaft deren Knochenatur. Mit den Knochenresten in den Sedimenten der Korbacher Spalte besteht auch in der Mikrostruktur Übereinstimmung. Es ist lediglich zu bemerken, dass die hier vorliegenden Reste der neuen Spaltenfüllung histologisch besser erhalten sind, als das bisher untersuchte Knochenmaterial der Korbacher Spalte. Besonders die länglich-bipolaren bis multipolaren Knochenzellen sind bei den neuen Resten besser und deutlicher sichtbar. Sicherlich ist aber auch in der Korbacher Spalte in Zukunft noch

mit besser erhaltenem Material zu rechnen. Die makroskopisch in dünnen winzigen Scherben trüb glasig durchscheinende, dichte Knochensubstanz stimmt ebenfalls mit den sicher permischen Knochenresten der Korbacher Spalte überein und kann als Hinweis darauf gelten, dass es sich hier nicht um jüngerer, quartäres Knochen-Material handelt. Die Schliffe sind allgemein sehr kontrastarm. Eine detaillierte Bestimmung und Zuordnung ist anhand der kleinen Bruchstücke gegenwärtig ebenso wenig wie eine sichere Altersbestimmung durchführbar. Knochenhistologisch kann nur bemerkt werden, dass es sich um primäres Knochengewebe mit primären Osteonen handelt. Sekundärer Knochenumbau, also „erosiv“ entstandene Havers'sche Systeme, ist möglicherweise in Schliff 36954/3 (Taf. 1 b, d, e) zu beobachten. Der größte Teil der Splitter zeigt fibro-lamellaren Feinbau (Taf. 1 a-e), lediglich im corticalen Bereich des Splitter in Taf. 1 a (oberer Bildteil) ist avascularer, lamellar-zonar gebauter Knochen anzutreffen. Knochen-Feinstrukturen wie die hier angetroffenen sind bei Therapsiden verbreitet, aber keineswegs auf diese beschränkt. So kommt die Kombination „fibro-lamellarer Feinbau“ und „zahlreiche primäre Osteone“ vor allem bei höheren Reptilien und bei Säugetieren vor. Bei diesen Gruppen ist auch Knochenumbau, also sekundäre Knochensubstanz in Form Havers'scher Kanäle verbreitet. Lamellar-zonarer Bau des primären Knochengewebes, im vorliegenden Untersuchungsmaterial nur untergeordnet als Teil fibro-lamellären Knochens gefunden, ist dagegen bei den „niederer“ Vertebraten bis einschließlich der niederen Reptilien vorherrschend. (Die hier verwendete histologische Terminologie und die Verbreitungsanga-

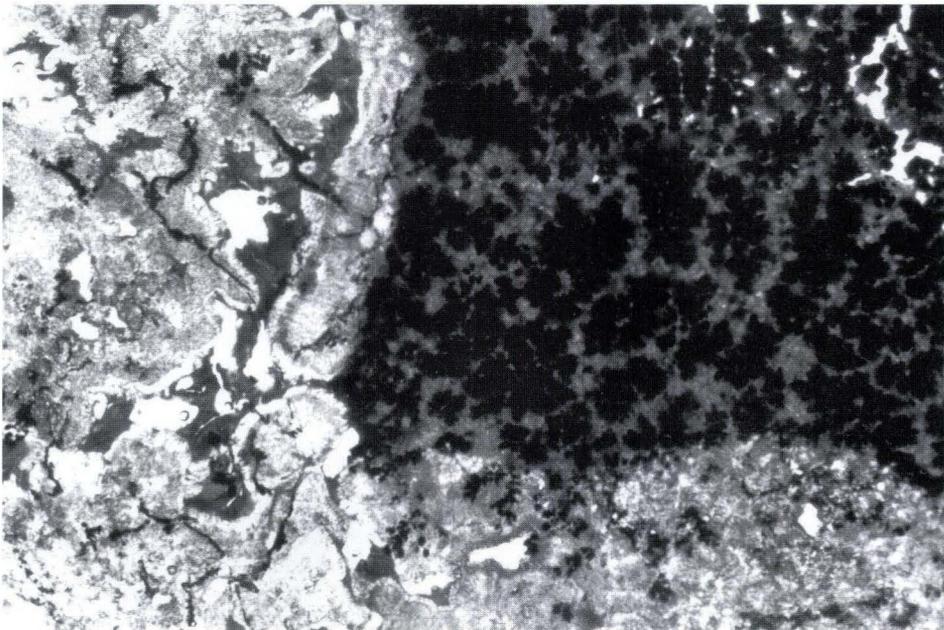


Abb. 4. Spaltenfüllung aus dem Profil Dorffitter: Angeschnitten ist ein Bruchstück (dunkel) des Randkarbonates, ausgefüllt mit schwarzen Mangandendriten. Der Karbonatklast ist in einen rosettenförmigen Karbonatzement (hellgrau) eingebettet, der die karbonatische Grundmasse verdrängt hat. Als weiße Komponenten erscheinen Quarze im Korngrößenbereich Silt. Vergrößerung 20x, Durchlicht.

ben ruhen auf der zusammenfassenden Arbeit von De Ricqlès (1976)). Eine Zugehörigkeit des Splittermaterials zu einer der bis jetzt in Korbach nachgewiesenen Reptil-Gruppen, insbesondere den Therapsiden, ist also auf knochenhistologischer Grundlage gut möglich, kann aber aufgrund der weiteren Verbreitung dieser Knochenstrukturen nicht eindeutig vorgenommen werden. Gezielte vergleichende mikroskopische Untersuchungen an reichem Material mögen hier in Zukunft bessere Auswertungs-Möglichkeiten ergeben.

3.3 Grenzbereich Randkalk / Oberer Werra-Ton (A1Ca/T1r)

Die Kalksteine des Randkalkes werden zwischen Profilmetern 55 und 56 von den roten Ton-, Schluff- und Sandsteinen des Oberen Werra-Tons überlagert. Der Kontakt dieser Einheiten ist ohne Ausbildung einer Winkeldiskordanz aufgeschlossen. Gleichwohl befindet sich zwischen den beiden geologischen Einheiten eine sedimentäre Diskordanz. Im unmittelbaren Grenzbereich ist eine ca. 40 cm mächtige Lage aus gelbem, karbonatischem Feinsand- bis Schluffstein ausgebildet. In dieser Matrix schwimmen einige brekziöse Kalksteine von dunkelbrauner Verwitterungsfarbe mit z.T. mulmiger Textur.

Der Karbonatgehalt der Grenzschicht ist mit 45–70 Vol.-% relativ hoch, es treten sowohl Calcit, als auch Dolomit in der Karbonatphase auf. Der nichtkarbonatische Anteil des Sedimentes besteht größtenteils aus Quarz und nur bis zu max. einem Drittel aus Illit. Kaolinit tritt im Grenzhorizont in Spuren auf (Abb. 3).

Im Dünnschliff ist zu erkennen, dass bei diesem Sediment schlecht gerundete aber nach ihrem Korngrößen-spektrum gut sortierte Quarzkörner in eine karbonatische bzw. mergelige Matrix eingebettet sind. Die Größe der dicht gepackten Quarzkörner liegt im Schluffbereich. Sehr selten treten etwas gröbere und dann gut gerundete Quarzkörner auf (Abb. 5, Dünnschliffoto 1).

Sedimentgefüge sind nicht erkennbar, allerdings wird das gesamte Sediment von Mikroklüften durchzogen, die mit Calcizementen ausgeheilt sind. Häufig sind ebenfalls Mangandendriten im Sediment verbreitet.

Die braun angewitterten brekziösen Karbonatklasten lassen teilweise noch ihr ursprünglich oolithisches Korngefüge erkennen. Aufgrund dieses Gefüges sind die Klaster aus dem im Liegenden angrenzenden Randkalk abzuleiten.

Knochensplitter, wie sie in den Spaltenfüllungen gefunden wurden, konnten im Grenzhorizont A1Ca/T1r bisher nicht nachgewiesen werden.

Der Grenzhorizont stellt eine nach der Regression des Zechsteinmeeres im Werra-Zyklus auf der Landoberfläche gebildete Verwitterungsdecke dar. Wie in Kap. 5 erläutert, findet sich dieser Grenzhorizont ebenfalls in der Bohrung A/99-BK1 Korbacher Spalte wieder (Abb. 6), was auf eine regionale Verbreitung dieser Lage hinweist.

3.4 Oberer Werra-Ton (T1r)

Der Obere Werra-Ton beginnt mit tonigen bis schluffigen Feinsanden, die eine rotbraune Färbung aufweisen. Zum Hangenden hin werden sie violettstichig, dunkel-

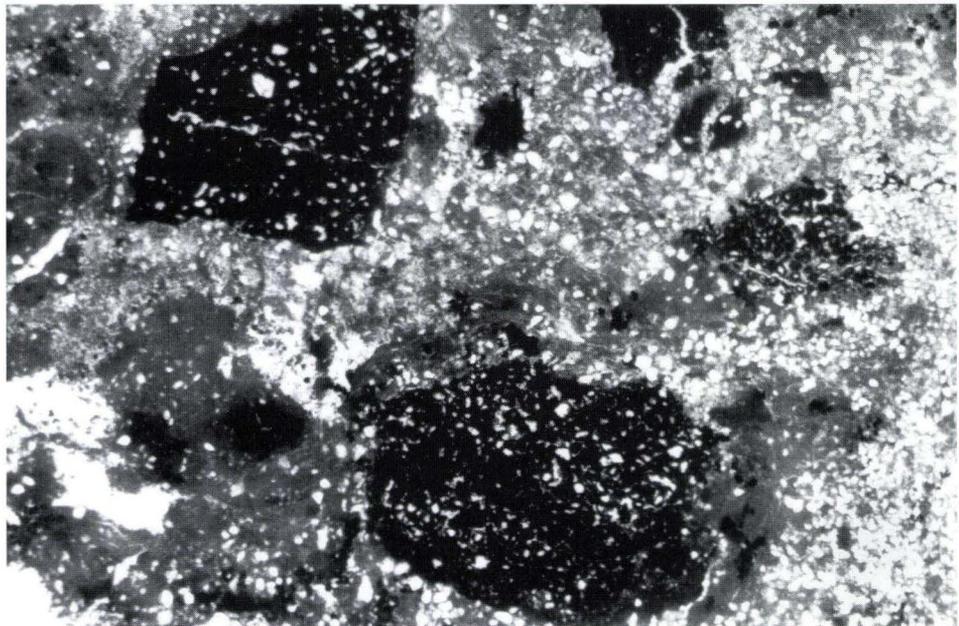


Abb. 5. Grenzhorizont aus dem Profil Dorffitter: Karbonatisch gebundene Quarzkörner im Silt-Korngrößenbereich (hellgrau bis weiß) und Bruchstücke des Randkarbonates (dunkelgrau) mit Eisen-/Manganreicher Matrix sind in einen Karbonatzement eingebettet. Vergrößerung 10x, Durchlicht.

braun, rot und stärker tonig. Eingeschaltet sind schmutzig graue, zum Teil bituminöse bis zu 10 cm mächtige Karbonatbänke bzw. dünne, rot gefärbte Sandsteinlagen. Die klastischen Komponenten bestehen aus detritischem Quarz im Siltkornbereich, das Bindemittel kann bis zu 50 % karbonatisch ausgebildet sein. Das Karbonat korrodiert und verdrängt die klastischen Bestandteile. Die färbende Substanz im Bindemittel ist Eisenoxid (Goethit). Die Sedimente erweisen sich im Profil als fossilfrei.

In der Bohrung A/99 BK 1 Korbacher Spalte (Kap. 5) folgen eingelagert in den Oberen Werra-Ton mehrere Meter mächtige Anhydrite des Oberen Werra-Anhydrites (A1r).

3.5 Tektonik

Im Randkalk des Profiles Dorffitter wurden Kluftflächen eingemessen (Abb. 7). Die Maxima der Kluftscharen bilden Winkel zwischen 70 und 90 Grad miteinander. Nach Bock (1980) sind diese quasi-orthogonalen Kluftgefüge typisch für gut gebankte Sedimentgesteine des ungefalteten Deckgebirges.



Abb. 6. Grenzhorizont zwischen T1r und A1Ca in der Bohrung A/99-BK1.

Es überwiegen die Streichrichtungen Nordost-Südwest sowie Nordwest-Südost. Die Raumlagen der Spalten, in denen sich der gelbe karbonatische Schluffstein befindet, sind in der Abb. 7 als Rauten dargestellt: Es zeigt sich, dass hier nur eine Streichrichtung, Nordost-Südwest, mit einem Durchschnittswert von 41 Grad vorherrscht. Daraus lässt sich folgern, dass die Spaltenfüllungen im Profil Dorffitter vorwiegend in ein System paralleler ausgerichtet Spalten eingetragen worden sind. Messungen entlang der aufgeschlossenen Spalten mit Sedimentfüllung ergaben für diese eine durchschnittliche Raumlage von 139/77 bzw. 301/72 (Einfallrichtung/Einfallwinkel).

Bei Messungen an den Wänden der Korbacher Spalte konnten im Bereich der Steinbruchwand ganz ähnliche Streichrichtungen beobachtet werden, die mit durchschnittlich 72 Grad eine Fortsetzung der Spalte in Richtung Nordost-Südwest anzeigen. Der Verlauf der Spalte ändert sich in Streichrichtung jedoch bis hin zu einer Nordwest-Südost-Ausrichtung (Abb. 1).

Becker et al. (1999a, 1999b) hatten aufgrund der tektonischen Verstellung der Gesteinsabschnitte entlang der Korbacher Spalte und dem von ihnen dargelegten Einfluss meteorischer Wässer bei der Diagenese und der damit verbundenen Bildung von Calzimenten im engen Umfeld der Spaltenwände (Becker & Zeeh 1999a, 1999b) gefolgert, dass mit einer tektonischen Dehnung und nachfolgenden Spalten- bzw. Fugenbildung im Randkalk auch die meteorischen Wässer in die entstandenen Hohlräume eindringen konnten und diese erweitert haben.

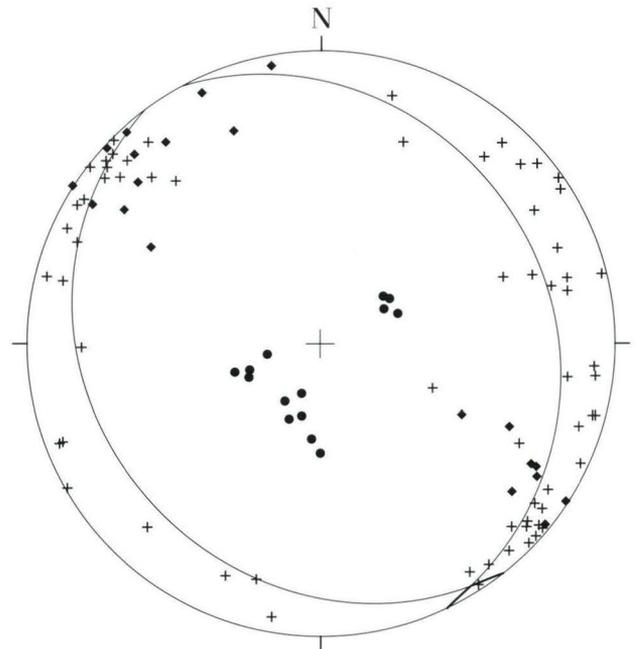


Abb. 7. Kluft- und Schichtflächen-Pole aus dem Bereich des Randkalkes im Profil Dorffitter im Schmid'schen Netz.

Wir gehen davon aus, dass gleichzeitig mit den meteorischen Wässern auch das Sedimentmaterial in die Spalten bei Korbach und Dorfitter eingetragen wurde. Somit sind die Spaltenhöhlräume durch tektonische Dehnungsbewegungen und einer gleichzeitig einsetzenden Verkarstung entstanden. Die Ausrichtung der Spalten bei Dorfitter in eine Richtung (Nordost-Südwest) macht deutlich, dass diese Kluftchar von meteorischen Wässern als Abflussweg (?) genutzt worden ist und so das Sediment in die entstandenen Hohlräume transportiert werden konnte.

Die Abbildung 7 zeigt, dass sich das Einfallen der Schichtung innerhalb des Profils Dorfitter verändert. Während die Schichtung zwischen Profilmeter 0 bis etwa 20 mit bis zu 20 Grad nach Südwesten einfällt, ändert sich die Einfallrichtung der Schichten ab 25 m in nordöstliche Richtung bei Einfallswerten von 15 bis 27 Grad. Ob die unterschiedliche Lagerung der Schichten jedoch mit einer an einer Störung angelegten Verstellung oder aber einer flexurartigen Verbiegung erfolgte, konnte nicht nachgewiesen werden, da der mögliche Bereich einer Störung oder Umbiegung von mächtigem Hangschutt überdeckt wird.

4. Vergleich mit der Spaltenfüllung der Fossilagerstätte Korbacher Spalte

Die Fossilagerstätte Korbacher Spalte zeigt eine mit Sediment gefüllte Spalte, die im Kalksteinbruch Fisseler südwestlich von Korbach aufgeschlossen ist. Die Spalte befindet sich im Randkalk und ist mit einer Tiefe von etwa 15 m und einer Breite von etwa 3–4 m am Top und 0,5 m an der Basis in der westlichen Steinbruchwand aufgeschlossen. Die Sedimente der Spalte enthalten eine Vielzahl von Knochenfragmenten, die einer Vergesellschaftung terrestrischer Tetrapoden (*Cynodontia*, *Dicynodontia*), Archosauromorphen und Pareiasaurier aus dem Oberperm angehören (Sues & Boy 1988, Sues & Munk 1996).

Die Entstehung der Spalte wird bisher durch ein Zusammenspiel von tektonischen Bewegungen und nachfolgenden Lösungsprozessen im Gestein gesehen (Sues & Munk 1996, Becker et al. 1999). Bisher galt die Spalte und ihre oberpermische Sedimentfüllung als einzigartig. Dagegen sind Karstspalten bzw. -höhlräume mit pleistozänen Füllungen häufiger im Zechstein beschrieben worden.

Durch den Fund des hier beschriebenen Profils Dorfitter kann man nun davon ausgehen, dass sich mehrere Spalten bzw. ein ganzes Spaltensystem im Randkalk in der Umgebung von Korbach befinden müssen.

Im Vergleich mit der Korbacher Spalte ist festzustellen, dass die Petrographie der Spaltenfüllung bei Dorfitter nicht nur makroskopisch der Sedimentfüllung der Korbacher Spalte vergleichbar ist, sondern dass auch durch die petrographischen Analysen eine Korrelation dieser Sedimente möglich ist.

Ähnlich wie bei Dorfitter schwankt der Karbonatgehalt in den gelblichen Bereichen der Korbacher Spaltenfüllung ebenfalls stark, ist aber mit bis zu 50 Vol.-% etwas geringer. (Anmerkung: Bisher konnten nur Proben aus dem unteren Teil der Spalte analysiert werden. Nach mündlicher Mitteilung von W. Munk war der Karbonatgehalt im oberen Teil der Spalte jedoch höher.) Die nichtkarbonatischen Anteile der Sedimentfüllung der Korbacher Spalte bestehen aus 60 bis 90 Vol.-% Quarz, bis zu 40 Vol.-% Illit und bis max. 3 Vol.-% Kaolinit (Abb. 3).

Die grau-violetten Bereiche der Korbacher Spalte enthalten mit bis zu 30 Vol.-% weniger Karbonat als die gelben Schluffsteine. Die grau-violette Färbung entsteht auch hier durch in Spuren verteilten Hämatit.

Im Dünnschliff bestehen sowohl die Füllungssedimente der Korbacher Spalte als auch die Spaltenfüllungen und das Sediment des Grenzhorizontes von Dorfitter aus einem gut sortierten Quarzschluffstein. Das Bindemittel ist bei allen Sedimenten karbonatisch bis mergelig. Alle Sedimente enthalten Bruchstücke aus verwittertem, seltener frischem Randkalk mit teilweise erkennbaren oolithischen Strukturen. Auch die diagenetischen Gefüge sind in allen Vorkommen gleich, es treten mit Calcizement ausgeheilte Klüfte und Mangandendriten auf. Die verschiedenen Sedimente unterscheiden sich jedoch in ihrem Fossilgehalt, so treten im Gegensatz zu der Spaltenfüllung der Korbacher Spalte in Dorfitter offensichtlich nur sehr wenige und sehr viel kleinere Knochensplinter auf.

5. Die Bohrung A/99-BK1 Korbacher Spalte

Mit Hilfe einer Forschungsbohrung sollte festgestellt werden, welches lithostratigraphische Zechsteinprofil

sich in der nächsten Umgebung der Korbacher Spalte befindet. Besonders wichtig war dabei zu erfahren, von

welcher lithologischen Einheit die Spalte, die im Randkalk der Werra-Folge (z1) im Bereich des Steinbruches Fisseler aufgeschlossen ist, abgedeckt wird. Dies würde einen wichtigen Hinweis auf das genaue Entstehungsalter der Spalte geben bzw. den Zeitraum einengen, zu dem die Spalte und deren Füllung von jüngeren Sedimenten abgedeckt wurde. Bisher wurde von Kulick & Kowalczyk (1987) vermutet, dass der Obere Werra-Ton des z1 die Spalte bedeckt. Dagegen erläutern Sues & Munk (1996), dass sie etwas später zeitgleich mit der Ablagerung des Oberen Werra-Tons entstanden oder aber einem Zeitraum zuzuordnen sei, der bis zur Ablagerung des Leine-Karbonates (Ca3) gedauert hätte, was bedeuten würde, dass bei Korbach die Staßfurt-Folge (z2) gänzlich fehlen und somit die Leine-Folge (z3) diskordant auf den Sedimenten der Werra-Folge (z1) liegen könnte.

Die die Karbonate der Werra-Folge überlagernden Sedimente sind im Gelände westlich der Steinbruchwand nicht mehr aufgeschlossen bzw. von quartären Ablagerungen überdeckt. Kulick (1997) hatte schon in seiner geologischen Karte von Blatt Korbach eine normale Zechsteinabfolge in der Umgebung der Spalte kartiert. Erste Lesesteine, die direkte Aussagen auf das im Untergrund anstehende Gestein zulassen, sind etwa 300 m südwestlich der Korbacher Spalte zu finden und sie gehören dem Leine-Karbonat (z3) an. Hier wurde der Bohrpunkt angesetzt, um ein Zechsteinprofil in unmittelbarer Nähe der Spalte vom Leine-Karbonat bis an die Zechsteinbasis durchteufen zu können.

Das erbohrte lithologische Profil lieferte wesentliche Hinweise auf die im Bereich der Spalte abgelagerten Lithofaziesseinheiten.

Eine Kernhälfte der Bohrung wird derzeit am Geologischen Institut der Universität Marburg (H. Zankl, S. Bökenschmidt) sedimentologisch und sedimentpetrographisch untersucht. Als wichtigste Ergebnisse der Bohrung sind bereits jetzt zu nennen:

1. Die Bohrung setzte unter 0,85 m Quartärbedeckung vermutlich in den untersten Lagen des Leine-Ton- und Sandsteins (T3, S3) an. Nach der geologischen Karte sollte eigentlich das Leine-Karbonat anstehen. Dies wird nun etwa 100 m weiter südwestlich auf einer Bergkuppe vermutet, zumal Hangschutt mit Kalken des Ca3 in der quartärzeitlichen Fließerde der Bohrung angetroffen wurde. Im Liegenden des Leine-Ton- und Sandsteins konnte ein vollständiges Zechsteinprofil erbohrt werden: Die Sedimente der Staßfurt-Folge umfassen den Oberen Staßfurt-Ton (T2r), das Staßfurt-Karbonat (Ca2) und den Staßfurt Ton- und Sandstein (T2, S2), darunter folgen die Sedimente der Werra-Folge mit Oberem Werra-Anhydrit (A1r), Oberem Werra-Ton (T1r), Randkalk (A1Ca) und Zechsteinkalk (Ca1).

2. Zwischen 35,22 m und 35,41 m wurde im Liegenden des Oberen Werra-Tons ein gelber karbonatischer Schluffstein erschlossen (Abb. 6). Er wird von einem grau-violetten, 7 cm mächtigen schluffigen Ton unterlagert, welcher direkt auf dem Randkalk liegt. Von der makroskopischen Ansprache her gleicht dieser Horizont der Spaltenfüllung der Korbacher Spalte. Wir vermuten daher, dass es sich bei der Spaltenfüllung um den ehemaligen, teils schon umgelagerten Verwitterungshorizont des obersten Randkalkes handelt, der nach Rückzug des Zechsteinmeeres auf der Landoberfläche in der Umgebung der Spalte entstanden ist. Nach heftigen Regenereignissen sind dann Teile dieser Verwitterungsbildung mit den auf ihr vorhandenen Skelettresten der Saurier in Gesteinsspalten zusammen mit noch relativ frischen Bruchstücken des Randkalkes gespült worden. Eine dieser Spalten ist die heute aufgeschlossene Fossilfundstelle Korbacher Spalte, ein weiteres Spaltensystem ist im Profil Dorffiter aufgeschlossen.

3. Da dieser Horizont direkt von den roten Ton- und Siltsteinen des Oberen Werra-Tons überlagert wird, ist der Zeitraum der Entstehung der Spalte vermutlich auf die Zeit zwischen dem Meeresrückzug nach Ablagerung des Randkalkes und der Ablagerung der terrestrischen Ton-, Schluff- und Sandsteine des Oberen Werra-Tons stark eingengt. Die Vermutungen von Kulick & Kowalczyk (1987), dass der Obere Werra-Ton die Spalte bedeckt, sind damit zu bestätigen:

Kurzprofil:

		Quartär (q)
- 0,10 m	0,10 m	Holozän (qh)
- 0,85 m	0,75 m	Pleistozän (qp)
		Zechstein (z)
		Leine-Serie (z3)
- 1,64 m	0,79 m	Leine-Ton und Sandstein (T3, S3)
		Staßfurt-Folge (z2)
- 9,20 m	7,56 m	Oberer Staßfurt-Ton (T2r)
- 11,60 m	2,40 m	Staßfurt-Karbonat (Ca2)
- 16,13 m	4,53 m	Staßfurt-Ton und Sandstein (T2, S2)
		Werra-Folge (z1)
- 29,94 m	13,81 m	Oberer Werra-Anhydrit (A1r)
- 35,22 m	5,28 m	Oberer Werra-Ton (T1r)
- 80,00 m	44,78 m	Randkalk (A1Ca)
- 97,00 m	17,00 m	Zechsteinkalk (Ca1)

97,00 m ET

Bei 97,00 m musste die Bohrung aus technischen Gründen eingestellt werden und hat damit die Zechsteinbasis nicht erreicht.

6. Schlussfolgerungen

Aus den beschriebenen Untersuchungen und Beobachtungen ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

1. Neben der Korbacher Spalte existiert ein weiterer Profilaufschluss mit einem Spaltensystem und oberpermischer Sedimentfüllung, das Reste oberpermischer Faunen enthält.
2. Ein an der Grenzfläche Randkalk/Oberer Werra-Ton ausgebildeter Horizont hat regionalen Leitwert, da er zum einen im Profil Dorffitter, zum anderen aber auch in der Bohrung A/99-BK1 Korbacher Spalte aufgeschlossen ist. Er wird als Verwitterungsdecke der nach der Regression des Meeres entstandenen Landoberfläche gesehen. Da das Spaltensediment und die Sedi-

mente des Grenzhorizontes petrographisch sehr ähnlich sind, wird diese Lage als Lieferhorizont für die Sedimente in den Spaltensystemen des Randkalkes angesehen.

3. Der Grenzhorizont gehört in den Zeitraum, in dem auch die Spaltensysteme entstanden sind. Damit ist das Alter der Spalten wahrscheinlich auf einen sehr engen Zeitraum nach Ablagerung des Randkalkes und vor Ablagerung des Oberen Werra-Tones beschränkt. Dieser Zeitraum ist in der gesamten Korbacher Bucht durch Karbonatverwitterung und durch die Bildung residualer terrigener Verwitterungsprodukte charakterisiert.

7. Schriftenverzeichnis

- Becker, F. & Zeeh, S. (1999a): Untersuchungen zur Diagenese und Isotopengeochemie ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) der Zechstein 1-Karbonate der Fossilagerstätte Korbacher Spalte und ihrer Umgebung (NW-Hessen).- Geol. Jb. Hessen **127**: 5-17; Wiesbaden.
- Becker, F., Zeeh, S. & Heggemann, H. (1999b): Isotopengeochemische Untersuchungen an Zechsteinkarbonaten der Fossilagerstätte Korbacher Spalte (NW-Hessen) als Beitrag zur Klärung ihrer Entstehung. - In: A. Hoppe & H. Abel, Hg.: Geotope - lesbar Archive der Erdgeschichte, Kurzfassungen der Vorträge und Poster zur 151. Hauptversammlung der Dt. Geol. Ges. - Schriftenreihe Dt. Geol. Ges., **7**: 25; Hannover.
- Bock, H. (1980): Das fundamentale Klufsystem. - Z. dt. geol. Ges., **131**: 627-650; Hannover.
- De Ricqlès, A. J. (1976): On bone histology of fossil and living reptiles, with comments on its functional and evolutionary significance. - In: A. Bellairs & C. B. Cox, eds.: Morphology and biology of Reptiles. Linnean Society Symposium Series, No. 3: 123-150; Dorchester, Dorset.
- Kulick, J. (1991): Die Randfazies des Zechsteins in der Korbacher und in der Frankfurter Bucht (Exkursion E am 4. April 1991). - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **73**: 85-113; Stuttgart.
- Kulick, J. (1997): Erläuterung zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt 4719 Korbach. - 2. Aufl., 272 S.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- Kulick, J. & Kowalczyk, G. (1987): Exkursion E1, Die Randfazies des Zechsteins in der Korbacher Bucht und im Frankfurter Raum, Stopp 1-7. - In: J. Kulick & J. Paul, Hg.: Zechsteinaufschlüsse in der Hessischen Senke und am westlichen Harzrand, Int. Symp. Zechstein 87, Exkursionsführer II: 141-169; Wiesbaden.
- Kulick, J. & Paul, J. (1987): Zechsteinaufschlüsse in der Hessischen Senke und am westlichen Harzrand. - Int. Symp. Zechstein 87, Exkursionsführer II: 310 S.; Hannover.
- Kulick, J., Leifeld, D., Meisl, S., Pöschl, W., Stellmacher, R., Strecker, G., Theuerjahr, A.-K. & Wolf, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. - Geol. Jb., **D 68**: 3-223; Hannover.
- Richter-Bernburg, G. (1950): Zwei Beiträge zur Fazies, Tektonik und Kupferführung des Zechsteins. I. Waldeck II. Nordsudeten. - Geol. Jb., **65**: 145-212; Hannover.
- Richter-Bernburg, G. (1955): Stratigraphie und Gliederung des deutschen Zechsteins. - Z. dt. geol. Ges., **105**: 843-854; Hannover.
- Sues, H.-D. & Boy, J. A. (1988): A procynosuchid cynodont from central Europe. - Nature, **331**: 523-524; London.
- Sues, H.-D. & Munk, W. (1996): A remarkable assemblage of terrestrial tetrapods from the Zechstein (Upper Permian: Tatarian) near Korbach (northwestern Hesse). - Paläont. Z., **70**: 213-223; Stuttgart.

Manuskript eingegangen am 21.12.1999, angenommen am 2.01.2000

Jürgen Fichter¹, Heiner Heggemann² & Reiner Kunz³

Neue bzw. bisher nicht veröffentlichte Tetrapodenfährten-Lokalitäten im Mittleren Buntsandstein Nordhessens und Südniedersachsens

In memoriam Dr. Manfred Horn (1934–1999)

Kurzfassung

Es werden sechs neue bzw. bisher in der Literatur noch nicht veröffentlichte Tetrapodenfährten-Lokalitäten im Mittleren Buntsandstein Nordhessens und Südniedersachsens vorgestellt. Bei der Beschreibung des geborgenen Materials stehen nicht Fra-

gen der Taxonomie oder der Systematik im Vordergrund. Es geht vielmehr darum, den Blick für spezielle Erhaltungsvarianten zu schärfen, die unter Umständen mit sedimentär entstandenen Marken oder auch mit Lebensspuren von Evertebraten

verwechselt werden können. Für die Lokalitäten Bühle und Wolfhagen wird eine detaillierte Beschreibung der Sedimente und des Faziesraumes zur Zeit der Ablagerung der Sandsteine gegeben.

Abstract

Six new tetrapod trackway locations of the Middle Bunter in northern Hesse and southern Lower Saxony are described. These locations are respectively up to now not cited in the literature. This publication

gives a close look on specific modes of preservation in order to avoid confusion with structures of sedimentary origin or even with „Lebensspuren“ of evertebrates. The taxonomic or systematic considerations

of the recovered material are not in the center of discussion. A detailed description of the sedimentary and facies environment is given for the locations Bühle and Wolfhagen.

Inhalt

1. Einleitung	34
2. Fundorte, Fundschichten und Fundumstände	35
2.1 Lokalität Bühle	35
2.2 Lokalität Wolfhagen	38
2.3 Lokalität Ballertasche bei Hann. Münden	40
2.4 Lokalität Schwalmstadt	41
2.5 Lokalität Bergshausen	41
2.6 Lokalität Martinhagen	42
3. Beschreibung der Funde	42
3.1 Fährtenfunde von der Lokalität Bühle	42
3.2 Fährtenfunde von der Lokalität Wolfhagen	45
3.3 Fährtenfunde von der Lokalität Ballertasche	51
3.4 Fährtenfund von der Lokalität Schwalmstadt	52
3.5 Fährtenfunde von der Lokalität Bergshausen	52
3.6 Fährtenfunde von der Lokalität Martinhagen	53
4. Schlussbemerkungen	54
5. Schriftenverzeichnis	55

¹ Dr. J. Fichter, Naturkundemuseum, Steinweg 2, 34117 Kassel;

² Dr. H. Heggemann, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Leberberg 9, 65193 Wiesbaden;

³ Dr. R. Kunz, Friedenstraße 7, 34466 Wolfhagen.

1. Einleitung

In den letzten Jahren sind bei gezielten Prospektionen und bei routinemäßigen Geländebegehungen (etwa zur Betreuung von Kartierarbeiten) einige Saurierfährtenlokalitäten im Mittleren Buntsandstein Nordhessens (insbesondere im Raum Wolfhagen) und Südniedersachsens neu entdeckt worden. Die Fährtenführung der einzelnen Fundpunkte ist dabei, sowohl hinsichtlich der Quantität als auch der Qualität in der Fährtenüberlieferung, sehr unterschiedlich. Das Spektrum der Überlieferung reicht von systematisch/taxonomisch nicht bestimmbar bis hin zu klar anzusprechenden Fährten. Einige der durch bestimmte äußere Umstände, die im Moment der Fährtenzeugung geherrscht haben, extramorphologisch stark überprägten Fährten werfen Fragen auf, die die Grundprinzipien ichnologischer Arbeitsweise erschüttern. Diese Prinzipien sind von Haubold (1996) so formuliert worden, dass Fährten, die nicht das Optimum an anatomischer Relevanz erkennen lassen, als sogenannte Phantomtaxa weder in das parataxonomische Fährten-system noch in das orthotaxonomisch-osteologische Er-

zeugersystem eingeordnet werden dürfen. Dies verengt natürlich die ichnologische Arbeitsbasis enorm und lässt einige Grenzbereiche völlig außer Acht. Dadurch werden viele Sedimentstrukturen, die auf die Tätigkeit von Sauriern zurückzuführen sind, nicht erkannt bzw. nicht richtig gedeutet. Bereits 1995 hat Fichter versucht, darauf aufmerksam zu machen, dass isolierte Teilabdrücke der Füße juveniler Fährtenenerzeuger ganz ähnlich aussehen können wie Sedimentstrukturen, die im Allgemeinen als während der Sedimentation entstandene Stoßmarken betrachtet werden.

Haubold (1997) hatte in seiner Besprechung dieser Arbeit geschrieben, die juvenilen Eindrücke seien von problematischen Marken überprägt, ähnlich *Sagittichnus*. Das ist nicht richtig dargestellt. Diese Eindrücke sind nicht überprägt von *Sagittichnus*-ähnlichen Marken, sondern, um es noch einmal klar zu sagen: isoliert auftretende *Sagittichnus*-ähnliche Marken könnten auch eine Lebensäußerung juveniler Fährtenenerzeuger sein.

Es stehen sich also zwei extreme Deutungsversuche

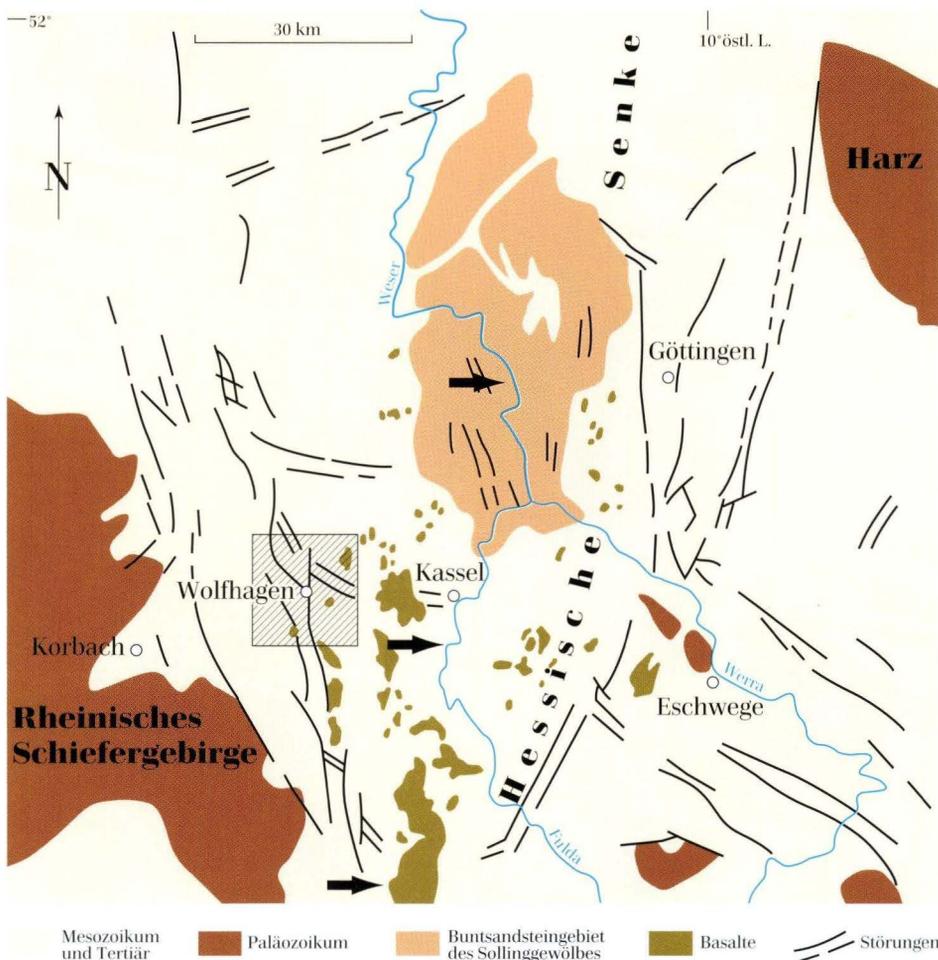


Abb. 1. Übersichtskarte der Hessischen Senke und Umgebung (aus Kunz et al. 1992, verändert). Die Pfeile zeigen auf die Fundorte. Von Norden nach Süden: Ballertasche, Bergshausen, Schwalmstadt. Das Quadrat westlich von Kassel gibt das Untersuchungsgebiet um Wolfhagen an (Abb. 2).

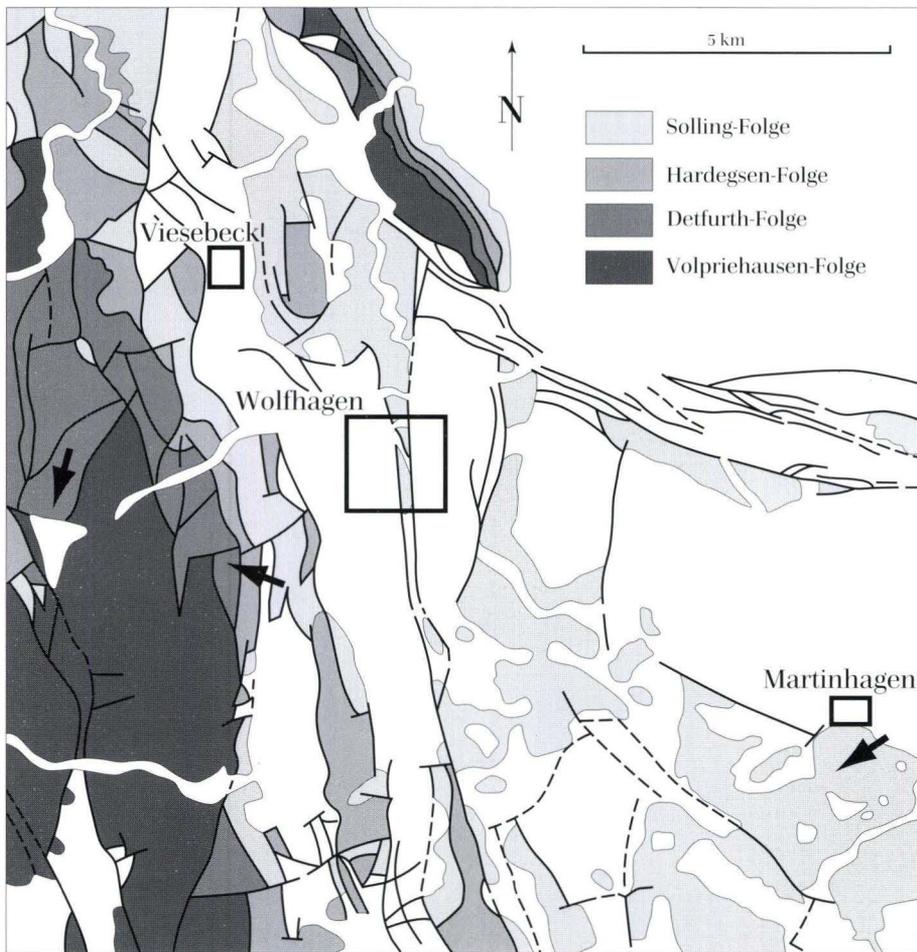


Abb. 2. Vorkommen des Mittleren Buntsandsteins im Raum Wolfhagen (nach Motzka et al. 1979, stark vereinfacht). Die Pfeile zeigen auf die fährtenführenden Lokalitäten. Von links nach rechts: Bühle, Wolfhagen, Martinhagen.

gegenüber: Einerseits die Deutung von bestimmten Sedimentstrukturen als Strömungs- oder Stoßmarken, andererseits ihre Deutung als Lebensspuren von Sauriern. In der vorliegenden Arbeit steht diese geschilderte Problematik im Vordergrund und nicht etwa taxonomisch/systematische Probleme.

Die Vorkommen in der Detfurth-Folge bei Bühle und Wolfhagen sind in den Erläuterungen zu Blatt Arolsen (Horn 1976) bereits gut bearbeitet und sehr gut abgeschlossen. Eine weitere Beschreibung zur Geologie um Wolfhagen geben Kunz et al. (1992). Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der sedimentologisch-faziellen Beschreibungen auf den Lokalitäten Bühle und Wolfhagen.

Manfred Horn konnte schon vor einigen Jahren Fährtenplatten aus den Sandgruben bei Bühle und Wolfhagen bergen. Diese Funde gaben für Fichter und Kunz den Anlass, ganz gezielt auf Saurierfährten-Horizonte zu prospektieren. Die Abbildungen 1–3 zeigen die Lage der Untersuchungsgebiete in der Hessischen Senke, die Verbreitung des Mittleren Buntsandsteins im Raum Wolfhagen sowie ein schematisches Profil des Mittleren Buntsandsteins im Raum Arolsen-Volkmarsen mit ungefähre Position der Fährtenhorizonte. Bei der Beschreibung der Fundorte wird aus verständlichen Gründen auf die Angabe von Hoch- und Rechtswerten verzichtet.

2. Fundorte, Fundschichten und Fundumstände

2.1 Lokalität Bühle

Art und Lage: Im Abbau befindliche Sandgrube am südwestlichen Bühlkopf, westlich von Bühle, Blatt 4620 Arolsen (Abb. 2).

Im Frühjahr 1994 konnte Manfred Horn im Rahmen einer von ihm durchgeführten Lehrerfortbildungsmaßnahme in der Sandgrube Bühle eine Fährtenplatte bergen, auf der acht Fährtenpaare abgebildet sind. Durch Herrn F. Böttger der Firma Sand-Vertrieb Bühle wurden die

Fährten 1998 dem Museum Wolfhagen übergeben. Sie werden mit dieser Publikation erstmalig beschrieben.

In der Sandgrube wird der Detfurther Sandstein abgebaut. Der hellgelbe bis weiße, bindemittelarme Sandstein ist mit einer Mächtigkeit von max. 20 m in der Sandgrube aufgeschlossen. Der Detfurther Sandstein bildet die Basis der Detfurth-Folge des Mittleren Buntsandsteins (Abb. 3). Horn (1976, 1991) konnte diese Formation auf Blatt Arolsen in eine Ober-, Zwischen- und Unterbank gliedern, die in großen Bereichen der gesamten Hessischen Senke ausgebildet sind (Abb. 3). In der Sandgrube ist diese Dreiteilung

nur bedingt erkennbar. Überlagert wird der Detfurther Sandstein von der Detfurther Wechselfolge. Dieser Übergang ist im oberen Drittel der Sandgrube aufgeschlossen (Abb. 4) und dort hat Horn 1994 die hier beschriebene Fährtenplatte entdeckt. Der Detfurther Ton, oberste lithostratigraphische Einheit der Detfurth-Folge, ist in der Sandgrube nicht mehr aufgeschlossen. Basaltgänge tertiären Alters durchschlagen stellenweise die Sedimentgesteine und sind je nach Abbaufortschritt sichtbar.

Detfurther Sandstein

Die Gliederung des Detfurther Sandsteins in eine Unterbank mit etwa 15–16 m Mächtigkeit, ein Zwischenmittel von ca. 3 m Mächtigkeit und eine Oberbank von 8–10 m Mächtigkeit auf Blatt Arolsen (Horn 1976) ist in der Grube nicht deutlich zu erkennen und die Mächtigkeiten scheinen nicht übertragbar zu sein.

Die untere mit etwa 8 m aufgeschlossene Sequenz setzt sich aus dickbankigen, bindemittelarmen, grobkörnigen, weißen bis gelbgrauen Sandsteinen zusammen. Der detritische Anteil an Komponenten besteht vorwiegend aus max. 4 mm großen Quarzkörnern, die sehr gut gerundet sind und mattierte Oberflächen zeigen. Dane-

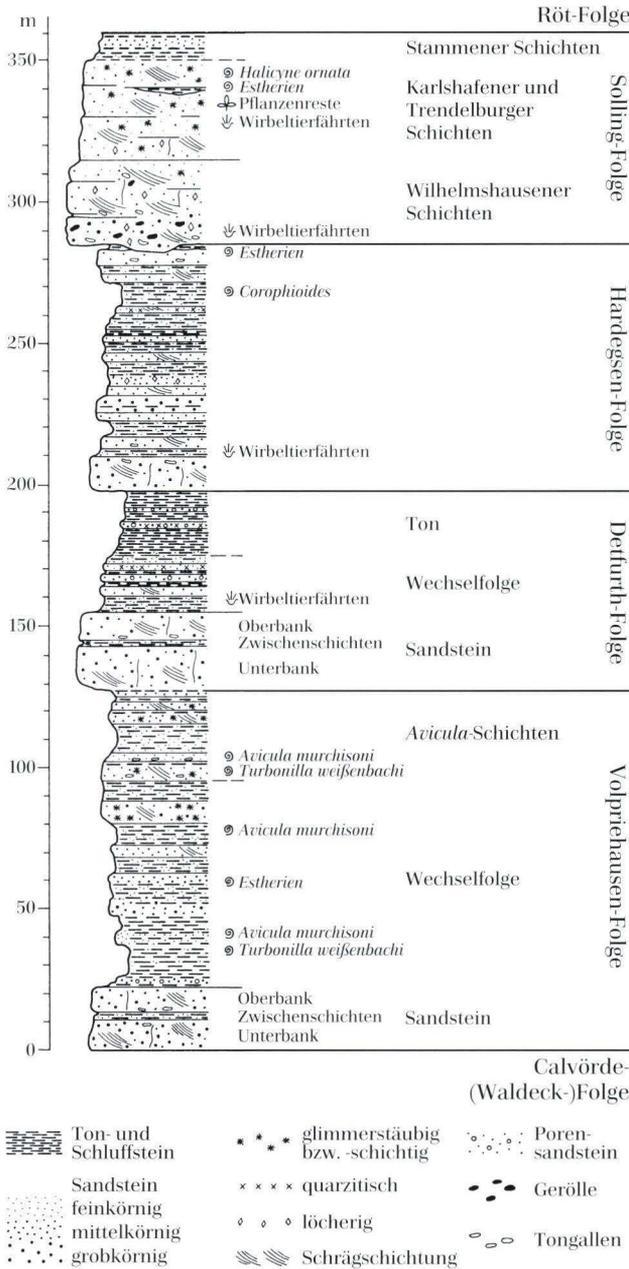


Abb. 3. Profil des Mittleren Buntsandstein im Raum Arolsen-Volkmarsen (nach Horn 1976).

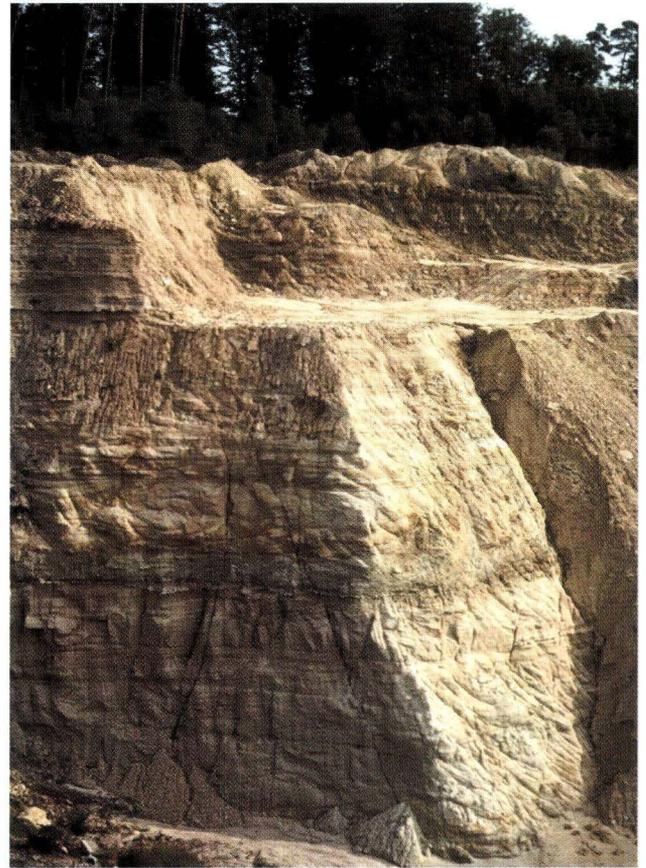


Abb. 4. Das Foto zeigt den Übergang des Detfurther Sandsteins in die Detfurther Wechselfolge im oberen Bereich der Sandgrube-Bühle.

ben tritt ein deutlicher Feldspatanteil (Kaolinit) auf, der die Quarzkörner mit dünnen Häutchen überzogen hat. Die Sandsteine sind z.T. horizontal geschichtet, wobei sich die interne Schichtung der Sandsteinbänke aus einer Aufeinanderfolge von bis 5 cm dicken, normal gradierten Lagen zusammensetzt, die von einer grobkörnigen Basis in einen mittelkörnigen Bereich übergehen. Zwischen diese Bänke können mm- bis cm-dicke Tonlagen eingeschaltet sein, die kurzzeitige Stillwasserbedingungen anzeigen und vermutlich die Bildung von Seen lokaler Verbreitung anzeigen. Horn et al. (1993) und Tietze (1997) beschreiben diese Fazies als Interdünen-Sedimente einer sehr flachen Sandebene. Daneben treten Sandsteinbänke mit z.T. großmaßstäbigen Schrägschichtungskörpern auf, die flach nach NE hin einfallen. An die Schrägschichtungskörper sind selten bis zu 2 cm dicke, invers gradierte Grobsandlinsen gebunden, die zur Basis der Sandbank hin auskeilen. Sie belegen den äolischen Transport der Sedimente, die als äolische Dünensande angesprochen werden können. Selten findet man grobkörnige Quarz-Einzelkornlagen, die als Deflationshorizonte zu interpretieren sind. In mehreren Aufschlüssen der Detfurth-Folge in der Umgebung von Marburg konnte Tietze (1997) den äolischen Transport der Dünensande von Süden nach Norden nachweisen. Die Sedimentstrukturen und Kornausbildungen deuten auf einen hohen Anteil durch Wind verfrachteter Sedimente. Diese wurden z.T. fluviatil erneut aufgearbeitet und umgelagert und bilden fluviatile Einschaltungen in den Interdünen-Sedimenten. Der hier aufgeschlossene untere Bereich der Sandgrube kann vermutlich mit der von Horn (1976) publizierten Unterbank des Detfurth Sandsteins verglichen werden.

Darüber befindet sich ein 1,5–3 m mächtiger Abschnitt, der sich aus eher mittel- bis feinkörnigen, dünnbankigen bis plattigen Sandsteinlagen aufbaut, die oft auskeilen und lang aushaltende, flache Rinnen bilden. Hier treten gehäuft grüne und grüngraue Tonstein- und Schluffsteinlagen auf. Die Sandsteinbänke enthalten oft Glimmer. Tietze (in Horn et al. 1993) konnte in diesem Bereich eine Flussrinne beschreiben, die zu einem mäandrierenden Flusssystem gehört. Diese Rinne ist heute leider durch Einlagerung von Bauschutt im südwestlichen Bereich der Sandgrube nicht mehr zugänglich. Häufiges Auskeilen der Sandsteinbänke, Rinnenstrukturen und der erhöhte Tonsteinanteil an der Schichtfolge sowie der hohe Glimmeranteil zeigen, dass hier vorwiegend fluviatil transportierte Sedimente abgelagert wurden. Es handelt sich vermutlich um das bei Horn (1976) beschriebene Zwischenmittel des Detfurth Sandsteins.

Die 4–6 m mächtige hangende Sandsteinabfolge gleicht in ihrer petrographischen und sedimentären Ausbildung wieder sehr der oben beschriebenen unteren

Sandsteinsequenz in der Grube. Die Bankmächtigkeiten und Korngrößen der bindemittelarmen, weißen bis gelblichen Sandsteine sind jedoch weniger groß. Auch in diesem Bereich wechseln sich äolische Dünen-Sedimente mit fluviatilen und Interdünen-Sedimenten ab. Die obere Sandsteinsequenz kann mit der Oberbank (Horn 1976) des Detfurth Sandsteins korreliert werden.

Detfurth Wechselfolge

Ganz allmählich gestaltet sich der Übergang vom Detfurth Sandstein zur Detfurth Wechselfolge. Die Bankmächtigkeiten des jetzt vorwiegend gelblich bis rötlichen Sandsteins nimmt ab und es schalten sich zunehmend cm- bis dm-mächtige rote und grüne Tonsteinlagen ein. Die Detfurth Wechselfolge hat eine Mächtigkeit von 20–25 m (Horn 1976), wovon jedoch zur Zeit der Profilaufnahme nur die untersten etwa 5 m im oberen Hang der Sandgrube aufgeschlossen waren. In dieser Sedimentfolge konnte die Fährtenplatte geborgen werden. Die Sandsteine der Detfurth Wechselfolge haben ihr kieseliges Bindemittel nicht verloren und sind daher als harte Sandsteinbänke erhalten. Die fein- bis grobkörnigen Sandsteine haben Korngrößen zwischen 0,2 und 0,8 mm. Horn (1976) beschreibt Lebensspuren und Bioturbationsgefüge in den Sandsteinen der Detfurth Wechselfolge.

Das lithologische Profil (Abb. 5) zeigt die Basis der Detfurth Wechselfolge aus dem obersten Bereich der Sandgrube Bühle (westlicher Abschnitt), in dem die Fährtenplatte gefunden wurde. Das Profil kann in zwei Kleinzyklen gegliedert werden, die jeweils mit einem grob- bis mittelkörnigen Sandstein an der Basis und einer Tonsteinlage am Top des Kleinzykles nach oben feiner werdende Kleinzyklen (Sohlbankzyklen) darstellen.

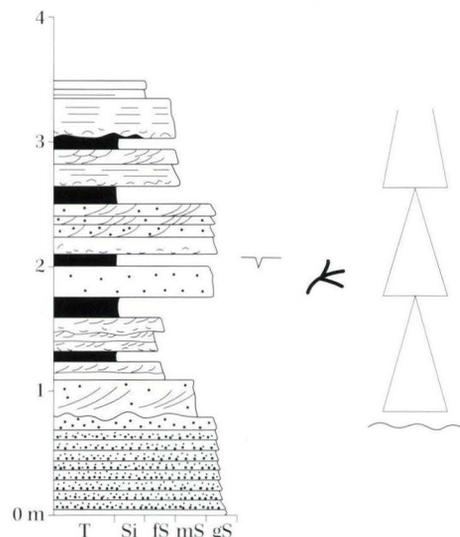


Abb. 5. Lithologisches Säulenprofil im Bereich der Sandsteinbank mit den Fährtenfunden in der Sandgrube Bühle (Aufnahme 1994, heute z.T. von Bauschutt überdeckt).

An der Basis befindet sich eine 80 cm mächtige, massive, weiß bis rosafarbene Sandsteinbank, die intern aus grobkörnigen, normal gradierten und horizontal ausgerichteten Sandlagen aufgebaut ist. Es folgt eine 30 cm mächtige, mittel- bis grobkörnige, hellbraun bis gelblich gefärbte Sandsteinlage, die mit erosiver Basis und deutlicher Schrägschichtung eine fluviatile Rinnenfüllung abbildet. Darüber liegen etwa 40 cm feinkörnige, weiße bis gelbbraune Sandsteine mit grünen Tonsteinlagen. Intern kann eine feine Rippelschichtung (Strömungsrippeln) beobachtet werden, die bei gering energetischem Strömungsregime eines fluviatilen Ablagerungsmilieus entstanden sein kann. Dieser erste nach oben feiner werdende Kleinzyklus wird von einer etwa 10 cm mächtigen, grauen Tonlage abgeschlossen, die entweder als Ablagerung auf einer Überschwemmungsebene nach der Verlagerung der Flussrinnen-Fazies oder aber infolge der nachlassenden Strömungsenergie unter Stillwasserbedingungen entstanden ist.

Auf dieser Tonlage müssen die Saurierfährten primär angelegt worden sein, denn mit großer Wahrscheinlichkeit stammt die Sandsteinplatte mit den Fährten an ihrer Unterseite aus der den Tonstein überlagernden, massiven, mittel- bis grobkörnigen, orangefarbenen bis gelben Sandsteinbank, die etwa 40 cm mächtig ist. Diese Bank liegt an der Basis des zweiten Sohlbankzyklus. Sedimentstrukturen konnten in diesem Sandstein nicht beobachtet werden. Er ist ohne Erosions- bzw. Aufarbeitungshorizont über dem Tonstein abgelagert worden. Die Tonsteinlage im Hangenden dieses Sandsteins zeigt bis 2 cm breite Trockenrisse, die das zeitweilige Trockenfallen des Ablagerungsraumes belegen. Darüber wurde erneut ein massiver, hellorangefarbener bis gelblicher Sandstein (20 cm) mit aufgearbeiteten Tonklasten an der Basis abgelagert, der in einem fluviatilen Ablagerungsmilieu transportiert wurde. Es folgen drei mittel- bis grobkörnige, stark schrägschichtete Sandsteinlagen. Die tangentialen Schrägschichtungskörper zeigen z.T. Grobsandlinsen mit inverser Gradierung, wie sie bei äolischem Sedimenttransport entstehen. Auch dieser zweite Sohlbankzyklus wird von einem grünen bis weißen Tonstein von etwa 10 cm Mächtigkeit abgeschlossen. Trockenrisse belegen auch hier das Trockenfallen des Ablagerungsraumes der Tonsedimente.

Im letzten Profilabschnitt sind mit etwa 1 m Mächtigkeit vorwiegend Mittel- bis Feinsandsteine aufgeschlossen. Die dünnbankigen Sandsteine zeigen im unteren Teil Aufarbeitungshorizonte mit Tonklasten an der Basis und Rippelschichtung am Top. Im oberen Abschnitt dominiert laminierte Schichtung mit häufigen Einlagerungen von Tonhorizonten. Es sind deutlich fluviatil abgelagerte Sedimente, die bei gering energetischem Strömungsregime sedimentiert wurden.

Das lithologische Kurzprofil macht deutlich, dass die

Fährten aus der Sandgrube Bühle zu einer Zeit entstanden sind, in der vorwiegend aquatische Sedimentation vorherrschte. Dabei wechselten Faziesräume mit annäherndem Stillwasser-Milieu, flächenhaftem fluviatilen Sedimenttransport, zeitweiligem Trockenfallen und untergeordnet vermutlich auch äolischem Sedimenttransport einander ab.

2.2 Lokalität Wolfhagen

Art und Lage: Derzeit nicht im Abbau befindliche Sandgrube südwestlich Wolfhagen, Blatt 4620 Arolsen (Abb. 2).

Der Abbau schließt sich nördlich an ehemalige Sandgrubenbereiche an, die schon stark zugewachsen sind. Die steile, nach Norden gerichtete Wand des Abbaus zeigt eine etwa 16 m mächtige, flach nach Osten einfallende, vorwiegend sandige Schichtenfolge (Abb. 6). An

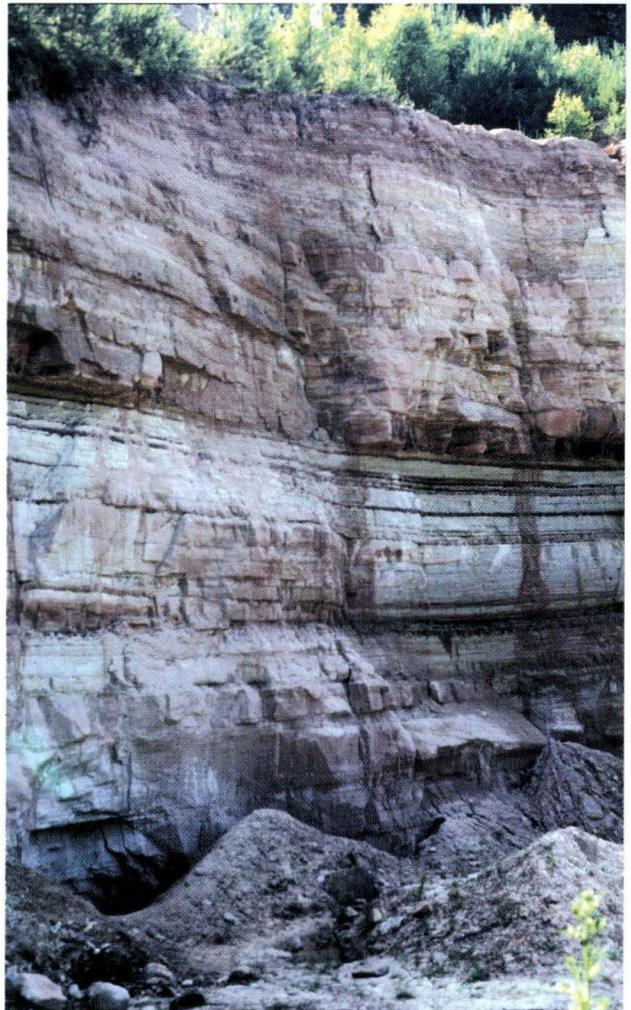


Abb. 6. Die nach Norden gerichtete Wand der Sandgrube südwestlich Wolfhagen (Foto).

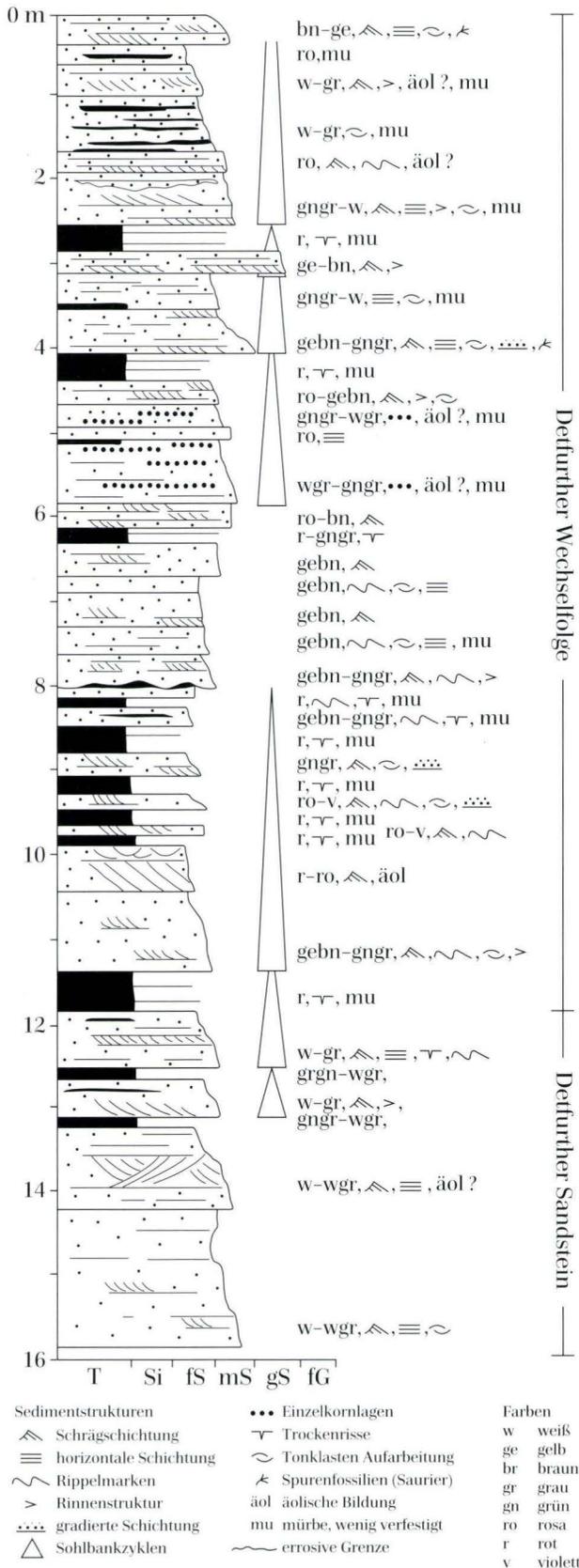


Abb. 7. Das lithologische Säulenprofil der Sandgrube südwestlich Wolfhagen mit Legende für Abb. 5 und 7.

deren Basis sind mit einer Mächtigkeit von 3,97 m die obersten Bänke des Detfurter Sandsteins aufgeschlossen. Darüber folgt mit 11,85 m Mächtigkeit der sandig-tonige Bereich der Detfurter Wechselfolge. Somit schließt das Profil an die obersten Abschnitte der Schichten in der Sandgrube Bühle an und reicht weit in die Detfurter Wechselfolge hinein. An dieser Lokalität konnte ein vollständiges lithologisches Säulenprofil aufgenommen werden (Abb. 7).

Detfurter Sandstein

Die untersten 3,97 m der Profilsäule setzen sich vorwiegend aus weiß bis weißgrau gefärbten Mittelsandsteinen zusammen, die im oberen Teil von zwei graugrünen bis weißgrauen Tonlagen durchsetzt sind. Aufgrund der sedimentpetrographischen und farblichen Ähnlichkeit mit den Schichten des Detfurter Sandsteins der Sandgrube Bühle wurden die Schichten auch hier dieser geologischen Einheit zugeordnet. Zahlreiche Sedimentstrukturen belegen den teilweise aquatischen Transport der Sedimente (Schrägschichtungskörper, Rippelmarken, Rinnenstrukturen, horizontale Schichtgefüge des hohen Strömungsregimes) sowie den äolischen Transport einiger Abschnitte (großmaßstäbige Schrägschichtung mit mehr als 30 cm Leeblothöhe und die Ausbildung von Grobsandlinsen). Die petrographischen und fazialen Eigenschaften des Detfurter Sandsteins gleichen sehr denen des Detfurter Sandsteins in der Sandgrube Bühle und sind in Kap. 2.1 detaillierter beschrieben.

Detfurter Wechselfolge

Das Einsetzen von Tonlagen, die rot gefärbt sind, kennzeichnet den Beginn der hier mit 11,85 m aufgeschlossenen Detfurter Wechselfolge, die von Horn (1976) auf Blatt Arolsen mit einer Mächtigkeit von 20–25 m angegeben wurde. Die roten Tonlagen haben Bankmächtigkeiten von 10–45 cm und sind mit gleichbleibender Mächtigkeit über den gesamten Aufschluss lateral verbreitet. Die vorwiegend tonigen Horizonte sind jedoch häufig von Fein- bis Mittelsandlagen durchsetzt. Trockenrissepolygone mit Trockenrissfüllungen von bis zu 10 cm vertikaler Länge sowie vermutlich Entwässerungsstrukturen und bioturbate Gefüge haben häufig die primären Schichtungsstrukturen zerstört. Fast jede Tonlage ist mit Trockenrissen durchsetzt, was auf das häufig wiederkehrende Trockenfallen des Faziesraumes hinweist. Die Tonlagen werden als Bildungen auf den Überflutungsebenen entlang von Flussrinnen gedeutet. Hier kam es vermutlich immer wieder zur Ausbildung von flachen Seen, in denen die tonigen Sedimente zur Ablagerung kommen konnten. Erst bei einer erneuten Verlagerung der Flussrinnen-Fazies wurden die Tone teilweise aufgearbeitet und von den sandigen Sedimenten der Rinnen überdeckt.

Die Detfurther Wechselfolge setzt sich im Bereich der Sandgrube vorwiegend aus fluviatilen Sedimentationszyklen zusammen, die von fein- bis mittelsandigen Horizonten aufgebaut werden, und nach oben hin in tonige bis siltige Abschnitte übergehen. In den Sandsteinen sind häufig Sedimentstrukturen gut erhalten. Fast alle Bänke zeigen Schrägschichtungsstrukturen, die vorwiegend durch tabulare bis planare Schrägschichtungskörper aufgebaut werden. Trogförmige Schrägschichtung wurde nur selten beobachtet. Auf den Schichtunterseiten oder z.T. auch den Schichtoberseiten sind oft gut erhaltene Strömungsrippelmarken zu erkennen. Rinnenstrukturen und erosive Schichtgrenzen deuten an, dass die Sandsteinbänke in horizontaler Richtung relativ schnell austreichen können. Vor allem an der Basis der Sandsteinlagen sind gehäuft Tonklasten eingelagert, die beim Transport von der Sedimentoberfläche aufgearbeitet worden sind.

Im Gegensatz zum Detfurther Sandstein sind die Sandsteine der Detfurther Wechselfolge bankig bis dünnbankig, z.T. auch plattig ausgebildet und können durch einen höheren Anteil an kieseligem Bindemittel stärker verfestigt sein.

Stellenweise deuten Quarz-Einzelkornlagen und großmaßstäbige Schrägschichtungskörper mit Grobsandlinien auf einen äolischen Transport einzelner Bänke bzw. Bereiche in der sonst vorwiegend fluviatil transportierten Folge hin.

Wie schon in der Sandgrube Bühle konnten später auch (siehe nachfolgende Fundbeschreibung) südwestlich Wollhagen Saurierfährten nur im Bereich der Detfurther Wechselfolge beobachtet werden. Sie befinden sich immer als Marken an der Unterseite von Sandsteinbänken, die direkt mit einer im Liegenden ausgebildeten Tonlage in Zusammenhang stehen. Die Fährtenabdrücke sind im noch weichen Schlamm bzw. Ton entstanden und dann nach relativ kurzer Zeit durch die Sedimentation von fluviatil oder äolisch transportiertem Sand konserviert worden.

Bei einer ersten Besichtigung dieser Sandgrube durch Fichter und Kunz im März 1999 zur Vorbereitung einer Exkursion wurden keine Fossilien entdeckt. Im April fand Kunz im Gesteinsschutt am Fuß der Steinbruchwand ein Handstück mit sicheren Hinweisen auf das Vorkommen von Saurierfährten. Bei einer dadurch angeregten intensiveren Nachsuche wurden von der Schutthalde am Fuße der senkrechten Steinbruchwand zahlreiche Handstücke aufgelesen, die fast alle den Nachweis von Saurierfährten in extramorphologisch stark überprägten Erhaltungslieferten. Diese Lesesteine dokumentieren zumindest drei verschiedene Faziestypen mit zum Teil ungenügender bzw. sehr spezieller Fährtenhaltung. Damit ist mit wenigstens drei unterschiedlichen Fährtenniveaus zu rechnen. Während der Fertigstellung dieses Manuskriptes wurden im Juli 1999

bei einer geologischen Exkursion im Rahmen einer museumspädagogischen Veranstaltung in einer von Regenfällen ausgespülten Fahrrinne entlang des nördlichen Steinbruchrandes auch Fährtenfragmente im Anstehenden entdeckt. Die Fundschicht liegt in einer der obersten im Profil dargestellten Sandsteinbänke (Abb. 7). Es handelt sich dabei um eine bis zu ca. 7,5 cm mächtige Bank eines rotbraunen, fein- bis mittelkörnigen Sandsteins, der an seiner Basis eine dünne Lage (ca. 0,5 cm) rotbraunen Schluffsteins aufweist. Unterlagert wird diese Bank von einem sehr geringmächtigen, graugrünen Tonstein, in dem die Fährten erzeugt wurden. Die Fährten sind somit als konvexes Hyporelief auf der Unterseite dieser Sandsteinbank erhalten und zeigen infolge der Feinkörnigkeit des abbildenden Mediums eine ausgezeichnete Erhaltung bis hin zur Überlieferung der Hautstruktur (Kap. 3.2). Bei von Kunz und Fichter später durchgeführten kleineren Nachgrabungen wurden weitere und vollständigere Fährten in zum Teil stark variierender Erhaltungsqualität entdeckt. An dieser Stelle sind längerfristig größere Grabungen geplant.

2.3 Lokalität Ballertasche bei Hann. Münden

Art und Lage: In Betrieb befindliche Kiesgrube 4-5 km nördlich von Hann. Münden am westlichen Fuß des Bramwaldes, Blatt 4523 Münden (Abb. 1).

Unter dem Namen Ballertasche ist durch Lepper (1996) ein einzigartiges geologisches Ensemble bekannt geworden, das sich aus der Felsböschung am Prallhang der Weser, einem künstlichen Felsanschnitt an der Straße L 561, und mehreren Kiesgruben westlich dieser Straße zusammensetzt. Die Buntsandsteinaufschlüsse am Weserprallhang, am Felsanschnitt an der L 561 sowie am Osthang einer der aufgelassenen Kiesgruben repräsentieren für den Bereich Südniedersachsen und den benachbarten hessischen Reinhardswald die einzigen Tagesaufschlüsse, die die Schichtfolge vom Detfurther Ton bis in die tiefere Hardegsen-Folge zeigen, auf die geowissenschaftliche Forschung und Lehre noch heute zurückgreifen können. Hinzu kommt, dass im Bereich der Kiesgrube pleistozäne Hangsedimente und ihr Kontakt zum Buntsandstein aufgeschlossen sind. Darüber hinaus bietet der aktuelle Kiesabbau entsprechend dem Abbaufortschritt sich ständig verändernde Anschnitte in den fluviatilen Weserablagerungen der Niederterrassenzeit und des Holozän. Alles in allem liegt hier also ein einzigartiges geowissenschaftliches Ensemble vor, das für die geowissenschaftliche Forschung und Lehre von zumindest landesweiter Bedeutung ist und dementsprechend als Geotop gesichert werden sollte.

Eine Beschreibung des Buntsandsteinprofils an der

Ballertasche findet sich bei Lepper et al. (1996, 1998). Im Profil ist der Grenzbereich zwischen dem Detfurther Ton und dem Hardegseiner Sandstein aufgeschlossen. Der Detfurther Ton besteht hier aus massiven Silt- und Feinsandsteinlagen. Teilweise sind Sedimentstrukturen wie Schrägschichtungskörper, Rippelmarken, Trockenrisse und Tonsteinklasten zu erkennen. Innerhalb der Detfurth-Folge sind Spurenfossilien von *Diplocraterion parallelum*, *Phycodes triadicum* vorhanden. Daneben treten wenige Horizonte mit *Avicula muchisoni*, einer Muschel, die auf einen marinen oder brackischen Faziesraum hindeutet (Lepper et al. 1998) und die mit ihrem massenhaften Auftreten vor allem in der Volpriehausen-Folge als Leithorizont gilt, auf. Mit scharfem Kontakt grenzt der Hardegseiner Sandstein an den Detfurther Ton. Die aufgeschlossenen Bänke bestehen aus grob- und mittelkörnigen, massigen, schräggeschichteten Sandsteinen von ca. 8 m Mächtigkeit. Im Hangenden folgt graduell der Übergang zur Hardegseiner Wechselfolge (Lepper et al. 1998).

Bei einer Exkursion im Rahmen der Betreuung einer Kartierarbeit von J. Lepper, K.-W. Tietze und D. Radies wurde von K.-W. Tietze auf der durch den Kiesabbau freigelegten Felsoberfläche (vermutlich im Bereich der tiefen Detfurth-Folge) ein isolierter, 20 cm langer, maximal 9 cm breiter und 9 cm mächtiger Lesestein gefunden, der bei näherer Betrachtung auf seiner Unterseite deutlich drei Zehen von chirotheriiden Proportionen als konvexes Hyporelief erkennen lässt. Es handelt sich um einen gelblich-braunen, mit einem Stich ins Rosa gehenden, fein- bis mittelkörnigen Sandstein, der kieselig gebunden ist. Die unebene Schichtfläche der Unterseite ist ebenso wie die der Oberseite von hellgrau-grüner Farbe mit einem leichten rosa Schimmer. Die Schichtfläche der Oberseite zeigt Wellenrippeln mit einem Abstand der Wellenkämme von ca. 3,7–4,0 cm.

2.4 Lokalität Schwalmstadt

Art und Lage: Aufgelassener und verfallener Steinbruch nördlich Schwalmstadt, südlich des noch in Betrieb befindlichen Basaltbruches „Landsburg“, Blatt 5021 Ziegenhain (Abb. 1).

Nach Blanckenhorn, der in den Jahren 1914 bis 1922 das Blatt Ziegenhain bearbeitete, liegt der Steinbruch im oberen Abschnitt des Mittleren Buntsandsteins und repräsentiert nach der damaligen Gliederung die obere Bausandsteinzone (sm2). Die zutage tretenden Gesteine bestehen nach Blanckenhorn (1926) „... aus mächtigen grob- und feinkörnigen Sandsteinen von blassroter bis braunvioletter Farbe... Bemerkenswert bei diesen Sandsteinen ist, abgesehen vom Auftreten von Tongallen bzw. Hohlräumen bei deren Auswitterung, das vereinzelte Vorkommen von Quarz-, seltener Kieselschiefergrollen

und das lagenförmige Erscheinen von hellen kugeligen Flecken oder auch Löchern, die auf Auslaugung früher hier konzentrierten Karbonatgehalts hinweisen.“

Blanckenhorn hat mit seiner Bausandsteinzone die massiven, grob- bis mittelkörnigen Sandsteine der Hardegse-Folge und die der Solling-Folge in einer geologischen Einheit zusammengefasst und als „sm2“ Bausandsteinzone ausgehalten. Da sich die Hardegse-Folge von den liegenden Folgen des Mittleren Buntsandsteins dahingehend unterscheidet, dass die Aufteilung in einen Basissandstein und eine Wechselfolge nicht deutlich ausgeprägt ist (Kupfahl 1981), kann die von Blanckenhorn durchgeführte Grenzziehung nachvollzogen werden. Blanckenhorn beschreibt mehrere Horizonte mit Spurenfossilien, die er als Wurmsspuren von *Corophioides luniformis* beschreibt. Die Spuren haben nach Kupfahl (1981) hohen Leitwert für den Basis-Sandstein (Hardegseiner Sandstein) und die Hardegseiner Wechselfolge. In der Geologischen Übersichtskarte, CC 5518 Fulda (Motzka 1988) ist versucht worden die „alten“ geologischen Einheiten in die moderne Buntsandsteingliederung zu überführen. Danach liegt der Steinbruch nördlich von Schwalmstadt im Bereich der Hardegse-Folge.

1997 fand Fichter im Bereich dieses verfallenen Steinbruches bei einer routinemäßigen Prospektion auf Saurierfährten eine Fährtenplatte, die somit in die Hardegse-Folge des mittleren Buntsandsteins einzustufen ist.

2.5 Lokalität Bergshausen

Art und Lage: Böschung des Tiefenbach-Wasserrisses südlich Bergshausen, Blatt 4725 Oberkaufungen (Abb. 1).

Nördlich und südlich des Wasserrisses wurden bereits von Kupfahl (1981) drei Fährtenfundpunkte mit Spuren von *Acropus* sp. und *Chirotherium* sp. sowie ein Fundpunkt mit einer Clavicula von „*Mastodonsaurus*“ erwähnt. Alle Funde entstammen dem tiefen Teil der Hardegseiner Wechselfolge, die von Kupfahl (1961) auch als „Fährtenandstein“ dieser Folge beschrieben wurde. Aus dem Wasserriss selbst konnte Kupfahl keine Funde bergen. Hier entdeckte jedoch Fichter bereits vor mehreren Jahren erste Fährtenvorkommen. Wahrscheinlich ist, dass es sich dabei um dasselbe stratigraphische Niveau handelt, in dem schon Kupfahl seine Fährten beschreiben konnte. Bei Nachgrabungen wurde festgestellt, dass mindestens drei – wenn nicht mehr – Fährtenhorizonte im Bereich des Wasserrisses liegen. Die beste Fährtenhaltung bis hin zur Überlieferung der Hautskulptur findet sich auf der Unterseite eines etwa 30 cm mächtigen, stark verkie-selten Feinsandsteins, der einen geringmächtigen rotvioletten Schluff-/Tonstein überlagert. Dieser Sandstein nimmt lagenweise durch Herauslösung vermutlich karbonatischer Substanzen eine „kavernöse“ Struktur an

(Kupfahl 1981). Auf der Unterseite weiterer flaseriger, dünnplattiger Feinsandsteine konnten sehr flach und undeutlich eingedrückte Fährten gefunden werden.

Die Sedimente der hier aufgeschlossenen Hardegseiner Wechselfolge bestehen aus roten bis rotvioletten Sandsteinbänken, die im Wechsel mit rotvioletten Ton- bis Schluffsteinlagen stehen. Der Schichtaufbau zeigt häufig ausgebildete Kleinzyklen mit grob- bis mittelkörniger Basis und feinkörnigem bis tonigem Top. Die Sandsteinbänke keilen seitlich über eine Strecke von 100 bis 200 m aus (Kupfahl 1981). Dies weist auf die Ausbildung breiter flacher Flussrinnen hin, die von einer Überschwemmungsebene umgeben waren. Das terrestrisch fluviatile Ablagerungsmilieu zur Zeit der Hardegseiner Wechselfolge wird ebenfalls durch die häufig aufgeschlossenen Sedimentstrukturen, wie Schrägschichtungskörper in den Sandsteinen, Gradierung und Ausbildung von nach oben feiner werdenden Kleinzyklen, Rinneform der Sandsteinbänke, Rippelmarken auf den Schichtflächen, Trockenrisse innerhalb der Tonsteinlagen und die Fährtenspuren der Saurier, angezeigt.

2.6 Lokalität Martinhagen

Art und Lage: Aufgelassener Steinbruch südsüdwestlich Martinhagen, Blatt 4721 Naumburg (Abb. 2).

Nach Horn (1971) gehören die Steinbrüche südlich von Martinhagen der Solling-Folge, und zwar den Trendelburger Schichten an. Die Trendelburger Schichten stellen einen Übergangsbereich zwischen den grauen Sandsteinen der Wilhelmshausener- und den dunkelbraunroten Sedimenten der Karlshafener Schichten dar. Die Trendelburger Sandsteine sind in ihrer Korngröße relativ gut sortiert

und liegen im fein- bis mittelkörnigen Bereich. Durch ihr kieseliges Bindemittel sind die Sandsteinbänke stark verfestigt und werden daher in vielen Steinbrüchen als Baustein gewonnen. Zwischen die mehrere Meter mächtigen Bänke sind untergeordnet Tonsteinlinsen eingeschaltet. Auf den Schichtflächen sind oft Glimmeranhäufungen zu erkennen. Rippelmarken auf den Schichtflächen, Schrägschichtungskörper und wenige aufgearbeitete Tonsteinklasten an den Bankunterseiten sind die häufigsten Sedimentstrukturen, die auf den fluviatilen Ablagerungsraum der Trendelburger Schichten hinweisen.

Aus einem dieser Steinbrüche bargen Fichter und Kunz im Frühjahr 1999 vermutlich aus dem Übergangsbereich Trendelburger/Karlshafener Schichten Platten mit Marken, deren Deutung als Fährten umstritten ist. Die Marken an der Bankunterseite eines Feinsandsteines wurden von vielen Sedimentologen bisher als Strömungsmarken angesprochen. Fichter ist jedoch der Annahme, dass sich unter den vielen Sedimentmarken auch überprägte Saurierspuren befinden (Kap. 3.6). Die fraglichen Fährtenspuren finden sich als konvexe Hyporeliefs auf der Unterseite eines grünlich bis graubraunen, feinkörnigen Sandsteins, der ein graugrünes Tonsteinpaket überlagert. Im Hangenden geht der Sandstein in einen Aufarbeitungshorizont über, der gekennzeichnet ist durch die unregelmäßige Einlagerung von Tonsteinfragmenten verschiedenster Größenordnung. Die liegende Schichtfläche des Sandsteins ist infolge einer anhaftenden Tonhaut graugrün bis graubraun gefärbt und weist eine auffallende schwarze Sprengelung als Folge einer nachträglichen Eisen-Manganfällung auf. Es hat den Anschein, dass die Eisen-Manganfällung an die Eintiefungen in der Sedimentoberfläche des liegenden Tonsteins gebunden waren und somit die Umrisse der Sedimentstrukturen nachzeichnen.

3. Beschreibung der Funde

Die Beschreibung umfasst nicht alle Funde der jeweiligen Fundstelle, sondern nur ausgewählte Beispiele. Wie schon bei der Vorstellung der Fundpunkte, soll die Priorität der Fundbeschreibung bei den Lokalitäten Bühle und Wolfhagen liegen.

3.1 Fährtenfunde von der Lokalität Bühle

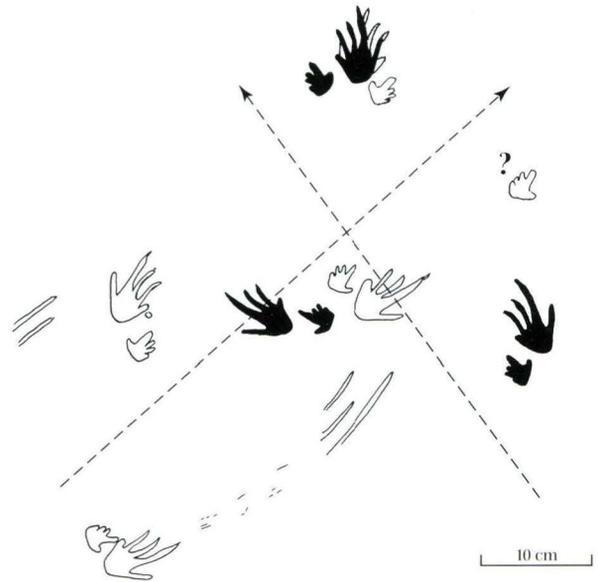
Bei dem ersten von Manfred Horn aus der Sandgrube Bühle geborgenen Fund handelt es sich um eine größere Platte eines grau-braun bis orange-gelb gebänderten, mittelkörnigen Sandsteins, auf deren relativ ebener und glatter Unterseite sich die Fährten als konvexe Hypore-



Abb. 8a. Übersichtsaufnahme der größten noch erhaltenen Teilplatte aus der Sandgrube Bühle (gefunden von Dr. M. Horn). Maße sind im Text angegeben.



Sb. Skizze der Fährten auf der Platte von Bühle. Nach einer Originalzeichnung von Heggemann, ergänzt um die Beobachtungen von Fichter.

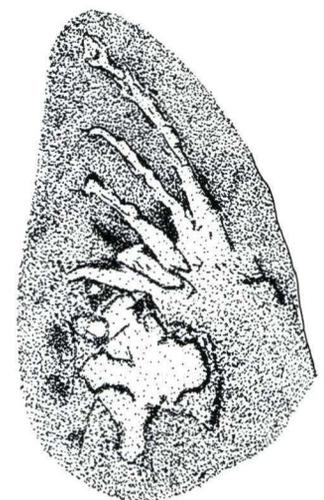


Sc. Rekonstruktion der Morphologie und der Fährtenverläufe. Am linken Bildrand überlagern sich die Fußindrücke der „weißen“ und der „schwarzen“ Fährte.



Sd. Skizze eines Hand-Fuß-Eindruckpaars von *Rhynchosauroides schochardti* auf der Platte von Bühle. Der vordere Eindruck wird als Fußeindruck, der hintere als Handeindruck interpretiert. Teile des konvexen Hyporeliefs sind herausgebrochen.

Se. Skizze eines Hand-Fuß-Eindruckpaars von *Rhynchosauroides schochardti* auf der Platte von Bühle. Fußeindruck mit sehr enger Zehenstellung. (Maße s. Text).



Sf. Skizze eines Hand-Fuß-Eindruckpaars von *Rhynchosauroides schochardti* auf der Platte von Bühle. Fußeindruck mit vermutlich annähernd normaler Zehenspreizung.

liefs befinden (Abb. 8a). Bei dem Versuch, dieser Platte ein etwas handlicheres Format zu verleihen, ist sie leider zerbrochen. Heute sind im Regionalmuseum Wolfhagen von dieser ehemals einheitlichen Platte nur noch zwei Bruchstücke mit den Abmessungen von ca. 43 x 25 cm und 19 x 20 cm unter den Nummern 10.14.6a und 10.14.6b vorhanden. Anhand einer Skizze, die von Heggemann nach der Gesamtplatte im Maßstab 1:1 angefertigt wurde, und nach den Beobachtungen Fichters an dem größeren der beiden heute noch vorhandenen Teilstücke lassen sich zwei sich annähernd rechtwinklig kreuzende Fährten von *Rhynchosauroides schochardti* aushalten (Abb. 8b, c). Die Fuß eindrücke sind ca. 49,2 mm lang (ohne Krallen) und schätzungsweise 30 mm breit. Die Handeindrücke, die innen neben den Fuß eindrücken liegen, sind ca. 27 mm lang und in etwa genauso breit, wodurch sie im Gesamtumriss annähernd quadratisch wirken. Dies macht sich insbesondere dann

deutlich bemerkbar, wenn Teile des konvexen Hyporeliefs heraus gebrochen bzw. im konkaven Epirelief des Liegenden haften geblieben sind, wie dies bei dem Material von Bühle öfters der Fall ist. Die Handeindrücke liegen damit größtenteils quasi als sekundär gestörte Hohlformen vor (Abb. 8d, e).

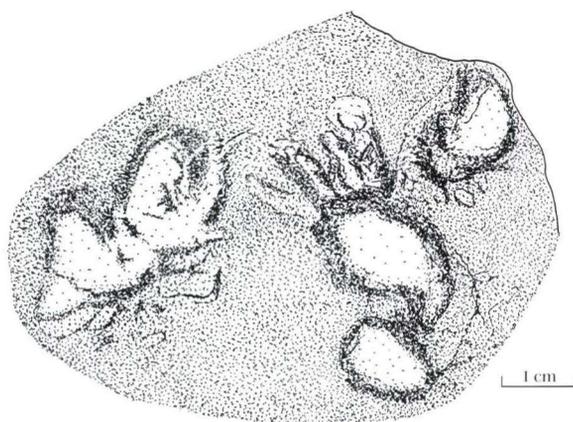
Der Stride der Füße liegt zwischen 214 mm und 246 mm, der Pace beträgt rund 175 mm, die Gangbreite reicht von 123,4 mm bis ca. 146 mm. Der Stride der Hände liegt bei ca. 239 mm, der Pace zwischen 128 und 158 mm, die Gangbreite zwischen 60 und 90 mm. Der Schrittwinkel der Fuß eindrücke beträgt rund 84° bis 90°, der der Handeindrücke 105° bis 125°. Die Rumpflängen liegen zwischen 110 bis 128 mm. Damit sind diese Formen etwas kleiner als der Typus von *Rhynchosauroides schochardti* (vgl. Haubold 1971) und die Fährten sind vermutlich bei etwas geringerer Ganggeschwindigkeit erzeugt worden.



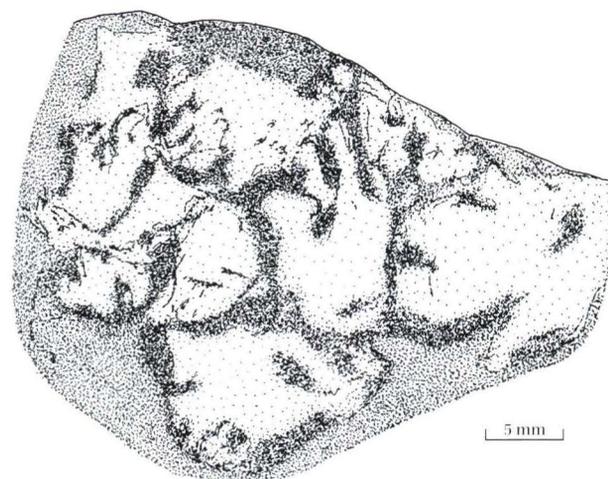
Abb. 9a. Eine spezielle Erhaltung von *Rhynchosauroides* (Erläuterungen s. Text).



Abb. 10a. Übersichtsaufnahme einer Fährtenplatte von Bühle mit pustelartiger Oberfläche.



9b. Detailskizze zu Abb. 9a. Die Spitze von Zeh I des rechts liegenden Fuß eindrucks ist von einem kleinen Eindruck überlagert.



10b. Detailskizze zu Abb. 10a. Es zeigt sich, dass diese sog. „Pusteln“ Anhäufungen sehr kleiner (juvener) vermutlich rhynchosauroider und/oder chirotheriider Eindrücke sind.

Morphologisch ist im Falle der Fuß eindrücke die vorwiegend enge Stellung der Fußzehen I-IV (Abb. 8e) erwähnenswert. Es ist nur ein Fuß Eindruck mit einer annähernd normalen Spreizung der Zehen I-IV erkennbar (Abb. 8f). Dies deutet – zusammen mit den deutlich sichtbaren Schleifspuren der Füße – auf einen insgesamt sehr feuchten und weichen Untergrund, bei dessen Begehung durch eine parallele Stellung der Zehen ein allzu tiefes Einsinken verhindern werden sollte (vgl. Fichter 1982).

Die Hand eindrücke machen sich mit wenigen Ausnahmen nicht als konvexes Relief, wie es eigentlich der Fall sein sollte, sondern als unvollständige Hohlformen bemerkbar. Dies liegt vermutlich allein daran, dass Teile der konvexen Wölbung bei der Trennung von Hangend- und Liegendplatte herausgebrochen und im konkaven Epirelief der Liegendplatte haften geblieben sind. Charakteristisch sind in allen Fällen jedoch die mehr oder weniger quadratischen Umrisse (Abb. 8e).

Das von Fichter und Kunz im Frühjahr 1999 aus der Sandgrube Bühle geborgene Material zeichnet sich nicht durch relativ glatte Schichtflächen aus, sondern die Schichtflächen sind rau bzw. polsterartig wulstig. Eine charakteristische Erhaltungsvariante zeigt die Abbildung 9a, b. Es handelt sich hier um ein Hand-Fuß Eindruckpaar von *Rhynchosauroides* in konvexer Hyporelief-Erhaltung. Zu erkennen sind nur Teile der Zehen I und II, die recht plump wirken. Deutlich zu erkennen sind die Eindrücke auch nur deshalb, weil das gelbliche, tonig-schluffige Material, das die Schichtfläche hauchdünn überzieht, an diesen Stellen fehlt und somit die körnige Struktur des braunen Sandsteins die Eindrücke deutlich nachzeichnet. Bei dem vorne liegenden Fuß Eindruck sind die proximalen und distalen Anteile der Zehen voneinander getrennt bzw. teilweise unterdrückt, was sicherlich mit der gegenüber dem Hand Eindruck mehr digitigraden Fußhaltung zu tun hat.

Die Abbildung 10a, b zeigt eine Platte mit deutlichen Pusteln an der Unterseite. Bei näherer Betrachtung unter geeigneter Beleuchtung zeigt es sich, dass diese wulstigen Strukturen auf ein Gewirr von sehr kleinen, vermutlich rhynchosauroiden Eindrücken zurückzuführen sind (Abb. 10b). Es dürfte sich um Eindrücke juveniler Erzeuger handeln, die das Substrat regelrecht zerwühlt haben. Eine derartige Konzentration von juvenilen Fährten ist nur sehr selten zu beobachten und zeigt, dass hier mehrere Jungtiere auf engem Raum zusammengelebt haben.

Bei größerer flächenhafter Ausbreitung könnten diese pustelartigen Strukturen bei oberflächlicher Betrachtung möglicherweise mit *Riccularites*, einem Pseudofossil aus der Unteren Trias, verwechselt werden. Diese Form wird als Interferenzrippelmarken oder als Runzelmarken sedimentologisch gedeutet.

3.2 Fährtenfunde von der Lokalität Wolfhagen

Das erste von Kunz an dieser Lokalität aus dem Schutt aufgesammelte Handstück (Abb. 11a) mit mehr oder weniger deutlich erkennbaren Fuß- und Hand eindrücken zeigt unterschiedliche Phasen der Fährtenentstehung an. Dünne Schleif-/Stoßmarken und kleine, grazile rhynchosauroide Zehenspuren deuten zunächst auf eine Wasserbedeckung. Bei noch sehr feuchtem Sediment wurde der chirotheriide, klobige Hand Eindruck nahe des oberen Bildrandes erzeugt (Abb. 11b). Die Hand ist um gut 1,5 cm in das Substrat eingesackt, wobei am rechten Rand des Reliefs durch die Körnerschuppen eine charakteristische Streifung erzeugt wurde. Hautschuppen sind undeutlich erkennbar. Selbst kleine (juvenile) und leichte rhynchosauroide Tiere haben noch relativ tiefe Eindrücke hinterlassen (Abb. 11c). Mit zunehmender Austrocknung wurde die Sedimentoberfläche von bis zu 2,8 cm breiten Trockenrissen zerrissen.

Abbildung 12a, b zeigt vermutlich einen kleinen (juvenilen) rhynchosauroiden Hand Eindruck. Es handelt sich um einen Hand Eindruck von Bühle vergleichbare Erhaltung (Abb. 8d). Die Zehen II, III und V sind nur ansatzweise zu erkennen, wobei sich II und III eng an den inneren Zeh I anlehnen und in Schleifspuren verlängert sind. Das Substrat muss bei der Fährtenzeugung sehr weich gewesen sein, so dass die Zehen I-III durch aufquellendes Sediment nach innen abgedrängt wurden. Dadurch entstand eine große Lücke zwischen den Zehen III und IV. Am deutlichsten ist Zeh IV abgebildet. Der metacarpale Handanteil proximal der freien Phalangen ist sehr tief eingedrückt und erscheint als längsovale, aufgeblähte Struktur. Vermutlich sind die distalen Anteile der Metacarpalia stark in das Sediment abgekippt, wie es von

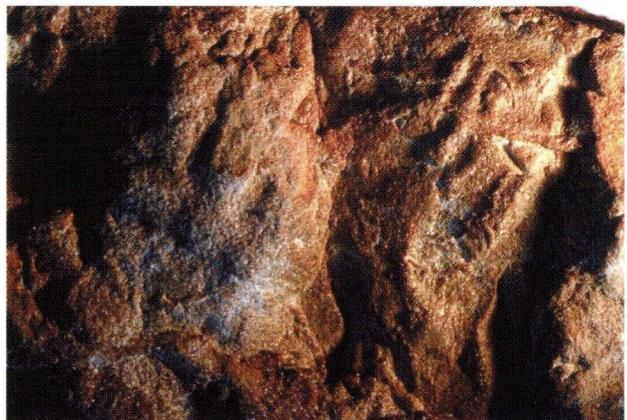
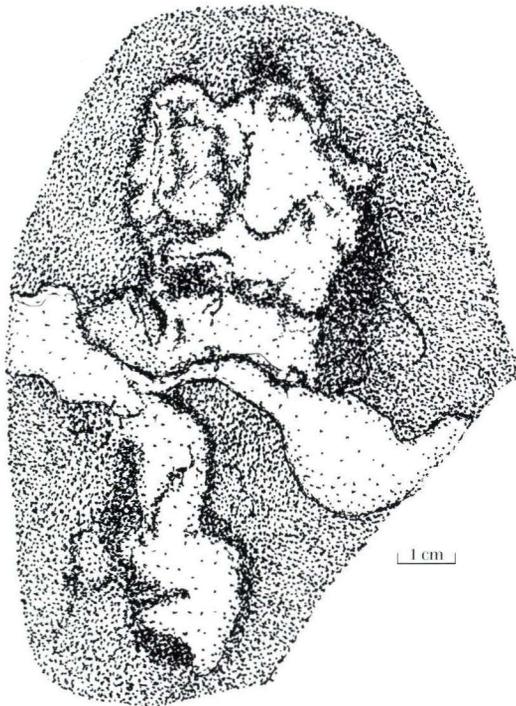
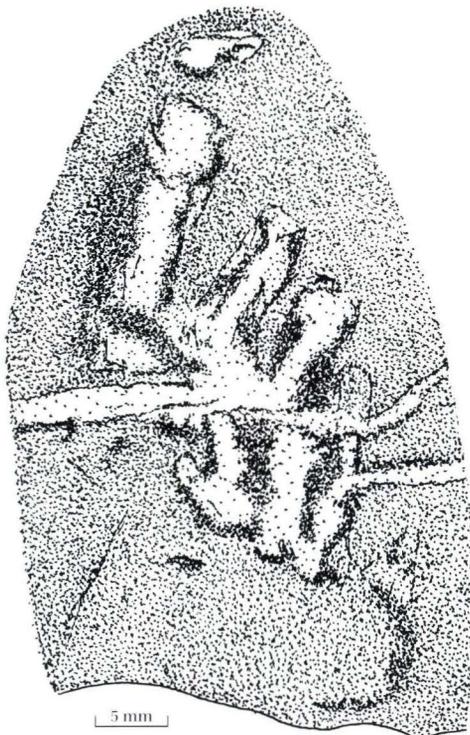


Abb. 11a. Erstes Fundstück von der Lokalität Wolfhagen, das auf das Vorhandensein von Saurierfährten-Horizonten schließen lässt. Links von der Bildmitte ist ein chirotheriider Hand Eindruck (ohne Details) zu erkennen. Rechts von der Bildmitte ein rhynchosauroides Hand-Fuß-Eindruckpaar.



11b. Detailskizze zu Abb. 11a. Der oben liegende chirotheriide Handeindruck wird proximal von einem Trockenriss begrenzt. Der hinten liegende Eindruck könnte die Spur eines Fußzehes darstellen.



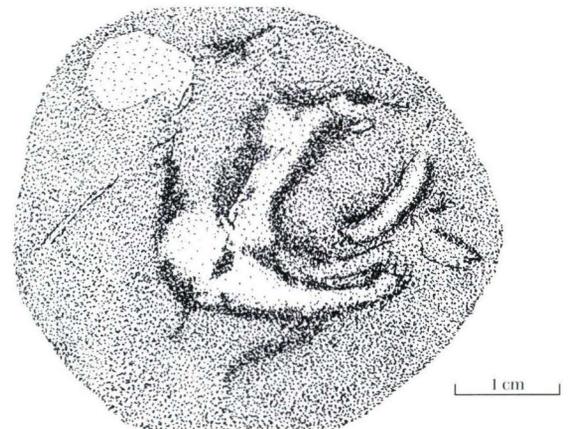
11c. Detailskizze zu Abb. 11a. Ein rhynchosauroides Hand-Fuß-Eindruckpaar eines juvenilen Fährtenersetzers. Der Handeindruck liegt hinter dem Fußeindruck.

Soergel (1925) postuliert wurde (vgl. Fichter & Lepper 1997: 53). Fehlen die Zehen II und III, kann der Eindruck eine pfeilförmige Gestalt annehmen, die durchaus mit anorganisch entstandenen Marken – wie etwa *Sagittichnus* – verwechselt werden kann. Ist dagegen nur der längsovale, metacarpale Sohlenabschnitt erhalten, nicht aber die Zehen, zeigt diese annähernd „mandelförmige“ Struktur eine große Ähnlichkeit zu Liegespuren von Bivalven, z.B. *Lockeia* (vgl. Seilacher & Seilacher 1994: 7).

Auf derselben Platte findet sich ein ungenügend erhaltener, chirotheriider Handeindruck, der nur bei genauerem Hinsehen zu erkennen ist (Abb. 13a, b). Am deutlichsten zeichnet sich Zeh I ab. Die Zehen II und III sind nicht abgebildet. Zeh IV ist parallel zu Zeh V nach außen gerichtet. Der Handeindruck ist in der konvexen Hyporelieferhaltung fast rundherum von mehr oder weniger scharfen Furchen begrenzt. In der konkaven Epirelieferhaltung machen sich diese Furchen als scharfe Grate bzw. Wülste bemerkbar. Vermutlich ist hier das weiche Sediment emporgequetscht bzw. am proximalen Sohlenrand hochgerissen worden.



Abb. 12a. Rhynchosauroider Handeindruck eines juvenilen Fährtenersetzers von der Lokalität Wolfhagen.



12b. Detailskizze zu Abb. 12a. Man beachte den fast „pfeilförmigen“ Gesamtumriss.

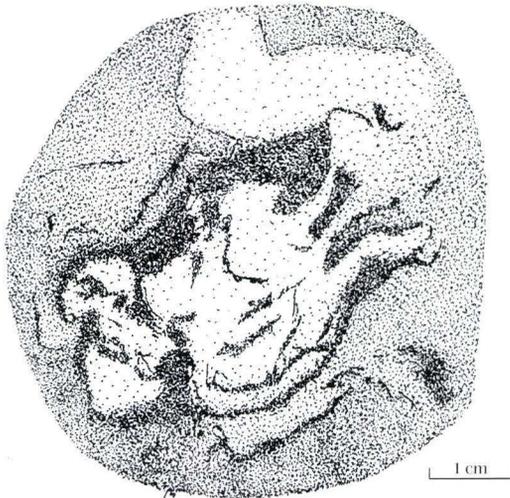
Abbildung 14a, b zeigt in konvexer Hyporelief-erhaltung Eindrücke, die als Fragment eines rhynchosauroiden Fußes angesprochen werden können. Zeh I ist vollständig eingedrückt, Zeh II nur mit seinen distalen Abschnitten. Proximal der Zehen sind Teile der Fußsohle zu erkennen und eventuell stellt der proximalste Teil des Eindruckes den vom Fuß übertretenen Handeindruck dar. Ebenso sind hier markante Hohlformen ausgebildet, die so in der konvexen Hyporelief-Erhaltung eigentlich nicht vorhanden sein dürften. Ausgüsse dieser Hohlformen zeigen, dass es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um doppelklappige Evertebraten – Muscheln oder vermutlich Brachiopoden – handelt, die hier in situ übertreten wurden (Abb. 14b). Nach der Länge der Zeheneindrücke zu urteilen (Zeh I misst schon an die 35 mm), waren an dieser Lokalität ziemlich große rhynchosauroide Fährten zu erwarten, was spätere Funde auch bestätigten.



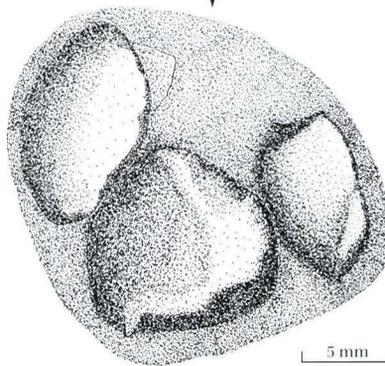
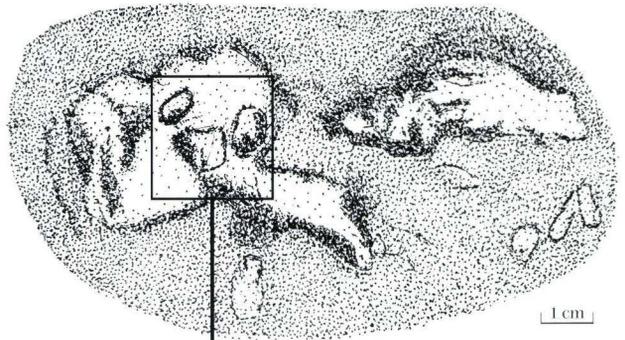
Abb. 14a. Fragment eines relativ großen rhynchosauroiden Fußesindrucks von der Lokalität Wollhagen. Es sind nur die Spuren der Zehen I und II zu erkennen. Proximal dieser Zehen sind markante Hohlformen im ansonsten konvexen Hyporelief sichtbar.



Abb. 13a. Platte wie bei Abb. 12a, b. Ein chirotheriider Handeindruck in einer sehr speziellen Erhaltungsvariante. Zeh IV ist stark nach außen gerichtet.



13b. Detailskizze zu Abb. 13a.



14b. Detailskizze zu Abb. 14a. Die Vertiefungen sind umrahmt. Die untere Skizze ist nach einem Ausguss der Hohlformen gefertigt. Vermutlich handelt es sich hier um zweischalige Evertebraten (? Muscheln), die von dem Saurierfuß in situ übertreten wurden. Die Größe der Schalen beträgt ca. 1,3 cm.

Eine spezielle Erhaltungsvariante eines kleinen rhynchosauroiden Hand-Fuß-Eindruckpaares ist in konvexer Hyporelief-Erhaltung auf der Unterseite eines braun-rosafarbenen, mittelkörnigen Sandsteins überliefert (Abb. 15a, b). Auf der Schichtfläche sind neben pustelartig ausgebildeten Lebensspuren von Evertebraten Ansätze von Trockenrissen zu erkennen. Die Hand- und Fußzehen I-V stehen ähnlich eng beieinander wie bei der Fährte der Abbildung 8e von Bühle, was auf einen weichen, schwer begehbaren Untergrund deutet. Der innen, neben dem Fuß Eindruck liegende Handeindruck ist teilweise vom Fuß übertreten. Fußzeh III endet klumpig, der längste Fußzeh IV ist noch relativ kräftig abgebildet und lässt Einschnürungen erkennen, die Rückschlüsse auf die Phalangenzahl (= 4) zulassen. Insgesamt kann die Erhaltung nur als schlecht bezeichnet werden; Details sind nur bei entsprechend flachem Lichteinfall zu erkennen.

Unter flacher Wasserbedeckung sind vermutlich die Fährten, die sich auf der Unterseite eines grau-grünen bis rosafarbenen, feinkörnigen Sandsteins befinden, erzeugt worden. Abbildung 16a, b zeigt einen Eindruck von vermutlich rhynchosauroidem Erscheinungsbild. Am auffälligsten tritt der distale Abschnitt von Zeh V hervor, der hakenförmig nach innen gekrümmt ist. Zeh IV ist nur unvollständig mit seinen proximaleren Abschnitten abgebildet. Von allen Zehen gehen Schleifspuren aus, die zunächst gerade nach vorne, an ihren Enden jedoch leicht nach außen orientiert sind. Dieselbe Schichtfläche zeigt flache, gerade verlaufende Rippelmarken mit einem Abstand der Rippelkämme von 6–7 cm. Überlagert werden diese Rippelmarken rechtwinklig zu ihrem Verlauf durch Strukturen, die sehr an das Pseudofossil *Kinneyia* (Häntzschel 1975: W 176) erinnern (Abb. 17). Es handelt sich im vorliegenden Fall in der konvexen Epirelief-Erhaltung um parallel verlaufende, schmale Wülste, die

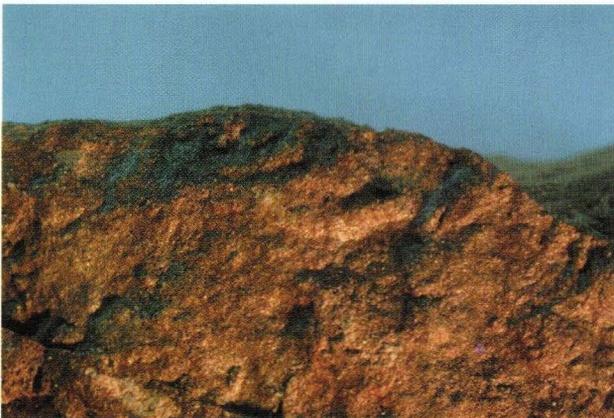


Abb. 15a. Ein rhynchosauroides Hand-Fuß-Eindruckpaar eines juvenilen Erzeugers von der Lokalität Wollhagen.



Abb. 16a. Eine besondere Erhaltungsvariante eines normal großen rhynchosauroiden Fußesindrucks von der Lokalität Wollhagen. Besonders markant ist die hakenförmig gebogene Spur des V. Zehes. Die Zehen enden in Schleifspuren.

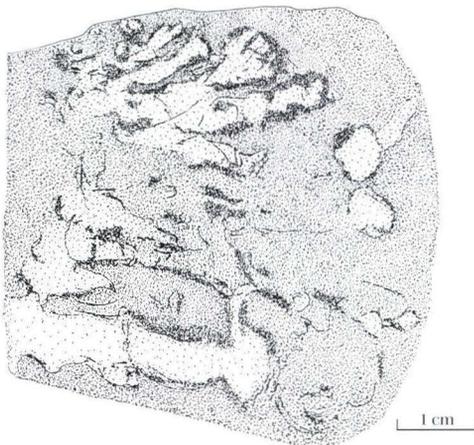
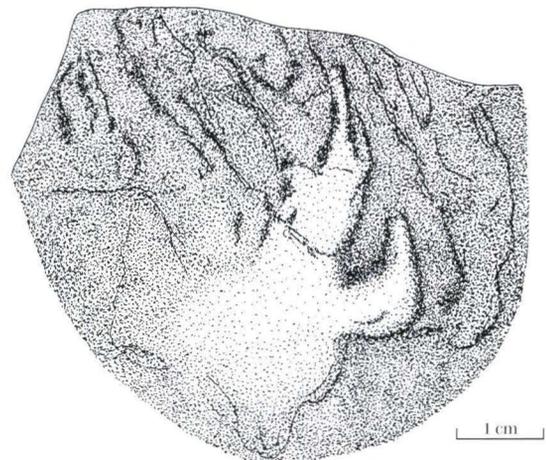


Abb. 15b. Detailskizze zur Abb. 15a. Der Handeindruck ist vom Fuß Eindruck teilweise übertreten. Fußzeh IV lässt andeutungsweise Grenzen der Phalangenpolster erkennen.



16b. Detailskizze zu Abb. 16a.

an einem Ende in verdickten „Köpfen“ enden und am anderen Ende flacher werdend ausdünnen. In der konkaven Epirelief-Erhaltung sind es bis zu 4,5 mm breite, asymmetrische Grate, die durch bis zu 3,8 mm breite Furchen voneinander getrennt sind. An einem Ende laufen sie spitz zu und sind hier stärker vertieft. In der entgegengesetzten Richtung verflachen sie und heben aus.

Kinneyia wurde zunächst als Alge gedeutet, später jedoch als rippelähnliche Strukturen erkannt. Reineck & Singh (1980: 65) bemerken, dass den sogenannte Runzelmarken ähnliche Strukturen in der Literatur auch als *Kinneyia*-Rippeln bekannt sind. Sie entstehen auf der Oberfläche eines nur teilweise kohäsiven Sediments, das von einem sehr dünnen Wasserfilm (bis zu 1 cm) bedeckt ist, über dessen Oberfläche ein starker Wind bläst. Je dünner der Wasserfilm über der Sedimentoberfläche umso schmaler und enger sind die Runzelmarken. Runzelmarken können als gute Indikatoren für periodische Auftauchphasen betrachtet werden.

Von dem im Schutt am Fuß der Steinbruchwand aufgefundenen Stücken zeigt das der Abbildung 18a, b noch die mit Abstand beste Erhaltung. Es handelt sich hier offensichtlich um ein Hand-Fuß-Eindruckpaar in konvexer Hyporelief-Erhaltung auf der Unterseite eines graugrünen, ca. 30 cm mächtigen, feinkörnigen Sandsteins. Der Fuß-Eindruck deutet auf eine semiplantigrade Fußhaltung hin. Der innerste, mit einer deutlichen Krallenbewehrte Zeh I ist stark nach innen orientiert. Der IV. Zeh ist ebenso mit einer deutlichen, relativ langen, scharfen Krallenbewehrt. Sollten die undeutlichen Spuren am

Außenrand des Fuß-Eindrucks die Lage und die Position des V. Zehes anzeigen, ergibt sich hier eine Konstellation, die nicht mit einem chirotheriiden Habitus in Übereinstimmung zu bringen ist. Ein ähnliches Bild zeigt auch der undeutlich ausgebildete, vor dem Fuß-Eindruck liegende Hand-Eindruck, der von den Fußzehen III und IV gerade noch tangiert wird. Morphologisch zeigt dieses Hand-Fuß-Eindruckpaar durchaus Ähnlichkeiten zu *Capitosauroides*-Fährten, wie sie von Haubold (1971: 412–416) beschrieben wurden. Allerdings sollen bei den *Capitosauroides*-Hand- und Fuß-Eindrücken die Zehen nicht mit Krallen bewehrt sein.

Alle bisher beschriebenen Stücke mit Eindrücken

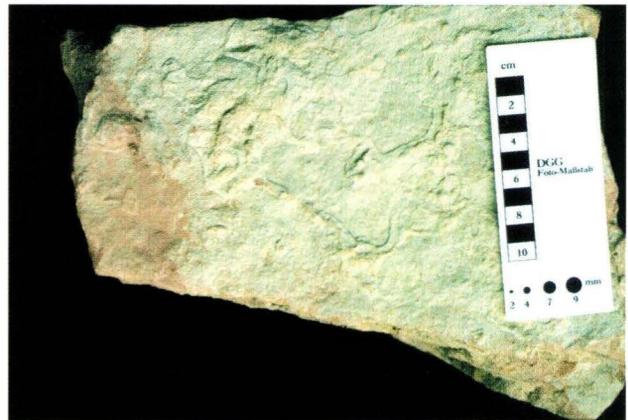


Abb. 18a. Ein Hand-Fuß-Eindruckpaar von der Lokalität Wolfhagen. Der Handeindruck liegt vor dem Fuß-Eindruck und wird von den Fußzehen III und IV noch tangiert.

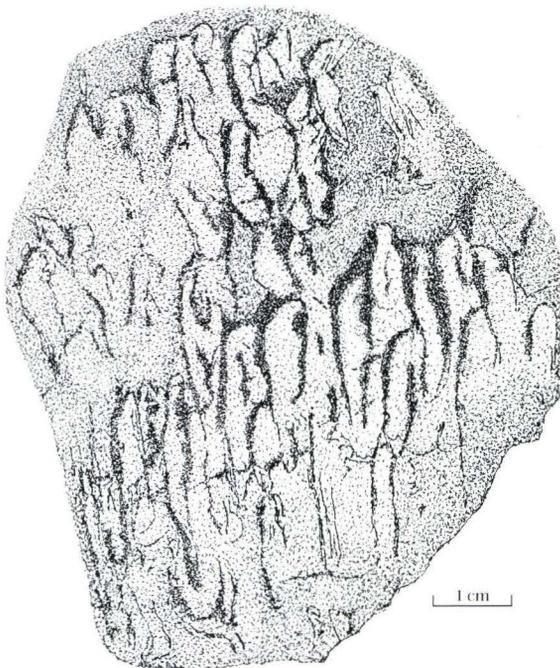
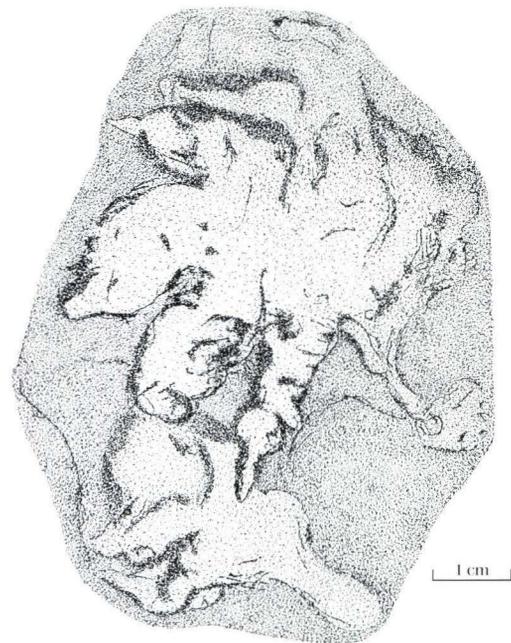


Abb. 17. Skizze von Sedimentstrukturen, die als *Kinneyia*-Rippeln (Runzelmarken) gedeutet werden.



18b. Detailskizze zu Abb. 18a. Morphologie und Proportionen sprechen nicht für eine chirotheriide Form. Eventuell bestehen Ähnlichkeiten zu *capitosauroiden* Fährten.

entstammen dem Gesteinsschutt am Fuß der Steinbruchwand. Die nachfolgend aufgeführten Funde gelangen jedoch im Bereich des Anstehenden in Erosionsrinnen eines stark ausgefahrenen Weges am Nordrand des Steinbruchs. Es handelt sich um Eindrucksfragmente von chirotheriiden und rhynchosauroidem Habitus in sehr guter Erhaltung, die auch deutlich die

Beschuppung der Fußunterseiten erkennen lässt (Abb. 19a-e). Hinzu kommt ein isolierter Balleneindruck mit relativ großen, rundlichen Schuppen (Abb. 20). Zur Zeit laufende Grabungen an dieser Lokalität erbringen weiterhin eine Fülle von Fahrtenmaterial in zum Teil hervorragender Erhaltung.

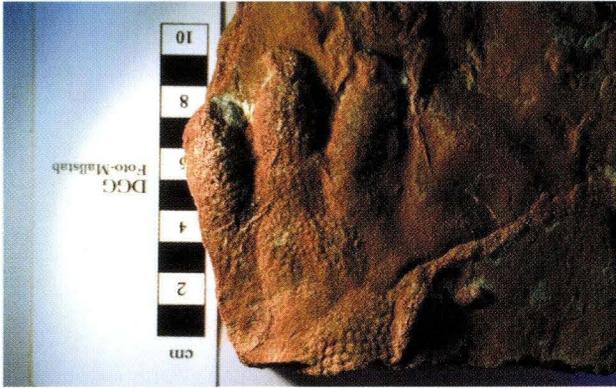
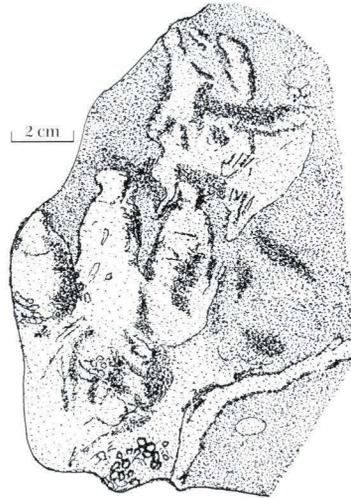


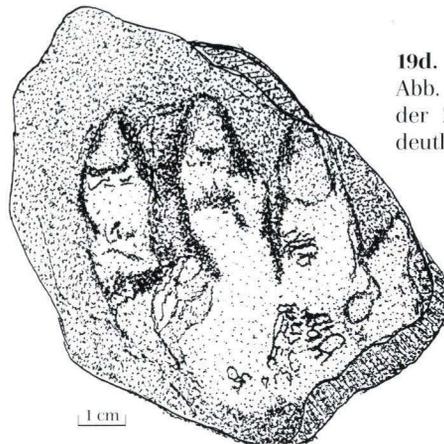
Abb. 19a. Fragment eines chirotheriiden Hand-Fuß-Eindruck-paares. Erste Funde im Anstehenden im Top des Aufschlusses der Lokalität Wolfhagen.



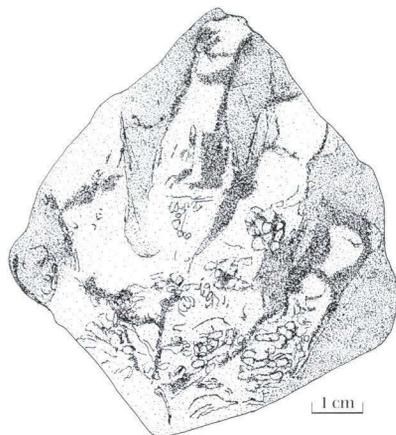
19b. Detailskizze zu Abb. 19a. Der vorne liegende Handeindruck ist sehr undeutlich zu erkennen. Die Schuppenstruktur ist beim Fußeindruck angedeutet.



19c. Fragment eines chirotheriiden ?Fußeindrucks aus dem Anstehenden der Lokalität Wolfhagen.



19d. Detailskizze zu Abb. 19c. Die Krallen der Zehen II-IV sind deutlich zu erkennen.



19e. Detailskizze eines rhynchosauroiden Eindruck-Fragments.

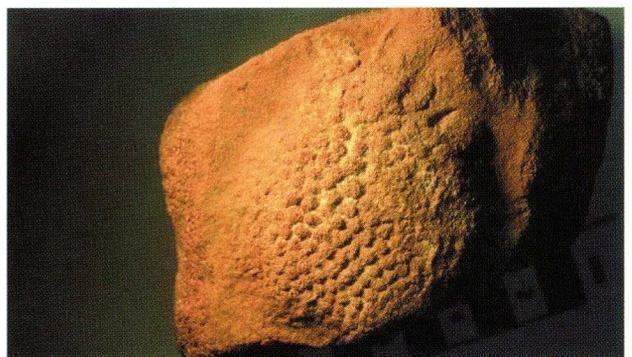


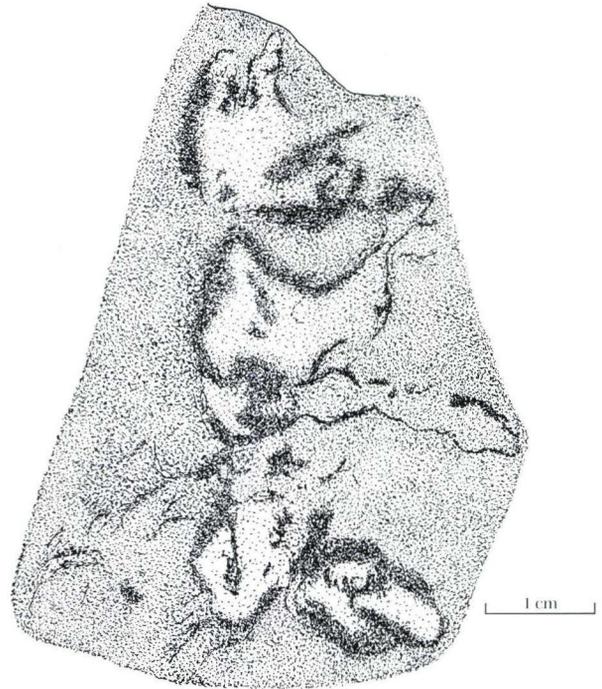
Abb. 20. Isolierter Hautabdruck aus dem Bereich des Anstehenden der Lokalität Wolfhagen.

3.3 Fährtenfunde von der Lokalität Ballertasche

Das an der Lokalität Ballertasche gefundene Handstück zeigt auf den ersten Blick einen vierzehigen Eindruck von chirotheriidem Habitus und Proportionen (Abb. 21a-c). Unter dem Mikroskop entpuppt sich jedoch der hinter den Zehen II-III? liegende Eindruck als eine Kombination von sehr kleinen Eindrücken juveniler Erzeuger von vermutlich rhynchosauroidem und/ oder chirotheriidem Erscheinungsbild. Interessant ist insbesondere das in der Abbildung 21c oben liegende Hand-Fuß-Eindruckpaar. Vom Fußeindruck sind nur Teile der Fußsohle und Zeh ?I sowie Zeh ?IV zu erkennen, wobei der letztere stärker nach außen orientiert zu sein scheint, wie dies auch bei den Abbildungen 12b, 13b zu beobachten ist. Insgesamt ergibt sich aus dieser Konstellation ein unvollständiger pfeilförmiger Eindruck. Der Handeindruck ist fast ähnlich abgebildet, zeigt jedoch die inneren Zehen ?II und ?III vollständig.

Neben dieser Eindruckserie ist auf dem Handstück ein weiterer winziger Eindruck von wahrscheinlich chirotheriidem Habitus zu erkennen (Abb. 22). Es handelt sich vermutlich um einen Fußeindruck mit deutlich dominie-

rendem Zeh III und einem fragmentär überlieferten Zeh V. Zeh I fehlt vollständig im Eindruck. Die Zehen II-III zeigen ansatzweise eine Bewehrung mit Krallen.



21c. Vergrößerte Darstellung des Eindruckes proximal der Zehengruppe II-III. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich dieser Gesamteindruck aus einzelnen Eindrücken (Pfeile) juveniler Erzeuger zusammensetzt.

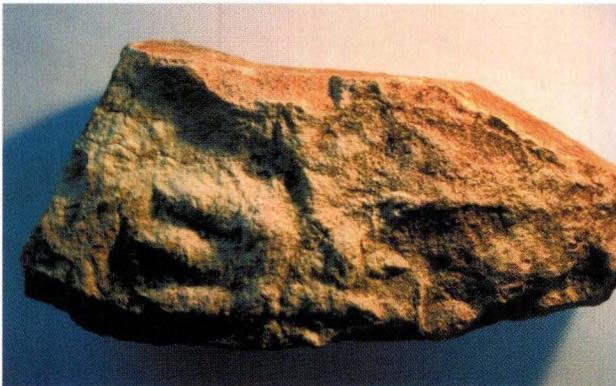
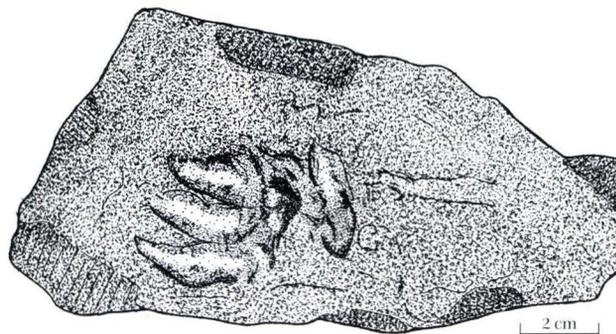


Abb. 21a. Fährtenfund von der Lokalität Ballertasche. Der Eindruck proximal der Zehengruppe II-III entspricht nicht dem Zeh V.



21b. Detailskizze zu Abb. 21a.

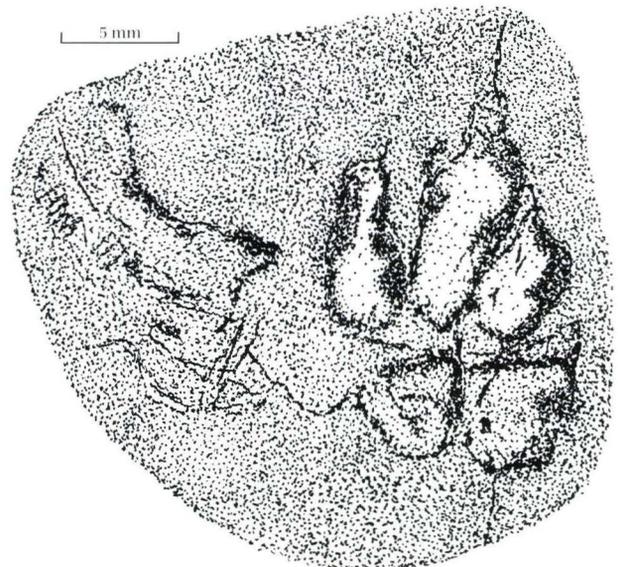


Abb. 22. Skizze eines sehr kleinen Fußeindruckes von chirotheriidem Habitus auf dem Handstück von der Ballertasche.

3.4 Fährtenfund von der Lokalität Schwalmstadt

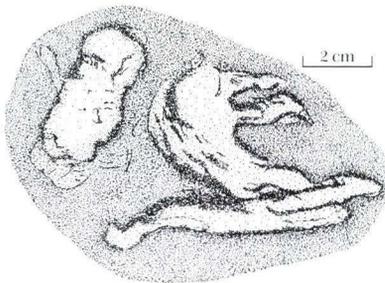
An dieser Lokalität gelang nur ein einziger Fund eines Fußabdruckes in konvexer Hyporelieferhaltung von chirotheriidem Habitus, der allerdings eine sehr spezielle Erhaltungsvariante zeigt (Abb. 23a, b). Der Eindruck lässt die Zehen II-V einigermaßen deutlich erkennen, Zeh I dagegen nur ansatzweise. Die inneren Zehen I und II sind stark nach innen, die Zehen III und IV gerade nach vorne orientiert. Infolge dieser unterschiedlichen Orientierung klafft zwischen II und III eine große Lücke. Ein Metatarsalphalangenpolster zeichnet sich allenfalls proximal der Zehen III und IV ab. Zeh V liegt als massiger, kaum differenzierter, isolierter Eindruck proximal der Zehengruppe I/IV. Bei dem sich in seinem vorderen Teil aufspaltenden Wulst, der die inneren Zehen I und II tangiert, kann es sich um eine Schwanzschleifspur handeln.

3.5 Fährtenfunde von der Lokalität Bergshausen

Von dieser Lokalität liegt schon etliches Fährtenmaterial in sehr guter Erhaltung vor. Es handelt sich hierbei um eine Vergesellschaftung von relativ großen Fährten



Abb. 23a. Chirotheriider Fußabdruck auf der Fährtenplatte von der Lokalität Schwalmstadt. Bemerkenswert ist die deutliche Lücke zwischen den Zehengruppen I-II und III-IV. Der Wulst, der Zeh I völlig überlagert kann als Schwanzschleifspur interpretiert werden.

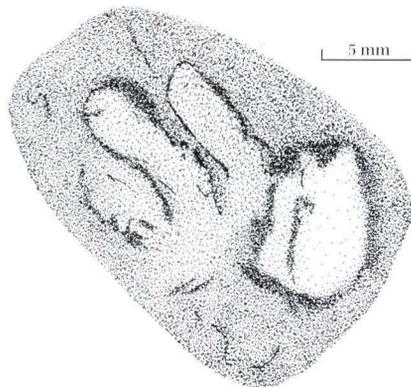


23b. Detailskizze zu Abb. 23a. Bemerkenswert ist der „klobige“, kaum differenzierte Eindruck von Zeh V.

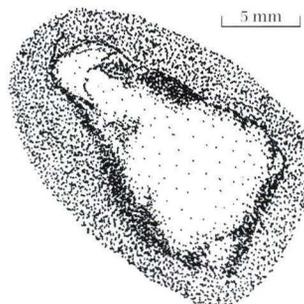
von chirotheriidem Habitus mit kleinen und sehr kleinen Eindrücken von chirotheriidem und rhynchosauroidem Charakter. Bemerkenswert bei den kleinen, chirotheriidem Fußspuren ist eine häufig zu beobachtende Überbetonung von Zeh V und dessen Basispolster (Abb. 24a, b). Das heißt dieser Zeh kann sehr viel tiefer eingedrückt sein als die übrigen Zehen (Abb. 24b). Gelegentlich erscheinen die Zehen I-IV gar nicht im Eindruck, so dass Zeh V als isolierte, keulen- oder pfeilförmige Struktur vorliegt, die ohne eindeutigen Zusammenhang mit anderen Saurierfährten vermutlich nicht als „Fußspur eines juvenilen Sauriers gedeutet würde (Abb. 24c).



Abb. 24a. Detail-Aufnahme von einer Fährtenplatte der Lokalität Bergshausen. Es ist ein winziger chirotheriider Fußabdruck zu erkennen mit übertieftem Eindruck der Basis von Zeh V.



24b. Detailskizze zur Abb. 24a. Die Zehen II-IV sind gegenüber der Basis von Zeh V sehr flach eingedrückt.



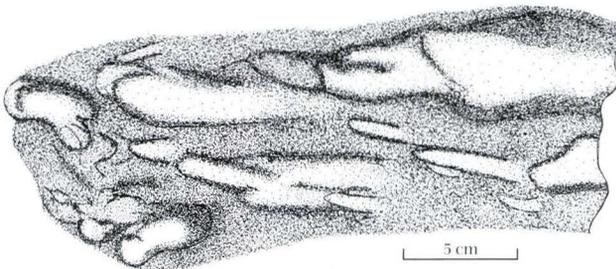
24c. „Pfeilförmiger Eindruck auf derselben Platte, der als isolierter Abdruck von Zeh V und seiner Basis gedeutet wird. Solche Strukturen könnten auch mit anorganisch entstandenen Marken – wie z.B. *Sagittichnus* – verwechselt werden.

3.6 Fährtenfunde von der Lokalität Martinhagen

Von der Lokalität Martinhagen wurden Platten mit Sedimentstrukturen geborgen, die von Sedimentologen als Strömungsmarken – im engeren Sinne „obstacle-scour“ (vgl. Reineck & Singh 1980: 78–80, Fig. 118) – angesprochen werden. Zum Teil sind sie es auch. Fichter ist jedoch überzeugt, dass die Strukturen der Abb. 25a–e von durch das Sediment gleitenden Saurierfüßen verursacht wurden. Am linken Rand der Abb. 25b sind deutlich Teile eines Handeindrucks zu erkennen. Der Fuß dagegen erzeugte die im konvexen Hyporelief vorliegenden langgezogenen Spuren. Besonders markant ist die am rechten oberen Rand liegende Spur, die vom Ballen des V. Zehes herrührt und unmittelbar nach vorne übergeht in die deutliche Spur des IV. Zehes. Ein Vergleich mit einer über einen festen Untergrund rutschenden menschlichen Hand, die in ihren Umrissen einem chirotheriiden

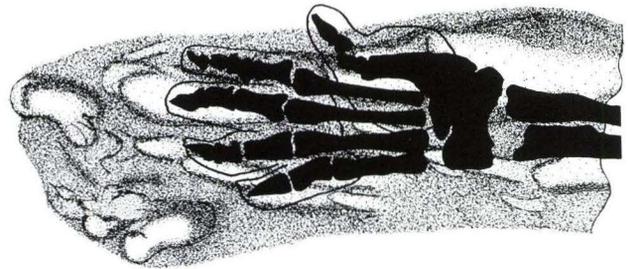


Abb. 25a. Übersichtsaufnahme einer Platte von der Lokalität Martinhagen. Darauf befinden sich von Saurierfüßen herführende „Gleitspuren“, die mit Strömungsmarken verwechselt werden könnten.

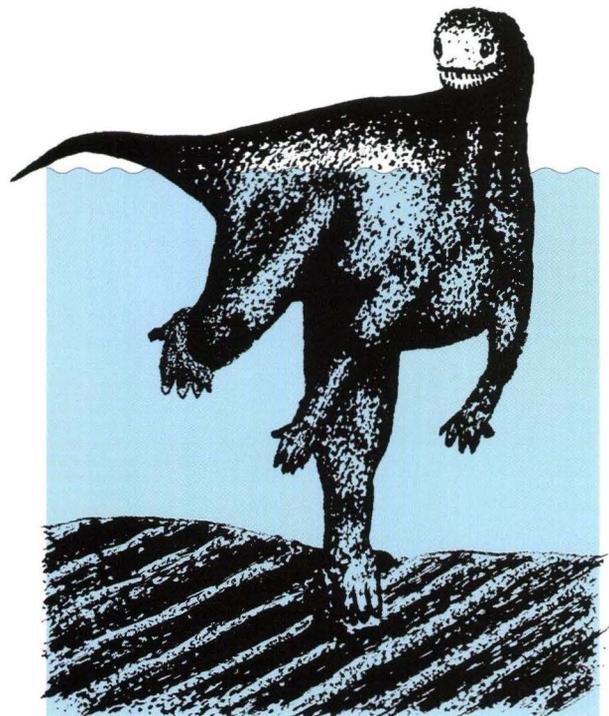


25b. Skizze von „Gleitspuren“ auf einer Platte von der Lokalität Martinhagen. Die Spuren am linken Rand werden als Fragmente eines chirotheriiden Handeindrucks interpretiert. Die breite Spur am oberen, rechten Bildrand rührt von dem Ballen des V. Zehes her und geht nach vorne über in die Spur des IV. Zehes.

Fuß ja nicht unähnlich ist, ergibt ein ganz ähnliches Bild. Zum besseren Verständnis dessen, was hier gemeint ist, wurde das Fußskelett von *Euparkeria* auf eine vergleichbare Größe gebracht und über diese Strukturen projiziert. Man erkennt deutlich, dass diese „Schleif-“ oder „Rutschmarken“, die beim Gleiten durch das Sediment nacheinander erzeugt wurden, mit den einzelnen Zehen korrespondieren (Abb. 25c). Das Milieu und die Entstehung der Strukturen wird dahingehend gedeutet, dass ein Saurier in einer Strömungsrinne paddelte und die Extremitäten nur noch teilweise mit dem Untergrund in Kontakt kamen (vgl. Abb. 25d). Der Zusammenhang die-



25c. Zum besseren Verständnis wurde eine Zeichnung des Fußskelettes von *Euparkeria* auf die entsprechende Größe gebracht und über diese Spuren gelegt. Man erkennt, dass sich die Zehenpositionen mit den „Gleitspuren“ decken.



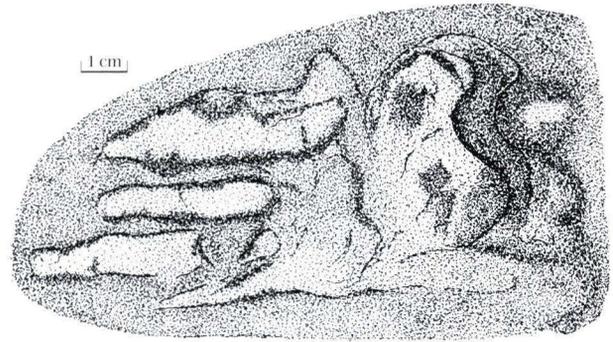
25d. Die Zeichnung soll einen Eindruck davon vermitteln, wie die Entstehung der Spuren erklärt werden könnte (Saurier „paddelt“ in einer Strömungsrinne, s. Text). Abweichend davon muss die Vorderextremität gelegentlich Bodenkontakt gehabt haben (Zeichnung nach McAllister 1989, verändert).

ser Strukturen mit Saurierfährten lässt sich außerdem durch einen zwar schwachen, aber immerhin deutlichen Fußeindruck auf derselben Platte belegen (Abb. 25e). Am deutlichsten ist Zeh V zu erkennen, während die Lage und die Proportionen der Zehengruppe I/IV durch Rutschen verändert sind.



25e. Auf derselben Platte befindet sich ein sehr flacher Fußabdruck von sehr deutlichem chirotheriiden Habitus in einem Übergangsstadium zu den „Gleitspuren“.

Ganz ähnliche Strukturen wurden bereits von Beasley (1904) als „flame markings“ beschrieben und 1908 auch abgebildet. Er führte ihre Entstehung auf strömendes Wasser zurück. Cummins (1958) identifizierte diese Strukturen als „flute casts“. Der geschilderte Sachverhalt wird in dem hervorragenden Werk von Tresise & Sarjeant (1997) neu beschrieben.



25f. Detailskizze zu Abb. 25e.

4. Schlussbemerkungen

Zweck dieser Arbeit ist nicht die taxonomische Bearbeitung des Fährteninventars der genannten Fundorte. Vielmehr soll u.a. der Blick geschärft werden für Saurierspuren mit ungewöhnlicher, extramorphologischer Überprägung als Folge der zur Zeit der Fährtenenerzeugung vorherrschenden äußeren Bedingungen. Dabei können Strukturen entstehen, deren biologischer Ursprung nicht ohne weiteres ersichtlich ist. Das Spektrum der Fehldeutungen kann von anorganisch entstandenen Stoß- und Strömungsmarken bis zu Liege- und Ruhespuren von Evertebraten bzw. deren Wohn- oder Fraßbauten reichen. So können *Sagittichnus*-ähnliche Marken, die als anorganisch entstandene Stoßmarken gedeutet werden, durchaus Teilabdrücke der Füße kleiner bis sehr kleiner Saurier darstellen. Oder es können sich Saurierspuren hinter den als Strömungsmarken gedeuteten Strukturen verbergen. Solche Grenzbereiche innerhalb der Wirbeltier-Ichnologie sollten stärker beachtet werden, da die fraglichen Strukturen als Indikatoren für das Auffinden von Fährtenhorizonten gewertet werden können.

Ein großes Problem ist die Interpretation kleiner bis sehr kleiner – etwa in einem Größenordnungsbereich < 2 cm – Saurierspuren. Es wäre nun ein Leichtes, diese als eigene, kleinwüchsige Arten abzugrenzen. Aber ihre oft große Anzahl und das häufig gemeinsame Vorkommen mit größeren Fährten legen den Schluss nahe, dass es sich um die Spuren juveniler Tiere handeln könnte. Die Beweisführung hierfür ist allerdings prekär und beruht zum größten Teil auf der geringen Spurengröße. Bei Trutnau (1994: 98, Abb. 63) veröffentlichte Wachstumskurven von 600 Leistenkrokodilen (*Cr. porosus*) zeigen, dass die Anfangsgröße des Schlüpfings von rund 30 cm etwa 15 % der Größe ausmacht, die nach 4 Jahren erreicht ist (ca. 200 cm). Ließen sich diese Wachstumsraten auf die hier besprochenen sehr kleinen Fußlängen anwenden, wären nach vier Jahren – ein lineares Wachstum der Füße vorausgesetzt – Fußlängen von ca. 12 cm erreicht. Solche Fußlängen von chirotheriidem Habitus sind bei dem Material von Wolfhagen realisiert.

5. Schriftenverzeichnis

- Beasley, H. C. (1904): Report on footprints from the Trias, Part I. – Report of the British Association for the Advancement of Science (Southport 1903): 219–230.
- Beasley, H. C. (1908): Some markings, other than footprints, in the Keuper sandstones and Marlslates. – Proceedings of the Liverpool Geological Society, **10**: 262–275; Liverpool.
- Blanckenhorn, M. (1926): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Lieferung 261 Blatt Ziegenhain, Gradabteilung 68, Blatt 6, 76 S.; Berlin.
- Cummin, W.A. (1958): Some sedimentary structures from the Lower Keuper Sandstones. – Liverpool and Manchester Geological Journal, **2**: 37–43; Liverpool.
- Fichter, J. (1982): Aktuopaläontologische Untersuchungen an den Fährten einheimischer Urodelen und Lacertilier. Teil I: Die Morphologie der Fährten in Abhängigkeit von der Sedimentbeschaffenheit. – Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv, **20**: 91–129; Mainz.
- Fichter, J. (1995): Ein bemerkenswerter Fund von Hans Penndorf (1879–1960). – *Philippia*, **7/2**: 91–108; Kassel.
- Fichter, J. & Lepper, J. (1997): Die Fährtenplatte vom Heuberg bei Gieselwerder. – *Philippia*, **8/1**: 35–60; Kassel.
- Häntzschel, W. (1975): Trace fossils and problematica. – In: C. Teichert, ed.: Treatise on invertebrate paleontology, part W, miscellanea, supplement 1, IXXI + 269 S.; Boulder/Lawrence.
- Haubold, H. (1971): Die Tetrapodenfährten des Buntsandsteins in der Deutschen Demokratischen Republik und in Westdeutschland und ihre Äquivalente in der gesamten Trias. – *Paläontologische Abhandlungen A*, **IV**, 3: 395–600; Berlin.
- Haubold, H. (1996): Ichnotaxonomie und Klassifikation von Tetrapodenfährten aus dem Perm. – *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, **B18**: 23–88; Halle (Saale).
- Haubold, H. (1997): [616. Fichter, J. (1995). Ein bemerkenswerter Fund von Hans Penndorf (1879–1960)]. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil II *Paläontologie* **1997(5/6)**: 335; Stuttgart.
- Horn, M. (1971): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Blatt 4721 Naumburg. – 285 S.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- Horn, M. (1976): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Blatt 4620 Arolsen. – 225 S.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- Horn, M. (1991): Buntsandstein und Muschelkalk am Westrand der Hessischen Senke (Exkursion H am 6. April 1991). – *Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F.*, **73**: 155–176; Stuttgart.
- Horn, M., Kulick, J. & Tietze, K.-W. (1993): Kontinentale klastische Sedimente aus Oberperm und Untertrias am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges, Exkursionen A3 und B3. – *Geologica et Palaeontologica*, **27**: 356–377; Marburg.
- Kunz, R., Halfar, W., Hoffmann, R. & Schröder, A. (1992): Geologie des Wolfhagener Landes. – 100 S.; Wolfhagen.
- Kupfahl, H.-G. (1961): Der Buntsandstein auf Blatt Schlitz in Hessen mit besonderer Berücksichtigung des Fährten sandsteins. – *Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch.*, **89**: 266–275; Wiesbaden.
- Kupfahl, H.-G. (1981): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Blatt 4723 Oberkaufungen. – 2. Aufl., 212 S.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).
- Lepper, J. (1996): Die Ballertasche bei Hann. Münden – ein geologisches Ensemble – (Dokumentation geowissenschaftlich schutzwürdiger Objekte in Niedersachsen, Nr. 12). – Bericht der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover, **138**: 133–139; Hannover.
- Lepper, J., Rettig, B. & Röbling, H.-G. (1996): Das Buntsandsteinprofil am Weserprallhang an der Ballertasche bei Hann. Münden. – Bericht der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover, **138**: 141–150; Hannover.
- Lepper, J., Röbling, H.-G., Stollhofen, H. & Tietze, K.-W. (1998): The Buntsandstein of the Hessian Depression: Contrasting styles of basinal and marginal deposition. Exkursion H. – *Hallesches Jahrb. Geowiss., Reihe B*, Beiheft **6**: 195–227; Halle (Saale).
- McAllister, J. A. (1989): Dakota Formation. Tracks from Kansas: Implications for the recognition of tetrapod subaqueous traces. – In: D. D. Gillette & M. G. Lockley, ed.: *Dinosaur tracks and traces*, 343–348; Cambridge (Cambridge University Press).
- Motzka, R., Horn, M., Hinze, C., Jordan, H., Lepper, J., Reuter, G., Waldecke, H. & Dahm, H. D. (1979): Geologische Übersichtskarte 1:200 000, CC 4718 Kassel. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- Motzka, R. (1988): Geologische Übersichtskarte 1:200 000, CC 5518 Fulda. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- Reineck, H.-E. & Singh, I. B. (1980): Depositional sedimentary environments. – 551 S.; Berlin–Heidelberg–New York (Springer).
- Seilacher, A. & Seilacher, E. (1994): Bivalvan trace fossils: A lesson from actuo-paleontology. – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **169**: 5–15; Frankfurt.
- Soergel, W. (1925): Die Fährten der Chirotheria. Eine paläobiologische Studie. – 92 S.; Jena.
- Tietze, K.-W. (1997): Ein Buntsandstein-Profil am Westrand der Hessischen Senke (Raum Marburg). – *Geologica et Palaeontologica*, **31**: 285–294; Marburg.
- Tresise, G. & Sarjeant, W. A. S. (1997): The tracks of Triassic vertebrates. Fossil Evidence from North-West England. – 204 S.; London.
- Trutnau, L. (1994): Krokodile – Die Neue Brehm-Bücherei, **593**: 270 S.; Magdeburg.

Manuskript eingegangen am 8.11.1999, angenommen am 30.11.1999

Carolyn Lampe*

Zur faziellen und sedimentologischen Entwicklung des Buntsandsteins in der östlichen Frankenger Bucht

Kurzfassung

Die Frankenger Bucht stellt eine beckenartige Struktur am Westrand der Hessischen Senke dar, die an drei Seiten vom Paläozoikum des Rheinischen Schiefergebirges umrahmt ist. Sie nimmt aufgrund ihrer im Vergleich zur Hessischen Senke randlichen Lage eine Sonderstellung ein, da der Buntsandstein hier in deutlich verminderter Mächtigkeit vorliegt und sich seine sedimentologische und fazielle Entwicklung zum Teil erheblich von der des Becken-

zentrums unterscheidet. Eine Besonderheit bilden die Übergangsschichten, die ein stratigraphisches Bindeglied zwischen dem Unteren und dem Mittleren Buntsandstein darstellen. Sie wurden in der Frankenger Bucht und in den südlich anschließenden Gebieten der westlichen Hessischen Senke bisher noch nicht beschrieben.

Die Ablagerungen des Buntsandsteins lassen darauf schließen, dass es sich bei der Frankenger Bucht

um eine sowohl tektonisch als auch synsedimentär-auflastbedingte „Bekken“-Struktur handelt. Ihr Buchtcharakter wurde entgegen älterer Annahmen bereits während der Untertrias und nicht erst im Verlauf der oligozänen Heraushebung des Rheinischen Schiefergebirges geprägt.

Die Frankenger Bucht bildet somit im Unteren bis Mittleren Buntsandstein einen randfaziellen Ablagerungsraum innerhalb der westlichen Hessischen Senke.

Abstract

The Frankenger Embayment is a basin-like structure within the western margin of the Hessian Depression. Geologically, it forms a marginal depositional area within the Hessian Depression. To the west, north, and northeast it is flanked by the Paleozoic rocks of the Rhenish Massif. It comprises mainly terrestrial rocks of lower Triassic age (Bunter) which show a considerably reduced thickness as well as sub-

stantial differences in sedimentology and facies development compared to the central part of the Hessian Depression. A special feature is the „transitional formation“ which forms a stratigraphic link between the Lower and Middle Bunter. This formation has not been described in the Frankenger Embayment and its southern vicinity to date.

The sediments of the Bunter provide evidence that the Frankenger

Embayment is a combination of tectonic and sedimentary basins. Contrary to previous investigations which held that the Frankenger Embayment is a tectonic basin, sedimentary evidence shows that the basin structure must have been developed as early as the lower Triassic and not only during the Oligocene uplift of the Rhenish Massif.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	58
2. Geologischer Rahmen	59
3. Sedimentäre und fazielle Entwicklung	59
3.1 Unterer Buntsandstein (su)	59
3.2 Übergangsschichten (üs)	61

* Dipl. Geol. C. Lampe, Geologisches Institut der Universität zu Köln, Zülpicher Str. 49a, 50674 Köln

3.3 Mittlerer Buntsandstein (sm)	63
3.3.1 Volpriehausen-Formation (smV)	63
3.3.2 Detfurth-Formation (smD)	66
4. Diskussion	67
5. Schlussfolgerungen	68
6. Schriftenverzeichnis	69

1. Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden die Sedimentationsprozesse und die fazielle Entwicklung des Unteren und Mittleren Buntsandsteins in der südlichen und zentralen Frankenerger Bucht vorgestellt und diskutiert. Die Arbeit basiert neben einer ca. 12 km² umfassenden Geländekartierung, die 1993 und 1994 am Nordostrand der Frankenerger Bucht östlich der Ortschaft Gemünden durchgeführt wurde, auf der detaillierten Aufnahme des oberen Abschnittes der Forschungsbohrung Rosenthal 1001 (Lampe 1994; Abb. 1). Die Bohrung

wurde 1991 vom Hessischen Landesamt für Bodenforschung ca. 3,5 km westlich von Rosenthal abgeteuft (R 348759, H 564972, Blatt 5018 Wetter) und diente vor allem der Erforschung der tektonischen und paläogeographischen Situation innerhalb der Frankenerger Bucht, zwischen Kellerwald und Rheinischem Schiefergebirge (NLfB 1993). Die Forschungsbohrung befindet sich etwa 11 km westlich des Kartiergebietes und somit sowohl geographisch als auch geologisch gesehen im Zentrum der Bucht.

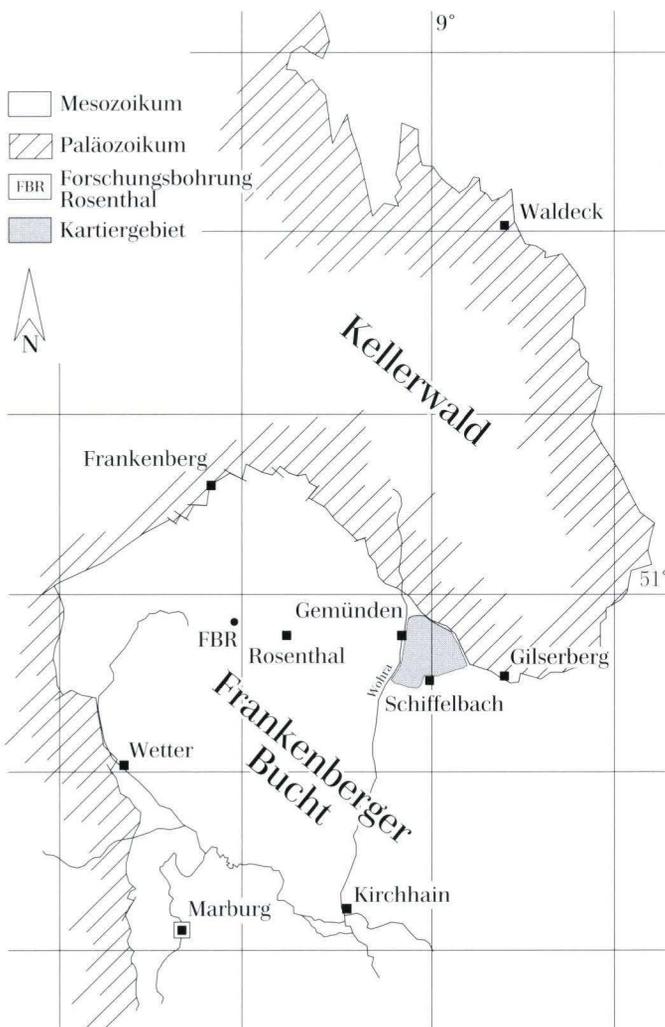


Abb. 1. Geographischer Überblick, Lage der Forschungsbohrung Rosenthal und des kartierten Gebietes.

2. Geologischer Rahmen

Die Frankfurter Bucht liegt zwischen dem Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges im Westen und dem Kellerwald-Horst im Osten (Abb. 1). Sie bildet eine geologisch-naturräumliche Einheit innerhalb der Hessischen Senke, mit der sie nach Südosten in Verbindung steht. Im Westen, Nordwesten und Nordosten ist sie vom Paläozoikum des Rheinischen Schiefergebirges umgeben.

In der Frankfurter Bucht sind im wesentlichen Gesteine der unteren Trias (Buntsandstein) aufgeschlossen. Lokal tritt durch Grabenbrüche die mittlere Trias (Muschelkalk) zutage (Mömberger Graben, ca. 2 km südöstlich von Gemünden). Im Zentrum der Bucht kommt der Mittlere und vereinzelt auch der Obere Buntsandstein vor, wohingegen in den Randgebieten der Untere Buntsandstein und Sedimente des Zechsteins anstehen.

Die Zechstein-Sedimente umgeben die Frankfurter Bucht wie ein Saum und zeichnen so die ehemalige Küstenlinie mit Schwemmfächern und flächenhaften, fluviatilen Grottschüttungen nach. Daher ist anzunehmen, dass die Kellerwaldschwelle (heutiger Kellerwald) und das Rheinische Schiefergebirge zur Zeit des Zechsteins ein ausgeprägtes Relief hatten und dass die Frankfurter Bucht bereits angelegt war (Kulick 1966).

Die Tektonik der Frankfurter Bucht ist geprägt durch steilstehende Störungen mit Versatzbeträgen im Zehnermeter-Bereich. Sie unterteilen den Schichtverband in einzelne Schollen mit örtlich antithetischem Abschiebungscharakter (Lampe 1994). Die Versatzbeträge der daraus resultierenden Bruchschollen nehmen vom Rheinischen Schiefergebirge und dem Kellerwald aus zum Zentrum der Bucht hin zu (Kupfahl 1985, Lampe 1994). Die Störungen lassen sich zwei senkrecht aufeinander stehenden, NW-SE und NE-SW streichenden Systemen zuordnen. Sie sind das Ergebnis der jurassisch/kretazischen Saxonischen Bruchtektonik im Sinne von Stille (1937). Daneben treten auch Nord-Süd verlaufende Verwerfungen auf, die dem generellen Verlauf der Hessischen Senke entsprechen. Sie sind das Ergebnis ausgeprägter Dehnungstektonik, assoziiert mit dem beginnenden Rifting Pangäas (Ziegler 1982). Das Tal der Wohra folgt einem solchen System. Der Einbruch der Frankfurter Bucht und die Bildung der Buntsandsteinschollen – basierend auf der Reaktivierung bereits paläozoisch und mesozoisch angelegter Strukturen – erfolgte im Zuge der Haupthebungsphase des Rheinischen Schiefergebirges im oberen Oligozän (Murawski et al. 1983).

3. Sedimentäre und fazielle Entwicklung

Die Unterteilung der einzelnen Schichtglieder des Buntsandsteins erfolgt mangels geeigneter Fossilführung rein lithologisch anhand markanter sedimentologischer und fazieller Unterschiede im Gestein. Die lithologischen Grenzen der einzelnen Formationen stimmen dabei weitgehend mit sequenz-stratigraphischen Grenzen überein (Geluk & Röhling 1997). Die Unterscheidung der Buntsandstein-Formationen lässt sich neben den Unterschieden im Inventar an Sedimentstrukturen vor allem anhand der Korngrößenunterschiede vornehmen. Basierend darauf lassen sich lithologisch verschiedene Horizonte aushalten, deren biostratigraphische Einstufung aber keinesfalls eindeutig ist. So werden beispielsweise die in der Frankfurter Bucht auftretenden Übergangsschichten in der Literatur sowohl dem Unteren als auch dem Mittleren Buntsandstein zugeordnet (Kulick 1961, Röhling 1991).

Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit dem Unteren Buntsandstein (Calvörde- und Bernburg-Formation), den Übergangsschichten und dem tieferen Mittleren Buntsandstein (Volpriehausen- und Detfurth-Formation; Abb. 2). Der höhere Mittlere Buntsandstein (Hardeggen- und Solling-Formation) sowie der Obere Buntsandstein

(Röt-Formation) stehen weder in den randlichen Gebieten der Frankfurter Bucht an, noch sind sie in der Forschungsbohrung Rosenthal erbohrt, fallen also nicht in den hier untersuchten Aufschlussbereich. Eine Beschreibung dieser Formationen für die westliche Hessische Senke findet sich bei Kupfahl (1985) und Tietze (1997).

3.1 Unterer Buntsandstein (su)

Der Untere Buntsandstein entwickelt sich mit einem deutlichen Korngrößensprung hin zum Feinsandbereich aus den grobsandigen bis grobkiesigen Sedimenten des Bröckelschiefers („Jüngere Konglomerate“ des Zechsteins; Kulick & Paul 1987), die in der Frankfurter Bucht eine Mächtigkeit von ca. 20–30 m erreichen (Kulick 1991). Während die Sedimente des Bröckelschiefers noch eine deutliche Entwässerung des Rheinischen Schiefergebirges in die Frankfurter Bucht hinein in Form von Schwemmfächern und grobklastischen Rinnensedimenten widerspiegeln, fehlen solche Sedimente in den Flusssystemen des Unteren Buntsandsteins (Horn et al. 1993).

Paläofließrichtungsmessungen aus dem Unteren Buntsandstein belegen einen streng nach Norden gerichteten Sedimenttransport (Koslowski 1986). Während also im Zechstein der Kellerwald von den Ablagerungssystemen des Bröckelschiefers noch morphologisch als Schwelle erkannt wurde und die Frankenberger Bucht eine Beckenstruktur bildete, fließen die Flüsse des Unteren Buntsandsteins unbeirrt darüber hinweg (Kulick 1966). Der Zeitabschnitt des Unteren Buntsandsteins zeichnet sich durch eine allgemeine Einebnung des Reliefs aus. Es entsteht eine weite, wenig oder ungegliederte Ebene mit weitflächigen, fluviatilen, limnisch-terrestrischen Sedimentationsräumen, die große Teile des heutigen nordöstlichen Schiefergebirges bedeckte (Horn 1991). Als Liefergebiet dient nicht mehr das Rheinische Schiefergebirge, sondern das im Süden gelegene Vindelizische bzw. Gallische Land (Ziegler 1990).

Eine Untergliederung des Unteren Buntsandsteins in die Calvörde- und Bernburg-Formation ist im Gelände wegen der starken anthropogenen Überprägung durch die Landwirtschaft nicht möglich. Auch das vorhandene Bohrmaterial ermöglicht wegen fehlender fazieller Unterschiede derzeit keine sicheren Kriterien für eine Gliederung im Bereich der westlichen Hessischen Senke (Tietze 1997).

Die Untersuchungen im Gelände und an der Forschungsbohrung Rosenthal weisen die Gesteine des Unteren Buntsandsteins als relativ gut verfestigte, gebankte Feinsandsteine von kräftiger rot-violetter Färbung aus. Auffällig ist neben der Feinkörnigkeit die gute Klas-

sierung und Sortierung der Sandsteine sowie die schlechte Rundung der einzelnen Körner. Die deutliche Ausbildung von feinen Poren am Top des Unteren Buntsandsteins bietet ein prägnantes lithostratigraphisches Kriterium zur Unterscheidung des Unteren Buntsandsteins von den darüber liegenden Übergangsschichten. Sie entsprechen dem „Porensandstein“, der in benachbarten Gebieten (z.B. im Raum Waldeck oder im Raum Marburg sowie auf Blatt 5018 Wetter) von verschiedenen Autoren beschrieben wurde (Kulick 1961, Roth 1966, Kupfahl 1985).

Die untersuchten Gesteine des Unteren Buntsandsteins zeigen einen lebhaften Wechsel in der Lithologie. Lagen von Feinsand alternieren mit Ton- und Silt-Horizonten im Zentimeter- und Dezimeter-Bereich. Die einzelnen Lagen sind lateral nicht kontinuierlich und keilen oft schon nach wenigen Dezimetern seitlich aus. In den Sandhorizonten finden sich häufig kleine Rippeln. Die Ton- und Silt-Horizonte weisen Linsenschichtung und Entwässerungsstrukturen in Form von Sandflammen auf. Daneben finden sich zahlreiche Horizonte mit Trockenrissen. Es gibt keine Anzeichen für Megarippeln oder Sandbänke in den untersuchten Schichten.

Die beobachteten Sedimentstrukturen des Unteren Buntsandsteins am östlichen Rand des Rheinischen Schiefergebirges weisen auf einen verflochtenen Flusstyp mit starker Wassertiefenfluktuation bis hin zum Trockenfallen. Gegen Ende des Unteren Buntsandsteins ist eine Abnahme des Gefälles der Fließwässer zu beobachten, was sich in einem erhöhten Feinanteil (Silt, Ton)

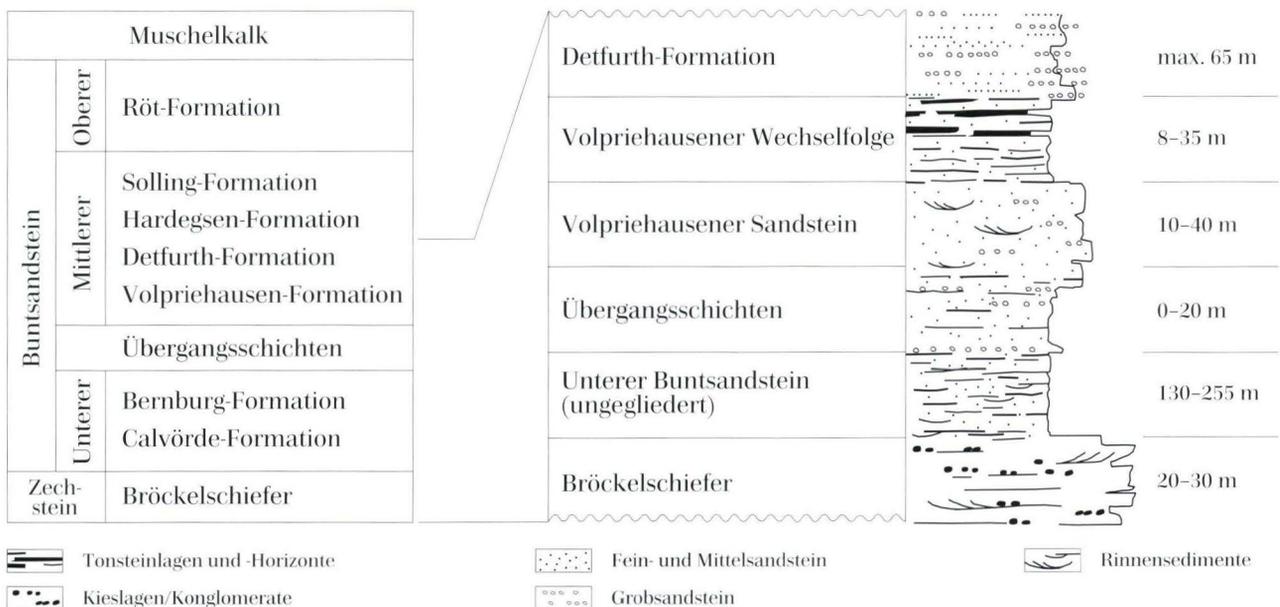


Abb. 2. Gliederung des Buntsandsteins in der Frankenberger Bucht und schematische Darstellung der Lithologie mit Mächtigkeitsangaben (nicht maßstäblich).

im oberen Teil der untersuchten Schichten bemerkbar macht. Die Wasserbedeckung war allgemein gering, wie aus den kleinen Sohlformen in den Sandlagen der Aufschlüsse und Bohrungen hervorgeht. Die Tatsache, dass sowohl die Sand- als auch die Ton-Silt-Horizonte lateral nicht konstant sind, deutet auf eine häufige Verlagerung der Rinnen mit Bildung von Totarmen hin, in denen Silt- und Tonschlamm abgelagert wurde. Ton- und Siltlagen auf Rippelhorizonten und in Rippeltälern zeigen einen zeitweiligen Wasserstillstand an. Der hohe Silt- und Tonanteil, der nach oben hin noch zunimmt, deutet auf ein sehr flaches Relief mit geringer Wasserbedeckung.

Im Gegensatz zu den stratigraphisch jüngeren Formationen des Buntsandsteins gibt es in den untersuchten Gesteinen des Unteren Buntsandsteins der Frankenger Bucht keine Hinweise auf eine äolische Sedimentation.

Die Mächtigkeiten des Unteren Buntsandsteins schwanken innerhalb der Frankenger Bucht z.T. erheblich. Am Ostrand der Bucht errechnet sich aus der Bohrung Schiffelbach, die ca. 1 km nordwestlich von Schiffelbach im Unteren Buntsandstein abgeteufte wurde (R 349894, H 564687, Blatt 5019 Gemünden/Wohra), und dem darüber im Gelände austreichenden Unteren Buntsandstein eine Gesamtmächtigkeit von ca. 220 m (Lampe 1994). Im Zentrum der Bucht nimmt die Mächtigkeit auf 255 m zu (Bohrung Rosenthal). Am westlichen Rand der Frankenger Bucht verringert sie sich wiederum auf 130 m (Kupfahl 1985).

3.2 Übergangsschichten (üs)

Die Übergangsschichten zwischen Unterem und Mittlerem Buntsandstein werden von Röhling (1991) und Lepper & Röhling (1998) für das Nordwestdeutsche Becken (Norddeutsche Tiefebene und Nordsee) beschrieben. Aus der Umgebung des Kellerwaldes sind die Übergangsschichten bisher nur von Kulick (1961) beschrieben worden. Sie werden als „Übergangsschichten“ (Kulick 1961), „Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein“ (Brüning 1986, Röhling 1991) oder „Quickborn-Sandstein“ (Lepper & Röhling 1998) bezeichnet und leiten die Grobschüttung des Volpriehausener Sandsteins bereits im obersten Teil des Unteren Buntsandsteins ein.

Die stratigraphische Zuordnung dieser Schichtfolge ist unklar. Puff & Radzinski (1980) beziehen den „Vorläufer-Sandstein“ im Zentrum des Thüringer Beckens in den Unteren Buntsandstein ein. Röhling (1991) beschreibt den tonreichen „Volpriehausen-Vorläufer-Sandstein“ in zahlreichen Bohrungen in der Nordwestdeutschen Tiefebene. Er gibt ihm den Rang einer Subformation (member) und sieht in ihm die Basis des Volpriehausener Sandsteins. Aufgrund ihrer deutlichen Auskartierbarkeit im Gelände, ihrer regionalen Verbreitung und ihrer li-

thofaziellen Unterschiede zum Liegenden und Hangenden werden die Übergangsschichten in der vorliegenden Arbeit als eine eigene Formation betrachtet, die als Bindeglied zwischen den Gruppen Unterer und Mittlerer Buntsandstein fungiert.

Im Arbeitsgebiet machen sich die Übergangsschichten örtlich durch eine Geländestufe bemerkbar, an deren Basis tiefrote, mittel- bis grobkörnige, schwach zementierte Lesesteine mit gut gerundeten Quarzkörnern zu finden sind („Kaviarsand“). Die typische Ausbildung

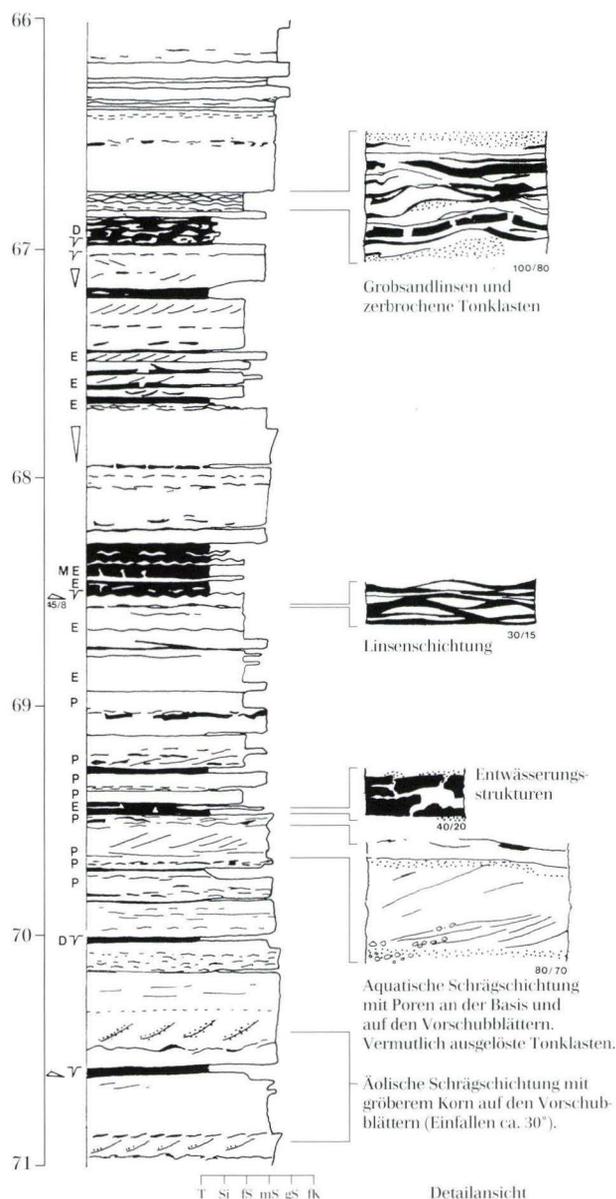


Abb. 3. Profilaufnahme der Forschungsbohrung Rosenthal: 66–71 m unter GOK. Exemplarische Darstellung der Übergangsschichten. Korngröße und Einschaltungen von äolischen Sedimenten weisen bereits auf den Mittleren Buntsandstein hin. Das Strukturinventar hingegen spricht für den Unteren Buntsandstein. (Legende siehe Abb. 10)

der Übergangsschichten weist fein- bis mittelkörnige, tief- bis fleischrote, gut zementierte Sandsteine mit einem ausgeprägten Anteil an Ton und Silt auf, was die Unterscheidung zum Unteren Buntsandstein z.T. erschwert. Die Sedimentstrukturen in den Übergangsschichten und der starke Ton- und Siltanteil sprechen für eine genetische Verwandtschaft mit dem Unteren Buntsandstein. Die Einschaltung von Mittelsand-Horizonten und äolischen Dünen (s.u.) weist jedoch stark auf das Faziesmilieu des Mittleren Buntsandsteins hin und zeigt eine allmähliche Änderung der Ablagerungsbedingungen an.

In der Forschungsbohrung Rosenthal wird das vielseitige Strukturinventar der Formation deutlich (Abb. 3). In

den Ton- und Siltlagen kommen Linsen- und Rippelschichtung sowie Deformations- und Entwässerungsstrukturen in Form von Injektionsrissen, „convolute bedding“ und Trockenrissen vor. In den Fein- bis Mittelsandsteinen treten häufig Aufarbeitungshorizonte mit Tonscherben und Tongallen auf. Diese sind z.T. herausgelöst und bilden einen sekundären Porenraum mit durchschnittlich 1 cm großen Hohlräumen. In einzelnen Bänken weisen die Sandsteine sowohl planare als auch tangentiale Schrägschichtung auf. Zudem gibt es zahlreiche Hinweise auf äolische Ablagerungen in Form kleiner invers gradierter größerer Sandlawinen in der Schrägschichtung, die sich als Relikte äolischer Dünen (Dünenfüße) interpretieren lassen. Die für die Volpriehausen- und Detfurth-Formation der Frankener Bucht typische Interdünenfazies ist in den Übergangsschichten nicht ausgebildet, was darauf schließen lässt, dass es sich hier um einzelne äolische Dünen in einem sonst überwiegend aquatisch geprägten Ablagerungsraum handelt.

Die Ton- und Silthorizonte sowie Kleinrippeln und Sandlinsen sprechen für ein energiearmes Ablagerungsmilieu. Demgegenüber stehen die Entwässerungsstrukturen (z.B. Injektionsrisse) für eine hohe Sedimentationsrate. Ausgehend von diesen Beobachtungen zeichnen sich die Übergangsschichten durch Wassertiefenfluktuation, sich verlagernde Flussrinnen und Schwankungen in der Sedimentfracht aus, was sich in den starken lateralen Faziesunterschieden widerspiegelt. Die wechselnde Transportenergie der Flüsse zeigt sich auch im Korngrößenspektrum und in den Sedimentstrukturen. Eine Zunahme der Korngröße und die im Verhältnis zum Unteren Buntsandstein größeren Sohlformen (z.B. mächtigere Rinnenfüllungen) sprechen schließlich für eine graduelle Zunahme der Transportenergie bzw. für die Bildung stabilerer Rinnen im Vergleich zum Unteren Buntsandstein.

Verschiedene Autoren postulieren zwischen dem Unteren und Mittleren Buntsandstein eine Schichtlücke: Diese wird bei Ausbildung des Quickborn-Sandsteins als Q-Diskordanz bezeichnet (an der Basis des Quickborn-Sandsteins / der Übergangsschichten), bzw. als V-Diskordanz an der Basis der Volpriehausen-Formation (Trusheim 1961, Brüning 1986, Röhling 1991, Aigner & Bachmann 1992, Lepper & Röhling 1998). Diese Diskordanzen lassen sich jedoch weder im Gelände noch in der Bohrung belegen. Hinweise auf eine plötzliche Änderung des Ablagerungsmilieus, wie beispielsweise markante Korngrößensprünge oder ein Wechsel der sedimentologischen Architekturelemente, finden sich nicht. Auch gibt es keine Hinweise auf Erosionshorizonte oder Schichtlücken. Die Übergangsschichten leiten vielmehr graduell vom Unteren zum Mittleren Buntsandstein über (Abb. 4).

Die Mächtigkeit der Übergangsschichten schwankt stark. Sie werden südlich von Schiffelbach und in der zentralen Bucht (Forschungsbohrung Rosenthal) bis zu

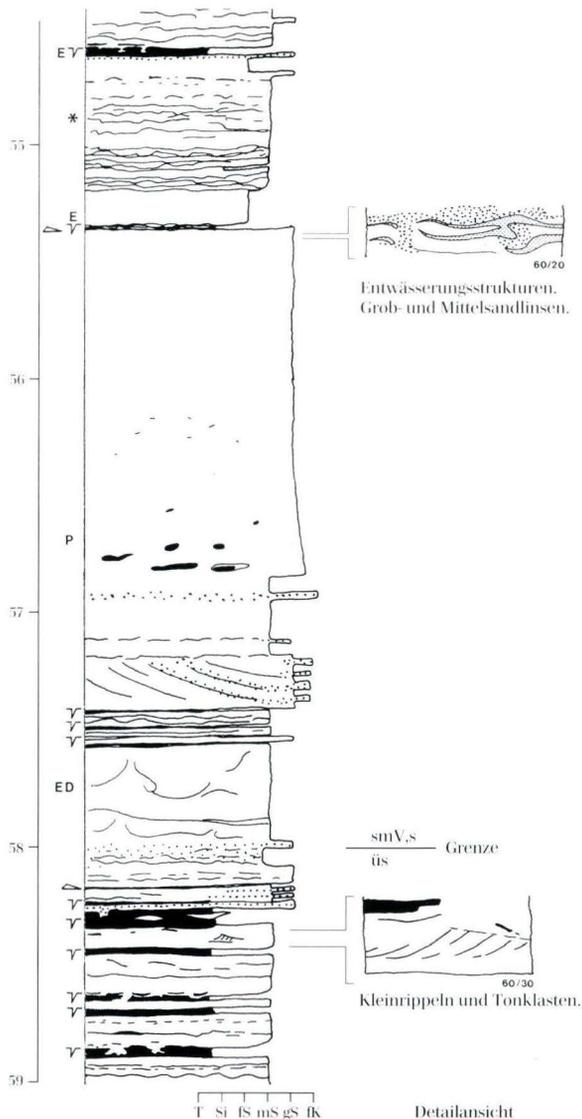


Abb. 4. Profilaufnahme der Forschungsbohrung Rosenthal: 54,5–59 m unter GOK: Grenze Übergangsschichten/ Volpriehausener Sandstein. Deutlich wird die Zunahme der Korngröße und eine gleichzeitige Abnahme des Strukturinventars. (Legende siehe Abb. 10)

20 m mächtig, dünnen zum Kellerwald hin aus und fehlen schließlich am südlichen und südöstlichen Kellerwaldrand (Lampe 1994).

3.3 Mittlerer Buntsandstein (sm)

In der östlichen Frankenger Bucht und in der Forschungsbohrung Rosenthal sind von den vier Formationen des Mittleren Buntsandsteins (Volpriehausen, Detfurth, Hardeggen, Solling) die gesamte Volpriehausen-Formation und Teile der Detfurth-Formation abgeschlossen.

3.3.1 Volpriehausen-Formation (smV)

Die Volpriehausen-Formation gliedert sich in der Frankenger Bucht in zwei Subformationen: den Volpriehausener Sandstein (smV,s) und die darüber liegende Volpriehausener Wechselfolge (smV,st). Verschiedene Autoren schlagen für die zentrale Hessische Senke eine Dreiteilung der Formation vor und fügen als dritte Subformation oberhalb der Wechselfolge die „*Avicula*-Schichten“ hinzu (z.B. Kulick 1966, Horn 1991, Röhling 1991). Auch für den westlichen Bereich der Hessischen Senke wird das „*Avicula*-Hauptlager“ beschrieben (Wycisk 1984). In diesen als stark bioturbat bezeichneten Schichten tritt die von Schindewolf (1928) ausführlich behandelte und paläontologisch untersuchte Bivalve *Avicula purchisoni* GEINITZ auf. Im Arbeitsgebiet ließen sich die *Avicula*-Schichten nicht nachweisen. Es besteht die Möglichkeit, dass sie hier – beispielsweise aufgrund der randfaziellen Lage des Untersuchungsgebietes oder wegen einer erosionsbedingten Diskordanz – nicht ausgebildet sind.

Die Gesamtmächtigkeit der Volpriehausen-Formation schwankt zwischen 30 m am südöstlichen Kellerwaldrand (Kartiergebiet), ca. 25 m am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges (Kupfahl 1985) und ca. 45 m im Zentrum der Frankenger Bucht (Forschungsbohrung Rosenthal).

Volpriehausener Sandstein (smV,s)

Im Arbeitsgebiet setzt der Volpriehausener Sandstein über den Übergangsschichten, bzw. bei Nichtausbildung der Übergangsschichten direkt über dem Unteren Buntsandstein ein. Er bildet eine deutliche, durch den Wechsel hin zu größeren Korngrößen bedingte morphologische Geländestufe, die sich streckenweise über hunderte von Metern im Gelände verfolgen lässt.

Bei den Gesteinen des Volpriehausener Sandsteins handelt es sich um mittel- bis grobsandige, blassorange bis bräunlichrote Sandsteine mit einem sehr geringen Tonanteil. Aus der Forschungsbohrung Rosenthal (Abb. 5) und Geländeaufschlüssen, wie beispielsweise einer

Sandgrube südwestlich der Ortschaft Schiffelbach (Abb. 6), geht hervor, dass das Strukturinventar im Vergleich zu den Übergangsschichten und zum Unteren Buntsandstein verhältnismäßig arm ist. Die Sedimente sind vorwiegend horizontal geschichtet. Der Feinkornanteil ist verhältnismäßig gering und beschränkt sich auf einzelne feine Sand- und Siltlagen, in denen Kleinrippeln auftreten. Selten kommen Entwässerungsstrukturen und Aufbereitungshorizonte mit kleinen Tonklasten vor. Daneben gibt es Bereiche mit massiven, weitgehend unstrukturierten Sandsteinbänken, in die lagenweise Porenhorizonte eingeschaltet sind. Schrägschichtungskörper treten nur untergeordnet auf. Diese Schrägschichtung ist z.T. mit grobem, invers gradiertem Korn auf den Leebältern verbunden, was auf äolische Dünen hinweist. Neben diesen Dünen finden sich auch typische Interdünen-sedimente. Es handelt sich dabei um parallelgeschichtete Sandsteine, die sich durch einen Wechsel von Lagen gutgerundeter grober Quarkörner mit Feinsandlagen auszeichnen. In drei Geländeaufschlüssen (Lampe 1994)

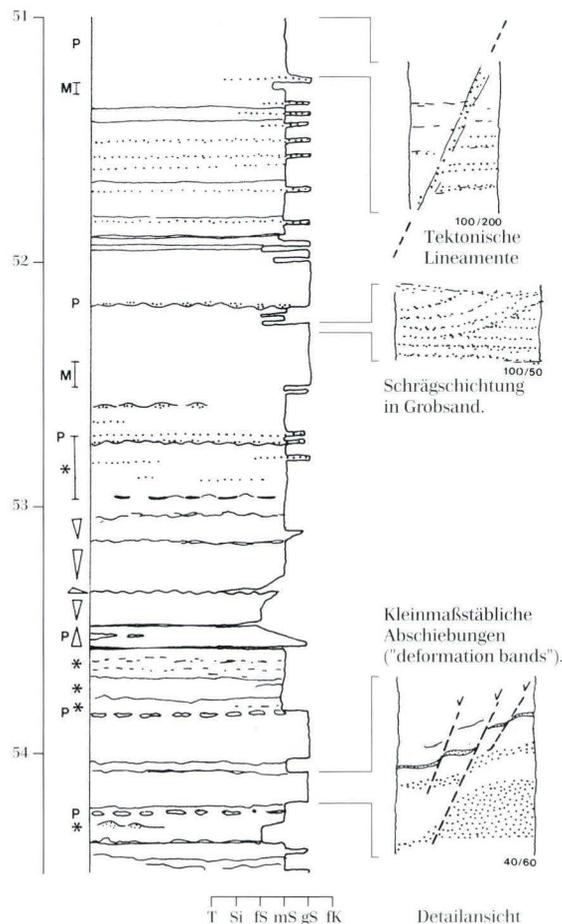


Abb. 5. Profilaufnahme der Forschungsbohrung Rosenthal: 51–54,5 m unter GOK. Exemplarische Darstellung des Volpriehausener Sandsteins. Überwiegend parallelgeschichtete Sandsteine mit zahlreichen Hinweisen auf eine äolische Sedimentation. (Legende siehe Abb. 10)

konnte beobachtet werden, dass in die überwiegend parallelgeschichteten Sandsteine örtlich Flussrinnen erosiv eingeschnitten sind. Die Vermessung von Rippel-Flächen einerseits und der Rinnenbasis einiger Flussrinnen andererseits ergab Fließrichtungen nach ENE oder gar SSE (Abb. 6). Damit weisen zumindest einige Flüsse der Volpriehausener-Formation in der östlichen Frankenger Bucht eine von der nordgerichteten Transportrichtung des gesamten Buntsandsteinbeckens der Hessischen Senke abweichende Fließrichtung auf. Die Paläoflößrichtung der Flüsse lässt darauf schließen, dass die Kellerwaldschwelle zu Beginn des Mittleren Buntsandsteins wieder als morphologisches Hindernis vorhanden war.

Im Gegensatz zu den liegenden Übergangsschichten zeichnet sich der Volpriehausener Sandstein durch eine relativ eintönige Sedimentologie aus. Die in die weitgehend parallelgeschichteten Sandsteine eingeschnittenen Rinnensedimente streichen im Verhältnis zu ihrer Mächtigkeit sehr breit aus, was auf einen verflochtenen Flusstyp hinweist. Allerdings gibt es keine Hinweise auf eine starke laterale Verlagerung der einzelnen Rinnen. Es muss sich vielmehr um relativ stabile Rinnen gehandelt haben, die mehrfach wieder aufbereitet wurden (Abb. 6). Die massigen Rinnensedimente weisen im Vergleich zu den Übergangsschichten auf eine zeitweise erhöhte Transportenergie hin.

Die parallelgeschichteten Sandsteine, in die die Rinnen eingeschnitten sind, machen den Großteil des Volpriehausener Sandsteins aus. Das Strukturinventar dieser Sandsteine (Ton- und Silthäutchen, Kleinrippeln, Entwässerungsstrukturen) spricht für eine Ablagerung in flachem, langsam fließendem, phasenweise stehendem Wasser.

Insgesamt muss es sich bei dem Ablagerungsraum des Volpriehausener Sandsteins um eine flache Sandebene vom Sabkha-Typ gehandelt haben, die zeitweise von Wasser bedeckt war und die von einzelnen Flussrinnen durchzogen wurde. Über diese Sandebene sind große Mengen feinkörnigen Sandes mit dem Wind verfrachtet worden und haben äolische Dünen gebildet. Sie sind in den Gesteinen des Volpriehausener Sandsteins als Relik-

te (Dünenfüße) erhalten. Untersuchungen von Koslowski (1986) haben ergeben, dass sich die äolische Sedimentation im Volpriehausener Sandstein auf den Bereich des Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges beschränkt.

Die Mächtigkeit des Volpriehausener Sandsteins beträgt zwischen 10 m am südlichen Kellerwaldrand und ca. 40 m südwestlich Schiffelbach. In der Forschungsbohrung Rosenthal ist die Folge mit ca. 12 m erbohrt. Für den westlichen Teil der Frankenger Bucht macht Kupfahl (1985) Mächtigkeitsangaben von 15–20 m.

Volpriehausener Wechselfolge (smV, st)

Morphologisch setzt die Volpriehausener Wechselfolge mit einer deutlichen Verflachung des Geländes ein. Der Grobsandanteil nimmt stark ab und es schalten sich zunächst einzelne Tonlagen, später Tonhorizonte von mehreren Zentimetern Mächtigkeit ein. Zum Hangenden nimmt der Tonanteil wieder ab, die plattige Absonderung der Gesteine tritt zurück und es setzen massigere Sedimente ein. Vom Strukturinventar her ähneln die Schichten der Volpriehausener Wechselfolge denen der Übergangsschichten und zeigen damit ein von ihrem liegenden Schichtglied, dem Volpriehausener Sandstein, abweichendes Ablagerungsmilieu an. Innerhalb der Wechselfolge lässt sich eine Zweiteilung beobachten.

Die untere Einheit der Volpriehausener Wechselfolge wird von fining-up Zyklen aufgebaut. Diese Zyklen sind maximal 1 m mächtig und weisen ein vielfältiges Strukturinventar auf (Abb. 7). Dazu gehören (z.T. gegensinnig einfallende) Schrägschichtung, Rippelschichtung, Aufbereitungshorizonte, Sandflammen und Linsenschichtung sowie Trockenrisse zum Top der Zyklen hin. Eingeschaltet ist auch hier vereinzelt eine äolische Schrägschichtung mit Mächtigkeiten im cm-Bereich. Diese Schrägschichtungskörper unterscheiden sich von der aquatischen Schrägschichtung durch das Auftreten invers gradiert Sandlawinen größerer Korngröße auf den Leehängen. Die Sohlformen sind insgesamt klein und erreichen maximal einige Zentimeter bis Dezimeter.

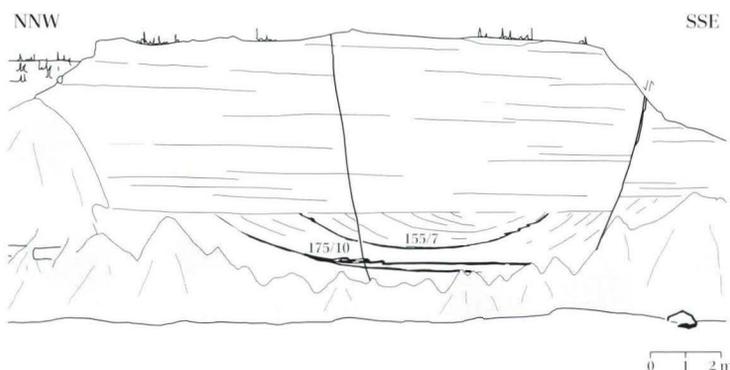


Abb. 6. Sandgrube 1 km südwestlich Schiffelbach; R 349865, H 564945 – Blatt 5019 Gemünden/Wohra Volpriehausener Sandstein (smV, s) Aufgeschlossen ist eine Flussrinne in parallelgeschichtetem Sandstein. Sichtbar sind verschiedene Stadien der Rinnenfüllung. Durch die Tonhorizonte (schwarz) wird deutlich, dass die Rinne nach oben hin enger und kleiner wird. Ein möglicher Grund ist das Aufsanden der Rinne durch eingewehten Sand. Die Fließrichtung dieses Flusses weist nach SSE (Messwerte der Fließrichtung an der Rinnenbasis).

Der Ablagerungsraum zeichnet sich durch eine überwiegend bi- oder polymodale Strömung aus, wie aus der gegensinnig einfallenden Schrägschichtung einzelner Horizonte deutlich wird. Da die Sohlformen klein sind und die Mächtigkeit der einzelnen Bänke gering ist, kann man von einer Ablagerung unter Flachwasserbedingungen mit zeitweiligem Trockenfallen (Trockenrisse) ausgehen.

Die Transportenergie des fließenden Wassers muss von unterschiedlicher Intensität gewesen sein. Aufbereitungshorizonte mit Tonklasten, die eine Größe von einigen Zentimetern erreichen können, sowie Entwässerungsstrukturen in Form von Injektionsrissen sprechen für eine hohe Fließgeschwindigkeit und eine hohe Sedimentationsrate. Kleinrippeln und Linsenschichtung dagegen weisen auf ruhige Ablagerungsbedingungen hin. Tonablagerungen und symmetrische Rippeln auf den Schichtoberflächen schließlich sind Indikatoren für längere Perioden stehenden Gewässers. Aufgrund der klei-

nen Sohlformen und der wechselnden Ablagerungsbedingungen lassen die Schichten dieser unteren Einheit einen schnellen lateralen und vertikalen Fazieswechsel vermuten. Im Gegensatz zum Volpriehausener Sandstein gibt es in der Wechselfolge keine Hinweise auf stabile große Flussrinnen. Das Ablagerungsmilieu deutet vielmehr auf ein System kleiner, flacher, sich häufig verlagernder Rinnen mit teils fließendem, teils ruhigem oder gar stehendem Gewässer.

Im oberen Teil der Wechselfolge sind die Sandsteine deutlich schlechter zementiert als in der unteren Einheit. Sie sind oft strukturlos und homogen. Schrägschichtungskörper treten nur sehr untergeordnet auf. Ebenso sind kaum noch Aufbereitungshorizonte oder Entwässerungsstrukturen vertreten. Die Ton- und Silthorizonte erreichen hier Mächtigkeiten bis zu 40 cm (Abb. 8). Sie weisen z.T. Sandlagen auf den Schichtflächen auf, wobei diese Sandlagen Rippeln bilden können, die teilweise in Form von Linsenschichtung erhalten sind. Eine Zykli-

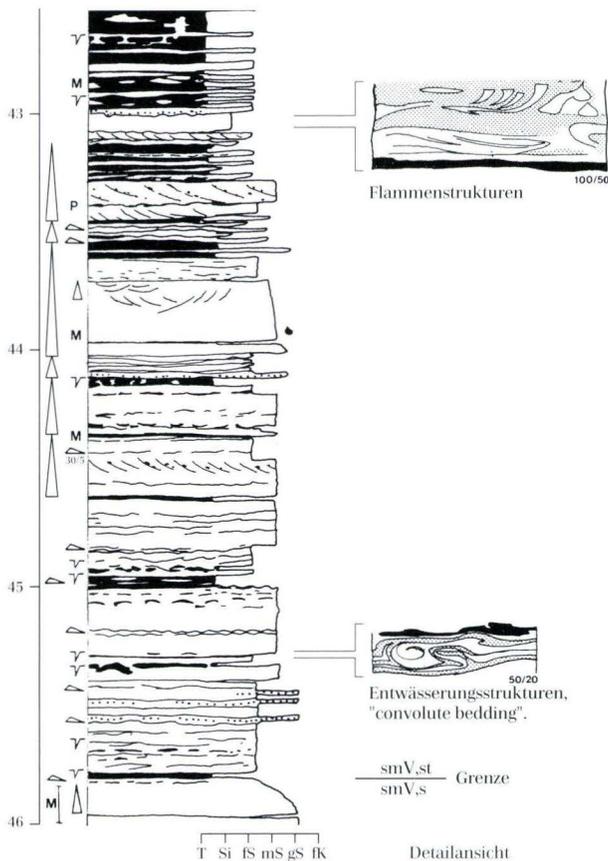


Abb. 7. Profilaufnahme der Forschungsbohrung Rosenthal: 42,5–46 m unter GOK. Exemplarische Darstellung der Volpriehausener Wechselfolge mit Grenze zum Volpriehausener Sandstein. In diesem unteren Abschnitt der Wechselfolge ist der Tonanteil verhältnismäßig hoch, die einzelnen Tonhorizonte sind jedoch geringmächtig. Die Folge weist kleine fining-up Zyklen auf. (Legende siehe Abb. 10)

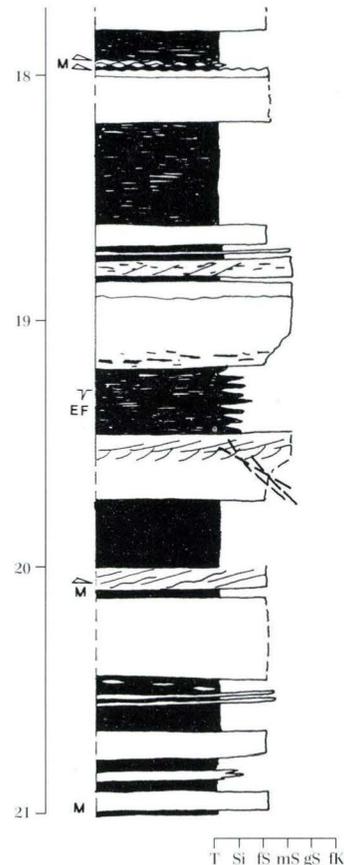


Abb. 8. Profilaufnahme der Forschungsbohrung Rosenthal: 17,7–21 m unter GOK. Exemplarische Darstellung der Volpriehausener Wechselfolge. In diesem oberen Abschnitt der Wechselfolge sind keine Zyklen mehr zu erkennen. Die Tonhorizonte erreichen Mächtigkeiten von bis zu 40 cm. (Legende siehe Abb. 10)

zität ist nicht mehr feststellbar. Wie auch im Liegenden ist hier das Ablagerungsmilieu durch einen periodischen Wechsel von bewegtem und ruhigem Wasser gekennzeichnet. Allerdings spiegeln gleichsinnig einfallende Schichtungskörper eine überwiegend einseitig gerichtete Strömung wider. Die z.T. recht mächtigen Ton-Silt-Horizonte sprechen für langanhaltende Perioden stehenden Wassers mit einem geringen Sandeintrag.

Die gesamte sedimentäre Abfolge der Volpriehäuser Wechselfolge lässt von der Basis zum Top eine Abnahme des Gefälles der Fließgewässer vermuten. Gibt es im unteren Teil der Wechselfolge noch zahlreiche Hinweise auf fließendes Gewässer in Form flacher Rinnen, so ist der obere Abschnitt durch langanhaltende Perioden stehenden Wassers gekennzeichnet. Die dünnen Rippellagen und die Linsenschichtung in den Tonhorizonten deuten auf phasenweise wellenbewegtes oder langsam fließendes Wasser hin. Das Relief des Ablagerungsraumes muss insgesamt sehr ausgeglichen gewesen sein, so dass sich ein Netz kleiner, sehr flacher Rinnen bilden konnte, bis hin zur Bildung von Seen. Diese Situation wird für die Volpriehäuser Wechselfolge von Koslowski (1986) auch im Raum Marburg beschrieben.

Die Mächtigkeit der Wechselfolge beträgt am Kellerwaldrand ca. 20 m und im Zentrum der Frankenberger Bucht (Forschungsbohrung Rosenthal) ca. 35 m. Für den westlichen Rand der Bucht beschreibt Kupfahl (1985) Mächtigkeiten von 8–10 m. Auffällig ist auch hier eine starke Schwankung der Mächtigkeiten und eine generelle Zunahme zum Zentrum der Bucht hin.

3.3.2 Detfurth-Formation

Die Lithologie der Detfurth-Formation ist im Vergleich zu den liegenden Formationen verhältnismäßig eintönig. Es handelt sich im Wesentlichen um blässorange, gelbliche oder weiße Fein- bis Grobsandsteine, die stark zum Absanden neigen, was auf eine schwache Zementierung schließen lässt. Dies macht sich in der Frankenberger Bucht morphologisch in den deutlich abgeflachten Kuppen aus Detfurth Sandstein bemerkbar. Aus der Forschungsbohrung Rosenthal wird das Strukturinventar der Formation deutlich (Abb. 9). Die bis zu einigen Metern mächtigen Sandsteinbänke sind überwiegend horizontallaminiert und weisen neben einem kleinmaßstäblichen Wechsel aus feinen und groben Kornlagen vereinzelt kleine symmetrische aquatische Rippeln auf sowie äolische Adhäsionsrippeln. Der Tonanteil der Formation ist sehr gering und beschränkt sich auf dünne dunkelrote oder grünliche Bänder und Häutchen. Nach Angaben von Tietze (1997) macht dieser Sedimenttypus in der östlichen Hessischen Senke 85–90 % der Formation aus. Einschaltet in diese parallel laminierten Sedimente

tritt in einigen Bänken eine steile äolische Schrägschichtung auf. Sie gibt einen Hinweis auf die Bildung äolischer Dünen, von denen in den Sedimenten der Detfurth-Formation nur die Basis von wenigen Zentimetern bis hin zu mehr als 2 m Mächtigkeit erhalten ist.

Die äolische Sedimentation, die sich bereits in den Übergangsschichten andeutete und im Volpriehäuser Sandstein ein erstes Maximum erreichte, ist in der Detfurth-Formation der westlichen Hessischen Senke vorherrschend. Die parallel geschichteten Sandsteine der Detfurth-Formation lassen auf eine Ablagerung in weitläufigen und mächtigen Interdünenbereichen und Sandebenen schließen. Die Sedimentstrukturen deuten jedoch darauf hin, dass der Grundwasserspiegel hoch, bzw. der Ablagerungsraum zeitweilig unter sehr flacher Wasserbedeckung gestanden haben muss. In der Forschungsbohrung Rosenthal finden sich zahlreiche Hinweise auf eine nass-äolische Sedimentation, wie Adhäsionsrippeln oder grobe, windverblasene Sandkörner, die durch die Bodenfeuchtigkeit kohäsiv an den fein- bis mittelsandigen Untergrund gebunden sind. Die feinen Tonhäutchen und kleine symmetrische Rippeln lassen ferner auf zeitweilige Stillwasserbedingungen schließen.

Über diese Ebene sind mit dem Wind große Mengen Sand transportiert worden, und es bildeten sich Dünen. Ihre Basis ist in den mächtigen äolischen Schrägschichtungskörpern überliefert. Schrägschichtungsmessungen

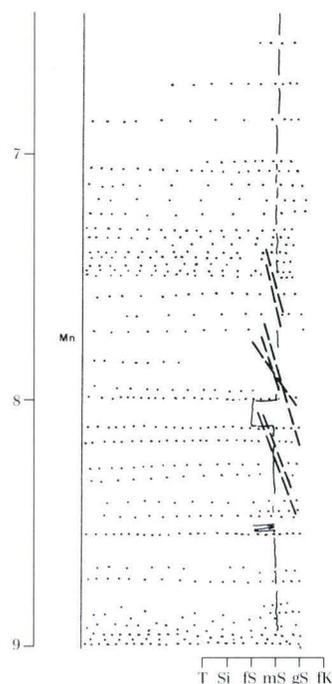


Abb. 9. Profilaufnahme der Forschungsbohrung Rosenthal: 6,5–9 m unter GOK. Exemplarische Darstellung der Detfurth-Formation. Überwiegend parallel geschichtete Sandsteine aus einem Interdünenbereich. Die kohäsiv haftenden groben Sandkörner auf den Schichtflächen lassen auf eine nass-äolische Sedimentation schließen. (Legende siehe Abb. 10)

Sedimentstrukturen	Detailansichten	
/// Tangentiale Schrägschichtung	40/80	Kantenlänge der Ausschnittvergrößerung in mm (40 breit/80 hoch)
/// Planare Schrägschichtung		verhältnismäßig grober Sand
oo Poren		verhältnismäßig mittlerer Sand
•• Tonklasten		verhältnismäßig feiner Sand
△ Rippeln (x/y: Kammabstand/Kammhöhe)		Ton/Silt
∇ Trockenrisse		Glimmer
△ "fining-upward"-Zyklus		
∇ "coarsening-upward"-Zyklus		
◇ Gipskristalle auf Klufflächen		
D Deformation	Korngröße	Bemerkungen
P Porenhorizonte	T Ton	* entfärbt/gebleicht
F Flammenstruktur	Si Silt	Kerndeformation oder -verlust
E Entwässerungsstruktur	fS Feinsand	/ tektonische Linien
Mn Mangan (Flecken oder Schwarten)	mS Mittelsand	┌ Bereichsangabe
M auffällige Hellglimmerführung	gS Grobsand	
	fK Feinkies	
	Die Korngrößenskala gibt die Durchschnittskorngröße des jeweiligen Bohrkernabschnittes an.	

Abb. 10. Legende zu den Bohrprofilen der Forschungsbohrung Rosenthal (R 348759, H 564972 – Blatt 5018 Wetter; Teufenangaben in Meter unter GOK).

von Horn et al. (1993) ergaben einen Sandtransport aus Südost und Südwest mit einer mittleren Transportrichtung nach Norden. Diese Form der Dünenbildung scheint sich nach bisherigen Untersuchungen auf einen Streifen entlang des Westrandes der Hessischen Senke zu beschränken (Horn et al. 1993).

In den Detfurth-Sedimenten der östlichen Frankfurter Bucht konnten keinerlei Hinweise auf eine fluviatile Sedimentation beobachtet werden. Weiter südlich, im Raum Marburg, treten hingegen aquatische Rinnen-

sedimente im Bereich von Sandwadis auf, die im Gegensatz zu den rein äolischen Sedimenten gut zementierte, feste Sandsteinbänke bilden (Tietze 1997).

Die Detfurth-Formation ist am südlichen Kellerwaldrand nur in einem Grabenbruch auf dem „Lindenborn“ mit ca. 12 m Mächtigkeit anstehend und in der Forschungsbohrung Rosenthal mit einer Mächtigkeit von 12 m unter Bohransatzpunkt erbohrt. Kupfahl (1985) gibt für den südwestlichen Teil der Bucht eine Gesamtmächtigkeit der Detfurth-Formation von bis zu 65 m an.

4. Diskussion

Im Gegensatz zu den Sedimenten der zentralen Hessischen Senke zeigen die Folgen am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges ein deutlich randnahes Ablagerungsmilieu an. Es fehlen ganze Schichtglieder, wie etwa die *Avicula*-Schichten der höheren Volpriehausen-Formation. Auch liegen die Folgen durchgehend in verringerter Mächtigkeit vor. Ein Überblick über die Mächtigkeiten des Unteren und tieferen Mittleren Buntsandsteins Deutschlands in einem annähernd Ost-West gerichteten Schnitt (Tab. 1) verdeutlicht die Mächtigkeitsunterschiede zwischen den randfaziellen Ablagerungsräumen am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges und der zentralen Hessischen Senke.

Röhling (1991) und Lepper & Röhling (1998) führen die enormen Mächtigkeitschwankungen vor allem im Mitt-

leren Buntsandstein des Germanischen Beckens auf eine teilweise Erosion der Sedimente unterhalb der Q-Diskordanz (Basis der Übergangsschichten), der V-Diskordanz (Basis der Volpriehausen-Formation), der D-Diskordanz (Basis der Detfurth-Formation) und der H-Diskordanz (Basis der Solling-Formation) zurück.

Die Übergangsschichten stellen eine Besonderheit in der stratigraphischen Abfolge des Buntsandsteins in der östlichen Frankfurter Bucht dar. Die Mächtigkeitschwankungen bzw. das Nichtvorhandensein der Übergangsschichten am südlichen Kellerwaldrand lassen zwei Thesen zu:

- Eine bereits vorgegebene Beckenstruktur in der Frankfurter Bucht führt dazu, dass die Sedimentakkumulation und somit die Mächtigkeit im Beckeninne-

Tab. 1. Übersicht über die Mächtigkeiten im Buntsandstein der Hessischen Senke und des Thüringer Beckens in einem ungefähren E-W Profil nach verschiedenen Autoren (Angaben in Metern)

	Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges			Zentrale Hessische Senke			Eichsfeld-Altmark-Schwelle	Thüringer Becken	
Raum	Frankenberger Bucht		Raum Marburg	Waldeck	NW-dt. Flachland u. dt. Nordsee	Hann.-Mündeln	Bad Hersfeld	Eschwege	Thüringen
Autor	Kupfahl 1985	Lampe 1994	Koslowski 1986	Kulick 1961	Röhling 1991	Wycisk 1984 Lepper 1979	Koslowski 1986	Wycisk 1977 in 1984	Puff & Radzinski 1980, Puff 1995
smD	60-65		60		50-70	110-120	55-60	20-25	30-60
smV	23-65	30-60	28-70	105-115	270-220	220-230	100	60-75	80-110
üs		0-20		10					
su	125-130	255 (FBR)	100	230-275	> 300		> 200		200-350

ren am größten ist, wohingegen die einzelnen Einheiten randlich ausdünnen bzw. nicht ausgebildet sind (z.B. Kulick 1966). Eine gleichzeitige Subsidenz des Beckens kann diesen Effekt noch verstärken.

- Da sich im Bereich von Schwellengebieten sedimentäre Diskordanzen besonders deutlich widerspiegeln (Aigner & Bachmann 1992), besteht die Möglichkeit, dass die Übergangsschichten im Bereich der Kellerwaldschwelle unter der V-Diskordanz erodiert wurden. Dies spräche für eine zur Zeit des Mittleren Buntsandsteins ausgeprägte Schwelle im Bereich des Kellerwaldes.

Als Hinweis auf eine Diskordanz unterhalb der Volpriehausen-Formation in der Frankenberger Bucht könnte einzig das randliche Fehlen der Übergangsschichten am südlichen Kellerwaldrand gedeutet werden. Da sich in den Übergangsschichten jedoch ein kontinuierlicher Sedimentationsablauf abzeichnet, der lückenlos vom Unteren zum Mittleren Buntsandstein überleitet, ist sowohl die Q-Diskordanz (Lepper & Röhling 1998) als auch die V-Diskordanz im Bereich der Frankenberger Bucht unwahrscheinlich. Das Fehlen der Übergangsschichten ist hier vielmehr auf ein ausgeprägtes Paläorelief zurückzuführen. Das Fehlen der *Avicula*-Schichten hingegen (Lampe 1994) sowie der abrupte Wechsel in der Sedimentologie und der faziellen Entwicklung der Schichten an der Wende Volpriehausen-/Detfurth-Formation sprechen für ein Vorhandensein der D-Diskordanz.

Ausgehend vom Unteren Buntsandstein, dessen nord-

gerichtete Fließrichtungen deutlich zeigen, dass die Kellerwaldschwelle eingeebnet war, zeigen die Sedimente des Mittleren Buntsandsteins, dass die Kellerwaldschwelle zu diesem Zeitpunkt bereits wieder vorhanden war. Deutlich wird dies in der Mächtigkeitsreduzierung der Schichten zum heutigen Kellerwald- und Schiefergebirgsrand hin sowie aus den gemessenen Fließrichtungen einzelner Flussrinnen, die nicht mehr ausschließlich nach Norden weisen. Dies widerspricht der Annahme, dass die Kellerwaldschwelle seit dem Zechstein eingeebnet war und die Frankenberger Bucht ihren Buchtcharakter einzig der jüngeren Tektonik im Zuge der oligozänen Haupthebungsphase des Rheinischen Schiefergebirges verdankt (Kulick 1991).

Die Mächtigkeitschwankungen und die faziellen Unterschiede der einzelnen Formationen sind vielmehr auf Diskontinuitäten in der Subsidenzrate des Beckens (gesteuert durch eine thermisch bedingte Subsidenz und eine gesteigerte rift-bedingte tektonische Instabilität der Kruste; Lepper & Röhling 1998), einen unterschiedlich hohen Sedimentandrang sowie unterschiedliche Sedimentationsraten zurückzuführen. Demnach wäre die Frankenberger Bucht das Ergebnis einer Kombination aus einem triassisch angelegten tektonischen Becken einerseits und einem subsidenzgesteuerten Sediment-Becken andererseits. Ihren heutigen überwiegend bruchtektonisch geprägten Buchtcharakter verdankt die Frankenberger Bucht schließlich der oligozänen Hebung der Rheinischen Masse und des Kellerwaldhorstes (Murawski et al. 1983, Kulick & Paul 1987, Horn et al. 1993).

5. Schlussfolgerungen

Die untersuchten Schichten der östlichen Frankenberger Bucht geben einen Einblick in die Ablagerungsbedingungen und Sedimentationsprozesse des Unteren und Mittleren Buntsandsteins.

Auffällig sind zunächst die großen Unterschiede in der Mächtigkeit der Formationen und ihrer Subformationen innerhalb der Frankenberger Bucht. In den Randbereichen der Frankenberger Bucht ist die Mächtigkeit der

untersuchten Formationen im Vergleich zum zentralen Bereich der Bucht z.T. erheblich reduziert. Hier deutet sich eine bereits vor der Ablagerung des Buntsandsteins angelegte Beckenstruktur an (Kulick 1991, 1966, Kulick & Paul 1987). Das im Perm bestehende Kellerwaldhoch soll im Zuge einer kontinuierlichen Verebnung bereits im Bröckelschiefer ausgeglichen sein (Kulick & Paul 1987, Horn et al. 1993). Die Bildung von Totarmen, das häufige Trockenfallen der Sedimente und die abnehmende Transportenergie des höheren Unteren Buntsandsteins sind ein Indiz für die Verflachung des Reliefs. Die Einebnung des Kellerwaldhochs wird zudem durch die streng nach Norden gerichteten Transportrichtungen im Unteren Buntsandstein belegt (Kosłowski 1986).

Dies muss sich an der Wende Unterer/Mittlerer Buntsandstein geändert haben. Die Flusssysteme des Volpriehausener Sandsteins weisen zwar eine hauptsächlich nordgerichtete Fließrichtung auf, jedoch hat die Vermessung einiger Flussrinnen in der östlichen Frankenger Bucht deutlich östliche und sogar südliche Fließrichtungen ergeben (Horn et al. 1993, Lampe 1994). Folglich verlief die Hauptfließrichtung der Flüsse nicht mehr, wie im Unteren Buntsandstein, ausschließlich entlang des Rheinischen Schiefergebirges und über die Kellerwaldschwelle hinweg, sondern war – zumindest lokal – von beiden weg gerichtet.

In den Übergangsschichten zwischen Unterem und Mittlerem Buntsandstein ist dokumentiert, dass die Änderung der Fließbedingungen kein plötzliches Ereignis war. In der östlichen Frankenger Bucht deutet sich hier ein gradueller Übergang von den ruhigen Flachwassersedimenten des Unteren Buntsandsteins hin zu den ausgeprägten Rinnen des Volpriehausener Sandsteins an. Die Zunahme der Transportenergie, der Eintrag größeren Sediments, die Bildung stabiler, gegenüber dem höheren Unteren Buntsandstein tieferer Rinnen mit

ausgeprägten Aufbereitungshorizonten, die Tonarmut und die Gleichförmigkeit des Sediments lassen hier zudem auf eine Versteilung des Reliefs an der Wende Unterer/Mittlerer Buntsandstein schließen.

Aufgrund dieser Annahmen ist es wahrscheinlich, dass die durch den gesamten Unteren Buntsandstein nicht relevante Kellerwaldschwelle während des Mittleren Buntsandsteins wieder als morphologische Schwelle von Bedeutung war und die Mächtigkeitsschwankungen der untersuchten Formationen darauf zurückzuführen sind, dass es sich bei der Frankenger Bucht zur Zeit der Ablagerung des Mittleren Buntsandsteins um ein lokales Becken innerhalb der westlichen Hessischen Senke gehandelt hat. Eine Gliederung der Hessischen Senke in randliche, kleinere Faziesräume, lokale Becken und Schwellen wurde bereits für den Unteren Buntsandstein postuliert (Brüning 1986), und es ist anzunehmen, dass sich dies im Mittleren Buntsandstein fortsetzt.

Inwiefern sich die Untersuchungen und Beobachtungen aus der östlichen Frankenger Bucht und der Forschungsbohrung Rosenthal auf die gesamte Frankenger Bucht übertragen lassen, bleibt zu prüfen und bietet sich als Ziel weiterer Untersuchungen an. Großräumigere sedimentologische und fazielle Untersuchungen im Buntsandstein der Frankenger Bucht, die Einmessung von Paläoflößrichtungen und die Auskartierung der Übergangsschichten würden sicherlich wertvolle Hinweise auf die sedimentologische und tektonische Entwicklung der Frankenger Bucht liefern.

Danksagung: Die Ergebnisse dieser Arbeit stammen aus einer an der Philipps Universität Marburg angefertigten Diplomarbeit. Für die Betreuung dieser Arbeit bedanke ich mich bei Prof. Dr. Klaus-Werner Tietze.

6. Schriftenverzeichnis

- Aigner, T. & Bachmann, G. H. (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. – *Sed. Geol.*, **80**: 115–135; Amsterdam.
- Brüning, U. (1986): Stratigraphie und Lithofazies des Buntsandsteins in Südniedersachsen und Nordhessen. – *Geol. Jb.*, **A 76**: 347–366; Hannover.
- Geluk, M. C. & Röhring, H.-G. (1997): High-resolution sequence stratigraphy of the Lower Triassic „Buntsandstein“ in the Netherlands and Northwest Germany. – *Geol. Mijnb.*, **76**: 227–246; Amsterdam.
- Horn, M. (1991): Buntsandstein und Muschelkalk am Westrand der Hessischen Senke (Exkursion H am 6. April 1991). – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.*, N.F., **73**: 155–176; Stuttgart.
- Horn, M., Kulick, J. & Tietze, K.-W. (1993): Kontinentale klastische Sedimente aus Oberperm und Untertrias am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges. – *Geologica et Palaeontologica*, **27**: 356–377; Marburg.
- Kosłowski, W. (1986): Zur sedimentären Entwicklung des Buntsandsteins: Ein Vergleich zwischen dem Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges und dem Raum Bad Hersfeld/Hessen. – Dissertation Universität Marburg, 135 S.; Marburg.
- Kulick, J. (1961): Die Gliederung des Unteren Buntsandsteins und der Volpriehausen-Folge des Mittleren Buntsandsteins in Waldeck (Nordhessen). – *Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch.*, **89**: 276–309; Wiesbaden.
- Kulick, J. (1966): Der Untere Buntsandstein am Südrande des Kellerwaldes (Nordhessen). – *Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch.*, **94**: 182–200; Wiesbaden.
- Kulick, J. (1991): Die Randfazies des Zechsteins in der Korbacher und in der Frankenger Bucht (Exkursion E am 4. April 1991). – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.*, N.F., **73**: 85–113; Stuttgart.
- Kulick, J. & Paul, J., Hg. (1987): Internationales Symposium Zechstein 87, Exkursionsführer II, Zechsteinaufschlüsse in der

- Hessischen Senke und am westlichen Harzrand. – 310 S.; Hannover.
- Kupfahl, H.-G. (1985): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Blatt 5018 Wetter. – 147 S.; Wiesbaden.
- Lampe, C. (1994): Geologische und sedimentologische Untersuchungen im Buntsandstein der östlichen Frankfurter Bucht. – Diplomarbeit Universität Marburg, 56 S.; Marburg (unveröff.).
- Lepper, J. & Röhring, H.-G. (1998): Buntsandstein. – Hallesches Jahrb. Geowiss., Reihe B, Beiheft 6: 27–34; Halle (Saale).
- Murawski, H., Albers, H. J., Bender, P., Berens, H.-P., Dürr, S., Kowalczyk, G., Meiburg, P., Müller, R., Müller, A., Ritzkowski, S., Schwab, K., Semmel, A., Stapf, K., Walter, R., Winter, K.-P. & Zankl, H. (1983): Regional Tectonic Setting and Geological Structure of the Rhenish Massif. – In: Fuchs, K., Gehlen, K. von, Mälzer, H., Murawski, H. & Semmel, A., Hg.: *PlatEAU Uplift*. – 411 S.; Berlin (Springer).
- NLfB, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (1993): Tätigkeitsbericht 1991/1992. – Hannover.
- Puff, P. & Radzinski, K.-H. (1980): Ergebnisse und Probleme stratigraphischer Untersuchungen im Mittleren Buntsandstein der DDR. – Z. Geol. Wiss., 8/8: 965–983; Berlin.
- Röhring, H.-G. (1991): A Lithostratigraphic Subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German Lowlands and the German Sector of the North Sea, Based on Gamma-Ray and Sonic Logs. – Geol. Jb., A 119: 3–24; Hannover.
- Roth, W. (1966): Der Untere Buntsandstein bei Marburg/Lahn. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 94: 173–181; Wiesbaden.
- Schindewolf, O. H. (1928): Studien aus dem Marburger Buntsandstein III–VII. – Senckenbergiana, 10/1,2: 16–54; Frankfurt.
- Stille, H. (1937): Die Hessische Tiefe im tektonischen Großgebilde Europa. – Z. dt. Geol. Ges., 88: 669–680; Berlin.
- Tietze, K.-W. (1997): Ein Buntsandstein-Profil am Westrand der Hessischen Senke (Raum Marburg). – Geologica et Palaeontologica, 31: 285–294; Marburg.
- Trusheim, F. (1961): Über Diskordanzen im Mittleren Buntsandstein Norddeutschlands zwischen Ems und Weser. – Erdöl-Z., 77/9: 361–367; Wien, Hamburg.
- Wycisk, P. (1984): Faziesinterpretation eines kontinentalen Sedimenttroges (Mittlerer Buntsandstein/Hessische Senke). – Berliner Geowiss. Abh. (A), 54: 104 S.; Berlin.
- Ziegler, P. A. (1982): Triassic rifts and facies patterns in Western and Central Europe. – Geol. Rdsch., 71/3: 747–772; Stuttgart.
- Ziegler, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. – 239 S.; The Hague (Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.).

Manuskript eingegangen am 18.8.1999, angenommen am 7.12.1999

Alessandro Garassino¹, Hans Hagdorn² & Manfred Schulz³

A decapod crustacean assemblage from the Middle Triassic Upper Muschelkalk of Großenzlüder (Hessen, Germany)

Kurzfassung

Im Oberen Muschelkalk des Großenzlüderer Grabens (Osthessen) wurden aus Brockelkalk 4a (Trochitenkalk-Formation, Kraichgau-Subformation; *atavus*-Biozone; Anis, Oberillyr) in der näheren Umgebung von Großenzlüder zahlreiche Exuvien und Körperfossilien dekapoder Krebse geborgen. Am häufigsten ist darin *Lissocardia silesiaca* v. Meyer,

1847. Wesentlich seltener sind in der Fossilagerstätte die Gattungen *Aspidogaster*, *Litogaster* und *Pseudopemphix*. Das flächenhafte (mehrere km²), auf eine einzige Lage begrenzte Vorkommen der *Lissocardia*-Bank wird als Ergebnis von populationsdynamischen Prozessen gedeutet. Eine Erklärung ausschließlich durch günstige diagenetische Prozesse ist

weniger wahrscheinlich. Hinweise auf Baue oder andere Lebensspuren von Krebsen liegen nicht vor. Das hervorragend erhaltene Material ermöglicht erstmals eine vollständige Beschreibung der Morphologie von *Lissocardia* und die sichere Zuordnung zur Familie Nephropidae (Ordnung Astacidea).

Abstract

Many exuviae and body fossils of decapod crustaceans have been collected in the Upper Muschelkalk of the Großenzlüder Graben (eastern Hessen, Central Germany). The decapod bed is a single layer in Brockelkalk 4a (Trochitenkalk-Formation, Kraichgau-Subformation; *atavus* Biozone; Anisian, Late Illyrian) in the vicinity of Großenzlüder.

The most common decapod of this fossil lagerstätte is *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847. In addition, *Aspidogaster*, *Litogaster*, and *Pseudopemphix* occur, although they are much less abundant in the *Lissocardia* Bed. The mass occurrence of decapods in this fossil lagerstätte extending over at least several km² is interpreted as a result of unusually favorable local

environmental conditions rather than as a taphonomic process. Burrows or other traces of decapod activity have not yet been observed. The excellent preservation makes possible the first comprehensive morphological description of *Lissocardia* and its definite attribution to the family of Nephropidae (order Astacidea).

Contents

1. Introduction	72
2. The Großenzlüder <i>Lissocardia</i> Bed	73
2.1 Localities	73
2.2 Stratigraphy	73
2.3 Sedimentology and paleosynecology	75
3. Systematic paleontology	76
4. Discussion	80
4.1 Systematic position of <i>Lissocardia</i>	80
4.2 Life habit	80
5. References	81

¹ Museo di Storia Naturale, c.so Venezia, – 20121 Milano, Italy

² Muschelkalkmuseum, Schloßstraße 11, D-74653 Ingelfingen, Germany

³ Martin-Luther-Ring 16, D-36137 Großenzlüder, Germany

1. Introduction

Decapod crustaceans, many well preserved in limestone nodules, have been collected from the Germanic Muschelkalk since the pioneer period of paleontology, early in the 19th century. As the first species, the large spiny lobster *Palinurus sueuri* was described by Desmarest (1822). Later, v. Meyer (1840) established the genus *Pemphix* for this crustacean, which is most common in the Upper Muschelkalk of Southwest Germany. Until now, it remained the best-known of all Muschelkalk decapods (Förster 1967). Due to their rarity, other genera of reptant Muschelkalk decapods have been added later: *Litogaster* by v. Meyer (1844), *Lissocardia* by v. Meyer (1847), *Pseudopemphix* by Wüst (1903), *Clytiopsis* by Bill (1914), *Aspidogaster* and *Piratella* by Assmann (1927). A fragmentary carapace has been attributed to *Pseudoglyphea* by Förster (1967), a genus established for Jurassic decapods by Oppel (1861). It was Assmann (1927) who studied the decapod material housed in major German collections and discussed their systematic positions and geographical and stratigraphical distribution. In his comprehensive study, Förster (1967) revised the reptant decapods that were then known from Triassic strata worldwide. His monograph clearly demonstrated that the most complete and diverse reptant decapod faunas of the entire Middle Triassic (Anisian, Ladinian) are found in the Upper Buntsandstein (Votziensandstein) of eastern France and Southwest Germany and in the Upper Muschelkalk of Southwest Germany. However, the type material of some of the genera listed above has been collected from the Lower Muschelkalk of Upper Silesia (now Poland) and – once again – of Southwest Germany.

Decapod faunas from the Triassic of the Tethys realm and phylogeny of early Mesozoic decapods have been discussed in a number of papers by Glaessner (comp. Glaessner 1960). In recent years, knowledge of Triassic decapod diversity has been significantly enlarged by systematic investigation of rich conservation lagerstätten, which have yielded decapod crustaceans in Lombardy and elsewhere, conducted by the Invertebrate Paleontology Department of the Museo di Storia Naturale di Milano. Included in this research programme are the Triassic faunal assemblages of the Ambilobè region (NW-Madagascar; Garassino & Teruzzi 1995), of Cene (Seriana Valley, Bergamo – N-Italy; Pinna 1974), of Prati di Rest

(Valvestino, Brescia – N-Italy; Pinna 1976), of Ponte Giurino (Imagna Valley, Bergamo – N-Italy; Garassino & Teruzzi 1993), and of Carnia (Udine, NE-Italy; Garassino et al. 1996, Garassino, in press).

Private collecting activity in many Muschelkalk sections in Germany since publication of Förster's monograph has resulted in a great number of new specimens many of which have been excavated from measured sections and skillfully prepared from hard limestone nodules by means of pneumatic chisels. These new specimens allow more detailed morphological description of some of the less well known genera and discussion of systematic position. Moreover, they also allow discussion of paleoecology, stratigraphical range, and geographical distribution of Muschelkalk decapod crustaceans.

One of the most productive decapod beds yielding an association both diverse and rich in individuals has been discovered by one of us (Manfred Schulz) at the base of the Upper Muschelkalk of eastern Hessen (Central Germany). The most common species in this fossil lagerstätte is *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847, hitherto mostly known from the Lower Muschelkalk from a few more or less fragmentary specimens. The excellent preservation of relatively complete specimens allows a full morphological description of *Lissocardia* and confirmation of its attribution to the family Nephropidae Dana, 1852 (order Astacidea Latreille, 1803). The new specimens of *Aspidogaster* and *Litogaster* (Glypheidae), and *Pseudopemphix* (Pemphicidae) collected in the Großenlüder *Lissocardia* Bed do not provide additional morphological information. Therefore, they were not described in this paper.

The specimens studied in this publication are part of the private collection of Manfred Schulz (acronym CSG). Additional material referred to in this paper is housed in the Museum für Naturkunde an der Humboldt-Universität Berlin (MB), the Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart (SMNS), the Muschelkalkmuseum Hagdorn, Ingelfingen (MHI) and in the private collection of M. Hartinger (CHK), Krautheim (Baden-Württemberg, Germany). It is guaranteed that none of the figured or referred to specimens will be given to another than a public collection. The Muschelkalkmuseum Ingelfingen will be informed about any change of specimen repository.

2. The Großelüder *Lissocardia* Bed

2.1 Localities

Lissocardia and other decapod crustaceans have been collected in four outcrops around the town of Großelüder near Fulda (Hessen, Central Germany; Fig. 1). Generally, the Muschelkalk in this region is preserved in the Großelüder Graben, a minor tectonic structure striking SE-NW. Along this graben, small downfaulted Muschelkalk blocks are quarried for lime and portland cement. Each of the few localities exposing the section under study has yielded decapod specimens. These localities are:

- (1) Großelüder, quarry of Kalkwerk Meister. TK 25 Sheet Nr. 5423 Großelüder, R 35 36 85, H 56 06 36
- (2) Großelüder-Müs, road cutting of the Umgehungsstraße Müs. TK 25 Sheet Nr. 5423 Großelüder, R 35 36 08, H 56 06 05
- (3) Großelüder-Müs, landfill of Firma Hillenbrand. TK 25 Sheet Nr. 5423 Großelüder, R 35 36 11, H 56 05 91
- (4) Fulda-Rodges, quarry of Firma Wende. TK 25 Sheet Nr. 5423 Großelüder, R 35 43 18, H 56 02 60

In 1999, only Locality 1 is still accessible; Localities 2–4 were only temporarily open and have been refilled.

2.2 Stratigraphy

The *Lissocardia* Bed is a single layer of uniform expansion in the Großelüder area (Fig. 2). The Kalkwerk Meister quarry (Fig. 3) exposes a complete profile from the dolomitic marls of the Middle Muschelkalk Diemel For-

mation up to the Upper Muschelkalk Meißner Formation (Hagdorn & al. 1987: pl. 2). Lithostratigraphically, it belongs to the Trochitenkalk Formation (Kraichgau Subformation) at the base of the Upper Muschelkalk Subgroup. Biostratigraphically, its position is exactly the base of the *atavus*-Biozone, which is of Late Anisian (Late Illyrian) age.

Traditionally, the Germanic Muschelkalk is subdivided by a number of isochronous marker beds, many of which can be traced over wide areas of the Muschelkalk basin. In terms of this extremely detailed marker bed stratigraphy, the Großelüder *Lissocardia* Bed is a distinct layer in Brockelkalk 4a, 20 cm below the base of Trochitenbank 1 (Fig. 2, 4). Brockelkalk 4a is a 50–65 cm thick horizon of nodular limestone (calcilutite, mudstone) interbedded with marlstone. This horizon was originally identified and described as a marker bed some 200 km farther to the South in Baden-Württemberg (Southwest Germany; Wirth 1957, Ockert 1992). The same is true for Trochitenbank 1, an 80 cm thick set of limestone beds (calcirudite, packstone) with abundant bivalve and brachiopod shells and echinoderm sclerites (mostly crinoid columnals, the so-called Trochiten).

One layer in Trochitenbank 1 contains shells of *Tetractinella trigonella*. In the entire 70 to 80 m thick column of the Upper Muschelkalk, this brachiopod only occurs in this marker bed, the *Tetractinella*-Bank, which can be traced from the Black Forest to the Subhercynian Hills over 500 km in a wide zone along the eastern coast of the Muschelkalk sea (Hagdorn & Simon 1993). Isochrony of

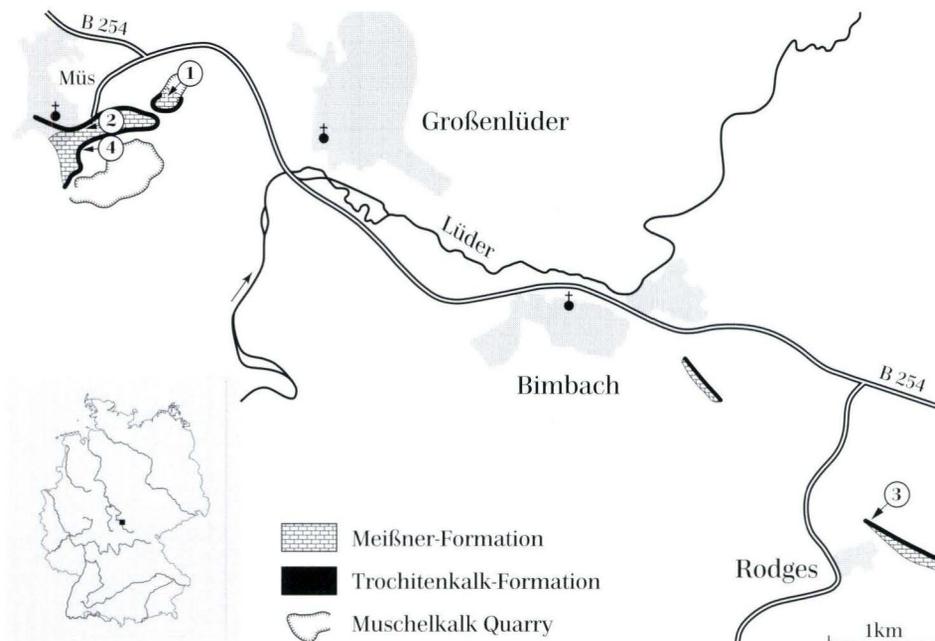


Fig. 1. Geographical position of *Lissocardia* fossil sites and Upper Muschelkalk outcrop around Großelüder.

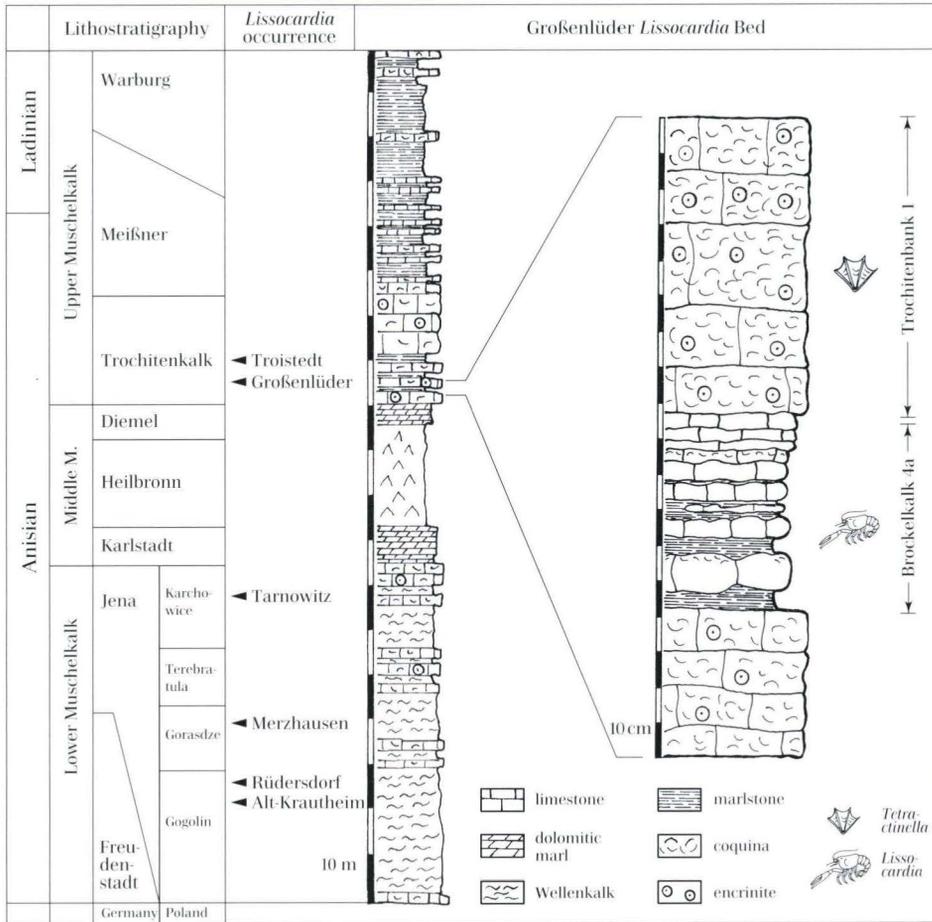


Fig. 2. Stratigraphical position of the Großelüder *Lissocardia* Bed and additional *Lissocardia* occurrences.

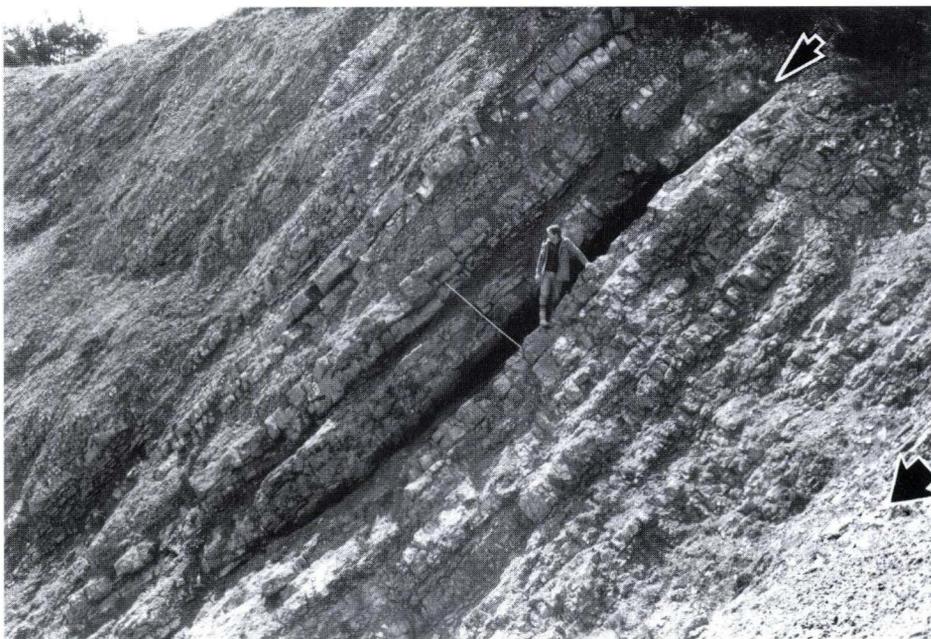


Fig. 3. Overview of Kalkwerk Meister near Großelüder-Müs with *Lissocardia* Bed (thin arrow). The Middle/Upper Muschelkalk boundary is indicated by a thick arrow.



Fig. 4. Detail of *Lissocardia* Bed in Kalkwerk Meister (arrow).

the *Tetractinella*-Bank is corroborated biostratigraphically by the first occurrence of *Paraceratites atavus* and *P. flexuosus* in the Germanic Basin directly below it, in Brockelkalk 4a (Geisler 1939, König 1920). Thus, the stratigraphical position of the *Lissocardia* Bed can be exactly fixed and easily compared with other decapod occurrences in the basal Upper Muschelkalk.

2.3 Sedimentology and paleosynecology

The *Lissocardia* Bed is a 5–6 cm thick layer of nodular limestone in the upper part of Brockelkalk 4a (Figs. 2, 4). The nodules containing the crustaceans are irregular, often longitudinal, up to 15 cm long and 6–8 cm wide lensoid bodies of a grey, micritic, marly limestone. Their lime content decreases towards the surfaces of the nodules and therefore there are no distinct boundaries between concretion and marly matrix. Many of the crustaceans are positioned close to the upper or lower surface of the nodules, however, others may also be found in the interior parts of the nodules. The typical preservation

of the crustaceans with carapace and abdomen separated or slightly displaced indicates that most of the fossils are exuviae. Some intact specimens could also have been embedded as carcasses. The three-dimensional and uncompressed preservation of both carcasses and exuviae indicates early diagenetic cementation of the nodules. It is supposed that the early diagenetic cementation of the nodules was triggered by decay of the crustaceans.

We also discussed whether the nodules originally represented crustacean burrows that were later infilled with lime-mud and subsequently cemented. However, the nodules are not likely to be burrow fills because (1) the shape of the nodules is too irregular for crustacean burrows, (2) we did not find fecal pellets in the nodules and (3) because some nodules may also contain actinopterygian fish skeletons and are thus definitely concretions formed during decay of animal skeletons.

The *Lissocardia*-Bed around Großelüder yielded the following fossils, most of which are rare:

- Brachiopoda: *Lingula cf. tenuissima*
Discinisca discoides
- Bivalvia: *Pleuromya musculoides*
Myophoria vulgaris
Entolium discites
Hoernesia socialis
Plagiostoma striatum
- Crustacea: *Lissocardia silesiaca*
Litogaster ornata
Aspidogaster limicola
Pseudopemphix meyeri
- Vertebrata: Actinopterygian fish indet.

Crustaceans are the most abundant fossils in the *Lissocardia* Bed. Until April 1999, the four localities yielded the following numbers of decapod specimens:

Tab. 1: Number of decapod crustaceans from the Großelüder *Lissocardia* Bed

Locality	1	2	3	4
<i>Lissocardia silesiaca</i>	24	15	3	17
<i>Litogaster ornata</i>	1	-	-	-
<i>Aspidogaster limicola</i>	1	-	2	-
<i>Pseudopemphix meyeri</i>	-	1	-	-

On average, one specimen is found per m². In patches, the fossil density is greater (up to five per m²). Below and above the *Lissocardia* Bed, no crustacean fossils have been found. A thin tempestitic shellbed a few cm upsection contains abundant shells of the bivalves *Palaeonucula*, *Myophoria*, *Entolium* and the small gastropod ?*Neritaria* or ?*Ampullina*. The above faunal list indicates that in the *Lissocardia* Bed, fossils with chitinous or phosphatic skeletons are over-represented in both abundance and diversity. Among the bivalves, the same is true for genera with calcitic shells, whereas genera with originally arago-

nitic shells are rare. Due to early diagenetic cementation of coquinas with high pore volume between the shells, aragonitic shells have increased fossil potential in tempestite beds. Therefore, the fossil content of the *Lissocardia* Bed and of the entire Brockelkalk 4a represents only a small part of the original community. Thus, diagenetic extinction of aragonite shells and diagenetic overprint of the sediment makes it difficult to comment on paleoecology and sedimentary environment.

The benthic fauna suggests a soft substrate. As there are no clasts or large shells, it can be concluded that the crustaceans must have burrowed in a slightly firm sediment, possibly in a level a few decimeters below the seafloor. However, there is no definite sedimentological evidence for burrowing activity, such as scratch marks or doubtless burrows.

Around Großenlüder, *Lissocardia* and the other decapod crustaceans are limited to a single layer of Brockelkalk 4a, however, this layer extends over at least several km². This striking decapod occurrence can be interpreted (1) as an episodic event of extreme population growth or (2) as a short period of time with unusually favorable conditions for preservation of crustacean skeletons. Given the second case, the decapods inhabited the Muschelkalk seafloor over longer periods and their skeletons usually were dissolved by diagenetic processes. We favor the first inference and explain the mass occurrence as an explosive local or regional population increase. In the Muschelkalk, episodic mass occurrences of fossils also have been described from ophiuroids, asteroids, and brachiopods. *Aspidogaster* also occurs hundreds of kilometers distant in the same horizon at Neidenfels, Baden-Württemberg (MHI 1631).

The marl layers of the Hassmersheim Subformation

(which follows upsection and which are very similar in fauna and sediments) yielded *Aspidogaster*, *Litogaster* and rare *Lissocardia* and *Pseudopemphix*. Localities are Eschelbronn, Baden-Württemberg (König 1920), Künzelsau and Neidenfels, Baden-Württemberg (MHI 1477, 787), Rottershausen, Bavaria (MHI 1673), Troistedt, Thuringia (MHI 1634, CHK 22017, 22019). *Aspidogaster* and *Pseudopemphix* have also been recorded from the upper part of the Trochitenkalk Formation and from the Meißner Formation (comp. Assmann 1927, Förster 1967). However, *Lissocardia* has been previously recorded from the Upper Muschelkalk only in one specimen from the shaft of the Friedrichshall salt mine (SMNS 4401/658, Alberti-Collection). These records in different strata indicate that the decapods inhabited the Muschelkalk sea over a longer period. Episodic events of mass reproduction may have caused local or regional mass occurrences such as the Großenlüder *Lissocardia* Bed.

The Kraichgau and Hassmersheim Subformations of the Trochitenkalk Formation are characterized by stacked parasequences (or high frequency sequences, comp. Aigner & Bachmann 1993). The thickly bedded limestones such as Trochitenbank 1 are interpreted as transgressive peaks during high sea levels and their stenohaline echinoderms and articulate brachiopods are exotic immigrants from Tethys (Hagdorn & Simon 1993). The marlstone and nodular limestone intercalations such as Brockelkalk 4a or the three marlstone horizons of the Hassmersheim Subformation were deposited during low sea level and increased input of fine clastics. Decrease of echinoderms in these horizons might indicate salinity changes that were tolerated by the decapods. The Trochitenbänke have not yielded decapods because the coarse skeletal beds were unfavorable for crustacean preservation.

3. Systematic paleontology

Order Decapoda Latreille, 1803
 Infraorder Astacidea Latreille, 1803
 Family Nephropidae Dana, 1852

Genus *Lissocardia* v. Meyer, 1847

- 1847 *Lissocardia* - v. Meyer: 575
 1851 *Lissocardia* v. Meyer - v. Meyer: 254
 1903 *Lissocardia* v. Meyer - Wüst: 11
 1927 *Lissocardia* v. Meyer - Assmann: 335
 1927 *Piratella* n. gen. - Assmann: 337
 1930 *Lissocardia* v. Meyer - Beuerlen & Glaessner: 53
 1930 *Piratella* Assmann - Beuerlen & Glaessner: 53
 1930 *Lissocardia* v. Meyer - Beuerlen: 326
 1930 *Piratella* Assmann - Beuerlen: 326
 1967 *Lissocardia* v. Meyer - Förster: 174

The genus *Piratella* has been established by Assmann (1927) because of alleged lack of cristae on the gastrical region and a shallow abdominal notch, however, he emphasized its similarity with *Lissocardia*. Förster (1967) treated *Piratella* as a synonym of *Lissocardia*. The new material corroborates Förster's decision.

Generotype: *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847

Diagnosis: Carapace cylindrical, relatively high, compact. Rostrum narrow. Longitudinal dorsal keel with spines from rostrum to the posterior margin. Cervical groove deep, gastroorbital groove short. Postcervical groove weaker than branchiocardial groove, dorsally strongly reduced, becoming deeper downward completely separating the posterior, reduced part of the hepatic region. Anterior part of the hepatic groove horizontal, appearing only in outlines. Gastrical region with two

longitudinal carinae. Second carina on anterior side strongly bent upwards towards the rostrum. Antennal region on anterior side constricted by a depression originating from the antennal groove. Keel and carinae with spines, posterior antennal region and cardinal region with coarser granules, otherwise uniform granulation. Abdomen weakly ornamented; epimeres separated from tergum by granulated longitudinal bulge. Pereiopod I with elongate merus, short carpus and strong propodus, chelate, elongate index and dactylus with long, dagger-like spines on opposite internal edges. Pereiopods II and III chelate. Pereiopods IV and V with terminal dactylus. Extended diagnosis modified after Förster (1967).

Lissocardia silesiaca v. Meyer, 1847

Figs. 5–10

- 1847 *Lissocardia silesiaca* – v. Meyer: 575
 1847 *Lissocardia magna* – v. Meyer: 575
 1851 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – v. Meyer: 254, Taf. 32, Fig. 34–35, 37–39
 1864 *Lissocardia magna* v. Meyer – v. Alberti: 196
 1865 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – Eck: 108
 1927 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – Assmann: 336, Taf. 8, Fig. 4–8, Taf. 13, Fig. 1
 1927 *Piratella badensis* n. gen. no. sp. – Assmann: 338, Taf. 8, Fig. 2–3
 1928 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – Schmidt: 318, Fig. 874
 1929 *Piratella badensis* Assmann, 1927 – Schmidt: 318, Fig. 875
 1929 *P. badensis* Assmann, 1927 – Glaessner: 317
 1937 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – Assmann: 110, Taf. 22, Fig. 6–8
 1960 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – Glaessner: 40, Fig. 18, 1
 1965 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – Förster: 160, Taf. 36, Fig. 1
 1967 *Lissocardia silesiaca* v. Meyer – Förster: 175, Taf. 9, Fig. 6; Fig. 14.
 1967 *Lissocardia badensis* (Assmann, 1927) – Förster: 176

Lectotype: v. Meyer 1851: Taf. 32, Fig. 37 (same specimen as Assmann 1927: Taf. 8, Fig. 6–7) Museum für Naturkunde an der Humboldt-Universität zu Berlin MB.A. 936.

Locus typicus: Tarnowitz, Upper Silesia (now Tarnowskie Góry, Poland), abandoned Böhm quarry.

Stratum typicum: Lower Muschelkalk, upper part of Karchowice Formation (Anisian, Early Illyrian).

Geographical occurrence: Lower Muschelkalk: Upper Silesia (Poland), Brandenburg (East Germany), Baden-Württemberg (Southwest Germany). Upper Muschelkalk: Baden-Württemberg (Southwest Germany), Hessen, Thüringen (Central Germany).

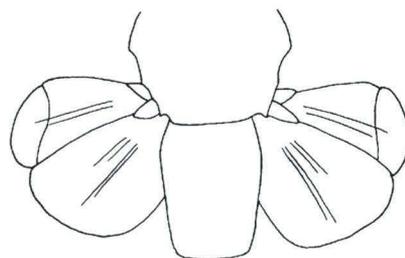


Fig. 5. *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847. Tail fan reconstruction in dorsal view.

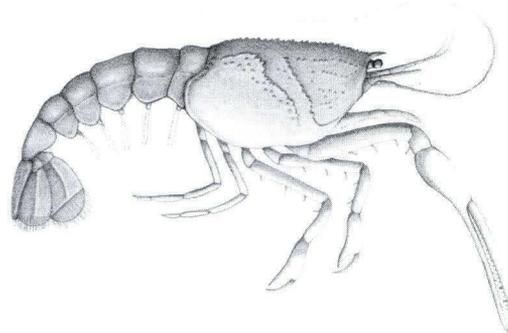


Fig. 6. *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847. Reconstruction.

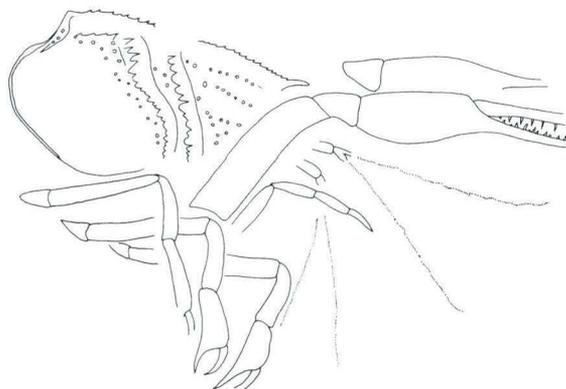
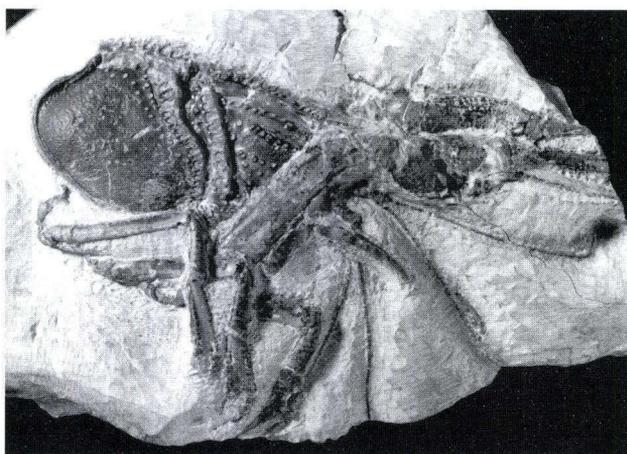


Fig. 7. *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847. Specimen CSG 1/1. Carapace, pereopods and antennulae of a large specimen; exuvia, right side, lateral view. x 1.5.

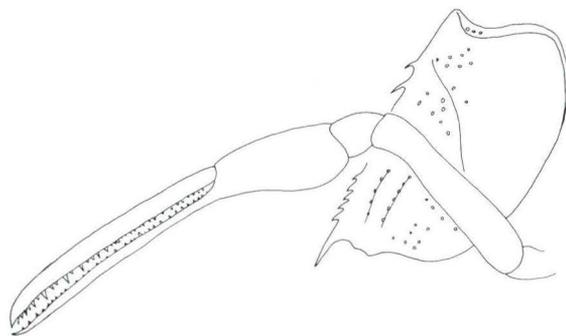
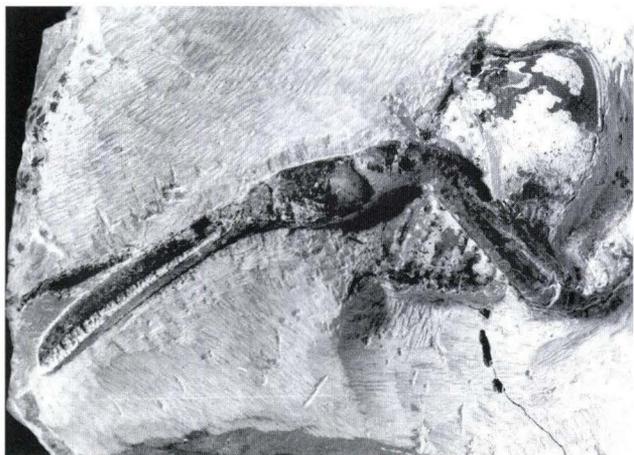


Fig. 8. *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847. Specimen CSG 1/2. Carapace and chelate pereiopod I with dagger-like teeth on inner edges; exuvia, right side, lateral view. x 2.

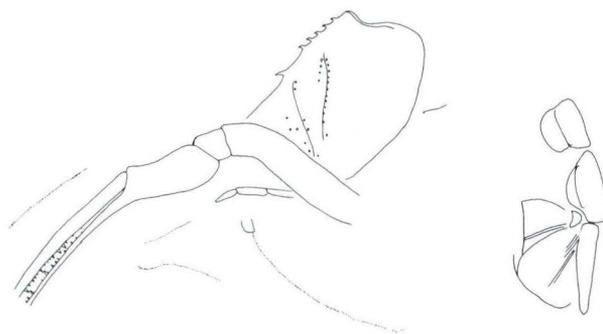
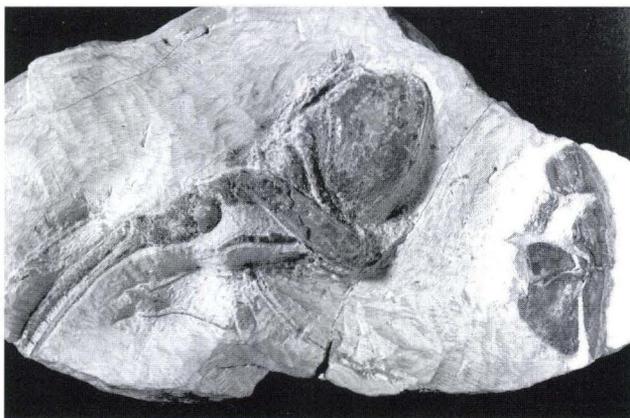


Fig. 9. *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847. Specimen CSG 1/3. Carapace, chelate pereiopod I and tail fan; probably an exuvia, left side, lateral view. x 0.9.

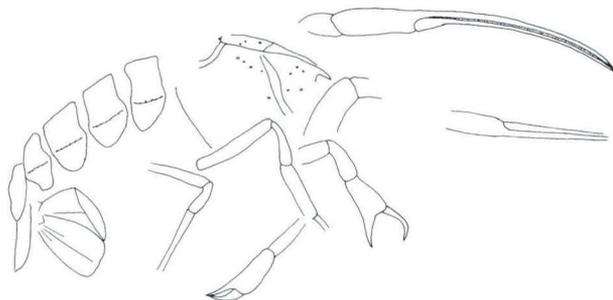
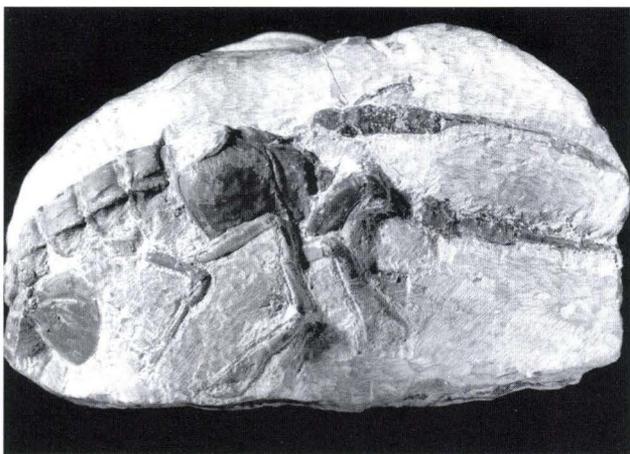


Fig. 10. *Lissocardia silesiaca* v. Meyer, 1847. Specimen CSG 2/1. Almost complete specimen showing carapace, abdomen with tail fan and pereiopods; body specimen, right side, lateral view. x 1.3.

Stratigraphical occurrence: Lower Muschelkalk, Jena Formation, Freudenstadt Formation, Karchowice Formation (Anisian, Bithynian to Early Illyrian); Upper Muschelkalk, Trochitenkalk Formation (Kraichgau Subformation, Brockelkalk 4a and contemporaneous Troistedt Subformation), *atavus* Biozone (Anisian, Late Illyrian).

Material: The originals of *Lissocardia* (MB.A. 936, 937) and *Piratella* from the Lower Muschelkalk have been so carefully described by Assmann (1927) and Förster (1967) that a restudy was not necessary. The same is true for the specimen mentioned by v. Alberti (1864: 196) from the Upper Muschelkalk of Friedrichshall (SMNS 4401/658). Due to their poor preservation, a number of very fragmentary and compressed *Lissocardia* specimens from the Lower Muschelkalk Freudenstadt Formation (Lower Anisian) of Altkrauthem (Hohenlohekreis, Baden-Württemberg) in M. Hartinger's collection (CHK 22036–22042) have not been studied in detail. The same is true for a typical *Lissocardia* chela from the Lower Muschelkalk Jena Formation of Rüdersdorf (Brandenburg, East Germany); W. Tornow (Berlin) kindly sent a photo of this specimen in his private collection (uncatalogued). However, these specimens provide additional data on stratigraphical and geographical range of the species. A fragmentary specimen (carapace, chela) from the Lower Muschelkalk Jena Formation of Buchen-Bödighem (MHI 1674) is much better preserved. Among 59 more or less complete and well preserved specimens from the Großenlütter *Lissocardia* Bed, 17 have been selected for study. After skillfull preparation, they are visible either in lateral or in dorsal view. Certainly, most of the specimens are exuviae showing the typical separation between carapace and abdomen. Two specimens (CSG 2/2, CSG 4/4) are full body fossils. An additional specimen from the Trochitenkalk Formation (Troistedt Subformation, *atavus* Biozone) of Troistedt (Thüringen) in M. Hartinger's collection (CHK 22019) has also been studied.

The excellently preserved specimens from Großenlütter make possible for the first time a full morphological description of *Lissocardia silesiaca*, which was known before by a few fragmentary specimens only.

Description: *Lissocardia silesiaca* is a medium-sized astacidean of 4 to 6 cm length, with a coarsely tuberculate carapace and strongly elongate index and dactylus of chelate pereiopod I.

Carapace: In lateral view in almost all specimens, the carapace has a subrectangular shape, which becomes slightly more narrow towards the anterior margin be-

cause of the slight curvature of the ventral margin. Over its total extension, the straight dorsal margin forms a crista with a row of equal-sized spines pointing forward. The rostrum is short, without supra- and subrostral teeth and with a pointed distal extremity. The posterior margin is sinuous and strengthened by a strong marginal carina with a row of spines in its upper part. The ocular incision is narrow and shallow and the antennal and pterygostomial angles are not very marked. Two strongly barbed carinae extend along the antennal region of the carapace, joining together at the base of the rostrum. Moreover, the surface of the carapace has deep cervical and branchiocardic grooves with exterior margins ornamented by rows of equal-sized spines. Generally the largest part of the carapace is smooth; strong spines are located only near the grooves, and small tubercles are located near the carinae.

Abdomen: The subrectangular somites are equal in length. The triangular pleurae are strengthened by a coarse tuberculate transverse median carina, and the margins have a row of similar small spines. Somite VI has a subrectangular shape and is slightly longer than the others. The telson (Fig. 5) has a triangular shape with a rounded distal extremity; it is strengthened by two thin median longitudinal carinae. The uropods have the same length as the telson. The exopodite, with rounded diaeresis, is crossed by a strong median longitudinal carina. The median carina crossing the endopodite longitudinally bifurcates at its anterior extremity. The surface of the abdomen and of the tail fan is slightly tuberculate.

Cephalic appendages: None of the specimens has the eyes preserved. The antennular peduncle is composed of three articula: the 1° and the 2° are thin and elongate, and the 3° is short and stocky; two long flagella are articulated with it. The antennal peduncle is composed of three thin and elongate articula. The flagellum is twice the body length. The scaphocerite is not preserved.

Thoracic appendages: The maxilliped III is composed of thin, elongate and barbed articula. Pereiopod I has an elongate merus, short and stocky carpus and strong propodus with strongly elongate and curved distal extremity of dactylus and index (Fig. 8). The interior margins of the dactylus and the index have alternating strong and small teeth. Pereiopods II–III are chelate. The exterior margins of pereiopods I–III have sparse and strong spines. Pereiopods IV–V have a terminal dactylus.

Abdominal appendages: The pleopods have a subrectangular sympodite; two long multiarticulate flagella are attached to the sympodite.

4. Discussion

4.1 Systematic position of *Lissocardia*

In his revision of the Triassic reptant decapod crustaceans, Förster (1967) emphasized the most important characters of *Lissocardia*: subrectangular carapace, dorsal margin of carapace with a longitudinal keel with spines from rostrum to the posterior margin, deep cervical and branchiocardical grooves, antennal region with two longitudinal carinae and pereopod I chelate with strongly elongate dactylus and index. These features could be found in the examined specimens.

Due to the fragmentary preservation of v. Meyer's specimens, the systematic position of *Lissocardia* has been controversial for a long time. Assmann (1927) ascribed *Lissocardia* to the Nephropsidae whereas Förster (1967) compared it with the Glypheidae Zittel, 1885, the Erymidae van Straelen, 1924, and the Pemphicidae van Straelen, 1928, and stated its intermediate position between these families. Glaessner (1969) ascribed this genus to the family Erymidae van Straelen, 1924 (subfamily Clytiopsinae Beurlen, 1927).

The complete and perfect preservation of many of our specimens made possible a more precise statement of its systematic position. Certainly, *Lissocardia* is not an erymid because this family has a cylindrical carapace, cervical and branchiocardical grooves devoid of spines and a pereopod I with short and stocky chelae. *Lissocardia* has a longitudinal keel with spines in the dorsal margin of the carapace, longitudinal carinae in the antennal region and long and strong chelae of pereopod I. This character is diagnostic enough to exclude an ascription of *Lissocardia* to the family Erymidae.

Zariquiey-Alvarez (1968:199–201) and Holthuis (1991:19) pointed out the main characters of the family Nephropidae Dana, 1852: subrectangular carapace, longitudinal keel with spines in the dorsal margin of carapace, tuberculate longitudinal carinae in the antennal region, deep cervical and branchiocardical grooves, abdominal somite with a transverse median carina and pereopod I with elongate and strong chelae with long and small teeth along the interior margins of dactylus and index. Because these characters are clearly developed in the studied specimens we ascribe the genus *Lissocardia* to the Nephropidae.

Two species of *Lissocardia* have been established from the Muschelkalk: *L. silesiaca* v. Meyer, 1851 and *L. magna* v. Meyer, 1851, both of them from the Lower Muschelkalk Karchowice Formation of Upper Silesia. They only dif-

fer in size and are certainly conspecific. Förster (1969) also assigned the poorly known *Piratella badensis* Assmann, 1927 to *Lissocardia*. However, he kept this species, which is based on two compressed specimens (Lower Muschelkalk, South Baden, Southwest Germany), as a separate species because he could not decide with certainty whether or not its diagnostic characters (shallow abdominal notch, no cristae on the gastrical region) are only a matter of poor preservation. A specimen recently collected in contemporaneous Lower Muschelkalk strata of Buchen-Bödighheim (northern Baden; MHI 1674) has typical cristae on its gastrical region and does not substantially differ from *Lissocardia silesiaca* in the shape of the the abdominal notch. Therefore, we do not hesitate to treat *Piratella badensis* as a junior synonym of *Lissocardia silesiaca*.

4.2 Life habit

The small size of *Lissocardia* with its slender carapace and abdomen and its elongate and strong chelae give evidence that, like other astacideans, it was a benthic crustacean burrowing in muddy or slightly consolidated sediment. Its long and slender chelae with dagger-like spines on the interior edges of index and dactylus indicate food gathering specialization. However, the low diversity of other invertebrate fossils in the Großenlüder *Lissocardia* Bed does not indicate any kind of specialized predator-prey relationship. *Lissocardia* can be compared to the extant astacideans *Thaumastocheles* and *Acanthacaris* that live as burrowers on muddy bottoms and have chelae similar to those of *Lissocardia* (Holthuis 1991).

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the permission to study additional specimens of Muschelkalk decapods kept in the private collections of Michael Hartinger (Altkrautheim) and Werner Tornow (Berlin). The artwork of Figs. 5 to 10 was done by Franco Nodo. Manfred Schulz gratefully acknowledges permission for collecting in the quarries of the Kalkwerk Meister, Steinbruch Wende and in the Erddeponie Hillenbrand. Dr. Erika Pietrzeniuk, Berlin, and Dr. Max Urlichs, Stuttgart, provided information on type and figured material. We thank Dr. Daniel Blake, Urbana, who kindly improved the English phrasing, and Dr. Giorgio Teruzzi, Milano, for his useful advice and for careful revision of the text.

5. References

- Aigner, T. & Bachmann, G. H. (1993): Sequence Stratigraphy of the German Muschelkalk. – In: Hagdorn, H. & Seilacher, A. (ed): Muschelkalk. Ergebnisse des Schöntaler Symposiums 1991. (Sonderbde. Ges. Naturk. Württ. 2): 15–18; Korb (Goldschneck).
- Alberti, F. v. (1864): Ueberblick über die Trias mit Berücksichtigung ihres Vorkommens in den Alpen. – 353 S.; Stuttgart (Cotta).
- Assmann, P. (1927): Die Decapodenkrebse des deutschen Muschelkalks. – Jb. preuß. geol. Landesanst. 48: 332–356; Berlin.
- Assmann, P. (1937): Revision der Fauna der Wirbellosen der oberschlesischen Trias. – Abh. preuß. geol. Landesanst. N. F. 170: 5–134; Berlin.
- Beuerlen, K. (1930): Vergleichende Stammesgeschichte; Grundlagen, Methoden, Probleme unter besonderer Berücksichtigung der höheren Krebse. – Fortschr. Geol. Paläontol. 8: 317–586; Berlin.
- Beuerlen, K. & Glaessner, M. F. (1930): Systematik der Crustacea Decapoda auf stammesgeschichtlicher Grundlage. – Zool. Jahrb. 60: 49–84; Jena.
- Bill, Ph. C. (1914): Über Crustaceen aus dem Voltziensandstein des Elsass. – Mitt. geol. L-Anst. Elsaß-Lothr. 8: 289–338; Straßburg.
- Desmarest, A. G. (1822): Histoire naturelle de Crustacés fossiles. Les Crustacés proprement dits. – Paris.
- Eck, H. (1865): Ueber die Formationen des bunten Sandsteins und des Muschelkalks in Oberschlesien und ihre Versteinerungen. – 149 S.; Berlin (R. Friedländer u. Sohn).
- Förster, H. (1965): Über die Erymiden, eine alte konservative Familie der mesozoischen Dekapoden. – Palaeontographica A 125: 61–175; Stuttgart.
- Förster, H. (1967): Die reptanten Decapoden der Trias. – N. Jb. Geol. Paläont. Abh. 128: 136–194; Stuttgart.
- Garassino, A. (in press): *Glyphea rigoi* n.sp. (Crustacea, Decapoda) della Dolomia di Forni (Norico, Triassico superiore) della Carnia (Udine, NE Italia). „Gortania“ – Atti Museo Friul. Storia nat., Udine.
- Garassino, A. & Teruzzi, G. (1993): A new decapod crustacean assemblage from the Upper Triassic of Lombardy (N. Italy). – Palaeontologia Lombarda, Nuova Serie I: 1–27; Milano.
- Garassino, A. & Teruzzi, G. (1995): Studies on Permo-Triassic of Madagascar. 3. The decapod crustaceans of the Ambilobè region (NW Madagascar). – Atti Soc. it. Sci. nat. Museo civ. Stor. nat. Milano 134(1): 85–113; Milano.
- Garassino, A., Teruzzi, G. & Dalla Vecchia F.M. (1996): The macruran decapod crustaceans of the Dolomia di Forni (Norian, Upper Triassic) of Carnia (Udine, NE Italy). – Atti Soc. it. Sci. nat. Museo civ. Stor. nat. Milano 136(1): 15–60; Milano.
- Geisler, R. (1939): Zur Stratigraphie des Hauptmuschelkalks in der Umgebung von Würzburg mit besonderer Berücksichtigung der Ceratiten. – Jb. preuß. geol. Landesanst. 59: 197–248; Berlin.
- Glaessner, M. F. (1960): The fossil decapod crustacea of New Zealand and the evolution of the order Decapoda. – N. Zealand Geol. Surv. Palaeont. Bull. 31: 1–60; Wellington.
- Hagdorn, H., Hickethier, H., Horn, M. & Simon, T. (1987): Profile durch den hessischen, unterfränkischen und baden-württembergischen Muschelkalk. – Geol. Jb. Hessen 115: 131–160; Wiesbaden.
- Hagdorn, H. & Simon, T. (1993): Ökostratigraphische Leitbänke im Oberen Muschelkalk. – In: Hagdorn, H. & Seilacher, A. (ed): Muschelkalk. Schöntaler Tagung 1991 (Sonderbde. Ges. Naturk. Württ. 2): 193–208; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- Holthuis, L. B. (1991): Marine lobsters of the world. An annotated and illustrated catalogue of species of interest to fisheries known to date. – FAO species catalogue 13: 1–292; Rome (Food and Agriculture Organization of the United Nations).
- König, H. (1920): Zur Kenntnis des unteren Trochitenkalkes im nordöstlichen Kraichgau. – Sitz-Ber. Heidelberger Akad. Wiss. (mathem.-naturwiss.) 13: 1–48; Heidelberg.
- Meyer, H. von (1840): Neue Gattungen fossiler Krebse aus Gebilden vom bunten Sandstein bis in die Kreide. – 28 S.; Stuttgart.
- Meyer, H. von (1847): Halicyne und Litogaster zwei Crustaceengenera aus dem Muschelkalk Württembergs. – Palaeontographica 1: 134–140; Cassel.
- Meyer, H. von (1851): Fische, Crustaceen, Echinodermen und andere Versteinerungen aus dem Muschelkalk Oberschlesiens. – Palaeontographica 1: 216–279; Cassel.
- Meyer, H. von (1854): Jurassische und Triassische Crustaceen. – Palaeontographica 4: 42–55; Cassel.
- Oeckel, W. (1992): Die Zwergfaunaschichten (Unterer Hauptmuschelkalk, Trochitenkalk, mo1) im nordöstlichen Baden-Württemberg. – In: Hagdorn, H. & Seilacher, A. (ed): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. (Sonderb. Ges. Naturk. Württ. 2): 17–130; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- Oppel, A. (1861): Die Arten der Gattungen *Glyphea* und *Pseudoglyphea*. – Jh. Ver. Vaterl. Naturk. in Württ. 17: 108–111; Stuttgart.
- Pinna, G. (1974): I crostacei della fauna triassica di Cene in Val Seriana (Bergamo). – Mem. Soc. it. Sci. nat. Museo civ. Stor. nat. Milano 21(1): 5–34; Milano.
- Pinna, G. (1976): I crostacei triassici dell'Alta Valvestino (Brescia). – Natura Bresciana Ann. Mus. Civ. St. Nat., Brescia 13: 33–42; Brescia.
- Schmidt, M. (1928): Die Lebewelt unserer Trias. – 461 S.; Öhringen (Rau).
- Wirth, W. (1957): Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des Trochitenkalkes im nordwestlichen Baden-Württemberg. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg 2: 135–173; Freiburg/Br.
- Wüst, E. (1903): Untersuchungen über die Dekapodenkrebse der germanischen Trias. – 20 S.; Jena.
- Zariquiey-Alvarez, R. (1968): Crustaceos decapodos ibéricos 32; Barcelona.

Manuskript eingegangen am 10.10.1999, angenommen am 26.10.1999

Katrin Lügger & Erhard Weidner*

Schwermetalle und organische Schadstoffe in Böden der Region Biebesheim (nördliche Oberrheinebene)

Kurzfassung

In der Region Biebesheim wurden aufgrund einer dort ansässigen Sondermüllverbrennungsanlage sowie im Rahmen von Untersuchungen über die Schadstoffbelastung der Auen in den letzten Jahren eine Vielzahl von Bodenuntersuchungen auf Schwermetalle und organische Schadstoffe durchgeführt. Diese Daten sind hier zusammengeführt.

Neben einer nutzungsbezogenen Auswertung des erstellten Datenkollektivs wird für die Schwermetalle der Substratbezug in den Vordergrund gestellt. Die räumliche Verteilung der Oberbodenbelastungen wird mit Hilfe von Kartendarstellungen für jedes relevante Element aufgezeigt und interpretiert. Die vorhandenen Konzentrationen werden mit Grenz- und Hintergrundwerten verglichen und bewertet. Außerdem wird anhand ausgewählter Bodenprofile die vertikale Variabilität der Schadstoffe diskutiert.

Insgesamt korrelieren die Konzentrationen aller untersuchten Schwer-

metalle mit den Substrattypen. Während sandige Substrate wie Flugsand und Terrassensande nur gering belastet sind, weisen die schwereren wie Auenlehme und Hochfluttone deutlich höhere Schwermetallgehalte auf. Für die Elemente Zink, Blei und Vanadium ist auf Grundlage des Vergleichs der Ober- und Unterbodenbelastung ein verstärkter anthropogener Eintrag wahrscheinlich. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung läßt sich - abgesehen vom erläuterten Substratbezug - nur der Rhein eindeutig als Belastungsquelle lokalisieren. Insbesondere die Elemente Cadmium, Chrom, Kupfer, Zink und Blei werden fluvial in die Auensedimente eingetragen. Allerdings läßt sich in den jüngeren Hochflutsedimenten - mit Ausnahme des Elements Vanadium - insgesamt ein Rückgang der Schwermetallkonzentrationen feststellen. Deutliche Überschreitungen der angeführten Orientierungs- und Vorsorgewerte nach Eikmann & Kloke (1993) und der Bundes-Bodenschutz-

verordnung (BBodSchV 1999) zeigen nur Vanadium sowie Cadmium und Chrom an Auenstandorten.

Die zusammengeführten Daten organischer Schadstoffe umfassen PAK, PCB, PCDD/F sowie CKW (HCH, DDT, HCB). Besonders die PAK-, PCB-, PCDD/F- und HCB-Konzentrationen sind im rezenten Überflutungsbe- reich des Rheins stark erhöht und überschreiten teilweise deutlich die aufgeführten Orientierungs- und Hintergrundwerte. Eine weitere lokalisierbare Belastungsfläche ist eine bereits seit Ende der siebziger Jahre bekannte HCH-Verwehung, die auch erhöhte PCDD/F-Werte aufweist. Für die übrigen untersuchten Standorte liegen die Konzentrationen der analysierten Schadstoffe im Bereich der Hintergrundbelastung. Eine Ausnahme bildet nur DDT, welches trotz des seit 1972 bestehenden Ausbringungsverbotes auf den meisten landwirtschaftlich genutzten Standorten noch nachgewiesen werden konnte.

Abstract

In recent years a variety of soil analyses for heavy metals and organic pollutants have been carried out in the area of Biebesheim on account of a local hazardous waste incinerating plant and within the frame of pollution analyses of Hessian floodplains. These data are merged in the present study.

In addition to evaluating the data with regard to the utilization the heavy metals have mainly been evaluated with regard to the substrata. The spatial distribution of topsoil pollution is shown and interpreted by means of map representations for each relevant element; the concentrations discovered are compared with

threshold and background values and then appraised. Besides, the vertical variability of the pollutants is illustrated by representative soil profiles.

On the whole, the concentrations of all heavy metals analysed correlate with the substratum types. Whereas sandy substrata such as aeolian sands and terrace sands only

* K. Lügger, E. Weidner, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Leberberg 9, 65193 Wiesbaden

show small pollution loads, more clayey substrata such as floodplain loams and high flood clays contain clearly higher heavy metal concentrations. For zinc, lead and vanadium the comparison of the topsoil with the subsoil pollution load indicates an increased anthropogenic input. As far as the spatial distribution is concerned apart from the influence of the various substrata it is only the Rhine that can definitely be identified as source of pollution. Especially the elements cadmium, chromium, copper, zinc and lead are fluvially deposited. It is true, however, that on the whole, with the excep-

tion of the element vanadium, a decrease of heavy metal concentrations can be observed in the recent high flood sediments. Only vanadium as well as cadmium and chromium in the floodplain locations clearly exceed the quoted values of orientation and precaution by Eikmann & Kloke (1993) and the soil conservation decree (BBodSchV 1999).

The merged data of organic pollutants comprise PAH, PCB, PCDD/F as well as CHx (HCH, DDT, HCB). Especially the concentrations of PAH, PCB, PCDD/F and HCB are considerably increased in the recent flood area of the Rhine and part of them

clearly exceed the quoted orientation and background values. A further polluted area which can be located is caused by a HCH drift which has been known since the end of the 1970s and which also shows increased PCDD/F values. As far as the rest of the sample-sites is concerned, the concentrations of the analysed pollutants are within the limits of background pollution. The only exception from this is DDT which could still be detected on most agricultural locations, although its distribution has been forbidden since 1972.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	85
2. Datengrundlage und Methoden	85
2.1 Datenquellen	85
2.2 Analytierte Parameter und Analysenmethoden	87
2.3 Statistische Methoden	88
3. Das Untersuchungsgebiet	89
3.1 Geologie und Ausgangssubstrate der Bodenbildung	89
3.2 Böden und ihre Belastbarkeit	92
3.3 Flächennutzung	93
4. Belastung mit Schwermetallen	94
4.1 Herkunft und Eigenschaften von Schwermetallen in Böden	94
4.2 Grenz- und Orientierungswerte	94
4.3 Statistische Auswertungen des Datensatzes	95
4.3.1 Schwermetallgehalte nach Substratgruppen geordnet	96
4.3.2 Schwermetallgehalte nach Nutzung geordnet	101
4.4 Räumliche Verteilung der Schwermetallgehalte der Oberböden	102
4.5 Vertikale Schwermetallverteilung ausgewählter Profile	113
5. Belastung mit organischen Schadstoffen	115
5.1 Herkunft und Eigenschaften der organischen Schadstoffe in Böden	115
5.2 Grenz- und Orientierungswerte	116
5.3 Statistische Auswertungen des Datensatzes	118
5.4 Räumliche Verteilung der organischen Schadstoffgehalte der Oberböden	118
5.5 Vertikale Verteilung der organischen Schadstoffe ausgewählter Profile	125
6. Zusammenfassung	126
7. Schriftenverzeichnis	128

1. Einleitung

Die Region Biebesheim im Hessischen Ried liegt zwischen den Ballungszentren Rhein-Main im Norden und Rhein-Neckar im Süden. Aufgrund einer günstigen naturräumlichen Ausstattung ist sie durch eine intensive, ertragreiche landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet. Darüber hinaus befindet sich im Hessischen Ried der bedeutendste Grundwasserspeicher Hessens. In den letzten Jahren wurde die Entwicklung der Region durch zunehmende Bebauung und steigenden Industrieinfluß charakterisiert. Im Blickpunkt steht hier insbesondere die Sonderabfallverbrennungsanlage (SVA) der Hessischen Industriemüll GmbH. Darüber hinaus liegen weitere 40 genehmigungsbedürftige Anlagen (HMUR 1990) im engeren Umkreis. Vor allem seitens der Anwohner wird befürchtet, dass die Emissionen der Industrieanlagen die Boden- und Nahrungsmittelqualität negativ beeinflussen. Vor dem Hintergrund dieser Nutzungskonflikte wurden in den letzten zwei Jahrzehnten u.a. vom Hessischen Landesamt für Bodenforschung mehrere Meßprogramme in der Region durchgeführt, die sowohl Schwermetallanalysen als auch Untersuchungen auf organische Schadstoffe umfassten. Das umfangreichste Projekt der letzten Jahre war ein ökosystemares Biomonitoring-Programm, welches neben Schadstoffuntersuchungen in Böden, Aufwuchs und Milch und dem Einsatz von Akkumulations- und Reaktionsindikatoren zur Erfassung des Eintrags von Luftschadstoffen auch hu-

man-medizinische Untersuchungen umfaßte (HLfU 1996, HMILFN 1998). Über diese, auf den Einfluß der SVA und anderer Industrieanlagen ausgerichteten Meßprogramme hinaus wurden in der Region jedoch auch Untersuchungen zum fluvialen Schadstoffeintrag durch den Rhein und die Belastung der holozänen Auensedimente durchgeführt.

Für eine zusammenfassende Charakterisierung der geologischen und bodenkundlichen Verhältnisse in der Region Biebesheim unter besonderer Berücksichtigung der Belastung mit anorganischen und organischen Schadstoffen sollten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung möglichst viele der vorhandenen Daten zusammengeführt werden. Da Meßprogramme von verschiedenen Stellen durchgeführt wurden und die Daten insgesamt innerhalb eines längeren Zeitraumes erhoben wurden, war zunächst eine Plausibilitätskontrolle und anschließend eine Homogenisierung der Datenkollektive notwendig. Neben statistischen Auswertungen, mit deren Hilfe der Einfluß der geologischen Ausgangssubstrate und der jeweiligen Nutzungen auf die Schadstoffbelastung überprüft werden sollte, wurden für alle relevanten Substanzen Karten erstellt, die die Schadstoffgehalte der Oberböden der beprobten Standorte wiedergeben und so einen schnellen Überblick über die Belastungssituation des Untersuchungsgebietes erlauben.

2. Datengrundlage und Methoden

2.1 Datenquellen

Die hier zusammengeführten Daten stammen aus einer Vielzahl von Untersuchungsreihen und Meßprogrammen, die seit den achtziger Jahren in der Region Biebesheim durchgeführt wurden. Neben den vom Hessischen Landesamt für Bodenforschung (HLfB) im Rahmen der geologischen und bodenkundlichen Kartierung, der Bodendauerbeobachtung und verschiedener Gutachten erhobenen Daten (z.B. Weidner 1989, 1992a, 1998, HLfU 1991, Emmerich 1997a, 1997b, HLfB 1998), die den überwiegenden Teil des Datenkollektivs ausmachen, wurden auch Daten aus Veröffentlichungen (Thiemeyer 1989a, 1989b), einer Diplomarbeit (Dehner 1994) und einem Werkvertrag (Moldenhauer 1996) mit einbezogen. Darüber hinaus wurde in den Jahren 1992–1994 ein umfangreiches ökosystemares Biomonitoring-Programm in der Region Biebesheim durchgeführt (HLfU 1996, HMILFN 1998), dessen Daten ebenfalls Eingang fanden,

soweit sie die Schadstoffbelastung der Böden betrafen. Eine weitere Datenquelle bot das Untersuchungsprogramm des Hessischen Landesamtes für Regionalentwicklung und Landwirtschaft (HLRL), in dessen Rahmen von 1984–1993 an 26 Standorten, die auch im Schwermetallgutachten von Weidner (1992a) berücksichtigt wurden, anorganische und organische Schadstoffgehalte ermittelt wurden (HLRL 1991, HMILFN 1998). Da es sich bei den Schwermetalldaten jedoch um Zeitreihen über fast 10 Jahre handelt, wurde es nicht als sinnvoll erachtet, diese Werte in die statistischen Auswertungen und Kartendarstellungen einzubeziehen. Im allgemeinen sind sie jedoch mit den an den gleichen Standorten erhaltenen Werten von Weidner (1992a) vergleichbar. Die erhobenen organischen Schadstoffdaten des HLRL hingegen werden im folgenden verwendet.

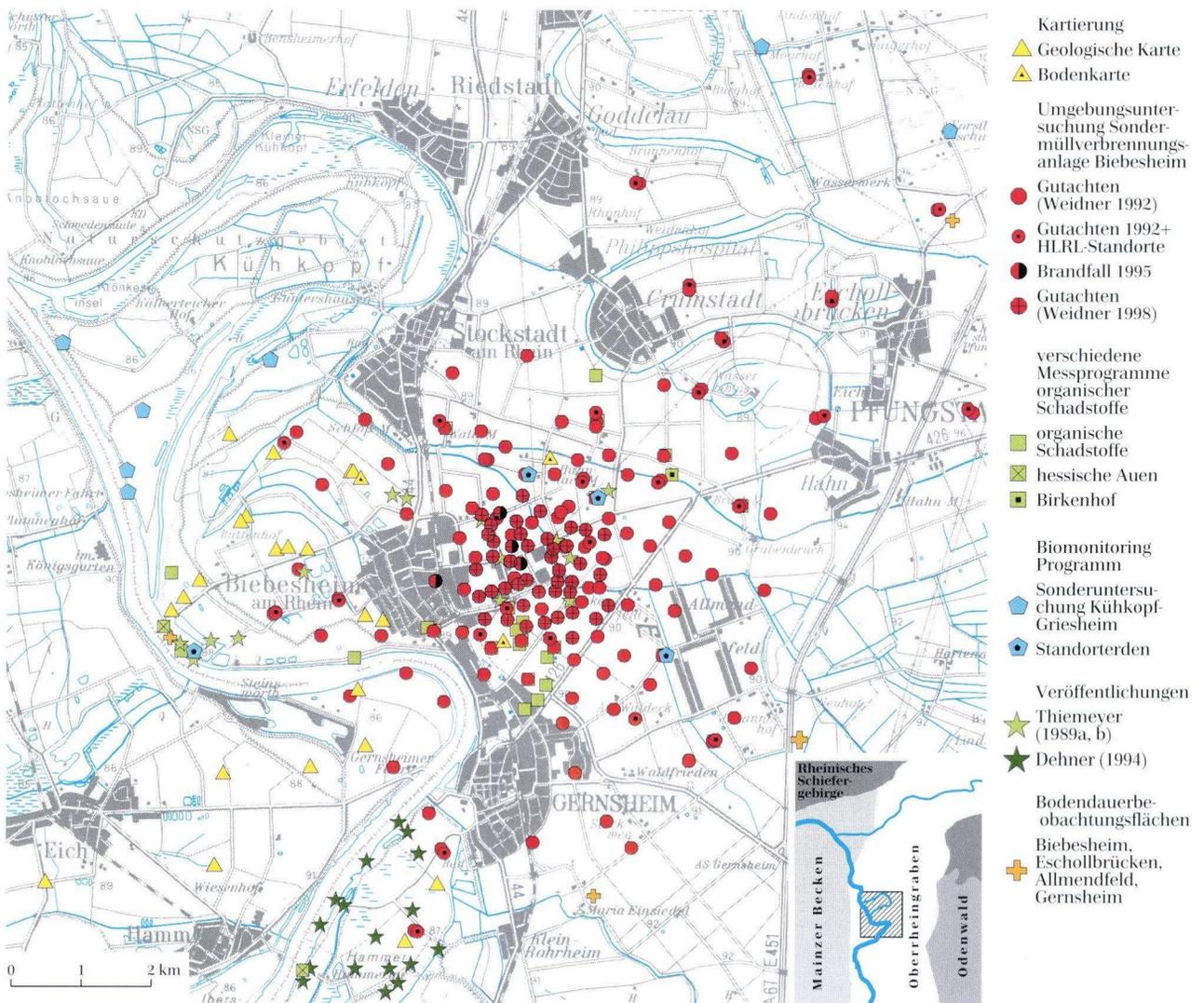
Mit wenigen Ausnahmen wurde die Beprobung der Böden entweder an Schürfgaben oder durch mehrere Einstiche mit dem Pürckhauer Bohrer horizontbezogen

durchgeführt. Nur im Falle der Standorterden des Biomonitorings und des HLRL-Untersuchungsprogrammes wurden ausschließlich Flächenmischproben genommen. Ein im Rahmen des Schwermetallgutachtens (Weidner 1998) durchgeführter Vergleich von Punkt- und Flächenmischproben zeigt allerdings kaum signifikante Abweichungen der Schwermetallgehalte.

Die Aufnahme der Daten für die vorliegende Untersuchung erfolgte in Anlehnung an die Punktdatenbank des Bodenzustandskatasters Gernsheim (Hagemeister & Domrös 1995), die sich aus Profildaten der Geländeanprache und Laboranalysedaten zusammensetzt. Außerdem werden Kopfdaten, die deskriptive Informationen zu dem jeweiligen Profil beinhalten, von Horizontdaten unterschieden, die die verschiedenen Meßwerte für jeden einzelnen beprobten Horizont umfassen. Bei der

Datenaufbereitung mußte aufgrund der unterschiedlichen Datenquellen zunächst eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt werden, da die Analysedaten der einzelnen Projekte nur bei einer einheitlichen Methodik miteinander verglichen werden können. Ein Abgleich der Daten war vor allem im Hinblick auf die Parameter der Standortaufnahme und Bodenansprache notwendig, die soweit möglich an die Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage (KA 4) angeglichen wurden (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Bodenkunde 1994).

Eine Übersicht über die Lage aller zusammengeführten Profile, geordnet nach ihrer Quelle, gibt Karte 1. In Tab. 1 werden zusätzlich die jeweilige Anzahl der untersuchten Profile, das Jahr der Probenahme, die analysierten Parameter sowie die beteiligten Labore aufgezählt.



Karte 1. Zusammengeführte Profile nach Datenquelle.

Tab. 1. Zusammenstellung der Datenquellen

Datenquelle	Anzahl der Profile	Jahr der Probenahme	analyisierte Parameter	Labor
Geologische Landesaufnahme	22	1992-1993	<i>Schwermetalle</i>	HLfB
Bodenkundliche Landesaufnahme	3	1988	Schwermetalle	HLfB
Umgebungsbeobachtung SVA Biebesheim, Gutachten (Weidner 1992)	134	1988	Schwermetalle	HLfB
Umgebungsbeobachtung SVA, Brandfall	4	1995	Schwermetalle PAK, PCB, HCB PCDD/F	HLfB HLVA GfA
Umgebungsbeobachtung SVA Nahbereich, Gutachten (Weidner 1998)	45	1996	Schwermetalle	HLfB
Meßprogramm org. Schadstoffe	27	1989-1991	<i>PAK, PCB, HCH, HCB, PCDD/F</i>	GfA
Meßprogramm hessische Auen	2	1994	Schwermetalle PAK, PCB, HCH, HCB, DDT <i>PCDD/F</i>	HLfB HLVA Dr. Weßling
Meßprogramm Birkenhof	1	1995	<i>PCDD/F</i>	Dr. Weßling
Sonderuntersuchungen Kühkopf-Griesheim	7	1992	PAK, PCB, HCH, HCB, DDT <i>PCDD/F</i>	HLVA GfA
Standorterden Biomonitoring	4	1992	Schwermetalle PAK, PCB, HCB, <i>PCDD/F</i>	HLfB GfA
Veröffentlichungen Thiemeyer (1989a, b)	14	1981	Schwermetalle	Geogr. Inst. Uni Frankf.
Diplomarbeit Dehner (1994)	17	1992	Schwermetalle	HLfB
Bodendauerbeobachtungsflächen: Allmendfeld, Biebesheim, Eschollbrücken Gernsheim (Sondierung)	3	1992	Schwermetalle PAK, PCB, HCH, HCB, DDT <i>PCDD/F</i>	HLfB HLVA GfA Dr. Weßling
Untersuchungsprogramm des HLRL	1	1994	Schwermetalle	HLfB
	26	1984-1993	Schwermetalle PCB, HCH, HCB, DDT, <i>PCDD/F</i>	HLVA

Kursiv gedruckte Untersuchungsparameter = Daten nur bei einem Teil der untersuchten Profile vorhanden

2.2 Analyisierte Parameter und Analysemethoden

Wie aus Tab. 1 ersichtlich, wurde der überwiegende Teil der untersuchten Profile auf Schwermetalle untersucht. Es wurden insgesamt 1178 Einzelproben mit 10716 Schwermetalldaten für die weitere Auswertung zusammengestellt. 11 verschiedene Schwermetalle wurden erfasst, wobei an fast allen Proben die Elemente Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Zink (Zn) und Blei (Pb) analysiert wurden, während die Datendichte für Antimon (Sb), Vanadium (V), Quecksilber (Hg), Kobalt (Co) und Arsen (As) geringer ausfällt.

Die Analytik der Schwermetalluntersuchungen wurde größtenteils im Labor des HLfB durchgeführt. Die Bestimmung von Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V und Zn erfolgte nach Königswasseraufschluß mittels Flammen-AAS. As wurde nach Königswasseraufschluß und Abtrennung als AsH₃ im Hydridsystem mittels Atomabsorption gemessen. Sb wurde analog nach einem speziellen Salzsäure-

auszug mittels Hydridverfahren bestimmt. Die Hg-Analyse erfolgte mit dem Kaltdampfverfahren nach oxidativem Säureaufschluß mit Salpeter- und Schwefelsäure und Freisetzen mittels Natriumborhydrid als Hg-Dampf. Die Nachweisgrenzen liegen bei den verwendeten Verfahren bei 0,1 mg/kg. Die Streuung (Reproduzierbarkeit) der Meßwerte wurde durch Mehrfachbestimmungen zu 7 % ermittelt. Ausnahmen bilden die Schwermetallanalysen im Rahmen der Veröffentlichungen von Thiemeyer (1989a, 1989b), die am Geographischen Institut der Universität Frankfurt durchgeführt wurden, und die Untersuchungen des HLRL, die von der Hessischen Landwirtschaftlichen Versuchsanstalt (HLVA) in Kassel vorgenommen wurden.

Der Königswasseraufschluß liefert keine Gesamtgehalte, jedoch lassen sich nach Brümmer (1989) mehr als 90 % der Gesamtgehalte erfassen, sofern die Proben vor der Analyse feinst gemahlen werden. Dies gilt in der Regel für Pb, Ni, Zn und Cu, allerdings können insbesondere die Gehalte an Cr, V und As z.T. deutlich unterschätzt

werden und nur um 70 % der Gesamtgehalte betragen, wie ein im Rahmen des Schwermetallgutachtens von Weidner (1998) durchgeführter Vergleich von Cr-Gehalten nach Königswasseraufschluß mit Röntgenfluoreszenz-Werten deutlich macht. Auch Ruppert (1990) und Golwer (1989) betonen, dass insbesondere Cr-Gesamtgehalte erst durch einen Aufschluß mit Flußsäure-Perchlorsäure oder mittels Röntgenfluoreszenz zu erhalten sind und bei einem Königswasseraufschluß sogar bis zu 50 % des Gesamtchromgehaltes nicht erfaßt werden. Nach Bachmann et al. (1997) kann vorläufig von folgendem Verhältnis zwischen Gehaltsangaben aus Königswasser- und Totalaufschlüssen ausgegangen werden: Faktor 0,8 für Cd, Zn, Ni, Pb, Cu; Faktor 0,7 für As; Faktor 0,6 oder niedriger für Cr.

Der Datensatz der organischen Schadstoffe umfaßt deutlich weniger Profile, es wurden 116 Einzelproben zusammengestellt, die auf mindestens eine der verschiedenen Substanzen untersucht wurden. Insgesamt wurden 4424 Einzelanalysen aufgenommen, die folgende Substanzen beinhalten:

1. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK): bis zu 19 Einzelsubstanzen
2. Polychlorierte Biphenyle (PCB): Tetra- bis Deca-PCB bzw. Ballschmitter-Kongeneren
3. Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW): Hexachlorcyclohexane (α -, β -, γ -, δ -HCH), DDT und Hexachlorbenzol (HCB)
4. Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F): 25 Homologen- und Kongenerenwerte

Die Analysen auf organische Schadstoffe erfolgten nach den z.Z. üblichen DIN-Normen. Der überwiegende Teil der Messungen auf PAK, PCB und CKW wurde von der HLVA durchgeführt. Eine Ausnahme bilden die im Rahmen des Biomonitoring-Programmes untersuchten Standorterden und die Proben des Meßprogrammes organische Schadstoffe, welche von der Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik, Münster (GfA) analysiert wurden, die darüber hinaus auch einen Großteil der PCDD/F-Analysen durchführten. Hier ist außerdem noch das Labor Dr. Weßling, Altenberge, zu nennen. Schon an dieser Stelle sei angemerkt, dass der Datensatz der organischen Schadstoffe somit im Hinblick auf die Anzahl der beteiligten Analyseinstitute deutlich heterogener zusammengesetzt ist als das Datenkollektiv der Schwermetalle.

2.3 Statistische Methoden

Die aus den erläuterten Quellen zusammengeführten Daten wurden, um einen Überblick über das Spektrum des Gesamtdatensatzes zu erhalten, zunächst anhand von Histogrammen auf ihre Häufigkeitsverteilung untersucht. Desweiteren wurden verschiedene Lokations- und Streuungsparameter (arithmetisches Mittel, Median, 90. Perzentil, Minimal- und Maximalwerte) berechnet. Zur differenzierteren Betrachtung erfolgte zusätzlich eine Untergliederung in Ober- und Unterböden sowie verschiedene Substratgruppen und Nutzungstypen.

Im Rahmen der statistischen Auswertungen waren Werte unterhalb der Nachweisgrenze ein Problem. Bei den Schwermetallen handelte es sich in erster Linie um Cd- und Hg-Gehalte, außerdem wies eine Vielzahl der Messungen auf organische Schadstoffe nicht nachweisbare Stoffgehalte auf. Prinzipiell gibt es in diesem Zusammenhang verschiedene Vorgehensweisen:

- Alle Messungen unterhalb der Nachweisgrenze werden aus dem Datensatz gestrichen.
- Es werden die jeweiligen Nachweisgrenzen eingesetzt.
- Es werden die jeweiligen halben Nachweisgrenzen eingesetzt.
- Es wird der Zahlenwert 0 eingesetzt.

Nach Joneck & Prinz (1995) ist bei heterogenen Datenkollektiven, hervorgerufen beispielsweise durch über längere Zeiträume hinweg gesammelte Daten oder die Beteiligung verschiedener Analyseninstitute mit unterschiedlichen Nachweisgrenzen, die zuletzt genannte Variante die einzig akzeptable Lösung. Da genau dieses im vorliegenden Fall zutrifft, wurden vor der statistischen Auswertung alle nicht nachweisbaren Stoffgehalte durch den Zahlenwert 0 ersetzt.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt bei einer statistischen Auswertung ist die Ausreißerproblematik. Extremwerte üben eine verzerrende Wirkung auf viele statistische Parameter aus, allerdings gibt es kaum „saubere“ Möglichkeiten ihrer Definition und Eliminierung (Sachs 1992). Da im vorliegenden Fall der Schwerpunkt der Untersuchung auf die Betrachtung der räumlichen Verteilung der Schadstoffgehalte und möglicher Belastungsquellen gelegt wird, wird auch im Hinblick auf die durchgeführten statistischen Verfahren eine Eliminierung der Extremwerte als nicht sinnvoll erachtet. Bei den Vergleichen der einzelnen Datenkollektive wird der gegenüber dem arithmetischen Mittel von Ausreißern weniger stark beeinflusste Medianwert verwendet.

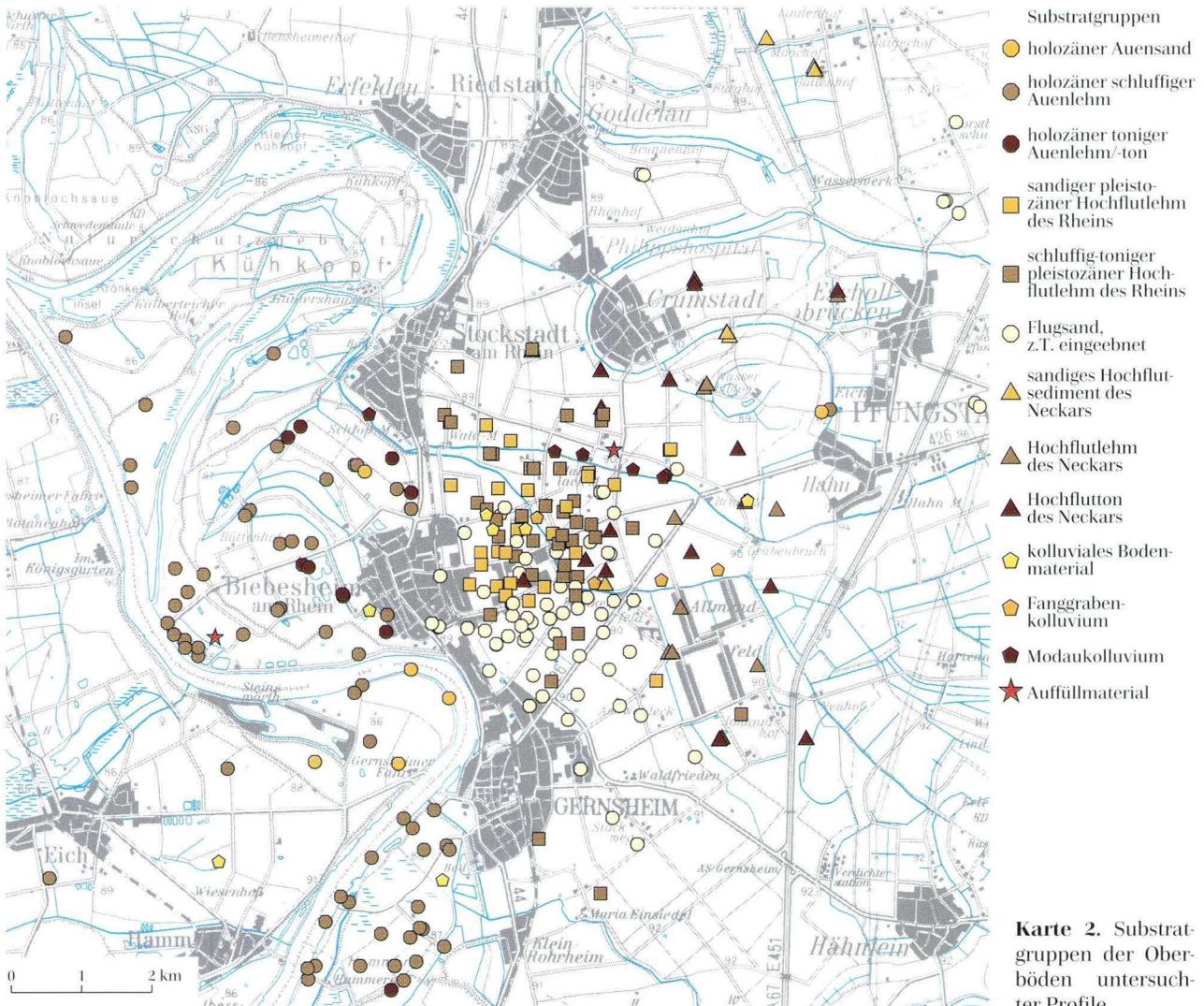
3. Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im zentralen nördlichen Oberrheintiefland. Es umfaßt Bereiche von vier TK 25-Blättern (6116 Oppenheim, 6117 Darmstadt West, 6216 Gernsheim, 6217 Zwingenberg). Der Rhein unterteilt das Gebiet in einen westlichen, rheinhessischen Teil (Rheinland-Pfalz) und einen östlichen, hessischen Teil, welcher dem Naturraum des Hessischen Rieds zuzuordnen ist. Mit Ausnahme einiger im Rahmen der geologischen Kartierung aufgenommener Profile und vier Untersuchungsstandorten des Schwermetallgutachtens (Weidner 1992a) liegen alle analysierten Profile auf hessischer Seite (siehe Karte 1).

Man kann das Untersuchungsgebiet in drei Landschaftsräume untergliedern, nämlich die holozäne Rheinaue, die pleistozäne Hochgestadefläche und den Neckaraltauenbereich. Diese Dreigliederung findet sich in der Verteilung der Sedimente und Böden wieder.

3.1 Geologie und Ausgangssubstrate der Bodenbildung

Als Teil des Hessischen Rieds befindet sich das Untersuchungsgebiet im Oberrheingraben, dessen Entstehung im Alttertiär seinen Anfang nahm. Im Verlauf der noch heute andauernden Grabenentwicklung wurden ungefähr 3000 m mächtige Sedimentserien abgelagert; allein während des Pleistozäns wurden unter periglazialen Klimabedingungen vom Rhein sandig-kiesige Flußschotter in einer Mächtigkeit von durchschnittlich 100–200 m sedimentiert. Der letzte pleistozäne Schotterkörper, die Niederterrasse, die von Flugsanden und Hochflutlehmen bedeckt wird, erreicht im hessischen Ried eine Mächtigkeit von ca. 20 m (Kupfahl 1972). Seit Ende des Pleistozäns und im Laufe des Holozäns wurde sie durch die Mäandersysteme von Rhein und Neckar stark zergliedert.



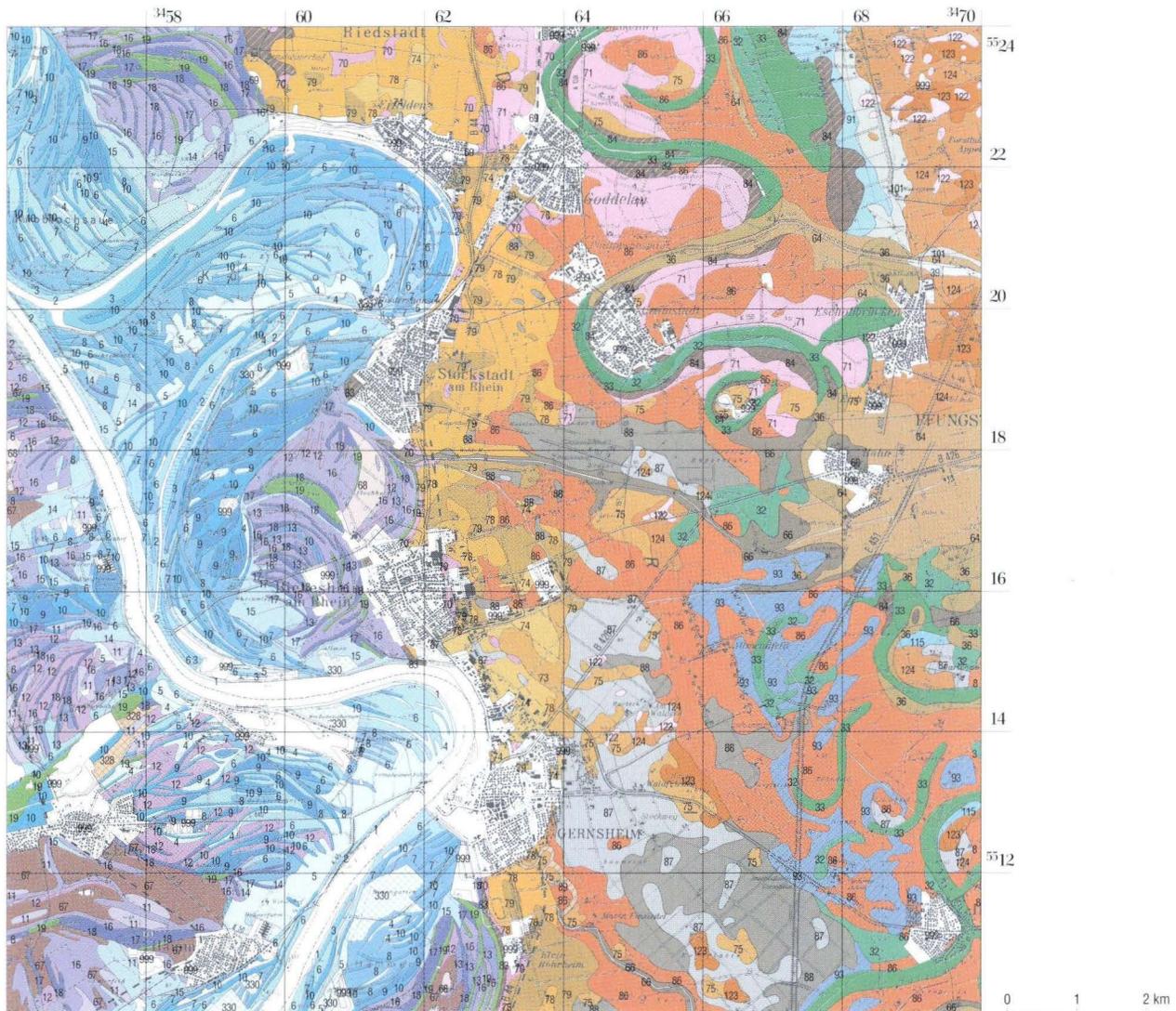
Karte 2. Substratgruppen der Oberböden untersuchter Profile.

Einen Überblick über die Geologie und die tektonische Entwicklung des Oberrheingrabens gibt Pflug (1982). Geologische Karten des Untersuchungsgebietes existieren für die Blätter 6217 Zwingenberg (Kupfahl 1972), 6216 Gernsheim (digitale Ausgabe, Rosenberger et al. 1996) und für das benachbarte Blatt 6316 Worms (Scharpff 1977). Eine dreidimensionale Darstellung des quartären Untergrunds zeigen Hoppe et al. (1996).

Das Relief ist aufgrund der quartären fluvialen Aufschüttungen des Rheins nur gering ausgeprägt. Der Übergang von der holozänen Rheinniederung zum pleistozänen Hochgestade ist allerdings durch eine 1–2 m mächtige Geländekante erkennbar. Neben dieser morphologischen Grobgliederung fällt im Bereich der holozänen Mäandersysteme eine äußerst abwechslungsreiche, morphologisch kleinräumige Gliederung auf. An die rezente Rheinaue schließen sich bogenförmig verschie-

den alte Mäandersysteme an, deren einzelne Mäander sich aus Altläufen und oft nur wenige Dezimeter höherliegenden Umlaufflächen, die wiederum in Rinnen- und Rückenbereiche untergliedert werden können, zusammensetzen (Scharpff 1977). Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Altläufen und den Umlaufflächen sowie den Rinnen- und Rückenbereichen heute durch die landwirtschaftliche Nutzung stark verwischt. Der Versuch einer zeitlichen Einordnung der verschiedenen Mäandersysteme wird bei Scharpff (1977) und Thiemeyer (1989b) sowie im Rahmen der Geologischen Karte Gernsheim (Rosenberger et al. 1996) unternommen.

Im Gegensatz zur holozänen Rheinaue zeigt das pleistozäne Hochgestade eine geringere Reliefierung. Eine Ausnahme bilden die vielen Ackerberge, die ein Indiz für die schon lange bestehende ackerbauliche Nutzung des Raumes sind, da diese langgestreckten, wallartigen



Karte 3. Bodenkarte der Region Biebesheim, Ausschnitt aus der digitalen Bodenkarte von Hessen 1:50 000 (vorläufige Ausgabe, Blatt L 6116 Darmstadt West und L 6316 Worms, Rosenberger & Sabel 1997a, b).

Erhöhungen dort entstehen, wo der Bauer beim Pflügen wenden muß. Im Bereich der Neckaraltaue ist das Hochgestade zerschnitten und mit Auenlehmen und Flugsanden verschiedener Mächtigkeit und unterschiedlichen Alters bedeckt. Auch auf dem restlichen Hochgestade sind Flugsanddecken und Dünen von unterschiedlicher Mächtigkeit zu finden.

Um die geogenen Grundgehalte der Schwermetalle in den Böden unterscheiden zu können, ist eine Differenzierung der Ausgangssubstrate der Bodenbildung erforderlich. In Anlehnung an die Schwermetallgutachten von Weidner (1992a, 1998), denen ein beträchtlicher Anteil der hier zusammengeführten Daten entstammt, wurden insgesamt 18 geologische Substratgruppen unterschieden (Tab. 2). Die Zuordnung erfolgte dabei für jeden einzelnen Horizont, da die Profile überwiegend durch einen mehrschichtigen Substrataufbau gekenn-

Tab. 2. Substratgruppen in der Region Biebesheim.

holozäner Auensand
schluffiger holozäner Auenlehm
toniger holozäner Auenlehm bis Auenton
Rheinweißhorizont, lehmig, tonig (holozäner Auenlehm/-ton)
Terrassensande, holozän
sandiger pleistozäner Hochflutlehm des Rheins
schluffig-toniger pleistozäner Hochflutlehm des Rheins
Rheinweißhorizont, sandig, schluffig (pleistozäner Terrassensand)
Terrassensande, pleistozän
sandiges Hochflutsediment des Neckars
Hochflutlehm des Neckars
Hochflutton des Neckars
Flugsand, z.T. eingeebnet
Niedermoortorf
kolluviales Bodenmaterial
Fangrabenkolluvium
Modaukolluvium
Auffüllmaterial



Legende zu Karte 3.

zeichnet sind. Alle beprobten Bodenhorizonte der übrigen Untersuchungen wurden soweit möglich diesen Substratgruppen zugeordnet, so dass sich durchschnittliche Schadstoffgehalte der Böden aus den einzelnen Substratgruppen ermitteln lassen.

In Karte 2 werden die untersuchten Bodenprofile unter Angabe der jeweiligen Substrate ihrer Oberböden dargestellt. Die Legende umfaßt hier nur 13 Substratgruppen, da Substrate wie beispielsweise Rheinweiß oder Terrassensande nur in den Unterböden vertreten sind und deshalb nicht aufgeführt werden.

3.2 Böden und ihre Belastbarkeit

Karte 3 gibt einen das untersuchte Gebiet umfassenden Ausschnitt der digitalen Bodenkarte von Hessen 1:50 000 wieder. Insgesamt sind im Untersuchungsgebiet 50 unterschiedliche Bodenformengesellschaften vertreten, deren Nummern und Farbgebungen in der zugehörigen Legende aufgelistet werden.

Auf der Hochgestadefläche sind Bodenformengesellschaften aus jungquartären aquatischen Sedimenten (Hochflutablagerungen) verbreitet. Es handelt sich größtenteils um Parabraunerden (Nr. 74, 75, 78, 79) aus mehreren Hochflutlehmen des Rheins über Rheinweiß über Terrassensand/-kies, die oft pseudovergleyt (Nr. 87, 88) und in mehr oder weniger starkem Maße erodiert sind, ein Ausdruck der langandauernden, intensiven landwirtschaftlichen Nutzung des Raumes. Teilweise haben diese Böden noch eine Deckschicht aus Flugsand. Bei dem sogenannten Rheinweiß handelt es sich um eine Besonderheit des Hessischen Rieds, einen weißen bis fahlbraunen, sehr karbonatreichen Kalkanreicherungs-horizont, der in ausgetrocknetem Zustand stark verfestigt ist. Er entstand durch Ausfällung von Kalk aus aufsteigendem karbonatreichem Grundwasser im Bereich des offenen Kapillarsaumes. Liegen mehrere Rheinweißhorizonte übereinander, ist dies ein Indiz für unterschiedliche Grundwasserstände. Neben den genannten Bodenformengesellschaften findet man im Nordosten des Untersuchungsgebietes außerdem Bodenformengesellschaften aus Flugsand (Nr. 123 und 124, Braunerde mit Bändern) sowie angrenzend an den Neckaraltlauf Gleye (Nr. 91) und als Bodenformengesellschaft aus fluvialen Kiesen und Sanden Gley-Pseudogley (Nr. 101).

Im Bereich des Neckaraltlaufes sind in erster Linie Pelosole (Nr. 86) und Pelosol-Gleye (Nr. 93) aus tonigem Hochflutlehm bis Hochflutton über Rheinweiß und Terrassensand/-kies verbreitet, während im Altlauf selbst das z.T. mineralisch überdeckte Niedermoor und der Anmoorgley vorkommen (Nr. 33 und 32), angrenzend auch Tschernitzen (Nr. 84). Im nördlichen Teil nehmen außerdem Pararendzinen (Nr. 71) eine größere Fläche ein. Uferbegleitend an Sandbach, Modau und Fangra-

ben findet man überwiegend aus Lößmaterial hervorgegangene Kolluvisole (Nr. 64 und 66) über Hochflut- bzw. Auenlehm mit Vergleyung im Untergrund, die den Bodenformengesellschaften aus holozänen Abschwemm-massen der Schwemmfächer zugerechnet werden können.

In der holozänen Rheinaue werden kalkhaltige, hydro-morphe Böden angetroffen, deren Horizontierung abhängig vom jeweiligen Substrat und dem Einfluß des Grundwassers ist. Geringe Reliefunterschiede, wie bei den Rinnen und Rücken der Umlaufflächen, haben eine Differenzierung in Auengleye (in den Rinnen: Nr. 10 und 3) und kalkhaltige Vegen (auf den Rücken: Nr. 4, 5, 6, 7, 8, 9) zur Folge. Auf den älteren Umlaufflächen sind Auen-pelosol-Vegen (Nr. 16) und Auenpelosol-Auengleye (Nr. 18) aus Auenton mit geringmächtiger schluffig-toniger Auenlehmbedeckung sowie Gley-Vegen (Nr. 13) und Kalkpaternia (Nr. 12) aus schluffigem bis schluffig-tonigem Auenlehm mit Karbonatanreicherungs-horizont verbreitet. In den Altlauf-rinnen ist die Bodenformengesellschaft Niedermoor zu finden (Nr. 19).

Dieser Formenreichtum der Bodengesellschaften geht einher mit ihren unterschiedlichen Filter-, Puffer- oder Transformationseigenschaften für Schadstoffe. So sind im Hinblick auf das Filtervermögen für Schwermetalle, also die Fähigkeit der Böden, Schwermetalle zu binden und zu immobilisieren, damit sie nicht von den Pflanzen aufgenommen werden können oder ins Grundwasser gelangen, der pH-Wert und die Gehalte an Ton, Humus, Carbonat und Eisenoxiden maßgeblich. Beispielsweise erhöht der im Hessischen Ried im Unterboden weit verbreitete Rheinweißhorizont aufgrund seines hohen Carbonatgehaltes die Bindungsstärke der Böden. Zur Abschätzung der Grundwassergefährdung müssen über die Bindungskapazität hinaus noch die klimatische Wasserbilanz, die Grundwasserflurabstände und die Höhe der Schadstoffgehalte in die Überlegungen mit einbezogen werden.

Anhand der Beurteilungskriterien der DVWK-Merkblätter 212 (1988) und der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Bodenkunde 1982) wurde auf Grundlage der Bodenkarte der nördlichen Ober-rheinebene 1:50 000 eine Auswertungskarte erstellt, auf der 5 Stufen des Schwermetallfiltervermögens nach der relativen Bindungsstärke der Böden und der Länge der Filterstrecke über dem mittleren Grundwasserhochstand unterschieden werden (Weidner 1992b). Es wird deutlich, dass die karbonatreichen Auenböden der Rheinaue mit tief stehendem Grundwasser und die Parabraunerden des Hochgestades das größte Filtervermögen besitzen, wohingegen die Niedermoore im Neckaraltauenbereich und der Rheinaue sowie die Auengleye in den Umlauf-rinnen ein geringes Filtervermögen aufweisen.

3.3 Flächennutzungen

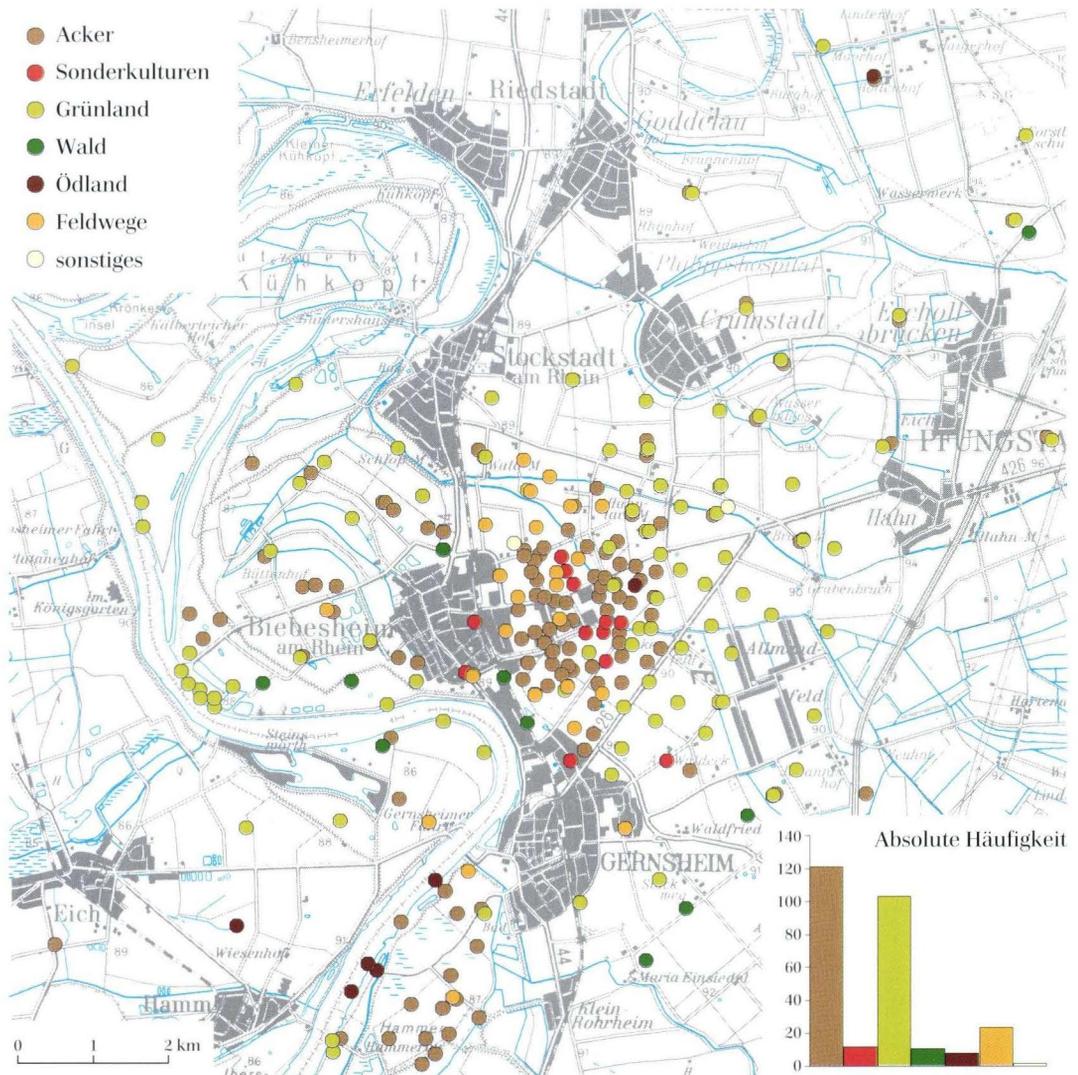
Während es sich bei dem Hessischen Ried ursprünglich um ein feuchtes Niederungsgebiet mit typischer Sumpflvegetation und Auenwaldlandschaften handelte, hat sich bis heute ein Wandel zu einer intensiv genutzten Agrarlandschaft vollzogen. Möglich wurde dies durch zahlreiche anthropogene Eingriffe in den Naturhaushalt, wie die seit dem Mittelalter bis ins 20. Jahrhundert durchgeführten Deichbaumaßnahmen und die im 19. Jahrhundert begonnene Rheinbegradigung, im Zuge derer auch die Rheinschlinge des Kühkopfes nördlich Biebesheim abgeschnitten wurde. Hinzu kamen Maßnahmen zur Binnenentwässerung und Trockenlegung tiefliegender Flächen, z.B. durch den Durchstich der Modau oder das Landgrabensystem. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Niederschläge (660 mm Jahresmittel) und einer großflächigen Grundwasserabsenkung auf mehr als 2 m Flurabstand, auch als Folge der verstärkten

Förderung zur Wasserversorgung der Region seit Mitte der sechziger Jahre, muß heute ein Großteil der landwirtschaftlichen Flächen zusätzlich beregnet werden.

Der überwiegende Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche wird als Ackerland genutzt, wobei der Getreideanbau den größten Flächenanteil einnimmt. Außer Hackfrüchten werden auch vermehrt Sonderkulturen (vor allem Gemüse) angebaut. Dauergrünlandflächen nehmen im Untersuchungsgebiet nur eine nachgeordnete Stellung ein, extensiv genutzte Mähwiesen befinden sich vor allem entlang des Rheins vor dem Winterdeich (Hagemeister & Domrös 1995).

Neben landwirtschaftlichen Nutzflächen findet man im hessischen Ried aber auch wichtige Natur- und Landschaftsschutzgebiete, wie beispielsweise Niederungen und Altarme des Rheins (z.B. Kühkopf), Niedermoore des Neckaraltlaufs oder Dünengebiete mit naturnahen Kiefernwäldern auf dem Hochgestade.

Karte 4 zeigt die Nutzungstypen der untersuchten Pro-



Karte 4. Nutzungstypen der untersuchten Profile.

file nach ihrer Angleichung an die Nomenklatur der KA 4 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Bodenkunde 1994). Insgesamt wurden 7 Nutzungen unterschieden: Acker- und Sonderkulturflächen sind mit 46 % der untersuchten Profile am häufigsten vertreten, gefolgt von Grünland mit 37 %.

4. Belastung mit Schwermetallen

4.1 Herkunft und Eigenschaften von Schwermetallen in Böden

Generell wird zwischen dem natürlichen, **geogenen** Grundgehalt an Schwermetallen und den durch menschliche Aktivitäten hervorgerufenen **anthropogenen** Einträgen in Böden unterschieden. Den geogenen Grundgehalt untergliedert man weiter in eine **lithogene** Komponente, die dem Ausgangsgestein entstammt, ggf. eine **chalkogene** Komponente bei oberflächennah anstehenden Vererzungen und eine **pedogene** Komponente, da es durch Bodenbildungsprozesse (Verwitterung, Lessivierung, Podsolierung, Bioturbation) zu einer sekundären Umverteilung (Anreicherung oder Verarmung) der Schwermetalle gegenüber dem Ausgangsmaterial kommen kann. Der Ausdruck „Hintergrundgehalt“ umfaßt neben dem geogenen Grundgehalt die diffusen, ubiquitären Stoffeinträge, die nur schwer von den Grundgehalten zu trennen sind (LABO 1998). Neben luftbürtigen Immissionen (z. B. industrielle Feuerung und Verhüttung, Hausbrand, Kfz-Verkehr, Müllverbrennung) gelangen Schwermetalle anthropogen auch durch die Ausbringung von Abfallstoffen und Agrochemikalien oder durch belastetes Flußwasser und Sedimente im Überflutungsbereich oder Rieselfeldern in die Böden.

In Abhängigkeit von ihrer Herkunft (lithogen, pedogen, anthropogen) liegen die Schwermetalle in spezifischen Bindungsformen vor und besitzen einen unterschiedlichen Mobilitätsgrad und eine unterschiedliche Pflanzenverfügbarkeit. So kommen Schwermetalle lithogener Herkunft überwiegend in carbonatischer, sulfidischer oder silikatischer Form vor. Durch pedogenetische Prozesse werden sie teilweise aus der lithogenen in bodentypische Bindungsformen überführt (adsorptive Bindung an Tonmineralen, organischer Substanz und pedogenen Oxiden; Kuntze et al. 1991). Anthropogen eingetragene Schwermetalle sind oft oxidisch gebunden und somit leicht löslich und pflanzenverfügbar.

Auf der anderen Seite wird die Löslichkeit, Verfügbarkeit und Mobilität der Schwermetalle von element- und bodenspezifischen Eigenschaften bestimmt. So nimmt die Bindungsstärke der Schwermetalle an Bodenbestandteile nach Herms & Brümmer (1984) in folgender Reihenfolge zu: $Cd < Ni < Co < Zn < Cu < Pb < Hg$. In Be-

Waldstandorte hingegen sind im Untersuchungsgebiet seltener, weshalb auch nur 11 Profile unter Wald analysiert wurden. Im Rahmen des Schwermetallgutachtens (Weidner 1992a) wurden bevorzugt Feldwege und Ackerlandstreifen beprobt.

zug auf die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften läßt sich tendenziell eine Abnahme der Schwermetalllöslichkeit mit steigendem pH-Wert, steigenden Ton- und Humusgehalten sowie Gehalten an pedogenen Oxiden feststellen. Andererseits nimmt die Mobilität mit anwachsenden Schwermetallgesamtgehalten und Gehalten an löslichen Komplexbildnern sowie größerer Ionenstärke der Bodenlösung zu.

4.2 Grenz- und Orientierungswerte

Die Beurteilung der Schwermetallgehalte in den Böden der Region Biebesheim erfolgte in Anlehnung an die Orientierungswerte nach Eikmann & Kloke (1993) und der Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, BBodSchV 1999).

Im Rahmen der „nutzungs- und schutzgutbezogenen Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden“ unterscheiden Eikmann & Kloke (1993) drei Bodenwertebereiche:

1. Bodenwert I = BW I = Basiswert = Hintergrundwert
2. Bodenwert II = BW II = Prüfwert = Sanierungszielwert
3. Bodenwert III = BW III = Eingreifwert (Interventionswert)

Die Orientierungswerte für die untersuchten 11 Elemente werden für die multifunktionale Nutzungsmöglichkeit, die landwirtschaftlichen Nutzflächen und nicht-agrarische Ökosysteme für das Schutzgut Mensch und andere Schutzgüter in Tab. 3 angegeben. Es handelt sich bei den Werten um Gehalte nach Königswasseraufschluß.

Die Vorsorgewerte für Metalle in Böden nach §8 Abs. 2 Nr.1 des neuen Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) werden in Tab. 4 vorgestellt; es handelt sich ebenfalls um Werte nach Königswasseraufschluß. Sie sollen den vorsorgenden Schutz der Bodenfunktionen bei empfindlichen Nutzungen gewährleisten. Im Gegensatz zu den Orientierungswerten von Eikmann & Kloke (1993) wird dem Einfluß der Bodenarten Rechnung getragen, indem unterschiedliche Werte für Ton, Lehm/Schluff und Sand angegeben werden. Darüber hinaus werden für die Elemente Cd, Ni, Zn und Pb Einschränkungen

Tab. 3. Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für Schwermetalle in Böden (Eikmann und Kloke 1993), Angaben in mg/kg. Kursiv gedruckte Werte betreffen das „Schutzgut Mensch“, die restlichen Werte „andere Schutzgüter“.

Nutzungsarten		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
multifunktionale	BW I	20	1	50	50	50	0,5	40	100	1	50	150
Nutzungsmöglichkeit		<i>20</i>	<i>1</i>	<i>30</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>0,5</i>	<i>40</i>	<i>100</i>	<i>1</i>	<i>50</i>	<i>150</i>
landwirtschaftliche	BW II	40	2	200	200	50	10	100	500	5	100	300
Nutzflächen	BW III	50	5	1000	500	200	50	200	1000	25	400	600
nicht-agrarische	BW II	40	5	200	200	50	10	100	1000	5	100	300
Ökosysteme	BW III	60	10	1000	500	200	50	200	2000	25	400	600

Tab. 4. Vorsorgewerte für Metalle in Böden (in mg/kg Trockenmasse, Feinboden, Königswasseraufschluß) (BBodSchV 1999).

Böden	Cd	Pb	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn
Bodenart Ton	1,5	100	100	60	1	70	200
Bodenart Lehm/Schluff	1	70	60	40	0,5	50	150
Bodenart Sand	0,4	40	30	20	0,1	15	60
Böden mit naturbedingt und großflächig siedlungsbedingt erhöhten Hintergrundgehalten	unbedenklich, soweit eine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge nach § 9 Abs. 2 und 3 dieser Verordnung keine nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen erwarten lassen.						

Tab. 5. Prüf- und Maßnahmenwerte für Schwermetalle für den Schadstoffübergang Boden - Nutzpflanze im Hinblick auf die Pflanzenqualität für Ackerbau/Nutzgarten und Grünland (in mg/kg Trockenmasse, Feinboden) (BBodSchV 1999).

Stoff	Ackerbau, Nutzgarten			Grünland	
	Methode ¹⁾	Prüfwert	Maßnahmenwert	Methode ¹⁾	Maßnahmenwert
Arsen	KW	200 ²⁾	-	KW	50
Cadmium	AN	-	0,04/0,1 ³⁾	KW	20
Blei	AN	0,1	-	KW	1200
Quecksilber	KW	5	-	KW	2
Kupfer	-	-	-	KW	1300 ⁴⁾
Nickel	-	-	-	KW	1900
Thallium	AN	0,1	-	KW	15

¹⁾ Extraktionsverfahren: AN=Ammoniumnitrat, KW=Königswasser

²⁾ Bei Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt ein Prüfwert von 50 mg/kg TM.

³⁾ Auf Flächen mit Brotweizenanbau oder Anbau stark Cadmium-anreichernder Gemüsearten gilt als Maßnahmenwert 0,04 mg/kg TM; ansonsten gilt als Maßnahmenwert 0,1 mg/kg TM.

⁴⁾ Bei Grünlandnutzung durch Schafe gilt als Maßnahmenwert 200 mg/kg TM.

beim Vorliegen bestimmter Säuregrade getroffen. Die Vorsorgewerte gelten nicht bei Bodenhorizonten mit einem Humusgehalt von mehr als 8 %, in diesem Fall sollen ggf. gebietsbezogene Festsetzungen getroffen werden.

Außerdem werden nach §8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 und 2 des neuen Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) in der BBodSchV (1999) nach Nutzung untergliederte Prüf- und Maßnahmenwerte für einige Schwermetalle angegeben, die sich auf den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze im Hinblick auf die Pflanzenqualität beziehen, wobei die Werte sich teils auf Königswasser- und teils auf Ammoniumnitrat-Extraktionsverfahren beziehen (Tab. 5). Weitere Prüfwerte für die direkte Aufnahme von Schadstoffen werden nur für die Nutzungen Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen sowie Industrie- und Gewerbegebiete angegeben und sind somit zur Zeit für die untersuchten Profile nicht relevant.

Darüberhinaus sollen die zusammengeführten Daten der Region Biebesheim mit Hilfe der Hintergrundwerte für Oberböden der LABO (1995, 1998) bewertet werden, die nach Substrat-, Nutzungs- und Gebietstyp untergliedert berechnet wurden.

4.3 Statistische Auswertungen des Datensatzes

Bei der Erstellung von Häufigkeitsdiagrammen für den Gesamtdatensatz ließen nur die Elemente Ni und Co annähernd eine Normalverteilung erkennen. Bei den übrigen Schwermetallen zeigten die Histogramme eine mehr oder weniger prägnant positiv schiefe Verteilung, die links steil ansteigt und nach rechts flach ausläuft. Bei einer eingipfligen Verteilung dieses Musters kann die logarithmische Normalverteilung ein passendes Modell sein.

In Bezug auf die durchgeführten Berechnungen der Lokations- und Streuungsparameter muß an dieser Stelle festgehalten werden, dass arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen charakteristische Werte einer Normalverteilung sind. Bei einer linksschiefen, ein-gipfligen Verteilung gibt der Median ein zutreffenderes Bild, da er sich gegenüber Extremwerten „robuster“ verhält als das arithmetische Mittel (LABO 1998), was hier zu hoch liegen würde. Deshalb wird im folgenden für Vergleiche einzelner Datenkollektive immer der Median herangezogen. Auf eine Berechnung der Standardabweichung wird verzichtet. Da die deskriptiven statistischen Parameter des Gesamtdatensatzes in Bezug auf die Schwermetalle ohne eine Substratdifferenzierung nur eine beschränkte Aussagekraft besitzen, wird von einer Darstellung der Werte abgesehen.

4.3.1 Schwermetallgehalte nach Substratgruppen geordnet

Zur Beurteilung des Einflusses verschiedener Substrate auf die Schwermetallkonzentrationen wurden die einzelnen Horizonte - wie erläutert - insgesamt 18 verschiedenen Substratgruppen zugeordnet. Jede Substratgruppe besitzt aufgrund ihrer speziellen Genese und ihres charakteristischen Substrataufbaus ein typisches Schwermetallgehaltsspektrum (Weidner 1992a). In Abb. 1 werden für die einzelnen Elemente die Mediane der unterschiedlichen Substratgruppen untergliedert nach Ober- und Unterboden getrennt dargestellt, wobei nur Werte mit einer Fallzahl von $n > 15$ in die Abbildung aufgenommen wurden. Die auf der x-Achse aufgetragenen Substrattypen werden dabei nach den drei im Rahmen der Hintergrundwerte in Böden Hessens (LABO 1995, 1998) unterschiedenen Substraten Sande, Hochflutlehme und Auenlehme gruppiert. Die Elemente Cd, Sb und Hg werden aufgrund der großen Anzahl an Werten unterhalb der Nachweisgrenze oder insgesamt zu niedriger Fallzahl in Abb. 1 nicht dargestellt. In Tab. 6 wird für alle Substratgruppen neben dem Median das 90. Perzentil, der arithmetische Mittelwert, sowie das Minimum und Maximum angegeben.

Erwartungsgemäß lassen sich bei allen Elementen die höchsten Schwermetallkonzentrationen in den eher tonigen Substratgruppen und die niedrigsten aufgrund der geringen Bindungsstärke und den niedrigen geogenen Gehalten in den sandigen Substraten antreffen. Besonders hoch belastet sind die holozänen schluffigen und tonigen Auenlehme, ebenso wie die Hochfluttone des Neckars und die Niedermoortorfe, für die jedoch keine ausreichende Datenbasis vorliegt und die deshalb nicht abgebildet werden. In Bezug auf die schluffigen Auenlehme sei angemerkt, dass einige der untersuchten Profile im rezenten Rheinüberflutungsbereich liegen und durch

den Eintrag fluvialer Schwebstoffe eine hohe Belastung aufweisen. Die niedrigsten Schwermetallkonzentrationen zeigen die pleistozänen und holozänen Terrassensande sowie der Flugsand. Quantifiziert sei dies am Beispiel von Zn: Während die holozänen und pleistozänen Terrassensande einen Median von 21 bzw. 16,7 mg/kg aufweisen, zeigen die Unterbodenmediane der Hochfluttone des Neckars mit 69,5 mg/kg oder der holozäne tonige Auenlehme mit 72 mg/kg einen annähernd viermal so hohen Wert.

Basierend auf der Annahme, dass zumindest für die nicht mobilen Schwermetalle die Konzentrationen in den Unterböden den geogenen Grundgehalt widerspiegeln, können sich mit Hilfe der durchgeführten Differenzierung nach Ober- und Unterbodenhorizonten innerhalb der einzelnen Substratgruppen Tendenzen einer anthropogenen Schwermetallanreicherung im humosen Oberboden feststellen lassen. Es muß jedoch betont werden, dass korrekterweise die Konzentrationen aufgrund der unterschiedlichen Humusgehalte anhand der Rohdichte korrigiert werden müßten. Infolge teilweise fehlender Rohdichtedaten konnte diese Korrektur nicht durchgeführt werden, so dass der Vergleich nur bedingt aussagekräftig ist. Trotzdem lassen sich einige Trends ablesen.

Eine deutliche Anreicherung in den Oberböden läßt sich im Fall von Pb und Zn ausmachen. Bei Pb liegen die Konzentrationen in den Oberböden im Mittel um etwa 5–10 mg/kg höher als in den Unterböden der entsprechenden Substratgruppen, bei Zn mit Ausnahme der Hochfluttone des Neckars um etwa 10–20 mg/kg. Auch V ist mit Ausnahme der schluffig tonigen Hochflutlehme im Mittel um 5–10 mg/kg in den Oberböden angereichert; Cr zeigt nur eine geringfügige Anreicherung um bis zu 5 mg/kg, deutlich höher ist nur der Median der holozänen schluffigen Auenlehme, was jedoch in erster Linie auf die Belastung durch den Rhein zurückgeführt werden kann (Karte 7). Abweichend verhält sich die Substratgruppe der holozänen tonigen Auenlehme/-tone, die in den Unterböden einen mehr als 20 mg/kg höheren Medianwert aufweist, wobei sich allerdings das Datenkollektiv der nicht dargestellten Oberböden nur aus einer relativ geringen Anzahl an Meßwerten zusammensetzt.

Für Cu und As läßt sich keine signifikante Erhöhung der Oberbodengehalte feststellen. Zwar sind innerhalb einiger Substratgruppen geringfügige Anstiege der Konzentrationen zu erkennen, bei anderen sind Ober- und Unterbodengehalte jedoch gleich groß. Eine Ausnahme bilden wiederum die holozänen schluffigen Auenlehme, die bei Cu eine deutliche Anreicherung von im Mittel 6 mg/kg zeigen.

Im Fall von Ni und Co ist eine einheitliche Tendenz nicht erkennbar. Die Mediane der Oberböden sind teilweise geringfügig erhöht, oft jedoch auch deutlich niedri-

Schwermetalle und organische Schadstoffe in Böden der Region Biebesheim (nördliche Oberrheinebene)

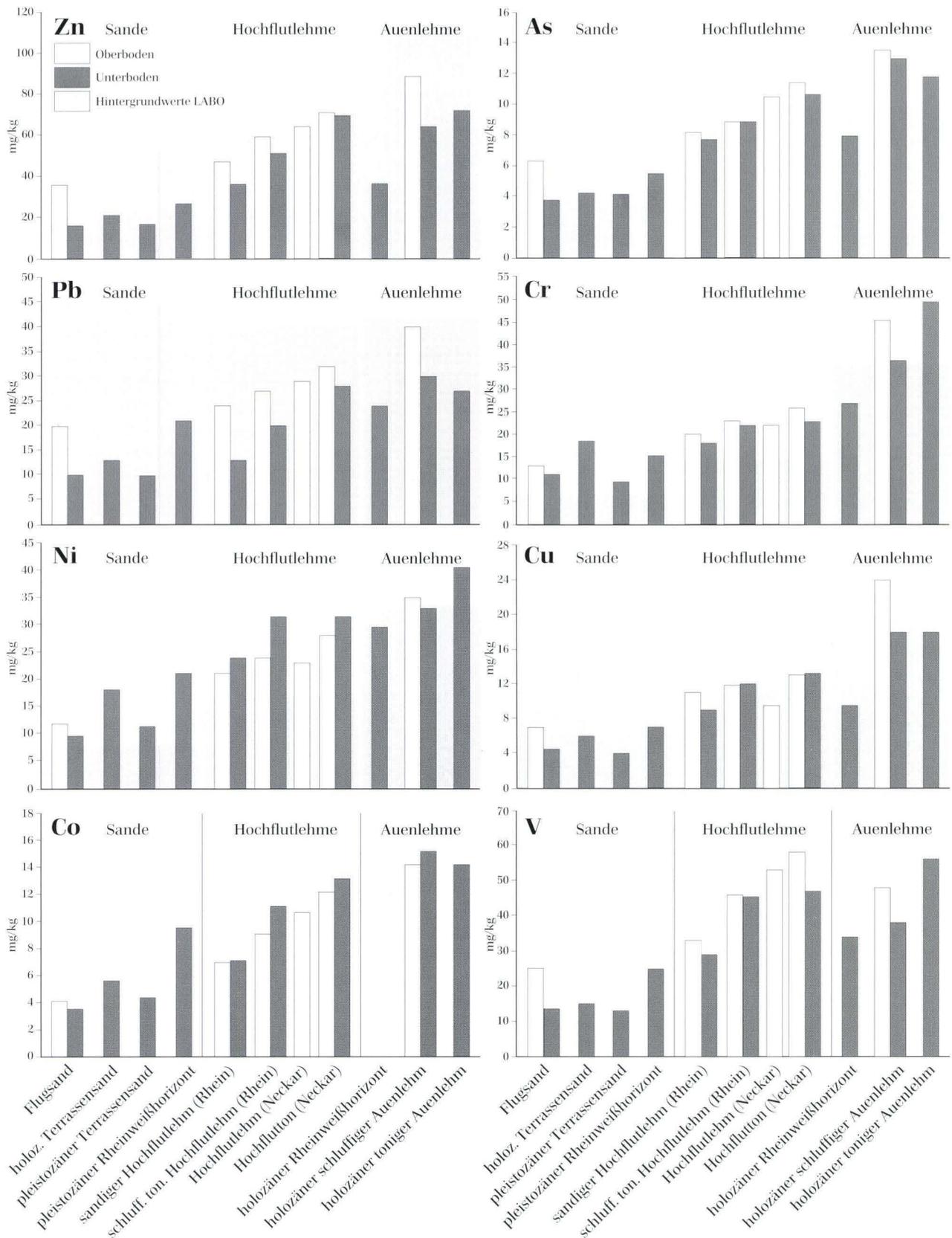


Abb. 1. Schwermetall-Gehalte der Ober- und Unterböden nach Substratgruppen geordnet, Vergleich mit den Hintergrundwerten der LABO (1995, 1998).

ger als die vergleichbaren Werte der Unterböden. Bei diesen beiden Elementen kann davon ausgegangen werden, dass es sich größtenteils um geogene Schwermetallgehalte handelt und der anthropogene Eintrag zu vernachlässigen ist. Andererseits muß auch auf die relativ große Mobilität der beiden Elemente hingewiesen werden. Für Cd, Sb und Hg können aufgrund des geringen Wertekollektives bzw. der großen Anzahl an Werten unterhalb der Nachweisgrenze keine Aussagen getroffen werden.

Zum Vergleich mit den Hintergrundwerten hessischer Böden (LABO 1995, 1998) sind in Abb. 1 außerdem die Oberbodenmediane der dort ausdifferenzierten Substratgruppen Sande (Flug-, Talsande, Terrassen), Hochflutlehme und Auenlehme als schattierter Bereich eingezeichnet. Es handelt sich hierbei um die substratbezogenen Hintergrundwerte ohne Differenzierung nach Nutzung und siedlungsstrukturellen Gebietstypen. Für V und Co werden keine Hintergrundwerte angegeben. Es wird deutlich, dass für die Elemente As, Cr und Ni die berechneten Oberbodenwerte der Region Biebesheim für alle drei Substratgruppen höher liegen als die eingezeichneten Hinter-

grundwerte. Teilweise sind die Abweichungen aber nur geringfügig; deutlich niedriger liegen die Hintergrundwerte für Ni nur bei den Hochflutlehmen und für As und Cr bei den Auenlehmen, was auf die hohe Belastung der Standorte im rezenten Überflutungsbereich des Rheins zurückzuführen ist. Bei einer Berechnung von Hintergrundbelastungen aus den zusammengeführten Daten müßten diese Extremwerte ausgeschlossen werden, da sie nicht die ubiquitäre Belastung repräsentieren. Für die Elemente Pb, Zn und Cu ist hingegen der umgekehrte Fall zu beobachten: Mit Ausnahme der Cu-Werte der Auenlehme sind die LABO-Hintergrundwerte höher als die berechneten Mediane. Gleiches gilt auch für das nicht dargestellte Cd. Besonders auffällig ist der Pb-Hintergrundwert für Sande, der den ermittelten Flugsand-Oberbodenwert um mehr als das doppelte übertrifft. Da sogar auch die Hintergrundwerte für Hochflut- und Auenlehme niedriger angesetzt werden, muß allerdings vermutet werden, dass in das Datenkollektiv der LABO Beprobungspunkte mit hoher anthropogener Belastung eingegangen.

Tab. 6. Statistische Kennwerte der Schwermetall-Konzentrationen in der Region Biebesheim, Angaben in mg/kg.

Substrattyp	statistische Kennwerte	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Sb	V	Zn	Pb	Hg	Co
Flugsand												
Oberboden	n	138	140	140	140	140	44	138	140	140	45	132
	arith. Mittel	6,3	0,03	16,8	7,7	13,9	0,32	25,9	37,7	23,4	0,021	4,9
	Median	6,3	0,00	13,0	7,0	11,8	0,31	25,0	36,0	19,9	0,009	4,1
	90. Perzentil	8,8	0,10	30,0	12,0	20,0	0,48	38,5	57,0	30,0	0,081	7,0
	Minimum	1,8	0,00	1,0	1,0	1,0	0,00	5,0	11,0	4,0	0,000	1,0
Maximum	13,8	0,60	69,0	19,0	169,0	0,95	66,0	95,0	400,0	0,130	32,0	
Unterboden	n	30	30	30	30	30	9	30	30	30	1	22
	arith. Mittel	4,4	0,01	14,4	4,8	10,4	0,11	14,9	19,3	10,4	0,010	3,8
	Median	3,8	0,00	11,0	4,5	9,5	0,07	13,5	16,0	10,0	-	3,5
	90. Perzentil	7,4	0,00	26,2	7,1	17,1	0,23	28,5	34,9	16,4	-	6,4
	Minimum	1,8	0,00	5,0	2,0	4,0	0,04	3,0	8,0	4,0	-	1,0
Maximum	7,6	0,10	41,0	11,0	21,0	0,29	35,0	50,0	21,0	-	9,0	
holozäner Terrassensand												
Unterboden	n	27	30	30	30	30	15	19	30	29	-	4
	arith. Mittel	4,7	0,03	18,7	5,9	15,6	0,05	16,9	20,0	11,6	-	5,8
	Median	4,2	0,00	18,5	6,0	18,0	0,00	15,0	21,0	13,0	-	5,5
	90. Perzentil	8,1	0,08	32,3	9,1	23,1	0,17	26,4	30,1	19,2	-	8,1
	Minimum	1,8	0,00	7,0	1,0	6,0	0,00	6,0	7,0	2,0	-	3,0
Maximum	9,0	0,15	36,0	13,0	25,0	0,20	42,0	38,0	23,0	-	9,0	
pleistozäner Terrassensand												
Unterboden	n	95	101	101	101	101	41	95	101	101	24	78
	arith. Mittel	4,5	0,00	11,8	4,9	12,7	0,18	15,7	19,2	11,3	0,011	5,2
	Median	4,1	0,00	9,4	4,0	11,2	0,17	13,0	16,7	9,9	0,004	4,3
	90. Perzentil	7,4	0,00	21,8	9,0	19,0	0,24	24,9	35,0	18,0	0,043	8,3
	Minimum	0,9	0,00	4,0	2,0	5,0	0,04	1,0	7,0	2,0	0,000	1,0
Maximum	15,0	0,11	38,0	14,0	33,0	0,60	57,0	57,0	33,0	0,060	16,0	
pleistozäner Rheinweißhorizont												
Unterboden	n	121	127	127	127	127	49	121	127	127	35	107
	arith. Mittel	5,9	0,02	16,5	7,7	20,9	0,23	25,1	28,4	20,5	0,007	10,5

Fortsetzung Tab. 6.

Substrattyp	statistische Kennwerte	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Sb	V	Zn	Pb	Hg	Co
	Median	5,5	0,00	15,3	7,0	21,0	0,19	24,9	26,4	21,0	0,004	9,4
	90. Perzentil	8,9	0,10	23,3	11,0	28,0	0,45	36,0	42,6	27,0	0,013	16,4
	Minimum	2,2	0,00	4,0	3,0	8,0	0,04	9,0	10,0	5,0	0,000	3,0
	Maximum	18,0	0,31	47,0	17,0	40,0	0,77	60,0	63,0	35,0	0,050	22,0
sandiger pleistozäner Hochflutlehm des Rheins												
Oberboden	n	50	55	55	55	55	16	50	55	55	16	50
	arith. Mittel	7,9	0,04	21,8	10,2	19,4	0,34	35,2	50,5	23,8	0,024	7,0
	Median	8,1	0,00	20,0	11,0	21,0	0,32	33,0	47,0	24,0	0,018	6,9
	90. Perzentil	9,3	0,10	36,4	13,7	24,8	0,42	46,6	67,7	29,6	0,069	9,0
	Minimum	4,6	0,00	2,0	1,0	8,0	0,21	10,0	13,0	4,0	0,000	5,0
	Maximum	10,9	0,22	39,4	15,1	34,9	0,46	62,9	129,0	47,7	0,100	10,5
Unterboden	n	55	59	59	59	59	19	55	59	59	19	55
	arith. Mittel	7,9	0,01	22,9	9,7	23,7	0,28	30,9	39,0	13,9	0,020	7,4
	Median	7,7	0,00	18,0	9,0	24,0	0,28	29,0	36,0	13,0	0,000	7,0
	90. Perzentil	10,5	0,01	41,3	13,2	31,9	0,33	43,9	59,8	19,0	0,068	10,0
	Minimum	3,8	0,00	5,0	4,0	5,0	0,18	10,0	19,0	6,0	0,000	3,0
	Maximum	14,9	0,10	48,3	23,0	38,0	0,43	54,0	83,0	21,0	0,100	14,0
sandiges Hochflutsediment des Neckars												
Oberboden	n	8	8	8	8	8		8	8	8	2	8
	arith. Mittel	11,8	0,00	15,3	6,4	14,6		36,0	46,5	22,3	0,020	6,0
	Median	9,5	0,00	15,5	5,5	14,0		36,0	50,0	22,0	-	6,5
	90. Perzentil	18,8	0,00	16,6	9,6	18,2		39,5	65,1	26,2	-	8,0
	Minimum	8,8	0,00	13,0	3,0	10,0		31,0	23,0	14,0	0,000	4,0
	Maximum	18,9	0,00	18,0	18,0	21,0		43,0	91,0	29,0	0,040	8,0
Unterboden	n	4	4	4	4	4		4	4	4		4
	arith. Mittel	8,5	0,00	12,5	4,5	12,5		25,8	27,0	14,5		5,5
	Median	8,8	0,00	13,0	4,0	12,0		25,5	25,0	14,0		4,5
	90. Perzentil	10,4	0,00	13,0	6,1	15,1		28,1	35,0	16,8		8,8
	Minimum	6,0	0,00	11,0	3,0	10,0		23,0	20,0	12,0		3,0
	Maximum	10,5	0,00	13,0	7,0	16,0		29,0	38,0	18,0		10,0
holozäner Auensand												
Oberboden	n	8	10	10	10	10	1	8	10	10		7
	arith. Mittel	6,6	0,07	17,0	10,3	16,3	0,40	32,1	48,8	22,9		6,9
	Median	6,5	0,00	17,5	10,0	15,0	-	26,5	49,0	26,0		7,0
	90. Perzentil	8,0	0,23	21,5	16,2	21,4	-	59,7	61,2	31,1		10,0
	Minimum	5,0	0,00	12,0	4,0	10,0	-	9,0	32,0	13,0		3,0
	Maximum	9,5	0,30	26,0	18,0	25,0	-	80,0	72,0	32,0		10,0
Unterboden	n	8	10	10	10	10	2	8	10	10		6
	arith. Mittel	7,5	0,01	19,4	6,3	17,0	0,25	28,6	32,0	15,7		6,2
	Median	7,8	0,00	16,5	6,0	16,5	-	30,0	31,0	16,0		7,0
	90. Perzentil	8,8	0,03	31,0	10,1	21,3	-	47,0	46,2	22,3		7,5
	Minimum	5,0	0,00	12,0	4,0	12,0	0,20	9,0	22,0	5,0		3,0
	Maximum	9,0	0,05	40,0	11,0	24,0	0,30	47,0	48,0	25,0		8,0
schluffig-toniger pleistozäner Hochflutlehm des Rheins												
Oberboden	n	70	72	72	72	72	36	70	72	72	42	70
	arith. Mittel	8,9	0,06	30,8	11,8	24,5	0,52	47,3	64,2	29,4	0,045	9,1
	Median	8,8	0,00	23,0	11,9	24,0	0,47	46,0	59,4	27,0	0,018	9,0
	90. Perzentil	10,8	0,11	45,6	15,0	31,0	0,80	64,0	78,0	39,9	0,100	12,0
	Minimum	3,9	0,00	13,0	5,0	10,8	0,29	27,5	39,0	15,2	0,000	5,0
	Maximum	13,2	1,43	97,2	38,0	37,0	0,90	80,8	177,0	112,0	0,480	13,0
Unterboden	n	65	72	72	72	72	34	65	72	72	30	60
	arith. Mittel	9,6	0,01	32,0	11,9	32,8	0,39	49,3	51,9	20,2	0,018	10,9
	Median	8,8	0,00	22,0	12,0	31,5	0,34	45,4	51,0	20,0	0,013	11,0
	90. Perzentil	12,1	0,00	56,3	15,0	45,0	0,69	74,8	69,3	27,0	0,050	13,5
	Minimum	3,7	0,00	8,0	5,0	10,0	0,13	20,0	16,0	9,0	0,000	4,0
	Maximum	42,9	0,16	67,0	20,0	53,0	0,83	96,0	85,7	42,0	0,100	19,0

Fortsetzung Tab. 6.

Substrattyp	statistische Kennwerte	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Sb	V	Zn	Pb	Hg	Co
Hochflutlehm des Neckars												
Oberboden	n	16	16	16	16	16	1	16	16	16	8	16
	arith. Mittel	10,8	0,06	25,1	10,2	26,8	0,34	54,6	69,9	29,9	0,119	10,5
	Median	10,5	0,10	22,0	9,5	23,0	-	53,0	64,0	29,0	0,010	10,5
	90. Perzentil	15,4	0,10	41,0	15,0	41,5	-	77,0	92,0	39,0	0,301	15,5
	Minimum	5,8	0,00	17,0	6,0	17,0	-	30,0	49,0	22,0	0,000	5,0
	Maximum	18,2	0,17	44,0	18,0	49,0	-	78,0	115,0	43,0	0,700	17,0
Unterboden	n	6	6	6	6	6		6	6	6		6
	arith. Mittel	8,8	0,02	18,8	9,2	29,5		35,8	48,2	26,3		15,7
	Median	9,9	0,00	19,5	8,5	29,0		35,0	47,0	27,5		14,5
	90. Perzentil	10,0	0,05	22,0	14,0	35,0		41,0	56,0	31,0		21,5
	Minimum	5,0	0,00	13,0	3,0	22,0		28,0	39,0	18,0		11,0
	Maximum	10,0	0,10	22,0	15,0	39,0		47,0	59,0	32,0		22,0
Hochflutton des Neckars												
Oberboden	n	35	35	35	35	35	13	35	35	35	16	30
	arith. Mittel	11,2	0,06	33,5	12,4	27,1	0,26	56,4	75,2	32,0	0,030	11,7
	Median	11,4	0,08	26,0	13,0	28,0	0,36	58,0	71,0	32,0	0,000	12,0
	90. Perzentil	13,9	0,12	57,4	17,0	33,6	0,41	74,7	103,7	37,2	0,090	15,1
	Minimum	4,5	0,00	17,0	7,0	16,0	0,07	27,0	46,0	22,0	0,000	6,5
	Maximum	21,8	0,20	64,0	18,2	39,0	0,42	80,6	128,0	39,0	0,200	17,0
Unterboden	n	32	32	32	32	32	9	32	32	32	6	27
	arith. Mittel	11,8	0,01	32,9	12,8	30,9	0,18	53,6	69,0	27,6	0,028	13,4
	Median	10,7	0,00	23,0	13,2	31,5	0,07	47,0	69,5	28,0	0,000	13,0
	90. Perzentil	18,2	0,00	68,8	18,0	43,8	0,36	76,5	91,2	32,9	0,085	17,8
	Minimum	4,8	0,00	13,0	4,0	6,0	0,04	15,0	40,0	18,0	0,000	5,0
	Maximum	20,1	0,20	77,0	19,7	44,7	0,41	94,0	104,6	38,0	0,150	21,0
holozäner Rheinweißhorizont												
Unterboden	n	16	18	18	18	18	12	16	18	18		4
	arith. Mittel	9,5	0,08	28,4	9,9	28,8	0,04	35,6	36,7	22,3		15,0
	Median	8,0	0,08	27,0	9,5	29,5	0,02	34,0	36,5	24,0		14,5
	90. Perzentil	17,0	0,15	46,9	14,3	36,0	0,12	47,5	46,2	27,3		17,4
	Minimum	2,0	0,00	14,0	3,0	10,0	0,00	13,0	12,0	7,0		13,0
	Maximum	22,2	0,20	50,0	15,0	46,0	0,20	69,0	58,0	31,0		18,0
holozäner schluffiger Auenlehm												
Oberboden	n	75	78	78	78	78	34	57	78	78	14	24
	arith. Mittel	13,5	1,01	60,4	26,4	34,3	0,22	51,2	139,7	44,4	0,068	13,8
	Median	13,5	0,30	45,5	24,0	35,0	0,24	48,0	88,5	40,0	0,040	14,0
	90. Perzentil	17,9	2,43	86,2	47,0	42,3	0,33	69,0	264,5	68,6	0,194	17,7
	Minimum	0,0	0,00	20,0	6,0	15,0	0,00	31,0	23,0	11,0	0,000	6,0
	Maximum	27,8	8,30	257,0	81,0	48,0	0,54	140,0	381,0	93,0	0,210	18,0
Unterboden	n	132	146	146	146	146	46	66	146	146	1	20
	arith. Mittel	14,2	0,52	51,3	20,4	31,4	0,13	39,7	96,2	37,5	0,000	14,4
	Median	13,0	0,10	36,5	18,0	33,0	0,09	38,0	64,0	30,0	-	15,0
	90. Perzentil	21,3	1,40	108,5	39,5	42,0	0,32	52,0	239,0	74,0	-	18,1
	Minimum	2,5	0,00	8,0	2,0	8,0	0,00	15,0	7,0	4,0	-	8,0
	Maximum	31,9	9,80	261,0	96,0	53,0	0,50	102,0	491,0	113,0	-	19,0
holozäner toniger Auenlehm/-ton												
Oberboden	n	12	13	13	13	13		11	13	13	5	11
	arith. Mittel	11,4	0,11	32,0	21,4	36,9		50,4	84,5	40,5	0,032	13,6
	Median	10,8	0,00	27,0	24,0	37,0		50,0	90,0	38,0	0,040	14,0
	90. Perzentil	14,8	0,30	41,2	27,6	41,8		56,0	98,0	44,8	0,040	16,0
	Minimum	8,1	0,00	23,0	12,0	30,0		43,0	65,0	29,0	0,000	9,0
	Maximum	16,2	0,38	65,0	28,0	42,0		60,0	100,0	94,0	0,040	21,0
Unterboden	n	29	32	32	32	32	11	25	32	32	2	14
	arith. Mittel	11,9	0,06	49,5	19,0	41,1	0,16	62,8	74,5	28,1	0,020	13,4
	Median	11,8	0,00	49,5	18,0	40,5	0,04	56,0	72,0	27,0	-	14,0
	90. Perzentil	20,8	0,22	78,4	26,9	50,8	0,40	91,0	93,7	37,6	-	15,0
	Minimum	0,0	0,00	17,0	7,0	28,0	0,00	33,0	51,0	18,0	0,000	9,0
	Maximum	25,0	0,34	102,0	33,0	58,0	0,60	108,0	114,0	40,0	0,040	16,0

4.3.2 Schwermetallgehalte nach Nutzung geordnet

Um den möglichen Einfluß unterschiedlicher Nutzungen auf die Oberböden zu untersuchen, wurden die mittleren Schwermetallkonzentrationen auch nach Nutzungstypen geordnet berechnet. Die Nutzungstypen aller untersuchten Profile werden in Karte 4 dargestellt. Für die statistische Auswertung der Nutzungstypen wurden nur die Nutzungen Acker, Grünland und Wald berücksichtigt, wobei die Daten der Sonderkulturen unter Acker subsummiert wurden. Ödland, Feldwege und sonstige Nutzungen wurden nicht in die Berechnungen einbezogen. Abb. 2 zeigt die Mediane der Schwermetallkonzentrationen der mineralischen Oberböden unter Acker, Grünland und Wald. Da für die Wald-Auflagehorizonte nur ein ungenügendes Datenkollektiv vorhanden war, erfolgt keine gesonderte Darstellung. Außerdem muß betont werden, dass auch die Datengrundlage der Wald-Oberböden im Vergleich zu Acker und Grünland deutlich geringer ist und deshalb bei der Interpretation Zurückhaltung geboten ist. Auf eine Darstellung und Beurteilung des Elementes Cd muß wegen der großen Anzahl an Meßwerten unterhalb der Nachweisgrenze verzichtet werden.

Eine geringfügig höhere Belastung der Grünland-Oberböden im Vergleich zum Nutzungstyp Acker ist bei den Elementen Zn, Pb und Hg zu beobachten. Dieser Sachverhalt kann auf vorwiegend atmosphärische Einträge von Schwermetallen hinweisen. Er läßt sich damit erklären, dass die Acker-Oberböden auf Pflugtiefe homogenisiert werden und es dadurch zu einer „Verdünnung“ der Schwermetallkonzentrationen kommt. Außerdem besitzen die Ah-Horizonte der Grünlandstandorte im Vergleich zu den Ap-Horizonten der Ackerprofile einen höheren Anteil an organischer Substanz und haben somit eine größere Adsorptionskapazität für Schwermetalle.

Im Gegensatz dazu sind die mittleren Cr-, Sb- und V-Konzentrationen in den Acker-Oberböden z.T. deutlich

höher als in den Grünland-Oberböden. Dies kann zunächst als Indiz dafür gesehen werden, dass diese Schwermetalle nicht primär über die Luft eingetragen werden, sondern andere Eintragspfade Berücksichtigung finden müssen. In Bezug auf Cr ist allerdings eine weitergehende Interpretation nur beschränkt möglich, da die Laboranalysen des aktuellen Schwermetallgutachtens (Weidner 1998), welches fast ausschließlich Ackerprofile umfaßt, im Durchschnitt fast doppelt so hohe Werte erbrachten, wie die des ersten Gutachtens (Weidner 1992a). Es wird davon ausgegangen, dass es sich um systematische Minderbefunde handelt, für die ein unterschiedlicher Aufmahlungsgrad und variierende Aufschlußbedingungen verantwortlich sein könnten (Weidner 1998). Aus diesem Grund ist der Cr-Datensatz nur bedingt auswertbar. Auch für Sb ist bei der Interpretation Zurückhaltung geboten, da das Datenkollektiv der Grünland-Oberböden deutlich kleiner ist, als das der Ackerböden. Im Fall von V ist ein Eintrag über Schlackendünger eine mögliche Erklärung für die höheren Konzentrationen unter Acker im Vergleich zu Grünland und Wald. Nach Keller & Desaulles (1997) sind diese Dünger lokal die bedeutendste Eintragsquelle für V. In erster Linie nennen sie in diesem Zusammenhang den Phosphordünger „Thomasphosphat“, der nach BUWAL (1991) V-Gehalte von 6300 mg/kg aufweist und nach Ender (1986) auch beträchtliche Mengen an Cr (1510 mg/kg) enthält. Nach Berechnungen von Keller & Desaulles (1997) kann er bei einer Normdüngung von 80 kg P₂O₅ zu einer jährlichen V-Anreicherung von etwa 1 ppm im Boden führen.

Für die Elemente As, Cu und Co lassen sich nur geringfügige nutzungsbedingte Abweichungen der Mediane feststellen. Auch im Falle von Ni besitzen die Oberböden unter Acker und Grünland fast identische Werte, wengleich die Nickelkonzentrationen unter Wald deutlich niedriger zu liegen scheinen, wobei allerdings auf die Möglichkeit eines statistischen Fehlers infolge der geringen Anzahl an Meßwerten hingewiesen sei. Nach HMUEJFG (1995) kann bei Schwermetallen, deren Gehalte sich

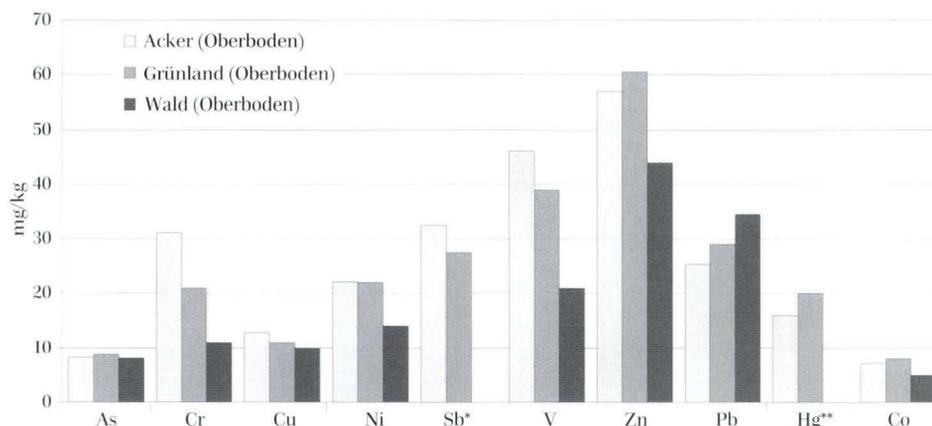


Abb. 2. Schwermetall-Gehalte der Oberböden nach Nutzung geordnet (*=Multiplikation mit dem Faktor 100, **=Multiplikation mit dem Faktor 1000).

in Acker- und Grünland-Oberböden nicht unterscheiden, davon ausgegangen werden, dass es sich um geogene Gehalte handelt und sie nicht durch Immissionen hervorgerufen werden.

Wälder besitzen normalerweise durch den „Auskämmeffekt“ ihrer Blätter bzw. Nadeln eine große Filterwirkung für durchstreifende Luftmassen. Durch die trockene Deposition atmosphärischer Schadstoffe und anschließendem Laub-/Nadelfall bzw. Tropfwasser und Stammablauf akkumulieren sich im Wald größere Schadstoffmengen als im Freiland. Mit Ausnahme von Pb, für das die höchste mittlere Konzentration unter Wald vorliegt, ist die Belastung für alle anderen dargestellten Schwermetalle jedoch geringer als unter Acker oder Grünland. Abgesehen von dem kleineren Datenkollektiv liegt dies wahrscheinlich an der geringen Dichte der untersuchten Waldstandorten, denn es handelt sich entweder um lichten Auenwald oder Wald- bzw. Feldholzinseln geringen Ausmaßes, die vermutlich in der Vergangenheit ebenfalls landwirtschaftlich genutzt wurden.

4.4 Räumliche Verteilung der Schwermetallgehalte der Oberböden

Für jedes untersuchte Schwermetall wurde eine Karte erstellt, die die Elementkonzentrationen in den Oberböden der untersuchten Profile wiedergibt. Bei Existenz mehrerer Analysedaten innerhalb eines A-Horizontes wurden Mischproben über den gesamten Horizont berechnet, indem die einzelnen Elementgehalte mit der jeweiligen Horizontmächtigkeit multipliziert wurden und nach Summierung der Horizonte durch die Gesamtmächtigkeit geteilt wurde. Im Anschluß wurde eine Klassifizierung der Daten in 5 Klassen durchgeführt, deren Grenzen in Anlehnung an den BW I (Schutzgut Mensch) der Orientierungswerte von Eikmann & Kloke (1993) (siehe Tab. 3) gewählt wurden (< 25 %, 25–50 %, 50–75 %, 75–100 %, > 100 % des BW I). Die Darstellung erfolgt anhand farblich differenzierter Punktsignaturen. Außerdem werden mittels Histogrammen die absoluten Häufigkeiten der Gehaltsklassen aufgezeigt.

Die As-Gehalte der Oberböden von 60 % der insgesamt 223 analysierten Profile liegen zwischen 5 und 10 mg/kg (Karte 5). Nur 11 Profile weisen einen Wert von < 5 mg/kg auf. Weitere 27 % sind der dritten Belastungsklasse (10–15 mg/kg) und 7 % der vierten Belastungsklasse (15–20 mg/kg) zuzuordnen. 3 Profile - alle aus dem Schwermetallgutachten von Weidner (1992a) - befinden sich in der höchsten Klasse (> 20 mg/kg). Das mit 27,5 mg/kg am höchsten belastete Profil gehört der Substratgruppe holozäner schluffiger Auenlehm an und liegt nördlich von Biebesheim. Die beiden anderen Profile der höchsten Belastungsklasse, die sehr dicht nebeneinander angelegt wurden, befinden sich im Bereich des Neckaraltaufes.

Ein ihnen benachbartes Profil weist ebenfalls einen leicht erhöhten Wert von 15,1 mg/kg auf. Eine mögliche lokale Schadstoffquelle als Verursacher kann nicht benannt werden. Ansonsten sind die holozänen Auensedimente im Schnitt deutlich höher belastet als die Substrate des Hochgestades, wobei die Profile im rezenten Überflutungsbereich des Rheins teilweise sogar niedrigere As-Gehalte aufweisen als die Profile auf den älteren Mäandersystemen. Die aus der durchgeführten Klassifizierung resultierende große Anzahl an Oberböden der zweiten Belastungsklasse auf dem Hochgestade verdeckt den Einfluß der Substrate. Trotzdem kann festgehalten werden, dass es sich bei den Profilen mit einem As-Oberbodengehalt von < 5 mg/kg mit einer Ausnahme ausschließlich um Flug- und Auensande handelt, während die höher belasteten Profile ab der dritten Gehaltsklasse vor allem den lehmigen und tonigen Hochflutsedimenten des Neckars zuzuordnen sind.

Der BW I nach Eikmann & Kloke (1993) wird nur von den drei erläuterten Profilen überschritten, für alle restlichen ist die multifunktionale Nutzungsmöglichkeit in Bezug auf As gegeben. Die BBodSchV (1999) sieht für As keinen Vorsorgewert vor. Der Prüfwert von 200 mg/kg (bzw. 50 mg/kg bei zeitweise reduzierenden Verhältnissen) für Ackerbauflächen und Nutzgärten sowie der Maßnahmewert von 50 mg/kg für Grünland wird nicht erreicht.

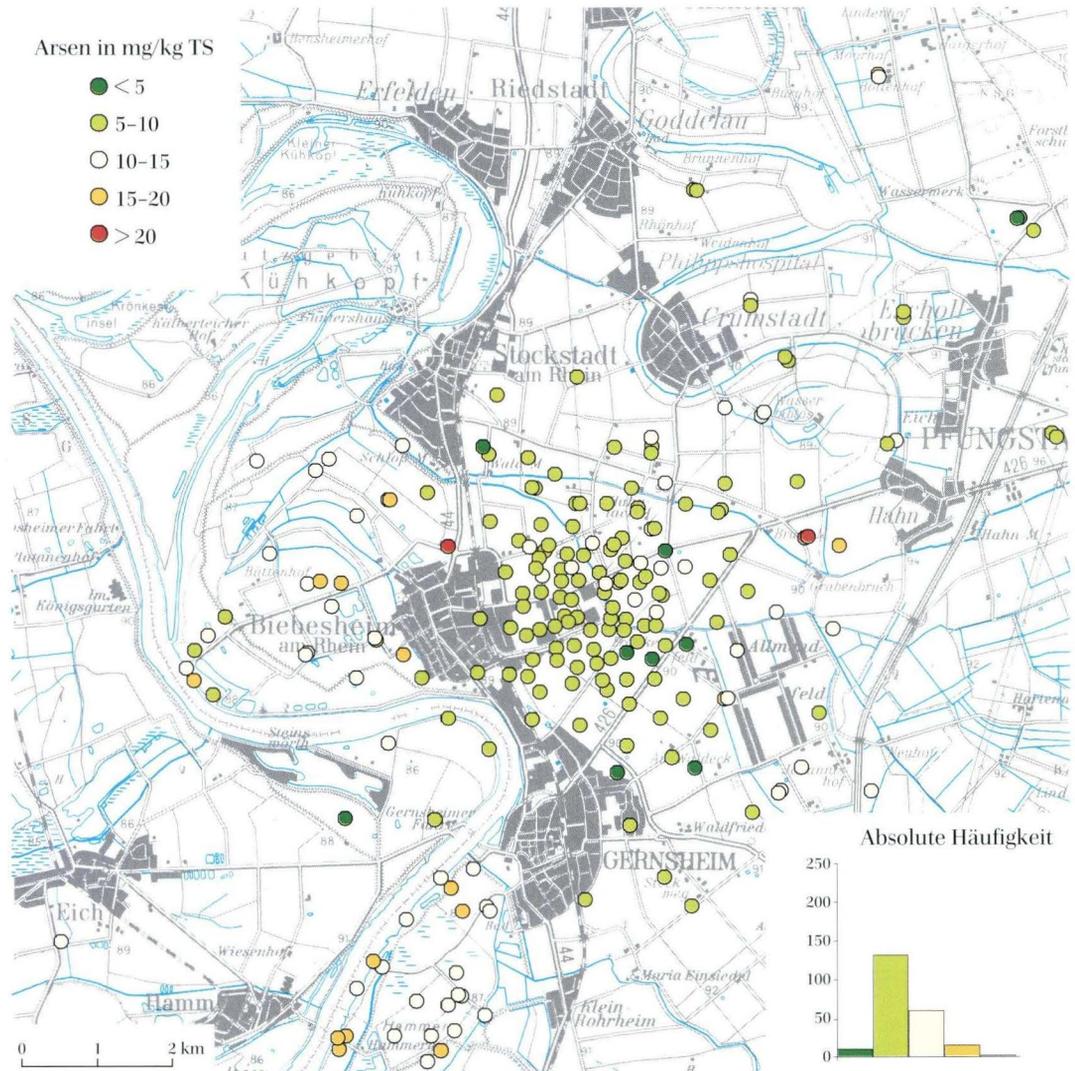
Die Cd-Gehalte der Oberböden von insgesamt 236 Profilen werden in Karte 6 dargestellt. Annähernd 50 % der untersuchten Proben liegen unterhalb der Nachweisgrenze. Der überwiegende Anteil (86 %) der Gehalte befindet sich deshalb in der untersten (< 0,25 mg/kg), weitere 7 % in der zweiten Belastungsklasse (0,25–0,5 mg/kg). Die Oberböden von insgesamt 6 Profilen können den nächsten beiden Gehaltsklassen von 0,5–0,75 und 0,75–1 mg/kg zugeordnet werden. Die höchste Belastungsklasse (> 1 mg/kg) umfaßt 10 Profile, wobei der Maximumwert von 8,30 mg/kg, ein als Mähwiese genutzter Standort in der Biebesheimer Aue, den Analysen von Thiemeyer (1989a) entnommen wurde. Im Fall von Cd ist die Belastung durch fluvialen Eintrag eindeutig: Die Profile der beiden höchsten Belastungsklassen befinden sich ausschließlich in der rezenten Rheinaue, während die Oberböden der zahlreichen Profile auf dem Hochgestade nicht nachweisbare bis sehr geringe Cd-Gehalte aufweisen. Nach Ruppert (1987) handelt es sich bei Cd um das wichtigste Indikatorelement für eine anthropogene Beeinflussung von Auenböden. Auffällig ist, dass die linksrheinischen Standorte in der Aue eine deutlich niedrigere Belastung aufweisen, was ebenfalls noch in Bezug auf die Elemente Cr, Cu, Ni, V und Zn zu beobachten sein wird. Dies kann zum einen durch das Vorliegen unterschiedlicher Ausgangssubstrate erklärt werden, da es sich bei vier dieser Profile um Auensande handelt

(Karte 2), die eine geringere Adsorptionskapazität für Schwermetalle besitzen, als die rechtsrheinisch verbreiteten schluffigen Auenlehme. Zum anderen ist der geologischen Karte Blatt 6216 Gernsheim (Rosenberger et al. 1996) zu entnehmen, dass es sich um zwei verschiedene Mäandersysteme handelt. Denn während die hochbelasteten Standorte in der Aue bei Biebesheim innerhalb des jüngsten Mäandersystems MS 14 liegen, sind die linksrheinischen Profile vermutlich dem älteren Mäandersystem MS 13 zuzuordnen.

Der BW I nach Eikmann & Kloke (1993) wird von 10 Profilen überschritten, weitere 3 besitzen genau einen Wert von 1 mg/kg. 3 Standorte, von denen einer als Mähwiese genutzt wird, überschreiten darüber hinaus den BW II für landwirtschaftliche Nutzfläche von 2 mg/kg, der erwähnte Maximalwert liegt sogar über dem BW III für landwirtschaftliche Nutzflächen bzw. dem BW II für nicht-agrarische Ökosysteme (5 mg/kg). Der Vorsorgewert der BBodSchV (1999) beträgt für die

Bodenart Lehm/Schluff ebenfalls 1 mg/kg, 8 der genannten Oberböden sind dieser Bodenart zuzuordnen. Ein Oberboden aus mittel schluffigem Ton überschreitet den Vorsorgewert für die Bodenart Ton von 1,5 mg/kg. Der Maßnahmenwert für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze unter Grünland von 20 mg/kg wird nicht tangiert, der Maßnahmenwert Ackerbauflächen/Nutzgärten bezieht sich nur auf eine Ammoniumnitrat-Extraktion.

In Bezug auf Cr (Karte 7) ist der größte Anteil der Oberböden von insgesamt 236 zusammengestellten Profilen der Gehaltsklasse 12,5–25 mg/kg zuzuordnen. 24 % sind in der nächsthöheren Klasse von 25–37,5 mg/kg zu finden. Der Rest verteilt sich ungefähr gleichmäßig auf die verbleibenden drei Gehaltsklassen, wobei insgesamt 31 Oberböden mit einem Cr-Gehalt von > 50 mg/kg in die höchste Belastungsklasse eingeordnet werden müssen. Der mit 155,6 mg/kg mit Abstand am höchsten belastete Oberboden ist auf der Bodendauerbeobachtungsfläche Biebesheim in der rezenten Rheinaue zu finden, die als

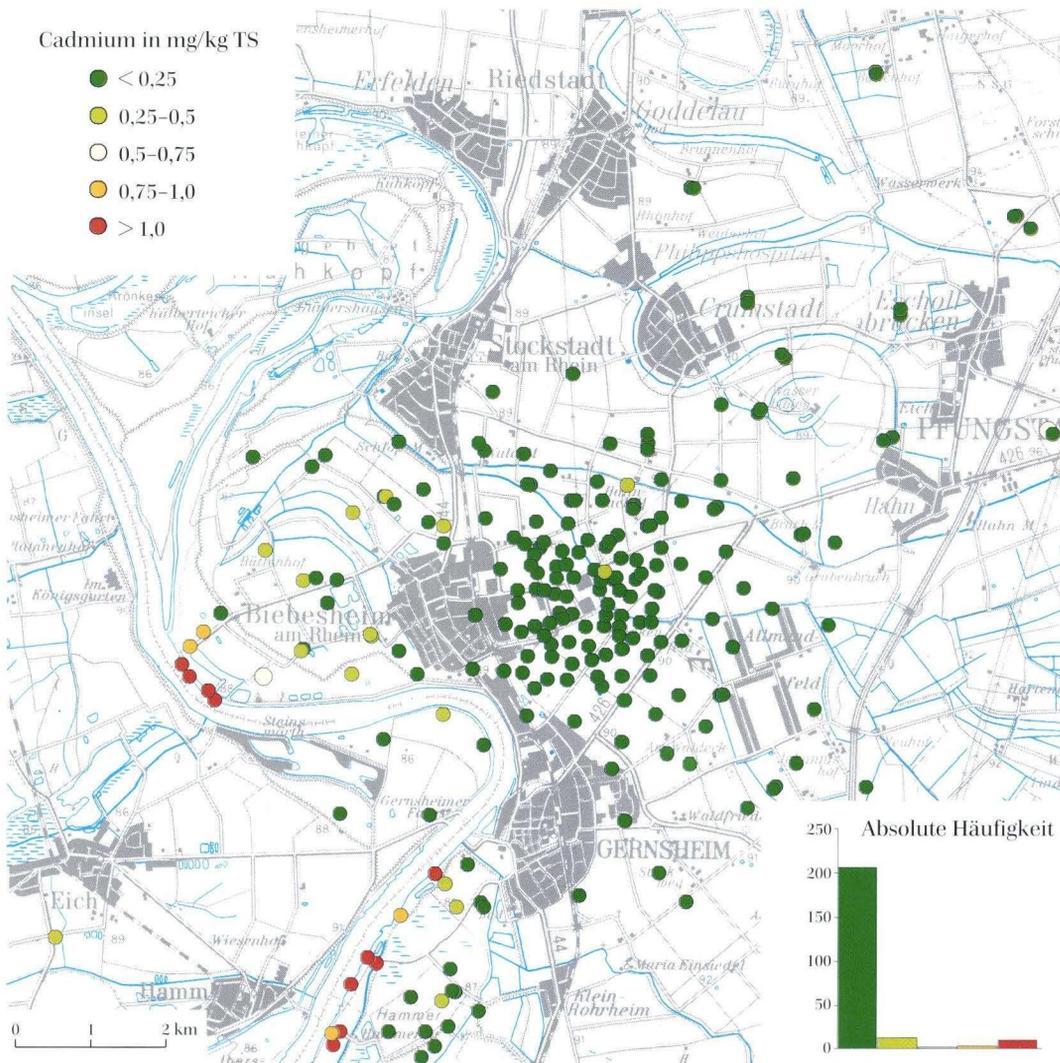


Karte 5. Arsen-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

Mähwiese genutzt wird. Es handelt sich hierbei um einen gemittelten Wert über den gesamten Ah-Horizont, da Proben in 5 cm-Abschnitten entnommen wurden. Der höchste Einzelwert von 257 mg/kg ist in einer Tiefe von 15–20 cm anzutreffen, zur Oberfläche hin nehmen die Cr-Gehalte kontinuierlich ab (siehe auch Abb. 3a). Auch alle anderen rechtsrheinisch im rezenten Überflutungsbereich liegenden Profile weisen einen Cr-Gehalt der höchsten Belastungsklasse auf, so dass der Rhein als wichtige Eintragsquelle angesehen werden muß. Die Interpretation der räumlichen Verteilung der übrigen Profile wird durch die bereits erwähnte Tatsache erschwert, dass die Cr-Analysen im Rahmen des Schwermetallgutachtens von Weidner (1992a) systematische Minderbefunde erbrachten und deshalb nur bedingt mit den übrigen Analysen vergleichbar sind. Trotzdem kann tendenziell ein Substratbezug der Cr-Gehalte erkannt werden: So sind die Profile der niedrigsten Belastungsklasse ausnahmslos den Substraten Flugsand und sandiger

Hochflutlehm zuzuordnen, während die Oberböden der höchsten Belastungsklasse mit Ausnahme von zwei Flugsandstandorten besonders den schweren Substratgruppen der Neckar-Hochfluttone und schluffig-tonigen Hochflutlehm sowie den holozänen Auenlehmen/-tonen angehören.

Insgesamt überschreiten 13 % der dargestellten Profile den BW I nach Eikmann & Kloke (1993). Nach dieser Bewertungsgrundlage ist also eine multifunktionale Nutzungsmöglichkeit in Bezug auf Chrom für weite Teile des Untersuchungsgebietes, insbesondere die Rheinaue, nicht gegeben. Allerdings gilt der BW I als relativ niedrig angesetzt (Weidner 1998). Der BW II für landwirtschaftliche Nutzflächen und nicht-agrarische Ökosysteme (200 mg/kg) wird zwar von den der Karte zugrunde liegenden gemittelten Werten nicht erreicht, jedoch von genannten Einzelproben überschritten. Die BBodSchV (1999) sieht für Cr bei der Bodenart Lehm/Schluff einen Vorsorgewert von 60 mg/kg vor. Dieser Wert wird von



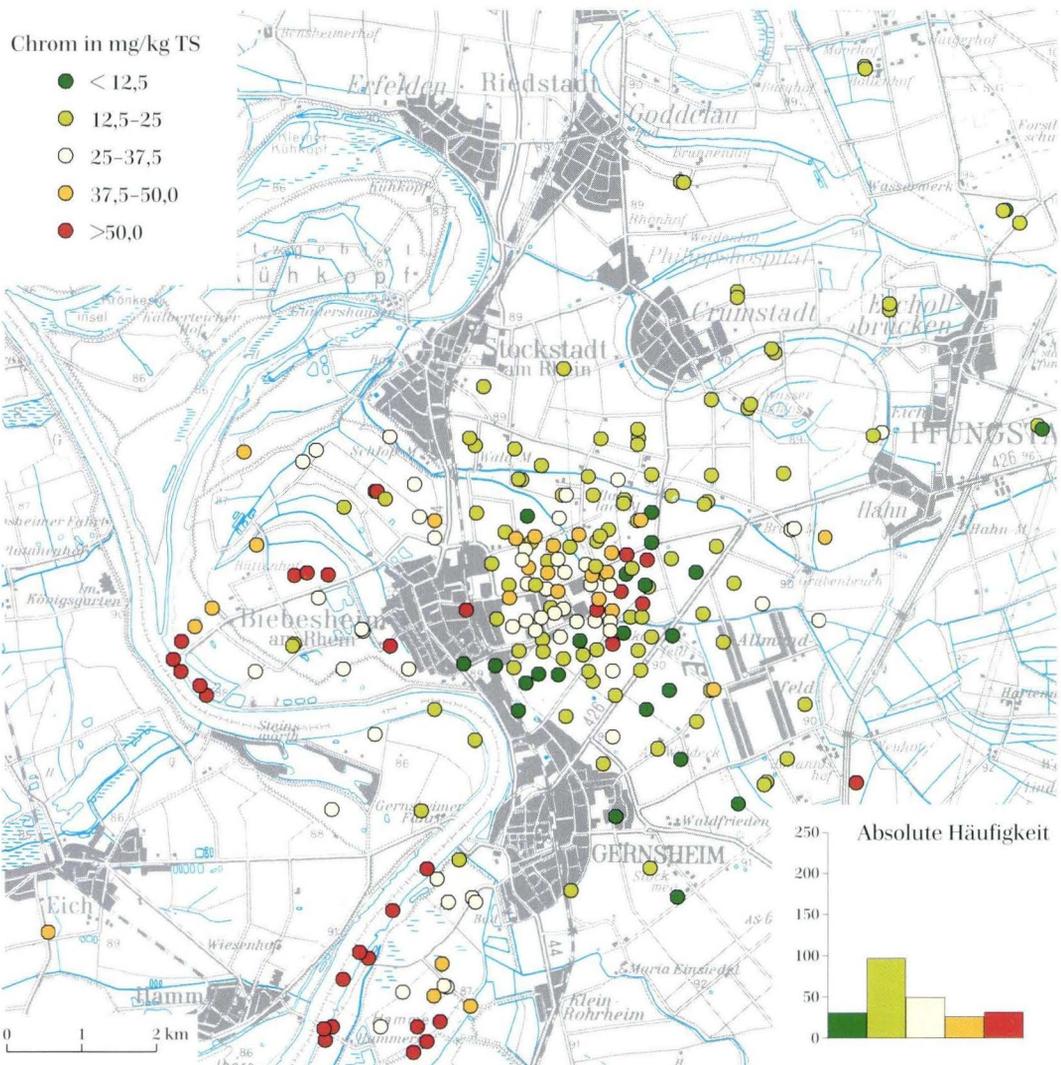
Karte 6. Cadmium-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

insgesamt 14 Oberböden dieser Bodenart überschritten, bei weiteren 3 Profilen fehlen Angaben zur Bodenart. Die Vorsorgewerte für die Bodenarten Ton und Sand werden nicht erreicht. Mit Ausnahme der eindeutig anthropogen beeinflussten Rheinaue sind die Cr-Gehalte nicht als kritisch zu beurteilen. Es ist davon auszugehen, dass sie größtenteils die geogenen Grundgehalte widerspiegeln und ihre räumliche Verteilung substratbedingt ist. Indiz hierfür sind die oft über das gesamte Bodenprofil erhöhten Gehalte. Unterstützt wird diese Interpretation auch von dem Vergleich der Ober- und Unterbodengehalte in Abb. 1, wo eine deutliche Anreicherung von Cr im Oberboden nur bei den holozänen schluffigen Auenlehmen zu beobachten ist.

Für die Ermittlung der **Cu**-Belastung der Oberböden wurden Daten von 236 Profilen zusammengetragen (Karte 8), von denen sich mehr als die Hälfte in der untersten Belastungsklasse < 12,5 mg/kg befinden. Weitere 36 % sind der zweiten Klasse von 12,5–25 mg/kg zuzuordnen.

14 Profile entfallen auf die Klasse 25–37,5 mg/kg, 7 auf die Klasse 37,5–50 mg/kg. Das am höchsten belastete Profil weist im Oberboden eine Cu-Konzentration von 67 mg/kg auf und liegt somit in der obersten Gehaltsklasse. Es handelt sich dabei um das in der rezenten Rheinaue in Biebesheim gelegene Profil aus der Veröffentlichung von Thiemeier (1989a), welches bereits in Bezug auf Cd besonders hohe Werte aufwies. Insgesamt ist der Rhein als Belastungsquelle deutlich auszumachen. Die Profile, die den beiden höchsten Belastungsklassen zuzuordnen sind, befinden sich in der Rheinaue, wie auch ein großer Teil der Profile der dritten Gehaltsklasse. Davon abgesehen wird in der räumlichen Verteilung der Cu-Gehalte tendenziell ein Substratbezug zwischen den niedrigeren Gehalten der Flugsande vor allem südlich Biebesheim und den - wenn auch oft nur geringfügig - höheren Gehalten der Hochflutlehme des Hochgestades und den holozänen Auenlehmen erkennbar.

Überschritten wird der BW I nach Eikmann & Kloke

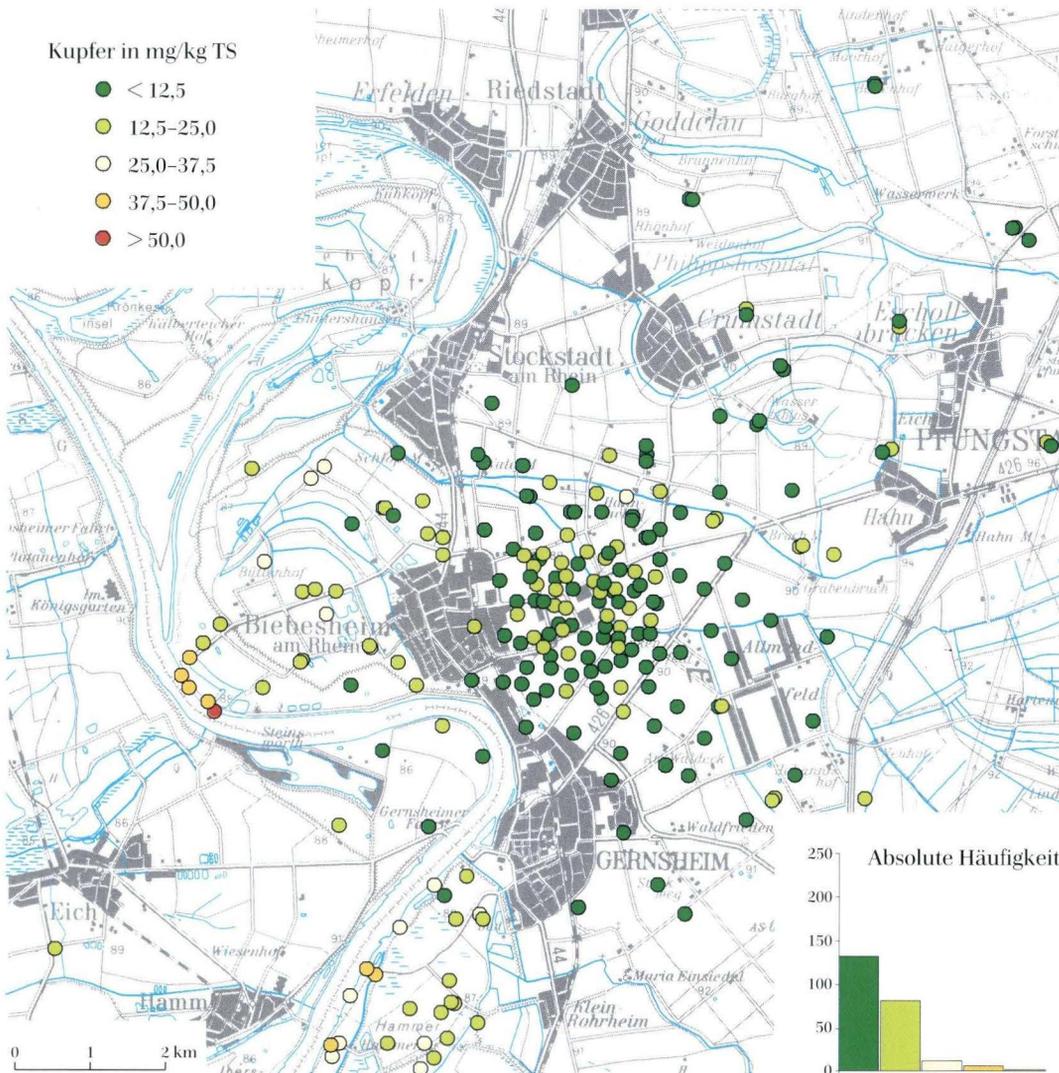


Karte 7. Chrom-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

(1993) von 50 mg/kg nur von dem erwähnten Maximalwert. Der Vorsorgewert der BBodSchV (1999) von 20 mg/kg für die Bodenart Sand wird nicht erreicht, da schluffige Sande entsprechend der Bodenart Lehm/Schluff zu bewerten sind. Hier beträgt der Vorsorgewert 40 mg/kg und wird somit von insgesamt 5 Profilen überschritten, die ausnahmslos in der rezenten Rheinaue zu finden sind. Der Vorsorgewert für die Bodenart Ton von 60 mg/kg wird nicht tangiert, noch viel weniger der Maßnahmenwert für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze unter Grünland von 1300 mg/kg.

Auch auf Ni wurden insgesamt 236 Profile analysiert (Karte 9). Jeweils um die 30 % entfallen auf die Gehaltsklassen von 10-20 mg/kg bzw. 20-30 mg/kg, weitere 24 % sind in der vierten Klasse von 30-40 mg/kg zu finden. Die übrigen Profile verteilen sich relativ gleichmäßig auf die niedrigste und höchste Belastungsklasse: So besitzen 23 Oberböden einen Ni-Gehalt von < 10 mg/kg und 17 von

> 40 mg/kg. Der mit Abstand am höchsten belastete Oberboden weist einen berechneten mittleren Ni-Gehalt von 161,1 mg/kg auf. Es handelt sich um ein Flugsand-Profil auf dem Hochgestade, welches im Rahmen des Schwermetallgutachtens von Weidner (1992a) beprobt wurde. Hier muß eindeutig von einer lokalen Verunreinigung ausgegangen werden, denn während die Analyse des rAp-Horizontes von 2-40 cm Tiefe einen Ni-Gehalt von 169 mg/kg ergab, weisen die oberen 2 cm des Horizontes sowie der darunter liegende Bt-Horizont nur Gehalte von 11 bzw. 24 mg/kg auf. Da die Werte durch eine Wiederholungsanalyse bestätigt wurden, kann ein Laborfehler ausgeschlossen werden (Weidner 1998). Auch ein weiteres, gut 1 km östlich gelegenes Flugsand-Profil (Weidner 1992a) zeigt mit 42,5 mg/kg einen ungewöhnlich hohen Ni-Oberbodengehalt. Wie weiter unten deutlich wird, zeigen diese beiden Profile auch in Bezug auf das Element Pb auffällig hohe Werte. Vernachlässigt



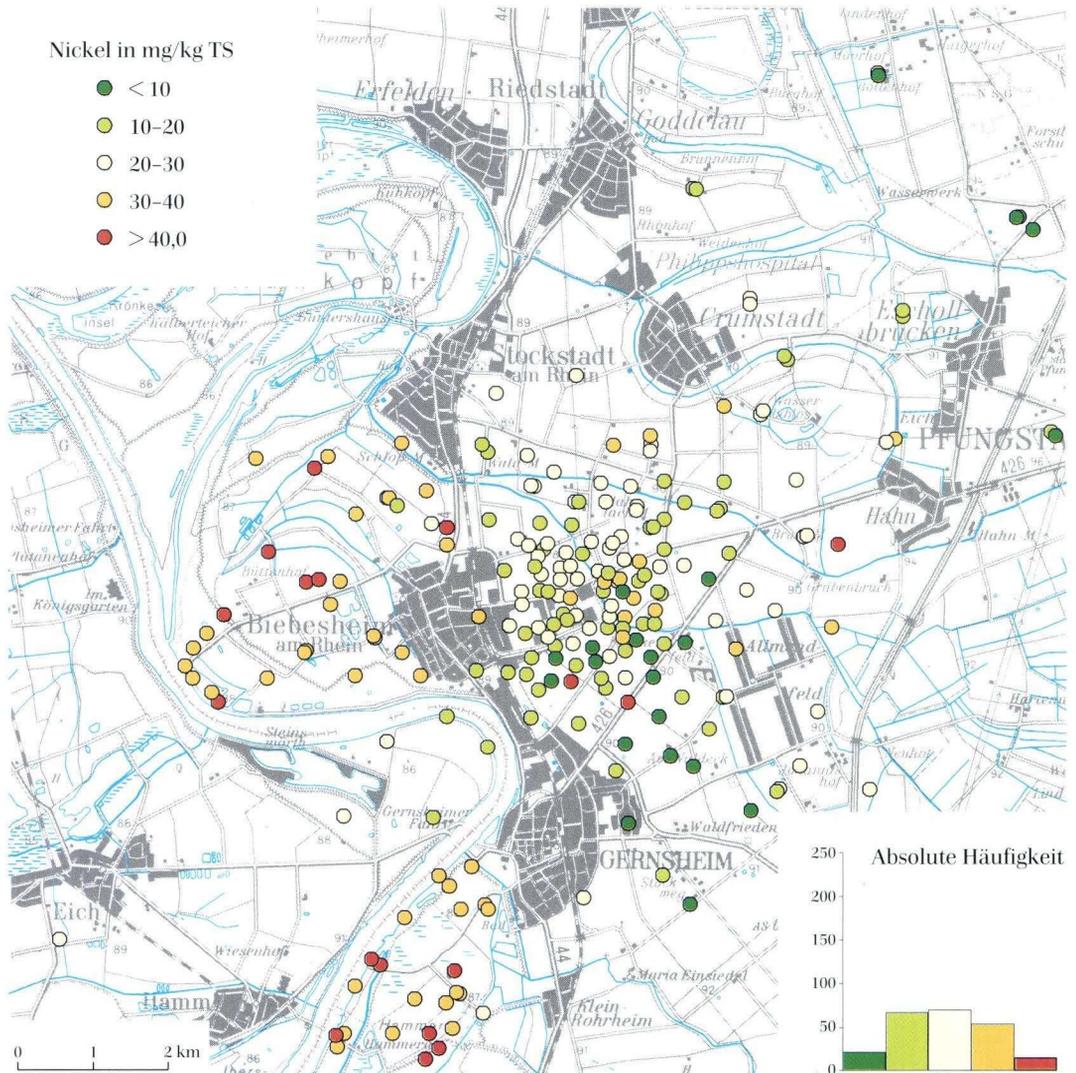
Karte 8. Kupfer-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

man diese Einzelwerte so läßt sich für Ni ebenfalls eine Substratabhängigkeit der Oberbodenbelastung feststellen: Die Profile der untersten Belastungsklasse gehören ausschließlich den sandigen Substratgruppen an (Flugsande, sandige Hochflutsedimente von Rhein und Neckar), wohingegen die schwereren Oberböden in der holozänen Rheinaue vor allem den beiden oberen Belastungsklassen zuzuordnen sind.

Den BW I nach Eikmann & Kloke (1993) überschreiten insgesamt 17 Oberböden. Abgesehen von dem genannten Maximalwert, der auch über dem BW II für landwirtschaftliche Nutzflächen und nicht-agrarische Ökosysteme von 100 mg/kg einzustufen ist, liegen die übrigen Werte jedoch nur geringfügig höher als 40 mg/kg. Der Vorsorgewert der BBodSchV (1999) für die Bodenart Lehm/Schluff von 50 mg/kg wird ebenfalls nur von dem Ausreißerwert überschritten. Für die Bodenarten Ton und Sand werden die Vorsorgewerte von keinem Profil

erreicht. Der Maßnahmenwert für den Wirkungspfad Boden-Pflanze unter Grünland (1900 mg/kg) wird nicht tangiert.

Auf **Sb** wurden nur 72 Profile beprobt (Karte 10), wobei der größte Anteil der Daten dem Schwermetallgutachten von Weidner (1998) entstammt. Ein gutes Viertel der Profile liegt mit einem Sb-Oberbodengehalt von < 0,25 mg/kg in der untersten, mehr als die Hälfte in der zweiten Belastungsklasse von 0,25–0,5 mg/kg. 8 Oberbodengehalte lassen sich der Klasse 0,5–0,75 mg/kg zuordnen, die restlichen 4 der Klasse 0,75–1 mg/kg, wobei der Maximumwert von 0,86 mg/kg der im Rahmen des Biomonitoring-Programmes beprobten Standorterde in der rezenten Rheinaue in Biebesheim entstammt. Ein Substratbezug läßt sich aus der räumlichen Verteilung der Sb-Gehalte nicht herleiten. Trotz des Maximumwertes in der rezenten Rheinaue scheint der Rhein als Belastungsquelle keinen größeren Einfluß auszuüben, da sich auch



Karte 9. Nickel-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

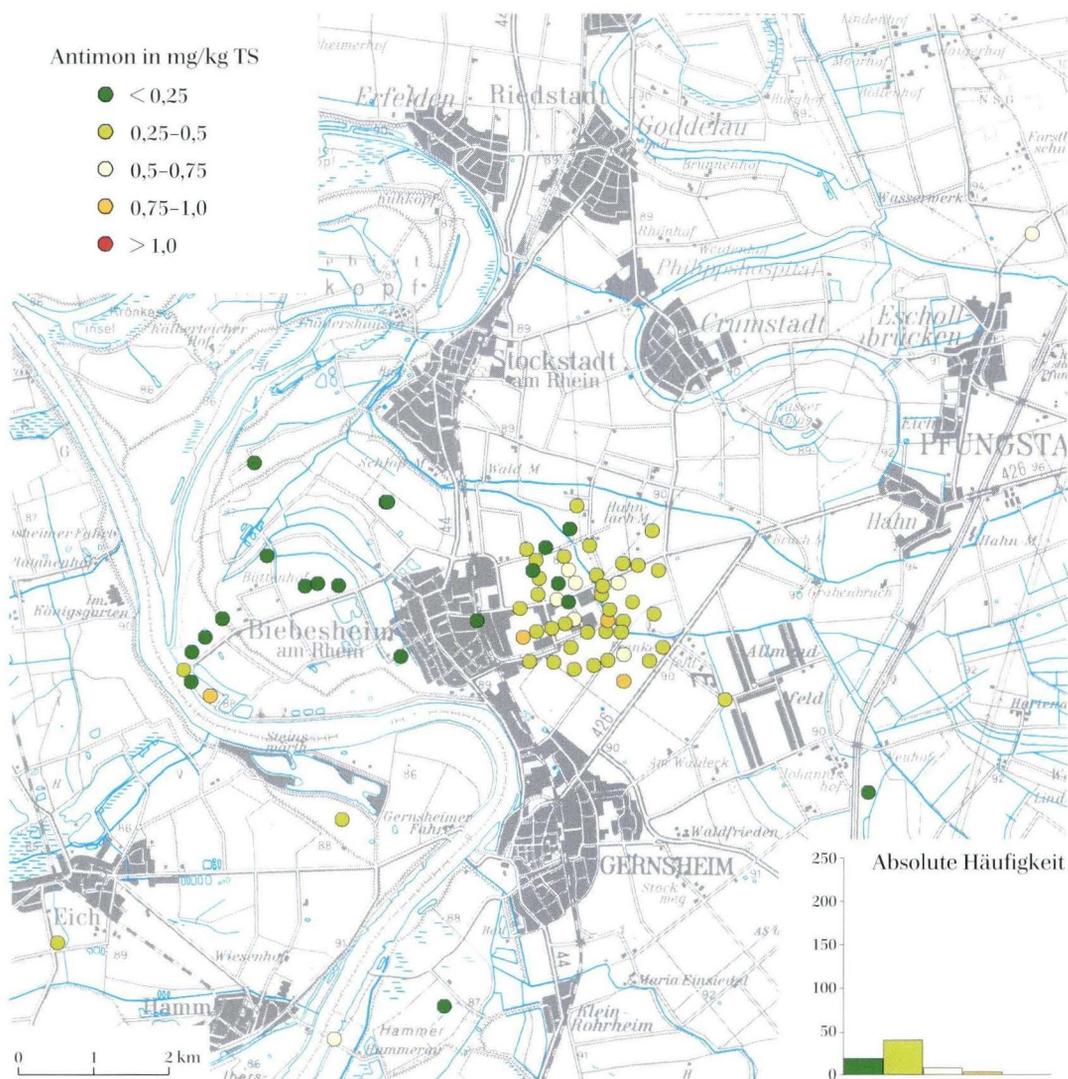
auf dem Hochgestade mehrere höher belastete Profile finden lassen.

Der BW I nach Eikmann & Kloke (1993) wird von keinem der beprobten Profile erreicht, so dass die multifunktionale Nutzungsmöglichkeit für Sb uneingeschränkt gegeben ist. In der BBodSchV (1999) werden für Sb weder Vorsorge- noch Prüf- oder Maßnahmenwerte angegeben.

Proben von insgesamt 206 Profilen wurden auf V analysiert (Karte 11). V ist das einzige Element, bei dem die höchste Belastungsklasse (> 50 mg/kg) mit 30 % der untersuchten Oberböden am häufigsten vertreten ist. Fast ebenso hohe Anteile entfallen in die nächstfolgenden Klassen von 37,5–50 mg/kg und 25–37,5 mg/kg. 27 der analysierten Profile sind mit 12,5–25 mg/kg und nur 5 mit einem Oberbodengehalt < 12,5 mg/kg belastet. Aus der räumlichen Verteilung der Belastungen wird ersichtlich, dass der Rhein als Eintragsquelle nicht besonders

deutlich hervortritt. Viele der höher belasteten Profile sind auch auf den älteren Mäandersystemen und dem Hochgestade zu finden. Wie angesprochen könnte die Ursache hierfür ein anthropogener Eintrag von V durch Schlackendünger sein (Keller & Desaulles 1997). Eine andere mögliche Belastungsquelle stellen die nördlich Biebesheim im Raum Stockstadt gelegenen Erdölfelder dar. Insgesamt paust sich jedoch auch bei diesem Element die Substratverteilung durch, denn die geringer belasteten Oberböden der ersten zwei Gehaltsklassen korrelieren in erster Linie mit den Flugsandvorkommen.

Der BW I nach Eikmann & Kloke (1993) wird von 61 der untersuchten Profile überschritten, die multifunktionale Nutzungsmöglichkeit ist in Bezug auf V fast für das gesamte Untersuchungsgebiet nicht gegeben. An dieser Stelle muß allerdings angemerkt werden, dass unter Berücksichtigung der geogenen Hintergrundwerte der Wert von 50 mg/kg ähnlich wie bei Cr als niedrig ange-



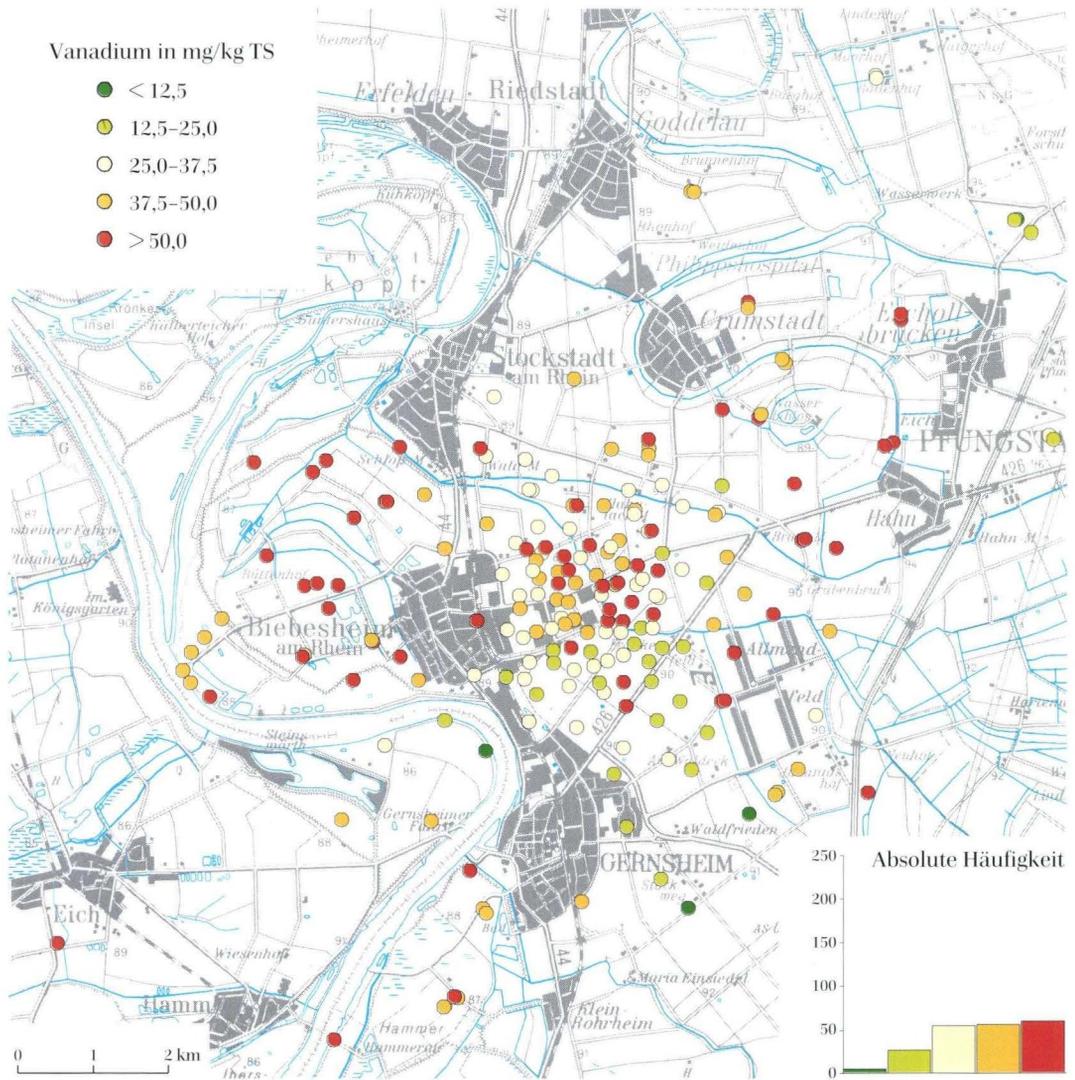
Karte 10. Antimon-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

setzt gilt (Weidner 1998). Auch berichten Keller & Desaulles (1997) über die Schwierigkeit der Risikobeurteilung von V, weil über seine Toxizität und Funktion noch zu wenig bekannt ist und in der Literatur widersprüchliche Angaben gemacht werden. Zwei Oberböden, gelegen in der Neckaraltaue und einem älteren Mäandersystem des Rheins, überschreiten bzw. erreichen darüber hinaus mit 140 und 100 mg/kg den BW II für landwirtschaftliche Nutzflächen und nicht-agrarische Ökosysteme (100 mg/kg). Der BW III (400 mg/kg), der als Toxizitätswert gilt und ein Eingreifen erforderlich macht, wird jedoch noch lange nicht erreicht. In der BBodSchV (1999) wird für V kein Vorsorge-, Prüf- oder Maßnahmenwert genannt.

Im Falle von **Zn** wurden Analysedaten von insgesamt 236 Profilen zusammengeführt (Karte 12). Gut 50 % der Oberböden dieser Profile weisen einen Zn-Gehalt von 37,5–75 mg/kg auf. Weitere 40 % entfallen zu annähernd gleichen Teilen auf die Gehaltsklassen < 37,5 mg/kg und

75–112,5 mg/kg. 6 Profile besitzen Oberbodengehalte zwischen 112,5 und 150 mg/kg. 11 Profile schließlich, ausnahmslos im rezenten Überflutungsbereich des Rheins gelegen, müssen in die höchste Belastungsklasse (> 150 mg/kg) eingeordnet werden. Ein Zn-Eintrag durch belastete Schwebstoffe des Rheins ist somit eindeutig belegt. Bei der räumlichen Verteilung der Zn-Belastung der übrigen Profile lässt sich wiederum ein Bezug zu den tonigeren Substratgruppen feststellen: Während die schluffigen und tonigen Auenlehme des Rheins zum Großteil der dritten Belastungsklasse zuzurechnen sind und die pleistozänen Hochflutlehme/-tone von Rhein und Neckar ebenfalls in die zweite oder dritte Gehaltsklasse fallen, korrelieren die Oberböden mit Gehalten < 37,5 mg/kg mit den Vorkommen von Flugsanddecken vor allem südöstlich von Biebesheim.

Der BW I nach Eikmann & Kloke (1993) wird von den bereits erwähnten 11 Profilen überschritten, d.h. in der

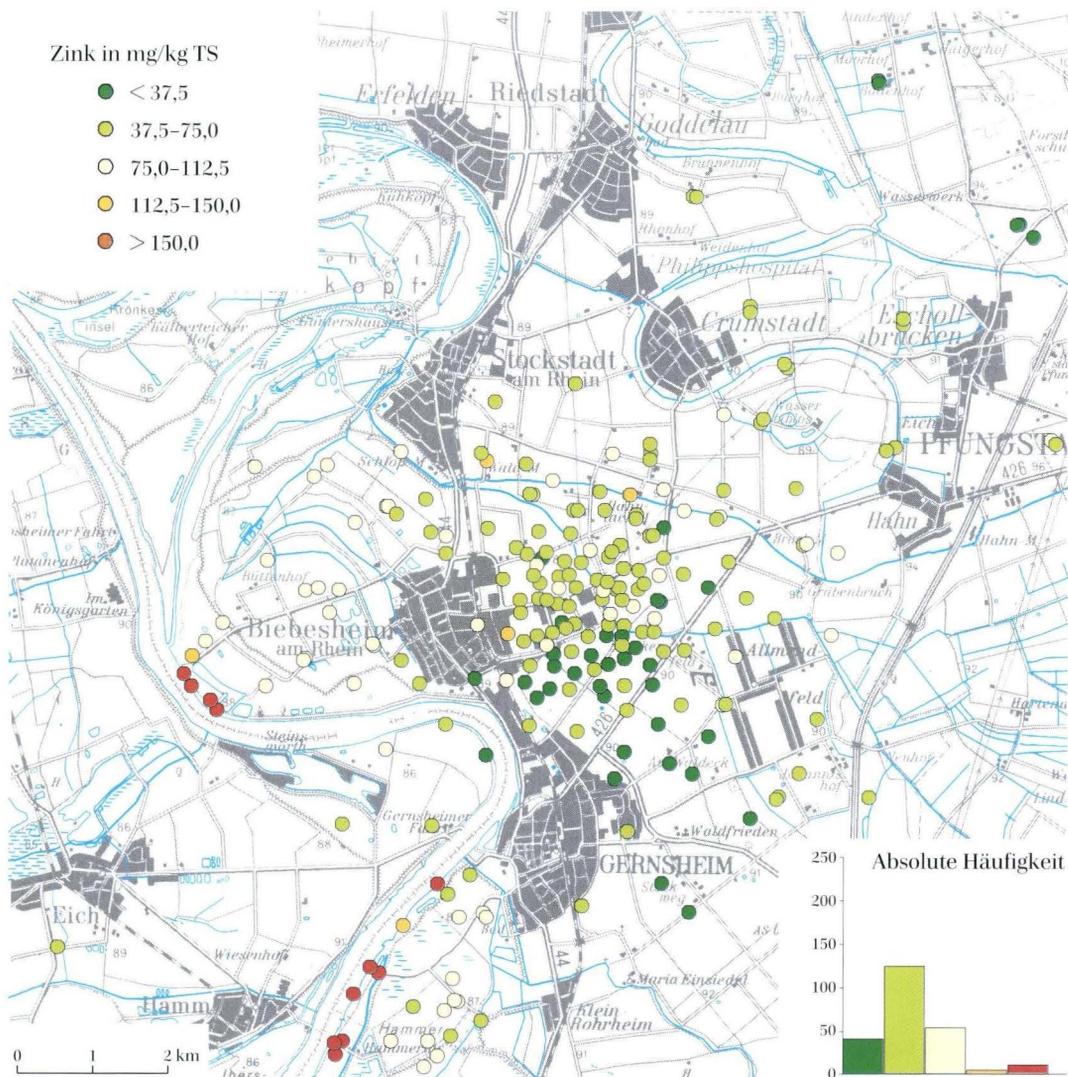


Karte 11. Vanadium-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

zenten Rheinaue ist eine multifunktionale Nutzungsmöglichkeit in Bezug auf Zink nicht gegeben. 2 dieser Oberböden - ein Profil in der Hammeraue (Ödland) sowie die Bodendauerbeobachtungsfläche Biebesheim (Mähwiese) - liegen sogar über dem Prüfwert BW II für landwirtschaftliche Nutzflächen und nicht-agrarische Ökosysteme von 300 mg/kg. Der in der BBodSchV (1999) für die Bodenart Ton aufgeführte Vorsorgewert von 200 mg/kg wird von 2 Oberböden in der Hammeraue, beides mittel schluffige Tone (Dehner 1994), überschritten. Der Vorsorgewert für die Bodenart Lehm/Schluff entspricht mit 150 mg/kg dem BW I und wird von den übrigen 9 erläuterten Profilen in der Rheinaue überschritten, die alle dieser Bodenart zugerechnet werden können.

Die **Pb**-Gehalte der Oberböden von ebenfalls 236 Profilen werden in Karte 13 dargestellt. In die ersten beiden Gehaltsklassen < 25 mg/kg und 25–50 mg/kg entfallen 41 % bzw. 52 % der analysierten Profile. 11 Profile sind

der Klasse 50–75 mg/kg zuzuordnen, in den beiden höchsten Belastungsklassen sind jeweils 3 Profile zu finden. Der mit Abstand am höchsten belastete Oberboden weist einen berechneten mittleren Pb-Gehalt von 381,2 mg/kg auf. Es handelt sich hierbei um das schon bei der Ni-Belastung angesprochene Flugsand-Profil, welches im Rahmen des Schwermetallgutachtens (Weidner 1992a) beprobt wurde. Die Analyse des rAp-Horizontes von 2–40 cm Tiefe ergab einen Pb-Gehalt von 400 mg/kg, während die oberen 2 cm des Horizontes sowie der darunter liegende Bt-Horizont nur Gehalte um die 20 mg/kg aufwies. Auch die Oberböden der umliegenden Profile sind alle den untersten Belastungsklassen zuzuordnen. Ähnlich verhält es sich mit den beiden anderen Profilen der höchsten Belastungsklasse, ebenfalls Weidner (1992a) entnommen, die allerdings nur Pb-Oberboden-gehalte von knapp über 100 mg/kg aufweisen. Auch hier besitzen die obersten 2 cm bzw. die unterliegenden Ho-



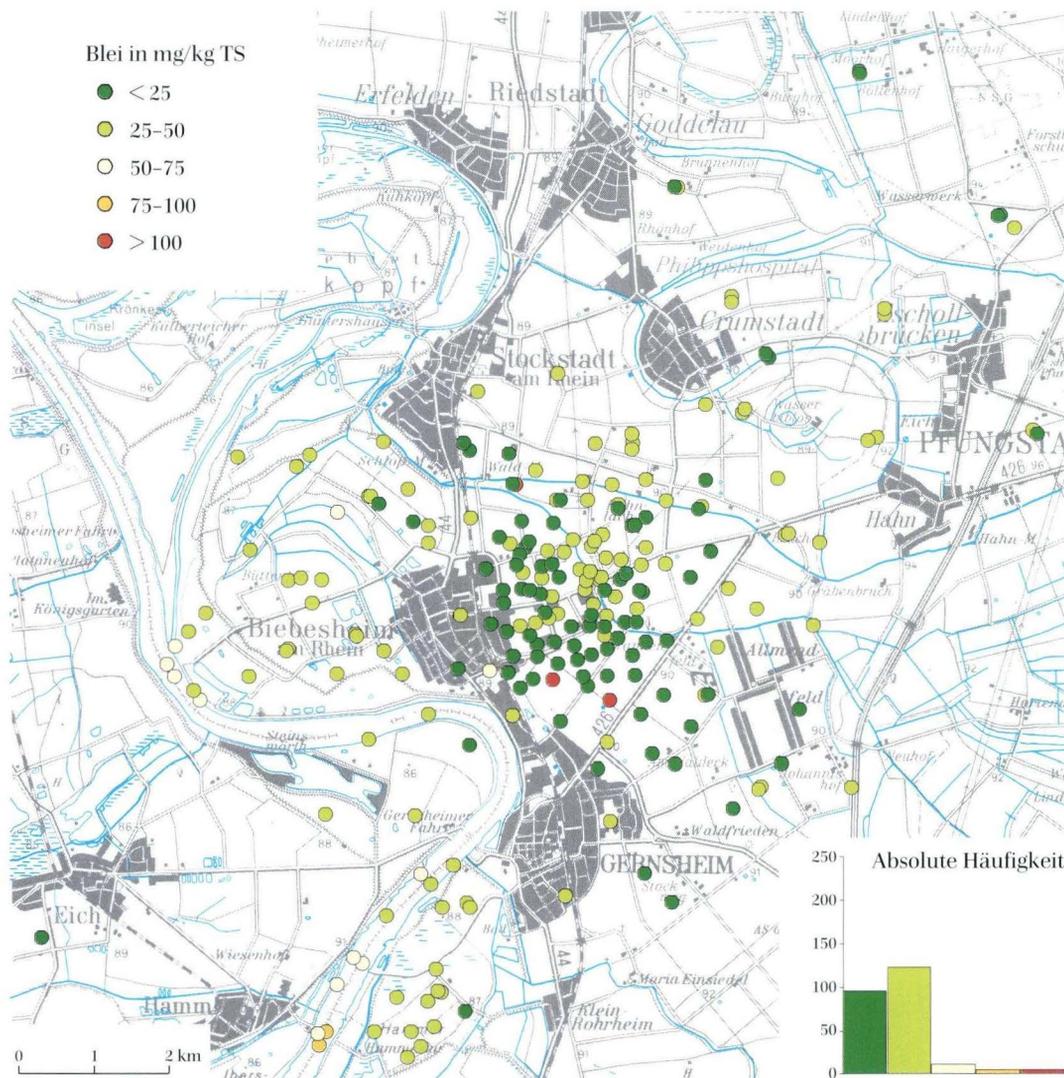
Karte 12. Zink-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

rizonte deutlich geringere Gehalte. Diese Werte müssen als Einzelwerte ohne Flächenbedeutung angesehen werden. Die Profile in der rezenten Rheinaue zeigen durch fluvialen Schadstoffeintrag leicht höhere Pb-Gehalte. Ansonsten ist eine deutliche Substratabhängigkeit der Belastung erkennbar: Während auf dem Hochgestade die geringen Pb-Gehalte mit den Substratgruppen der Flugsande und sandigen Hochflutlehme korrelieren, sind die schluffig-tonigen Hochflutlehme, die Hochfluttone und -lehme des Neckars sowie die holozänen Auensedimente überwiegend der zweiten Belastungsklasse zuzuordnen.

Der BW I nach Eikmann & Kloke (1993) wird nur von den drei erörterten Profilen erreicht, flächendeckend ergibt sich keine Einschränkung der multifunktionalen Nutzungsmöglichkeit. Der Vorsorgewert für die Bodenart Lehm/Schluff von 70 mg/kg nach der BBodSchV (1999) wird darüber hinaus von weiteren 4 Profilen überschritten, von denen drei in der Hammeraue liegen

(Dehner 1994). Die Vorsorgewerte für die Bodenarten Ton (100 mg/kg) und Sand (40 mg/kg) werden hingegen nicht tangiert. Der in der BBodSchV (1999) genannte Prüfwert für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze auf Ackerbauflächen und in Nutzgärten bezieht sich auf eine Ammoniumnitrat-Extraktion, der Maßnahmenwert von 1200 mg/kg unter Grünlandnutzung wird bei weitem nicht erreicht.

Das Datenkollektiv des Elements Hg (Karte 14) umfasst nur 85 analysierte Profile, deren größter Anteil im Rahmen des Schwermetallgutachtens von Weidner (1998) beprobt wurde. Insgesamt 94 % der Profile sind der niedrigsten Gehaltsklasse < 0,125 mg/kg zuzuordnen, wobei einige dieser Werte unterhalb der Nachweisgrenze liegen. 4 Profile gehören der Klasse 0,125–0,25 mg/kg an. Die im Rahmen des Biomonitoring-Programmes beprobte Standorterde in der rezenten Rheinaue in Biebesheim besitzt mit 0,48 mg/kg die höchste Hg-Belastung und



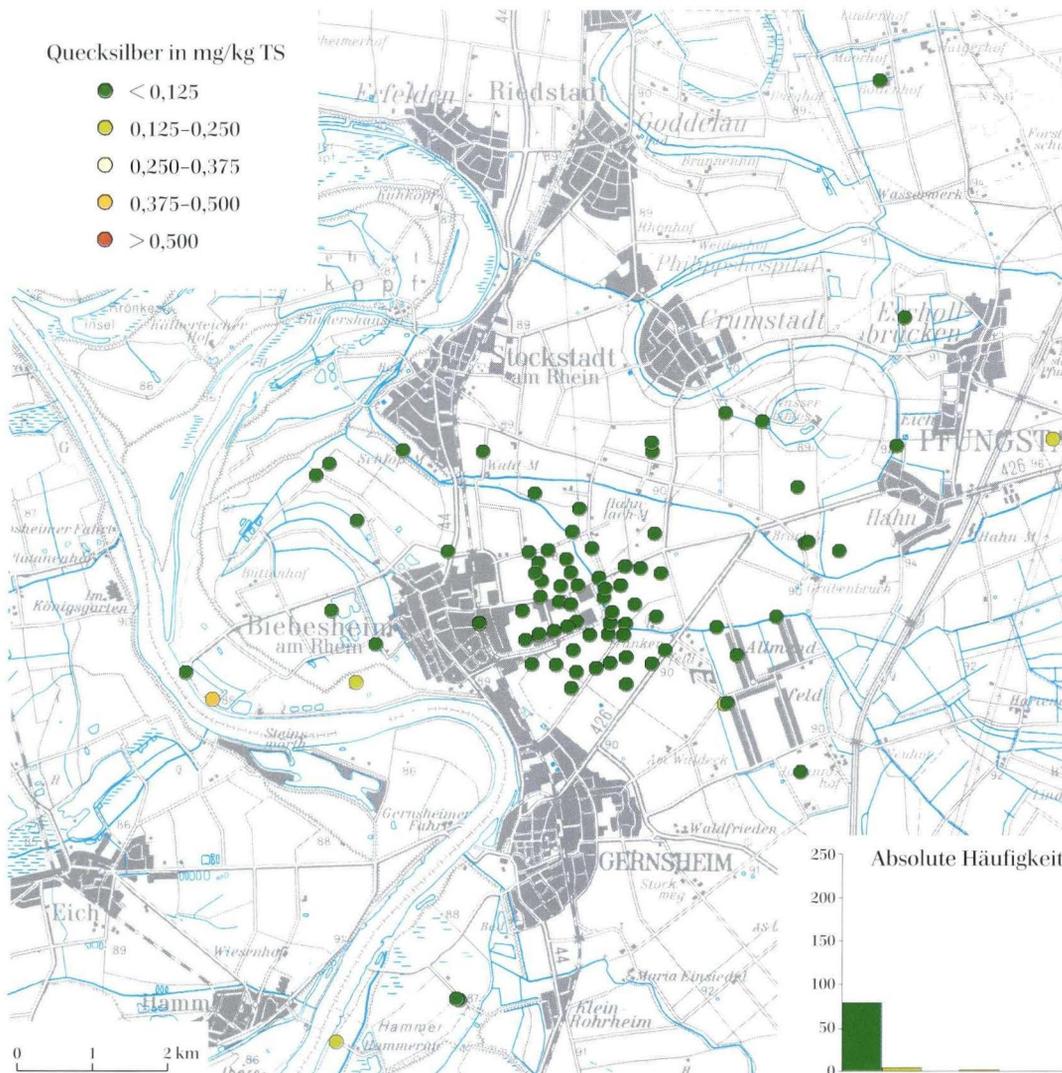
Karte 13. Blei-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

muß somit der 4. Gehaltsklasse zugerechnet werden. Der zweithöchste Wert von 0,21 mg/kg wurde in Hochwassersedimenten der Hammeraue ermittelt, so dass ein fluvialer Eintrag Hg-belasteter Schwebstoffe möglich erscheint. Allerdings sind insgesamt nur 4 auf Hg beprobte Profile im rezenten Überflutungsbereich vorhanden, so dass keine statistisch abgesicherte Aussage gemacht werden kann.

Der BW I von 0,5 mg/kg nach Eikmann & Kloke (1993) wird in keinem der untersuchten Oberböden überschritten, die multifunktionale Nutzungsmöglichkeit ist also ohne Einschränkungen gegeben. Die BBodSchV (1999) gibt für die Bodenart Sand einen Vorsorgewert von 0,1 mg/kg an. Da jedoch schluffige Sande entsprechend der Bodenart Lehm/Schluff (Vorsorgewert 0,5 mg/kg) zu bewerten sind, erreicht keiner der analysierten Oberböden diesen Vorsorgewert. Der Prüfwert von 5 mg/kg für Ackerbau und Nutzgärten sowie der Maßnahmenwert von 2 mg/kg

für Grünland in Bezug auf den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze wird ebenfalls deutlich unterschritten.

Für **Co** (Karte 15) liegen 50 % der 183 untersuchten Profile in der untersten Belastungsklasse < 7,5 mg/kg, weitere 45 % in der Klasse 7,5–15 mg/kg. Die Oberböden von 10 Profilen sind der Klasse 15–22,5 mg/kg zuzuordnen. Mit 17,9 bzw. 18 mg/kg am höchsten belastet sind drei Oberböden aus schluffigem Auenlehm (Schwermetallgutachten Weidner 1992a) in der Hammeraue. Mit Ausnahme eines höher belasteten Flugsandstandortes handelt es sich auch bei den übrigen Profilen der dritten Belastungsklasse um schluffige bis tonige Auensedimente sowie einen Neckar-Hochflutlehm. Die Oberböden aus Flugsand sind hingegen größtenteils der untersten Klasse zuzuordnen. Die Belastung durch den Rhein scheint vernachlässigbar zu sein, wobei allerdings nur ein Wert aus der ansonsten hochbelasteten rezenten Aue in Biebesheim zur Verfügung steht. Insgesamt kann davon ausgegangen werden,



Karte 14. Quecksilber-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

dass die dargestellten Co-Oberbodenwerte überwiegend den geogenen Grundgehalt wiedergeben.

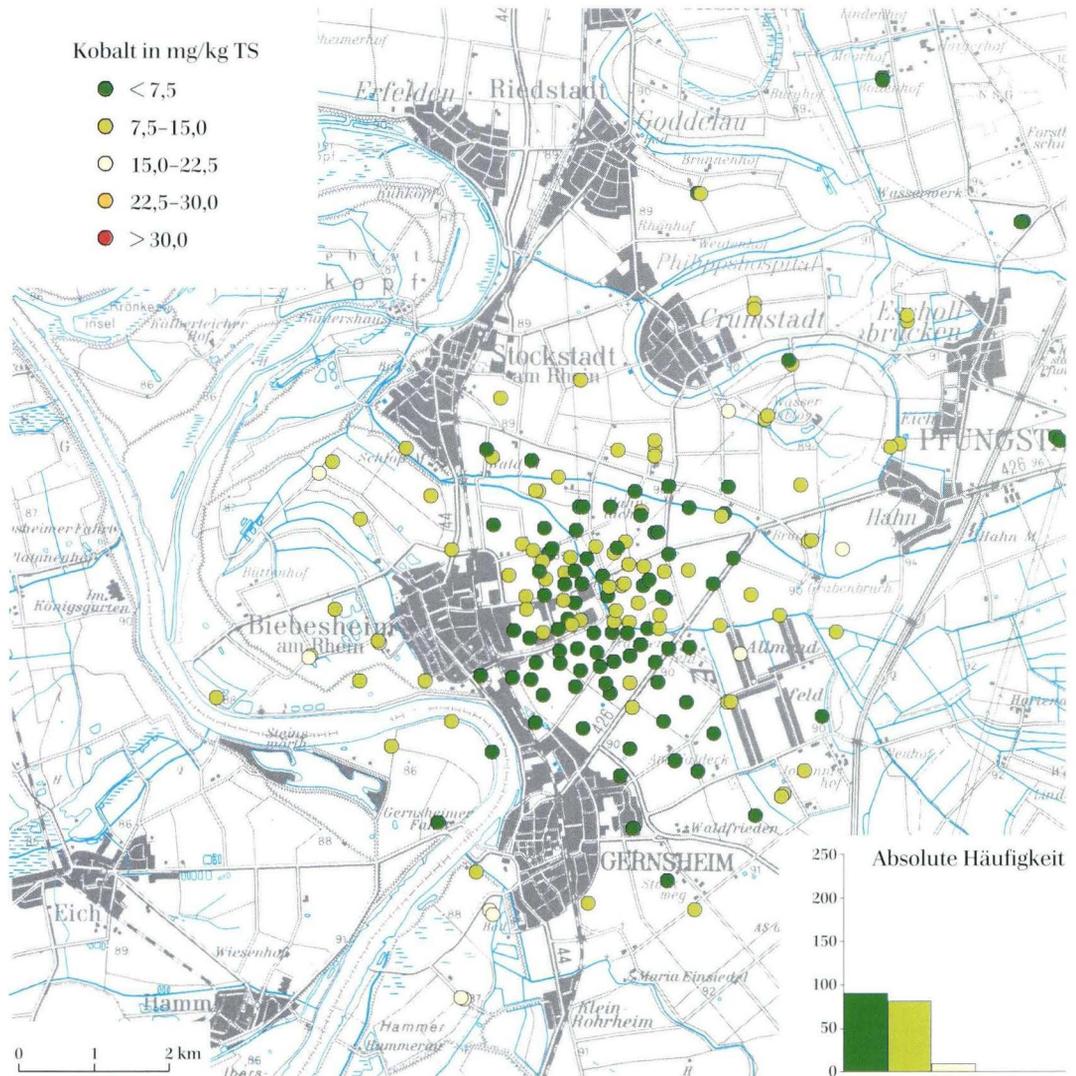
Kein Oberboden erreicht annähernd den BW I von 30 mg/kg für das „Schutzgut Mensch“ nach Eikmann & Kloke (1993). In der BBodSchV (1999) werden für Kobalt keine Vorsorge-, Prüf- oder Maßnahmenwerte angegeben.

4.5 Vertikale Schwermetallverteilung ausgewählter Profile

Beispiele für die Tiefenfunktionen der Schwermetallgehalte sollen anhand der Profile der Bodendauerbeobachtungsflächen dargestellt werden, da diese am detailliertesten beprobt wurden. Wie bereits bei dem Vergleich der Ober- und Unterbodenbelastung wird darauf hingewiesen, dass auch hier die dargestellten Konzentrationen nicht mittels der Rohdichte korrigiert wurden.

Da die Mineralböden größtenteils nur geringe Humusgehalte aufweisen, würde sich an der Interpretation der Tiefenfunktionen jedoch wenig ändern.

Die vertikale Schwermetallverteilung der Elemente As, Cd, Ni, V, Zn und Pb der **Bodendauerbeobachtungsfläche Biebesheim** in der rezenten Rheinaue wird in Abb. 3a dargestellt (Emmerich 1997c). Mit Ausnahme von As, bei dem die höchsten Gehalte in einer Tiefe von 180-190 cm anzutreffen sind, lässt sich für alle Elemente eine ähnliche Abfolge beobachten, nämlich ein Maximum der Schwermetallkonzentrationen im Oberboden und eine mehr oder weniger kontinuierliche Abnahme mit der Tiefe. Gleiches gilt auch für die hier nicht dargestellten Elemente Cr, Cu und Sb. Während für Cd, Ni, Zn und Pb die höchste Belastung in dem Bereich zwischen 5-25 cm zu finden ist und die Werte der jüngeren Hochflutablagerungen jeweils niedriger liegen, was auf einen zurückgehenden fluvialen Eintrag hindeutet,

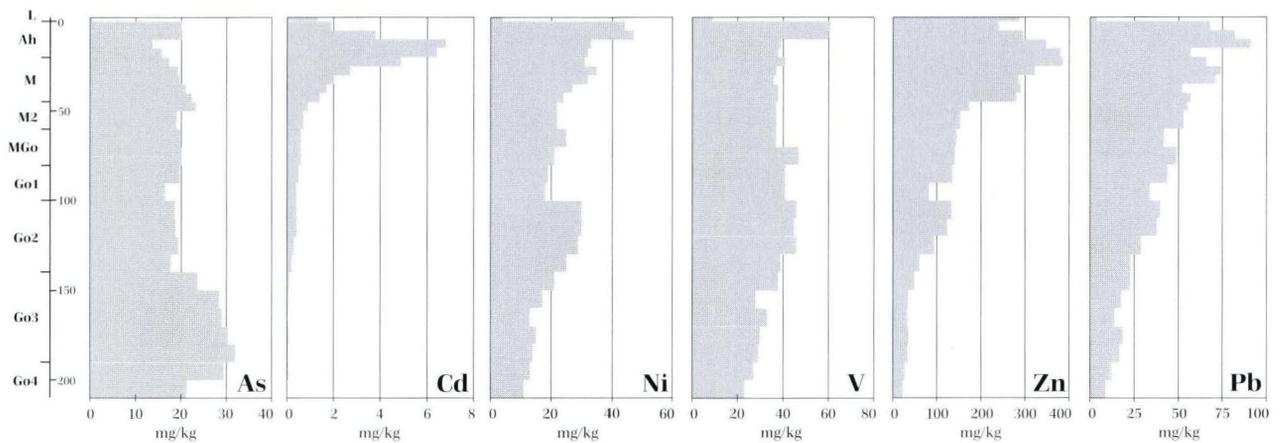


Karte 15. Kobalt-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

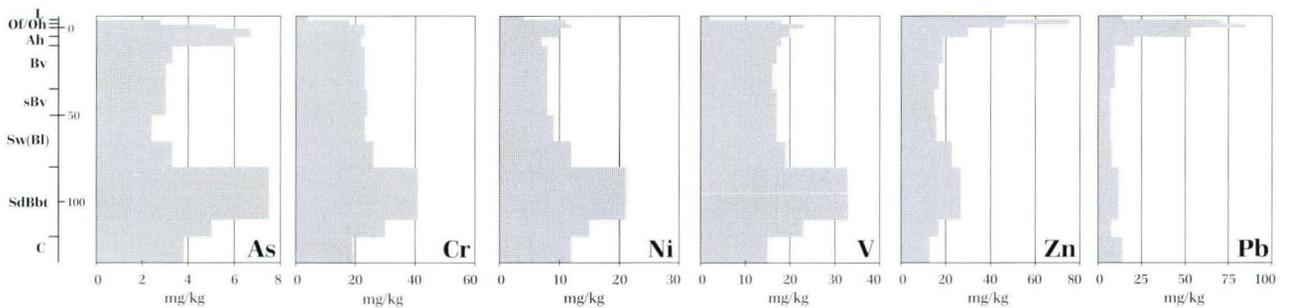
ist V das einzige Element, welches in den obersten 5 cm eine Gehaltszunahme zeigt. Dieser Trend wird durch die beprobten Sedimente der Hochwässer 1994 und 1995 bestätigt (Moldenhauer 1996). Weiterhin läßt sich festhalten, dass die Schwermetallgehalte im Auflagehorizont L bei allen Elementen um ein vielfaches niedriger liegen als in den unterlagernden Mineralbodenhorizonten, was darauf hinweist, dass der atmosphärische Eintrag deutlich unter dem sedimentären liegt. Eine Ausnahme bildet nur Zn, hier liegt der Wert des L-Horizontes in der gleichen Größenordnung wie der des mineralischen Oberbodens. Es muß allerdings betont werden, dass der

Vergleich der Auflage mit dem mineralischen Oberboden aufgrund der fehlenden Rohdichte-Korrektur nur beschränkt interpretierbar ist. Die pH-Werte schwanken über das gesamte Profil nur gering und nehmen insgesamt mit der Tiefe von 7,3 im Oberboden bis 7,8 kontinuierlich zu (L-Horizont: 6,25). Aufgrund dieser optimalen Pufferung ist eine Mobilisierung und Verlagerung der Schwermetalle zunächst nicht zu erwarten. Ein weiteres Indiz für eine sedimentäre, nicht durch pedogene Verlagerungen überprägte Entstehung des Profils ist die Tatsache, dass das hochmobile Cd und die relativ immobilen Elemente Pb sowie das nicht dargestellte Cu eine

(a) Biebesheim



(b) Eschollbrücken



(c) Allmendfeld

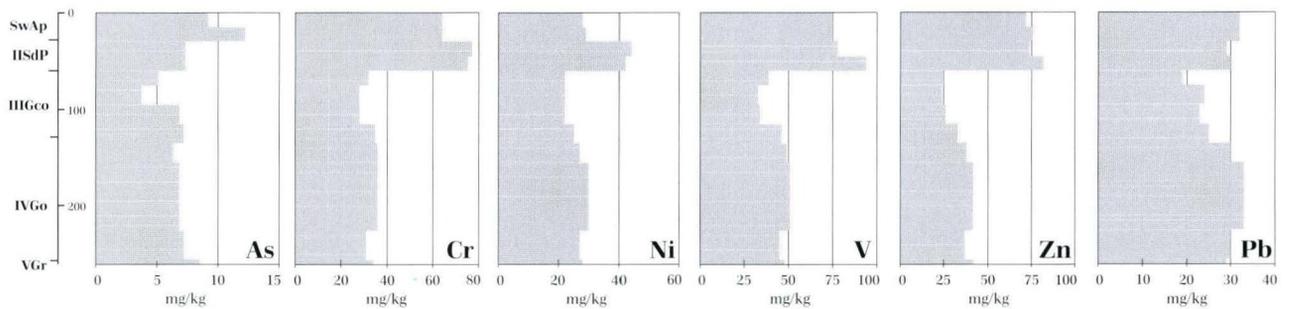


Abb. 3a-c. Tiefenfunktion der Schwermetallgehalte der Bodendauerbeobachtungsflächen Biebesheim, Eschollbrücken und Allmendfeld.

vergleichbare Tiefenverteilung zeigen. Eine sekundäre Stoffumverteilung innerhalb des Profils kann damit ausgeschlossen werden. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass es in den tieferen Bodenhorizonten im Oszillationsbereich des Grundwassers durch Aufspiegelung im Verlauf eines Hochwasserereignisses trotz neutraler pH-Werte zu einer Mobilisierung der Schwermetalle und damit zu einem Eintrag ins Grundwasser kommt.

Die vertikale Schwermetallabfolge der Elemente As, Cr, Ni, V, Zn und Pb der **Bodendauerbeobachtungsfläche Eschollbrücken**, einer Braunerde mit Bändern aus Flugsand unter Wald, veranschaulicht Abb. 3b (Emmerich 1997c). Im Gegensatz zu den beiden anderen dargestellten Dauerbeobachtungsstandorten, die optimal gepuffert sind, befinden sich hier der Oberboden (pH-Wert 3,3) sowie weite Teile des Profils im sauren Bereich. Erst in einer Tiefe von 120 cm steigt der pH-Wert auf 7,7 an. Eine Verlagerung mobilerer Elemente kann somit nicht ausgeschlossen werden. Der L-Horizont ist mit As, Cr, Ni, V und Pb nur gering belastet, während der aktuelle Eintrag für Zn und die nicht abgebildeten Elemente Cd und Cu deutlich höher zu sein scheint. Es können zwei Belastungsschwerpunkte erkannt werden: Zn, Pb und das nicht dargestellte Cu weisen die mit Abstand höchsten Werte in den Of-/Oh-Horizonten auf. Auch der mineralische Oberboden ist noch deutlich höher belastet, was auf einen anthropogenen Eintrag dieser Schwermetalle deutet. As, Cr, Ni und V sind hingegen innerhalb des SdBbt-Horizonts in einer Tiefe von 80–100 cm am höchsten belastet, wenn auch insbesondere bei As erhöhte Werte ebenfalls in Auflage und Oberboden festzustellen sind. Abgesehen vom generell höheren Tongehalt läßt sich die Anreicherung in der Tiefe möglicherweise auf pedogenetische Prozesse und eine sekundäre Umverteilung

zurückführen, die Schwermetalle wurden im Rahmen der Verlagerung und Anreicherung des Tons in Bändern mit in die Tiefe transportiert. Die in den weiteren Profilmereichen weitgehend einheitlichen Konzentrationen insbesondere von Cr, aber auch von Ni und V deuten auf deren geogenen Ursprung hin.

Bei der **Bodendauerbeobachtungsfläche Allmendfeld**, die als Acker genutzt wird, handelt es sich um einen Pelosol im Bereich des Altneckarlaufes, dessen vertikale Schwermetallverteilung für die Elemente As, Cr, Ni, V, Zn und Pb in Abb. 3c dargestellt wird (Emmerich 1997c). Am höchsten belastet ist dieses Profil in Bezug auf Cr, Ni, V, Zn und das nicht abgebildete Cu innerhalb des IISdP-Horizontes in einer Tiefe von 30–60 cm. Im darübergelegenen SwAp sind geringere Gehalte zu finden. In den unterlagernden Horizonten mit Grundwassereinfluß ist zunächst eine deutliche Abnahme, ab einer Tiefe von 110 cm wiederum eine Zunahme der Schwermetallkonzentrationen festzustellen, die dann auf annähernd gleichem Niveau verbleiben. Diese Tiefenfunktion korreliert mit der Verteilung der Bodenarten: Während es sich bei dem am höchsten belasteten IISdP-Horizont um einen lehmigen Ton handelt, sind die unterlagernden Rheinweißhorizonte als lehmige Sande bis sandige Lehme anzusprechen. Unterhalb 110 cm folgen dann wiederum tonigere Lehme. Im Fall von As sind die höchsten Konzentrationen mit einem deutlichen Maximum in 15–20 cm Tiefe im SwAp-Horizont zu finden und auch bei Pb übertreffen die Gehalte des Oberbodens die des IISdP-Horizontes. Ansonsten folgt auch hier die Belastung dem Wechsel der Bodenarten. Die pH-Werte schwanken über den gesamten Profilmereichen nur geringfügig von 7,2 bis 7,9, eine Mobilisierung der Schwermetalle kann ausgeschlossen werden.

5. Belastung mit organischen Schadstoffen

5.1 Herkunft und Eigenschaften der organischen Schadstoffe in Böden

Im Gegensatz zu den Schwermetallen gelangen organische Schadstoffe fast ausschließlich durch anthropogenen Eintrag in die Böden. Ihre Hintergrundgehalte sind deshalb weitgehend identisch mit den ubiquitären Einträgen, die dann durch bodenbildende Prozesse und nutzungsspezifische Einwirkungen umverteilt werden können (LABO 1998). Die große Umweltrelevanz organischer Schadstoffe resultiert aus ihrer hohen Persistenz, starken Dispersionstendenz sowie oft ausgeprägten Lipophilie und damit Neigung zur Anreicherung in der Nahrungskette. Meist ist ihre akute Toxizität relativ gering und die Schädlichkeit beruht vielmehr auf den carcino-

genen, teratogenen oder mutagenen Eigenschaften. In der aktuellen Diskussion ist außerdem die endokrine Wirkung von Umweltchemikalien in den Vordergrund gerückt (HLfU 1997).

Die wesentlichen Adsorbenten für organische Schadstoffe im Boden sind Humus, Tonminerale und Sesquioxide. Während Schwermetallanreicherungen im Boden weitgehend irreversibel sind, können organische Schadstoffe sowohl durch pflanzlichen Entzug als auch durch unmittelbaren Abbau reduziert werden. Dabei sind die wesentlichen Degradationsprozesse Photolyse, Oxidation, Reduktion und Substitution. Da die biotische Abbaurate um so größer ist, je günstiger der Luft- und Wasserhaushalt für die Mikroorganismen im Boden, geht die Degradation in sandigen, gut durchlüfteten Substraten

meist schneller voran, als in tonreichen, dichtgelagerten (Ketterer 1991). Exakte Angaben über Abbauraten sind jedoch aufgrund der komplexen Bedingungen im Freiland nur schwierig zu ermitteln; die meisten Befunde wurden im Labor gewonnen und stellen deshalb nur Orientierungswerte dar. Betont werden muß, dass ein Abbau organischer Schadstoffe nicht mit einer Verringerung der Belastung korrelieren muß, da Zwischen- oder Abbauebenenprodukte sogar teils größere Toxizität und Persistenz aufweisen. Im folgenden sollen die hier untersuchten organischen Schadstoffe in Bezug auf ihre Quellen und Charakteristika näher erläutert werden.

PAK entstehen hauptsächlich bei der unvollständigen Verbrennung fossiler Brennstoffe und gelangen über Schwebstäube durch trockene und nasse Deposition in den Boden und die Oberflächengewässer, wo sie heute ubiquitär vorhanden sind. Während die niedermolekularen PAK aufgrund ihrer hohen Wasserlöslichkeit im Boden relativ mobil sind, sind die höhermolekularen PAK bei geringer Wasserlöslichkeit weniger mobil. Über ihren Abbau im Boden existieren stark voneinander abweichende Angaben, wobei nach Joneck & Prinz (1993) eine Transformation durch Bodenbakterien innerhalb von 0,5–2 Jahren (je nach Substanz) als wahrscheinlich gilt, während bei höher kondensierten PAK (≥ 5 Ringe) ein mikrobieller Abbau nicht gesichert nachgewiesen werden konnte (Mahro & Kästner 1993). Der wichtigste Vertreter dieser Stoffgruppe ist das Benzo(a)pyren, welches oft als Leitsubstanz verwendet wird (Tebaay et al. 1993). Im folgenden wird der PAK-Gehalt gemäß der sog. EPA-Liste angegeben (EPA 1984), in der die 16 am häufigsten in der Umwelt vorkommenden PAK als Summenparameter zusammengefasst werden.

PCB wurden aufgrund ihrer hervorragenden chemischen Eigenschaften (hoher Siedepunkt, thermische Stabilität) für ein weites Anwendungsspektrum eingesetzt (z.B. in der Transformator- und Kondensatortechnik, als Weichmacher in Kunststoffen, in Farben und Lacken). Seit 1978 dürfen PCB in Deutschland nur noch in geschlossenen Systemen verwendet werden, seit 1989 besteht ein Produktionsverbot und bis 1999 sollen alle PCB-gefüllten Produkte außer Betrieb genommen werden (HLfU 1997). Trotzdem stellen sie auch heute noch ein aktuelles Belastungsproblem dar und sind ubiquitär vorhanden. Für die niedrig chlorierten Kongenere (1–3 Chloratome) beträgt die Halbwertszeit im Boden ungefähr 6 Monate, während die hoch chlorierten Kongenere (4–10 Chloratome) weitgehend persistent sind. Da bei den verschiedenen hier zusammengetragenen Untersuchungen die PCB-Konzentrationen nicht nach einer einheitlichen Methodik gemessen wurden, werden sie im folgenden entweder als Summe der 6 sog. Ballschmitter-Kongenere (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) oder als Summe von Tri- bis DecaCB dargestellt.

PCDD/F entstehen als unerwünschte Nebenprodukte bei chemischen Synthesen und als Verbrennungsprodukte bei unterschiedlichen thermischen Prozessen. Sie sind ubiquitär verbreitet und werden durch trockene oder nasse Deposition aus der Luft in die Böden und Oberflächengewässer eingetragen. Ihre Adsorbierbarkeit an der organischen Substanz in Böden ist sehr hoch, die vertikale Mobilität aufgrund der niedrigen Wasserlöslichkeit gering. Einträge über die Luft sind noch nach mehreren Jahren fast vollständig in den oberen Zentimetern von Böden wiederzufinden. Vor allem die höher chlorierten Dioxinverbindungen sind weitgehend persistent, die Halbwertszeit für das sogenannte „Seveso-Dioxin“ (2,3,7,8-TCDD) beträgt nach Young (1983) mit photolytischen Abbauprozessen 10–12 Jahre. Die Konzentrationsangaben werden im folgenden als Toxizitätsäquivalente (I-TE) nach dem NATO-CCMS-Modell (1988) angegeben. Sie sind ein Maß für die toxische Potenz des Kongenerengemischs, indem die Kongenere in Beziehung zu ihrem giftigsten Vertreter, dem „Seveso-Dioxin“, gestellt werden.

Die **HCH**-Isomere haben durch ihre Anwendung als Pestizide eine weltweite Verbreitung erfahren und wurden somit teilweise auf direktem Wege in den Boden eingetragen. **DDT** war jahrzehntelang das bedeutendste Insektizid und wurde ebenfalls weltweit eingesetzt, **HCB** wurde in Pflanzenschutzmitteln, zur Saatbeize und in Holzschutzmitteln verwendet. Während die Anwendung von DDT, HCB und dem technischen HCH-Gemisch seit 1972, 1981 bzw. 1980 in Deutschland verboten ist, darf das reine γ -HCH (Lindan) heute noch verwendet werden. Die Halbwertszeit von DDT im Boden beträgt 3–10 Jahre, die von HCB ungefähr 2 Jahre und die von γ -HCH rund 1 Jahr. Dahingegen ist β -HCH mit einer Halbwertszeit von 8 Jahren deutlich persistenter, unter aeroben Bedingungen kann der Abbau sogar Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Während in Bezug auf HCH vier Isomeren (α -, β -, γ -, δ -HCH) einzeln ausgewertet wurden, handelt es sich bei den DDT-Konzentrationen um den Summenwert aus DDT, DDE und DDD.

5.2 Grenz- und Orientierungswerte

Analog zu den Schwermetallen wurden die organischen Schadstoffgehalte in den Böden der Region Biebesheim in Anlehnung an die Orientierungswerte nach Eikmann & Kloke (1993) und der Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchV 1999) beurteilt. Die Bewertung der Dioxine erfolgte darüber hinaus anhand der Richtwerte der BLAG Dioxine (1992).

Die Orientierungswerte nach Eikmann & Kloke (1993) für die Verbindung Benzo(a)pyren, die PCB-Summengehalte nach Ballschmiter und die PCDD/F-Gehalte nach BGA (Umweltbundesamt 1985) sind in Tab. 7 dargestellt.

Tab. 7. Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für organische Schadstoffe in Böden (Eikmann und Kloke 1993).

Nutzungsarten		Benzo(a)pyren [mg/kg]	PCB ₆ [µg/kg]	PCDD/F nach BGA [ng TE/kg TS]
multifunktionale	BW I	1	200	10

Tab. 8. Vorsorgewerte für organische Schadstoffe in Böden (in mg/kg Trockenmasse, Feinboden) (BBodSchV 1999).

Böden	PCB ₆	Benzo(a)pyren	PAK ₁₆
Humusgehalt > 8%	0,1	1	10
Humusgehalt < 8%	0,05	0,3	3

Tab. 9. Prüf- und Maßnahmenwerte für organische Schadstoffe für den Schadstoffübergang Boden - Nutzpflanze im Hinblick auf die Pflanzenqualität für Ackerbau/Nutzgarten und Grünland (in mg/kg Trockenmasse, Feinboden) (BBodSchV 1999).

Stoff	Ackerbau, Nutzgarten		Grünland
	Prüfwert	Maßnahmenwert	Maßnahmenwert
Benzo(a)pyren	1	–	
Polychlorierte Biphenyle (PCB ₆)			0,2

Im Gegensatz zum Nutzungsschlüssel für die Schwermetalle werden hier landwirtschaftliche Nutzflächen nicht separat betrachtet.

Die Vorsorgewerte für organische Stoffe in Böden nach §8 Abs. 2 Nr.1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) werden in Tab. 8 aufgeführt. Es werden nur Werte für die Summe der 6 PCB-Kongeneren nach Ballschmiter, die Einzelsubstanz Benzo(a)pyren sowie die Summe von 16 PAK (EPA 1984) angegeben. Um dem Einfluß des Humusgehaltes auf die Bindung und Mobilität organischer Schadstoffe Rechnung zu tragen, wird zwischen Gehalten größer bzw. kleiner 8 % differenziert.

Nach Nutzung untergliederte Prüf- und Maßnahmenwerte [nach §8 Abs. 1 Satz 2 Nr.1 und 2 des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998)] bezogen auf den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze im Hinblick auf die Pflanzenqualität werden nur für Benzo(a)pyren und die Summe der 6 PCB-Kongeneren nach Ballschmiter angegeben (Tab. 9). Für den Wirkungspfad Boden-Mensch, also die direkte Aufnahme von Schadstoffen, existieren Maßnahmenwerte für PCDD/F sowie Prüfwerte für Benzo(a)pyren, DDT, HCB, HCH und PCB₆. Da diese sich jedoch nur auf die Nutzungen Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen sowie Industrie- und

Gewerbegrundstücke beziehen, kommen sie hier nicht zur Anwendung.

Die Richtwerte und Empfehlungen für landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzung der BLAG Dioxine (1992) werden in Tab. 10 aufgeführt. Die Toxizitätsäquivalente stützen sich auf die Berechnung nach dem NATO/CCMS-Modell (1988). Je nach Nutzung beziehen sich die Werte auf unterschiedliche Bodentiefen.

Weil die angeführten Orientierungs- und Richtwerte nicht für alle hier untersuchten Schadstoffe eine Beurteilungsgrundlage bieten, wurden die vorliegenden Ergebnisse darüber hinaus mit Daten aus der Literatur verglichen. Es muß allerdings betont werden, dass die Meßprogramme hinsichtlich Probenumfang, Standortauswahl, Probennahme und Analytik differieren und somit die Ergebnisse vorsichtig interpretiert werden sollten. Im Rahmen der Hintergrundwerte der LABO (1998) gibt es für das Land Hessen bei den organischen Schadstoffen nur Daten für Dioxine. Allerdings existiert inzwischen eine erste Bestandsaufnahme der emittentenunabhängigen Belastung hessischer Böden auf Grundlage der Daten von bis zu 44 Bodendauerbeobachtungsflächen, von denen auch drei in diese Untersuchung mit einfließen (Emmerich 1997b). Diese Hintergrundwerte wurden in Anlehnung an die Berech-

Tab. 10. Bodenrichtwerte und Maßnahmen für PCDD/F nach BLAG Dioxine (1992).

Bodengehalte [ng I-TE/kg TS]	Maßnahmen	Bezugssystem (Bodentiefe in cm)
< 5	uneingeschränkte landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzung, Zielgröße der Bodensanierung	Grünland 0–10, Acker-/Gartenbau 0–30 bzw. Bearbeitungstiefe
5–40	Uneingeschränkte Nutzung für Nahrungsmittel- und Feldfutteranbau, Einschränkung der Beweidung bzw. Verzicht auf Freilandhaltung von Tieren für Selbstversorger	s.o.
> 40	Ermittlung der Ursachen Folgende Nutzungen sollten unterbleiben: - Anbau bodennah wachsender Obst- und Gemüsearten - Anbau bodennah wachsender Feldfutterpflanzen - bodengebundene Nutztierhaltung	s.o.

nungsweise der LABO (1998) jeweils als Median und 90. Perzentilwert angegeben. Außerdem wurden die umfangreichen Untersuchungen zur Hintergrundbelastung der Böden Bayerns mit organischen Schadstoffen (Joneck & Prinz 1993, 1994) und Analysen von PCB und chlororganischen Pestiziden im Rhein-Neckar-Raum (Ketterer 1991) zum Vergleich herangezogen.

5.3 Statistische Auswertungen des Datensatzes

Die statistischen Kenngrößen der untersuchten organischen Schadstoffe sind in Tab. 11 dargestellt, wobei neben der Auswertung für den Gesamtdatensatz eine Differenzierung in Acker- und Grünlandnutzung vorgenommen wurde. Die Unterschiede zwischen arithmetischem Mittel, Median und 90. Perzentil deuten bereits darauf hin, dass die Datenkollektive nicht normalverteilt sind. Vielmehr zeigen alle eine ausgeprägte linksschiefe Verteilung, was im Hinblick auf die häufig nicht nachweisbaren Stoffgehalte auch zu erwarten war. Wie bereits bei den Schwermetallen erläutert, gibt der Median also auch in diesem Fall ein korrekteres Bild über die Lage des mittleren Wertes der Meßreihen als das arithmetische Mittel und wird deshalb bei der Betrachtung der verschiedenen Probenkollektive verwendet.

Ein Vergleich der organischen Schadstoffgehalte der einzelnen Substratgruppen im Hinblick auf deren unterschiedliche Adsorptionsfähigkeit wurde auf Grundlage des vorhandenen Datensatzes nicht als sinnvoll erachtet,

da nur für die Flugsande und die holozänen schluffigen Auenlehme ausreichende Wertkollektive vorhanden sind. Die durchschnittlich deutlich höhere Belastung der Auenlehme ist dabei, wie die Karten 16–20 verdeutlichen, in erster Linie auf die hochbelasteten Profile im rezenten Überflutungsbereich des Rheins zurückzuführen. Eine Ausnahme bilden nur die HCH-Isomeren, hier sind die Flugsande aufgrund von Verwehungen aus einer ehemaligen HCH-Halde höher belastet (Karte 19). Da bei der Untersuchung auf die diversen organischen Schadstoffe fast ausschließlich Oberböden beprobt wurden, konnte eine differenzierte Betrachtung der Ober- und Unterböden im Hinblick auf eine mögliche Verlagerung von organischen Schadstoffen nur anhand von Einzelprofilen erfolgen. Auch die dargestellte nutzungsspezifische Auswertung der organischen Schadstoffgehalte, die sich aufgrund der geringen Anzahl an Waldstandorten auf einen Vergleich von Acker und Grünland beschränken muß, besitzt nur eine begrenzte Aussagekraft, da die leicht höher belasteten Grünlandböden überproportional von den Standorten in der Aue beeinflusst werden.

5.4 Räumliche Verteilung der organischen Schadstoffgehalte der Oberböden

Auch für die organischen Schadstoffe wurden Karten erstellt, die die Belastung der untersuchten Oberböden wiedergeben (Karte 16–20). Die Berechnung der Konzentrationen über den gesamten Oberboden erfolgte wie im

Tab. 11. Statistische Kennwerte der Konzentrationen organischer Schadstoffe in der Region Biebesheim.

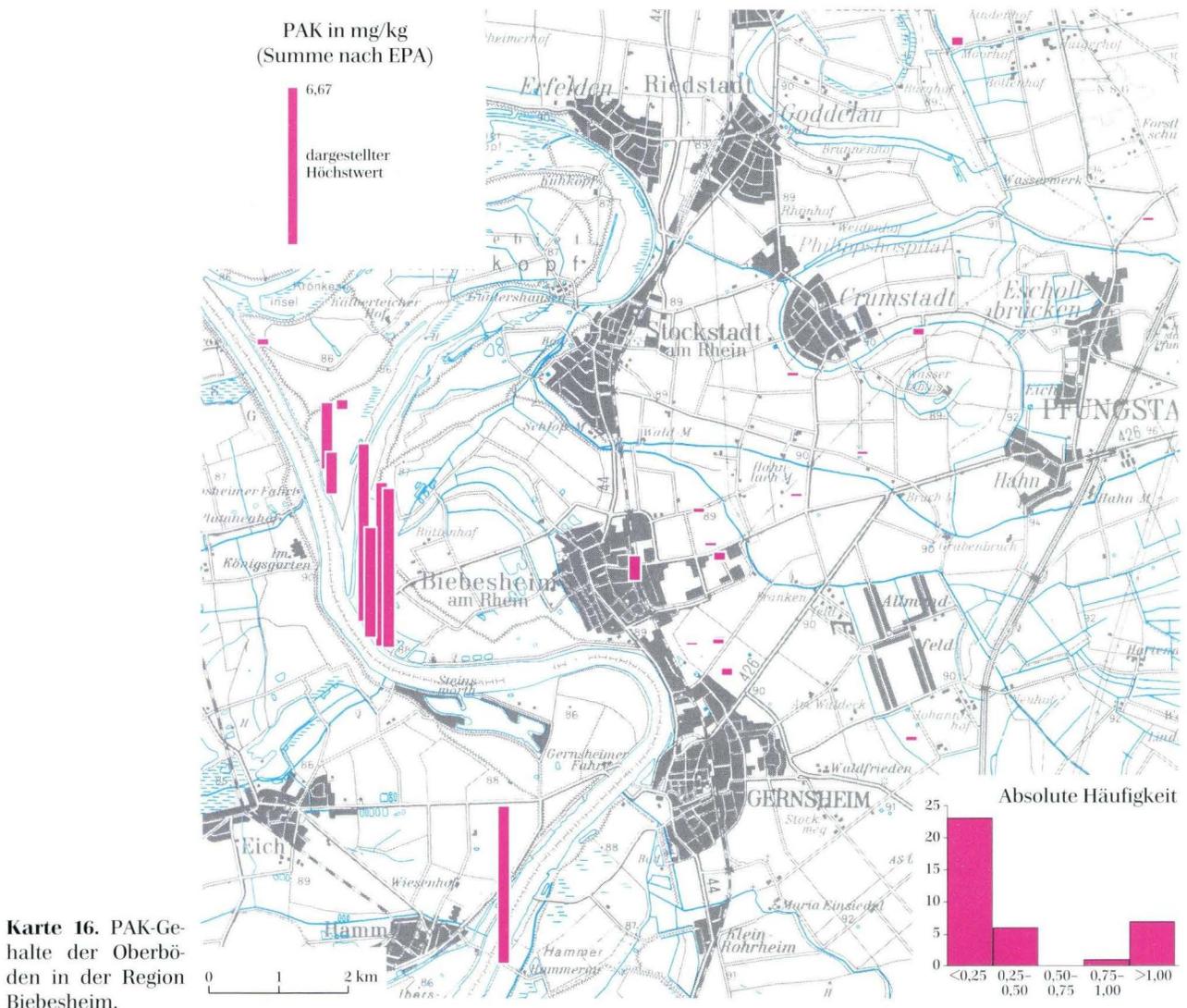
statistische Kennwerte	Benzo(a) PAK EPA		Summe	Summe	PCDD/F	α -HCH	β -HCH	γ -HCH	δ -HCH	HCB	DDT
	pyren	Summe	PCB	PCB ₆	I-TEq						
	[mg/kg]	[mg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]
Gesamt											
n	67	67	39	85	75	83	83	81	60	113	77
arith. Mittel	0,116	1,163	26,811	12,371	10,688	2,00	135,00	1,00	1,00	9,352	18,091
Median	0,020	0,198	10,990	0,000	3,600	0,00	0,00	0,00	0,00	2,350	10,000
90. Perzentil	0,476	4,596	30,630	48,200	32,040	3,00	20,00	2,00	2,00	22,000	49,200
Minimum	0,000	0,002	2,830	0,000	0,010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000
Maximum	0,716	6,690	253,960	159,000	85,200	75,00	3862,00	16,00	29,00	189,000	107,000
Acker (Oberboden)											
n	7	7	6	51	14	49	49	49	48	54	48
arith. Mittel	0,009	0,142	8,978	0,666	3,616	2,00	84,00	1,00	1,00	3,043	21,854
Median	0,010	0,110	8,120	0,000	1,890	0,00	0,00	0,00	0,00	2,370	10,500
90. Perzentil	0,010	0,270	13,840	2,000	5,180	2,00	21,00	2,00	0,00	7,000	55,800
Minimum	0,003	0,030	4,650	0,000	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000
Maximum	0,010	0,360	18,710	5,000	16,900	75,00	3303,00	16,00	29,00	9,000	107,000
Grünland (Oberboden)											
n	47	47	31	21	44	24	24	21	12	49	18
arith. Mittel	0,145	1,430	31,534	36,936	11,702	3,00	294,00	2,00	4,00	17,233	11,056
Median	0,020	0,210	12,750	41,000	3,650	0,00	0,00	1,00	1,00	2,540	11,500
90. Perzentil	0,588	6,228	33,630	66,000	34,080	5,00	20,00	2,00	17,00	42,314	20,000
Minimum	0,007	0,030	2,830	0,000	1,200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	1,000
Maximum	0,716	6,690	253,960	159,000	58,800	32,00	3862,00	11,00	22,00	189,000	22,000

Fälle der Schwermetalle beschrieben. Aufgrund der deutlich geringeren Dichte der Daten und des nicht für alle untersuchten Schadstoffe gegebenen Bezugs zu definierten Grenz- bzw. Orientierungswerten werden diese zunächst nicht klassifiziert, sondern als absolute Werte mit Hilfe von Balkendiagrammen dargestellt. Nur für die Darstellung der absoluten Häufigkeiten in Histogrammen erfolgt eine Klassifizierung der Daten.

Die **PAK**-Belastung der Oberböden von insgesamt 37 Profilen wird in Karte 16 wiedergegeben. Zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung erfolgte eine Klassifizierung der Werte in 5 Klassen von $< 0,25$ bis > 1 mg/kg. Der überwiegende Teil (62 %) der Oberböden ist mit $< 0,25$ mg/kg belastet, 6 Oberböden sind der zweiten Gehaltsklasse von 0,25–0,5 mg/kg zuzuordnen. Während kein Profil in der dritten und mit 0,98 mg/kg nur ein Standort im Stadtgebiet von Biebesheim in der vierten Klasse zu finden ist, weisen 7 Oberböden eine Belastung von > 1 mg/kg auf.

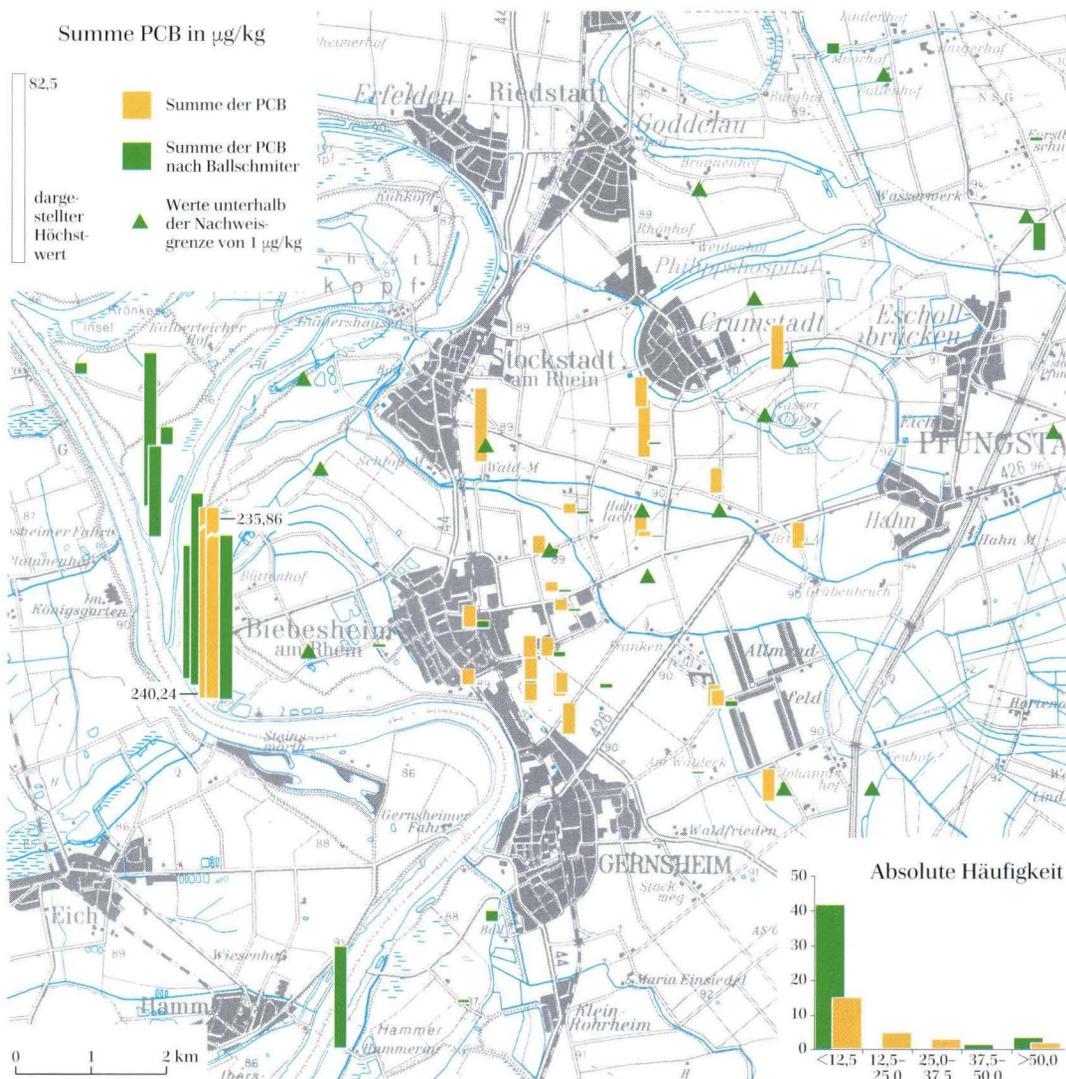
Bei dem mit 6,67 mg/kg am höchsten belasteten Standort handelt es sich um das im Rahmen des Meßprogrammes hessischer Auen (Moldenhauer 1996) beprobte Profil in der Aue bei Biebesheim (Nutzung: Mähwiese), bei dem die Sedimente des Hochwassers von 1994 analysiert wurden. Insgesamt läßt die räumliche Verteilung der Belastung eindeutig einen fluvialen Schadstoffeintrag erkennen. Während die Profile auf dem Hochgestade mit Ausnahme des genannten Profils der vierten Belastungsklasse, dessen überhöhter Wert nicht erklärt werden kann, PAK-Gehalte von $< 0,5$ mg/kg aufweisen, liegen die untersuchten Oberböden im rezenten Überflutungsbereich ausnahmslos in der obersten Belastungsklasse.

Der BW I von Eikmann & Kloke (1993) existiert nur für die Einzelsubstanz Benzo(a)pyren und nicht für die dargestellte Summe der PAK. Er beträgt 1 mg/kg und wird in keinem der untersuchten Oberböden überschritten. Gleiches gilt für den Prüfwert der BBodSchV (1999) des Wir-



kungspfades Boden-Nutzpflanze unter Ackerbau und in Nutzgärten, der für Benzo(a)pyren auch mit 1 mg/kg angegeben wird. Der für die EPA-Summe genannte Vorsorgewert von 10 mg/kg bei einem Humusgehalt von > 8 % wird ebenfalls nicht erreicht. Allerdings überschreitet der genannte Maximumwert den Vorsorgewert von 3 mg/kg für einen Humusgehalt < 8 %. Für zwei weitere Standorte in der Biebesheimer Aue kann keine sichere Einordnung vorgenommen werden, da für sie keine Humusgehalte vorliegen. Die durchschnittliche Belastung der Oberböden auf dem Hochgestade von knapp 0,2 mg/kg liegt noch deutlich unterhalb des Wertes von 0,93 mg/kg, der von Joneck & Prinz (1994) als Hintergrundbelastung für Acker- und Grünlandböden in Bayern angegeben wird. Weiterhin liegt sie im Bereich der Hintergrundwerte für Oberböden in Hessen, die durch einen Median von 0,1 mg/kg und ein 90. Perzentil von 0,63 mg/kg charakterisiert werden (Emmerich 1997b).

In Karte 17 werden die **PCB**-Gehalte der Oberböden dargestellt. Insgesamt umfaßt das Datenkollektiv 63 auf PCB beprobte Profile. Weil jedoch je nach Labor unterschiedliche Kongeneren gemessen wurden, wird in der Karte sowohl die Summe der 6 Ballschmitter-Kongeneren, im folgenden als „Summe PCB₆“ bezeichnet, als auch die Summe von Tri- bis Deca-CB, im folgenden als „Summe PCB“ bezeichnet, aufgetragen. Im Falle von 8 Profilen existieren Daten für beide Summenbildungen. Zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung wurden die PCB-Werte 5 Belastungsklassen von < 12,5 bis > 50 µg/kg zugeordnet. 18 der 46 auf PCB₆ analysierten Profile weisen Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze auf, insgesamt sind somit fast 90 % der untersten Gehaltsklasse zuzuordnen. Von den übrigen 6 Profilen liegen 2 in der Belastungsklasse 37,5–50 µg/kg, 4 Profile besitzen PCB₆-Gehalte von > 50 µg/kg. Bei dem am höchsten belasteten Standort handelt es sich um die als Mähwiese genutzte

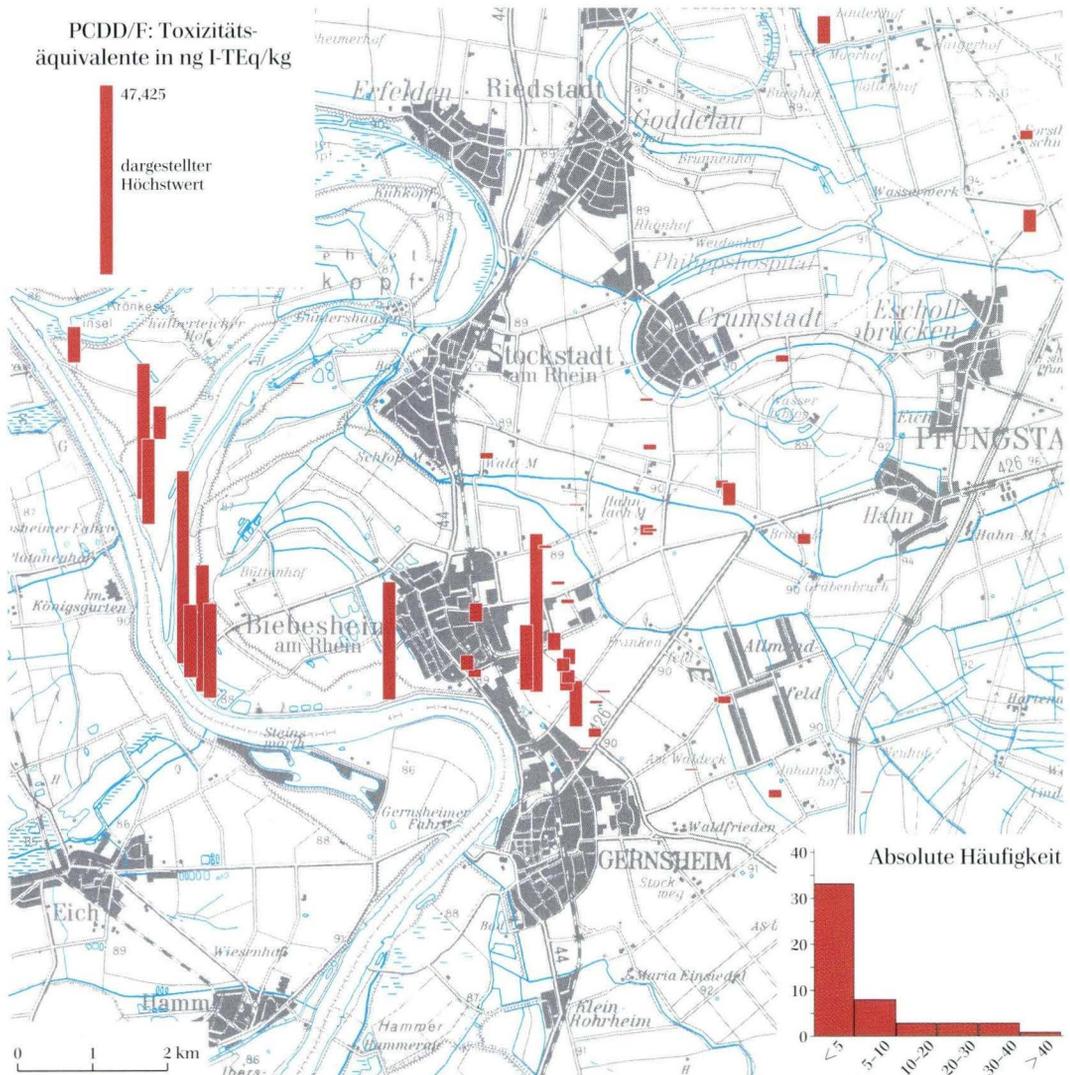


Karte 17. PCB-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

Bodendauerbeobachtungsfläche Biebesheim (Emmerich 1997b), der gemittelte Oberbodengehalt beträgt hier 82,5 µg/kg. Auch die übrigen 3 Profile liegen in der rezenten Rheinaue. Dahingegen sind die Profile auf dem Hochgestade ausschließlich der untersten Belastungsklasse zuzuordnen, wobei noch erwähnt werden soll, dass die Analysen unterhalb der Nachweisgrenze zum größten Teil aus dem Datenkollektiv des HLRL-Untersuchungsprogramms stammen (HMILFN 1998). Von den 25 auf die Summe der PCB analysierten Standorte liegen 60 % in der untersten Gehaltsklasse. 5 der Profile weisen einen PCB-Oberbodengehalt zwischen 12,5 und 25 µg/kg auf, weitere 3 sind der dritten Gehaltsklasse (25–37,5 µg/kg) zuzuordnen. Nur zwei der Standorte liegen im Überflutungsbereich des Rheins und sind mit großem Abstand am höchsten belastet. Es handelt sich dabei um ein Profil aus dem Meßprogramm organische Schadstoffe (Weidner 1989), welches einen PCB-

Oberbodengehalt von 235,86 µg/kg aufweist, und eine Standorterde des Biomonitoring-Programmes (HLfU 1996), die mit 240,24 µg/kg am höchsten belastet ist. Beide Flächen werden als Mähwiese genutzt. Aufgrund der gewählten Skalierung der Balkendiagramme können die zugehörigen PCB-Gehalte auf der Karte nicht mehr maßstabsgetreu dargestellt werden. Insgesamt ist eine PCB-Belastung durch fluvialen Eintrag belasteter Schwebstoffe eindeutig belegt. In Bezug auf die Profile auf dem Hochgestade kann keine weitere räumliche Differenzierung getroffen werden.

Sowohl die Orientierungswerte nach Eikmann & Kloke (1993) als auch die Werte im Rahmen der BBodSchV (1999) beziehen sich auf die Summe der 6 Ballschmitterkongeneren. Der BW I von 200 µg/kg wird in keinem der untersuchten Oberböden überschritten, eine multifunktionale Nutzung ist also selbst für die Gebiete im rezenten Überflutungsbereich gegeben. Der Vorsorgewert der



Karte 18. PCDD/F-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

BBodSchV von 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ für einen Humusgehalt von $> 8\%$ wird ebenfalls nicht erreicht. Für einen Humusgehalt $< 8\%$ wird ein Vorsorgewert von 50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ angegeben, der zumindest von dem im Rahmen des Meßprogramms hessische Auen beprobten Standort mit 57,25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ leicht überschritten wird (Moldenhauer 1996). Für die Standorterde des Biomonitoring-Programms und das belastete Profil auf dem Kühkopf, die beide ebenfalls einen PCB₆-Oberbodengehalt von $> 50 \mu\text{g}/\text{kg}$ aufweisen, sind zwar die Humusgehalte nicht analysiert worden, können aber ebenfalls als $< 8\%$ abgeschätzt werden. Der Maßnahmenwert für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze auf Grünlandflächen beträgt wie der BW I 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ und wird somit nicht tangiert. Joneck & Prinz (1994) geben die Hintergrundbelastung der Böden Bayerns mit 190 und 70 $\mu\text{g}/\text{kg}$ für Acker- bzw. Grünlandböden an. Für hessische Oberböden betragen die Hintergrundwerte 3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (Median) bzw. 43 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (90. Perzentil; Emmerich 1997b). Abgesehen von den Profilen in der rezenten Rheinaue werden diese Vergleichswerte z.T. deutlich unterschritten.

Insgesamt 48 Profile wurden auf PCDD/F beprobt und analysiert (Karte 18). In Anlehnung an die BLAG Dioxine (1992) wurden die Werte zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung im Gegensatz zu allen anderen Elementen nicht in 5 sondern 6 Belastungsklassen (von < 5 bis $> 40 \text{ ng I-TEq}/\text{kg}$) eingeteilt. 64 % der untersuchten Oberböden weisen einen Wert von $< 5 \text{ ng I-TEq}/\text{kg}$ auf, weitere 16 % einen Wert zwischen 5 und 10 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$. In die folgenden drei Gehaltsklassen fallen jeweils 3 Standorte. Nur der Maximalwert, der 47,425 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$ beträgt, ist der höchsten Klasse zuzuordnen. Es handelt sich wiederum um den im Rahmen des Meßprogrammes hessischer Auen beprobten Standort in der Aue bei Biebesheim (Moldenhauer 1996). Auch im Falle der PCDD/F tritt der Rhein als Schadstoffquelle deutlich in Erscheinung. Daneben weisen jedoch auch einige Standorte südöstlich von Biebesheim eine deutlich erhöhte Belastung bis zu 39,233 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$ auf. Diese Werte sind auf Verwehungen aus einer ehemaligen HCH-Halde zurückzuführen, auf die unten näher eingegangen werden soll. Die übrigen Profile auf dem Hochgestade besitzen eine PCDD/F-Belastung zwischen 1 und 7,8 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$.

Eikmann & Kloke (1993) sehen für PCDD/F einen BW I von 10 $\text{ng TEq}/\text{kg TS}$ vor, dem allerdings im Gegensatz zur Kartendarstellung die BGA/UBA-Berechnungsweise (Umweltbundesamt 1985) zugrunde liegt. Auf dieser Berechnungsgrundlage überschreiten insgesamt 10 Standorte in der Aue und im Bereich der HCH-Belastungsfläche den BW I, so dass auf diesen Flächen die multifunktionale Nutzungsmöglichkeit nicht gegeben ist. Die BBodSchV (1999) sieht für PCDD/F keine Vorsorge-, Prüf- oder Maßnahmenwerte hinsichtlich landwirtschaftlicher Nutzung vor. In Bezug auf die Bodenrichtwerte für

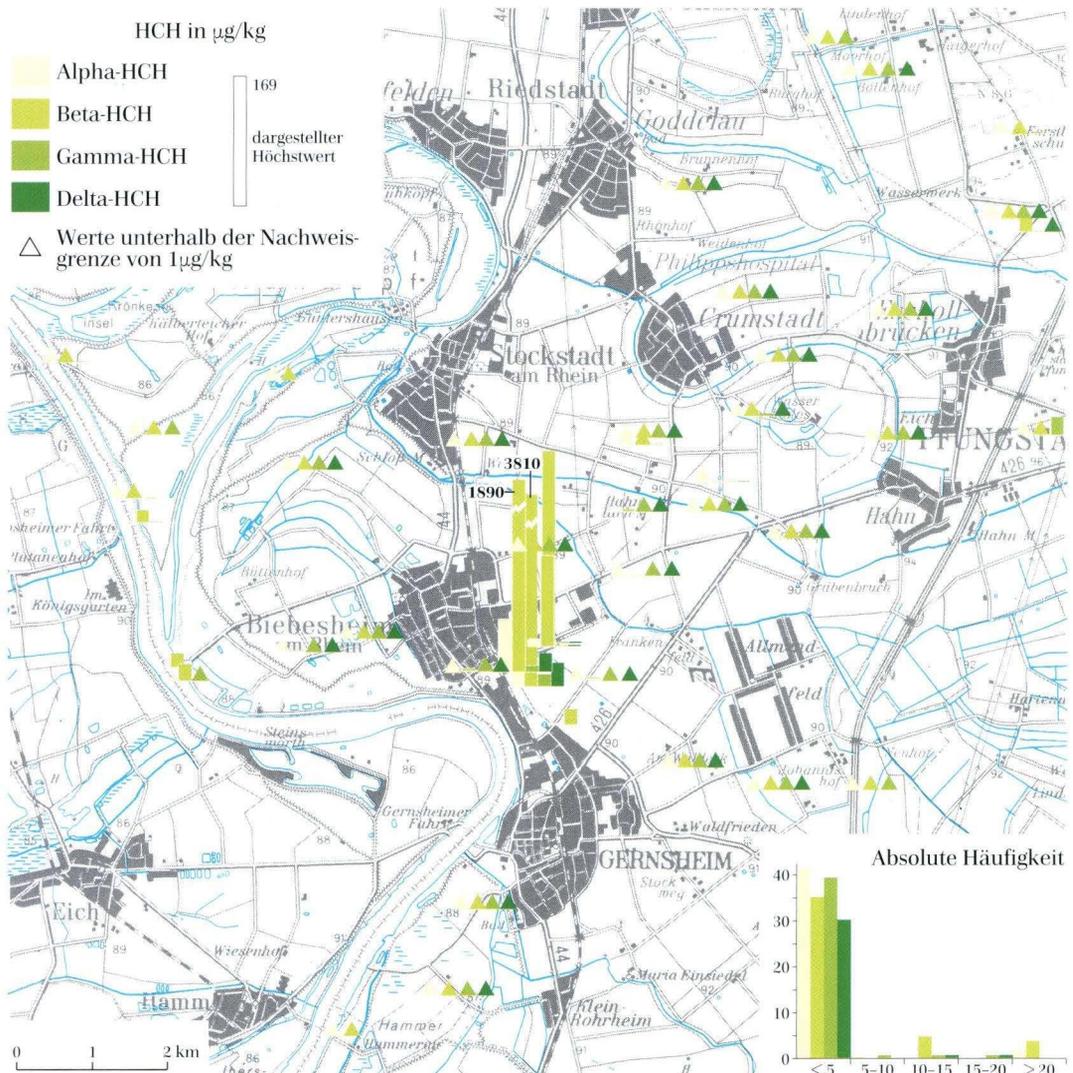
landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzung der BLAG Dioxine (1992) sollte für insgesamt 17 Standorte mit PCDD/F-Gehalten zwischen 5 und 40 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$ eine Einschränkung der Beweidung empfohlen werden. Nur der genannte Maximalwert befindet sich in der dritten Belastungsklasse $> 40 \text{ ng I-TEq}/\text{kg}$, für die ein Verzicht auf den Anbau bodennah wachsender Obst- und Gemüsearten sowie Futterpflanzen und bodengebundene Nutztierhaltung nahegelegt wird. Im Rahmen der Hintergrundwerte der LABO (1998) wird für Hessische Oberböden ohne Nutzungs- und Gebietstypdifferenzierung ein Wert von von 5 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$ (Median) genannt. Joneck & Prinz (1994) geben für Acker- und Grünlandböden in Bayern einen Hintergrundwert von 2,3 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$ an. Ohne die belasteten Standorte in der Aue und im Rahmen der HCH-Belastungsfläche südöstlich Biebesheim ergibt sich mit 2,96 $\text{ng I-TEq}/\text{kg}$ eine durchschnittliche Belastung der Profile, die in etwa dem bayerischen Wert entspricht.

Von den 44 Profilen, die in diesem Zusammenhang auf α -, β -, γ - oder δ -HCH untersucht wurden (Karte 19), entstammt ein großer Anteil dem Untersuchungsprogramm des HLRL (HMILFN 1998) und dem Meßprogramm organische Schadstoffe (Weidner 1989). Zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung wurden hier die Analysedaten in 5 Klassen zwischen < 5 und $> 20 \mu\text{g}/\text{kg}$ eingeteilt. Aufgrund der geringen Persistenz insbesondere von α -, γ - und δ -HCH weisen die meisten der beprobten Oberböden Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze von 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ auf. Diese werden in der Karte durch Dreieckssignaturen dargestellt. Für α -, γ - und δ -HCH befinden sich deshalb über 90 % der analysierten Oberböden in der untersten Gehaltsklasse, nur je maximal ein Standort ist den folgenden drei Gehaltsklassen bis 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ zuzuordnen, 2 Standorte überschreiten für α -HCH diesen Wert und fallen damit in die oberste Gehaltsklasse. Eindeutig höhere Belastungen zeigen die Profile aber in Bezug auf β -HCH: Immerhin 5 Oberböden sind der dritten Gehaltsklasse von 10–15 $\mu\text{g}/\text{kg}$ zuzuordnen, weitere 4 - alle südöstlich von Biebesheim gelegen - überschreiten zum Teil deutlich 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Die beiden hier gemessenen am höchsten belasteten Standorte, die gemittelte β -HCH-Oberbodengehalte von 1888 und 3810 $\mu\text{g}/\text{kg}$ aufweisen, können aufgrund der gewählten Skalierung auf der Karte nicht maßstabsgetreu aufgetragen werden; der dargestellte Höchstwert beträgt 169 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Die ungewöhnlich hohen HCH-Rückstände dieser 4 Profile sind auf Auswehungen aus einer ehemaligen HCH-Produktionsstätte zurückzuführen. HCH wurde direkt in die umgebenden Ackerflächen eingetragen. Diese überhöhte Belastung ist bereits seit 1979 bekannt, damals wurden für stark ($> 500 \mu\text{g}/\text{kg}$ Boden), mittel (50–500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden) und gering ($< 50 \mu\text{g}/\text{kg}$ Boden) belastete Flächen Anbauempfehlungen ausgesprochen. Zwar wurde ein sukzessiver

Rückgang der Belastung bereits seit 1980 beobachtet, da bei Aufwuchsuntersuchungen jedoch wiederholt Überschreitungen der zulässigen Höchstmenge für HCH-Isomere festgestellt wurden, wurde vom HLRL bis Anfang der neunziger Jahre eine Anbau-, Fütterungs- und Produktverwertungsberatung sowie Anbauüberwachung durchgeführt. Die Anbaubeschränkung für den Belastungsbereich $< 50 \mu\text{g}/\text{kg}$ Boden konnten inzwischen aufgehoben werden. Heute erfolgt von der Agrarverwaltung noch eine Fruchtfolgeüberwachung der betroffenen Flächen. Die erläuterten hoch belasteten Oberböden wurden im Jahr 1989 beprobt, jedoch muß an diesen Standorten immer noch von erhöhten Gehalten ausgegangen werden. Dies belegen auch Untersuchungen des Instituts für Pflanzenbau der Universität Giessen, die größtenteils Werte unter $50 \mu\text{g}/\text{kg}$ ergaben, aber auch parzellenweise noch sehr hohe Belastungen bis zu knapp $38 \text{ mg}/\text{kg}$ Boden (Mitteilung des HMULF). Einige

der in der rezenten Rheinaue gelegenen Profile weisen ebenfalls leicht erhöhte β -HCH-Gehalte um die $15 \mu\text{g}/\text{kg}$ auf, jedoch scheint der Rhein als Belastungsquelle nur von geringerer Bedeutung zu sein.

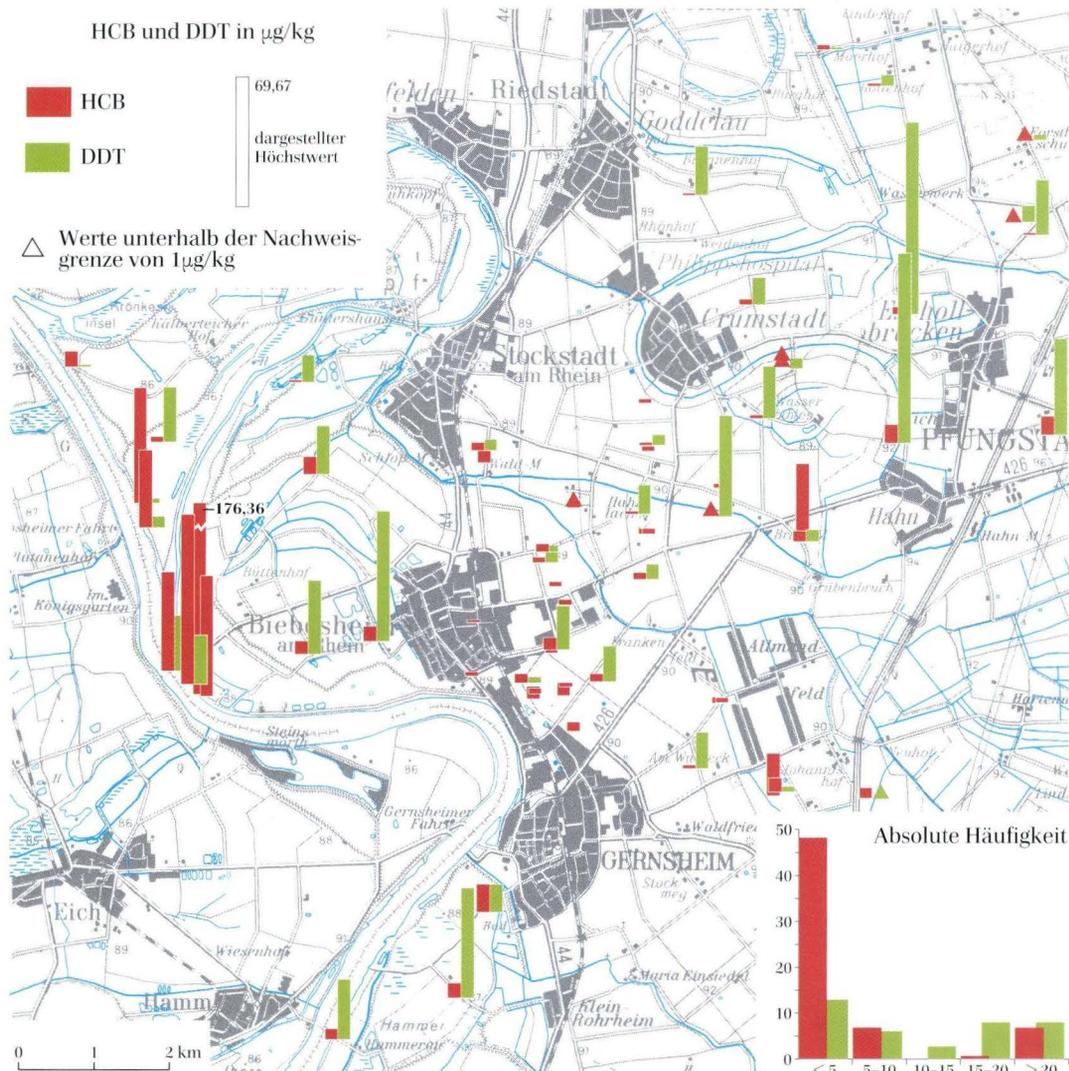
Weder im Rahmen der Orientierungswerte von Eikmann & Kloke (1993) noch der Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV (1999) in Bezug auf landwirtschaftliche Nutzung werden die HCH-Isomere aufgeführt. Joneck & Prinz (1993) geben für Acker- und Grünlandböden im ländlichen Raum und in Verdichtungsräumen Bayerns aufgrund der überwiegenden Werte unterhalb der Nachweisgrenze arithmetische Mittel von $< 1 \mu\text{g}/\text{kg}$ an, Emmerich (1997b) nennt für Ackeroberböden Hessens Hintergrundwerte von $0,5 \mu\text{g}/\text{kg}$ bzw. $1 \mu\text{g}/\text{kg}$ (Median und 90. Perzentil) für γ -HCH. Abgesehen von der erläuterten Belastungsfläche stimmen diese Ergebnisse in der Größenordnung gut mit den hier zusammengestellten Werten überein.



Karte 19. HCH-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

Insgesamt 63 Profile wurden auf **HCB** beprobt und analysiert, 38 von ihnen ebenfalls auf **DDT** (Karte 20). Während DDT trotz des seit 1972 bestehenden Anwendungsverbotes aufgrund der hohen Persistenz mit einer Ausnahme an allen untersuchten Standorten nachweisbar war, wiesen 6 Oberböden einen HCB-Gehalt unterhalb der Nachweisgrenze von 1 µg/kg auf. Im Rahmen der Klassifizierung in 5 Klassen von < 5 bis > 20 µg/kg lag mit 76 % ein Großteil der HCB-Werte und mit 34 % nur ein knappes Drittel der DDT-Werte in der untersten Belastungsklasse. Den folgenden drei Klassen sind in Bezug auf HCB insgesamt 8 und in Bezug auf DDT insgesamt 17 Standorte zuzuordnen. 7 der untersuchten Profile zeigen deutlich erhöhte HCB-Oberbodengehalte > 20 µg/kg, mit Abstand am höchsten belastet ist mit 176,36 µg/kg ein Standort des Meßprogramms organische Schadstoffe (Weidner 1989) in der rezenten Rheinaue in Biebesheim. Auch die übrigen Profile der obersten Gehaltsklasse lie-

gen im aktuellen Überflutungsbereich des Rheins, ausgenommen ein weiterer Standort des Meßprogramms organische Schadstoffe nördlich von Allmendfeld, der mit 28,183 µg/kg belastet ist. Allerdings weist ein direkt benachbartes Profil des HLRL-Untersuchungsprogrammes deutlich geringere Gehalte auf. Insgesamt liegen die HCB-Gehalte der Oberböden auf dem Hochgestade im Mittel um 3,33 µg/kg. Die erhöhten Belastungen sind eindeutig auf fluvialen Eintrag während der Überflutungsphasen zurückzuführen. Hinsichtlich DDT müssen 8 Oberböden in die oberste Belastungsklasse eingeordnet werden. Mit Ausnahme des im Rahmen des Meßprogrammes hessischer Auen in der Hammeraue beprobten Profils (Moldenhauer 1996), welches gleichzeitig einen überraschend niedrigen HCB-Gehalt aufweist, handelt es sich ausschließlich um Standorte des Untersuchungsprogramms der HLRL (HMILFN 1998). Die DDT-Belastung der Profile im rezenten Überflutungsbereich ist



Karte 20. HCB- und DDT-Gehalte der Oberböden in der Region Biebesheim.

nur leicht erhöht, dem Rhein als Schadstoffquelle scheint ein geringer Stellenwert zuzukommen. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass die hohen Belastungen mit der Nutzung korrelieren und auf einen direkten, lokalen Eintrag von Pestiziden zurückzuführen sind, da es sich fast ausschließlich um Ackerstandorte handelt.

Wie schon für HCH existieren für HCB und DDT keine Orientierungswerte nach Eikmann & Kloke (1993) oder Werte hinsichtlich landwirtschaftlicher Nutzung im Rahmen der BBodSchV (1999). Ketterer (1991) gibt für gering belastete Böden einen HCB-Gehalt von 10 µg/kg an. Die Oberböden des Hochgestades liegen mit ihrer mittleren Belastung von 3,33 µg/kg noch deutlich unterhalb dieses Wertes und stimmen sehr gut mit dem Hintergrundwert hessischer Oberböden von 3 µg/kg (Median) überein (Emmerich 1997b). Für DDT geben Joneck & Prinz (1993) für Acker- und Grünlandböden im ländlichen Raum und in Verdichtungsräumen Bayerns arithmetische Mittelwerte zwischen 1 und 17 µg/kg an, Emmerich (1997b) für Oberböden Hessens Hintergrundwerte von 4 bzw. 40 µg/kg für Median und 90. Perzentil. Gemittelt liegen die untersuchten Profile mit rund 10 µg/kg ebenfalls in diesem Bereich, wenn auch wie erläutert einige Oberböden deutlich höher belastet sind.

Insgesamt kann kritisch angemerkt werden, dass die Daten des HLRL-Untersuchungsprogrammes (HMILFN 1998) insbesondere durch niedrige PCB- und hohe DDT-Konzentrationen auffallen. Möglicherweise sind sie deshalb nur bedingt mit den anderen Datenkollektiven vergleichbar.

5.5 Vertikale Verteilung der organischen Schadstoffe ausgewählter Profile

Leider wurden bei dem größten Teil der auf organische Schadstoffe untersuchten Standorte nur die Oberböden beprobt. Der Frage nach der vertikalen Variabilität dieser Schadstoffe und den Nachweistiefen kann deshalb nur anhand der Daten der Bodendauerbeobachtung nachgegangen werden. Aufgrund des hohen analytischen Aufwands wurden allerdings auch diese Profile teilweise nicht durchgehend beprobt, so dass Lücken entstanden.

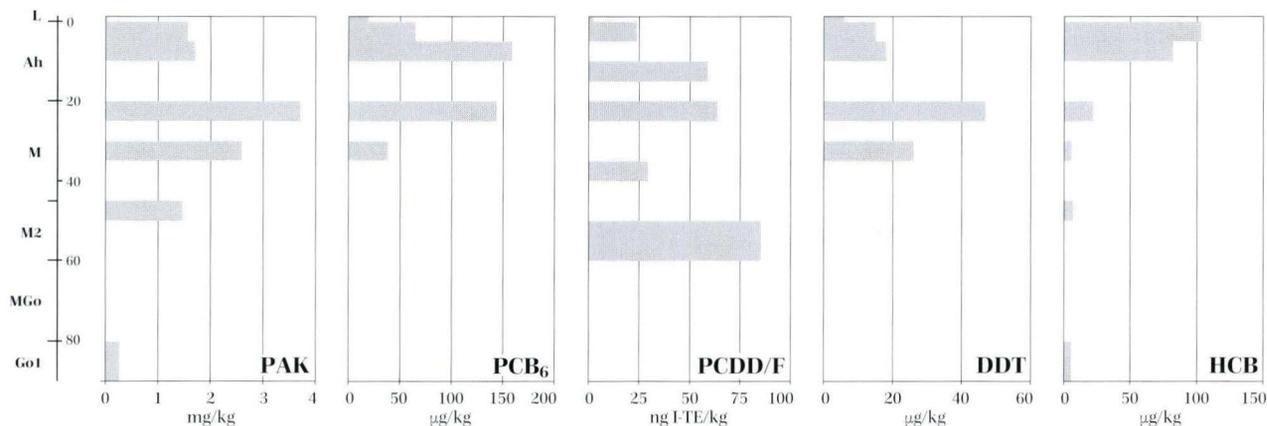
Die Tiefenfunktionen für PAK, PCB₆, PCDD/F, DDT und HCB der **Bodendauerbeobachtungsfläche Biebesheim** in der rezenten Rheinaue werden in Abb. 3d wiedergegeben (Emmerich 1997a, b). PAK und HCB lassen sich bis in den GoI-Horizont in einer Tiefe von 90 cm nachweisen, PCB₆ und DDT nur bis in eine Tiefe von 30–35 cm. Für PCDD/F schließlich kann keine befriedigende Aussage zur Nachweistiefe gemacht werden, da es

nur bis in 50–60 cm Tiefe beprobt wurde und hier noch recht hohe Werte zu finden sind. Aufgrund des sich mit der Tiefe deutlich verschiebenden Verteilungsmuster der Kongeneren muß in diesem Fall unbedingt eine Unterscheidung zwischen der Summe der PCDD/F und den I-TE-Werten getroffen werden. So wird die höchste Gesamtbelastung mit 8222 ng/kg in einer Tiefe von 10–15 cm angetroffen, der höchste I-TE-Wert mit 85,2 ng I-TE/kg jedoch in 50–60 cm Tiefe, da sich das Verteilungsmuster in den tieferen Bodenhorizonten zugunsten höher chlorierter Furane verschiebt (Emmerich 1997a). PAK und DDT zeigen eine maximale Belastung in einer Tiefe von 20–25 cm, während die Gehalte nach oben und unten abnehmen. Auch PCB₆ besitzt eine ähnliche Verteilung, wenn auch die höchste Konzentration bereits in 5–10 cm Tiefe zu finden ist. Nur HCB weist den höchsten Wert in den obersten 5 cm und eine kontinuierliche Abnahme mit der Tiefe auf. Die Gehalte in der Auflage, die den atmosphärischen Eintrag wiedergeben, liegen bei allen Schadstoffen deutlich unter den Konzentrationen im Oberboden, wobei allerdings erneut auf die fehlende Rohdichtekorrektur hingewiesen werden muß. Beprobungen der Hochwassersedimente von 1994 und 1995 zeigen für PCB, PCDD/F und HCB eine abnehmende Belastung (Emmerich 1997b, Moldenhauer 1996). Für PAK und DDT waren in den Proben von 1994 hingegen höhere Konzentrationen zu finden, wobei sich dieser Trend jedoch in den Ablagerungen von 1995 nicht fortsetzte.

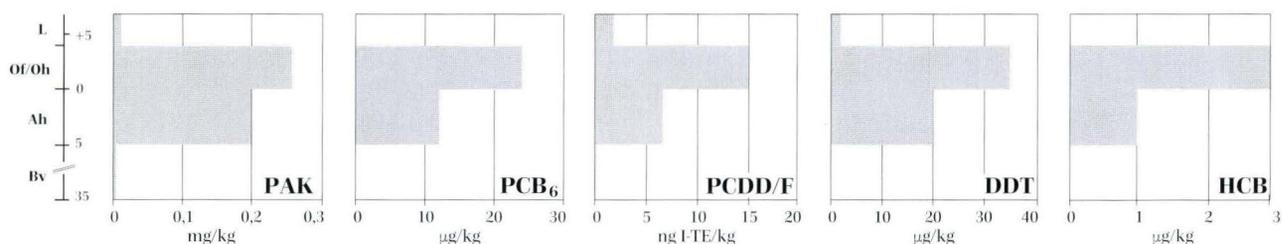
Im Falle der **Bodendauerbeobachtungsfläche Eschollbrücken** wurden Analysen auf organische Schadstoffe bis in eine Tiefe von 35 cm durchgeführt (Abb. 3e). Es zeigt sich für alle untersuchten Elemente eine ähnliche Verteilung mit einem Belastungsmaximum im Of/Oh-Horizont und einer teils um die Hälfte niedrigeren Konzentration im unterlagernden Ah-Horizont. Im Unterboden in einer Tiefe von 5–35 cm sind nur noch PAK und PCDD/F nachweisbar. Wiederum zeigt sich die L-Lage als sehr viel geringer kontaminiert, PCB und HCB konnten hier nicht nachgewiesen werden.

Die vertikale Verteilung von PAK, PCDD/F und HCB im Profil der **Bodendauerbeobachtungsfläche Allmendfeld** wird in Abb. 3f dargestellt. PCB₆ und DDT waren in keiner der untersuchten Proben nachweisbar. Während HCB nur im Oberboden mit 4 µg/kg vorhanden ist, sind für PAK und PCDD/F geringe Gehalte auch bis in 60 cm Tiefe auffindbar. Allerdings umfassen diese nur einen Bruchteil der Konzentrationen im Oberboden. Nur für PCDD/F kann eine möglicherweise durch Bioturbation verursachte Verlagerung in den IISdP-Horizont beobachtet werden, der sich im Falle der Schwermetalle als am höchsten belastet herausstellte.

(d) Biebesheim



(e) Eschollbrücken



(f) Allmendfeld

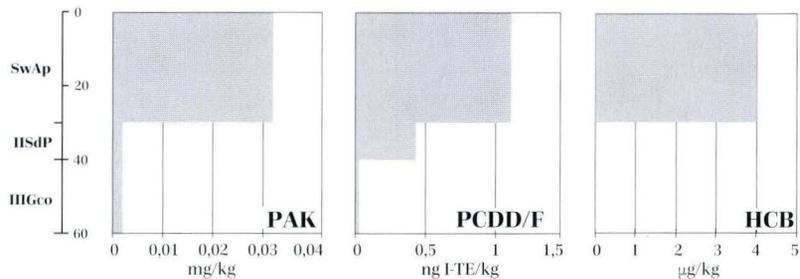


Abb. 3d-f. Tiefenfunktion der Gehalte an organischen Schadstoffen der Bodendauerbeobachtungsflächen Biebesheim, Eschollbrücken und Allmendfeld.

6. Zusammenfassung

Durch die Zusammenführung der diversen Datenkollektive konnte für die Beurteilung der Schwermetallbelastung in der Region Biebesheim mit Ausnahme einzelner Elemente (Sb, Hg) eine solide Datenbasis geschaffen werden. Da das Labor des HLfB einen Großteil der Analysen durchführte, ist der Datensatz trotz der über einen längeren Zeitraum erhobenen Daten relativ homogen. Die für das Untersuchungsgebiet charakteristischen Ausgangssubstrate der Bodenbildung werden durch die beprobten Standorte hinreichend repräsentiert. Die Datenbasis der organischen Schadstoffe dagegen ist beträchtlich kleiner und hinsichtlich der Probennahme

und der Anzahl beteiligter Analyseinstitute deutlich inhomogener.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Belastungssituation in der Region Biebesheim für den überwiegenden Teil der untersuchten Schadstoffe den Hintergrundwerten entspricht. Abgesehen von dem fluvialen Eintrag in die Auensedimente und der bekannten HCH-Belastung lässt sich keine regionale Belastungsquelle lokalisieren. Einzelne Ausreißerwerte sind nur durch einen räumlich begrenzten Eintrag erklärbar, ohne dass eine flächenhafte Belastung zu erkennen ist. Regelmäßige Analysen der Hochflutablagerungen in den Auen

können Aufschluß über die Entwicklung der vom Rhein ausgehenden Belastung geben.

Bei den untersuchten Schwermetallen zeigte sich, dass die räumliche Verteilung der Konzentrationen fast aller Elemente mit den jeweils beprobten Substraten korreliert. Abgesehen von den berechneten Medianwerten der einzelnen Substratgruppen (Tab. 6, Abb. 1) wird dies in den erstellten Karten besonders durch die durchschnittlich geringere Belastung der Profile südlich und südöstlich Biebesheim deutlich, wo die dort verbreiteten Flugsanddecken beprobt wurden. Nur bei Cd und Hg wird der Einfluß der Substrate anhand der Kartendarstellungen nicht sichtbar, was auf die insgesamt niedrigen Gehalte und die gewählten Klassifizierungen zurückgeht. Im Fall von Sb läßt die geringe Anzahl analysierter Profile keine signifikante Auswertung nach Substratgruppen zu. Im Gegensatz zum Substratbezug scheint der Einfluß der jeweiligen Nutzungen eher gering zu sein, wobei für den Nutzungstyp Wald ein nur unzureichendes Datenkollektiv vorliegt. Nur V zeigt unter Acker eine deutlich höhere Belastung, was möglicherweise auf einen Eintrag durch Schlackedünger zurückzuführen ist.

Abgesehen vom Substratbezug fällt bei Betrachtung der räumlichen Verteilung der Schwermetallkonzentrationen die erhöhte Belastung der rezenten Rheinaue ins Auge. Besonders prägnant kann ein fluvialer Eintrag im Fall der Elemente Cd, Cr, Cu, Zn und Pb identifiziert werden. Hingegen spielt der Eintrag von As, Ni, Sb, V, Hg und Co in die Auensedimente offenbar eine geringere Rolle oder kann nicht signifikant belegt werden, da nur wenige Profile im rezenten Überflutungsbereich auf V, Sb, Hg und Co untersucht wurden. Für die Elemente Cd, Cr, Cu, Zn und Pb deuten die geringeren Gehalte in den obersten im Vergleich zu tiefer liegenden Horizonten auf zurückgehende Einträge in die rezente Aue hin. Das Gegenteil ist bei V der Fall, hier sind die jüngsten Hochflutablagerungen höher belastet als die unterlagernden Horizonte (Abb. 3).

Im Vergleich zu den Hintergrundwerten der Oberböden Hessens (LABO 1995, 1998) liegen die untersuchten Profile der Region Biebesheim meist in der gleichen Größenordnung oder sind geringer belastet. Eine offensichtlich höhere Belastung ist nur für Cr, für die As-Werte der Auenlehme und für die Ni-Werte der Hochflutlehme zu erkennen (Abb. 1). Eine deutliche Überschreitung der angeführten Orientierungs- und Vorsorgewerte nach

Eikmann & Kloke (1993) sowie der BBodSchV (1999) ist bei Cd und Cr für die Profile in der Aue, sowie bei V für viele Profile auf dem Hochgestade zu beobachten, wobei die erhöhten Cr- und V-Gehalte vor dem Hintergrund möglicherweise zu hoch angesetzter Orientierungswerte kritisch betrachtet werden sollten.

Bei einem Großteil der zusammengeführten Daten organischer Schadstoffe ist neben der ubiquitären Hintergrundbelastung der fluviale Schadstoffeintrag durch den Rhein im rezenten Überflutungsbereich die wichtigste Belastungsquelle. Ausnahmen bilden nur die HCH-Isomere, die abgesehen von der bekannten Belastungsfläche nur in geringen Spuren nachweisbar sind, sowie das Pestizid DDT, welches durch direkte Ausbringung auf mehreren der beprobten landwirtschaftlich genutzten Flächen angereichert ist, während die Standorte im rezenten Überflutungsbereich geringer belastet sind. Dagegen sind insbesondere die PAK-, PCB- und HCB-Gehalte an den Standorten in der rezenten Aue stark erhöht, während sie bei den übrigen Profilen im Bereich der Hintergrundbelastung liegen. Gleiches gilt auch für die Oberbodenbelastung mit PCDD/F, wobei hier zusätzlich erhöhte Konzentrationen infolge der HCH-Verwehungen im Umfeld der genannten Belastungsfläche zu beobachten sind. Die Tiefenfunktionen der analysierten organischen Schadstoffe konnten nur exemplarisch anhand der Profile der Bodendauerbeobachtung untersucht werden. Mit Ausnahme des Profils der Bodendauerbeobachtungsfläche Biebesheim wurden PCB, DDT und HCB nur in den Oberböden angetroffen. Dagegen waren PAK und PCDD/F in geringen Mengen auch in den Unterböden nachweisbar.

Im Hinblick auf die herangezogenen Orientierungs- und Vorsorgewerte werden die in der BBodSchV (1999) aufgeführten Gehalte für PAK und PCB₆ geringfügig überschritten. Kritisch sind die PCDD/F-Gehalte zu bewerten, die die deutlichsten Überschreitungen aufweisen. Die in der rezenten Aue und im Bereich der HCH-Belastungsfläche gelegenen Profile übertreffen zum Teil deutlich den BW I von Eikmann & Kloke (1993). Auch die Grenzwerte der BLAG Dioxine (1992), aus denen sich Prüfaufträge und Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Nutzung ableiten, werden erreicht. Insgesamt bleibt die Beurteilung der untersuchten organischen Schadstoffe allerdings problematisch, da in vielen Fällen sowohl Mobilität als auch Abbau im Boden nicht ausreichend geklärt sind.

7. Schriftenverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Bodenkunde (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 4. Auflage: 392 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Arbeitsgruppe Bodenkunde (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 3. Auflage: 331 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Bachmann, G.; Bannick, C.-G.; Giese, E.; Glante, F.; Kiene, A.; Konietzka, R.; Rück, F.; Schmidt, S.; Terytze, K. & Borries, D. von (1997): Fachliche Eckpunkte zur Ableitung von Bodenwerten im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes. – In: D. Rosenkranz, G. Bachmann, G. Einsele & H.-M. Harres (Hg.): Bodenschutz. 24. Lfg. IX/97, Kennz. 3500: 1–121; Berlin (Erich Schmidt).
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz) vom 17.3.1998, BGBl. I, S. 502.
- BBodSchV (1999): Inhalte einer Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, BBodSchV) vom 12.7.1999., BGBl. I, S. 1554.
- BLAG (Bund/Länder-Arbeitsgruppe Dioxine) (1992): Umweltpolitik – Eine Information des Bundesumweltministers. Rechtsnormen, Richtwerte, Handlungsempfehlungen, Mefprogramme, Mefwerte und Forschungsprogramme. – Bonn.
- Brümmer, G. (1989): Schadstoffe. – In: F. Scheffer & P. Schachtschabel (Hg.): Lehrbuch der Bodenkunde: 268–278.; Stuttgart (Enke).
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (1991): Schwermetalle und Fluor in Mineraldüngern. – Schriftenreihe Umwelt, **162**; Bern.
- Dehner, U. (1994): Das Verteilungsmuster von Schwermetallen in der Rheinaue des Hessischen Rieds. – Geol. Jb. Hessen, **122**: 159–171; Wiesbaden.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (1988): Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen. Teil 1: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, **212**; Hamburg – Berlin.
- Eikmann, T. & Kloke, A. (1993): Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden. – In: D. Rosenkranz, G. Einsele & H.-M. Harres (Hg.): Bodenschutz. 14. Lfg. X/93, Kennz. 3590: 1–26; Berlin (Erich Schmidt).
- Emmerich, K.-H. (1997a): Dioxine und Furane in hessischen Böden. Erste Ergebnisse auf hessischen Boden-Dauerbeobachtungsflächen. – Unveröff. Gutachten, Archiv Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Emmerich, K.-H. (1997b): Organische Schadstoffe (CKW, PCB, PAK) in hessischen Böden. Erste Ergebnisse von Untersuchungen auf hessischen Boden-Dauerbeobachtungsflächen. – Unveröff. Gutachten, Archiv Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Emmerich, K.-H. (1997c): Hessisches Landesamt für Bodenforschung, freundl. pers. Mitteilung. – Wiesbaden.
- Ender, R. (1986): Schwermetallbilanzen von Lysimeterböden – am Beispiel der Elemente Vanadium, Chrom, Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Cadmium und Blei. – Marb. Geogr. Schriften, **102**; Marburg.
- EPA (Environmental Protection Agency of the United States of America) (1984): Methode 610. – Part VIII, Vol. 49, No. 209.
- Golwer, A. (1989): Geogene Gehalte ausgewählter Schwermetalle in mineralischen Böden Hessens. – Wasser und Boden, **5**: 310–311; Berlin.
- Hagemeister, A. & Domrös, M. (1995): Aufbau des digitalen Bodenzustandskatasters am Beispiel der TK 25, Blatt 6216 Gernsheim. – Geographisches Institut der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (unveröff.).
- Harms, U. & Brümmer, G. (1984): Einflußgrößen der Schwermetalllöslichkeit und -bindung in Böden. – Z. Pflanzenernähr. Bodenkde., **147**: 400–424; Weinheim.
- HLfB (Hessische Landesamt für Bodenforschung) (1998): Böden im Wandel – Dauerbeobachtung von Böden in Hessen. – Geologie in Hessen, **2**; Wiesbaden.
- HLRL (Hessisches Landesamt für Regionalentwicklung und Landwirtschaft) (1991): Bericht über die Schwermetalluntersuchungen im Raum Biebesheim von 1982–1991 (unveröff.). – Kassel.
- HLfU (Hessische Landesanstalt für Umwelt) (Hrsg.) (1991): Dioxine und Furane in der Hessischen Umwelt – Meßergebnisse aus Hessen. – Schriftenreihe Umweltpflege, Arbeits- und Umweltschutz, **126**; Wiesbaden.
- HLfU (Hessische Landesanstalt für Umwelt) (Hrsg.) (1996): Ökosystemares Biomonitoring-Programm in der Region Biebesheim 1992–1994. – Schriftenreihe Umweltpflege, Arbeits- und Umweltschutz, **193**; Wiesbaden.
- HLfU (Hessische Landesanstalt für Umwelt) (Hrsg.) (1997): Orientierende Messungen gefährlicher Stoffe. Landesweite Untersuchungen auf organische Spurenverunreinigungen in hessischen Fließgewässern, Abwässern und Klärschlämmen 1991–1996. – Schriftenreihe Umweltpflege, Arbeits- und Umweltschutz, **233**; Wiesbaden.
- HMILFN (Hessisches Ministerium des Inneren und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz) (Hrsg.) (1998): Ökologie-Forum Hessen. Biomonitoring in der Region Biebesheim (Teil B) – Untersuchungsergebnisse zur Belastungssituation von Böden, Aufwuchs und Kuhmilch. – Natur in Hessen; Wiesbaden.
- HMUEJFG (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit) (Hrsg.) (1995): Luftreinhalteplan Wetzlar, 1. Fortschreibung. – Wiesbaden.
- Hoppe, A.; Kött, A.; Mittelbach, G. & Ulmer, D. (1996): Ein Raumbild quartärer Grundwasserleiter und Grundwassernichtleiter im nördlichen Oberheingraben. – Geol. Jb. Hessen, **124**: 149–158; Wiesbaden.
- Joneck, M. & Prinz, R. (1993): Inventur organischer Schadstoffe in Böden Bayerns. – GLA Fachberichte, **9**; München.
- Joneck, M. & Prinz, R. (1994): Hintergrundbelastung bayerischer Böden mit organischen Problemstoffen. – GLA Fachberichte, **12**; München.
- Joneck, M. & Prinz, R. (1995): Nutzungs- und raumspezifische Hintergrundgehalte organischer Schadstoffe in Böden. – Wasser und Boden, **11**: 28–42; Berlin.
- Keller, T. & Desaulles, A. (1997): Vanadium in Böden der Schweiz. – Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, **22**; Zürich-Reckenholz.
- Ketterer, S. (1991): Polychlorierte Biphenyle und ausgewählte chlororganische Pestizide in Böden. – Heidelberger geowiss. Abh., **42**; Heidelberg.
- Kuntze, H.; Fleige, H.; Hindel, R.; Wippermann, T.; Filipinski, M.; Grube, M. & Pluquet, E. (1991): Empfindlichkeit der Böden gegenüber geogenen und anthropogenen Gehalten an Schwermetallen – Empfehlung für die Praxis. – In: D. Rosenkranz, G. Einsele & H.-M. Harres (Hg.): Bodenschutz. 8. Lfg. VI/91, Kennz. 1530: 1–86; Berlin (Erich Schmidt).
- Kupfahl, H.-G. (1972): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000 Blatt Zwingenberg. – Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- LABO (Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (1995): Hintergrund- und Referenzwerte für Böden. – In: D. Rosenkranz, G. Bachmann, G. Einsele & H.-M. Harres (Hg.): Bodenschutz. 18. Lfg. V/95, Kennz. 9006: 1–123; Berlin (Erich Schmidt).
- LABO (Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (1998): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. – In: D. Rosenkranz, G. Bachmann, G. Einsele & H.-M. Harres (Hg.): Bodenschutz. 28. Lfg. XII/98, Kennz. 9006: 1–115; Berlin (Erich Schmidt).
- Mahro, B. & Kästner, M. (1993): PAK-Altlasten – Bewertung der mikrobiellen Sanierung. – Spektrum der Wissenschaften, **10/93**: 97–100; Heidelberg.

- Moldenhauer, K.-M. (1996): Schwermetalle und organische Schadstoffe in Hochwassersedimenten und Böden hessischer Auen. - Geol. Jb. Hessen, **124**: 191-214; Wiesbaden.
- NATO/CCMS (1988): International Toxicity Equivalency Factor (I-TEF) - Method of Risk Assessment for Complex Mixtures of Dioxins and Related Compounds. - Pilot Study on International Information Exchange on Dioxins and Related Compound; Report Number, **176**.
- Pflug, R. (1982): Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens. - Erträge der Forschung, **184**: 145 S.; Darmstadt (WBG).
- Rosenberger, W.; Weidner, E.; Friederich, K. & Hottenrott, M. (1996): Geologische Karte 1:25 000, Blatt 6216 Gernsheim. - Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Rosenberger, W. & Sabel, K.-J. (1997a): Bodenkarte von Hessen 1:50 000, Blatt L6116 Darmstadt West. - Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Rosenberger, W. & Sabel, K.-J. (1997b): Bodenkarte von Hessen 1:50 000, Blatt L6316 Worms. - Hess. Landesamt für Bodenforschung; Wiesbaden.
- Ruppert, H. (1990): Natürliche Spurenelementgehalte im Boden und ihre anthropogene Überprägung. - Mitt. Österreichische Geol. Gesell., **83**: 243-265; Wien.
- Ruppert, H. (1987): Natürliche Grundgehalte und anthropogene Anreicherung von Schwermetallen in Böden Bayerns. - GLA-Fachberichte, **2**; München.
- Sachs, L. (1992): Angewandte Statistik. - 7. Aufl.: 846 S.; Berlin - Heidelberg - New York (Springer).
- Scharpff, H. J. (1977): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25 000 Blatt Worms. - Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Tebaay, R. H.; Welp, G. & Brümmer, G.W. (1993): Gehalte an Polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und deren Verteilungsmuster in unterschiedlich belasteten Böden. - Z. Pflanzenernähr. Bodenkde., **156**: 1-10; Weinheim.
- Thiemeyer, H. (1989a): Schwermetallgehalte von typischen Böden einer Toposequenz im Hessischen Ried. - Geoökodynamik, **10**: 47-63; Bensheim.
- Thiemeyer, H. (1989b): Aufbau und Eigenschaften typischer Böden im Hessischen Ried. - Geol. Jb. Hessen, **117**: 217-236; Wiesbaden.
- Umweltbundesamt (1985): Sachstand Dioxine. - UBA-Berichte, **5/85**; Berlin.
- Weidner, E. (1989): Umweltbelastung mit gefährlichen Stoffen, insbesondere Dibenzodioxine und Dibenzofurane. - Unveröff. Gutachten, Archiv Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Weidner, E. (1992a): Gutachten über die Schwermetallbelastung der Böden in der Umgebung der Sonderabfall-Verbrennungsanlage Biebesheim, Landkreis Groß-Gerau. - Unveröff. Gutachten, Archiv Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Weidner, E. (1992b): Filtervermögen für Schwermetalle - Abgeleitet aus der Bodenkarte der nördlichen Oberrheinebene 1:50 000. - Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Weidner, E. (1998): Gutachten über die Schwermetallbelastung der Böden in der Umgebung der SVA Biebesheim (Nahbereich), Landkreis Groß-Gerau. - Unveröff. Gutachten, Archiv Hess. Landesamt f. Bodenforschung; Wiesbaden.
- Young, A.L. (1983): Long term studies on the persistence and movement of TCDD on a national ecosystem. - In: A. Tucke (Hg.): Human and environmental risks of chlorinated dioxins and related compounds; New York (Plenum Publishing Corporation).

Manuskript eingegangen und angenommen am 1.9.1999

Arthur Golwer*

Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit durch Straßenverkehr in Wasserschutzgebieten

Kurzfassung

Die von Straßen ausgehenden Emissionen erhöhen im Grundwasser nicht nur die Konzentrationen mehrerer anorganischer Hauptbestandteile und organischer Substanzen, sondern auch die Konzentrationen zahlreicher anorganischer Spurenstoffe. Der Einfluss der Straßen auf die Grundwasserbeschaffenheit

hängt wesentlich von der Schutzwirkung des Untergrundes und von der Verkehrsmenge ab und ist besonders am Chloridanteil des Grundwassers erkennbar. Das breitflächige Versickern der Straßenabflüsse durch bewachsene Böden in Gebieten mit großer Schutzwirkung des Untergrundes und bei Straßen mit einem

durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) unter 2000 Kfz ist in der Engeren Schutzzone (Zone II) von Wassergewinnungsanlagen in den meisten Fällen und bei Straßen mit einem DTV von 2000-15000 Kfz in Einzelfällen tolerierbar.

Abstract

The emissions, which come off the streets, increased in the groundwater not only the concentration of several inorganic main substances and organic substances, but also the concentration of many inorganic trace elements. The influence of the streets on the groundwater quality is

basically depending on the protective effect of the underground and on the amount of traffic and is to be noticed at the concentration of chloride in the groundwater. The wide infiltration of the street runoff on the overgrown soil in the Near Protective Zone (Zone II) of water works is

in most cases to be tolerated in areas with large protective effect of the underground and on streets with an average daily road traffic (DTV) of less than 2000 motor vehicles and also, in particular cases, on streets with DTV of 2000-15000 motor vehicles.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	132
2. Belastungspotential von Straßen	132
3. Straßen in Wasserschutzgebieten	133
3.1 Hochtaunus	134
3.2 Untermaingebiet	139
3.2.1 Versickerung im Straßenrandbereich	140
3.2.2 Versickerbecken	140
4. Schlussfolgerungen	144
5. Schriftenverzeichnis	146

* Prof. Dr. A. Golwer, Dresdener Ring 39, 65191 Wiesbaden.

1. Einleitung

Von Straßen gehen Emissionen aus, die über den Luftpfad ständig und über den Wasserpfad zeitweilig zur Belastung von Böden und oberirdischen Gewässern beitragen und von dort verbreitet auch das Grundwasser erreichen. Über das Ausmaß dieser Belastungen mit zahlreichen anorganischen und organischen Stoffen und die Möglichkeiten sie zu mindern, sind in den vergangenen drei Jahrzehnten viele, an einigen Stellen auch langjährige Untersuchungen an Straßen und ihren Entwässerungseinrichtungen durchgeführt worden (Zusammenstellung der Literatur bis etwa 1993 in Lange & Moog 1995). Diese Untersuchungsergebnisse ermöglichen eine relativ gute Abschätzung des Gefährdungspo-

tentials. Angaben über die in Wassergewinnungsanlagen tatsächlich aufgetretenen Beeinflussungen der Grundwasserbeschaffenheit durch den Straßenverkehr sind dagegen nur von wenigen Stellen bekannt. In der vorliegenden Arbeit werden Erfahrungen mit dem Versickern von Straßenabflüssen in Wasserschutzgebieten mitgeteilt, die sich vor allem auf Rohwasseranalysen von Brunnen stützen, die in geologisch unterschiedlich aufgebauten Gebieten Hessens und an unterschiedlich stark befahrenen Straßen liegen. Außerdem wird zu einigen straßenbezogenen Angaben in der Literatur kritisch Stellung genommen.

2. Belastungspotential von Straßen

Die auf Straßen anfallenden Stoffe stammen überwiegend vom Kraftfahrzeugverkehr und den Baustoffen der Straßen sowie zeitweilig vom Streugut, von Unfällen und vom Umfeld der Straßen. Auf dem Wege von der Erdoberfläche zum Grundwasser und im Grundwasserraum unterliegen die straßenspezifischen Stoffe den natürlichen Rückhalte-, Umwandlungs- und Verdünnungsvorgängen des Untergrundes. Die Schutzwirkung dieser Vorgänge für das Grundwasser ist seit vielen Jahren bekannt. Das Nichtzitieren der älteren Literatur, z.T. weil sie im Internet nicht verfügbar ist, erweckt häufig den Eindruck von Neuerkenntnissen. Auch durch neuere Untersuchungen wird immer wieder bestätigt, dass in der Regel nur gelöste Stoffe das Grundwasser erreichen. Partikuläre Stoffe des Straßenabflusses, z.B. Ton, Gummiabrieb, und an ihnen sorbierte Substanzen, z.B. polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), werden dagegen durch die mechanische Filterwirkung des Bodens und durch Sorption in den oberflächennahen Schichten zurückgehalten. Diese Rückhaltung ist besonders wirkungsvoll an bewachsenen Seitenstreifen, Mulden und Böschungen und führt zur Anreicherung straßenspezifischer Substanzen in Böden und in Sedimenten von Entwässerungsanlagen (Golwer & Zereini 1998).

Von allen straßenspezifischen Stoffen belasten die Chloridionen das Grundwasser am stärksten und reichen im Grundwasserunterstrom am weitesten, weil Chloride leicht löslich sind und während der Untergrundpassage wenig zurückgehalten und nicht umgewandelt werden. Das Chlorid ist daher in Gebieten mit winterlichen Einsätzen von Tausalzen für das Grundwasser eine straßenspezifische Leitsubstanz. Die durch Tausalze verursachten Chloriderhöhungen im Grundwasser

können in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten einige mg/l bis etwa 3 000 mg/l erreichen. Die Chloridkonzentrationen des Sickerwassers und des Grundwassers zeigen im Versickerungsbereich der Straßenabflüsse einen jahreszeitlichen Gang (Golwer 1973, Brod 1979), der bei geringer oder sehr gut durchlässiger Grundwasserüberdeckung durch erhöhte Werte im Februar, März und April und geringe Werte im Oktober und November gekennzeichnet ist. Mit zunehmender Grundwasserüberdeckung oder abnehmender Durchlässigkeit verschieben sich die Maxima und Minima im Grundwasser des Versickerungsbereiches der Straßenabflüsse um mehrere Monate und flachen ab, weil im Sickerraum die verschieden großen Hohlräume unterschiedlich rasch durchströmt werden.

Das vom Tausalz stammende Natrium kann im Grundwasser auch zeitweilig erhöht sein. Im Gegensatz zu den Chloridionen erfolgt bei den Natriumionen auf dem Wege zum Grundwasser vor allem in den oberflächennahen Schichten ein Kationenaustausch (Na gegen Ca und Mg), der die Calcium- und Magnesiumwerte auch zeitweilig erhöht.

Neben den Chlorid-, Natrium-, Calcium- und Magnesiumwerten sowie der Gesamthärte und der elektrischen Leitfähigkeit können im Grundwasser der gelöste organisch gebundene Kohlenstoff (DOC) sowie als Folge von Stoffumwandlungen und Sekundärreaktionen auch die Konzentrationen von Ammonium, Eisen, Mangan und Hydrogencarbonat erhöht sein. Erhöhte Nitrat- und Sulfatwerte sind dagegen nicht typisch für Straßenabflüsse, sondern deuten auf andere anthropogene Belastungsherde hin, z. B. auf saure Niederschläge oder Düngung. Im Versickerungsbereich der Abflüsse von sehr stark befahrenen Straßen kann das Grundwasser im Vergleich

zum Oberstrom zeitweilig erhöhte Konzentrationen an Bor sowie an Mineralölkohlenwasserstoffen, anionaktiven Tensiden und Phenolen und im Spurenbereich auch andere straßenspezifische, organische Substanzen enthalten. Von zahlreichen aus Kraftstoffen, Ölen und Fetten stammenden organischen Substanzen wird Methyltertiärbuthylether (MTBE), das dem Benzin zugesetzt wird, um die Oktanzahl zu erhöhen, als gut wasserlöslicher, aber schwer abbaubarer Belastungsstoff für das Grundwasser beschrieben (Schirmer 1999). Von den umweltrelevanten straßenverkehrsspezifischen Schwermetallen Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink erreichen in der Regel nur an sehr stark befahrenen Straßen Zink, Nickel und Kupfer in erhöhten Konzentrationen das Grundwasser.

Die Menge und die Art der straßenspezifischen Stoffe hängen wesentlich von der Verkehrsmenge(-stärke) ab. Aus diesen Gründen ist der durchschnittliche tägliche

Verkehr (DTV) ein geeignetes Kriterium zur Einteilung der Straßen in drei Gruppen mit unterschiedlicher Belastung der Umwelt. Nach langjährigen Erfahrungen geht von Straßen mit einem DTV unter 2000 Kfz ein geringes, mit einem DTV von 2000–15000 Kfz ein mittleres und mit einem DTV über 15000 Kfz ein großes belastendes Stoffpotential aus (Golwer 1973, 1991), wobei die Stoffe aber nur zum Teil auch das Grundwasser erreichen. Zu den wenig befahrenen Straßen (DTV < 2000 Kfz) gehören 74 % der Kreisstraßen (Zählung 1990), 32,6 % der Landesstraßen (1995) und in Ortschaften die meisten Anliegerstraßen, zu den Straßen mit mittlerer Verkehrsmenge (DTV 2000–15000 Kfz) rd. 66 % der Landesstraßen (1995), rd. 85 % der Bundesstraßen (1995) und von den Ortsstraßen die meisten Nebenstraßen, zu den Straßen mit hoher Verkehrsmenge (DTV > 15000 Kfz) rd. 13 % der Bundesstraßen (1995), rd. 93 % der Bundesautobahnen (1995) und in Städten viele Hauptstraßen.

3. Straßen in Wasserschutzgebieten

In Hessen verlaufen lange Straßenabschnitte in festgesetzten oder beantragten Wasserschutzgebieten von Wassergewinnungsanlagen und Heilquellen (Tab. 1).

Seit 1989 ist die Länge der Straßen kaum gestiegen, die Länge der in Wasserschutzgebieten verlaufenden Straßen hat dagegen durch Abgrenzung und Festsetzung von Wasserschutzgebieten zugenommen. Außerdem liegen in Wasserschutzgebieten auch Gemeindestraßen.

Der Abfluss der Straßen des überörtlichen Verkehrs fließt in den meisten Fällen auch in den Zonen II und III von Wasserschutzgebieten ungesammelt über bewachsene Seitenstreifen und versickert in Seitenmulden oder an Böschungen. Bei hohen Böschungen erreichen geringe Abflüsse meistens nicht den Böschungsfuß. An mehreren Stellen werden die Abflüsse gesammelt und in Versickerbecken oder in oberirdische Gewässer und vereinzelt in aufgedecktes Grundwasser eingeleitet. An einigen Stellen erfolgt das Versickern des in der Zone II gesammelten Straßenabflusses außerhalb dieser Zone.

Zur Erhaltung der Verkehrssicherheit werden in Deutschland seit dem Winter 1959/60 auf Straßen in größerem Umfang Tausalze gestreut, vorwiegend Natriumchlorid (NaCl), untergeordnet Calciumchlorid (CaCl₂) und Magnesiumchlorid (MgCl₂). Der Tausalzverbrauch variiert in Abhängigkeit von der Winterintensität erheblich, in Hessen auf Straßen des überörtlichen Verkehrs in den Wintern seit 1977/78 zwischen 163 447 t (1980/81) und 35 621 t (1989/90) mit einem 22-jährigen Mittel von 91088 t (Abb. 1). Auf Gemeindestraßen wird insgesamt weniger gestreut, wobei der größte Teil vom Tausalz in Abwasserkanäle gelangt und daher die oberirdischen Gewässer mehr belastet als das Grundwasser. Der Tausalzverbrauch hängt auch von der Höhenlage, der Klasse und der Verkehrsbedeutung der Straßen ab sowie von der Art der Winterglätte. Bei Winterglätte wird empfohlen, 5 g/m² (präventiv auf trockenen Fahrbahnen) bis 40 g/m² (bei Glatteis, Schneefall, Schneeglätte und nach Eisregen) Feuchtsalz zu streuen (Knoll 1999). Die unter-

Tab. 1. Länge der Straßen des überörtlichen Verkehrs in Wasserschutzgebieten von Hessen (Angaben des Hessischen Landesamtes für Straßen- und Verkehrswesen)

Straßenklassen	Gesamtlänge (1.1.1999)		Länge in Wasserschutzgebieten (1989)	
	Abschnitte [km]	Abschnitte+F* [km]	Zonen I + II [km]	Zone III [km]
Bundesautobahnen	956	1617	16	155
Bundesstraßen	3 121	3 403	83	685
Landesstraßen	7 192	7 231	170	1 443
Kreisstraßen	4 671	4 683	132	1 047
Summe	15 940	16 934	401	3 330

*Abschnitte mit Fahrbahnästen

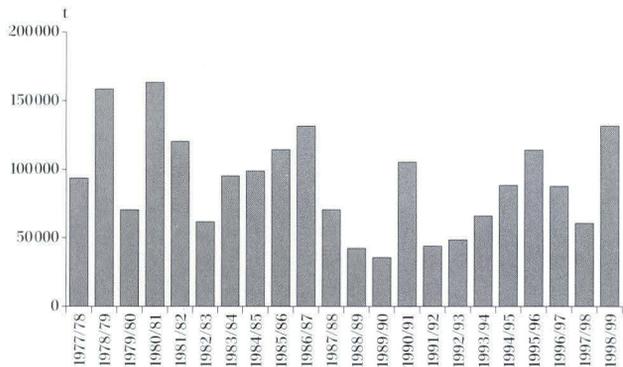


Abb. 1. Tausalzverbrauch auf Straßen des überörtlichen Verkehrs in Hessen (Angaben des Hessischen Landesamtes für Straßen- und Verkehrswesen).

schiedliche Verteilung der Tausalzmengen in den einzelnen Wintern und Höhenlagen ist für die Interpretation von Chloridkonzentrationen in Gewässern und den Einfluss auf die Vegetation (Gischtkontaktschäden, Schäden durch Bodenversalzung) in einem bis zu rd. 10 m breiten Randbereich von Straßen (Giesa & Gumprecht 1990) von großer Bedeutung.

Die Grenzen der Zonen II und III folgen meistens Grundstücksgrenzen, Wegen, Straßen oder markanten Geländestrukturen. Aus diesen Gründen werden Straßen örtlich als Grenze der Zone II gewählt, auch wenn sie nicht mit der 50-Tage-Linie (DVGW 1995) zusammenfallen.

3.1 Hochtaunus

Im Hochtaunus werden aufgrund der Höhenlage (500–879 m ü. NN) in den Wintermonaten auf Straßen häufiger, intensiver und daher insgesamt etwa dreimal mehr Tausalze gestreut als im Untermaingebiet¹. Aus diesen Gründen ist vor allem das Waldgebiet um den Großen Feldberg für Angaben über die Belastung des Grundwassers mit Chloriden besonders geeignet. Natürliche Salzwasseraufstiege, die Düngung und Abfallablagerungen spielen hier als Chloridquelle keine, die Abwasserversickerung nur lokal eine geringe Rolle.

Der Hochtaunus besteht aus unterdevonischen Ton-schiefern (Bunte Schiefer und Singhofener Schichten), Quarziten (Taunusquarzit) und quarzitischen Sandstei-

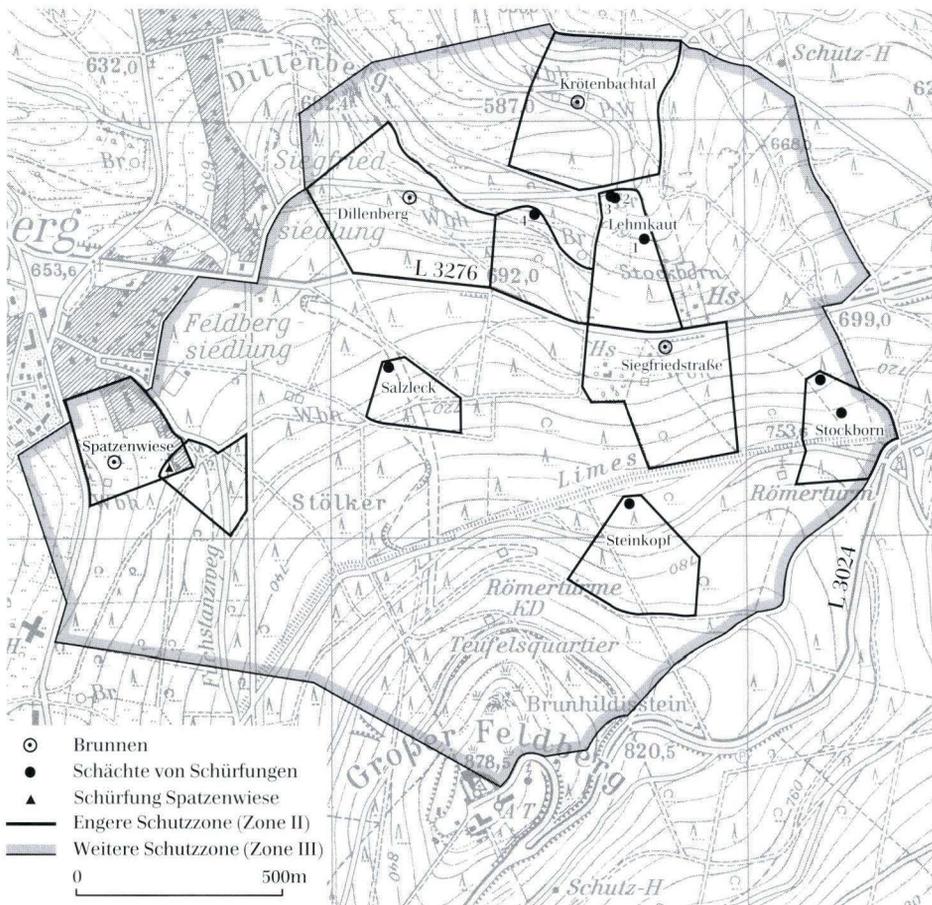


Abb. 2. Wassergewinnungsanlagen im Hochtaunus am Großen Feldberg.

¹ Für diese Abgaben und wertvolle Unterlagen dankt der Verfasser Herrn BD P. Feyerherd, Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, Wiesbaden.

nen (Hermeskeil-Schichten). Durch diese pufferungsarmen Kluftgrundwasserleiter und die darüber auftretenden, weitgehend carbonatfreien Böden (Fickel 1977) sind in Verbindung mit sauren Niederschlägen günstige geochemische Voraussetzungen entstanden, die an der Erdoberfläche abgelagerten Schwermetalle anthropogener Herkunft zu mobilisieren und bis zum Grundwasser zu transportieren. Daher ist der Hochtaunus auch für Angaben über die Beeinflussung des Grundwassers durch straßenspezifische Schwermetalle ein günstiges Untersuchungsgebiet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Hochtaunus bei Königstein i. Ts. in den Jahren 1985–1997 der pH-Wert des Freilandniederschlags von 4,13 auf 4,74 und im Bestandesniederschlag der Fichte von 3,51 auf 4,22 gestiegen ist und der atmogene Eintrag von gelöstem und säuremobilisierbarem Cadmium, Blei und Zink deutlich abgenommen hat (Balázs 1998).

Das Feldberggebiet ist von mehreren, nur örtlich gut wasserwegsamem Kluft- und Störungszonen durchzogen. Die Festgesteine sind verbreitet von unterschiedlich mächtigem quartärem Hangschutt bedeckt. Die Wassergewinnung um den Großen Feldberg erfolgt in Festgesteinen aus Brunnen und Stollen und im Hangschutt aus Schürfungen. Für alle Wassergewinnungsanlagen wurden Trinkwasserschutzgebiete vorgeschlagen oder festgesetzt, in deren Zonen III und II örtlich wenig befahrene Landesstraßen verlaufen (Abb. 2).

Im bewaldeten Hochtaunus lassen sich nach den Chloridkonzentrationen Grundwässer aus Einzugsgebieten ohne Straßen (Cl-Mittel < 10 mg/l) von denen mit Straßen (Cl-Mittel > 10 mg/l, Cl-Max. < 50 mg/l) deutlich unterscheiden (Tab. 2).

Die Chloride der Grundwässer aus Einzugsgebieten ohne Straßen stammen im bewaldeten Hochtaunus

Tab. 2. Chloridkonzentrationen des Grundwassers von ausgewählten Brunnen, Stollen und Schürfungen im Hochtaunus²

Wassergewinnungsanlagen (Baujahr, Tiefe oder Länge der Anlage)	Analysen		Chlorid [mg/l]			Grundwasserleiter
	Anzahl	Zeit	Max.	Min.	Mittel	
Einzugsgebiet ohne Straßen						
Glashütten, Brunnen 2 (1971, 153 m)	18	1980–1999	8*	< 1**	3,4	Q, S, T
Schmitten-Seelenberg						
Brunnen 1 (1961, 130 m)	15	1982–1998	8	1	4,9	T
Brunnen 2 (1972, 105 m)	17	1982–1998	6	< 1**	3,4	T, S, Q
Schmitten-Oberreifenberg						
Schürfung Steinkopf (1911/82)	16	1982–1998	13	3,5	6,0	T, Hangschutt
Schürfung Stockborn (?/1982)	16	1982–1998	12	3	4,8	Hangschutt
Oberursel (Ts.)						
Brunnen II (1967, 72 m)	15	1966–1999	10	3,7	5,8	S, T
Brunnen V (1972, 103 m)	11	1974–1998	9,5	6,1	7,5	Q
Einzugsgebiet mit Straßen						
						WS-Zone
Glashütten						
Brunnen 1 (1961, 140 m)	25	1972–1999	16	3	7,4	S, Q, T II
Brunnen 3 (1975, 67 m)	21	1976–1999	22	4	11,6	Q, T III
Brunnen 4 (1976, 100 m)	22	1976–1999	20	6	11,2	Q, S, T III
Schmitten i. Ts.						
Brunnen Siegfriedstr. (1962, 110 m)	16	1981–1998	25	5,8	10,9	T, Q II
Brunnen Spatzenwiese (1960, 100 m)	15	1982–1998	22	5	11,7	T II/III
Brunnen Krötenbachtal (1961, 100 m)	15	1980–1998	25	6,4	13,8	T III
Brunnen Dillenbergl (1966, 120 m)	17	1982–1998	32	15	26,1	T, G II/III
Oberursel (Ts.)						
Brunnen I (1966, 72 m)	15	1965–1999	10	2	6,1	Q II
Brunnen VI (1983, 100 m)	11	1984–1999	8,7	3	6,0	Q, T II
Brunnen VII (1983, 50 m)	12	1983–1999	6	3	3,8	Q II
Brunnen III (1967, 76 m)	15	1967–1999	18	10	14,3	Q II/III
Brunnen IV (1971/75, 102 m)	15	1971–1999	32	8,5	21,6	Q, S II/III
Hermannsbornstollen (1931, 125 m)	17	1968–1999	22	14	16,6	S, T III
Schmitten-Treisberg, Brunnen (1956, 100 m)	17	1978–1998	31	12	16,7	T II

Grundwasserleiter: Q = Quarzit, S = Sandstein, T = Tonschiefer, G = Grauwacke
WS-Zone: Straße in Wasserschutzzone II, III oder an der Grenze II/III

Analysen: Institut Fresenius GmbH, Taunusstein

* Max. Cl-Wert von 17 mg/l (20. 10. 1981) nicht plausibel und daher nicht berücksichtigt

** Cl-Werte < 1 mg/l im Taunus wenig plausibel

² Der Verfasser dankt den Gemeinden Glashütten (Herrn Eichhorn) und Schmitten i. Ts. (Herrn Ott) sowie den Stadtwerken Oberursel (Ts.) GmbH (Herrn Hanke) für die Zustimmung zur teilweisen Veröffentlichung hydrochemischer Daten und für wertvolle Hinweise.

vorwiegend aus der Atmosphäre aus nassen und trockenen Depositionen und nur untergeordnet aus unterdevonischen Gesteinen. Das Chlorid atmosphärischer Herkunft wird überwiegend in Salzform (insbesondere als NaCl) und nur in geringem Maße in Säureform (HCl) deponiert (Balázs 1991) und durch Verdunstung eines Teils des Niederschlagswassers im Sickerwasser und oberflächennahen Grundwasser im Mittel auf 5–10 mg/l angereichert. In den Jahren 1986 und 1987 wurden in einem Fichtenbestand des Hochtaunus bei Königstein i. Ts. als Gesamtdepositionsrate 5,3 mg Cl/(m²·d) (19,3 kg/(ha·a)) ermittelt, wobei 76 % auf die Trockendeposition entfielen und im Niederschlagswasser von Freiflächen die jährlichen Mittelwerte der Cl-Konzentrationen 0,73 mg/l (1986), 0,47 mg/l (1987) und 0,81 mg/l (1. Hj. 1988) betragen (Georgii & Grosch 1989). Untersuchungen von 1984–1997 ergaben für die Messstation Königstein i. Ts. einen Chlorideintrag durch Freilandniederschläge (nasse und trockene Deposition) von 4,85–20,63 kg/(ha·a), Mittel 10,82 kg/(ha·a), und durch Bestandesniederschläge der Fichte von 12,06–37,44 kg/(ha·a), Mittel 23,76 kg/(ha·a), mit fallendem Trend (Balázs 1998). Diese großen Unterschiede im jährlichen atmosphärischen Chlorideintrag spiegeln sich zum Teil auch in den Cl-Konzentrationen des oberflächennahen Grundwassers wider. Unterschiede in den Chloridkonzentrationen des Grundwassers zwischen den Südhängen und Nordhängen des Taunus sind nicht erkennbar.

Örtlich für das Wild ausgelegte Salzlecksteine, Losungen des Wildes sowie Abfälle und Ausscheidungen von Wandern erhöhen in geringem Maße auch die Chloridkonzentrationen. Der Chloridanteil in der täglichen Harnausscheidung (500–2000 g) eines Erwachsenen beträgt in Abhängigkeit von der Ernährung und dem Körpergewicht 4,3–8,5 g (Karlson et al. 1994). Diese geringen biogenen und anthropogenen Einflüsse werden häufig übersehen und auf gesteinsbedingte (lithogene) Ursachen zurückgeführt.

In Grundwässern aus Einzugsgebieten mit Straßen erreichen die Chloridkonzentrationen höhere bis deutlich höhere Werte (Tab. 2). Im Hochtaunus sowie im Taunus und Vortaunus überschreiten die Maximalwerte in der Regel nicht 50 mg/l. Anthropogene, häufig straßenbedingte Erhöhungen der Chloridkonzentrationen wurden zum Teil als geogener Normalbereich bezeichnet und der Beginn anthropogener Beeinflussung in Abhängigkeit vom Gestein erst ab 40–80 mg Cl/l angesehen (Schleyer & Kerndorff 1992). Die auffallend hohe Chloridkonzentration von 71 mg/l im Rohwasser vom Brunnen Hainchen der Stadt Büdingen, Vogelsberg, (Höltling 1991) ist auch nicht repräsentativ für die geogene Beschaffenheit eines Grundwassers aus Tonsteinen und Sandsteinen des Rotliegenden, weil in dieser Analyse der anthropogene Chloridanteil mindestens 50 mg/l beträgt. Diese Konzentrationswerte sind in der Regel Hintergrundge-

halte, also geogene Grundgehalte mit nutzungs- und gebietsbedingten Stoffanteilen anthropogener Herkunft. Vor fast 30 Jahren hat bereits Thews (1972) für den Taunus und das Taunusvorland erkannt, dass die anthropogene Belastung des Grundwassers mit Chloriden bei 15 mg/l beginnt. Diese Untergrenze liegt im Hochtaunus verbreitet schon bei 5 mg Cl/l (Golwer 1978). Nach den hydrogeologischen Erläuterungen zu geologischen Karten GK 25 sind in anderen Gebieten Hessens Chloridkonzentrationen über 15 mg/l in vielen Fällen auch auf anthropogene Belastungsquellen zurückzuführen.

Im Rohwasser der Brunnen I, VI und VII der Stadt Oberursel (Ts.) waren in den vergangenen 15 Jahren nur geringe Chloridkonzentrationen nachweisbar (Tab. 2), obwohl durch die gemeinsame Zone II dieser Brunnen die Landesstraße L 3004 (DTV₁₉₉₅ 5760 Kfz) verläuft. Die am westlichen Talhang im Taunusquarzit stehenden Brunnen sind durch den Haidtränkbach von der am Fuß des östlichen Talhangs verlaufenden Landesstraße getrennt und erhalten gespanntes Wasser vom westlichen Talhang ohne Straßen. Die Ruhewasserspiegel liegen im Bereich der Talauwe des Haidtränkbaches, die Betriebswasserspiegel mehrere Meter darunter. Die Absenkungstrichter der Brunnen erreichen zeitweilig den Haidtränkbach und könnten bei sehr großer Förderleistung den Bach unterfahren. Dann wäre ein Grundwasserzuström vom östlichen Talhang zu den Brunnen möglich. Unter Berücksichtigung dieser besonderen hydrologischen Gegebenheiten wurde die Zone II vorsorglich auch auf die östliche Talseite ausgedehnt. Daher verläuft ein rd. 520 m langer Abschnitt der L 3004 in der Zone II. Mehrjährige Betriebserfahrungen belegen durch die niedrigen Cl-Konzentrationen (2–10 mg/l), dass die über bewachsene Seitenstreifen vorwiegend zur Seitenmulde an der Hangseite abfließenden und im Hangschutt versickernden Straßenabflüsse dem Haidtränkbach zuströmen und die Brunnen nicht erreichen. Nach 15-jährigen Erfahrungen ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Verkehrsunfall mit wassergefährdenden Stoffen dann passiert, wenn die Absenkungstrichter der Brunnen sich bis zur östlichen Talseite ausdehnen, sehr gering. Außerdem besteht die Möglichkeit, bei einem Verkehrsunfall die Brunnen abzuschalten, dadurch die Absenkungstrichter rasch aufzufüllen und das natürliche hydraulische Gefälle zum Haidtränkbach wieder herzustellen. Aus den genannten Gründen ist es vertretbar, auf besondere Schutzmaßnahmen an der L 3004 in der Zone II zu verzichten. Dieses Beispiel unterstreicht die Notwendigkeit der Einzelfallbetrachtung.

In Glashütten verläuft durch die Zone II vom Brunnen 1 die Bundesstraße B 8 (DTV₁₉₉₅ 7649 Kfz) und durch die Zone III der Brunnen 3 und 4 die Landesstraße L 3319 (DTV₁₉₉₅ 3175 Kfz) (Abb. 3). Das Einzugsgebiet von Brunnen 2 ist dagegen frei von Straßen.

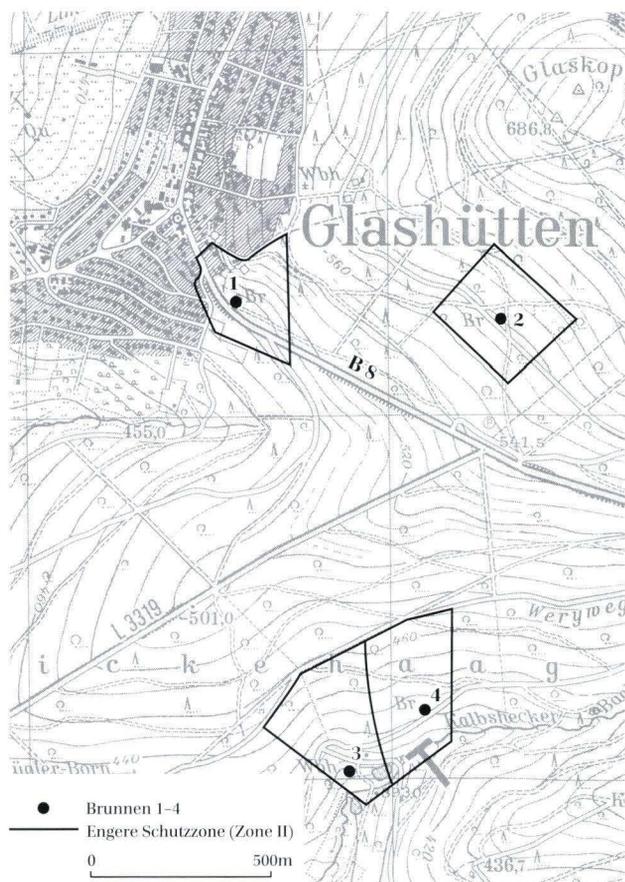


Abb. 3. Straßen in Wasserschutzgebieten der Brunnen 1-4 der Gemeinde Glashütten.

Obwohl die Bundesstraße bis etwa 23 m an den leistungsschwachen (ca. 1,2 l/s), in Sandsteinen, Quarziten und Tonschiefern stehenden Brunnen 1 heranreicht, lagen im Rohwasser in den Jahren 1972-1989 die Werte von Chlorid (16-3 mg/l), Nitrat (6-3 mg/l), Sulfat (6-1 mg/l), der Gesamthärte (1,7-0,7 °dH) und der Oxidierbarkeit (KMnO₄-Verbrauch 2-1 mg/l) in niedrigen Konzentrationsbereichen. Trotz dieser geringen Belastung und einer Grundwasserüberdeckung von mindestens 17 m (Ruhewasserspiegel) wurden 1990 für rd. 1 Mio DM die Seitenbereiche der Straße in der Zone II und bis rd. 50 m darüber hinaus abgedichtet und doppelte Distanzschutzplanken gesetzt. Nach den Abdichtungsmaßnahmen variierten die Cl-Konzentrationen im Rohwasser nur noch von 8,5-5,2 mg/l (Abb. 4). Im gleichen Zeitabschnitt war die Streubreite der Cl-Werte in den Brunnen 3 und 4 deutlich größer, im nicht von Straßenabflüssen beeinflussten Brunnen 2 geringer (Abb. 4). Die im Rohwasser vom Brunnen 2 bestimmten Cl-Konzentrationen von 17 mg/l (20. 10. 1981) und < 1 mg/l (10. 11. 1986) sind nicht plausibel und wahrscheinlich Analysenfehler.

Ähnliche Chloridganglinien in einem niedrigen Konzentrationsbereich zeigen auch andere Brunnen im Hochtaunus. Mit einer jährlich einmal durchgeführten

Rohwasseranalyse wird zwar nicht die jährliche Streubreite der Chloridwerte erfasst, aber in den meisten Fällen ein für das Rohwasser der Wassergewinnungsanlage kennzeichnender Konzentrationswert erhalten. Bei siebenmaliger Beprobung der Brunnen 1-4 der Gemeinde Glashütten vom Juli 1992 bis Oktober 1993 betrug die Streubreite weniger als 5 mg Cl/l (Abb. 4).

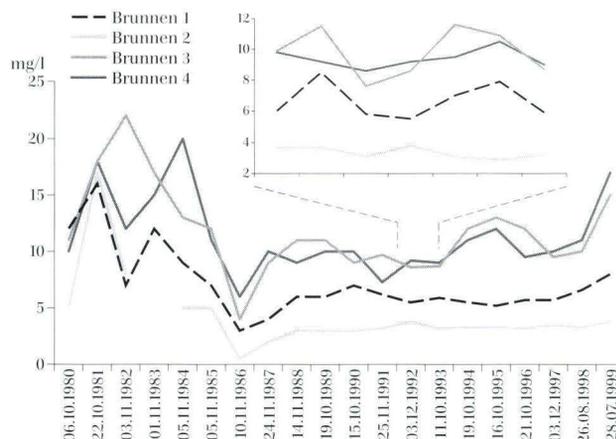


Abb. 4. Chloridkonzentrationen im Rohwasser der Brunnen 1-4 der Gemeinde Glashütten.

Die erhöhten Cl-Konzentrationen im Brunnen Dillenberg (Tab. 2) sind darauf zurückzuführen, dass er in einer SE-NW verlaufenden Störungszone steht, die etwa 250 m südöstlich vom Brunnen am Rand der Zone II die L 3276 (DTV₁₉₉₅ 1578 Kfz) quert und das Chlorid der Tausalze von dort zufließt. Am Brunnen Siegfriedstraße sind die Cl-Werte deutlich geringer, obwohl diese Landesstraße durch die Zone II des Brunnens verläuft (Abb. 2). Das Chlorid dieser Straße, das vom Absenkungstrichter des Brunnens Siegfriedstraße zeitweilig nicht erfasst wird, fließt hangabwärts zur Schürfung Lehmkauf (1983-1994: 29-9 mg Cl/l) oder zum leistungsschwachen (max. 1 l/s) Brunnen Krötenbachtal (Abb. 2).

Im Hochtaunus ist der Einfluss des Straßenverkehrs auf das Grundwasser nur an der Erhöhung der Chloride bis etwa 50 mg/l deutlich nachweisbar. Bei den Ca- und Mg-Konzentrationen dominiert der gesteinsbedingte (lithogene) Einfluss. Die Ca-Werte des Grundwassers aus Tonschiefern betragen 20-45 mg/l (Seelenberg Br. I, Br. Treisberg, Schmitten i. Ts. Br. Spatenwiese), aus Taunusquarziten dagegen nur 2-6 mg/l (Oberursel (Ts.) Br. I, VII). Da weder aus den Gesteinen noch von Straßen oder anderen anthropogenen Belastungsquellen organische Substanzen in nennenswerter Menge in das Grundwasser gelangen, variiert in allen Rohwässern der in Tab. 2 genannten Wassergewinnungsanlagen der Anteil an gelöstem organisch gebundenem Kohlenstoff (DOC) nur zwischen 0,2 und 2,0 mg/l. Von den sechs in der Trinkwasserverordnung genannten und daher untersuchten polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) wurde

im Rohwasser nur Fluoranthen örtlich und zeitweilig im Bereich der Bestimmungsgrenze von 0,000002 mg/l nachgewiesen. Fluoranthen ist von den sechs PAK der Trinkwasserverordnung am leichtesten wasserlöslich, am wenigsten toxisch und kann auch natürlicher Herkunft sein.

Bei den Schwermetallen sind im Grundwasser Konzentrationsunterschiede zwischen Einzugsgebieten mit Straßen und solchen ohne Straßen nicht erkennbar. In den Jahren 1992/93 waren im Hochtaunus die Belastungen der Wässer aus Bächen, Quellen, Brunnen und Stollen mit Schwermetallen insgesamt gesehen gering und zwischen 40 Beprobungspunkten (275 Wasseranalysen) traten keine großen Unterschiede auf, obwohl pH-Werte in Bächen von 4,09–7,32, in Quellwässern von 3,82–7,19, in Stollenwässern von 5,20–6,57 und in Brunnenwässern von 5,28–6,46 sowie Chloridkonzentrationen von 2,7–51,1 mg/l gemessen wurden (Kämmerer 1994). Bei den Cl-Konzentrationen ist zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen in Jahren mit geringer Streuung von Tausalzen durchgeführt wurden (Abb. 1). Die im Einzugsgebiet einiger Beprobungspunkte verlaufenden Landesstraßen und die an sie angrenzenden Geländestreifen mit angeereicherten straßenspezifischen Schwermetallen in Böden haben im Grundwasser nicht zu deutlich erhöhten Metallkonzentrationen geführt.

Untersuchungen (Kämmerer 1994) ergaben, dass in Glashütten in den straßenfernen Brunnen 2, 3 und 4 häufig etwas höhere Schwermetallkonzentrationen auftreten als im straßennahen Brunnen 1, sie aber, von einem auffallend hohen Kupferwert abgesehen, deutlich unter den für Grundwasser geltenden Prüfwerten der LAWA (1994) liegen (Tab. 3).

Die zeitweilig etwas niedrigeren Cadmium- und Nickelkonzentrationen im Rohwasser vom Brunnen 1 im Vergleich zu den Brunnen 2, 3 und 4 sind wahrscheinlich auf die höheren pH-Werte im Sicker- und Rohwasser am Brunnen 1 und möglicherweise auch auf die Abdich-

tungsmaßnahmen in der Zone II zurückzuführen. Die Schwermetallgehalte der Böden sind am Brunnen 1 durch den Straßenabfluss von der B 8 deutlich höher (sandig-schluffiges Sediment vom Straßenrand [Probe vom 21. 3. 1994]: Blei 116 mg/kg, Chrom 146 mg/kg, Kupfer 126 mg/kg, Nickel 80 mg/kg, Zink 964 mg/kg) als am Brunnen 2, in dessen Einzugsgebiet die verkehrsspezifischen Schwermetalle nur über den Luftpfad auf den Boden gelangen.

Im Hochtaunuskreis verlaufen an einigen Stellen nicht nach der RiStWag (1982) ausgebaute Kreis-, Landes- und Bundesstraßen mit einem DTV₁₉₉₅ unter 15 000 Kfz durch die Zone II von Brunnen, die in Kluftgrundwasserleitern stehen. Dazu gehören außerhalb des Hochtaunus Brunnen der Gemeinde Weilrod im OT Winden (Br. ca. 80 m westlich L 3025 mit DTV₁₉₉₅ ca. 2 400 Kfz, Chloride 1966–1995: 6,1–11 mg/l), im OT Hasselbach (Br. ca. 70 m nördlich L 3030 mit DTV₁₉₉₅ 1 670 Kfz, Chloride 1978–1991: 7,1–12,8 mg/l) und im OT Altweilnau (Br. Meerpfuhl 21 m nordwestlich B 275 mit DTV₁₉₉₅ 4 578 Kfz, Chloride 1986–1994: 11–21 mg/l). In den vergangenen 35 Jahren war der Einfluss dieser Straßen auf die Beschaffenheit des gefördert Grundwassers gering und nur an erhöhten Chloridkonzentrationen (in der Regel unter 50 mg/l) erkennbar. Daher sind an diesen Straßen, von Abdichtungen der Straßenseitenbereiche und doppelten Distanzschutzplanken bei Glashütten sowie von einfachen Distanzschutzplanken und der Einrichtung eines Notruftelefons an der B 275 am Brunnen Meerpfuhl bei Altweilnau abgesehen, keine besonderen Schutzmaßnahmen durchgeführt worden. Im Odenwald verläuft seit mehreren Jahrzehnten sogar eine Landesstraße (DTV₁₉₉₅ < 2 000 Kfz) durch den 1983 festgesetzten Fassungsbereich (Zone I) einer Quelle (Quellkammer unterhalb der Fahrbahn), ohne dass dieses Wasser bisher beanstandet wurde³. Diese und andere, nach den geltenden Regelungen nicht zulässigen Fälle zeigen, dass vor allem bei Straßen mit

Tab. 3. Kenngrößen im Rohwasser der Brunnen 1–4 der Gemeinde Glashütten (aus Kämmerer 1994: Wasserproben vom 2. 7., 19. 8. und 28.10. 1992, 17. 2. und 29. 6. 1993)

Kenngröße		Brunnen 1	Brunnen 2	Brunnen 3	Brunnen 4	LAWA-Prüfwerte
Chlorid	[mg/l]	8,5–5,8	3,7–2,9	11,6–7,6	10,5–8,6	30*
pH		6,42–5,85	5,89–5,58	6,32–5,62	5,82–5,28	0,3–1,0*
Blei	[µg/l]	1,60 < 0,5	1,60–0,5	2,9 < 0,5	1,20 < 0,5	40–10
Cadmium	[µg/l]	0,06 < 0,03	0,1 < 0,03	0,07 < 0,03	0,1–0,03	5–1
Chrom	[µg/l]	0,1 < 0,1	0,1 < 0,1	0,3–0,1	0,3–0,1	50–10
Kupfer	[µg/l]	5,5–2,7	8,4–4,5	16,6–5,1	28,5–5,9	50–20
Nickel	[µg/l]	1,0–0,7	1,8–1,4	2,4–1,4	1,7–0,5	50–15
Zink	[µg/l]	30–10	50–20	30–10	30–10	300–100
DOC	[mg/l]	3,2–0,5	1,3–0,5	1,7–0,8	1,1–0,3	4*
Calcium	[mg/l]	3,8–2,6	2,9–2,3	8,2–6,1	4,3–3,1	20*

* Mindeständerungen im Vergleich zum Oberstrom (Differenzwert)

³ Für diese Angaben und wertvolle Hinweise dankt der Verfasser Herrn Dr. W. Pöschl, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden.

einem DTV unter 15 000 Kfz die straßenbedingten Belastungen für das Grundwasser entgegen den häufig geäußerten Befürchtungen immer noch im tolerierbaren Bereich liegen.

Im Hochtaunuskreis wurden von einem Untersuchungslabor für die im August 1990 aus mehreren Brunnen verschiedener Gemeinden entnommenen Rohwasserproben auffallend hohe Chloridkonzentrationen (31–69 mg/l) angegeben. Nach Plausibilitätsprüfungen haben sich diese Konzentrationen als Analysen- oder Schreibfehler herausgestellt. Bei der Bewertung einzelner Wasserinhaltsstoffe werden solche Fehlerquellen zum Teil übersehen.

3.2 Untermaingebiet

Im Untermaingebiet bieten vor allem der Frankfurter Stadtwald und die angrenzenden Waldgebiete günstige Voraussetzungen für Angaben über die Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit durch versickernde Straßenabflüsse, weil hier andere Belastungsquellen mit straßentypischen Stoffen fehlen oder ihre Auswirkungen örtlich begrenzt sind. Diese Waldgebiete werden von den

sehr stark befahrenen Bundesautobahnen A 3 (DTV_{1995max.} 125 560 Kfz) und A 5 (DTV_{1995max.} 148 041 Kfz) sowie von den Bundesstraßen B 43 (DTV_{1995max.} 65 153 Kfz) und B 44 (DTV_{1995max.} 21 610 Kfz) durchzogen (Abb. 5). Die Straßenabflüsse versickern seit mehr als 25 Jahren breitflächig im Straßenrandbereich oder gesammelt in Erdbecken in den Zonen III A und III B großer Wasserwerke der Stadt Frankfurt am Main.

Im Frankfurter Stadtwald besteht der Untergrund aus rd. 20–40 m mächtigen, kalkfreien, gut durchlässigen pleistozänen Sanden mit eingeschalteten kiesigen Sanden und sandigen Kiesen und darunter, verbreitet durch eine tonige Schlufflage getrennt, aus rd. 60–140 m mächtigen, ebenfalls kalkfreien pliozänen Sanden. Im Bereich der genannten Straßen betragen die natürlichen Grundwasserflurabstände etwa 10–20 m und die Fließ-(Abstands-)geschwindigkeiten des Grundwassers außerhalb der Absenkungstrichter der Brunnen der Frankfurter Stadtwaldwasserwerke Hinkelstein, Schwanheim, Goldstein und Oberforsthaus etwa 0,5–1 m/d.

In den ältesten chemischen Wasseranalysen der Wasserwerke Hinkelstein (1896) und Oberforsthaus (1889) betragen die Chloridkonzentrationen ca. 6 mg/l. Diese geringen Werte von 5–10 mg Cl/l treten auch heute noch

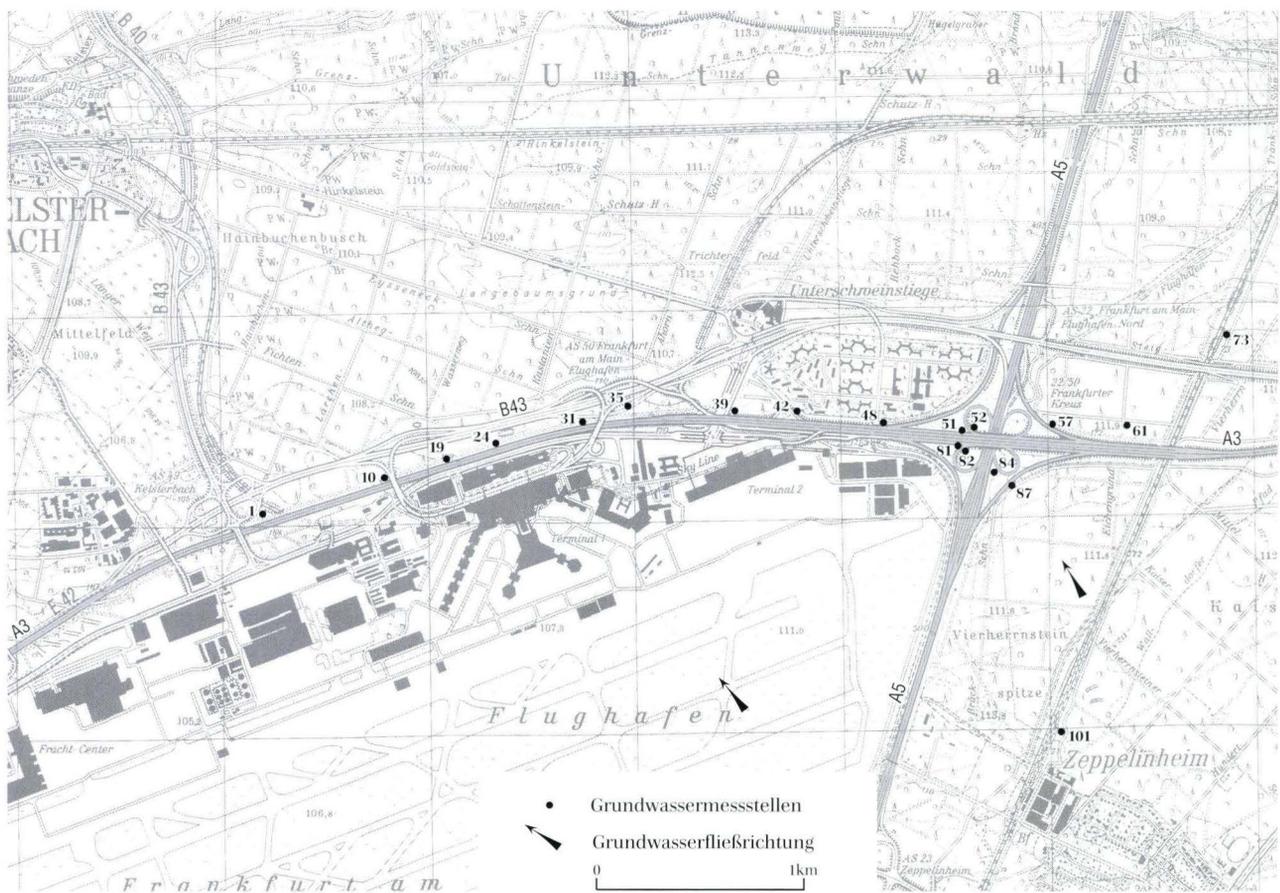


Abb. 5. Straßen im westlichen Frankfurter Stadtwald.

im westlichen, von Straßen nicht beeinflussten Teil des Frankfurter Flughafens auf. Cl-Werte von nur 2–3 mg/l im Grundwasser einer Messstelle führten zur Entdeckung einer benachbarten, illegal mit Kies gefüllten Bohrung, in der von befestigten Flächen abfließendes Niederschlagswasser ohne nennenswerte Verdunstung rasch versickern konnte. Im Bereich der Startbahn 18 West sind die Cl-Werte des Grundwassers von 1982 bis 1991 im Vergleich zum benachbarten Waldgebiet (10–20 mg Cl/l) auf Werte von ca. 5 mg/l abgesunken. Das ist eine Folge der Abholzung und damit ein Wegfall der auskämmenden Wirkung des Waldes.

3.2.1 Versickerung im Straßenrandbereich

Im unmittelbaren Grundwasserunterstrom der sehr stark befahrenen A 3 am Frankfurter Flughafen (DTV₁₉₉₅ 99 291 Kfz) wurden in den im Februar 1994 aus 19 Messstellen (Abb. 5) abgepumpten Grundwasserproben deutlich erhöhte Chloridwerte und örtlich erhöhte Konzentrationen an straßenspezifischen Schwermetallen sowie an gelöstem organisch gebundenem Kohlenstoff (DOC) und Mineralölkohlenwasserstoffen (KW nach H 18) nachgewiesen (Tab. 4).

Bei der Bewertung der in Tab. 4 genannten Kenngrößen ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der Chloride in den Messstellen 1–48 aus den im Flughafengelände auf Straßen verwendeten Tausalzen stammt und die Wasserpro-

ben aus quartären (Q) und aus pliozänen (P) Schichten, also aus unterschiedlichen Tiefen, abgepumpt wurden.

Das von Südosten nach Nordwesten fließende Grundwasser erreicht das Frankfurter Kreuz mit geringen Chloridkonzentrationen von 14 mg/l (GM 87). Durch die Tausalze der südöstlichen Verbindungsrampe steigen die Cl-Werte im oberen quartären Grundwasserleiter auf 17 mg/l (GM 84) und durch die der A 5 auf 177 mg/l (GM 82). Im unteren pliozänen Grundwasserleiter wurden nur 21 mg Cl/l (GM 81) bestimmt. Nördlich der A 3 steigen auch im pliozänen Grundwasserleiter die Cl-Werte auf 31 mg/l (GM 52) an und erreichen im Mischwasser aus dem oberen und unteren Grundwasserleiter 166 mg/l (GM 51). Der erhöhte Cl-Wert von 31 mg/l (GM 101) im Oberstrom des Frankfurter Kreuzes ist auf das Versickern von gelösten Tausalzen und Cl-haltigen Abwässern in Zeppelinheim zurückzuführen. Bis zur A 5 werden diese Chloridkonzentrationen durch versickerndes Niederschlagswasser verdünnt und nordwestlich der A 5 und A 3 durch das Versickern von Straßenabflüssen wieder erhöht.

3.2.2 Versickerbecken

Straßenbedingte Konzentrationsschwankungen der Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen sind in Rohwässern der jährlich nur einmal beprobten Wassergewinnungsanlagen kaum erkennbar. Dazu bieten spezielle Untersu-

Tab. 4. Ausgewählte Kenngrößen im Grundwasserunterstrom der Bundesautobahn A 3¹

GM Nr.	DOC [mg/l]	KW [mg/l]	Chlorid [mg/l]	pH	Arsen [µg/l]	Blei [µg/l]	Nickel [µg/l]	Zink [µg/l]
1 Q	2,0	< 0,1	89	6,64	< 1	< 1	< 10	10
10 Q	3,7	< 0,1	112	6,51	1	< 1	16	31
19 Q	2,3	< 0,1	30	6,71	< 1	< 1	< 10	19
24 Q	3,2	< 0,1	79	6,86	< 1	< 1	12	32
31 Q	2,3	< 0,1	97	6,81	< 1	< 1	10	12
35 Q	3,9	< 0,1	203	6,62	< 1	< 1	< 10	19
39 Q	4,6	< 0,1	175	6,34	< 1	< 1	25	25
42 P	3,9	< 0,1	28	6,61	< 1	< 1	< 10	30
48 Q	2,1	< 0,1	72	6,05	< 1	< 1	< 10	20
51 Q/P	2,9	< 0,1	166	6,59	< 1	< 1	19	16
52 P	5,4	< 0,1	31	7,15	< 1	7	15	95
57 Q	2,4	< 0,1	125	6,28	< 1	< 1	14	30
61 Q	2,0	< 0,1	90	6,01	1	< 1	10	29
73 Q	2,1	< 0,1	92	5,84	< 1	< 1	11	21
81 P	8,8	0,3	21	6,79	2	3	20	45
82 Q	2,0	< 0,1	177	6,35	< 1	< 1	< 10	25
84 Q	1,8	0,2	17	6,26	< 1	< 1	< 10	27
87 Q	7,6	0,4	14	7,17	< 1	< 1	200*	110
101 Q	2,5	< 0,1	31	6,23	< 1	< 1	< 10	15

Entnahmetiefe der Wasserproben: Quartär (Q) ca. 13–25 m u. GOK, Pliozen (P) ca. 30–39 m u. GOK.

* Wert nicht plausibel

¹ Auszüge aus dem Gutachten vom 29. 4. 1994 der Ingenieursozietät Prof. Dr. Ing. Katzenbach und Dipl.-Ing. Quick, Frankfurt, Darmstadt, Mannheim, Berlin, für die Deutsche Bahn AG, Neubaustrecke Köln–Rhein/Main.

chungen im Versickerungsbereich der Straßenabflüsse und in dessen unmittelbarem Grundwasserunterstrom mehr Angaben. Unter einem Versickerbecken südlich Frankfurt a. Main in der Zone III B, in das seit Mai 1973 Abflüsse der sehr stark befahrenen A 3 (DTV₁₉₉₅ 125 560 Kfz) und seit 1978 zusätzlich der stark befahrenen B 43 (DTV₁₉₉₅ 36 678 Kfz) eingeleitet werden, lassen sich im oberen, sandig-kiesigen Grundwasserleiter ($k_f = 7\text{--}8 \cdot 10^{-4}$ m/s) die für Straßeneinflüsse typischen jahreszeitlichen Konzentrationsschwankungen einiger Parameter, der Kationenaustausch sowie die geschichtete Ausbreitung der Chloride im Grundwasserunterstrom dieses Beckens deutlich nachweisen. Die langjährigen Untersuchungen an diesem Becken (Golwer & Schneider 1983) haben wesentlich dazu beigetragen, in die Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RiStWag) (1982) bei günstiger Untergrundbeschaffenheit (große Schutzwirkung des Untergrundes) das Versickern von Straßenabflüssen in der Zone III A im Einzelfall in Becken als zulässig einzuführen. Einzelfall: Abstand zur Fassungsanlage > 1 km, Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers < 3 m/d. Das Versickerbecken der A 3 besitzt keine Vorschalteneinrichtungen (Absetzbecken, Leichtflüssigkeitsabscheider) und ist bisher nicht gereinigt worden. Von 1973–1999 variierte als Folge unterschiedlicher Niederschlagshöhen die Grundwasser Oberfläche zwischen ca. 5,20 und 9,0 m unter der Beckensohle, also um ca. 3,80 m.

Die Ganglinie der Cl-Konzentrationen des Grundwassers (Br. 7) unter dem Versickerbecken der A 3 von 1976 bis 1981 (Abb. 6) und in den folgenden Jahren bis 1993 spiegelt weitgehend den Tausalzverbrauch auf Straßen des überörtlichen Verkehrs in Hessen wider.

Große Tausalzmengen führten im Grundwasser zu besonders hohen Cl-Konzentrationen von 1113 mg/l (19. 2. 1979) (Abb. 6) und 2 664 mg/l (20. 3. 1991). Nach dem milden Winter 1989/90 waren dagegen am 2. Mai 1990 unter

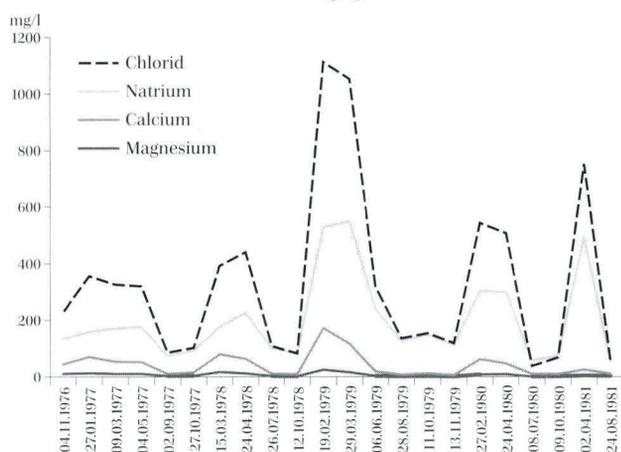


Abb. 6. Konzentrationen von Chlorid, Natrium, Calcium und Magnesium im Grundwasser (Br. 7) unter dem Versickerbecken der A 3 vom 4. 11. 1976 bis 24. 8. 1981.

dem Versickerbecken im Brunnen 5 nur 198 mg Cl/l und im Brunnen 7 nur 78 mg Cl/l nachweisbar. Der Kationenaustausch wird durch die großen Unterschiede in den Massenkonzentrationen von Cl⁻ und Na⁺ im Winter und Frühjahr sowie die geringen Unterschiede dieser Ionen im Sommer und Herbst belegt (Abb. 6). Im Winter führt die Rückhaltung der Na⁺-Ionen zum deutlich höheren Eintrag von Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen in das Grundwasser (Abb. 6). Durch diesen Kationenaustausch verschiebt sich das im Beckenwasser weitgehend ausgeglichene Na⁺/Cl⁻-Äquivalentverhältnis im Grundwasser unter dem Becken zugunsten der Cl⁻-Ionen (am 19. 2. 1979 im Brunnen 7: 23,04 mmol(eq) Na⁺/l und 31,39 mmol(eq) Cl⁻/l).

Die großen jährlichen Konzentrationsschwankungen nehmen im Grundwasser mit zunehmendem Abstand vom Versickerungsbereich der Straßenabflüsse mehr oder weniger rasch ab. Am Versickerbecken der A 3 reicht im Grundwasserunterstrom der hydraulische Einfluß (erhöhtes Gefälle) zeitweilig bis ca. 100 m, der hydrochemische Einfluß (erhöhte Chloridkonzentrationen) über 500 m ab Beckenrand, wobei erhöhte Konzentrationen der straßenspezifischen organischen Substanzen, der anorganischen Spurenstoffe und der meisten anorganischen Hauptbestandteile nur bis etwa 100 m ab Beckenrand nachweisbar sind.

Nach dem Winter 1988/89 mit geringem Tausalzverbrauch war am 10. 4. 1989 unter dem Versickerbecken der A 3 im oberen Grundwasserleiter eine geschichtete Verteilung der Chloride mit hohen Konzentrationen im Brunnen 6 (261–339 mg/l) nachzuweisen (Abb. 7).

Unter den gut durchlässigen Beckenrändern trat dagegen durch das Versickern von chloridarmem Beckenwasser im Grundwasser im April ein Rückgang der Chloridkonzentrationen (Br. 7: 50–51 mg/l; Br. 5: 74–122 mg/l) und im Grundwasserunterstrom (Br. 4: 20–384 mg/l) eine deutliche Übersichtung des chloridhaltigen Grundwassers durch das Versickern von chloridarmem Niederschlagswasser auf (Abb. 7). Am 21. 12. 1989 war von dem Tausalz des Winters 1988/89 durch Verdünnung mit chloridarmem Sickerwasser aus Niederschlägen und durch den Zustrom von chloridarmem Grundwasser nur noch im untersten Teil vom Brunnen 4 ein Cl-Anteil von max. 245 mg/l nachweisbar, während unter dem Versickerbecken geringere Cl-Konzentrationen auftraten (Br. 7: 103–149 mg/l; Br. 6: 97–144 mg/l; Br. 5: 19–51 mg/l), wobei die erhöhten Cl-Werte im Brunnen 7 bereits vom Tausalz stammen, das Ende November bis Anfang Dezember 1989, also kurz vor der Probenahme, gestreut wurde. Das Chloridmaximum des Winters 1988/89 ist bis Dezember 1989 zum rd. 145 m vom Rand des Versickerbeckens entfernten Brunnen 3 gewandert und trat dort unter der etwa 10 m mächtigen, chloridarmen (31–34 mg Cl/l) Grundwasserschicht etwa 12–14 m unter dem Grundwasserspiegel mit max. 287 mg Cl/l in Erscheinung.

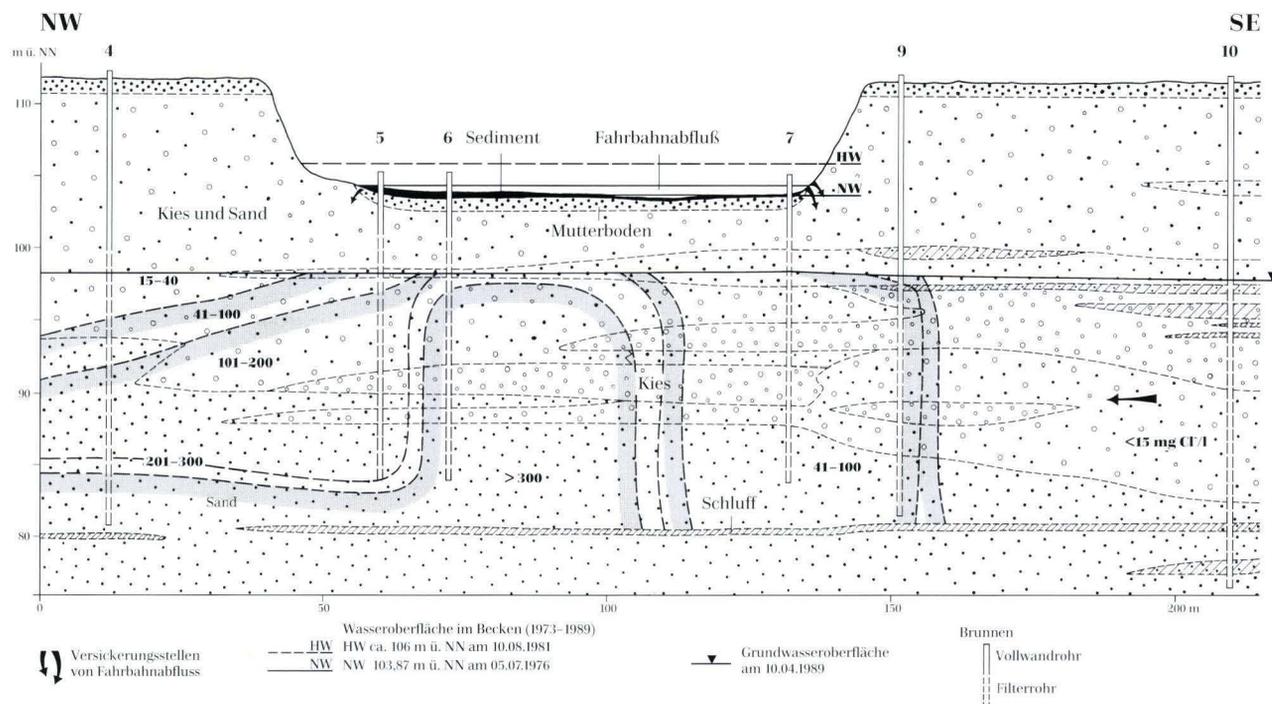


Abb. 7. Verteilung der Chloride unter dem Versickerbecken der A 3 am 10. 4. 1989.

nung. Nach dem Winter 1990/91 mit großem Tausalzverbrauch (Abb. 1) wurden die höchsten Chloridkonzentrationen am 20. 2. 1991 im Beckenwasser (3175 mg/l) und am 20. 3. 1991 im Grundwasser durch eine geschichtete Probenahme im Brunnen 7 (2323–2664 mg/l) bestimmt. Am 17. 4. 1991 waren in einer 5 m unter dem Grundwasserspiegel gepumpten Wasserprobe aus dem Brunnen 7 immer noch 1241 mg Cl/l nachweisbar, die bis zum 22. 10. 1991 auf 62 mg Cl/l verdünnt wurden.

Bei der Bewertung hydrochemischer Analysen ist zu berücksichtigen, dass die durch unterschiedliche Dichten bedingte und durch Konvektion verursachte geschichtete Verteilung von Wasserinhaltsstoffen im Grundwasserleiter auch beim kurzzeitigen Abpumpen mit geringer Leistung ($< 1,5$ l/s) nicht nennenswert verändert wird. Daher liefern die Entnahmetiefe der Wasserprobe und die Pumpleistung wichtige Informationen für die Interpretation hydrochemischer Analysen.

An einigen Untersuchungsstellen besteht der Verdacht, dass zu flache Brunnen den unteren Teil der hydrochemischen Schichtung nicht erreichen. Im Untersuchungsgebiet Lochham an der BAB I2A bei München-Pasing deutet der steile Abfall der Cl-Konzentrationen darauf hin, dass die über der Grundwassersole endenden Messstellen (Pegel) 43–47 (Dauschek 1978, Bild 7) die chloridhaltigsten Grundwässer nicht erfasst haben. In einem anderen Fall werden im Untermaingebiet Abflüsse einer stark befahrenen Autobahn (DTV₁₉₉₅ 63608 Kfz) in der Zone III B direkt in das aufgedeckte Grundwasser von zwei ehemaligen Sandgruben eingeleitet. Die

zeitweilig stark chloridhaltigen Abflüsse und die partikulären Stoffe sinken zur Grubensohle ab und breiten sich dort aus. Die Feststoffe bilden ein mit straßentypischen Stoffen angereichertes Sediment. Probenahmen im Herbst an der Wasseroberfläche täuschten aufgrund der Chlorid-, CSB- und Schwermetallkonzentrationen eine Gewässerbelastung vor, die zur Einstufung in eine niedrige Dringlichkeit für Schutzmaßnahmen führte.

In der am 12. 10. 1999 aus dem Versickerbecken der A 3 geschöpften Wasserprobe wurde im Institut Fresenius GmbH, Taunusstein, in Anlehnung an DIN 38407, Teil 9, mittels Headspace-Gaschromatographie mit Flammenionisationsdetektor (GC-FID) Methyltertiärbutylether (MTBE) nicht nachgewiesen (Bestimmungsgrenze 20 µg/l, über das Aufstockverfahren ermittelt). Das Analyseergebnis deutet darauf hin, dass diese organische Spurenspezies beim Straßenverkehr nicht in nennenswerten Mengen anfällt und daher das Grundwasser nicht belastet. Grundwasserbelastungen mit MTBE sind dagegen von Benzinschadensfällen beschrieben worden (Schirmer 1999) und möglicherweise auch unter Tankstellen nachweisbar.

Nach ICP-MS Analysen zeigen folgende anorganische Spurenstoffe im Beckenwasser (am Br. 6) und im Grundwasser unter dem Versickerbecken der A 3 (Br. 5) und zum Teil auch im Unterstrom (Br. 4) im Vergleich zum Grundwasser oberstrom (Br. 10) deutliche Konzentrationserhöhungen: Antimon, Arsen, Blei, Bor, Cadmium, Cäsium, Chrom, Gallium, Germanium, Kupfer, Mangan, Molybdän, Niobium, Rubidium, Tantal, Tellur, Thorium,

Titan, Vanadium, Wolfram, Zink und Zirkonium (Tab. 5). Bei Barium, Brom, Lithium, Scandium, Strontium, Thallium und Uran tritt dagegen durch das Versickern von Beckenwasser eine Minderung der Konzentrationswerte ein (Tab. 5), weil bei diesen Stoffen der gesteinsbedingte (lithogene) Anteil höher ist als der anthropogene Anteil vom Straßenabfluss. Verglichen mit früheren Untersuchungen (Golwer & Schneider 1983) sind durch die 1995/96 angewandte Analysenmethode mit niedrigeren

Nachweisgrenzen Antimon, Beryllium, Cadmium, Quecksilber, Selen, Silber und Thallium im Nannogrammbe- reich auch im Grundwasser nachweisbar und außerdem wurden 20 Spurenstoffe zusätzlich erfasst.

Die unterschiedlichen Konzentrationen zwischen den beiden Beprobungstagen sind schwierig zu interpretieren, weil Untersuchungen mit vergleichbaren Analysemethoden über die natürlichen Streubereiche dieser Spurenstoffe in sandig-kiesigen Porengrundwasserleitern

Tab. 5. Anorganische Spurenstoffe [$\mu\text{g/l}$] im Beckenwasser und Grundwasser am Versickerbecken der A 3

Spurenstoff	Brunnen 10		Versickerbecken		Brunnen 5	Brunnen 4	
	4.9.95	29.10.96	4.9.95	29.10.96	4.9.95	4.9.95	29.10.96
Silber (Ag)	< 0,001	0,001	< 0,001	0,95	0,001	< 0,001	< 0,001
Arsen (As)	0,13	0,30	0,22	0,54	0,71	0,58	0,46
Gold (Au)		< 0,002		< 0,002			< 0,002
Bor (B)	2,03	7,43	19,3	30,7	43,5	24,4	24,1
Barium (Ba)	77,0	82,4	28,3	26,5	22,1	21,0	50,7
Beryllium (Be)	0,043	0,041	0,016	0,022	0,069	0,044	0,058
Bismut (Bi)	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,001	0,003
Brom (Br)	71,8	85,9	8,03	17,1	14,4	21,5	24,9
Cadmium (Cd)	0,018	0,024	0,076	0,30	0,003	0,007	0,084
Cobalt (Co)	0,26	0,15	0,017	0,16	0,17	0,25	0,52
Chrom (Cr)	< 0,010	0,60	0,20	2,42	0,64	0,24	2,10
Cäsium (Cs)	0,008	0,009	0,055	10,2	0,070	0,016	0,050
Kupfer (Cu)	4,36	1,89	12,4	17,9	7,47	6,36	2,75
Gallium (Ga)	0,001	0,008	0,007	0,027	0,14	0,025	0,12
Germanium (Ge)	0,004	0,006	0,023	0,013	0,034	0,003	0,011
Hafnium (Hf)	0,003	< 0,002	0,011	0,007	0,029	0,006	0,018
Quecksilber (Hg)	< 0,005	0,009	< 0,005	0,096	< 0,005	< 0,005	0,022
Indium (In)	0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	0,001	0,001	< 0,001
Jod (I)	1,72	1,39	0,54	0,85	2,49	0,66	1,9
Lithium (Li)	3,97	4,56	2,40	3,54	1,91	2,93	5,18
Mangan (Mn)	< 2,0	1,31	< 2,0	21,0	< 2,0	< 2,0	2,90
Molybdän (Mo)	0,053	0,053	0,98	1,32	0,12	0,084	0,076
Niobium (Nb)	< 0,002	0,015	0,007	0,050	0,20	0,013	0,14
Nickel (Ni)	5,33	2,79	1,43	3,88	1,49	1,69	2,32
Blei (Pb)	0,037	0,054	0,62	0,43	0,35	0,15	0,29
Platin (Pt)		< 0,002		0,002			< 0,002
Rubidium (Rb)	0,70	0,79	2,47	2,36	1,21	0,53	1,35
Antimon (Sb)	0,022	0,034	2,06	3,87	0,45	0,031	0,046
Scandium (Sc)	1,72	2,03	0,24	0,34	1,23	1,28	1,83
Selen (Se)	0,18	0,47	< 0,01	0,10	0,17	0,23	1,04
Zinn (Sn)	< 0,005	0,002	< 0,005	0,16	< 0,005	< 0,005	0,032
Strontium (Sr)	121	122	53,9	51,9	52,1	19,4	53,7
Tantal (Ta)	< 0,001	0,010	0,004	0,015	0,014	0,002	0,024
Tellur (Te)	< 0,001	< 0,001	0,002	0,010	0,006	0,005	0,001
Thorium (Th)	0,003	0,007	0,004	0,019	0,064	0,015	0,074
Titan (Ti)	0,86	1,70	0,36	3,08	11,3	2,96	12,4
Thallium (Tl)	0,019	0,014	0,004	0,015	0,007	0,002	0,008
Uran (U)	0,048	0,018	0,004	0,007	0,036	0,014	0,018
Vanadium (V)	0,056	0,26	0,17	1,17	1,51	0,61	1,30
Wolfram (W)	0,038	0,11	0,024	0,34	0,68	0,39	0,54
Yttrium (Y)	0,21	0,10	0,013	0,042	0,43	0,073	0,16
Zink (Zn)	6,07	9,20	76,3	196	4,87	6,82	8,32
Zirkonium (Zr)	0,009	0,022	0,029	0,28	0,78	0,11	0,61

Analytik: ICP-MS Analysen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

nicht zur Verfügung stehen. Einzelne hohe Konzentrationen von Silber, Cäsium, Quecksilber und Mangan im Beckenwasser (Tab. 5) sind nicht repräsentativ für die gelöste Phase dieser Stoffe.

Von den Seltenen Erden, metallische Elemente mit den Ordnungszahlen 57 bis 71, sind Lanthan und Cer als straßenspezifische Spurenstoffe einzustufen (Tab. 6). Cer dient in Katalysatoren als Promotor und wird mit einem

Ce/Pt Verhältnis von ca. 20–100 verarbeitet (Domesle 1997). Seltene Erden kommen in geringen Konzentrationen in fast allen Mineralen vor und sind daher bei empfindlichen Analysenmethoden in allen Grundwässern im ein- bis zweistelligen Nannogrammbereich nachweisbar (Tab. 6). Über das hydrochemische Verhalten der Seltenen Erden und ihre ökologische Bedeutung ist bisher wenig bekannt.

Tab. 6. Seltene Erden [$\mu\text{g/l}$] im Beckenwasser und Grundwasser am Versickerbecken der A 3

Seltene Erden	Brunnen 10		Versickerbecken		Brunnen 5		Brunnen 4	
	4.9.95	29.10.96	4.9.95	29.10.96	4.9.95	4.9.95	29.10.96	
Lanthan (La)	0,021	0,023	0,009	1,82	0,15	0,063	0,16	
Cer (Ce)	0,019	0,075	0,013	0,077	0,81	0,098	0,58	
Praseodym (Pr)		0,008		0,010			0,060	
Neodym (Nd)		0,027		0,043			0,14	
Samarium (Sm)		0,008		0,008			0,042	
Europium (Eu)		0,005		0,002			0,008	
Gadolinium (Gd)		0,009		0,007			0,038	
Terbium (Tb)		0,001		0,001			0,006	
Dysprosium (Dy)		0,008		0,008			0,036	
Holmium (Ho)		0,002		0,002			0,007	
Erbium (Er)		0,009		0,006			0,020	
Thulium (Tm)		0,001		< 0,001			0,002	
Ytterbium (Yb)		0,011		0,005			0,055	
Lutetium (Lu)		0,002		< 0,001			0,005	

Analytik: ICP-MS Analysen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

4. Schlussfolgerungen

Die von Straßen ausgehenden Emissionen erhöhen im Grundwasser unter dem Versickerungsbereich der Abflüsse stark befahrener Straßen nicht nur die Konzentrationen mehrerer anorganischer Hauptbestandteile und organischer Substanzen, sondern auch die Konzentrationen zahlreicher anorganischer Spurenstoffe im Nanno- bis Mikrogrammbereich.

Im Taunus und Untermaingebiet besteht in Bereichen ohne Einfluss von Salzwasser aus dem tieferen Untergrund der natürliche Chloridanteil des Grundwassers aus Chloriden vorwiegend atmogener und nur untergeordnet lithogener Herkunft. Die ursprünglich in den marinen und brackigen Sedimenten vorhandenen Chloride sind in den vergangenen Jahrtausenden aus dem oberflächennahen Bereich durch Sicker- und Grundwasser herausgelöst worden. In diesen Gebieten beginnt die anthropogene Chloridbelastung des Grundwassers in Abhängigkeit vom atmogenen Chlorideintrag zwischen 5 und 15 mg Cl/l.

Das Chlorid, der wichtigste straßenspezifische Indikatorparameter, der aber nur von geringer toxikologischer Bedeutung ist, sowie Natrium, Calcium, Magnesium, Borat und DOC werden in Hessen durch routinemäßige,

seit 1991 jährlich einmal durchzuführende Rohwasseranalysen erfasst. Diese Analysen bieten in Verbindung mit Analysen nach der Trinkwasserverordnung vom 5. Dezember 1990 in den meisten Fällen einen ausreichenden Überblick über den Einfluss von versickerten Straßenabflüssen auf das Grundwasser. Umfangreichere Untersuchungen sind in der Regel nur in begründeten Einzelfällen, z. B. nach Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen, gezielt auf bestimmte Stoffe, meistens organische Substanzen, oder bei Forschungsprogrammen mit besonderer Fragestellung notwendig. Auch die überarbeitete, am 25.12.1998 in Kraft getretene EG-Trinkwasserrichtlinie (Castell-Exner 1999) enthält die wichtigsten straßenspezifischen Kenngrößen.

Die Konzentration der straßenbedingten Chloride wird überwiegend im Grundwasserleiter vermindert. Bei anderen straßenspezifischen Wasserinhaltsstoffen ist aus Rohwasseranalysen häufig nicht abzuleiten, ob die während der Untergrundpassage ablaufenden Konzentrationsänderungen vorwiegend in der Grundwasserüberdeckung oder erst im Grundwasserleiter erfolgen. Grundwasserüberdeckung und Grundwasserleiter sind zwei Stufen eines natürlichen Rückhalte-, Umwand-

lungs- und Verdünnungssystem. Eine vollständige Bewertung des Untergrundes im Hinblick auf seine Schutzwirkung gegen Straßeneinflüsse sollte daher nicht nur die Grundwasserüberdeckung, vor allem die Mächtigkeit und Beschaffenheit des Sickerraums, sondern auch den Grundwasserleiter berücksichtigen, insbesondere seine Mächtigkeit und Beschaffenheit sowie die Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers.

Nach Langzeituntersuchungen an zahlreichen Stellen ist bei straßenbedingten Chloridkonzentrationen unter 50 mg/l der Straßeneinfluss auf die Grundwasserbeschaffenheit in der Regel so gering, dass andere straßenspezifische anorganische und organische Stoffe keine eindeutig interpretierbaren Auffälligkeiten zeigen, sondern im natürlichen Streubereich variieren. Die Befürchtung, dass im Grundwasser trotz niedriger straßenbedingter Chloridwerte andere straßenspezifische Stoffe in erhöhten, toxikologisch bedenklichen Konzentrationen auftreten könnten, lässt sich nicht bestätigen. Daher sind zur Erkennung und Überwachung der Straßeneinflüsse auf das Grundwasser erst bei straßenbedingten Chloridkonzentrationen über 50 mg/l Analysen mit einem größeren Parameterumfang, z. B. nach LAWA (1994), notwendig. Bei der Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit sollte auch der untere Teil des Grundwasserleiters erfasst werden, weil sich dort chloridhaltige Straßenabflüsse bevorzugt ausbreiten.

Bei der Bewertung auffallend hoher oder niedriger Konzentrationen einzelner Stoffe ist auch auf Fehler bei der Probenahme, Probenbehandlung und der Analyse zu prüfen. Ein Handlungsbedarf ergibt sich erst nach der Bestätigung der zunächst nicht plausibel erscheinenden Konzentrationen durch Wiederholungsanalysen. Die Annahme, bei niedrigen Konzentrationen straßenspezifischer Stoffe im Grundwasser sei die Grenzziehung von Schutzzonen anzuzweifeln, ist meistens auf ungenügende Ortskenntnisse zurückzuführen.

Das breitflächige Versickern der Niederschlagsabflüsse von wenig befahrenen Straßen (DTV unter 2000 Kfz) durch bewachsene Böden führt in den meisten Fällen nur zu geringen Änderungen der Stoffkonzentrationen im Grundwasser, die in der Regel unter den Prüfwerten der LAWA (1994) liegen. Das langjährige Nebeneinander von Straßen und Wassergewinnungsanlagen im Hochtaunus, Untermaingebiet und anderen Gebieten Hessens zeigt, dass auch das Unfallrisiko gering ist. Daher ist die aus der Empfehlung des DVGW (1995) abgeleitete Forderung, in der Zone II aus Gründen des Grundwasserschutzes keine Straßenabflüsse zu versickern, für Straßen mit einem DTV unter 2000 Kfz bei Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten in den meisten Fällen nicht gerechtfertigt.

Bei Straßen mit einem DTV von 2000–15000 Kfz ist das breitflächige Versickern von Straßenabflüssen durch

bewachsene Böden in einigen Fällen in der Zone II auch tolerierbar, wenn die straßenbedingten Chloridkonzentrationen im Rohwasser unter 50 mg/l liegen und die örtlichen Gegebenheiten (Lage der Straße zur Wassergewinnungsanlage, Damm oder Einschnitt, Schutzwirkung des Untergrundes) sowie die möglichen betrieblichen, verkehrstechnischen und verkehrsregelnden Maßnahmen zur Minderung von Unfällen (FGSV 1993) ausreichend berücksichtigt werden.

Die Anreicherung straßenspezifischer Stoffe (z.B. Schwermetalle, PAK) in Böden am Rand der Verkehrsflächen kann vor allem in der Zone II durch Entfernen des belasteten Bodenmaterials für das Grundwasser in tolerierbaren Konzentrationen gehalten werden. Diese Maßnahme trägt auch dazu bei, im Seitenbereich der Straßen die Funktionen des Bodens als Filter, Puffer und Transformator weitgehend zu erhalten.

Straßen im Grenzbereich der ermittelten 50-Tage-Linie, also an der Grenze Zone II/III, vorsorglich immer in die Zone II einzustufen, ist nach hydrogeologischen Erfahrungen, vor allem bei Straßen mit einem DTV unter 15000 Kfz, in der Regel nicht notwendig. Die zu geringe Berücksichtigung der örtlichen hydrogeologischen und verkehrlichen Gegebenheiten kann zu unverhältnismäßig hohen Kosten führen, wenn an bestehenden Straßen aufgrund der nicht nach Verkehrsmengen differenzierten Empfehlungen des DVGW (1995), Straßenabflüsse in der Zone II nicht zu versickern, umfangreiche technische Maßnahmen gefordert werden. Daher ist in vielen Fällen ein höherer Kostenaufwand zur genaueren Ermittlung der 50-Tage-Linie und der Schutzwirkung des Untergrundes gerechtfertigt, wenn dadurch auf kostenintensive Schutzmaßnahmen an Straßen und anderen Belastungsherden verzichtet werden kann.

Erfahrungen und Untersuchungsergebnisse an stark befahrenen Straßen (DTV > 15000 Kfz) werden häufig auf Straßen mit geringer Verkehrsmenge übertragen und dadurch diesen Straßen ein für das Grundwasser überhöhtes Belastungsrisiko zugeordnet. In den vergangenen 30 Jahren an verschiedenen Stellen durchgeführte Untersuchungen über die natürliche Schutzwirkung des Untergrundes (Grundwasserüberdeckung und Grundwasserleiter) bieten in vielen Fällen ausreichend Informationen zur realistischen Einschätzung der von Straßen für das Grundwasser ausgehenden Gefährdungen. In einer Zeit knapp werdender Mittel sollten die natürliche Schutzwirkung des Untergrundes und das von Straßen in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge ausgehende unterschiedliche Belastungspotential mehr als bisher in der Praxis berücksichtigt werden, um die zur Verfügung stehenden Mittel nicht für wünschenswerte, sondern nur für notwendige Maßnahmen auszugeben.

5. Schriftenverzeichnis

- Balázs, A. (1991): Niederschlagsdeposition in Waldgebieten des Landes Hessen - Ergebnisse von den Mess-Stationen der „Waldökostudie Hessen“. - Forschungsber. Hess. Forstl. Versuchsanstalt, Bd. **11**: 168 S.; Hann. Münden.
- Balázs, A. (1998): 14 Jahre Niederschlagsdeposition in Hessischen Waldgebieten - Ergebnisse von den Messstationen der Waldökostudie Hessen. - Forschungsber. Hess. Landesanstalt für Forsteinrichtung, Waldforschung und Waldökologie, Bd. **25**: 129 S.; Gießen.
- Brod, H. G. (1979): Die Auswirkungen von Auftausalzen auf Boden, Oberflächen- und Grundwasser entlang von Bundesautobahnen. - Diss. Univ. Gießen: 137 S.; Gießen.
- Castell-Exner, C. (1999): Anforderungen an die Trinkwasserqualität in Europa - Revision der EG-Trinkwasserrichtlinie 80/778/EWG. - Grundwasser H. **2**: 76-82; Berlin-Heidelberg (Springer).
- Dauschek, H. (1978): Tausalzstreuung auf Straßen in Wasserschutzgebieten. - gwfwasser/abwasser 119: 348-353; München.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (1995): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete, I. Teil Schutzgebiete für Grundwasser. - DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 101: 23; Bonn.
- Domesle, R. (1997): Katalysatorertechnik. - In: Edelmetall-Emissionen, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH: 8-17.
- Fickel, W. (1977): Erläuterungen zur Bodenkarte von Hessen 1: 25 000, Bl. 5716 Oberreifenberg. - 120 S.; Wiesbaden.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1982): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RiStWag). - 47 S.; Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1993): Hinweise für Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wasserschutzgebieten. - 14 S.; Köln.
- Georgii, H.-W. & Grosch, S. (1989): Schadstoffbelastung in Waldgebieten durch Deposition und Interzeption. - Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz u. Reaktorsicherheit, Luftreinhaltung, Forschungsprojekt 104 02 715, Forschungsbericht Teil A, 164 S.; Univ.-Inst. Meteorologie u. Geophysik; Frankfurt a. M.
- Giesa, S. & Gumprecht, G. (1990): Einfluß des Streusalzes auf die Lebensbedingungen der Gehölze an Außerortsstraßen. - Straße und Autobahn, 5/1990: 204-210; Bonn.
- Golwer, A. (1973): Beeinflussung des Grundwassers durch Straßen. - Z. dt. geol. Ges., **124**: 435-446; Hannover.
- Golwer, A. (1978): Hydrogeologie. - Erl. geol. Kt. Hessen 1: 25 000, Bl. 5716 Oberreifenberg: 53-67; Wiesbaden
- Golwer, A. (1991): Belastung von Böden und Grundwasser durch Verkehrswege. - Forum Städtehygiene, **42**: 266-275; Hannover (Patzer).
- Golwer, A. & Schneider, W. (1983): Untersuchungen über die Belastung des unterirdischen Wassers mit anorganischen toxischen Spurenstoffen. Untersuchungen über die Belastung des Grundwassers mit organischen Stoffen im Bereich von Straßen. - Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, **391**: 47 S.; Bonn-Bad Godesberg.
- Golwer, A. & Zereini, F. (1998): Einflüsse des Straßenverkehrs auf rezente Sedimente - Langzeituntersuchungen an einem Versickerbecken bei Frankfurt am Main. - Geol. Jb. Hessen, **126**: 47-70; Wiesbaden
- Höiting, B. (1991): Geogene Grundwasserbeschaffenheit und ihre regionale Verbreitung in der Bundesrepublik Deutschland. - In: Rosenkranz et al. Handbuch Bodenschutz, KZ 1300, 36 S.; Berlin (Schmidt).
- Kämmerer, D. (1994): Zur Neutralisation saurer Niederschläge in Grundwassersystemen des südlichen Taunus. - DVWK-FE-Vorhaben, Abschlußbericht, 245 S.; Wiesbaden.
- Karlson, P., Doenecke, D. & Koolmann, I. (1994): Kurzes Lehrbuch der Biochemie für Mediziner und Naturwissenschaftler. - 580 S.; Stuttgart (G. Thieme).
- Knoll, E. (Hg.) (1999): Der Elsner - Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. - 1663 S.; Berlin (Otto Elsner Verlagsgesellschaft).
- Lange, G. & Moog, K.-H. (1995): Potentielle Beeinträchtigungen des Grundwassers durch den Verkehr. - DVWK-Materialien 3/1995: 234 S.; Bonn.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1994): Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden. - 19 S.; Stuttgart (Umweltministerium Baden-Württemberg).
- Schirmer, M. (1999): Das Verhalten des Benzinhaltstoffes Methyltertiärbuthylether (MTBE) in Grundwasser. - Grundwasser H. **3**: 95-102; Berlin-Heidelberg (Springer).
- Schleyer, R. & Kerndorff, H. (1992): Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen. - 248 S.; Weinheim (VCH).
- Thews, J.-D. (1972): Zur Typologie der Grundwasserbeschaffenheit im Taunus und Taunusvorland. - Abh. Hess. L.-Amt Bodenforsch., **63**: 42 S.; Wiesbaden.

Manuskript eingegangen am 8.11.1999, angenommen am 22.11.1999

Manfred Horn †



Am 5. März 1999 verstarb am Ende einer Reise nach Israel Manfred Horn in Tel Aviv. Diese letzte Lebensreise hatte ihm noch viele Einblicke in die jüdische Geschichte und Kultur ermöglicht, an denen er seit langem stark interessiert war. Ein erfolgreiches und glückliches Leben ging für uns alle völlig unerwartet und viel zu früh zu Ende. Eine große Trauergemeinde von Kollegen, Freunden und Segelkameraden gab ihm zusammen mit seiner Familie am 12. März an einem sonnigen Vorfrühlingstag das letzte Geleit zum kleinen Friedhof des Idsteiner Stadtteils Dasbach im Taunus, wo er vor 35 Jahren selbst ein Haus gebaut hatte.

Manfred Horn wurde am 24. Februar 1934 in Sensburg auf dem masurischen Landrücken Ostpreußens geboren, wo er die Volksschule und bis Ende 1944 auch noch kurzzeitig das Gymnasium besuchte. Die Kriegswirren verschlugen ihn zunächst nach Neuburg a.d. Donau, wo sein Vater eine Anstellung als Lehrer fand. Dort ging er bis 1949 in die Oberschule. Danach siedelte die Familie

nach Stade in Niedersachsen um. Am dortigen Gymnasium Athenäum legte er 1954 die Reifeprüfung ab. Nach einem Semester in Tübingen begann er im Wintersemester 1954/55 das Studium der Geologie an der Welfischen Landesuniversität Georgia Augusta in Göttingen. Durch seine von Erich Bederke betreute Diplomarbeit „Stratigraphie und Tektonik des Mittleren Buntsandsteins zwischen Bramwald und Solling“ und seine bei Hermann Schmidt 1960 abgeschlossene Dissertation „Die Biostratigraphie der *pseudobilingue*-Zone des untersten Namurs im Sauerland“ wurden wesentliche Schwerpunkte seines kommenden geologischen Arbeitslebens vorgezeichnet.

Am 1. August 1960 trat er in das Hessische Landesamt für Bodenforschung in Wiesbaden ein, wo er im Rahmen der geologischen Landesaufnahme auf Blatt 5423 Großenlüder eine Spezialkartierung durchführte. 1964 wurde er zum Regierungsgeologen, 1971 zum Oberregierungsgeologen, 1986 zum Geologiedirektor und 1995 zum Leitenden Geologiedirektor ernannt. Seit 1986 leitete er das Dezernat „Geologische Landesaufnahme“, ab 1993 bis zu seiner Pensionierung Ende 1997 zusätzlich die Abteilung I „Geowissenschaftliche Landesaufnahme und Landesforschung“.

Manfred Horn widmete sich in seiner über Jahrzehnte dauernden Kartierzeit mit viel Begeisterung und großer Sorgfalt vor allem der Aufnahme der bis dahin „weißen“ Blätter des ehemaligen Fürstentums Waldeck und dessen Nachbarschaft. Mehrere Geologische Karten 1 : 25 000 mit den zugehörigen Erläuterungen belegen eindrucksvoll seine große Kartierleistung und Darstellungsfähigkeit. 1969 legte er zusammen mit seinem Studienkollegen Jens Kulick das Blatt 4720 Waldeck vor. Danach folgten 1971 das Blatt 4721 Naumburg (Geologische Karte gemeinsam mit F. Rösing), 1973 das Blatt 4820 Bad Wildungen (zusammen mit J. Kulick und D. Meischner), 1976 das Blatt 4620 Arolsen und 1982 das Blatt 4520 Warburg. Darüber hinaus war er in erheblichem Maße an der 1983 erschienenen Erläuterung zu Blatt 4521 Liebenau (P. Meiburg) beteiligt. Zu den ergänzten 2. Auflagen der Erläuterungen der unverändert nachgedruckten Blätter 4618 Adorf (1979), 4917 Battenberg (Eder) (1984) und 5017 Biedenkopf (1992) lieferte er u.a. jeweils die „Geologischen Neuerkenntnisse“.

Auf seine lange Zeit als „hessischer“ Kartierer in Gebieten mit vorherrschend mesozoischen (Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper, Jura) und/oder paläozoischen Schichtgliedern (Karbon, Devon) gehen auch viele seiner z.T. umfassenden – meist in Teamarbeit erstellten – wissenschaftlichen Publikationen zurück. Über

Hessen hinaus half er auch in Portugal die Stratigraphie und Paläogeographie oberdevonischer und karbonischer Sedimente zu klären. Dank seines weit gespannten geologischen Wissens war er ein gefragtes Mitglied in mehreren Subkommissionen der stratigraphischen Kommission: Perm/Trias, Devon/Karbon, Silur/Devon und Riphäikum/Silur.

Er war Mitglied in mehreren geowissenschaftlichen Vereinigungen, u.a. auch in der Irischen Paläontologischen Gesellschaft, zu deren Hauptversammlungen er regelmäßig reiste.

Seine Beiträge zu den Chroniken der Stadt Warburg und dem Bad Wildunger Stadtteil Braunau verdeutlichen ebenso wie die Errichtung des „Lapidariums“ auf Schloss Friedrichstein in Bad Wildungen sein großes Interesse und Engagement an und für seine Kartiergebiete. Der Bad Wildunger Altbürgermeister Lückhoff widmete deshalb dem Engagement von Manfred Horn für das Waldecker Land und insbesondere für die Stadt Bad Wildungen einen ehrenden Artikel in der Waldeckischen Landeszeitung.

Ein wenig von dem warmherzigen und mitfühlenden Menschen „Manfred“ lassen seine von ihm verfassten Nachrufe erkennen. Aber nicht nur der Toten gedachte er liebevoll, sondern auch für die lebenden „Gesträndeten der Gesellschaft“ engagierte er sich intensiv. Auch in seiner langjährigen Personalratstätigkeit als Personalratsvorsitzender des HLfB (1985–1992) war er mit Einfühlungs- und Durchsetzungsvermögen für die „anderen“

aktiv. Die sehr persönliche und intensive Betreuung seiner Studenten – u.a. im Rahmen seines Lehrauftrages „Geologie von Hessen“ an der Technischen Universität Darmstadt – entsprach seiner sozialen Persönlichkeit. Vor allem für die jüngeren Kollegen im HLfB war der „Direktor“ als Mentor ein väterlicher Freund, beliebt und respektiert zugleich. Unvergessen ist seine Großzügigkeit, die sich auch in seiner Gastfreundschaft zu Hause widerspiegelte.

Zurück ließ er seine Ehefrau Marianne, geb. Lehmann, die er bereits am Ende seines Studiums geheiratet hatte. Vier Töchter und der Sohn sowie die vier Enkelkinder müssen jetzt ohne ihren geliebten „Baba“ auskommen.

Seine „privat-geologischen“ Reisen nach Portugal, in den Jemen, nach Rußland sowie nach China und Argentinien weiteten ebenso wie seine großen Segeltörns mit seiner selbst gebauten Yacht „Hornisse“ sein von Natur aus offenes Weltbild.

Wir konnten es nicht fassen, als uns Manfred Horn für immer verließ, denn er war auch ein Jahr nach seiner Pensionierung noch in viele unserer geologischen Arbeiten und Diskussionen integriert und ein gern gesehener Freund in unserem Kreise.

Freunde und Kollegen werden „Manfred“ sehr vermissen. Die Geologie Hessens verlor einen ihrer intimsten Kenner.

Karl-Heinz Ehrenberg & Witigo Stengel-Rutkowski

Veröffentlichungen von Manfred Horn

- Horn, M. (1958): Zur Stratigraphie und Tektonik des Mittleren Buntsandsteins zwischen Bramwald und Solling. – Dipl.-Arbeit: 37 S., 9 Abb., 1 Kt.; Göttingen.
- Horn, M. (1960): Die Biostratigraphie der *pseudobilingue*-Zone des unteren Namur im Sauerland. – Diss.: 60 S., 8 Abb., 6 Taf., 2 Prof.; Göttingen.
- Horn, M. (1960): Zur stratigraphischen Gliederung des tieferen Namur: Die Zone des *Eumorphoceras pseudobilingue* im Sauerland. – Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 3/1: 303–342, 6 Abb., 1 Tab., 5 Taf.; Krefeld.
- Horn, M. (1960): Der erste Nachweis von Oberkarbon in der Attendorf-Elsper Doppelmulde des Rheinischen Schiefergebirges. – Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 3/1: 301–302; Krefeld.
- Horn, M. (1962): Ein neues Vorkommen von Zechstein-Konglomerat im Wesertal. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 90: 491–493, 1 Abb., Taf. 35; Wiesbaden.
- Kutscher, F. & Horn, M. (1962): Beiträge zur Sedimentation und Fossilführung des Hunsrückschiefers. I. Ein Fossilvorkommen im Leimbachtal nördlich Bacherach (Unterdevon, Mittelrhein). – Paläontol. Z., Hermann-Schmidt-Fest-Band: 134–139, 2 Taf.; Stuttgart.
- Kutscher, F. & Horn, M. (1963): Fossilien und organogener Detritus im Sediment. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 91: 87–91, 1 Taf.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1965): Zur Stratigraphie des Oberdevons und des älteren Unterkarbons und zur Frage der bretonischen Faltung im nördlichen Kellerwald. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 93: 99–111, 1 Tab.; Wiesbaden.
- Horn, M. & Wendler, R. (1965): Geologie und Nivellement in Nordhessen. Zur Anlage eines Fein-Nivellement-Netzes in Nordhessen im Raume westlich Kassel. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 93: 322–327, 3 Abb.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1967): Detfurth- und Hardeggen-Folge am Naumburger Graben (Nordhessen). – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 95: 64–75, 3 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1968): Die Stratigraphie des höheren Mittleren Buntsandsteins (Detfurth- bis Solling-Folge) im westlichen Nordhessen. – Z. dt. geol. Ges., 117 (1965): 911; Hannover.
- Horn, M. & Wendler, R. (1968): Geophysik als Hilfsmittel geologischer Kartierung. 2. Geologisch-geophysikalische Untersuchungen im Naumburger Graben. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 96: 300–323, 8 Abb., 1 Taf.; Wiesbaden.
- Horn, M. & Kulick, J. (1969): Geol. Kt. Hessen 1: 25 000, Bl. 4720 Waldeck, mit Erläuterungen, 227 S., 35 Abb., 8 Diagr., 15 Tab., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- Dorstewitz, U.- E., Gotthardt, R., Helmkampf, K., Horn, M., Kulick, J. & Paproth, E. (1970): Ber. 120. Hauptversamml. 1968,

- Hagen, Westf.; Exkursion H: Nord- und Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges. 16.–18.9.1968. – Z. dt. geol. Ges. (1968), **120**: 278–282, 1 Abb.; Hannover.
- Horn, M. (1971): Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4721 Naumburg, mit Erläuterungen, 285 S., 29 Abb., 10 Tab., 1 Taf., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- Horn, M., Kulick, J. & Meischner, D. (1973): Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4820 Bad Wildungen, mit Erläuterungen, 386 S., 69 Abb., 20 Tab., 2 Taf., 3 Beibl.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1976): Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4620 Arolsen, mit Erläuterungen, 225 S., 35 Abb., 9 Tab., 1 Taf., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- Bless, M. J. M., Bouckaert, J., Calver, M. A., Dejongie, L., Graulich, J. M., Horn, M., Kimpe, W. F. M., Kullmann, J., Meesen, J. P. M. Th., Naylor, D., Oliveira, J. T., Paproth, E., Paris, F., Perdigao, J. C., Ribeiro, A., Robardet, M., Sanchez de Posado, L. & Truyols, J. (1977): Y a-t-il des hydrocarbures dans le Pré-Permien de l'Europe occidentale? – Serv. géol. Belgique, Prof. Pap., **148**: 1–58, 14 Abb.; Bruxelles.
- Horn, M. (1977): Ralph Wendler †. – Geol. Jb. Hessen, **105**: 261–262, 1 Bild; Wiesbaden.
- Busse, E. & Horn, M. (1978): Neue Fossilfunde im Mittleren Buntsandstein NW-Hessens und ihre Bedeutung für die Paläogeographie. – Geol. Jb. Hessen, **106**: 131–142, 2 Abb., 1 Tab., Taf. 7; Wiesbaden.
- Horn, M. (1979): Vorwort, Geologische Neuerkenntnisse, Bohrungen. – In: Paeckelmann, W. † (1979): Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4618 Adorf, 2. erg. Aufl.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1979): Geologische Übersicht. – Waldecksche Ortssippenbücher, Band 18: Frebershausen, S. 7–9; Arolsen.
- Oliveira, J. T., Horn, M. & Paproth, E. (1979): Preliminary note on the stratigraphy of the Baixo Anlentejo-Flysch Group, Carboniferous of Southern Portugal and on the palaeogeographic development, compared to corresponding units in Northwest Germany. – Communic. Serv. Geol. Portugal, **65**: 151–168, 5 Abb., 3 Tab., 4 Taf.; Lissabon.
- Baumgarte, D., Busse, E. & Horn, M. (1980): Muschelkalk und Lias des Homberger Grabens (Nordhessen). – Geol. Jb. Hessen, **108**: 121–138, 4 Abb.; Wiesbaden.
- Busse, E. & Horn, M. (1981): Fossilführung und Stratigraphie der gelben Basisschichten (Oberer Muschelkalk) im Diemelgebiet. – Geol. Jb. Hessen, **109**: 73–84, 1 Abb.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1982): Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4520 Warburg, mit Erläuterungen, 238 S., 28 Abb., 32 Tab., 1 Taf., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1983): Vorwort, Geographische Übersicht, Prätriassischer Untergrund, Buntsandstein, Subrosionssenken, Erdfälle, Lagerstätten, Exkursionspunkte, Bohrungen. – In: Meiburg, P. (1983): Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4521 Liebenau; Wiesbaden.
- Hoffmann, K. & Horn, M. (1983): Zur Stratigraphie des Lias (Hettangium – Unt. Pliensbachium) im Volkmarsener Graben. – Geol. Jb. Hessen, **111**: 165–202, 3 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1983): Erdgeschichte zum Anschauen. – Naturmagazin „draußen“, **26**, Naturpark Hochtannus: 39–45; Nordenstadt.
- Horn, M. (1984): Vorwort, Geologische Neuerkenntnisse, Exkursionen, Bohrungen. – In: Reich, H. (1984): Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4917 Battenberg, 2. erg. Aufl.; Wiesbaden.
- Horn, M. & Karschny, A. (1985): Erwin Busse †. – Geol. Jb. Hessen, **113**: 320–326; Wiesbaden.
- Horn, M. (1985): Geologie. – In: Schultheis, T. & Wolkers, U. (1985): Führer durch Bad Wildungen und Umgebung: 63–73, 4 Abb., 3 Tab.; Bad Wildungen.
- Horn, M. & Semmel, A. (1985): Zur Genese vermoorter Hohlformen in Nord-Waldeck. – Geol. Jb. Hessen, **113**: 83–96, 8 Abb., 3 Tab.; Wiesbaden.
- Oliveira, J. T., Horn, M., Kullmann, J. & Paproth, E. (1985): The stratigraphy of the Upper Devonian and Carboniferous sediments of South-West Portugal. – C.R. X^e Congr. Stratigr. et Géol. Carbonifère Madrid 1983. – **1**: 107–120, 6 Abb.; Madrid.
- Horn, M. (1986): Geologie und Landschaftsgeschichte. – In: Mürmann, F. (1986): Die Stadt Warburg 1036–1986. Beiträge zur Geschichte einer Stadt: 20–33, 11 Abb., 1 Tab.; Warburg.
- Horn, M. (1987): Muschelkalk. – Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 4925 Sontra: 113–120, 4 Abb.; Wiesbaden.
- Hagdorn, H., Hickethier, H., Horn, M. & Simon, T. (1987): Profile durch den hessischen, unterfränkischen und baden-württembergischen Muschelkalk. – Geol. Jb. Hessen, **115**: 131–160, 2 Abb., 2 Tab., 3 Taf.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1988): Das Lapidarium auf Schloß Friedrichstein in Bad Wildungen. – Gemeinschaft der Freunde Schloß Friedrichstein e. V., Bad Wildungen: 8 S., 5 Abb., 1 Tab.; Bad Wildungen.
- Horn, M. (1989): Fritz Kutscher †. – Geol. Jb. Hessen **117**: 274–292, 1 Bild; Wiesbaden.
- Horn, M. (1989): Die Lebensspur *Spirodesmos* im Unterkarbon des östlichen Rheinischen Schiefergebirges. – Bull. Soc. Belge Géol., **98** (3–4): 385–391, 5 Abb., 1 Tab.; Brüssel.
- Dehmer, J., Hentschel, G., Horn, M., Kubanek, F., Nöltner, T., Rieken, R., Wolf, M. & Zimmerle, W. (1989): Die vulkanisch-kieselige Gesteinsassoziation am Beispiel der unterkarbonischen Kieseliefer am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges. – Petrographie – Geochemie. – Geol. Jb. Hessen, **117**: 79–138, 20 Abb., 10 Tab., 4 Taf.; Wiesbaden.
- Horn, M., Kubanek, F., Nöltner, T. & Zimmerle, W. (1989): Zur Genese der unterkarbonischen Kieseliefer im Rheinischen Schiefergebirge und im Harz. – In: Kurzfassungen, 5. Rundgespräch „Geodynamik des europäischen Variszikums“, Rhenohertzynikum–Moravosilesikum: 29–30; Braunschweig. – Erschienen auch in: Zbl. Geol. Paläont., Teil I, 1990, 4: 364–365; Stuttgart.
- Horn, M., Kuhn, H. & Stoppel, D. (1989): Gibt es Namur im Nordwestharz? – Bull. Soc. Belg. Géol., **98**, 3–4: 393–399, 3 Abb., 1 Taf.; Brüssel.
- Flick, H., Horn, M. & Nesbor, H. D. (1989): Lagenbau eines doleritischen Lagergangs in der nordöstlichen Dill-Mulde. – In: Kurzfassungen, 5. Rundgespräch „Geodynamik des europäischen Variszikums“, Rhenohertzynikum–Moravosilesikum: 19; Braunschweig. – Erschienen auch in: Zbl. Geol. Paläont., Teil I, 1990, 4: 356–357; Stuttgart.
- Horn, M. (1990): Braunaus geologische Besonderheiten. – In: Dietz, R. & Menk, C. (1990): Braunaus, Beiträge zu seiner Geschichte: 107–111, 3 Abb.; Bad Wildungen.
- Horn, M. (1991): Buntsandstein und Muschelkalk am Westrand der Hessischen Senke (Exkursion H am 6. April 1991). – Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F., **73**: 115–176, 5 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- Flick, H., Horn, M., Nesbor, H. D. & Wengert, N. (1991): Eine subvulkanische Magmenkammer des devonischen Vulkanismus (Givet/Adorf-Phase) am Nordwestrand der Dillmulde, Rheinisches Schiefergebirge. – Geol. Jb. Hessen, **119**: 45–76, 18 Abb., 3 Tab.; Wiesbaden.
- Nesbor, H. D., Behnisch, R., Flick, H. & Horn, M. (1991): Vertical development of submarine volcanic Complexes in the Devonian of Mid-European Variscides. – Terra abstracts, **3**(1): 216; Oxford.
- Behnisch, R., Flick, H., Horn, M. & Nesbor, H. D. (1991): Paläogeographische Rekonstruktion submariner Vulkankomplexe im Devon des Lahn-Dill-Gebietes (südliches Rheinisches Schiefergebirge). – Nachr. dt. geol. Ges., **46**: 13; Hannover.
- Behnisch, R., Flick, H., Horn, M. & Nesbor, H. D. (1991): Korngrößenanalysen als Beitrag zur genetischen Interpretation submariner Pyroklastite im Devon der Lahnmulde (Rheinisches Schiefergebirge). – Nachr. dt. Geol. Ges., **46**: 12–13; Hannover.
- Horn, M. (1992): Vorwort, Geologische Neuerkenntnisse, Lagerstätten, Bohrungen. – In: Schmieder, Th. (1992): Erl. Geol. Kt. Hessen 1:25000, Bl. 5017 Biedenkopf, 2. Aufl.; Wiesbaden.
- Hagdorn, H., Horn, M. & Simon, T. (1993): Vorschläge für eine lithostratigraphische

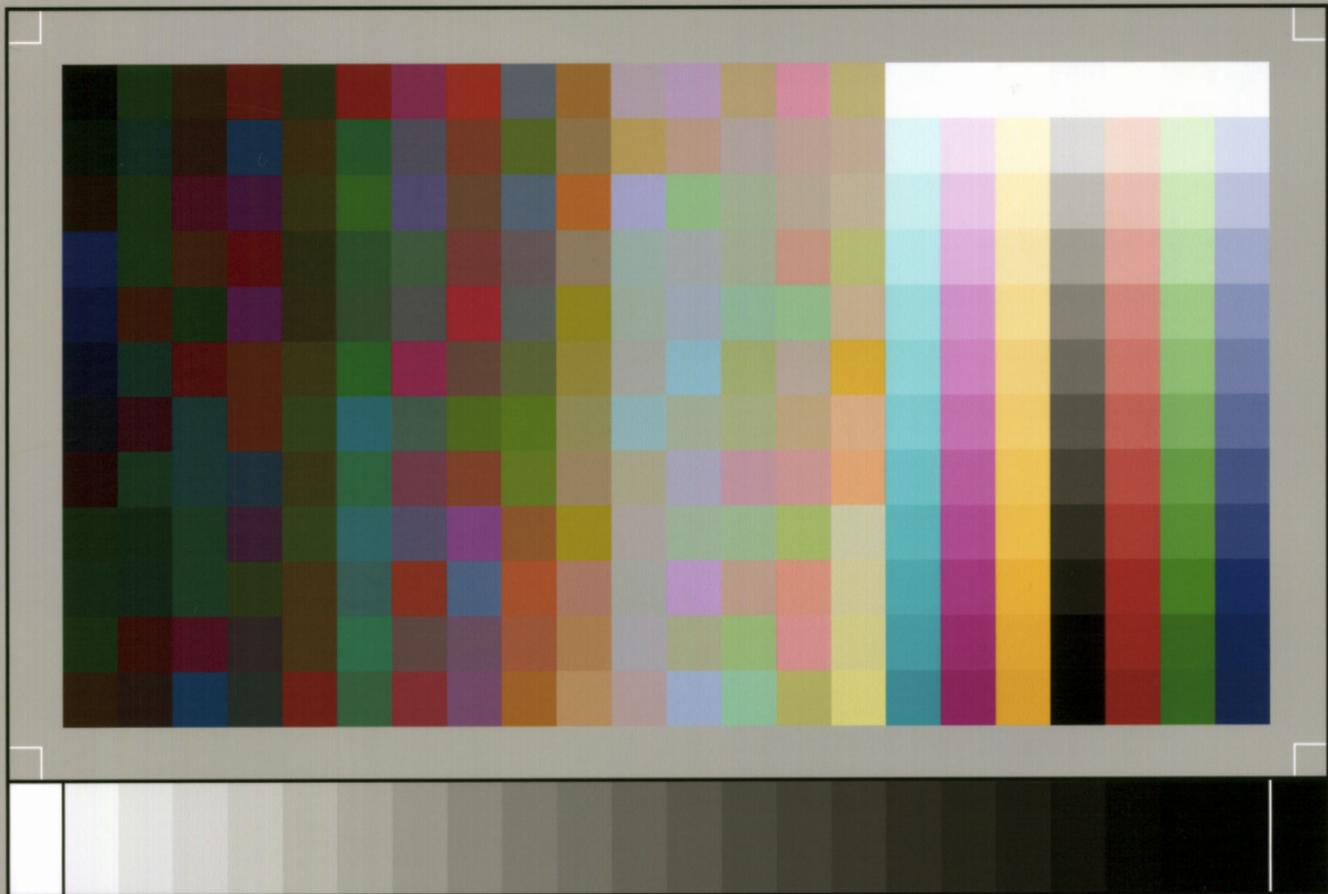
- Gliederung und Nomenklatur des Muschelkalkes in Deutschland. - In: Hagdorn, H. & Seilacher, A. (Hrsg.): Muschelkalk. - Schönthaler Symposium 1991: 39-46; Korbach.
- Horn, M., Kulick, J. & Tietze, K.-W. (1993): Kontinentale klastische Sedimente aus Oberperm und Untertrias am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges. - *Geologica et Palaeontologica*, **27**: 356-377, 14 Abb., 2 Tab.; Marburg.
- Horn, M. & Tietze, K. (1993): Forschungsbohrung Rosenthal 1001 (Hessen). - Tätigkeitsber. Niedersächs. L.-Amt Bodenforsch., 1991/92: 58-64, 4 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- Nesbor, H.-D., Buggisch, W., Flick, H., Horn, M. & Lippert, H.-J. (1993): Vulkanismus im Devon des Rheinoherzynikums. Fazielle und paläogeographische Entwicklung vulkanisch geprägter mariner Becken am Beispiel des Lahn-Dill-Gebietes. - *Geol. Abh. Hessen*, **98**: 3-87, 37 Abb., 8 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.
- Horn, M. (1993): The Triassic in the central part of the mid-European Basin: II, Muschelkalk (abstr.). - In: Lucas, S.G. & Morales, G. (eds.): The nonmarine Triassic. Transactions of the International Symposium and Field Trip on the nonmarine Triassic, 17-24 Oct. 1993, Albuquerque, N.M. - *Bull. New Mexico Mus. Natur. Hist. Sci.*, **3**: 68; Albuquerque, NM.
- Horn, M. (1993): Die Geologie Fürstenbergs. - Waldeckische Ortssippenbücher, Band 45; Fürstenberg, S. 11-15, 1 Abb.; Arolsen.
- Horn, M. (1997): Jens Kulick †. - *Geol. Jb. Hessen*, **125**: 113-116; Wiesbaden.
- Korn, D. & Horn, M. (1997): Subdivision of the basal Early Namurian (Early Carboniferous) in the Rhenish Massif (Germany). - *Newsl. Strat.*, **35** (2): 115-126, 5 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- Horn, M. (1998): Geologische Übersicht. - Waldeckische Ortssippenbücher, Band 62; Gellershausen, S. 9-11; Arolsen.
- Horn, M. (1998): A.G. Werner und J.C.W. Voigt diskutierten am Scheibenberg im Erzgebirge. - *Z. geol. Wiss.*, **26** (1/2): 265-266; Berlin.
- Horn, M. † (in Druckvorbereitung): 4.21. Lindener Mark bei Gießen/Vogelsberg (21) [Andreasteich-Quarzit(-Formation), *henningmoeni*-Quarzit, *grandior*-Quarzit]. - In: Stratigraphische Kommission Deutschlands (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland. Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil 2. - Courier Forschungsinstitut Senckenberg; Frankfurt am Main.
- Horn, M. † (in Druckvorbereitung): Kellerwald. - In: Stratigraphie von Deutschland. Devon. - Courier Forschungsinstitut Senckenberg; Frankfurt am Main.

Seite 131

A. Golwer:
Beeinflussung der Grund-
wasserbeschaffenheit
durch Straßenverkehr in
Wasserschutzgebieten

Seite 149

K.-H. Ehrenberg & W. Sten-
gel-Rutkowski:
Nachruf Manfred Horn



SP050509001

ScanPrint® *autopilot* Scan Target v2.0